

Abschlussbericht
Analyse des Energieverbrauchs und
exemplarische Best-practice-Lösungen für
relevante Verbrauchssektoren in Krankenhäusern

Fraunhofer-Institut für Umwelt-, Sicherheits-
und Energietechnik UMSICHT

Dipl.-Ing. Carsten Beier



Fördernummer DBU – AZ 23472

Oberhausen, Juni 2009

Projektkennblatt
der
Deutschen Bundesstiftung Umwelt



Az	23472	Referat	24/0	Fördersumme	124.947,00 €
Antragstitel	Analyse des Energieverbrauchs und exemplarische „Best-practice“-Lösungen für relevante Verbrauchssektoren in Krankenhäusern				
Stichworte	Energie, Analyse				
Laufzeit	Projektbeginn	Projektende	Projektphase(n)		
3,3 Jahre	01.01.2006	31.03.2009	1		
Zwischenberichte					
Bewilligungsempfänger	Fraunhofer-Institut für Umwelt-, Sicherheits- und Energietechnik (UMSICHT) Osterfelder Str. 3 46047 Oberhausen			Tel	0208/8598-1416
				Fax	0208/8598-1423
				Projektleitung Herr Carsten Beier	
				Bearbeiter	
Kooperationspartner	Marienhospital Bottrop, Knappschaftskrankenhaus Bottrop, Alfried Krupp Krankenhaus Essen, Borromäus-Hospital Leer, Evangelisches und Johanniter Klinikum Duisburg/Dinslaken/Oberhausen, St.-Marien-Hospital Lünen, St.-Johannes-Hospital Dortmund, Kliniken Maria Hilf Mönchengladbach, Prosper-Hospital Recklinghausen, Hans-Susemihl-Krankenhaus Emden, Marien-Hospital Wesel, Kreiskrankenhaus Gummersbach, Johanniter-Krankenhaus Rheinhausen, Neurochirurgisches Zentrum der Universitätskliniken Bonn, Evangelisches Krankenhaus Bergisch Gladbach, St. Vinzenz-Hospital Dinslaken, Ludmillenstift Meppen, Paracelsus-Klinik der Stadt Marl, Evangelisches Krankenhaus Kalk, Luisenhospital Aachen				
Zielsetzung und Anlass des Vorhabens					
Die Anforderungen an die Energieversorgung in Krankenhäusern ändern sich in Folge von Um- und Ausbaumaßnahmen stetig. Weiterhin ist ein hoher Anteil alter sanierungsbedürftiger Anlagen in Betrieb. Bei einem Energieverbrauch deutscher Krankenhäuser (2001) von ca. 4,6 Mio MWh/a an elektrischer Energie sowie ca. 15,36 Mio. MWh/a an thermischer Energie besteht in vielen Krankenhäusern ein großes Energieeinsparpotenzial. Bisherige Versuche, den Energieverbrauch mit geringem Aufwand anhand eines Kennzahlenvergleiches beurteilen zu können, blieben aufgrund der komplexen Versorgungsstruktur der Krankenhäuser ohne Erfolg, da die individuellen Eigenschaften der Einrichtungen unberücksichtigt blieben. Ziel des Projektes ist es, mit Hilfe von Lastgangmessungen den Zusammenhang zwischen dem Energieverbrauch und den individuellen Eigenschaften eines Krankenhauses aufzuzeigen und einen aussagekräftigen Krankenhausvergleich zu entwickeln, der auf Krankenhäuser unterschiedlicher Versorgungsstrukturen und Nutzungsbedingungen angewendet werden kann. Außerdem werden allgemeine Best-Practice-Lösungen erarbeitet und das lohnenswerte Einsparpotenzial in den 20 teilnehmenden Krankenhäusern aufgezeigt.					
Darstellung der Arbeitsschritte und der angewandten Methoden					
In 20 Krankenhäusern mit 300-600 Betten wird eine Bestandsaufnahme durchgeführt. Anschließend wird für eine repräsentative Woche der Energieverbrauch in folgenden energierelevanten Sektoren gemessen: Heizung, Warmwasser, Kühlung, Lüftungsanlage, Lüftungsanlage OP, Aufzüge, zentrale Energiewandlungsanlage. Gleichzeitig werden relevante Einflussgrößen bestimmt (Benutzungsdauer, Größe, Leistung, Flächen etc.). In Zusammenarbeit mit einem Expertenkreis werden für die Beispielkrankenhäuser allgemeine „Best-practice“-Lösungen erarbeitet. Anhand der Differenz zwischen dem individuellen Energieverbrauch und der realen „Best-practice“-Lösung wird in Verbindung mit den individuellen Eigenschaften der Krankenhäuser ein Vergleich durchgeführt und das Einsparpotenzial ermittelt.					
Deutsche Bundesstiftung Umwelt • An der Bornau 2 • 49090 Osnabrück • Tel 0541/9633-0 • Fax 0541/9633-190 • http://www.dbu.de					

Ergebnisse und Diskussion

Die Untersuchungen haben gezeigt, dass in vielen Bereichen der Austausch alter, ineffizienter Anlagen zu einer deutlichen Einsparung führt und wirtschaftlich sinnvoll ist. Doch auch neue Anlagen garantieren keinen optimalen Energieverbrauch, da eine ineffiziente Betriebsweise ebenfalls zu erhöhten Energieverbräuchen führt. Einsparungen durch optimierte Betriebsparameter können jedoch nur erschlossen werden, wenn die entsprechenden Kenngrößen im zeitlichen Verlauf bekannt sind und mit den Anlagenkenndaten in Beziehung gesetzt werden. Mit Hilfe von Lastgangmessungen können ineffiziente Betriebsweisen aufgezeigt werden, so dass mit geringem Aufwand beispielsweise durch Einstellung der Regelung Einsparungen erzielt werden können. Weiterhin konnten mit Hilfe der Messergebnisse Versorgungsengpässe und nicht einwandfreie funktionierende Versorgungsanlagen und Installationen aufgezeigt werden. Weiterhin hat das Projekt gezeigt, dass die Datenlage in den Krankenhäusern für eine Einschätzung und für den Vergleich mit anderen Krankenhäusern nicht ausreichend ist. Nur wenn zum einen die Kenndaten der Energieversorgungsanlagen wie die installierte Leistung und zum anderen die Bezugsgrößen der versorgten Bereiche bekannt sind, kann ein Vergleich durchgeführt werden. Da der Energieverbrauch sehr stark von der Raumnutzung abhängig ist, könnten anhand der nach Nutzungsart unterteilten Flächen Referenzverbrauchswerte ermittelt werden, die es ermöglichen eine Energieverbrauchsstruktur zu ermitteln. Aufgrund der fehlenden Daten ist es den meisten Krankenhäusern eine solche Flächenzuordnung nicht möglich. Ein weiterer Grund sind die fehlenden personellen Ressourcen, so dass, wenn Daten vorhanden sind, keine Zuordnung durchgeführt werden kann. Weiterhin müssen grundlegende Daten über die zu versorgenden Gebäude wie Gebäudealter, Wand-, Fenster-, Dach- und Fundamentflächen ermittelt werden, um eine Abschätzung des Wärme- und Kältebedarfes durchführen zu können. Bisher fast vollständig unbekannt sind die Verbrauchswerte der elektrisch angetriebenen Geräte und Anlagen, die sich u.a. auf den Wärme- und den Kältebedarf auswirken. Derzeit kann allenfalls eine grobe Abschätzung anhand von Literaturwerten durchgeführt werden. Hierzu liegen erste Kenndaten aus der Literatur vor, jedoch besteht noch Bedarf der Validierung und der Bewertung der Übertragbarkeit. Weiterführende Untersuchungen sollten zum Ziel haben, die Datensituation in den Krankenhäusern zu verbessern und eine energetische Auswertung von Raumflächen und Raumnutzung zur Abbildung der Energieverbrauchsstruktur zu automatisieren. Die Untersuchungen müssen auf bisher nicht betrachtete Verbrauchssektoren (Dampf, Licht, medizinische Geräte und Anwendungen) ausgeweitet werden, um den gesamten Energieverbrauch von Krankenhäusern abbilden zu können.

Öffentlichkeitsarbeit und Präsentation

Die Ergebnisse wurden auf mehreren Tagungen (u.a. BUND-Netzwerktreffen „Energiesparendes Krankenhaus“, Krankenhaus-Umwelttage NRW, Klinikkongress) und auf eigenen Veranstaltungen zum Thema (Hospital Engineering, UMSICHT zur Sache „Energieeffiziente Krankenhäuser“) öffentlich präsentiert und diskutiert. Zum Projektabschluss veranstaltete Fraunhofer UMSICHT am 3. September 2009 einen weiteren Workshop (UMSICHT zur Sache „Energieeffizienz in Krankenhäusern III“), auf dem die Projektergebnisse noch einmal zusammenfassend veröffentlicht und die Best-Practice-Lösungen vorgestellt wurden.

Fazit

Auf der Basis der Lastgangmessungen und dem Kennzahlenvergleich können zum einen Einsparpotenziale aufgezeigt, und zum anderen allgemeine Kennwerte zur Bewertung und zur Abschätzung von Energieverbräuchen in Krankenhäusern ermittelt werden. Mit Hilfe eines Boxplot-Vergleichs für die untersuchten Verbrauchssektoren kann gezeigt werden, welche Einflussgrößen für einen erhöhten Energieverbrauch verantwortlich sind. Die zur Bewertung erforderliche Datenbasis sowohl zum Anlagenbetrieb als auch zum Anlagen- und Gebäudebestand liegen vielen Krankenhäusern nicht in nutzbarer Form vor. Die Verwendung von Kennwerten ermöglicht es, Referenzverbrauchswerte zu berechnen und Ursachen für einen erhöhten Energieverbrauch zu erkennen. Anhand von Gebäude- und Flächendaten kann mit Hilfe pauschaler Wärmedurchgangskoeffizienten der Wärmebedarf ermittelt werden. Die Abschätzung der inneren Wärmegewinne durch elektrische Geräte und Anlagen kann mit derzeitiger Datenbasis nur grob abgeschätzt werden. Weiterhin muss die Datenbasis der Krankenhäuser bezüglich der Energieversorgungsanlagen weiter verbessert werden, um kontinuierlich die Effizienz und Sicherheit der Energieversorgung bewerten zu können. Hierzu gehören neben den Bestandsdaten auch Lastgänge, die eine Beurteilung der Energienutzung im zeitlichen Verlauf ermöglichen und eventuelle Fehlfunktionen aufzeigen. Dabei ist zu berücksichtigen, dass die Datenmenge auf das Wesentliche begrenzt wird, um eine Analyse mit vertretbarem Aufwand zu ermöglichen.

Deutsche Bundesstiftung Umwelt £ An der Bornau 2 £ 49090 Osnabrück £ Tel 0541/9633-0 £ Fax 0541/9633-190 £ <http://www.dbu.de>

Inhalt

Inhalt	4
Abbildungsverzeichnis	5
Tabellenverzeichnis	7
Verzeichnis von Begriffen und Definitionen	8
Zusammenfassung	10
1 Projektbeschreibung	11
2 Projektdurchführung und -ergebnisse	13
2.1 Wärmeversorgung	13
2.1.1 Versorgungsstruktur	13
2.1.2 Einflussgrößen und Einsparmaßnahmen	13
2.1.3 Energiemengenmessungen	17
2.1.4 Vergleich und Best-practice-Lösung	22
2.2 Warmwasserversorgung	27
2.2.1 Versorgungsstruktur	27
2.2.2 Einflussgrößen und Einsparmaßnahmen	27
2.2.3 Energiemengenmessungen	28
2.2.4 Vergleich und Best-practice-Lösung	30
2.3 Lüftungsanlagen	31
2.3.1 Versorgungsstruktur	31
2.3.2 Einflussgrößen und Einsparmaßnahmen	32
2.3.3 Energiemengenmessung	34
2.3.4 Vergleich und Best-practice-Lösung	35
2.4 Kälteversorgung	41
2.4.1 Versorgungsstruktur	41
2.4.2 Einflussgrößen und Einsparmaßnahmen	41
2.4.3 Energiemengenmessungen	42
2.4.4 Vergleich und Best-practice-Lösung	44
2.5 Aufzüge	47
2.5.1 Versorgungsstruktur	47
2.5.2 Einflussgrößen und Einsparmaßnahmen	47
2.5.3 Energiemengenmessung	48
2.5.4 Vergleich und Best-practice-Lösung	52
3 Fazit	54
4 Literaturverzeichnis	55
5 Anhang	A-1

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2.1: Wärmedurchgangskoeffizient für Warmwasser-Zirkulationsleitungen und Heizungsleitungen [Sch08a].	16
Abbildung 2.2: Fernwärmeversorgung mit T_{VL} 120 °C und dT von 50-60 K	17
Abbildung 2.3: Die geringe Auskühlung dT von 10 K verursacht einen hohen Pumpstrombedarf	18
Abbildung 2.4: Fernwärmeversorgung mit Anpassung von T_{VL} im Tagesverlauf	18
Abbildung 2.5: Fernwärmeversorgung mit Anpassung der Vorlauftemperatur T_{VL} an die Außentemperatur T_a	19
Abbildung 2.6: Konstanttemperaturkessel und drehzahlgeregelte Pumpen	19
Abbildung 2.7: Vergleich der Rücklauftemperaturen eines Heizsystems	20
Abbildung 2.8: Häufiges Takten des Kessels (Baujahr 2002) mit starken Schwankungen der Vorlauftemperatur	20
Abbildung 2.9: Eingeschränkte Brennwertnutzung bei T_{VL} von 58 °C, Auskühlung mit $dT < 8$ K zu gering	21
Abbildung 2.10: Die Wärmeversorgung der OP-Säle zeigt überwiegend hohe Temperaturdifferenzen	21
Abbildung 2.11: Direkter Zusammenhang zwischen Heizleistung einer Intensivstation und der Außentemperatur	22
Abbildung 2.12: Wärmeversorgung Vergleich 1 – spez. Wärmemengen und Heizkosten	23
Abbildung 2.13: Wärmeversorgung Vergleich 2 - Gebäudekennzahlen	23
Abbildung 2.14: Wärmeversorgung Vergleich 3 – Heizanlagen-Kennwerte	24
Abbildung 2.15: Wärmeversorgung Vergleich 4 – Kennzahlen Referenzwärme und Einsparpotenziale	25
Abbildung 2.16: Grundprinzip einer kombinierten Trinkwarmwassererzeugung und gleichzeitigen Heizung	26
Abbildung 2.17: Zu hohe Systemtemperaturen führen zu hohen Energieverlusten	29
Abbildung 2.18: Zu niedrige Warmwassertemperaturen erhöhen die hygienischen Risiken	29
Abbildung 2.19: Die Heizleistung für die Zirkulation hat einen großen Anteil am Energieverbrauch	30
Abbildung 2.20: Tagessummendiagramme – die Steigung zeigt den maximalen Frischwasserbedarf	30
Abbildung 2.21: Vergleich TWE aller KH mit dem besten und einem schlechten KH	31
Abbildung 2.22: Lüfterleistung in Abhängigkeit der Strömungsgeschwindigkeit bei konstantem Volumenstrom	33
Abbildung 2.23: Charakteristische Lastverläufe von OP-Lüftungen	34
Abbildung 2.24: Beispiel einer Energieverschwendung: volle Lüfterleistung auch außerhalb der Betriebszeiten	35
Abbildung 2.25: Charakteristischer Lastverlauf einer Intensivlüftung	35
Abbildung 2.26: Boxplot-Vergleich Lüftung in Krankenhäusern	36
Abbildung 2.27: Boxplot-Vergleich Zuluft OP	37
Abbildung 2.28: Stromkosteneinsparungen für eine typische OP-Lüftung bei einem besserem Wirkungsgrad und Teillastabsenkung	38
Abbildung 2.29: Boxplot-Vergleich für Nicht-OP-Lüftungsanlagen	39

Abbildung 2.30: Jährliche Stromkosteneinsparung in Abhängigkeit des Wirkungsgrads bezogen auf die bereits installierte Lüfterleistung	40
Abbildung 2.31: Lastgangmessung an einer Kältemaschine	43
Abbildung 2.32: Wirkungsgradsprung durch erhöhte Auslastung	43
Abbildung 2.33: Bedarfsangepasste Regelung einer Kältemaschine	44
Abbildung 2.34: Boxplot-Vergleich der Kältemaschinen	45
Abbildung 2.35: Kälteerzeugung - Teillastverhalten von verschiedenen Verdichtertypen, Quelle: Axima GmbH	46
Abbildung 2.36: Kosteneinsparung durch Austausch der Kältemaschine	46
Abbildung 2.37: Charakteristische Lastgänge unterschiedlicher Aufzüge (oben: Aufzug mit getriebelosem Seilantrieb und Frequenzregelung, unten: Aufzug mit Seilantrieb, mit Getriebe und ohne Frequenzregelung)	48
Abbildung 2.38: Jahresenergieverbrauch in Abhängigkeit der Regelung und der Auslastung	49
Abbildung 2.39: Einfluss des Baujahrs auf die mittlere Leistung im Betrieb und die installierte Leistung pro Nennlast	50
Abbildung 2.40: Vergleich der Messwerte geordnet nach den Baujahren der Aufzüge	51
Abbildung 2.41: Boxplot als Überblick und Einschätzungshilfe der Kennwerte für Aufzüge	53
Abbildung 5.1: Datenbasis und Beispiel eines Boxplots	A-9
Abbildung 5.2: Kostenbestandteile einer nachträglichen Wärmedämmung [BINO4]	A-11
Abbildung 5.3: Preisentwicklung von Brennstoffen Stand: Mai 2009, Quelle: Initiative Pro Schornstein e.V.	A-12
Abbildung 5.4: Nutzungsgrad von Brennwertkesseln in Abhängigkeit von der Heizsystemtemperatur [Sch08a]	A-13
Abbildung 5.5: Heizkurve mit unterschiedlicher Steilheit	A-14
Abbildung 5.6: Pumpstromkosten in Abhängigkeit von Pumpenleistung und Volumenstrom	A-15
Abbildung 5.7: Der überwiegende Teil der Heizwärme wird oberhalb von - 5 °C benötigt	A-16

Tabellenverzeichnis

Tabelle 2.1: Einsparungen in untersuchten OPs bei Herunterregelung der Lüftung um 80 % bezogen auf Volllast (Annahme Strompreis: 0,13 €/kWh)	38
Tabelle 2.2: Best-practice-Maßnahmen für Lüftungsanlagen	40
Tabelle 2.3: Best-practice für energieeffiziente Aufzüge [Hak08]	52
Tabelle 5.1: Pauschale U-Werte von Gebäuden nach Baualtersklassen [Log05]	A-10

Verzeichnis von Begriffen und Definitionen

Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Bedeutung	Einheit
a	Jahr	a
A	Fläche	m ²
BH	Bettenhaus	
BHKW	Blockheizkraftwerk	
COP	Coefficient Of Performance	
c _p	spezifische Wärmekapazität	J/kg
Ct	Cent	1/10 €
DIN	Deutsches Institut für Normung	
DN	Nennweite	mm
dT	Temperaturdifferenz	K
DVGW	Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches – Technisch-Wissenschaftliche Vereinigung e.V	
E	Energie	kWh
EnEV	Energieeinsparverordnung	
eta	Nutzungsgrad	
h	Stunde	h
Heiz	Heizung	
IWU	Institut Wohnen und Umwelt	
k	kilo, 10 ³	
K	Kelvin	K
KH	Krankenhaus	
KM	Kältemaschine	
l	Liter	l
Lüft	Lüftung	
M	Mega, 10 ⁶	
m	Meter	m
Mio.	Millionen	
NRW	Nordrhein-Westfalen	
OP	Operationssaal	
P	elektrische Leistung	kW
Pa	Pascal (Druckeinheit)	kg/ms ²
q	spezifischer Wärmeverbrauch	kWh/m ² a
Q	Wärmeverbrauch	kWh
Q´	Wärmemenge	W
RLT	Raumlufttechnische	
s	Sekunde	
SFP	Specific Fan Power	
T	Temperatur	°C oder K
TRY	Testreferenzjahr	
TWE	Trinkwarmwassererzeugung	
U	Wärmedurchgangskoeffizient	W/(Km ²)
V	Volumen	m ³
V´	Volumenstrom	m ³ /s
W	Watt	W
WW	Warmwasser	
Δp	Druckdifferenz	Pa

η	Nutzungsgrad	
ρ	Dichte	kg/m ³
ZI	Trinkwasserzirkulation	

Index-Verzeichnis

Index	Bedeutung
a	außen
BH	Bettenhaus
el	elektrisch
extrap.	extrapoliert
FW	Frischwasser
ges	gesamt
Gew	Gewinne
i	innere
inst	installiert
Int	Intensiv
Lüft	Lüftung
m	mittel
max	maximal
mess	Messung
min	minimal
nat	natürlich
OP	Operationssaal
R	Raum
ref	Referenzwert
RL	Rücklauf
sol	solar
spez.	spezifisch
th	thermisch
trans	Transmission
VL	Vorlauf
W	Wirk
Zirk	Zirkulation
ZI	Zirkulation

Zusammenfassung

In dem von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt geförderten Projekt (Az-23472) wurde der Energieverbrauch in 20 Krankenhäusern mit einer Größe von 300 bis 600 Betten untersucht. Es wurden in energierelevanten Verbrauchssektoren detaillierte Energiemengenmessungen durchgeführt und die Betriebsweise der Energieversorgungsanlagen analysiert sowie Maßnahmen zur Energieoptimierung aufgezeigt. Anschließend wurden der jährliche Energieverbrauch der untersuchten Verbrauchssektoren ermittelt und die Energieverbrauchskosten berechnet. Es wurde ein Krankenhausvergleich durchgeführt, mit dem der Energieverbrauch der Krankenhäuser in Abhängigkeit von Einflussgrößen verglichen werden kann. Jedes Krankenhaus kann sich so mit der Gesamtheit der Krankenhäuser sowie mit dem besten Krankenhaus der Untersuchung vergleichen. Weiterhin wurden für die Verbrauchssektoren Einsparmaßnahmen erarbeitet und Best-practice-Lösungen entwickelt, die besonders effektiv Einsparungen ermöglichen und in den meisten Krankenhäusern durchgeführt werden können. Die zu erwartenden Kosten und die erzielbaren Einsparungen wurden abgeschätzt. Weiterhin wurden Kennzahlen und einfache Werkzeuge zur überschlägigen Berechnung von Kosten und Einsparungen entwickelt. Aus dem Krankenhausvergleich ergeben sich anhand von statistischen Größen Kennzahlen für Energieverbrauch und Energiekosten der untersuchten Bereiche, die als Vergleichsgrößen genutzt werden können.

Die Untersuchungen haben gezeigt, dass in vielen Bereichen der Austausch alter, ineffizienter Anlagen zu einer deutlichen Einsparung führt und wirtschaftlich sinnvoll ist. Doch auch neue Anlagen garantieren keinen optimalen Energieverbrauch, da eine ineffiziente Betriebsweise ebenfalls zu erhöhten Energieverbräuchen führt. Einsparungen durch optimierte Betriebsparameter können jedoch nur erschlossen werden, wenn die entsprechenden Kenngrößen im zeitlichen Verlauf bekannt sind und mit den Anlagenkennwerten in Beziehung gesetzt werden. Mit Hilfe von Lastgangmessungen können ineffiziente Betriebsweisen aufgezeigt werden, so dass mit geringem Aufwand beispielsweise durch Einstellung der Regelung Einsparungen erzielt werden können. Weiterhin konnten mit Hilfe der Messergebnisse Versorgungsengpässe aufgezeigt sowie nicht einwandfrei funktionierende Versorgungsanlagen und Installationen identifiziert werden. Außerdem hat das Projekt gezeigt, dass die Datenlage in den Krankenhäusern für eine Einschätzung und für den Vergleich mit anderen Krankenhäusern nicht ausreichend ist. Nur wenn zum einen die Kennwerte der Energieversorgungsanlagen und zum anderen die Bezugsgrößen der versorgten Bereiche bekannt sind, kann ein Vergleich durchgeführt werden. Da der Energieverbrauch sehr stark von der Raumnutzung abhängig ist, könnten anhand der nach Nutzungsart unterteilten Flächen Referenzverbrauchswerte ermittelt werden, die es ermöglichen eine Energieverbrauchsstruktur zu ermitteln. Aufgrund der fehlenden Daten ist den meisten Krankenhäusern eine solche Flächenzuordnung nicht möglich. Ein weiterer Grund sind die fehlenden personellen Ressourcen, so dass, wenn Daten vorhanden sind, keine Zuordnung durchgeführt werden kann. Weiterhin müssen grundlegende Daten der zu versorgenden Gebäude wie Gebäudealter, Wand-, Fenster-, Dach- und Fundamentflächen ermittelt werden, um eine Abschätzung des Wärme- und Kältebedarfes durchführen zu können. Bisher fast vollständig unbekannt sind die Verbrauchswerte der elektrisch angetriebenen Geräte und Anlagen, die sich u.a. auf den Wärme- und den Kältebedarf auswirken. Derzeit kann allenfalls eine grobe Abschätzung anhand von Literaturwerten durchgeführt werden. Hierzu liegen erste Kennwerte aus der Literatur vor, jedoch besteht noch Bedarf der Validierung und der Bewertung der Übertragbarkeit. Weiterführende Untersuchungen sollten zum Ziel haben, die Datensituation in den Krankenhäusern zu verbessern und eine energetische Auswertung von Raumflächen und Raumnutzung zur Abbildung der Energieverbrauchsstruktur zu automatisieren. Die Untersuchungen müssen auf bisher nicht betrachtete Verbrauchssektoren (Dampf, Licht, medizinische Geräte und Anwendungen) ausgeweitet werden, um den gesamten Energieverbrauch von Krankenhäusern abbilden zu können.

1 Projektbeschreibung

In Deutschland standen in 2007 insgesamt 2 087 Krankenhäuser mit ca. 507 000 Betten zur Verfügung. Bei einem Verbrauch von 24 670 kWh Wärme und 7 786 kWh Strom pro Bett und Jahr [Tip03] ergeben sich für alle deutschen Krankenhäuser ein Wärmeverbrauch von 12,5 Mio. MWh/a und ein Stromverbrauch von 3,9 Mio. MWh/a. Hieraus resultieren Kosten von ca. 1,7 Milliarden Euro bzw. ca. 3 348 € pro Krankenhaus-Bett und Jahr [Des08b]. Da in Krankenhäusern zum einen ein großer Bestand alter sanierungsbedürftiger Anlagen existiert und zum anderen viele Krankenhäuser aufgrund vieler Um- und Anbauten keine optimierte Energieversorgung haben, bestehen beachtliche Einsparpotenziale. Laut der Energieagentur NRW zeigen Erfolgsbeispiele, dass Kostensenkungen von bis zu 40 % möglich sind. Eine vergleichsweise moderate Energieeinsparung von durchschnittlich nur 5 % würde für ein Krankenhaus mit 500 Betten eine Kosteneinsparung von jährlich ca. 84 000 € bedeuten. Mit Hilfe einer Energieanalyse kann das Einsparpotenzial festgestellt werden, jedoch stellen der hohe Aufwand und die hohen Kosten ein Hemmnis dar. Daher wurde der Ansatz verfolgt, den Energieverbrauch anhand von Kennzahlen zu bewerten, um Aufwand und Kosten gering zu halten. Die bisher durchgeführten Benchmarkings basieren jedoch auf globalen Kennzahlen wie Verbrauch und Kosten pro Fläche für das gesamte Krankenhaus. Aufgrund der hohen Komplexität und der großen strukturellen Unterschiede zwischen den Krankenhäusern konnten mit diesen einfachen Kennzahlen keine Aussagen über die Qualität der Energienutzung getroffen werden.

Ziel des Projektes ist es, in den 20 untersuchten Krankenhäusern mit Hilfe von Energiemessungen Einsparpotenziale aufzudecken und konkrete Einsparmaßnahmen (Best-practice-Lösungen) zu entwickeln. Mit Hilfe der Messergebnisse wird der Zusammenhang zwischen Energieverbrauch und Einflussparametern aufgezeigt, um Krankenhäuser vergleichen zu ermöglichen. Damit soll es den Krankenhäusern ermöglicht werden, mit geringem Aufwand Einsparpotenziale zu erkennen, zu bewerten und technisch optimale Lösungen zu entwickeln.

Die Untersuchungen werden an 20 möglichst repräsentativen Krankenhäusern einer mittleren, weit verbreiteten Größe mit einer Bettenzahl von ca. 300-600 Betten durchgeführt, so dass die Ergebnisse des Projektes auf möglichst viele Krankenhäuser übertragen werden können. Um die Vergleichbarkeit deutlich zu erhöhen, wurden die Untersuchungen für energierelevante Verbrauchssektoren durchgeführt. Bezüglich der Energierelevanz, der Mess- und Beeinflussbarkeit wurden für die Untersuchungen die Bereiche Heizung, Warmwasser, Lüftung von OP- und Nicht-OP-Abteilungen (z.B. Intensivstationen) sowie Kälte und Aufzüge ausgewählt. Neben dem Nutzenergieverbrauch wurde auch die Energiewandlung beurteilt.

In einer Bestandsaufnahme werden alle energierelevanten Informationen erfasst und ausgewertet. Es werden die Versorgungsstruktur unter energetischen Gesichtspunkten beschrieben und mögliche Einflussgrößen herausgearbeitet. Es werden Energiebezug (Strom, Erdgas, Fernwärme etc.), die Energiewandlung (Heizkessel, Kältemaschinen etc.) sowie, sofern möglich, der Energieverbrauch erfasst. Aus den erfassten Daten ergibt sich ein detailliertes Gesamtbild der Energieversorgung und der damit verbundenen Kosten. Weiterhin werden die energierelevanten Gesamtdaten (Betten-/Patientenzahl, Abteilungen, OPs, Flächen, Gebäudegeometrie etc.) der Krankenhäuser zusammengestellt. Basis der Untersuchungen sind die von den Krankenhäusern gelieferten Informationen.

Auf der Basis der Datenerfassung und der energetischen Beschreibung von Energieerzeugung, -verteilung und -nutzung wird in Zusammenarbeit mit den Krankenhäusern ein Messkonzept erarbeitet und anschließend Lastgangmessungen des Energieverbrauchs (Strom, Wärme, Kälte) durchgeführt. Im Vergleich zu bisherigen Untersuchungen können so umfangreiche Betriebsdaten aus

Teilbereichen der Krankenhäuser für die Entwicklung des Krankenhausvergleichs genutzt werden. Die Messungen werden jeweils für einen Zeitraum von 1 Woche durchgeführt, um einen charakteristischen Lastverlauf abzubilden. Parallel zu den Messungen werden die relevanten Einflussfaktoren erfasst. Zur Validierung der Messergebnisse werden in einigen Krankenhäusern Energieverbrauchsdaten herangezogen, die in den Einrichtungen bereits zur Verrechnung der Energiekosten nach Kostenstellen erfasst werden. Die Ergebnisse der Lastgangmessungen werden grafisch dargestellt und ausgewertet. Auf der Basis der Lastgangmessungen und der erfassten Einflussgrößen werden Jahresenergieverbrauchswerte und die daraus resultierenden Kosten berechnet.

Anhand der Lastgangmessungen und der Bestandsdatenerfassung werden auf der Basis von Literaturrecherchen und Praxiserfahrungen Einsparmaßnahmen entwickelt und Einsparpotenziale aufgezeigt. Anschließend wird ein Vergleich auf der Basis der Energieverbrauchswerte und der erfassten Einflussgrößen durchgeführt, der die Eigenschaften der Krankenhäuser berücksichtigt. Auf der Basis des Vergleichs werden in Verbindung mit den entwickelten Einsparmaßnahmen Best-practice-Lösungen entwickelt, die besonders erfolgversprechend in vielen Einrichtungen eingesetzt werden können. Die entwickelten Lösungen werden auf die untersuchten Krankenhäuser angewendet und das Einsparpotenzial abgeschätzt. Sowohl die Einsparmaßnahmen als auch die Best-practice-Lösungen werden bezüglich der Umsetzbarkeit und, sofern möglich, bezüglich der Wirtschaftlichkeit beurteilt und ihre Übertragbarkeit auf andere Krankenhäuser bewertet. Für jedes Krankenhaus wurde ein individueller Ergebnisbericht erstellt, in dem die Ergebnisse der Energiemengenmessungen, des Kennzahlenvergleiches und der Berechnungen der Einsparpotenziale des Krankenhauses dargestellt wurden. In Verbindung mit dem Abschlussbericht können so Effizienzmaßnahmen und Einsparpotenziale verglichen und bewertet werden. Die Ergebnisse des Forschungsprojektes werden abschließend anonymisiert einer breiten Öffentlichkeit zugänglich gemacht.

2 Projektdurchführung und -ergebnisse

2.1 Wärmeversorgung

2.1.1 Versorgungsstruktur

Die Wärmeversorgung in den Krankenhäusern erfolgt überwiegend über eine zentrale Heizungsanlage. Von den 20 untersuchten Krankenhäusern werden 10 Einrichtungen über einen Fernwärmeanschluss versorgt, in zwei Krankenhäusern erfolgt die Wärmeversorgung über eine Kombination aus Erdgas-Heizkessel und Blockheizkraftwerk (BHKW). 6 Krankenhäuser werden über Niedertemperaturkessel mit Wärme versorgt und in jeweils einem Krankenhaus wird ein Brennwert- bzw. Konstanttemperaturkessel betrieben. Die in den Krankenhäusern installierte Heizleistung liegt zwischen 2,3 und 9,8 MW. Die meisten Heizungsanlagen werden bei Vor-/Rücklauftemperaturen von 90/70 °C betrieben, in einigen neueren Anlagen ist das Heizungssystem auf 80/60 °C oder 70/50 °C ausgelegt. Im Krankenhaus mit dem Brennwertkessel ist der Rücklauf auf eine Temperatur von 55 °C ausgelegt. Die Vorlauftemperaturen der Fernwärmeanschlüsse liegen bei 120 °C, im Einzelfall zur Dampferzeugung bei 180 °C.

2.1.2 Einflussgrößen und Einsparmaßnahmen

Der Wärmebedarf, den die Wärmeversorgungsanlagen decken müssen, ergibt sich aus den Transmissions- und den Lüftungsverlusten und wird reduziert durch die inneren und die solaren Gewinne.

$$\dot{Q} = \dot{Q}_{\text{trans}} + \dot{Q}_{\text{Lüft}} - \dot{Q}_{\text{innere}} - \dot{Q}_{\text{solar}} \quad \text{mit}$$

$$\dot{Q}_{\text{trans}} = U \cdot A \cdot (T_i - T_a)$$

$$\dot{Q}_{\text{Lüft}} = r \cdot c_p \cdot \dot{V} \cdot (T_i - T_a)$$

$$\dot{Q}_{\text{innere}} = \dot{Q}_{\text{Personen}} + \dot{Q}_{\text{Geräte}} + \dot{Q}_{\text{Beleuchtung}}$$

Darüber hinaus entstehen Verluste bei der Wärmeerzeugung und der Wärmeverteilung, die sich in einem erhöhten Heizenergiebedarf niederschlagen. Entsprechend der oben dargestellten Bilanzgleichung für den Wärmebedarf stellt das Gebäude den größten Einflussfaktor dar. Die Wärmeverluste eines Gebäudes ergeben sich aus dem Wärmeaustausch über die Außenwand- und Dachflächen sowie über die an das Erdreich angrenzenden Flächen. Durch eine kompakte Bauweise kann während der Planung eines neuen Krankenhausabschnitts der Wärmeverlust über die Gebäudeoberfläche minimiert werden. Im Gebäudebestand können die Wärmeverluste über die Gebäudehülle durch nachträgliche Wärmedämmung und Einbau von Fenstern mit geringem U-Wert reduziert werden. Kosten für die nachträgliche Wärmedämmung können dem Anhang entnommen werden (Abbildung 5.2).

Der Wärmedämmstandard von Gebäuden kann entsprechend ihres Alters überschlägig bestimmt werden. Eine Übersicht der Dämmstandards und der charakteristischen U-Werte können dem Anhang entnommen werden (s. Tabelle 5.1). Mit den dargestellten pauschalen U-Werten ist es möglich, die Transmissionswärmeverluste und die Einsparpotenziale einer verbesserten Wärmedämmung abzuschätzen.

Weitere Wärmeverluste des Gebäudes entstehen durch die Belüftung, da die zugeführte Frischluft auf Raumtemperatur erwärmt werden muss und mit der abgeführten Luftmenge Wärme aus dem Gebäude transportiert wird. Zu unterscheiden sind dabei mechanisch belüftete Flächen und Bereiche, die manuell über Fenster gelüftet werden. Krankenhäuser mit einem hohen Lüftungsbedarf durch OP- und Intensivstationen sowie weitere mechanische belüftete Bereiche (z.B. Behandlung, Küche, Röntgen) haben einen hohen Lüftungswärmeverlust. Durch eine Wärmerückgewinnung kann die Wärme der Abluft jedoch zur Vorwärmung der Außenluft genutzt werden. Die Wärmerückgewinnung einer neuen Lüftungsanlage sollte einen Wärmerückgewinnungsgrad von mindestens 70 % erzielen.

Sowohl die Transmissions- als auch die Lüftungswärmeverluste sind von der Raumtemperatur abhängig, die sich aus der Raumnutzungsart ergibt. Diese kann jedoch auch vom Nutzer verändert werden. Aufgrund der Raumnutzung werden unterschiedliche Anforderungen an die Raumlufttemperatur gestellt. Im Bereich der Intensivstation, in OP-Sälen und in einigen Behandlungsbereichen sind höhere Temperaturen erforderlich, so dass der Wärmeverlust ansteigt. Patientenzimmer, Flure, Aufenthaltsräume usw. hingegen können deutlich geringer beheizt werden. Die zu erwärmende Frischluftmenge ergibt sich ebenfalls aus der Raumnutzung. Während in Bettenhäusern die Belüftung überwiegend über die Fenster und die Abluftanlagen im sanitären Bereich bestimmt wird, ist in vielen Bereichen des Krankenhauses aus hygienischer oder klimaphysiologischer Sicht eine mechanische Belüftung über eine Lüftungsanlage vorgeschrieben. Aufgrund der hohen inneren Lasten, die über die Lüftung abgeführt werden müssen, oder der Infektionsgefahr werden dem Gebäude sehr große Frischluftmengen zugeführt, die für einen erhöhten Wärmebedarf sorgen (s. Kapitel 2.3). Dabei ist zu unterscheiden, ob der Lüftungsbedarf durchgehend (Intensivstation) oder nur zu Nutzungszeiten besteht (Röntgenabteilung). Eine wesentliche Einsparmaßnahme ist daher, den Frischluftvolumenstrom auf das geforderte Minimum zu reduzieren und bedarfsgerecht zu steuern. In Bereichen mit einer mechanischen Lüftung und festgelegten Nutzungszeiten (z.B. Röntgenabteilungen) kann die Lüftung außerhalb der Nutzungszeiten deutlich reduziert oder sogar abgeschaltet werden. In OP-Abteilungen kann die Außenluftmenge außerhalb der OP-Zeiten nicht abgeschaltet, aber deutlich reduziert werden, um den Lüftungswärmeverlust sowie den Lüfterstromverbrauch zu minimieren.

Der Nutzer (Patient, Personal) kann sowohl auf die Raumtemperatur als auch auf die zugeführte Frischluftmenge Einfluss nehmen. Insbesondere in den Patientenzimmern und Aufenthaltsräumen, die über Heizkörper beheizt werden und in denen eine Fensterlüftung möglich ist, beeinflusst der Nutzer über die Einstellung an den Thermostatventilen oder durch das Lüftungsverhalten (gekippte Fenster oder Stoßlüftung) den Raumwärmebedarf. Das Nutzerverhalten kann nur durch Motivation und Aufklärung in begrenztem Maße beeinflusst werden. Der Einfluss des Nutzers auf den Energieverbrauch ist unter realen Bedingungen messtechnisch nicht zu erfassen. Projekte zur Verbesserung des Nutzerverhaltens sind z.B. *Aktionswoche E-Fit* der Energieagentur NRW oder *Ökoprofit* als Kooperationsprojekt von Städten und Unternehmen.

Die inneren Wärmegewinne ergeben sich aus der Anzahl der Personen, der Beleuchtung und den elektrischen Geräten. Sowohl in der Planung eines Gebäudes als auch im Betrieb kann durch den Einsatz effizienter Leuchtmittel und Geräte der Einfluss der elektrischen Verbraucher reduziert werden. Dadurch steigt zwar der Heizenergieverbrauch, aber gleichzeitig sinken der deutlich teurere Stromverbrauch sowie der Kühlbedarf klimatisierter Bereiche. Die inneren Gewinne sind von vielen sich stark verändernden Faktoren abhängig, so dass ihr Einfluss nur grob abgeschätzt werden kann.

Neben den inneren Gewinnen reduzieren auch die solaren Gewinne über die Gebäudehülle den Wärmebedarf, so dass durch Fensterflächen und Fensterart sowie durch die Gebäudeorientierung der Wärmebedarf von Gebäuden in der Planung beeinflusst werden kann. Die solaren Gewinne sind darüber hinaus von der Jahres- und Tageszeit abhängig sowie von der Verschattung z.B. durch Gebäude oder Bäume. Während der Nutzung von Gebäuden können die solaren Gewinne kaum beeinflusst werden.

Der oben beschriebene Wärmebedarf des Gebäudes muss von der Wärmeversorgungsanlage gedeckt werden. Dabei entstehen sowohl bei der Wärmeerzeugung als auch bei der Wärmeverteilung Verluste, so dass der Heizenergiebedarf (Erdgas, Fernwärme, Heizöl) größer als der Heizwärmebedarf ist. Die Effizienz der Wärmeerzeugung wird durch den Nutzungsgrad wiedergegeben. Brennwertkessel erzielen einen Nutzungsgrad von 95 % [Wol04], d.h. nur 5 % der eingesetzten Energie (z.B. Erdgas) gehen als Abgas- oder Abstrahlverluste verloren und können nicht in nutzbare Wärme umgewandelt werden. Dieser Nutzungsgrad kann jedoch nur erzielt werden, wenn das Abgas soweit ausgekühlt wird, dass das im Abgas enthaltene Wasser auskondensiert und die Kondensationswärme zum Heizen genutzt wird. Die Kondensation im Abgas setzt bei einer Temperatur von ca. 56 °C ein. Entsprechende Heizsysteme müssen daher auch bei niedrigen Systemtemperaturen von beispielsweise 55/45 °C an kalten Tagen die geforderte Heizlast liefern. Bei wärmeren Systemtemperaturen fällt der Wirkungsgrad mit zunehmender Auslastung deutlich ab (s. Anhang).

Niedertemperaturkessel hingegen können die Kondensationswärme nicht nutzen und zeigen in der Praxis einen entsprechend geringeren Nutzungsgrad von ca. 85 %, so dass die Verluste bei ca. 15 % liegen. Dafür sind höhere Heizsystemtemperaturen möglich (z.B. 70/55 °C) bzw. ist eine Schwitzwasserbildung zu vermeiden. Bei Tieftemperaturkesseln hingegen ist dies nicht erforderlich, so dass die Temperatur außerhalb des Brennerbetriebes bis auf Raumtemperatur absinken kann und die Verluste in der Schwachlastzeit weiter abgesenkt werden.

Sowohl Brennwert- als auch Niedertemperaturkessel können die Vorlauftemperatur entsprechend der Außentemperatur dem aktuellen Bedarf anpassen, um die Wärmeverluste zu minimieren. Demgegenüber arbeiten Konstanttemperaturkessel mit festen Vorlauftemperaturen, so dass hohe Wärmeverluste insbesondere in Teillast entstehen. Diese Kesselbauart (Baujahr 1975) erzielt daher nur einen Nutzungsgrad von maximal 65-80 % [Bur03]. Darüber hinaus können die Verluste aufgrund von Brennerstarts und im Teillastbetrieb durch modulierende Brenner reduziert werden.

Bei einer Fernwärmeversorgung liefert ein Versorgungsunternehmen Warmwasser, das Wärme in einer Übergabestation an das Heizungssystem des Hauses abgibt. Das Krankenhaus bezahlt einen Wärmepreis für die bezogene Wärmemenge und die Anschlussleistung. Die abgerechnete Wärmemenge entspricht der Summe aus Wärmebedarf und Verteilungsverlusten. Auf die Erzeugungsverluste hat der Wärmeabnehmer (das Krankenhaus) keinen Einfluss.

Eine weitere Möglichkeit zur Kosteneinsparung und zur Effizienzsteigerung bietet die Aufteilung der Heizlast auf Grund-, Mittel- und Spitzenlastanlagen. Effiziente Anlagen wie Blockheizkraftwerke oder Anlagen zur Nutzung regenerativer Energien (Holzpellet-/hackschnitzel-Kessel) verursachen hohe Investitionskosten, aber nur geringe Verbrauchskosten. Daher ist eine hohe Auslastung der Anlage erforderlich, um die Kapitalkosten durch geringe Verbrauchskosten auszugleichen. Aufgrund des Lastverlaufes des Wärmebedarfes (geordnete Jahresdauerlinie) kann auf diese Weise die Grundlast und damit ein Großteil der Wärme effizient oder regenerativ bereitgestellt werden. Je nach Lastverlauf können mit 40 % der installierten Leistung ca. 80 % der Wärme beispielsweise aus Holz erzeugt werden.

Während der Einsatz von BHKW-Anlagen oder von regenerativen Energien immer zu einer Reduktion des Primärenergieverbrauches und der Emissionen führt, ist die Wirtschaftlichkeit der Wärmeversorgung von den aktuellen Marktpreisen für die Erzeugungsanlagen und für die Brennstoffe abhängig. In Abbildung 5.3 ist die Preisentwicklung für Brennstoffe der vergangenen Jahre dargestellt. Aktuell liegt der Preisvorteil von Holzpellets gegenüber Heizöl bei 1,015 Ct/kWh und im Vergleich zu Erdgas bei 3,344 Ct/kWh (Preisverlauf s. Anhang). Der Preis von Holz hackschnitzeln ist in der Regel noch günstiger als der von Holzpellets.

Im Betrieb kann auch eine effiziente Kesselanlage durch fehlerhafte Einstellung der Betriebsparameter zu erhöhten Verbrauchswerten führen. Die ermittelten Abgasverluste geben darüber keine Aus-

kunft, da sie bei Vollast ermittelt werden und für den Betrieb in Teillast nicht repräsentativ sind. Bei witterungsgeführten Heizkesselanlagen kann der Betrieb durch Einstellung der Heizkurve an den Bedarf optimiert werden. Dabei sollte die Heizkurve so weit abgesenkt werden, dass alle Räume sowohl während der Übergangszeit als auch an sehr kalten Tagen gerade noch ausreichend mit Wärme versorgt werden (s. Anhang). Da zum einen die meisten Heizkörper überdimensioniert sind und zum anderen die maximale Heizleistung der Heizkörper nur bei Auslegungsbedingungen (z.B. $T_a = -10\text{ °C}$) erforderlich ist, können Vorlauf- und Rücklaufemperaturen abgesenkt werden. Dadurch kann der Heizenergiebedarf ohne Komforteinbußen und Investitionskosten gesenkt werden.

Aufgrund der großen Rohrlängen in Krankenhäusern spielen die Rohrwärmeverluste für die Effizienz der Wärmeversorgung eine wichtige Rolle. Insbesondere in unbeheizten Räumen (z.B. Keller, Untergeschoss) ist der Wärmeverlust der Heizungsrohre besonders groß. Für die Wärmeverluste von Rohrleitungen ist der längenbezogene Wärmedurchgangskoeffizient ausschlaggebend, der sowohl vom Dämmstoff als auch von der Dämmstärke abhängig ist. Je geringer die Wärmedurchgangszahl ist, desto besser ist die Isolierung. In Abbildung 2.1 sind die Wärmedurchgangskoeffizienten für unterschiedliche Dämmstandards dargestellt.

Wärmedurchgangskoeffizient von Rohren

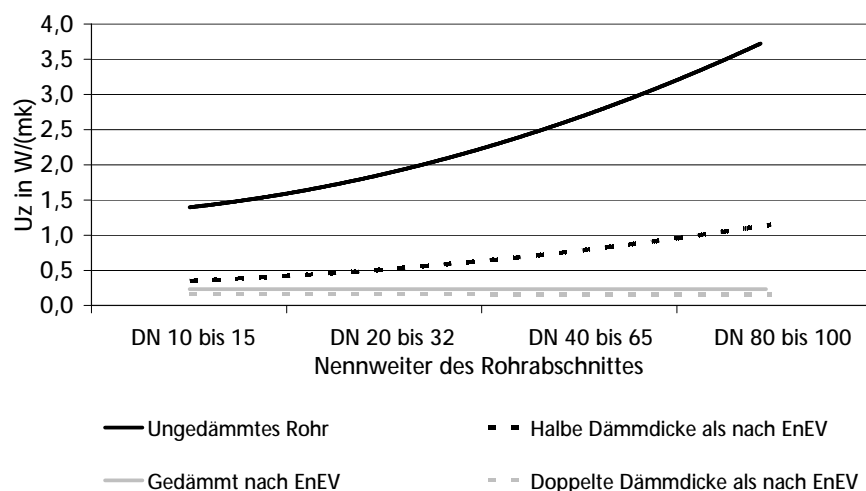


Abbildung 2.1: Wärmedurchgangskoeffizient für Warmwasser-Zirkulationsleitungen und Heizungsleitungen [Sch08a].

Auf Basis der U-Werte der Abbildung 2.1 können die auf die Rohrlänge bezogenen spezifischen Kosten berechnet werden. Die folgende Tabelle zeigt beispielhaft Einsparpotenziale durch Verbesserung der Rohrdämmung.

	Dämmstandard	ungedämmt	schlecht	0,5 EnEV	EnEV
U-Wert	W/mK	3,60	2,00	1,10	0,23
Wärmeverbrauch	kWh/m	1.361	756	416	87
Kosten	€/ma	136	76	42	9
Kosteneinsparung	€/ma	0	60	95	127

Annahmen		
TWW-TR	K	70
DN	-	100
Betriebsstunden	h/a	5400
Wärmepreis	€/kWh	0,1

Weiterhin verursacht die Wärmeverteilung einen Pumpstrombedarf, der sowohl vom Volumenstrom als auch vom Druckverlust bzw. von den Rohrreibungsverlusten (durch Rohrlänge, -durchmesser, -rauigkeit, -einbauten) abhängig ist. Ausschlaggebend ist die Abhängigkeit des Pumpstroms vom Volumenstrom in der dritten Potenz. Wird die Heizwärme mit einer geringeren Temperaturdifferenz

als möglich transportiert, besteht ein großes Einsparpotenzial: wird die Temperaturdifferenz von 10 K auf 20 K angehoben, sinkt der Pumpstrombedarf um 87 %.

2.1.3 Energiemengenmessungen

Der Heizwärmeverbrauch wurde für das gesamte Krankenhaus sowie in den Bereichen Bettenhaus, OP-Lüftung und einem weiteren mechanisch belüfteten nicht OP-Bereich durchgeführt. Bei der Auswertung der Wärmemengenmessungen ist die Versorgung über Fernwärme von Heizkesselanlagen zu trennen. Aufgrund der großen Rohrdurchmesser und der daraus resultierenden Ein- und Auslaflängen für die Ultraschalldurchflussmessungen konnte in 7 Krankenhäusern kein Gesamtwärmestrom gemessen werden.

Bei Fernwärmesystemen wird die Vorlauftemperatur T_{VL} durch den Energieversorger vorgegeben, so dass T_{VL} für die betreffenden Krankenhäuser eine festgelegte Randbedingung ist. In der Regel liegen die Vorlauftemperaturen bei Fernwärme in der Heizperiode bei ca. 120 °C, je nach Fernwärmesystem und je nach Temperaturbedarf in den Krankenhäusern (z.B. bei Dampferzeugung) können auch Temperaturen über 150 °C vorliegen.

Ein typischer Lastverlauf ist in Abbildung 2.2 zu sehen. Die Vorlauftemperatur liegt bei 120 °C und die Rücklauftemperatur bei 60...70 °C. Die Auskühlung erreicht entsprechend Werte von 50...60 °C. Die Außentemperaturen schwankten während der Messung zwischen 0 °C und 10 °C.

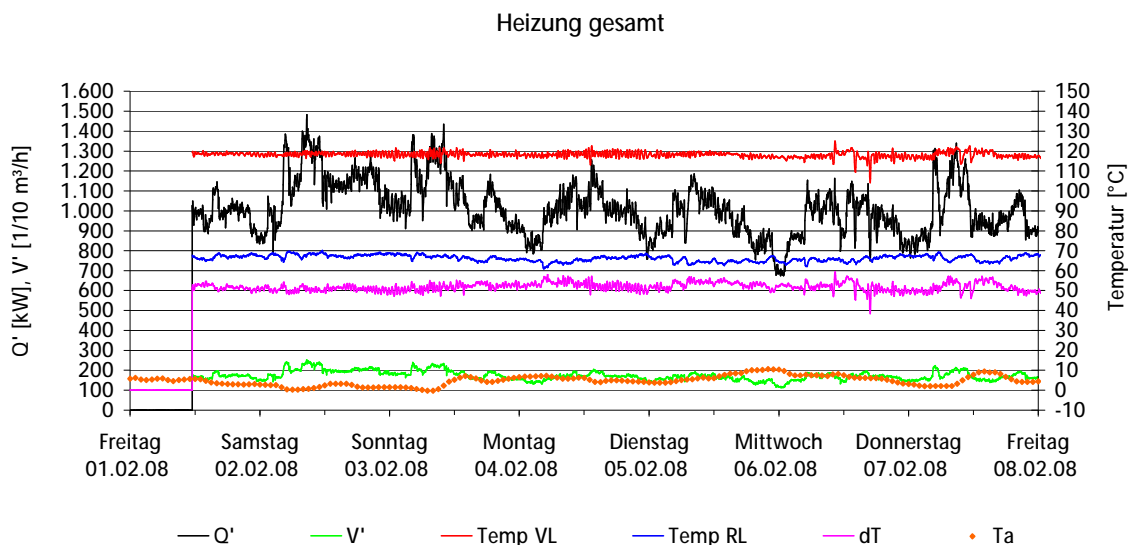


Abbildung 2.2: Fernwärmeversorgung mit T_{VL} 120 °C und dT von 50-60 K

Bei einer Versorgung über Fernwärme hat der Verlauf von T_{VL} für die Krankenhäuser keine direkte Auswirkung auf die Kosten oder die Effizienz der Versorgung. Im Gegensatz zur Vorlauftemperatur kann die Rücklauftemperatur auch bei einer Fernwärmeversorgung gesenkt werden. Das hat zur Folge, dass der Volumenstrom und damit der Pumpstromverbrauch deutlich reduziert werden. Gleichzeitig reduziert sich die Heizleistung der Heizkörper. Dies kann zur Folge haben, dass an sehr kalten Tagen die Raumtemperatur in einzelnen Räumen nicht gehalten werden kann und absinkt. Ein Teil der Reduzierung der Heizleistung kann jedoch dadurch kompensiert werden, dass die meisten Heizkörper überdimensioniert sind. Das Problem der reduzierten Heizleistung tritt allerdings nur an Tagen mit Temperaturen unter -10 °C auf. Mehr als 95 % der Wärme wird jedoch an Tagen mit höheren Außentemperaturen bereit gestellt, bei denen die Leistungsreduktion kein Problem darstellt.

Für den Fernwärmeversorger führen niedrigere Vor- und Rücklauftemperaturen zu geringeren Wärmeverlusten und je nach Art der Wärmeerzeugung auch zu einer verbesserten Effizienz der Er-

zeugung. Es ist daher zu prüfen, ob beispielsweise eine Begrenzung der Rücklauf­temperatur zu besseren Bezugskonditionen führt.

Ein Beispiel für eine ungenügende Auskühlung zeigt Abbildung 2.3, in der eine Temperatur­differenz dT zwischen Vor- und Rücklauf von nur 10 K zu sehen ist. Bei einer Temperatur­differenz von 20 K wäre nur der halbe Volumenstrom erforderlich, was einen um ca. 87,5 % reduzierten Pump­strombedarf zur Folge hätte.

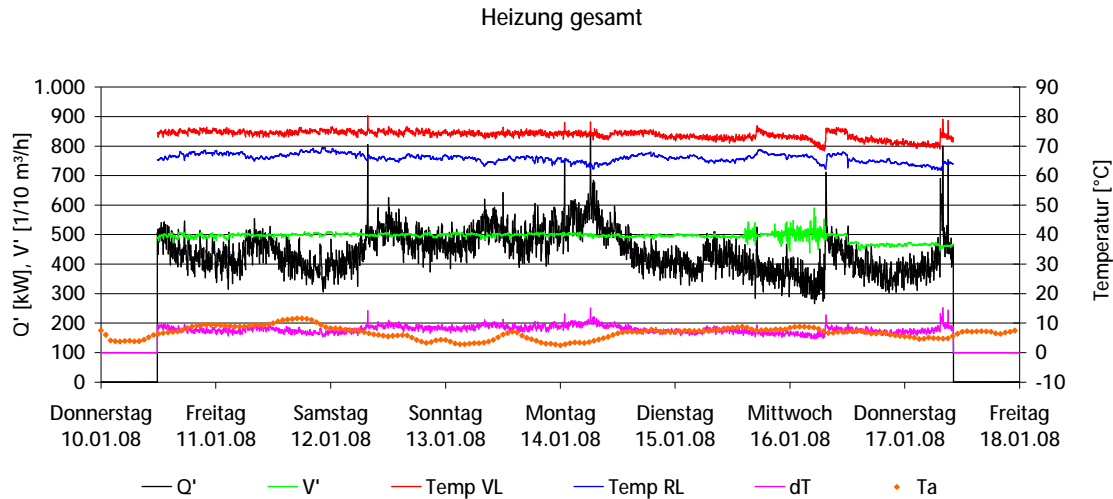


Abbildung 2.3: Die geringe Auskühlung dT von 10 K verursacht einen hohen Pumpstrombedarf

Während der Wochenverlauf in Abbildung 2.3 einen konstanten Verlauf der Vorlauf­temperatur T_{VL} zeigt, ist in Abbildung 2.4 ein deutlicher Tagesverlauf von T_{VL} der Fernwärmever­so­rgung zu sehen. Die Rücklauf­temperatur bleibt in der Abbildung 2.4 konstant, so dass T_{VL} und dT parallel verlaufen. Der Volumenstrom zeigt eine deutliche Lastspitze gegen 6 Uhr morgens und einen Einbruch gegen 23 Uhr. Die Auskühlung schwankte im Messzeitraum zwischen 40° C und 70° C.

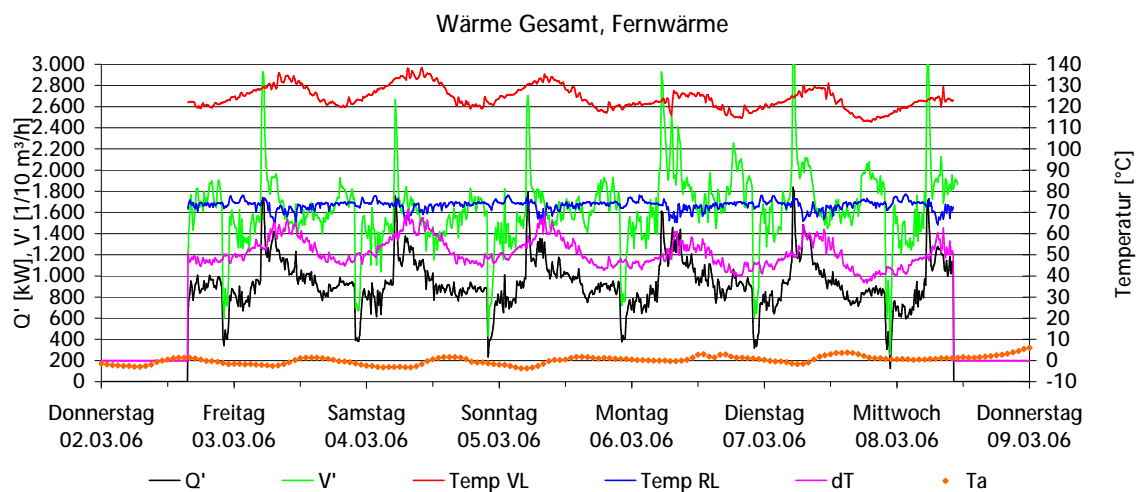


Abbildung 2.4: Fernwärmeverso­rgung mit Anpassung von T_{VL} im Tagesverlauf

In Abbildung 2.5 ist eine weitere Fernwärmeverso­rgung mit variabler Vorlauf­temperatur T_{VL} zu sehen, die mit steigender Außentemperatur und der damit sinkende Heizlast reduziert wird. Bei konstantem Volumenstrom ändert sich die Rücklauf­temperatur entsprechend der Heizlast. Sie wird nicht in dem Maße wie die Vorlauf­temperatur abgesenkt, so dass die Auskühlung mit steigender Außentemperatur abnimmt. Dies hat zur Folge, dass mit steigender Temperatur immer weniger Wärme mit dem vorliegenden Volumenstrom transportiert wird. Die Auskühlung beträgt nur 15...30 K bei gleichzeitig hoher Rücklauf­temperatur von durchgehend (teilweise deutlich) über 70 °C. Eine Verbesserung der Auskühlung und ein Absenken der Rücklauf­temperatur sind hier rat-

sam. Insbesondere aufgrund der vorhandenen Wärmedämmung, die nicht ausreichend ist und zu deutlichen Wärmeverlusten führt. Ein Absenken der Rücklauf­temperatur hätte entsprechend einen deutlich reduzierten Pumpstrombedarf sowie eine deutliche Reduktion der Wärmeverluste zur Folge. Während der Messung wurde außerdem eine unzureichende Wärmedämmung festgestellt, die zu unnötig hohen Wärmeverlusten führt.

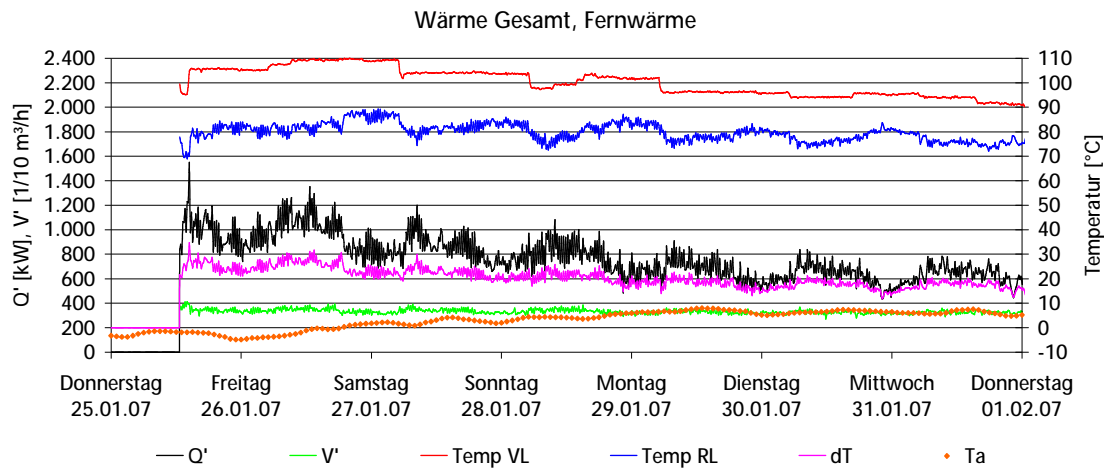


Abbildung 2.5: Fernwärmeversorgung mit Anpassung der Vorlauf­temperatur T_{VL} an die Außentemperatur T_a

Eine Wärmeversorgung mit einem Konstanttemperaturkessel von 1978 zeigt Abbildung 2.6. Die Vorlauf­temperatur wird auf 90 °C gehalten, obwohl die Tagesmaxima der Außentemperatur bei ca. 10 °C liegen und aufgrund des geringen Heizbedarfes eine niedrigere Vorlauf­temperatur möglich wäre. Erhöhte Wärmeverluste sind die Folge. Die Temperaturdifferenz zwischen Vor- und Rücklauf liegt bei weniger als 10 K, so dass im Vergleich zu einer Temperaturdifferenz von 20 K annähernd der 8fache Pumpstrombedarf erforderlich ist. Dabei liegt die Rücklauf­temperatur bei 80 °C und damit über der üblichen Rücklauf­temperatur alter Heizsysteme, die meist für ein Temperatur­paar von 90/70 °C ausgelegt sind. Die Rücklauf­temperatur kann wie die Vorlauf­temperatur wegen der hohen Außentemperatur weiter abgesenkt werden.

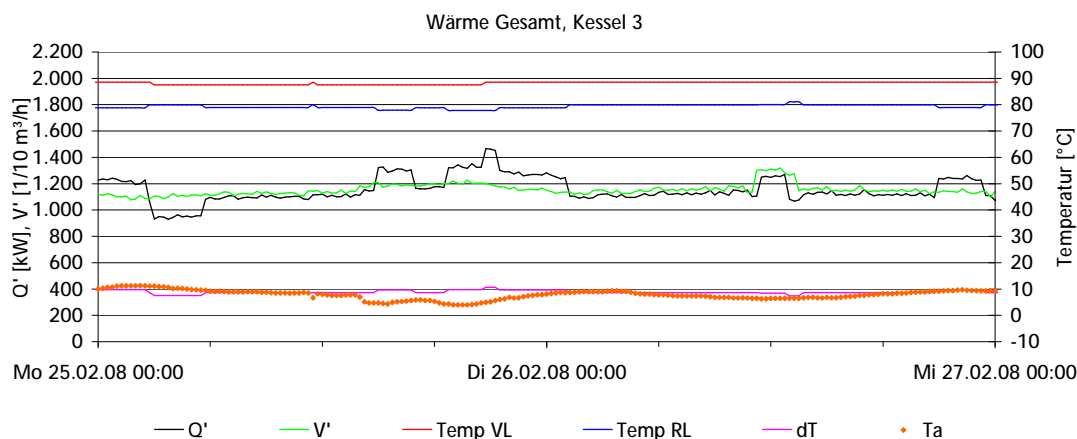


Abbildung 2.6: Konstanttemperaturkessel und drehzahl­geregelte Pumpen

Der Verlauf der Rücklauf­temperaturen des Heizungssystems (s. Abbildung 2.7) zeigt, dass die Temperaturen des Bettenhauses mit 50...60 °C sehr niedrig gefahren werden. Demgegenüber liegen die Rücklauf­temperaturen der Lüftungsanlage für die innenliegenden Patientenzimmer im Bauteil BH.O deutlich über 80 °C.

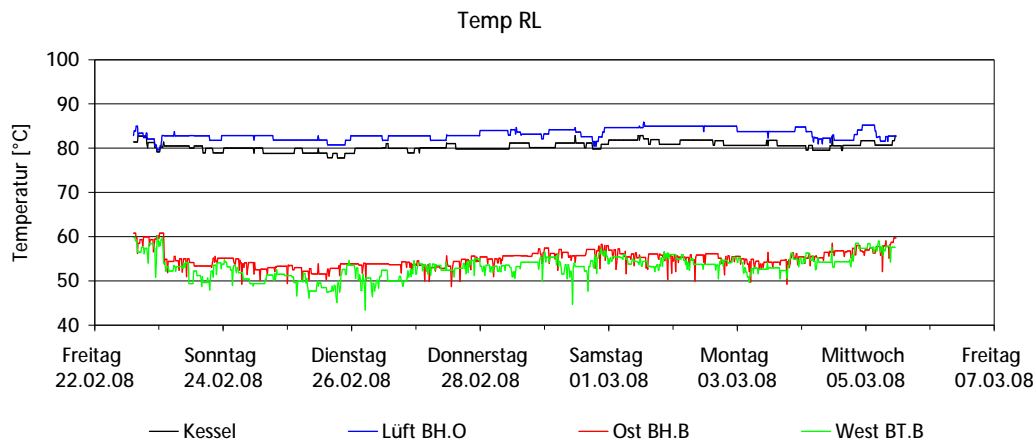


Abbildung 2.7: Vergleich der Rücklauftemperaturen eines Heizsystems

Durch die Wärmemengenmessungen konnten auch an neuen Heizkesseln ungünstige Betriebsweisen aufgezeigt werden. In Abbildung 2.8 ist die Messung an einem Niedertemperaturkessel von 2002 dargestellt. Die gemessenen Temperaturen liegen etwas über den Auslegungstemperaturen des Heizsystems (80/65 °C). Aufgrund des geringen Heizbedarfes ist ein starkes Takten des Kessels zwischen 11 Uhr vormittags und 6 Uhr morgens zu sehen. Die installierte Heizleistung des Kessels beträgt 2 100 kW, das Takten beginnt unterhalb einer Heizleistung von ca. 900 kW (ca. 43 % Auslastung). Trotz der Nachtabsenkung von 20-5 Uhr ist keine Abnahme der Temperaturen festzustellen. Die erhöhten Temperaturen und das Takten des Kessels führen zu zusätzlichen Wärmeverlusten.

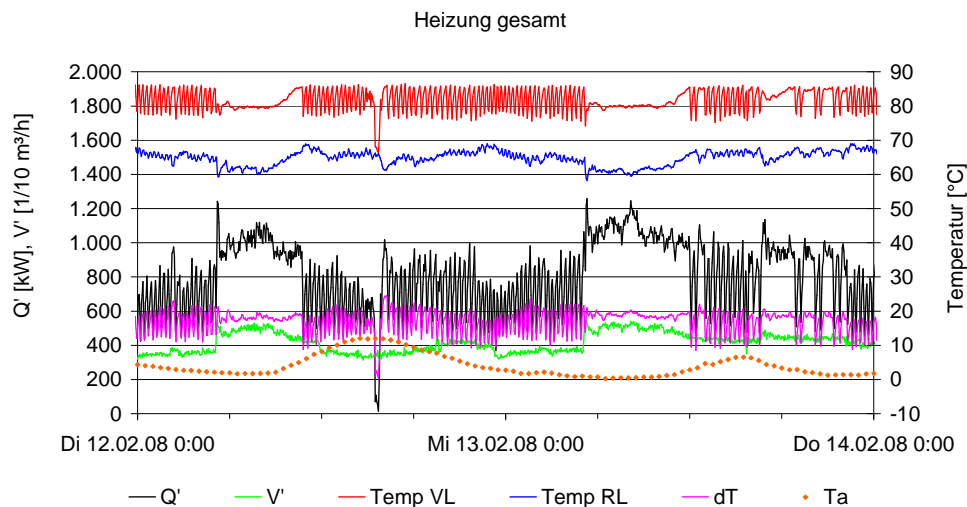


Abbildung 2.8: Häufiges Takten des Kessels (Baujahr 2002) mit starken Schwankungen der Vorlauftemperatur

Im Gegensatz zur Gesamtwärme liegen die gemessenen Systemtemperaturen der statischen Heizungen in den Bettenhäusern deutlich niedriger. In keinem der untersuchten Krankenhäuser wurden Temperaturen von 90/70 °C gemessen, die Rücklauftemperatur T_{RL} lag überwiegend unterhalb von 60 °C, teilweise unterhalb von 50 °C. Im Krankenhaus mit Brennwertkessel hingegen wurden Rücklauftemperaturen von über 58 °C gemessen, so dass nur eine eingeschränkte Brennwertnutzung möglich ist (s. Abbildung 2.9). Weiterhin ist eine sehr geringe Temperaturdifferenz dT von 8 K zu sehen, die zu erhöhten Pumpstromkosten führt.

statische Heizung Bettenhaus

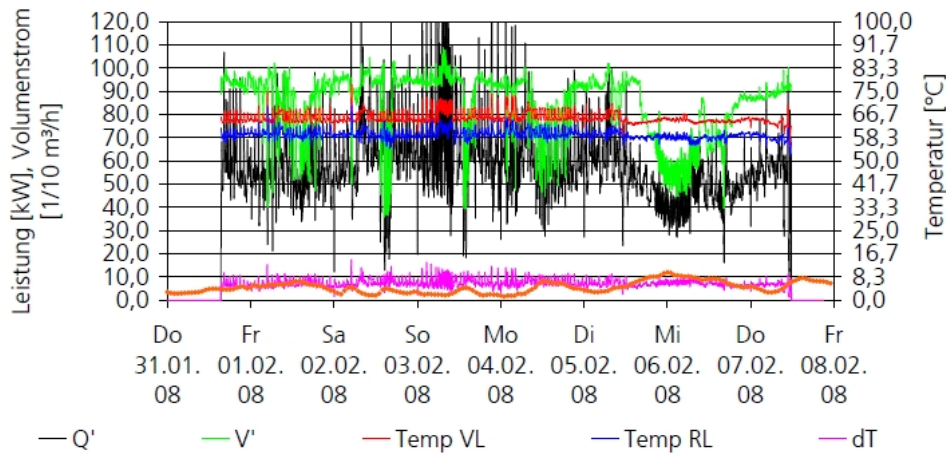


Abbildung 2.9: Eingeschränkte Brennwertnutzung bei T_{VL} von 58 °C, Auskühlung mit $dT < 8$ K zu gering

Der Wärmebedarf der mechanisch belüfteten Bereiche wird deutlich stärker durch den Luftwärmeverlust beeinflusst als natürlich belüftete Bereiche (Abbildung 2.10). Durch eine Anpassung der Betriebszeiten der Lüftungsanlagen an die Nutzungszeiten kann ohne Investition sowohl der Strombedarf als auch der Wärmebedarf effektiv reduziert werden. Die Wärmeversorgung der OP-Stationen kann außerhalb der OP-Zeiten nicht ausgeschaltet, aber deutlich reduziert werden. Die gemessenen Rücklauftemperaturen von OP-Anlagen liegen meist unterhalb von 60 °C, in einigen Krankenhäusern sogar zwischen 20...30 °C. Die Temperaturdifferenz lag in den 15 Krankenhäusern deutlich über 10 K (s. Abbildung 2.10).

Lüftung OP

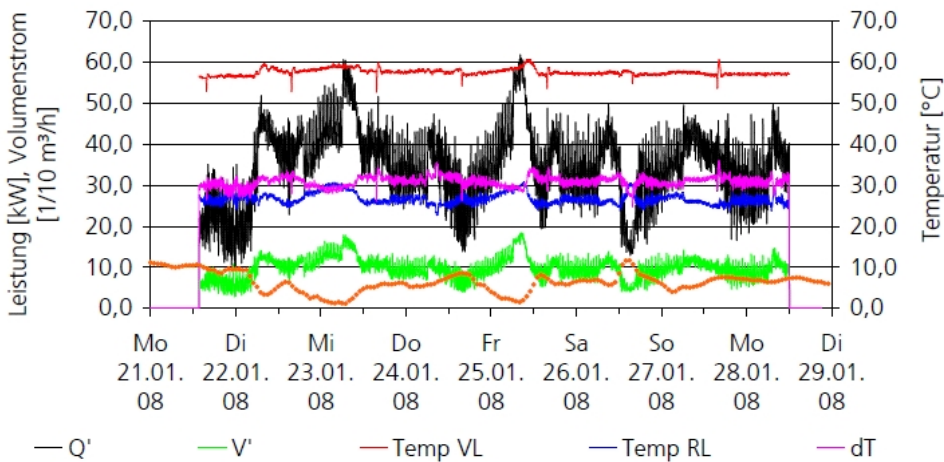


Abbildung 2.10: Die Wärmeversorgung der OP-Säle zeigt überwiegend hohe Temperaturdifferenzen

Die Beheizung von Intensivbettenstationen hingegen ist von den durchgehenden Nutzungszeiten und einem permanenten Betrieb der Lüftungsanlagen bestimmt. Abbildung 2.11 zeigt die Wärmemengenmessung einer Intensivstation und den direkten Zusammenhang zwischen der Außentemperatur und der Heizleistung. Weiterhin ist zu sehen, dass die Rücklauftemperatur unter 20 °C abgesenkt wird, so dass ein sehr niedriger Pumpstrombedarf erzielt wird.

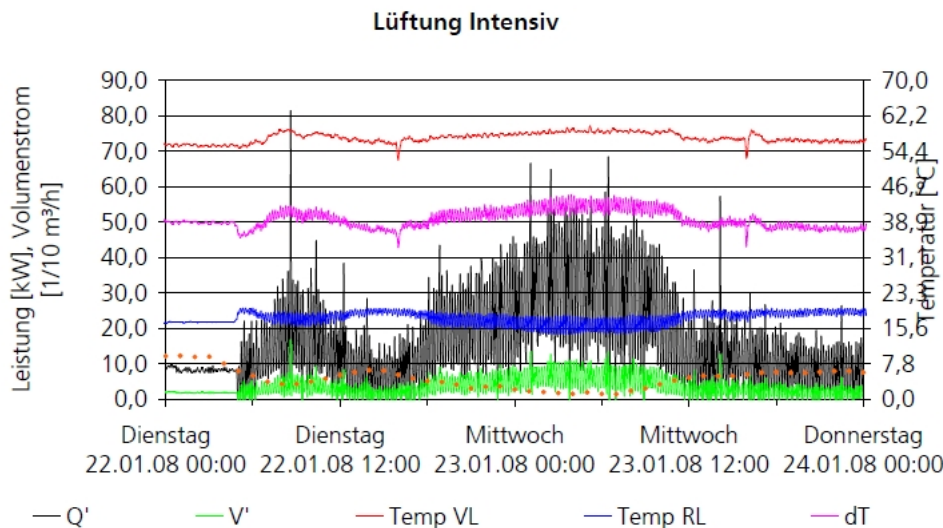


Abbildung 2.11: Direkter Zusammenhang zwischen Heizleistung einer Intensivstation und der Außentemperatur

2.1.4 Vergleich und Best-practice-Lösung

Aus den Energiemengenmessungen von Fraunhofer UMSICHT und den Bestandsdaten der Krankenhäuser wurden die Einflussgrößen in vergleichbare Kennziffern umgewandelt und in einem Boxplot-Diagramm (nähere Erläuterung s. Anhang) dargestellt. Der Gesamtheit der Krankenhäuser sind das Krankenhaus mit dem geringsten flächenbezogenen Heizwärmebedarf $q_{\text{Heiz-ges-mess}}$ (Bestes KH) und ein Krankenhaus mit vergleichsweise hohem spezifischen Heizwärmebedarf gegenübergestellt.

In Abbildung 2.12 sind auf der Basis der Wärmemengenmessungen in den Krankenhäusern die flächenbezogenen Wärmeverbrauchswerte auf das Testreferenzjahr Essen/Mülheim dargestellt. Die Werte beinhalten nur den Heizwärmebedarf ohne den Warmwasserbedarf. Aufgrund der guten Kompaktheit wird trotz teilweiser alter Dämmstandards ein flächenbezogener Heizwärmebedarf von $110 \text{ kWh/m}^2\text{a}$ (Mitte der Werte) erzielt. Deutlich wird der hohe Wärmebedarf in den mechanisch belüfteten Bereichen insbesondere für OP-Flächen. Das rot dargestellte Krankenhaus hat hohe Verbrauchswerte besondere im OP-Bereich. Durch einen sehr guten Wärmepreis (Fernwärme) werden die Energiekosten abgefangen. Die Energiemengenmessungen ergaben Heizkosten von ca. $6,7 \text{ €/m}^2\text{a}$ für das gesamte Krankenhaus, in mechanisch belüfteten Bereichen sind sie doppelt so hoch und von OP-Sälen liegen sie bei 90 €/m^2 . Für die Gesamtheizkosten ist die Breite der Werte deutlich geringer als für die Einzelbereiche OP, BH und Lüft. Ein großes wirtschaftliches, wenn auch nicht energetisches Potenzial bieten zumindest im Vergleich die Wärmepreise.

Vergleich 1 Wärmeversorgung

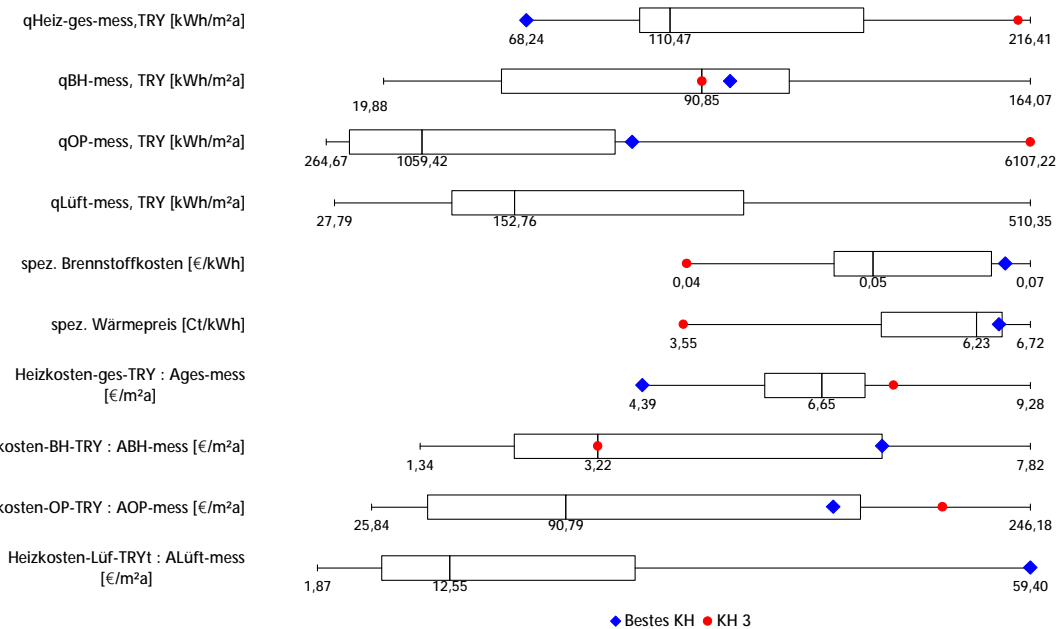


Abbildung 2.12: Wärmeversorgung Vergleich1 – spez. Wärmemengen und Heizkosten

In Abbildung 2.13 sind die Gebäudekennzahlen der Untersuchung dargestellt. Es zeigt sich eine sehr große Kompaktheit von 0,22 (Mitte der Werte/Median) der Krankenhäuser, die allerdings zwischen den Krankenhäusern sehr stark schwanken kann. Zu beachten ist, dass das Krankenhaus mit höchsten Heizwärmeverbrauchswerten einen sehr großen Anteil an mechanisch belüfteter Fläche sowie eine große OP-Fläche zu versorgen hat. Gleichzeitig besitzt es einen im Vergleich sehr guten U-Wert und eine mittlere Kompaktheit.

Vergleich 2 Wärmeversorgung

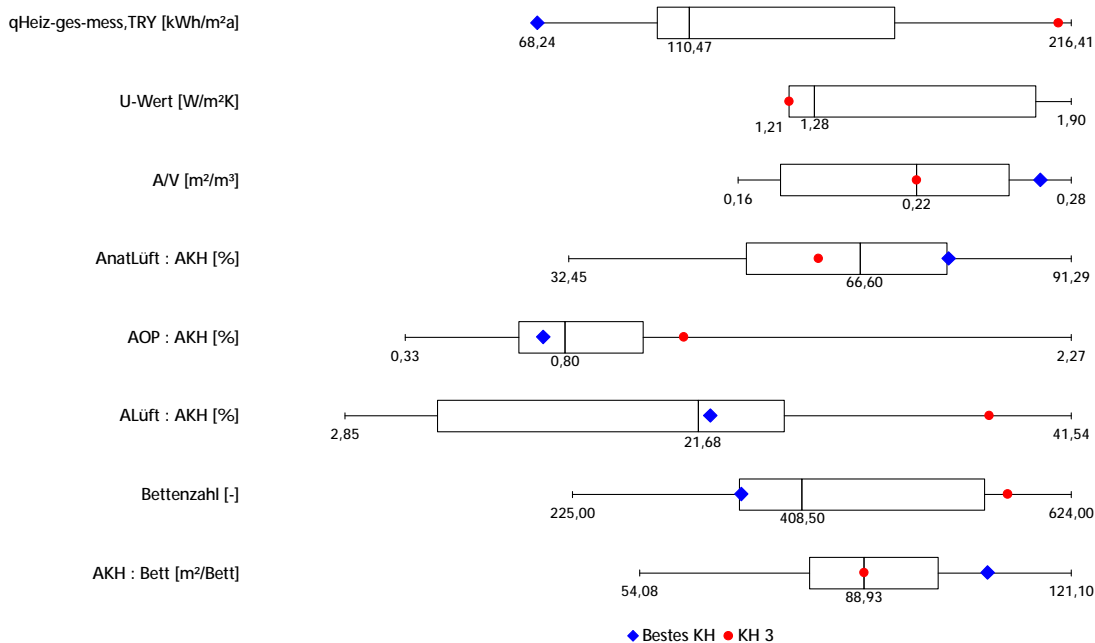


Abbildung 2.13: Wärmeversorgung Vergleich 2 - Gebäudekennzahlen

In Abbildung 2.14 sind die Kennwerte dargestellt, die den Betrieb und die Eigenschaften der Heizanlage beschreiben. Die hohe maximale Vorlauftemperatur der Krankenhäuser ist eine Fernwärmeversorgung, die auch zur Dampferzeugung verwendet wird. Entsprechend hoch ist auch die mittlere Auskühlung dT_m . Mit $65,95\text{ °C}$ liegt die mittlere Rücklauftemperatur T_{RL} relative hoch, was auf die alten Heizungsverteilsysteme zurückzuführen ist. Durch ein Energie- und Speichermanagement (s. Kapitel 2.1.4) kann trotz der alten Verteilsysteme der Wirkungsgrad der Kesselanlagen durch Einsatz von Brennwertkesseln deutlich verbessert werden (s. Abbildung 2.15). In vielen Krankenhäusern kann durch eine optimierte Temperaturdifferenz dT_m der Pumpstrombedarf deutlich reduziert werden. Die Vollbenutzungsstunden können durch geringere Kesselleistungen verbessert werden. Anhand er Lastgangmessungen wurde die Heizleistung als Funktion der Außentemperatur dargestellt und eine Heizleistung $Q'_{extrap,max}$ für den Auslegungsfall von -10 °C ermittelt. Trotz möglicher Messungenauigkeiten und der Abhängigkeit der Messung von den Klimabedingungen im Messzeitraum deuten die ermittelten Werte auf durchgehend überdimensionierte Heizkessel hin.

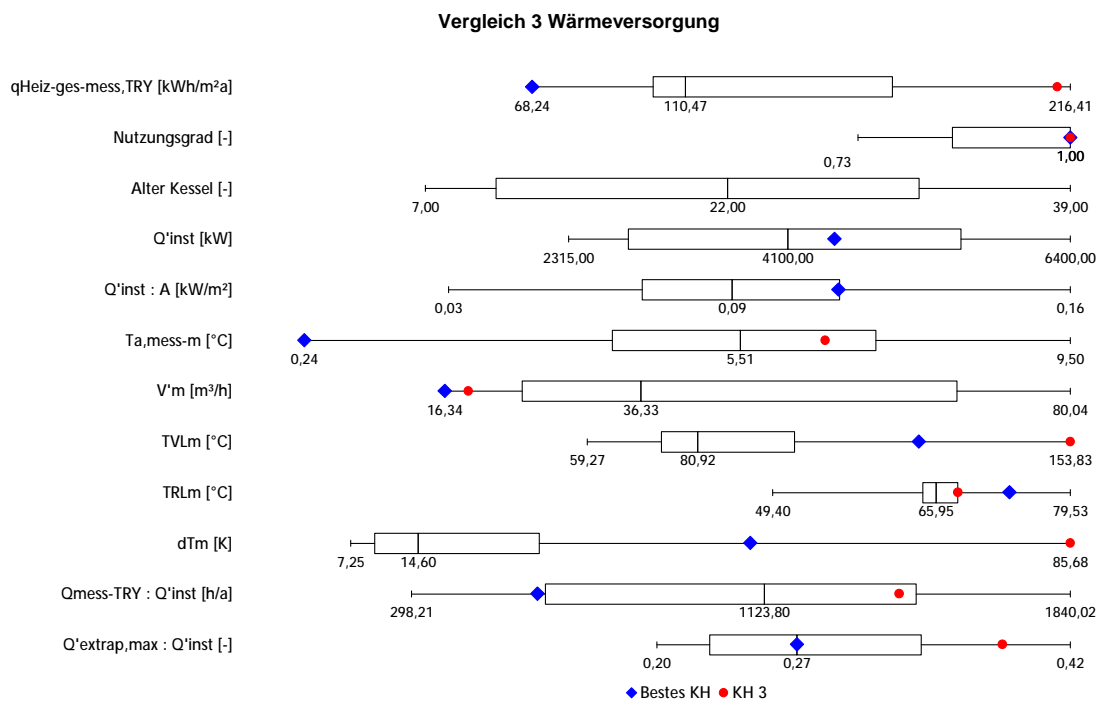


Abbildung 2.14: Wärmeversorgung Vergleich 3 – Heizanlagen-Kennwerte

Sofern Gebäudepläne mit einer Zuordnung von Flächen zu den Nutzungsgruppen OP-Säle, mechanisch belüftete Flächen wie z.B. Behandlungsräume, Röntgenabteilungen, Sterilisation, Küchen, innenliegende Räume usw. sowie zu Intensivstation und natürlich belüftete Bereiche vorlagen, wurden Referenzwerte für die Transmissions- und Lüftungswärmeverluste berechnet. Dabei wurde den Gebäuden anhand des Baualters ein Wärmedämmstandard zugeordnet [Log05] und auf der Basis von Praxiswerten und Literaturwerten [Hol08] flächenbezogene Luftwechselraten und innere Lasten berechnet. Mit Hilfe der solaren Einstrahlzahlen und einer Abschätzung der Fensterflächen und ihrer Orientierung wurde außerdem die solare Einstrahlung ermittelt. In Abbildung 2.15 sind dem gemessenen Heizwärmebedarf die theoretischen Referenzwärmeverbräuche gegenübergestellt. Damit lässt sich ermitteln, ob es Einsparpotenziale gibt und welche Bereiche für einen hohen Wärmeverbrauch verantwortlich sein können. Für das rot markierte Krankenhaus beispielsweise haben die Lüftungswärmeverluste einen hohen Anteil am Gesamtreferenzwärmebedarf. Gleichzeitig lässt qges-ref-Lüft für dieses Krankenhaus einen hohen Lüftungswärmeverlust vermuten. Das beste Krankenhaus des Vergleichs (Abbildung 2.15, blaue Markierung) hat hingegen, bezogen auf die Fläche, einen geringen gemessenen Wärmeverbrauch sowie einen hohen Referenzwärmebedarf. Die berechnete Referenzwärmemenge wird zum überwiegenden Teil durch die Transmissionswärmeverluste bestimmt, die im Vergleich zu den anderen Krankenhäusern des Projektes sehr hoch ausfallen. Da das Krankenhaus 1930 erbaut wurde, kann daraus gefolgert werden, dass der reale

Transmissionswärmeverlust durch Sanierungsmaßnahmen bereits deutlich verringert wurde. Weiterhin wurde für alle Krankenhäuser abgeschätzt, wie groß das Potenzial ist, Pumpstrom einzusparen. Dabei wurden Krankenhäuser mit einer Fernwärmeversorgung von Krankenhäusern mit einer Kesselanlage unterschieden. Mit Hilfe des weiter oben dargestellten Diagramms zur Beurteilung der Pumpstromkosten können die jährlichen Kosten abgeschätzt werden. Weiterhin wurde für jedes Krankenhaus abgeschätzt, welches Einsparpotenzial der Einsatz eines Brennwertkessels mit einem Nutzungsgrad von 95 % bietet. Diese Versorgungsvariante kann mit der weiter unten vorgestellten Best-practice-Lösung auch im Gebäudebestand realisiert werden. Mit den berechneten Heizwärmeverbräuchen und dem aktuellen Wärmepreis können zudem die erzielbaren Heizkosteneinsparungen ermittelt werden.

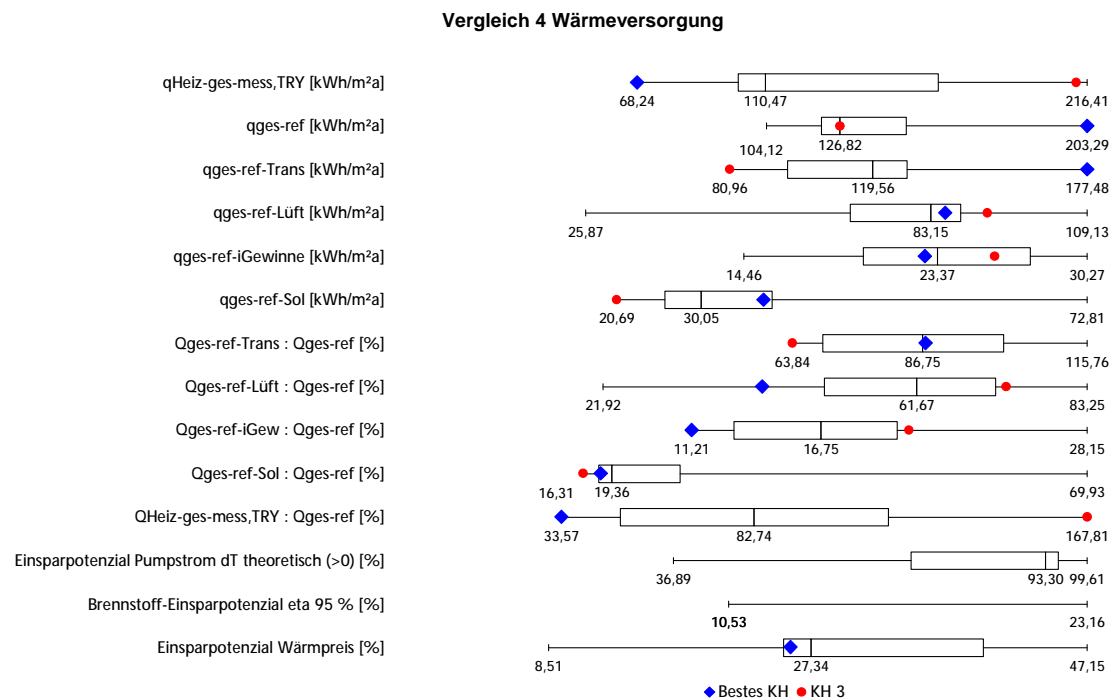


Abbildung 2.15: Wärmeversorgung Vergleich 4 – Kennzahlen Referenzwärme und Einsparpotenziale

Best-practice-Lösung: Energie- und Speichermanagement

Durch eine neue Technologie zum effizienten Energie- und Speicher-Management kann der Nutzungsgrad der Heizkesselanlage auf 95 % angehoben werden. Dazu werden Brennwertkessel eingesetzt und die Speicher der TWE durch eine direkte TWE und Speicher im Heizkreis ersetzt. Gegenüber herkömmlichen Niedertemperaturkesseln ergibt sich daraus ein Potenzial zur Energieeinsparung und Kostensenkung von ca. 10 %, der Austausch eines Festtemperaturkessels führt sogar auf eine Einsparung von über 20 %. Das System macht sich zu Nutze, dass zum einen vor allem alte Heizungsanlagen deutlich überdimensioniert sind und zum anderen die maximale Heizleistung nur wenige Stunden des Jahres erforderlich ist. Die übrige Zeit kann die Heizsystemtemperatur deutlich niedriger betrieben werden als im Auslegungspunkt. Durch die abgesenkte Vorlauftemperatur ist es möglich, auch in alten Heizungssystemen Brennwerttechnologie einzusetzen. Durch das Energie- und Speichermanagement wird weiterhin der Anlagenbetrieb soweit optimiert, dass sich daraus ein hoher Nutzungsgrad ergibt.

Zur Optimierung der Betriebsparameter und der Auslastung der Heizleistung baut diese Technologie auf eine Warmwasserversorgung im Durchflussprinzip auf. Wird Warmwasser von den Abnehmern angefordert, erwärmt ein Wärmetauscher direkt das angeforderte Kaltwasser, ohne es anschließend zu speichern. Da die Warmwassererzeugung hohe Heizleistungen für kurze Zeit benötigt, wird in dieser Zeit die Heizwärme aus einem Wärmespeicher im Heizkreis geliefert. Dadurch dass der Trinkwarmwasserspeicher durch einen Heizwasserspeicher ausgetauscht wird, wird die

Heizlast deutlich harmonisiert, so dass weniger Lastschwankungen auftreten und der Anlagenbetrieb optimiert wird. Weiterhin hat die direkte Trinkwarmwassererzeugung zur Folge, dass keine Trinkwarmwassermengen in großen Speichern über lange Zeit ruhen. So wird das Risiko, dass im Trinkwassersystem Legionellen entstehen und sich verbreiten, deutlich gesenkt. Durch eine so genannte Legioex-Erweiterung kann die Gefahr der Legionellen weiter gesenkt werden: in einem Behälter mit minimiertem Volumen wird das Trinkwarmwasser über eine Zeit von 3 Minuten auf 70 °C erhitzt und so desinfiziert. Der hohe Energieverbrauch durch zu hohe Temperaturen im Trinkwarmwassersystem, wie sie in den Krankenhäusern weit verbreitet sind, kann dadurch vermieden werden.

Ein weiterer Effekt des Energie- und Speichermanagements ist die Reduktion der Leistungsspitzen, so dass die Heizleistung gesenkt werden kann. Dadurch können die Investitionskosten für die Heizkessel gesenkt werden und die Zusatzkosten für das Managementsystem teilweise abgefangen werden. Im Falle einer Fernwärmeversorgung können zudem die Anschlussleistung und die Kosten für die Heizleistung gesenkt werden. Anlagen zum Energie- und Speichermanagement werden für Kesselanlagen und Fernwärme-Anschlussstationen angeboten und bestehen aus vier Modulen: dem Heizungsmodul, dem Speicher-Lademodul, dem Verteilerkreis mit Pumpe und der Trinkwassererwärmungsanlage. In der nachfolgenden Abbildung 2.16 ist das Grundprinzip einer solchen Anlage mit der direkten TWE und der Speicherung im Heizkreis schematisch dargestellt.

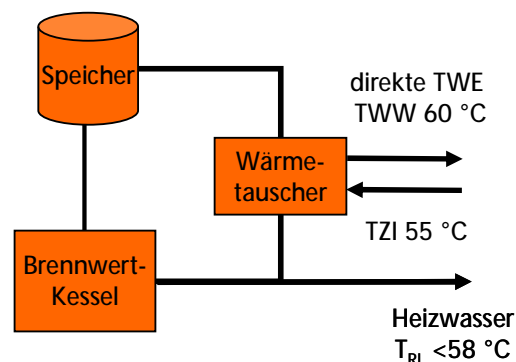


Abbildung 2.16: Grundprinzip einer kombinierten Trinkwarmwassererzeugung und gleichzeitigen Heizung

Da im Sommer und Winter der Heizbedarf variiert, werden je nach benötigter Heizleistung mindestens zwei energieeffiziente Brennwertkesselmodule installiert. In den Sommermonaten, bei Temperaturen über 18 °C, genügt der Betrieb eines Kessels, und im Winter wird der zweite Kessel hinzugeschaltet. Dadurch kann der Kesselbetrieb entsprechend der aktuellen Heizlastsituation optimiert werden. Neben der Verbesserung der Kesseffizienz um bis zu 30 % gegenüber konventionellen Kesselanlagen wird auch der Pumpstrombedarf deutlich reduziert.

Ein Kostenbeispiel: In einem Krankenhaus mit einem spezifischen Heiz- und Warmwasserbedarf von 200 kWh/m²a und einer beheizten Fläche von 10 000 m² ergibt sich ein Energieverbrauch von 2 Mio. kWh/a. Unter Annahme eines Brennstoffpreises von 10 Ct/kWh ergeben sich für einen alten Heizkessel, wie er in Krankenhäusern noch zu finden ist, jährliche Energiekosten von ca. 320 000 €. Durch Einsatz des Energiespeichermanagementsystems mit zwei Brennwertkesseln und einer Trinkwarmwassererwärmung nach dem Durchflussprinzip können die Kosten um ca. 110 000 € pro Jahr reduziert werden, so dass sich eine Amortisationszeit von 1 Jahr ergibt. Der Austausch von Anlagen mit Niedertemperaturkesseln ergibt eine Kosteneinsparung von 25 000 € pro Jahr. Wird eine Fernwärmeversorgung umgerüstet können die monatlichen Anschlusskosten reduziert werden. Praxiserfahrungen haben gezeigt, dass die Heizleistung selbst nach einer Sanierung weiter um fast 50 % abgesenkt werden kann. Bei einem Leistungspreis von 50 € pro kW und Jahr und einer Heizleistung von 1 000 kW ergibt sich durch eine Reduktion der Heizleistung um 500 kW eine Kostenersparnis von 25 000 € pro Jahr. Das Einsparpotenzial durch den erhöhten Wirkungsgrad wurde für alle Krankenhäuser berechnet und in Abbildung 2.15 dargestellt.

2.2 Warmwasserversorgung

2.2.1 Versorgungsstruktur

Die Erzeugung von Trinkwarmwasser TWW in Krankenhäusern erfolgt entweder in Speichersystemen oder Speicherladesystemen als Kombination aus Speicher- und Durchflusssystem. Warmwasser wird überwiegend zum Waschen und Duschen, aber auch für Sonderanwendungen wie Schwimmbäder eingesetzt. Die Wärmeversorgung des Trinkwassersystems erfolgt über das zentrale Heizungssystem (Kesselanlage oder Fernwärme). Die Versorgungsstruktur der Trinkwarmwassererzeugung TWE kann dezentral in kleinen Anlagen, beispielsweise für jedes Gebäude erfolgen, oder in einer zentralen großen Anlage. Dezentrale Anlagen werden über das Rohrleitungssystem des Heizungssystems versorgt. Um auch ohne Wasserabnahme durchgehend warmes Wasser an den Entnahmestellen zu haben, sind Zirkulationsleitungen installiert, durch die durchgehend Warmwasser zwischen Warmwassererzeuger und Entnahmepunkt im Kreis geführt wird. Durch die Zirkulation entstehen hohe Wärmeverluste und ein durchgehender Strombedarf zum Betrieb der Zirkulationspumpen.

Die Trinkwasserversorgung muss zum einen den Warmwasserbedarf decken, zum anderen muss sie dafür sorgen, dass die vorgeschriebenen hygienischen Anforderungen eingehalten werden. Hauptaugenmerk liegt dabei bei der Vermeidung von Legionellen im Trinkwassersystem. Anforderungen an die Trinkwassererwärmung finden sich in der DIN 1988-3 und im DVGW-Arbeitsblatt W551. Zur Vermeidung von Legionellen sind Warmwassertemperatur über 60 °C und eine maximale Abkühlung zwischen Warmwassertemperatur und Zirkulationstemperatur von 5 K vorgeschrieben.

2.2.2 Einflussgrößen und Einsparmaßnahmen

Einen wesentlichen Einfluss auf den Wärmebedarf der Warmwasserversorgung haben Abnehmerstruktur und -verhalten. Der Warmwasserbedarf entsteht sowohl in den Patientenzimmern als auch in den Funktionsbereichen durch Händewaschen, Duschen und Baden sowie zu Reinigungszwecken. Sondernutzer kann eine Bäderabteilung mit einem Schwimmbad sein. Da das Nutzerverhalten kaum oder gar nicht zu ändern ist, kann der Warmwasserverbrauch in diesem Bereich hauptsächlich durch Einsatz effizienter Armaturen reduziert werden.

Wesentlich mehr Möglichkeiten zur Energieeinsparung bietet die Erzeugung und Verteilung von Trinkwarmwasser. Ein wesentlicher Punkt sind dabei die Systemtemperaturen. In vielen Krankenhäusern liegen die TWW-Temperaturen deutlich höher als die vorgeschriebenen 60 °C, so dass sich der Wärmeverbrauch deutlich erhöht. Ursache hierfür ist das Risiko der Legionellenbildung und -ausbreitung, das durch höhere Temperaturen vermieden werden soll. Das Legionellenproblem wird weiter durch oftmals deutlich überdimensionierte Speichervolumina verschärft, da mit zunehmendem Volumen eine vollständige Durchspülung erschwert wird. Dadurch kann es zu Zonen kommen, die nicht heiß genug sind und wo kein Wasseraustausch stattfindet. Ein weiterer Faktor für die Wärmeverluste ist die Wärmedämmung der Rohrleitung. Einerseits ist die Temperaturdifferenz zwischen WW-Vorlauf und Zirkulationsleitung ein Maß für die Wärmeverluste, andererseits kann bei entsprechend hohem Volumenstrom die Auskühlung trotz hoher Wärmeverluste über das Rohrleitungssystem unterhalb von 5 K bleiben. Eine ausreichende Wärmedämmung der Rohrleitungen, wie im Kapitel Wärmeversorgung beschrieben, ist eine Maßnahme sowohl die Energieverluste als auch das Risiko der Legionellenbildung zu minimieren. Gerade die Zirkulationsleitungen können erheblich zum Wärmebedarf der TWE beitragen. Auch die Wärmedämmung insbesondere großer Wärmespeicher sollte überprüft und gegebenenfalls verbessert werden. Außerdem sollten die Speichervolumina auf ein Minimum reduziert oder, wenn möglich, in Teilen außer Betrieb genommen werden. Eine weitere Einsparmöglichkeit bietet die Aufteilung der Aufheizung in einen warmen Bereich mit 60 °C und einen heißen Bereich mit 70 °C, für den ein weiterer Wärmetauscher im oberen Teil des Speichers vor dem Entnahmepunkt installiert wird (Thermo-S-System). Dadurch werden die Hygiene verbessert, der Wärmeverluste verringert und die Zeiten zwischen der Heizanforderung

durch den Speicher verlängert, so dass die Heizlast des Heizkessels harmonisiert wird. Außerdem wird durch die Temperaturschichtung im Speicher eine bessere Auskühlung des Heizwarmwassers erzielt. Der Entnahmewirkungsgrad kann dadurch auf 99 % angehoben werden. In herkömmlichen Anlagen hingegen gehen bis zu 15 % des Wärmeinhalts verloren, bei alten Anlagen sind es sogar bis zu 40 %. [Frö04]

Durch eine exakte Dimensionierung von TWE-Systemen können Legionellenprobleme und Energieverluste minimiert werden. Dabei kommt es auf die richtige Wahl des Speichervolumens und der Heizleistung an, die an die Eigenschaften des Objektes angepasst sein müssen. Für die richtige Auslegung können Tagessummenkurven für eine Woche erstellt werden. Sie zeigen wie sich der Verlauf der Wasserentnahme entwickelt. Anhand der Steigung des ungünstigsten Tagesverlaufes können die Wärmeübertragerleistung und das Speichervolumen bestimmt werden. [Sch08b]

Eine weitere Möglichkeit sowohl die Energieeffizienz der TWE zu erhöhen als auch das Legionellenrisiko zu minimieren, bietet das Energie- und Speichermanagementsystem, das im Abschnitt 2.1 erläutert wird. Dabei wird das Trinkwarmwasser nicht gespeichert, sondern direkt bei Warmwasserbedarf über einen Wärmeübertrager auf die erforderliche Temperatur gebracht. Zur weiteren Reduzierung der Legionellenzahl wird in einem Behälter mit kleinem Volumen das erhitzte Warmwasser mindestens 3 Minuten bei 70 °C gehalten, bevor es zum Verbraucher geleitet wird. Dadurch werden gleichzeitig die Speicherverluste vermieden.

Bei der Auslegung und dem Betrieb von Speicherladesystemen ist zu beachten, dass sich Speicherladung und Zirkulation beeinflussen. Durch einen zu großen Zirkulationsvolumenstrom wird die Schichtung des Speichers zerstört. Erst wenn der Zirkulationsvolumenstrom deutlich kleiner ist als der Warmwasservolumenstrom besteht die Möglichkeit bei guter Strömungsführung im Speicher eine Schichtung zu erzielen. Die Ursache für einen hohen Zirkulationsvolumenstrom können hohe Wärmeverluste über das Rohrleitungssystem sein, da durch einen hohen Volumenstrom die Auskühlung unterhalb der vorgeschriebenen 5 K gehalten werden soll. Daraus ergibt sich eine durch die Zirkulationstemperatur begrenzte maximale Speichertemperatur. Schwankende Speichertemperaturen können ebenfalls darauf hindeuten, dass die Strömung im Speicher nicht günstig ist und die Schichtung nicht aufrecht gehalten werden kann. Das Problem kann durch einen separaten Wärmetauscher gelöst werden, der den Zirkulationsvolumenstrom vor Eintritt in den Speicher erhitzt. [Mai03].

2.2.3 Energiemengenmessungen

Es wurden in 18 Krankenhäusern Wärmemengenmessungen an der TWE durchgeführt. Während zumeist die gesamte TWE erfasst werden konnte, war es in vier Krankenhäusern nur möglich, die Versorgung eines Bettenhauses zu erfassen. In zwei Krankenhäusern war keine Bilanzierung möglich. Anhand der Messungen wurden die Betriebsparameter, die Wärmemengen sowie das Lastverhalten analysiert. Weiterhin konnten anhand der Messungen fehlerhafte Betriebsweisen wie eine ineffiziente Zwischenerwärmung sowie eine in die falsche Richtung fördernde Pumpe festgestellt und behoben werden.

Die Energiemessungen haben sowohl Einsparpotenziale aufgezeigt als auch Planungsgrundlagen für den Austausch bestehender Anlagen geliefert. Ein Beispiel für hohe Systemtemperaturen, die zu hohen Energieverlusten führen, ist in Abbildung 2.17 zu sehen. Die Vorlauftemperatur liegt durchgehend über 70 °C, zeitweise sogar über 80 °C. Die Temperaturdifferenz liegt bei 8 K und entspricht nicht den vorgeschriebenen 5 K. Die hohen Wärmeverluste werden durch den deutlich überdimensionierten Speicher verstärkt.

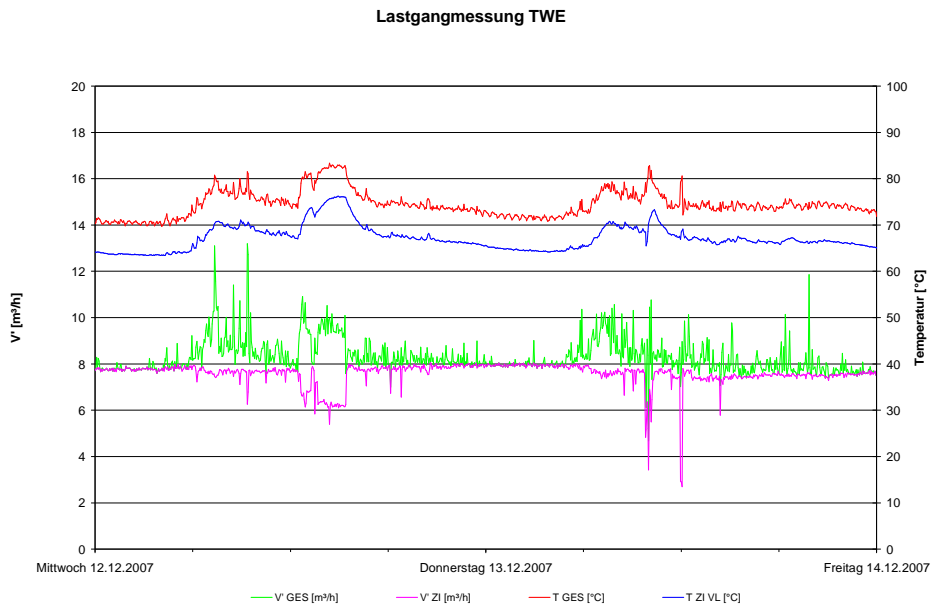


Abbildung 2.17: Zu hohe Systemtemperaturen führen zu hohen Energieverlusten

Die TWE muss wirtschaftlichen und hygienischen Anforderungen genügen. In Abbildung 2.18 ist ein Beispiel zu sehen, bei dem die erforderlichen Mindesttemperaturen deutlich unterschritten werden: die Vorlauftemperatur liegt unter 50 °C. Die Temperaturdifferenz beträgt durchschnittlich 2,2 K, so dass der Volumenstrom und damit die Pumpstromkosten deutlich reduziert werden können.

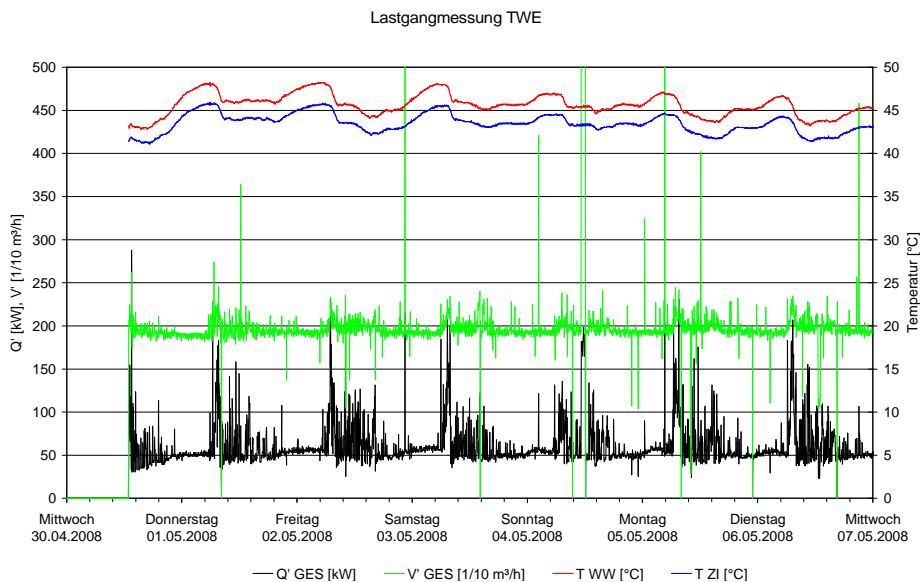


Abbildung 2.18: Zu niedrige Warmwassertemperaturen erhöhen die hygienischen Risiken

Aus den Temperaturen und den Volumenströmen wurden die Heizleistungen für die Zirkulationsverluste Q'_{ZI} und die Erwärmung des Frischwassers Q'_{FW} ermittelt. In Abbildung 2.19 ist zu sehen, dass die Zirkulationsverluste einen hohen Anteil am Gesamtenergieverbrauch der TWE haben. Neben den Energiekosten führen hohe Zirkulationsverluste auch zu einem höheren Risiko der Legionellenvermehrung.

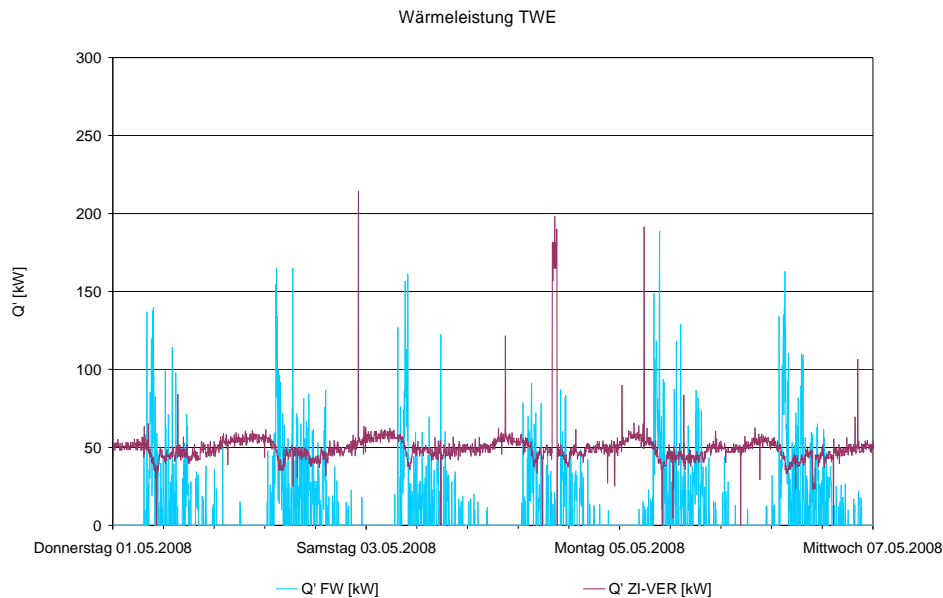


Abbildung 2.19: Die Heizleistung für die Zirkulation hat einen großen Anteil am Energieverbrauch

Auf der Basis der Volumenstrommessungen wurden anschließend Tagessummendiagramme erstellt (Abbildung 2.20). Anhand des ungünstigsten Tagesverlaufes und der maximalen Steigung können der maximale Tages-Warmwasserbedarf ermittelt und die Auslegung der Wärmeübertrager und des Speichervolumens durchgeführt werden. Die dargestellten Summenlinien zeigen einen maximalen Wasserbedarf von 4,22 m³/h. [Sch08b]

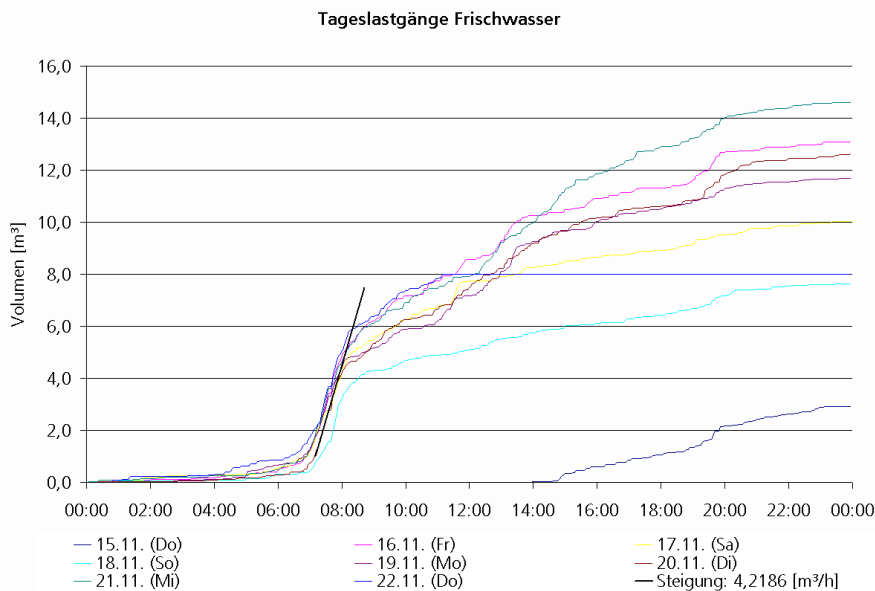


Abbildung 2.20: Tagessummendiagramme – die Steigung zeigt den maximalen Frischwasserbedarf

2.2.4 Vergleich und Best-practice-Lösung

Aus den Messergebnissen und den Bestandsdaten wurde ein Vergleich in Form von Boxplots erstellt (Abbildung 2.21). Der Vergleich zeigt, dass die Warmwassertemperatur TWW bei den meisten Krankenhäusern im Bereich von 61 °C liegen. Die Temperaturdifferenz zwischen Warmwasser und Zirkulation liegt nur bei wenigen Krankenhäusern bei 5 K und zeigt eine große Streubreite: für $dT=1,61$ K kann der Pumpstrombedarf der Zirkulation deutlich reduziert werden, ein dT von 14,44 K ist weit oberhalb der zulässigen 5 K. Sowohl bei der Heizleistung Q'_{TWE} als auch beim Frischwasserbedarf V'_{FW} der TWE gibt es große Unterschiede zwischen den Krankenhäusern. Eben-

falls eine große Spannbreite zeigt das Speichervolumen. Die TWE der Krankenhäuser (Mitte der Werte) verursacht 0,86 €/m²a jährliche Kosten und benötigt eine Heizleistung von 267 kW.

Das dargestellte KH 16 hat sehr schlechte Werte im Vergleich und hat mit

- 20 m³ den größten Speicher,
- 63,6 °C ein leicht erhöhtes TWW
- 9 K eine deutlich zu große Auskühlung dT
- 0,52 kW/Bett den größten Heizleistungsbedarf Q'_{TWE}, aber nur einen geringen Warmwasserbedarf pro Planbett
- 3,35 €/m²a die höchsten Heizkosten pro Krankenhausfläche.

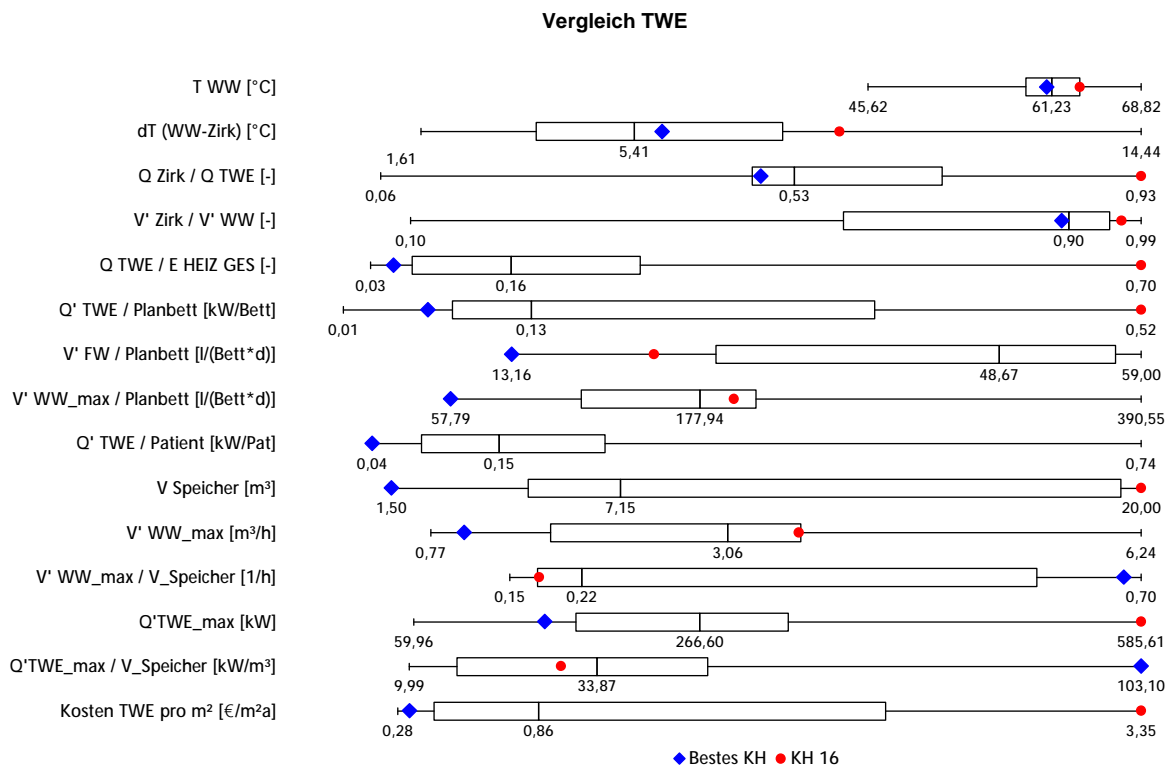


Abbildung 2.21: Vergleich TWE aller KH mit dem besten und einem schlechten KH

Viele Maßnahmen zur Optimierung des Energieverbrauchs der TWE können ohne oder mit nur geringen Investitionen durchgeführt werden (Einstellung der Temperaturen, der Volumenströme, Dämmung von Speicher und Rohrleitungen). Als Best-practice-Lösung wurde das Energie- und Speichermanagementsystem aus Kapitel 2.1.4 gewählt, da auf diese Weise sowohl der Heizenergiebedarf optimiert als auch das Risiko der Legionellenvermehrung abgesenkt werden kann.

2.3 Lüftungsanlagen

2.3.1 Versorgungsstruktur

In Krankenhäusern hat der Stromverbrauch einen Anteil von 20 % am gesamten Energieverbrauch und verursacht ca. 50 % der Energiekosten [Dic09]. Aufgrund der Vielzahl an Lüftungsanlagen und der hohen Lüfterlaufzeiten sind RLT-Anlagen für einen Großteil des Stromverbrauchs verantwortlich, so dass Effizienzmaßnahmen zu großen Einsparungen führen können. Viele Einsparpotenziale können ohne oder mit geringen Investitionen erschlossen werden. Bei den Krankenhäusern, die Angaben zu den Lüftungsanlagen machen konnten, lagen die installierte Lüfterleistung bei 40-830 kW_{el} und der Luftvolumenstrom der RLT-Anlagen zwischen 73 000 und 468 000 m³/h.

RLT-Anlagen in Krankenhäusern haben die Aufgabe, eine hygienisch einwandfreie sowie angenehm temperierte und feuchtigkeitsoptimierte Raumluft zu garantieren. In Abhängigkeit von der Raumnutzung sind in der DIN 1946 Teil 4/(12-2008) die Anforderungen an Luftwechsel sowie an Raumtemperatur und -feuchte festgelegt. Aufgrund der hohen hygienischen Anforderungen oder der hohen thermischen Lasten sind für einige Krankenhausbereiche RLT-Anlagen vorgeschrieben. Mechanisch belüftet werden insbesondere Intensivstationen und Operations-/Kreißsäle, aber auch Behandlungsräume, innenliegende Räume, Küchen und Bäderabteilungen. Die Außenluft wird zunächst gefiltert, erwärmt, entfeuchtet und über einen Ventilator in den belüfteten Raum eingebracht. Als RLT-Anlagen werden in den Krankenhäusern Einkanal-Nur-Luft-Klimaanlagen mit variablem und konstanten Volumenstrom und Luft-Wasser-Klimaanlagen mit örtlichen Nachwärmern oder Kühlern eingesetzt.

Im OP müssen sehr hohe hygienische Standards eingehalten werden. Der Temperaturbereich liegt zwischen 19 und 26 °C, der Mindestaußenluftvolumenstrom beträgt im Operationsbereich 1 200 m³/h, in den Nebenräumen 15 m³/(m²h) und die relative Luftfeuchtigkeit darf maximal 65 % und minimal 30 % betragen. Diese Anforderungen gelten für die Betriebszeiten. Während der Ruhezeiten kann die Lüftung heruntergefahren werden.

Bei einer Intensivstation variieren die Einstellungen je nach Behandlungsart. In dem Bereich für infektionsgefährdete Patienten muss ein Mindestaußenluftvolumenstrom von 30 m³/(m² h) eingehalten werden, in den anderen Bereichen genügen 15 m³/(m² h). Bezüglich der relativen Luftfeuchtigkeit gelten die gleichen Anforderungen wie im OP. Der Temperaturbereich erstreckt sich von 24 bis 26 °C. Da die Patienten 24 Stunden am Tag versorgt werden müssen, kann der Volumenstrom nachts nicht abgesenkt werden. Für ein Bettenhaus und für Behandlungsräume gelten die gleichen Grenzwerte wie bei einer Intensivstation ohne infektionsgefährdete Patienten.

2.3.2 Einflussgrößen und Einsparmaßnahmen

Die Leistung eines Lüfters ergibt sich aus dem Luftvolumenstrom, dem Druckabfall über die Kanal-länge sowie dem Lüfterwirkungsgrad:

$$P = \frac{\dot{V} \cdot \Delta p}{h_{ges}} \quad \text{Formel 2.1}$$

Da der Druckverlust mit der Luftgeschwindigkeit quadratisch zunimmt, ergibt sich wie bei Pumpen eine Abhängigkeit der Lüfterleistung und damit des Strombedarfes von der Strömungsgeschwindigkeit in der dritten Potenz. Praktisch bedeutet dies, dass eine Halbierung der Luftgeschwindigkeit zu einer Einsparung von ca. 87 % des Lüfterstroms führt. Da nach [Kob09] bei heutigen RLT-Anlagen typische Luftgeschwindigkeiten bei 2 bis 2,5 m/s liegen, verursachen alte Anlagen, die durchaus noch auf 5 m/s ausgelegt sein können, einen 8fachen Stromverbrauch.

Da die Luftmenge durch Vorschriften nach Raumnutzung unterschieden festgelegt ist, kann die Strömungsgeschwindigkeit durch Einstellung der Minimalanforderungen sowie durch große Strömungsquerschnitte minimiert werden. Der Zusammenhang zwischen der Lüfterleistung und der Strömungsgeschwindigkeit ist in Abbildung 2.22 dargestellt. Es wird von einem typischen Volumenstrom einer Intensivstation von 1,36 m³/s ausgegangen. Für diesen wird die Lüfterleistung in Variation von Strömungsgeschwindigkeit und Strömungsquerschnitt berechnet und auf eine Referenzleistung bezogen. In diesem Fall ist dies die geringste Leistung bei der kleinsten Geschwindigkeit und dem größten Strömungsquerschnitt.

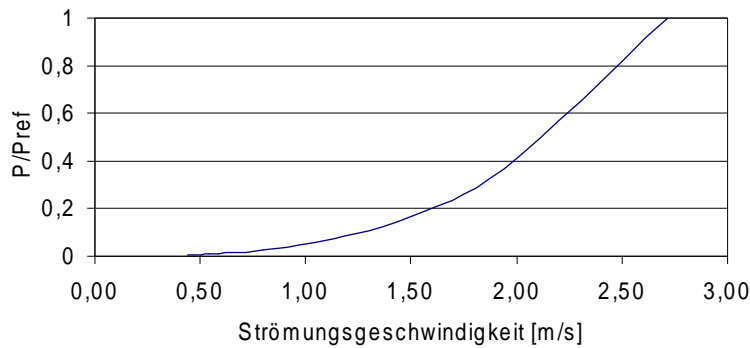


Abbildung 2.22: Lüfterleistung in Abhängigkeit der Strömungsgeschwindigkeit bei konstantem Volumenstrom

Neben dem Kanalquerschnitt kann durch Minimierung von Rohrreibungsbeiwert, -länge und -verlauf während der Planung von Lüftungsanlagen die Luftgeschwindigkeit reduziert werden. Eine weitere Maßnahme den Druckverlust zu minimieren ist der Einsatz von Filtern mit einer Drucküberwachung. Bei Überschreitung eines Grenzdrucks wird ein Signal ausgelöst und der Filter muss ausgetauscht werden.

Weiterhin kann der Stromverbrauch von Lüftungsanlagen durch Einsatz effizienter Motoren und Ventilatoren reduziert werden. Ein alter Lüfter mit vorwärts gekrümmten Ventilatorschaufeln hat beispielsweise einen Wirkungsgrad von 35 %, während neue Lüfter mit rückwärts gekrümmten Ventilatorschaufeln Wirkungsgrade zwischen 60 und 65 % erzielen. Aus diesem Grund ist generell eine Überprüfung von Anlagen zu empfehlen, die älter sind als 15 Jahre [Kob09], da sich durch einen Austausch eine erhebliche Energiemenge einsparen lässt. Weiterhin kann der Stromverbrauch mit Hilfe von drehzahlgeregelten Lüftern gesenkt werden, die ihren Betrieb an den Bedarf anpassen. Dadurch werden die Vollbetriebsstundenzeiten gesenkt. Sehr effektiv kann der Stromverbrauch, ohne Investitionskosten, durch eine Anpassung der Betriebszeiten an die Nutzungszeiten gesenkt werden. Dabei sind die hygienischen und thermischen Anforderungen einzuhalten. Während Lüftungsanlagen von Bereichen mit beschränkten Nutzungszeiten deutlich im Betrieb reduziert werden können (OP-Säle, Röntgen, Küche usw.) müssen Lüftungsanlagen von Intensivstationen und innenliegenden Bettenstationen durchgehend betrieben werden. Die Lüftungsanlagen von OP-Stationen können außerhalb der OP-Zeiten nicht ausgeschaltet, aber deutlich im Volumenstrom reduziert werden.

Aufgrund vieler alter Anlagen sollte die installierte Lüfterleistung geprüft und an den aktuellen Bedarf angepasst werden. Anhand der von der DIN 1946 Teil 4/ (12-2008) vorgeschriebenen Luftmengen, die sich in Abhängigkeit von der Raumnutzung und der Raumfläche bemisst, kann der aus hygienischen Gründen benötigte Luftvolumenstrom berechnet werden. Die Angaben des Wirkungsgrads und der Druckdifferenzen können vom Lüfterhersteller eingeholt werden. Mit diesen Werten kann die Lüfterleistung überschlägig berechnet und mit der bereits installierten Leistung verglichen werden. So kann festgestellt werden, ob ein Lüfter überdimensioniert ist und Strom verschwendet. Eine weitere Möglichkeit, Lüfteranlagen energetisch zu bewerten, ist der Vergleich des SFP-Wertes (= Specific Fan Power). Dieser Wert setzt die Ventilatorleistung und den geförderten Luftvolumenstrom ins Verhältnis. Er lässt sich ebenso aus der Gesamtdruckerhöhung dividiert durch den Wirkungsgrad des Lüfters errechnen. In der zukünftig geltenden Energieeinsparverordnung (EnEV) 2009 ist dieser Wert verbindlich für neue Anlagen vorgeschrieben. Er beträgt für Zuluftanlagen 1 500 W/(m³s) und für Abluftanlagen 1 000 W/(m³s). Beim Einbau von zusätzlichen Filtern, Kühlern oder Wärmerückgewinnungseinheiten werden Bonusfaktoren hinzuaddiert [Kob09]. Der SFP-Wert kann zur ersten Abschätzung der Energieeffizienz verwendet werden. Liegt der ermittelte Wert weit über den Grenzwerten, besteht dringender Handlungsbedarf.

2.3.3 Energiemengenmessung

Zur Analyse des Stromverbrauchs von Lüftungsanlagen wurden in jedem Krankenhaus des Projektes die elektrische Leistung des Zuluft-Lüfters für einen OP-Bereich und für einen weiteren mechanisch belüfteten Bereich wie z.B. Intensivstation, Röntgenabteilung oder innenliegende Bettenstationen gemessen. Der Lastgang der Lüfter wurde in Tages- und Wochenverläufen grafisch dargestellt und nach Raumnutzungsart unterschieden analysiert.

In Abbildung 2.23 sind zwei typische Lastverläufe für OPs zu sehen. Wesentliches Merkmal dieser Lastgänge ist die Absenkung des Volumenstroms bzw. der Leistung außerhalb der Hauptbetriebszeiten. Dieses Verhalten weisen nahezu alle Lastgänge der OPs auf. Unterschiede zeigen sich in der Höhe der gemessenen Leistung sowie in der Differenz zwischen Voll- und Schwachlast. Im Vergleich der beiden Lastgänge in Abbildung 2.23 ist zu beobachten, dass im ersten OP keine bedarfsangepasste Regelung vorhanden ist. Dies ist an dem gleichmäßigen Leistungsverlauf während der Betriebszeiten zu erkennen. Die zweite Lastgangmessung zeigt hingegen Leistungsschwankungen während der OP-Betriebszeit. In diesem OP wird die Lüftung in Abhängigkeit von den inneren Lasten und unter Berücksichtigung der nach DIN 1946 vorgegebenen Grenzwerte betrieben.

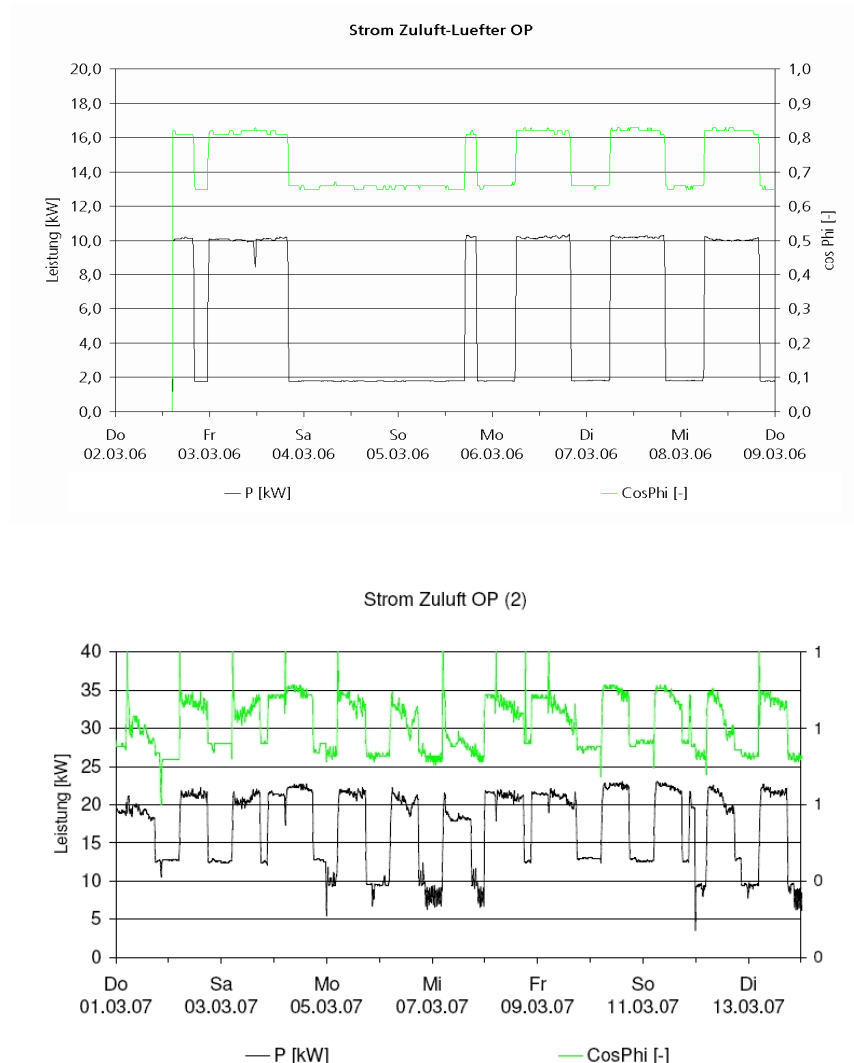


Abbildung 2.23: Charakteristische Lastverläufe von OP-Lüftungen

In Abbildung 2.24 ist ein Beispiel für eine Lüftungsanlage eines OPs dargestellt, die nicht entsprechend der Raumnutzungszeiten betrieben wird. Auch ohne Nutzung des OPs sind die Lüfter in voll-

lem Betrieb. Durch Anpassung des Lüfterbetriebs an die OP-Nutzungszeiten und der Luftvolumenströme können für den dargestellten Lüfter der Stromverbrauch um ca. 19 000 kWh/a und die Kosten (Strompreis 0,1 €/kWh) um ca. 1 900 €/a reduziert werden.

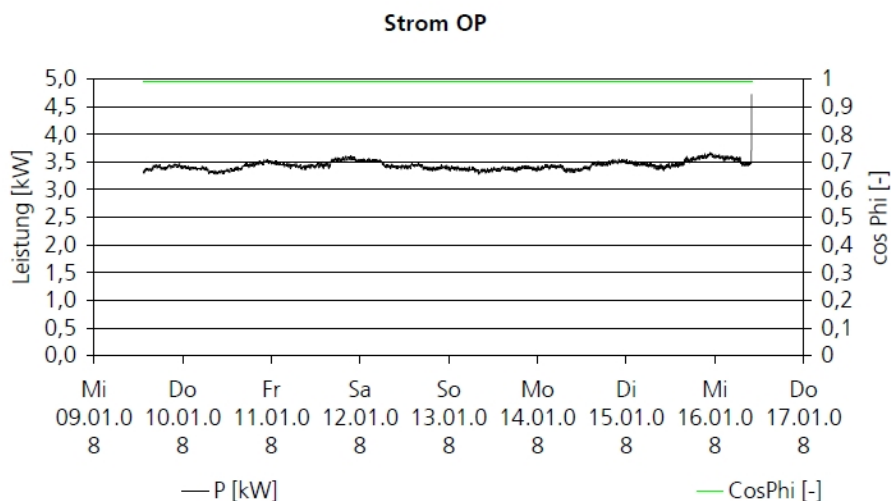


Abbildung 2.24: Beispiel einer Energieverschwendung: volle Lüfterleistung auch außerhalb der Betriebszeiten

Für Intensivstationen und Bettenhäuser sind eine Reduktion des Volumenstroms und eine damit verbundene Leistungsabnahme zu den Nachtzeiten nicht realisierbar, da die Patienten sich die ganze Zeit in diesen Bereichen aufhalten. Die gemessenen Lastgänge zeigen dies deutlich, da nur sehr leichte Schwankungen im Wochenverlauf auftreten. In der Abbildung 2.25 ist ein charakteristischer Lastgang einer Intensivstationslüftung zu sehen.

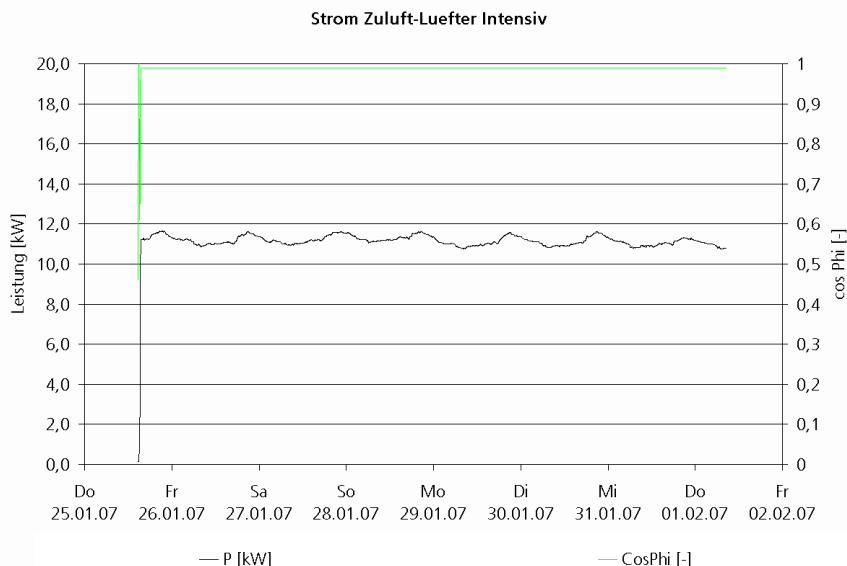


Abbildung 2.25: Charakteristischer Lastverlauf einer Intensivlüftung

2.3.4 Vergleich und Best-practice-Lösung

Auf der Basis der Energiemengenmessungen und der Bestandsdatenerfassung wurden Einflussgrößen und Kennzahlen ermittelt und in Boxplot-Vergleichen gegenübergestellt. Der Boxplot-Vergleich der gesamten Lüftungsanlagen (Abbildung 2.26) zeigt für die Krankenhäuser, die Angaben zu den Lüftungsanlagen machen konnten, eine mittlere Lüftergesamtleistung von 260 kW_{el} und einen mittleren Luftvolumenstrom von 156 000 m³/h. Unter der Annahme einer Lüfterleistung von 100 kW_{el} und einer jährlichen Vollbenutzungsstundenzahl von ca. 5 000 h/a ergibt sich ein Stromverbrauch von ca. 500 000 kWh/a oder Stromkosten von 50 000 €/a (Strompreis 0,1 €/kWh). Wäh-

rend die OP-Flächen sehr gering sind und wenig Unterschiede zeigen, ist die restliche mechanisch belüftete Fläche sehr groß und unterscheidet sich zwischen den Krankenhäusern deutlich.

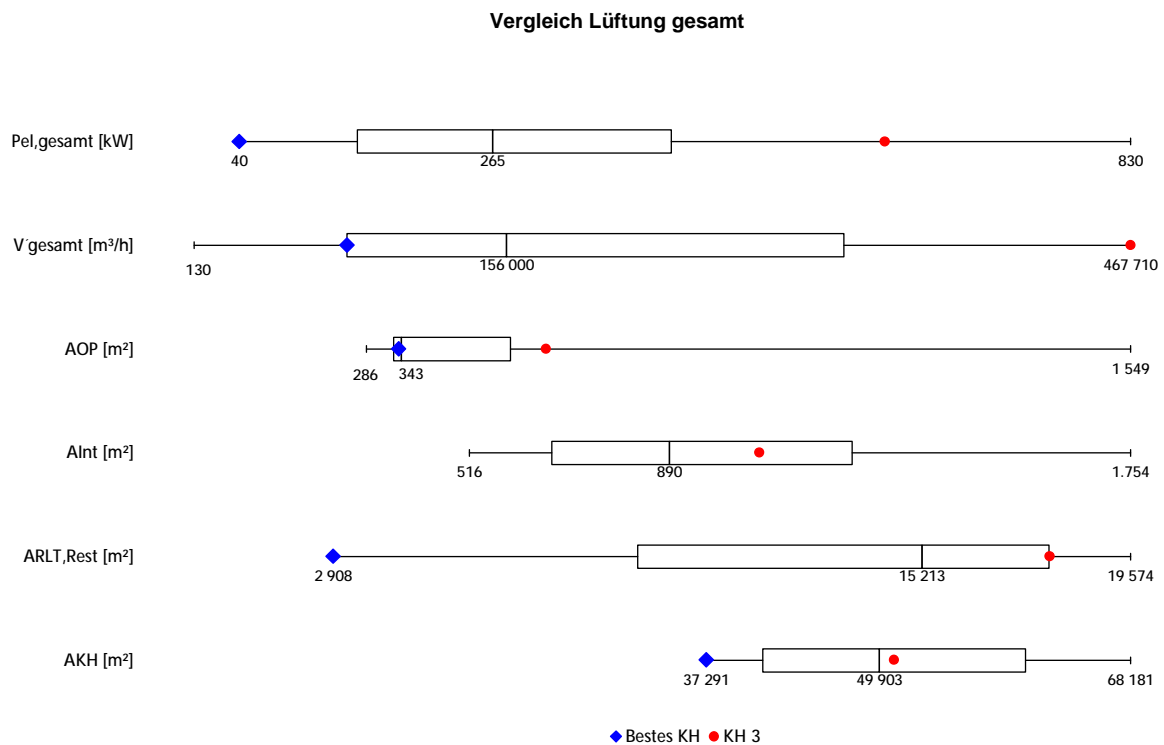


Abbildung 2.26: Boxplot-Vergleich Lüftung in Krankenhäusern

Der Stromverbrauch von Lüftungsanlagen für OP-Säle ist durch einen sehr hohen Lüftungsbedarf geprägt, der außerhalb der Nutzungszeiten deutlich reduziert werden kann. In Abbildung 2.26 ist der Boxplot-Vergleich der Krankenhäuser dargestellt. Es wurden sowohl einzelne OP-Säle als auch Gruppen von OP-Sälen untersucht. Die gemessenen Zuluft-Lüfterleistungen erstrecken sich von 2 bis 40 kW_{el}. Der mittlere auf die OP-Fläche bezogene Stromverbrauch liegt bei ca. 364 kWh/m². In dem KH mit den schlechtesten Verbrauchswerten (rote Markierung) wurde die OP-Lüftung durchgehend bei Vollast betrieben, so dass der Stromverbrauch bei 1 275 kWh/m² liegt. Im Mittel kann der Energieverbrauch durch Reduzierung außerhalb der Nutzungszeiten halbiert werden.

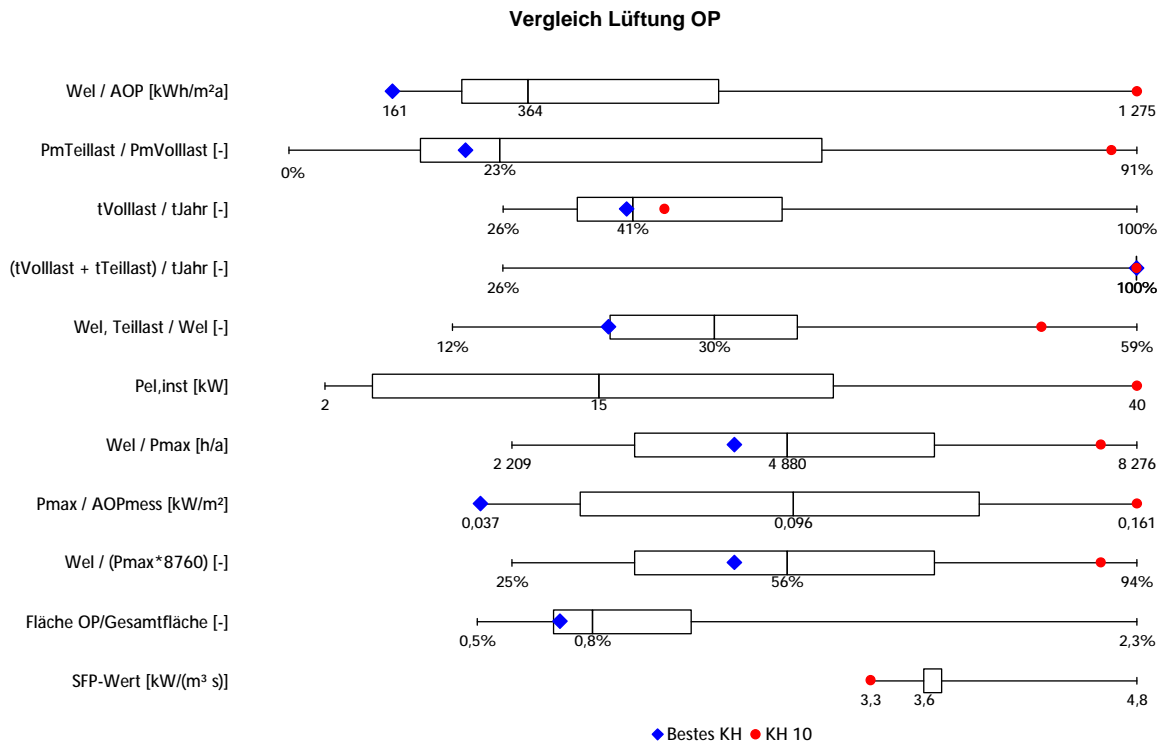


Abbildung 2.27: Boxplot-Vergleich Zulauf OP

Neben dem Einsatz effizienter Lüfter sind der reduzierte Luftvolumenstrom und die Anpassung der Laufzeiten die wichtigsten Einsparmaßnahmen. In den untersuchten Krankenhäusern lag der Anteil Volllastzeit zwischen 26 % und 100 %. Weiterhin hängt der Verbrauch vom Unterschied zwischen der Voll- und der Teillastleistung ab. Alle Lüftungsanlagen sollten soweit in der Leistung reduziert werden, dass sie gerade die minimalen Anforderungen erfüllen. In einigen Krankenhäusern konnte keine oder nur eine geringe Leistungsreduktion festgestellt werden. In einem Krankenhaus wurde die Lüftung im OP nachts im Vergleich zur Volllast nur um 8 % heruntergeregelt. Dies entspricht einer Volumenstromabsenkung von nur 2 %. Das beste Krankenhaus des Vergleichs (blaue Markierung) ist an dem geringen spezifischen Verbrauch im Betrieb und einer Abschaltung während der Ruhezeiten zu erkennen.

In der nachfolgenden Tabelle 2.1 sind die möglichen Einsparpotenziale für die gemessenen OP-Lüftungen aufgeführt. Für die Berechnung dieser Einsparungen wird davon ausgegangen, dass der Volumenstrom nachts um mindestens 20 % abgesenkt werden kann. Da die Leistung in der dritten Potenz von diesem abhängt, kann die Lüfterleistung um ungefähr 80 % gesenkt werden. Von dieser Annahme ausgehend sind für die OP-Lüftungen, deren Leistung in den Messungen nachts nicht um mindestens 80 % abgesenkt wurde, die Energieeinsparungen berechnet worden, die entstehen würden, falls diese Absenkung realisiert würden.

Tabelle 2.1: Einsparungen in untersuchten OPs bei Herunterregelung der Lüftung um 80 % bezogen auf Volllast
(Annahme Strompreis: 0,13 €/kWh)

Krankenhaus	Leistungsabnahme während der Ruhezeiten [%]	Volllastzeit [h/a]	Mittlere Leistung bei Volllast [kW]	Einsparung [€/a]
2	55,0	3241	10,4	3.347
3	33,2	6658	3,8	472
4	8,6	5869	25	6.572
5	77,0	2716	5,8	134
6	58,0	5256	4,2	424

Bei den Lüftungsanlagen der OPs führt aufgrund der hohen Luftvolumenströme der Austausch von alten Lüftern mit schlechtem Wirkungsgrad gegen neue effiziente Lüfter zu deutlichen Energieeinsparungen. Der Zusammenhang zwischen der Teillastabsenkung, dem Wirkungsgrad und dem jährlichen Energieverbrauch ist in der Abbildung 2.28 grafisch dargestellt. Die Graphen beziehen sich auf eine typische OP-Zuluft-Lüfterleistung von 5,5 kW. Es wird berechnet in wie weit sich die Energiekosten senken, wenn ein Lüfter mit besserem Wirkungsgrad eingesetzt wird. Des Weiteren wird der Einfluss verschiedener Teillastregelungen, d.h. die Reduktion der Leistung in den Ruhezeiten, berechnet. Für höhere Leistungen können entsprechend der installierten Lüfterleistung die Energiekosten umgerechnet werden.

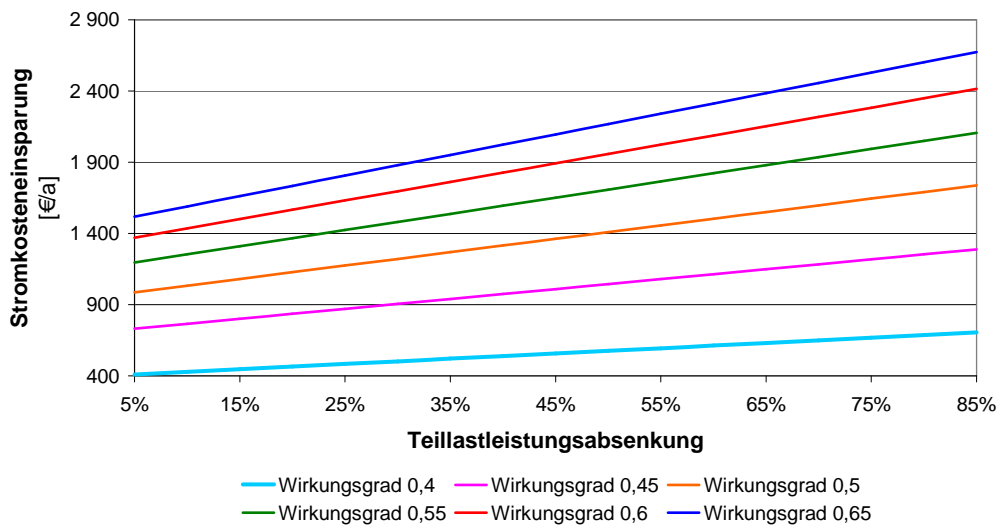


Abbildung 2.28: Stromkosteneinsparungen für eine typische OP-Lüftung bei einem besserem Wirkungsgrad und Teillastabsenkung

Für das Diagramm wird angenommen, dass die Betriebszeiten in einem OP 12 Stunden pro Tag betragen und dass an jedem Tag operiert wird. Sind die Betriebszeiten geringer, wird sich die Kosteneinsparung minimieren. Die weiteren Annahmen sind:

- Stromkosten: 0,13 €/kWh
- Wirkungsgrad bei Teillast: 6 % niedriger als bei Volllast
- Ausgangswirkungsgrad 0,35

Anhand dieses Diagramms kann abgelesen werden, dass bei einem Austausch eines alten Lüfters mit einem Wirkungsgrad von 35 % gegen einen neuen mit einem Wirkungsgrad von 65 % die Stromkosten um mindestens 1 500 €/a gesenkt werden können. Wird weiter davon ausgegangen, dass der alte Lüfter ohne Absenkung betrieben wurde und jetzt in den Ruhezeiten eine Leistungsreduktion von 80 % realisiert wird, betragen die eingesparten Kosten 2 500 €/a. Demgegenüber

stehen Investitionskosten für einen neuen Lüfter mit hohem Wirkungsgrad in dieser Leistungsklasse von etwa 11 000 €. Dementsprechend würde sich der Lüfter in 4,4 Jahren amortisieren. Diese Amortisationszeit wird größer, je besser der alte auszutauschende Lüfter ist. Besser bedeutet in diesem Fall, dass der alte Lüfter schon mit Teillastabsenkung betrieben wird und über einen Wirkungsgrad von mehr als 35 % verfügt.

Wie bereits im Gesamtvergleich gezeigt wurde, ist der Stromverbrauch von Krankenhäusern sehr stark von der Struktur der belüfteten Fläche und der daraus resultierenden Lüfterleistung abhängig. Während OP-Säle einen Stromverbrauch des Zuluft-Lüfters von 364 kWh/m²a haben, liegt der Wert der Nicht-OP-Bereiche bei 58 kWh/m²a (Median). Bei der Beurteilung des Einflusses auf den Gesamtenergieverbrauch ist jedoch zu berücksichtigen, dass die gesamte mechanisch belüftete Fläche (ohne OP und Intensivstationen) einen Anteil von ca. 30 % hat, während der Anteil von OP-Flächen unter 1 % liegt.

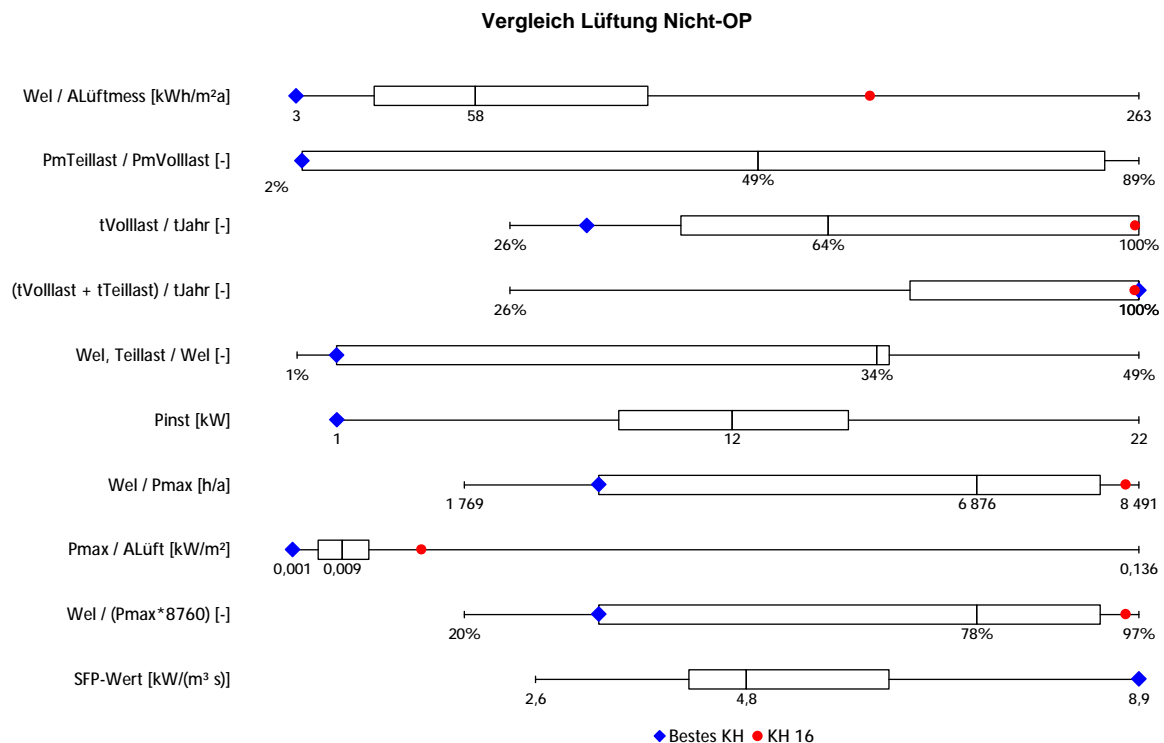


Abbildung 2.29: Boxplot-Vergleich für Nicht-OP-Lüftungsanlagen

Das größte Einsparungspotenzial für eine bestehende Intensivstation und ein Bettenhaus ist der Einsatz eines effizienten Lüfters, während bei Operationssälen auch durch eine Teillastabsenkung eine Verbrauchsreduktion erzielt werden kann. Im Bereich der Intensivstationen wurde eine Lüfterleistung von 2,6 bis 11 kW gemessen. Im Vergleich zu OP-Sälen sind die Anforderungen an den Außenluftvolumenstrom geringer, gleichzeitig sorgen die durchgehenden Betriebszeiten und die teils deutlich größere belüftete Fläche für einen hohen Strombedarf, so dass sich ein großes Einsparpotenzial ergibt. Durch den Einsatz von Lüftern mit einem hohen Wirkungsgrad können in diesem Bereich die größten Energiemengen eingespart werden. Der Zusammenhang zwischen verschiedenen Wirkungsgraden, unterschiedlichen Lüfterleistungen und den eingesparten Stromkosten ist in der nachfolgenden Abbildung 2.30 dargestellt.

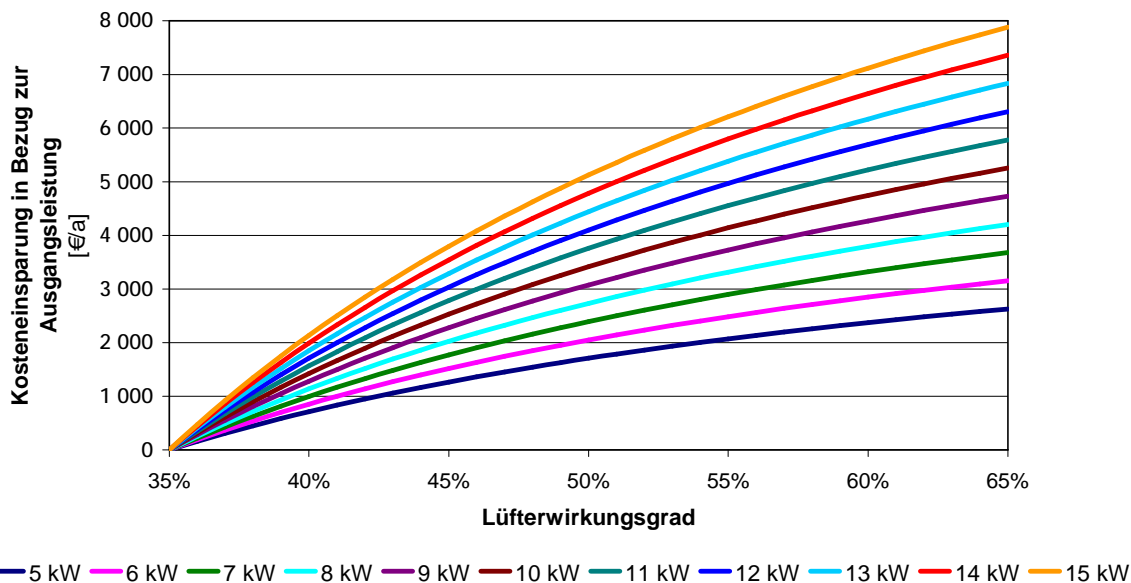


Abbildung 2.30: Jährliche Stromkosteneinsparung in Abhängigkeit des Wirkungsgrads bezogen auf die bereits installierte Lüfterleistung

Mit dem Diagramm in Abbildung 2.30 kann ausgehend von der installierten Lüfterleistung die Stromkosteneinsparung durch einen besseren Lüfterwirkungsgrad ermittelt werden. Bei einer typischen Leistung von 11 kW_{el} und einem aktuellen Wirkungsgrad von 35 % kann der Einsatz eines Lüfters mit 60 % Wirkungsgrad eine Kosteneinsparung von ca. 5 200 € (oder 40 150 kWh) erzielen (Annahme: Betriebszeit 8 760 h/a, Strompreis 0,13 €/kWh)

In Lüftungsanlagen kann durch den Einbau einer Filterdrucküberwachung der Druckverlust und damit der Stromverbrauch gesenkt werden. Während der Druckverlust einer beispielhaften Lüftungsanlage einer Intensivstation 1 100 Pa beträgt, kann er durch einen verschmutzten Filter um weitere 200 Pa ansteigen. Bei einem Lüfterwirkungsgrad von 64 % und einem Luftvolumenstrom von 25 448 m³/h steigt die Lüfterleistung um 2,2 kW an. Daraus ergeben sich jährliche Zusatzkosten von ca. 2 600 €, die durch eine Filterüberwachung vermieden werden können. Der Vorteil der automatischen Überwachung ist gerade bei der Vielzahl von Lüftungsanlagen in Krankenhäusern (teilweise mehr als 60 Anlagen) von Bedeutung.

Tabelle 2.2: Best-practice-Maßnahmen für Lüftungsanlagen

Neubau	Umrüstung
kleine Strömungsgeschwindigkeiten durch große Kanalquerschnitte	Bedarfsangepasste Regelung (Ausnahme Intensivstation, Bettenhaus)
kurze Leitungen mit möglichst wenigen Windungen, geringer Rohrreibungsbeiwert (Anlage nah am Einsatzort)	effiziente Lüfter mit einem Wirkungsgrad von 0,6 bis 0,65
Bedarfsangepasste Regelung (Ausnahme Intensivstation, Bettenhaus)	Filter mit Drucküberwachung
effiziente Lüfter mit einem Wirkungsgrad von 0,6 bis 0,65	
Filter mit Drucküberwachung	

2.4 Kälteversorgung

2.4.1 Versorgungsstruktur

Die Kälteversorgung in den Krankenhäusern erfolgt in der Regel über zentrale Kaltwassersätze. Dabei werden meist elektrisch angetriebene Kompressoren wie Schrauben-, Scroll- und Kolbenverdichter eingesetzt. In zwei Krankenhäusern sind thermische Kältemaschinen in Betrieb, die aus Fernwärme oder Heizwärme eines Kessels Kälte erzeugen. Zudem wurde in einem Krankenhaus ein Verbund von Wärmepumpen und einer elektrischen Kompressionskältemaschine betrieben.

Die Kälteverteilung erfolgt in den meisten Krankenhäusern über ein Kaltwassernetz, über das die Kälteverbraucher versorgt werden, in einzelnen Fällen sind Direktverdampfer im Einsatz. Neben den großen zentralen Kältemaschinen werden zunehmend kleine Splitgeräte installiert, die direkt am Ort des Kältebedarfes installiert werden und so zu geringen Investitionskosten führen. Allerdings ist ihr Wirkungsgrad (COP) aufgrund der Anlagengröße sowie der durchgehend schlechten Auslastung niedriger. Weiterhin ist die Versorgungssicherheit im Vergleich zum Anlagenverbund reduziert. Bei steigender Zahl an Splitgeräten geht der Überblick verloren, wo welche Kältemaschine installiert ist, und es steigt der Wartungsaufwand.

Typische Kälteabnehmer im Krankenhaus sind OP- und Intensivstationen. Weiterhin werden Kältemaschinen zur Kühlung von Sterilisations- und Röntgenabteilungen (CT- und MRT) sowie für Cafeterien, Küchen und innenliegende Räume eingesetzt. Die erzeugte Kälte wird in klimatisierten Bereichen zur Begrenzung der Raumtemperatur sowie zur Entfeuchtung der Zuluft eingesetzt.

2.4.2 Einflussgrößen und Einsparmaßnahmen

Im Gegensatz zur Heizlast erhöhen die inneren Lasten und die solaren Einstrahlungen den Kältebedarf klimatisierter Bereiche wie in folgender Gleichung zu sehen ist.

$$\dot{Q}_k = \dot{Q}_{trans} + \dot{Q}_{Lüft} + \dot{Q}_{innere} + \dot{Q}_{Solar}$$

Der Transmissions- und der Lüftungskältebedarf sind zunächst von den klimatischen Bedingungen wie Außentemperatur und -luftfeuchte abgänglich. Weiterhin hat die solare Einstrahlung großen Einfluss auf den Kältebedarf, so dass sowohl die Standortbedingungen als auch die Gebäudeausrichtung, der Fensterflächenanteil und die Einrichtungen zur Verschattung wichtige Einflussgrößen sind. Die Bauphysik hat über die Fensterflächen hinaus auch durch den Wärmedämmstandard sowie die Speicherfähigkeit einen Einfluss auf den Kältebedarf.

Weiterhin werden die Transmissions- und Lüftungswärmegewinne durch die Raumnutzung beeinflusst. Mit steigender Rauminnentemperatur sinkt der Kältebedarf, so dass über die eingestellte Raumtemperatur der Energiebedarf der Klimatisierung reduziert werden kann. Die zu kühlenden Luftmengen werden in vielen Krankenhausbereichen durch den aus hygienischer Sicht vorgeschriebenen Luftwechsel bestimmt. Insbesondere OPs haben durch ihren hohen Frischluftbedarf und die hohen inneren Lasten einen hohen Kältebedarf. Gleiches gilt für Intensivstationen, die zudem im Gegensatz zu OP-Abteilungen durchgehend betrieben werden müssen. Eine Reduktion der Luftmengen auf das erforderliche Minimum führt zu Kosteneinsparungen, die ohne Investitionen realisiert werden können. Weiterhin sind die Lüftungsanlagen, sofern möglich, außerhalb der Nutzungszeiten z.B. von OP- und Röntgenabteilungen im Teillastbetrieb zu fahren. Neben dem Kältebedarf wird dadurch auch der Strombedarf der Lüfter deutlich reduziert.

Die zunehmende Technisierung führt weiterhin zu einem ansteigenden Kältebedarf. Sowohl die Großgeräte beispielsweise in Röntgenabteilungen, als auch die Kleingeräte und der IT-Bedarf erhö-

hen die inneren Kühllasten. Der Einsatz effizienter Geräte und das Ausschalten, wenn Geräte und Anlagen nicht genutzt werden, können zu einer deutlichen Entlastung führen. Die Verminderung des Strombedarfes von Geräten führt daher in klimatisierten Bereichen gleichzeitig zu einer Verminderung des Energiebedarfes (meist Strombedarfes) der Kälteversorgung.

Im Bereich der Kälteversorgung können große Einsparpotenziale durch eine bessere Anlageneffizienz erschlossen werden. Zunächst bestimmt die Wahl der Erzeugungsanlage den Wirkungsgrad, dem sogenannten COP (coefficient of performance). Die technologische Entwicklung hat hier in den vergangenen Jahren zu einer deutlichen Effizienzverbesserung geführt. Während alte Kompressionskältemaschinen einen maximal erzielbaren COP von 4 aufwiesen, liegt der Wirkungsgrad heutiger Anlagen zwischen 5 und 10. Zu berücksichtigen ist dabei, dass nicht der Nennwirkungsgrad, sondern der Nutzungsgrad als Mittelwert aller Wirkungsgrade ausschlaggebend ist. Hierbei kommen die häufig anzutreffende geringe Auslastung und das Teillastverhalten der Kältemaschinen zum Tragen. Gerade hier liegt der große Vorteil neuer Kältemaschinen, die über ein sehr gutes Teillastverhalten verfügen. Darüber hinaus gibt es auch die Möglichkeit, die Auslastung über Speicher oder einen Kälteverbund aus mehreren Kältemaschinen zu erhöhen. Im Kälteverbund können Anlagen verschiedener Leistungsgrößen miteinander kombiniert werden, um die Kältemaschinen möglichst nahe am Auslegungspunkt betreiben zu können. Gleichzeitig wird die Versorgungssicherheit erhöht, da bei Ausfall einer Anlage nur ein Teil der Leistung nicht zur Verfügung steht, was die überwiegende Zeit des Jahres ausreichend ist.

Der Wirkungsgrad der Kälteerzeugung ist sehr stark von den Betriebsbedingungen abhängig. Den größten Einfluss hat die Auslastung der installierten Erzeugerleistung, da der Wirkungsgrad von Kältemaschinen im Teillastbereich deutlich reduziert sein kann. Ein weiterer Faktor für die Effizienz ist die Verdampfertemperatur, die durch die Vorlauftemperatur T_{VL} bestimmt wird. Je weiter T_{VL} abgesenkt wird, desto höher ist der Energieverbrauch. Einen ähnlichen Einfluss hat die Rückkühlung: je höher die Rückkühltemperatur ist, z.B. bei hohen Außentemperaturen, desto schlechter ist der Wirkungsgrad der Kälteerzeugung. Ist die Rückkühlung nicht ausreichend, kommt es sogar zu einem Anstieg der Vorlauftemperatur der Kälteversorgung, so dass die Kältemaschine der Kälteanforderung nicht mehr gerecht wird.

Neben dem Energieverbrauch der Kälteerzeugung sollte auch der Pumpstrombedarf berücksichtigt werden. Der Volumenstrom wiederum ist vom Kältebedarf sowie von der Temperaturdifferenz zwischen Vor- und Rücklauf abhängig. Die Kälteversorgung von Klimaanlage ist in der Regel auf eine Temperaturdifferenz von 6 K ausgelegt (6/12 °C). Wird eine Kälteversorgung mit einer Temperaturdifferenz von 3 K betrieben, erhöht sich der Pumpstrombedarf um das 8fache.

Aufgrund der hohen Technisierung von Krankenhäusern liegt ganzjährig ein Kältebedarf vor, der jedoch deutlich kleiner ist als der Spitzenkältebedarf. Daher kann durch einen Anlagenverbund zwischen einer großen und einer kleinen Kältemaschine der Teillastbetrieb reduziert werden. Weiterhin kann bei niedrigen Außentemperatur über das Rückkühlwerk die Außenluft zur Kühlung verwendet werden (freie Kühlung), um den Strombedarf zu reduzieren. Energetisch sehr sinnvoll ist der Einsatz einer adiabaten Kühlung: die Abluft wird durch Versprühen von Wasser weiter abgekühlt und zur Kühlung der Außenluft verwendet. Durch die adiabate Kühlung kann der Kältebedarf, der durch die Kältemaschinen abgedeckt werden muss, erheblich reduziert werden. Gleichzeitig erhöht sich der Wasserbedarf deutlich. Während eine adiabate Kühlung zu einer Energieeinsparung führt, ist die Wirtschaftlichkeit im Einzelfall zu überprüfen.

2.4.3 Energiemengenmessungen

In den untersuchten 20 Krankenhäusern wurden an 45 Kältemaschinen Wärme- und Strommengenmessungen durchgeführt. Zum einen wurden der Lastgang des Kältebedarfes und zum anderen die Antriebsenergie (Strom oder Wärme) gemessen. Anhand der Betriebsparameter des Kältebedarfes (V' , T_{VL} , T_{RL} , dT) wurde der Energieverbrauch ermittelt und Einsparpotenziale aufgezeigt.

Das Ergebnis einer Lastgangmessung in Abbildung 2.31 zeigt beispielhaft den Tageslastgang einer Kältemaschine. Es handelt sich hierbei um eine Einzelanlage, die aufgrund der Außentemperatur von 24 °C mit einer Auslastung von 15-25 % deutlich in Teillast betrieben werden muss. Daraus ergibt sich ein sehr schlechter Wirkungsgrad von 1,0-2,0. Dies bedeutet, dass zeitweise aus 1 kWh Strom nur 1 kWh Kälte erzeugt wurde.

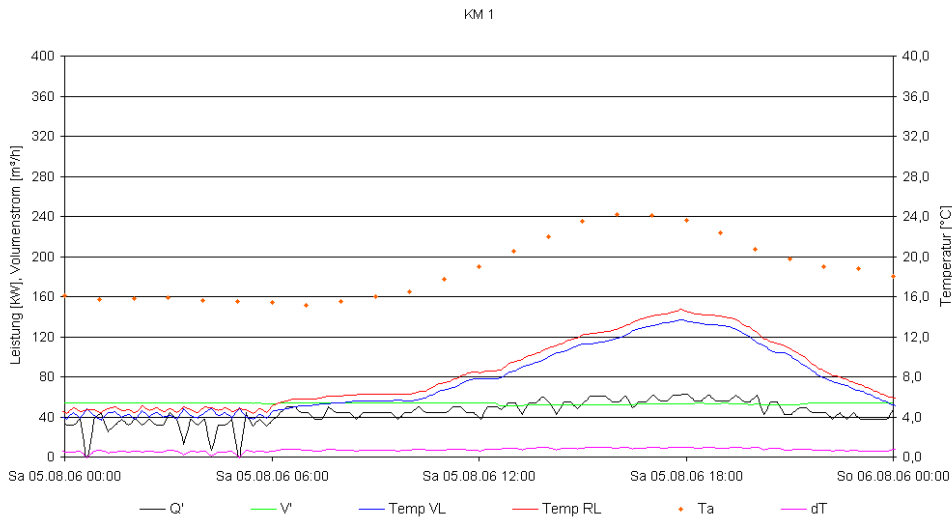


Abbildung 2.31: Lastgangmessung an einer Kältemaschine

Der Einfluss auf die Effizienz von Kältemaschinen ist in Abbildung 2.32 zu sehen. Mit Nutzungsbeginn der klimatisierten Räume steigt der Leistungsbedarf sprunghaft von 40% auf 85 % an. Gleichzeitig verbessert sich der Wirkungsgrad von ca. 3,7 auf 5,8.

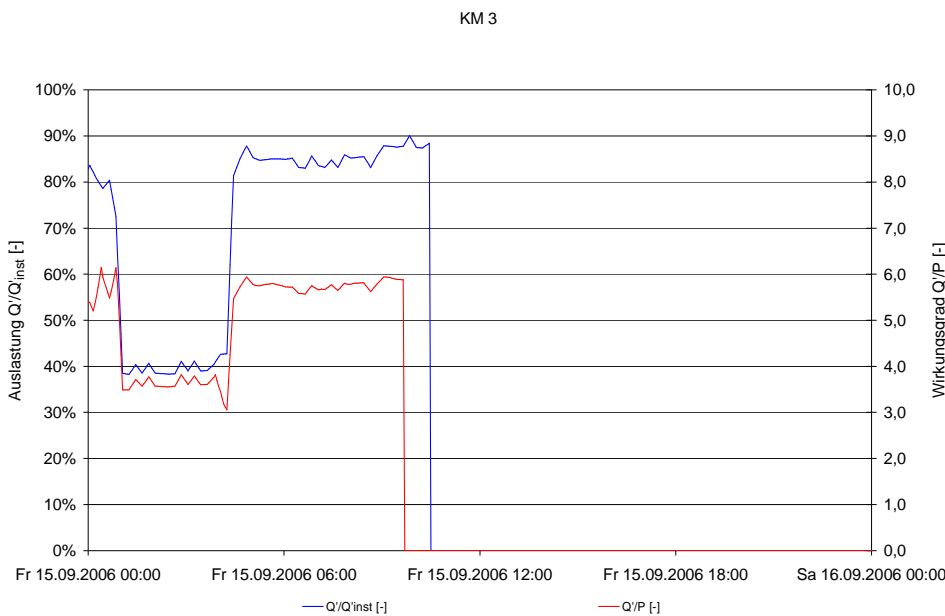


Abbildung 2.32: Wirkungsgradsprung durch erhöhte Auslastung

In Abbildung 2.33 ist die Kältemaschine zur Versorgung einer MRT-Anlage zu sehen. Es ist deutlich die Zeitsteuerung der Kaltwasserpumpe zu erkennen. Weiterhin zeigt der Kälteverlauf die exakten Nutzungszeiten der klimatisierten Bereiche. Die Vorlauftemperatur wird zwischen 6 und 8 °C gehalten. In diesem Temperaturbereich taktet die Anlage (Einzelanlage ohne Speicher). Die Rücklauftemperatur ist gegenüber einer 6/12 °C -Versorgung etwas angehoben, was aber den effizienten Betrieb begünstigt. Die Temperaturdifferenz ist mit 6 K ideal und führt somit zu minimalen Pumpstromkosten. Der Wirkungsgrad der Kältemaschine lag während der Messung bei ca. 5,0.

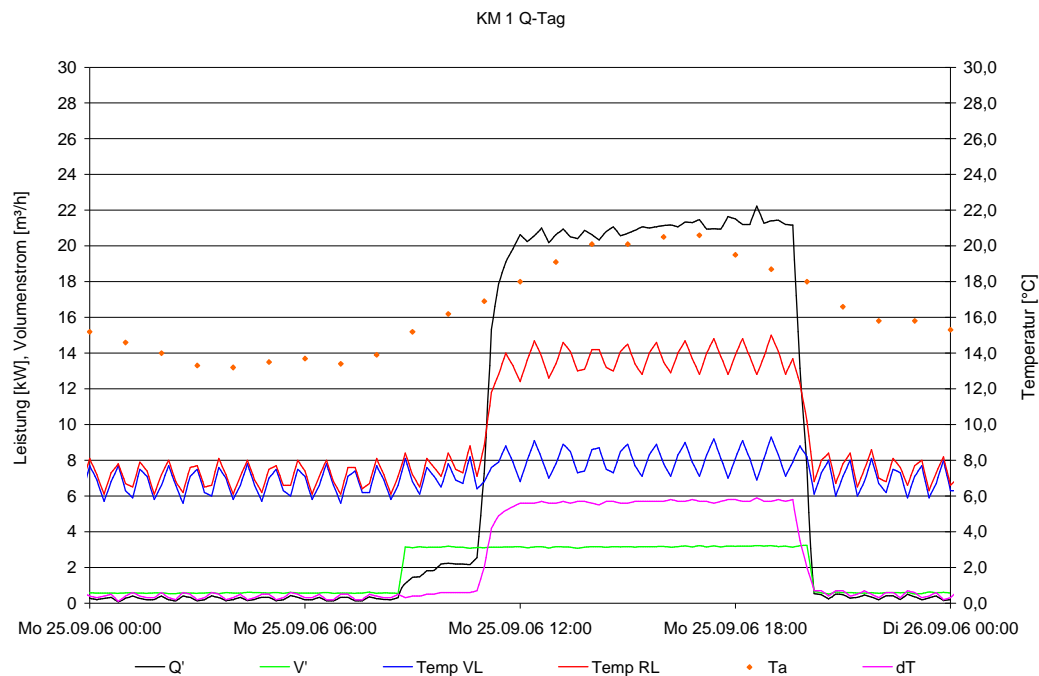


Abbildung 2.33: Bedarfsangepasste Regelung einer Kältemaschine

Weiterhin konnten anhand der Lastgangmessungen Probleme in der Rückkühlung bzw. in der Leistungsbereitstellung der Kältemaschinen aufgezeigt werden. So konnte in einem Krankenhaus nachgewiesen werden, dass die installierte Kältemaschine nicht die garantierte Kälteleistung brachte. In anderen Krankenhäusern konnten Probleme an der Rückkühlung bzw. eine nicht ausreichende Rückkühlleistung aufgezeigt werden. In Abbildung 2.31 ist ebenfalls zu sehen, dass die Vorlauftemperatur T_{VL} mit der Außentemperatur ansteigt, was darauf hindeutet, dass die Kälteversorgung nicht aufrecht gehalten werden kann. Durch Speicher kann die Kälteleistung einer Anlage erweitert werden. Außerdem kann die Rückkühlleistung durch Anheben des Wasser- bzw. Luftvolumenstroms oder durch Vergrößerung der Kondensatortauscherflächen erhöht werden.

Ein weiterer wesentlicher Punkt, der sich anhand der Messungen gezeigt hat, ist die niedrige Temperaturdifferenz, mit der die Kältemaschinen betrieben werden. Wie in Abbildung 2.31 zu sehen ist, liegt die Temperaturdifferenz durchgehend bei ca. 1 K. Dies bedeutet, dass der 6fache Volumenstrom gegenüber der Auslegungsdifferenz von 6 K erforderlich ist. Weiter ist zu sehen, dass die Vorlauftemperaturen mit 4 °C zeitweise deutlich unter der Auslegungstemperatur von 6 °C liegt, was sich ebenfalls im schlechten Wirkungsgrad widerspiegelt. Ursache kann eine fehlerhafte Regelung oder ein defekter Fühler sein.

In zwei Krankenhäusern wird die Kälteerzeugung in Verbindung mit einem Eisspeicher betrieben. Bei beiden Anlagen konnte kein Eisspeicherbetrieb festgestellt werden. In einer weiteren Kältemaschine, die für den Betrieb von 6/12 °C ausgelegt ist, wurden Vorlauftemperaturen von 0 °C gemessen und Eisbildung an den Rohren festgestellt.

2.4.4 Vergleich und Best-practice-Lösung

Zum Vergleich der gemessenen Kältemaschinen sind in Abbildung 2.34 die charakteristischen Kennwerte in einem Boxplot-Vergleich dargestellt. Während die Mitte der COP-Werte (Median) bei 3,68 liegt, wurden für 25 % der Anlagen deutlich kleinere Werte gemessen. Nicht vergleichbar und daher nicht dargestellt sind die COP-Werte sowie der Kältepreis der beiden Absorptionskältemaschinen, für die Werte von 0,2 und 0,47 gemessen wurden. Der spezifische Kältepreis lag dabei bei 0,18 €/kWh für die AbKM mit 600 kW_{th} und mit Fernwärme betriebene Anlage, während die mit

Kesselabwärme betriebene kleinere Kältemaschine ($2 \times 47 \text{ kW}_{\text{th}}$) Kältekosten von $0,38 \text{ €/kWh}$ verursacht. Beide Maschinen liegen damit deutlich über den Werten der elektrisch angetriebenen Kältemaschinen.

Die beste Kältemaschine (blaue Raute) hat trotz der geringen Auslastung einen COP von 5,47. Ursachen können das geringe Alter und die angehobene Vorlauftemperatur sein. KM 1 erzielt hingegen einen COP von nur 1,3, was u.a. durch das hohe Alter begründet ist. Aufgrund der hohen Technisierung und der Möglichkeit Anlagen im Verbund zu betreiben, erzielt eine Kältemaschine eine Vollbenutzungsdauer von 6164 h/a. Auffällig ist die geringe Temperaturdifferenz von der Mehrzahl der untersuchten Kältemaschinen. Bei einem Median von $1,64 \text{ K}$ und einem mittleren Volumenstrom von $21 \text{ m}^3/\text{h}$ besteht ein deutliches Einsparpotenzial. Aufgrund der geringen möglichen Temperaturdifferenzen der Kälteversorgung ist der Volumenstrom um das 3,5fache höher als in der Wärmeversorgung, so dass ein hoher Pumpstrombedarf entsteht. Die maximal installierte Kälteleistung pro Fläche liegt 3,5-mal so hoch wie der niedrigste Wert. Auch hier zeigen sich die unterschiedlichen Nutzungsbedingungen in den Krankenhäusern beispielweise bezüglich der klimatisierten Flächen und der inneren Lasten.

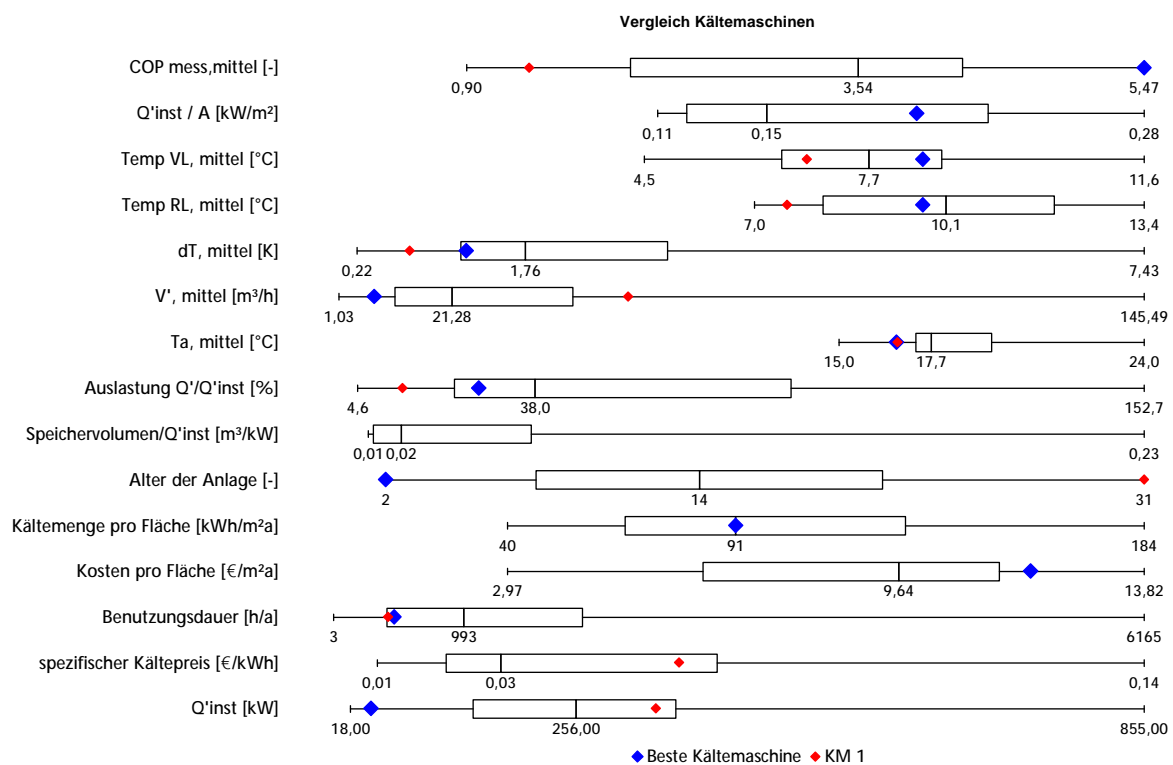


Abbildung 2.34: Boxplot-Vergleich der Kältemaschinen

Best-practice-Lösung: Magnetisch gelagerte Turbokältemaschinen

Als Best-practice-Lösung wird eine magnetisch gelagerte Turbokältemaschine vorgestellt. Aufgrund der reibungsfreien Lagerung und der optimierten Nutzung der Wärmeübertragerflächen erzielt diese Kältemaschine maximale COP-Werte von ca. 10,0. Besonders hervorzuheben ist ihr gutes Teillastverhalten, da die maximale Effizienz im Teillastbereich erzielt wird (s. Abbildung 2.35). Daraus ergeben sich insbesondere für Kälteversorgungssysteme in Krankenhäusern, die nur mit einer Kältemaschine zumeist in Teillast betrieben werden, große Einsparpotenziale. Durch die Kombination mit vorhandenen Anlagen im Kälteverbund kann die Grundlast und damit der überwiegende Anteil der Kälte über die neue Kältemaschine mit sehr hohem Wirkungsgrad bereitgestellt werden. Gleichzeitig kann die Auslastung der vorhandenen Kältemaschinen durch einen reduzierten Teillastbedarf optimiert werden. Die reibungsfreie Lagerung der Turbine ermöglicht es zudem, auf-

grund der geringen Geräuschemissionen und Vibrationen die Kältemaschine in der Nähe von Behandlungs- und Bettenstationen aufzustellen. Ein weiterer Vorteil ist der geringe Anlaufstrom.

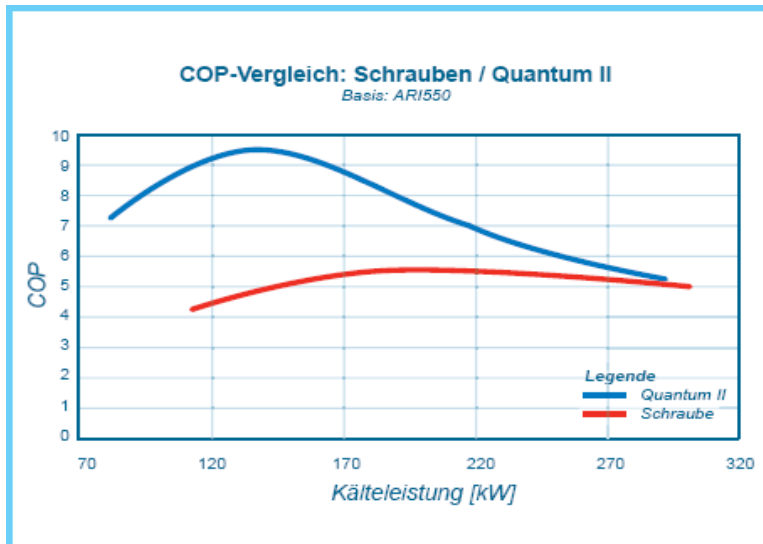


Abbildung 2.35: Kälteerzeugung - Teillastverhalten von verschiedenen Verdichtertypen, Quelle: Axima GmbH

Zur Abschätzung der Einsparmöglichkeiten durch eine magnetisch gelagerte Turbokältemaschine als Best-practice-Lösung sind in Abbildung 2.36 die möglichen Kosteneinsparungen in Abhängigkeit von der Jahreskältearbeit und dem Nutzungsgrad der vorhandenen Kältemaschine dargestellt. Mit Hilfe der ermittelten COP- und Verbrauchswerte für die gemessenen Anlagen ist es möglich, die jährlichen Einsparungen abzuschätzen. Grundlage der Berechnung ist ein COP der neuen Kältemaschine von 8,0. Im Vergleich geht der Hersteller in einer veröffentlichten Kostenrechnung von einem COP von 9,8 aus. Der Strompreis ist zur leichten Umrechnung mit 0,10 €/kWh angenommen worden. Bei einem Strompreis von 0,13 sind die Einsparungen entsprechend mit 1,3 zu multiplizieren.

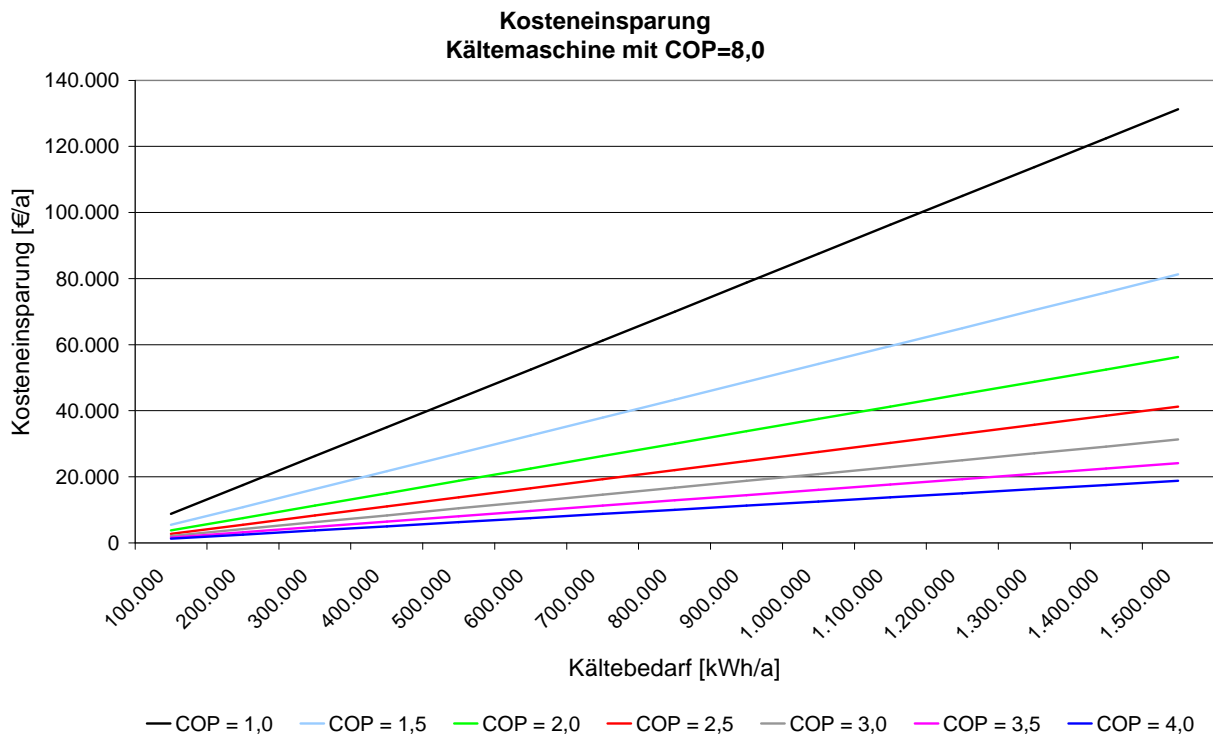


Abbildung 2.36: Kosteneinsparung durch Austausch der Kältemaschine

Die Kostenrechnung des Herstellers für magnetisch gelagerte Kältemaschinen zeigt für eine Kälteleistung von 1 100 kW Investitionskosten von 115 000 €. Damit liegen die Investitionskosten ca. 17 % über den Kosten eines effizienten Schraubenverdichters. Mit dem vom Hersteller angenommenen COP von 8,6 und einem Strompreis von 0,10 €/kWh ergibt sich eine Amortisationszeit von 4 Jahren. Die Kälteleistung magnetisch gelagerter Kältemaschinen erstreckt sich von 250-2 100 kW_{th}.

2.5 Aufzüge

2.5.1 Versorgungsstruktur

In Krankenhäusern werden die Aufzüge überwiegend für die Personenbeförderung und den Bettentransport eingesetzt. Der Energieverbrauch der Aufzüge beträgt im Durchschnitt etwa 5 % des Gesamtenergieverbrauchs eines Krankenhauses. Die wesentlichen Unterschiede zwischen den Aufzügen liegen in der Antriebsleistung, der Traglast, der Regelung und dem Baualter. In diesem Projekt sind in 17 Krankenhäusern jeweils ein oder zwei Aufzüge untersucht worden. Außerdem unterscheiden sich die Aufzüge in ihrer Fahrzeit aufgrund der unterschiedlichen Gebäudehöhe sowie in der Auslastung, die einen wesentlichen Einfluss auf den Energieverbrauch hat.

2.5.2 Einflussgrößen und Einsparmaßnahmen

Aufzüge werden auf eine bestimmte Nennlast ausgelegt. Eine Energieeinsparung kann bei ihnen nur über den Austausch von Anlagenkomponenten oder einen vollständigen Neubau erzielt werden. Allgemein hängt der Energieverbrauch eines Fahrstuhls von folgenden anlagentechnischen Parametern ab:

- Baualter
- Nennlast
- Antriebsart (Hydraulik, Seil mit und ohne Getriebe)
- Hubhöhe
- Motorleistung
- Fahrtenzahl

Es gibt zwei Ansatzpunkte den Energieverbrauch zu optimieren. Einerseits kann der Standby-Verbrauch durch Veränderungen der Regelung/Steuerung und durch den Einbau neuer Anlagenkomponenten minimiert werden und andererseits kann die Antriebstechnik verändert werden. Im Standby-Betrieb gibt es drei Ansatzpunkte den Verbrauch zu minimieren. Zunächst können die Steuerungsfunktionen (Frequenzumrichter-Steuerung oder andere Steuerung) abgeschaltet werden. Der Aufzug wird dann in eine Art „Sleep-Zustand“ gefahren, aus dem er schnell wieder in den Betriebszustand hochgefahren werden kann. In der Schwachlastzeit (nachts) kann dieser Hochfahrprozess auch mit längeren Wartezeiten verbunden werden, um noch mehr Energie einzusparen. Die Netzteile, die den Fahrstuhl während der Betriebs- und Ruhezeiten mit der richtigen Spannung versorgen, sollten einen Wirkungsgrad über 80 % haben. Eine weitere Maßnahme den Standby-Betrieb zu minimieren, ist das Ausschalten der Beleuchtung während der Stillstandzeiten. Generell sollten die Lampen in Aufzügen aus energiesparenden Leuchtmitteln bestehen und die Anzeigetafeln möglichst aus LEDs. Des Weiteren sollte der Türantrieb im Stillstand abgeschaltet werden.

Der Einsatz einer neuen Antriebstechnik bewirkt die größte Energieeinsparung, dadurch sind über 50 % des Energieverbrauchs einzusparen [Kös08]. Dieser Umbau ist jedoch auch mit hohen Investitionskosten verbunden. Die Kosten für einen neuen Antrieb betragen in etwa 11 500 €, der Preis eines neuen Frequenzumrichters liegt bei ca. 4 300 €. In einer Untersuchung der Aufzüge im Krankenhaussektor ist eindeutig festgestellt worden, dass mit zunehmenden Baualter der Energie-

verbrauch sehr stark ansteigt [Kös08]. Dies ist darauf zurückzuführen, dass bei neueren Aufzügen eine deutliche effizientere Technik eingesetzt wird. Durch die Frequenzregelung wird die Fahrleistung dem genauen Bedarf (Personenbelastung) angepasst und durch rückspeisende Umrichter kann ein Teil der bei der Abwärtsfahrt aufgenommenen Energie wieder zurückgewonnen werden.

2.5.3 Energiemengenmessung

Die Messungen erfolgten in zwei Zeiträumen an der dreiphasigen Hauptleitung. Es wurde jeweils eine Kurzzeitmessung über einige Stunden für die Ermittlung der Leistung (alle 3 Phasen) durchgeführt und eine Langzeitmessung über eine Woche, in der die Stromstärke für eine Phase gemessen wurde. Daraus lässt sich der Stromverbrauch für den Stand-by-Betrieb, den Türantrieb, die Steuerung, die Bremse, den Umrichter sowie für den Fahrtrieb ermitteln. Die gemessenen Leistungen variierten im Fahrbetrieb von 0,7 bis 19 kW und im Standby-Betrieb von 0,01 bis 0,6 kW. Da die Messungen an der dreiphasigen Hauptleitung durchgeführt worden sind, kann über den Einfluss, den die Beleuchtung auf den Energieverbrauch hat, keine Aussage getroffen werden, da diese über eine einphasige Nebenleitung mit Strom versorgt wird.

In den nur einige Stunden dauernden Kurzzeitmessungen ist die Wirkleistung der Aufzüge ermittelt und als Lastgang aufgetragen worden. In der Abbildung 2.37 sind zwei Lastgänge für einen Zeitraum von 10 Minuten als Beispiel dargestellt.

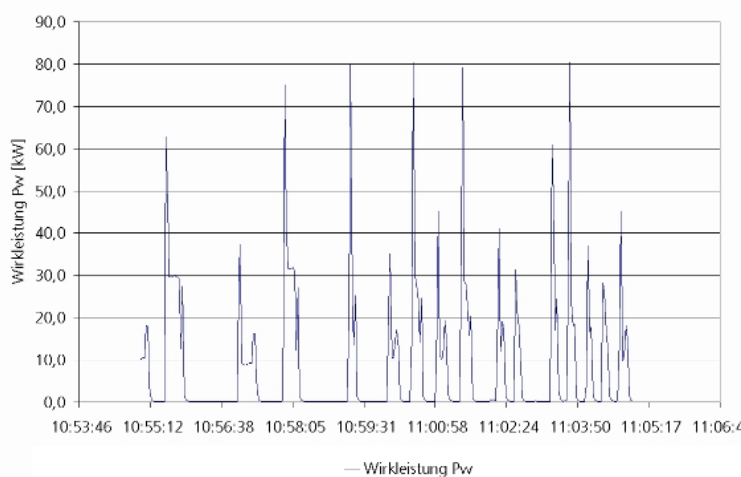
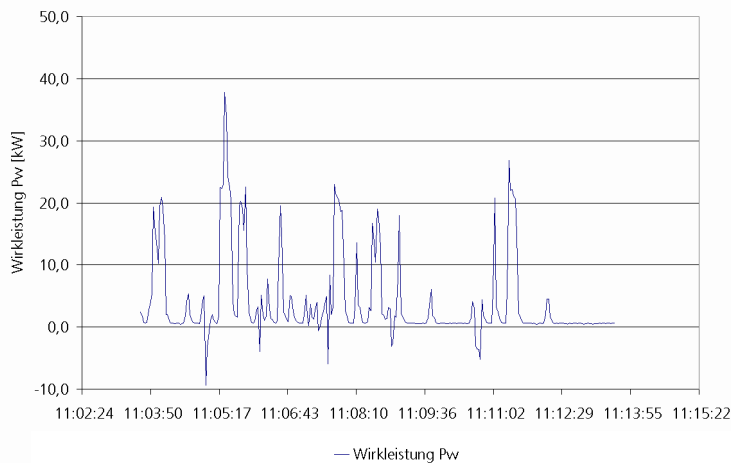


Abbildung 2.37: Charakteristische Lastgänge unterschiedlicher Aufzüge (oben: Aufzug mit getriebelosem Seilantrieb und Frequenzregelung, unten: Aufzug mit Seilantrieb, mit Getriebe und ohne Frequenzregelung)

Im oberen Lastgang ist ein neu installierter Aufzug mit einem getriebelosem Seilantrieb und Frequenzregelung zu sehen. Im unteren Bild ist zum Vergleich der Lastverlauf eines alten Aufzugs zu sehen. Es handelt sich ebenfalls um einen Seilantrieb allerdings mit Getriebe und ohne Frequenzregelung. Erkennbar ist, dass die Leistung des alten Aufzugs trotz einer deutlich geringeren Nennlast mehr als das Doppelte des neuen Aufzugs beträgt.

Die Abwärtsfahrten sind in den Lastgängen an der starken Leistungszunahme zu erkennen, da bei Seilantrieben ein Gegengewicht angehoben wird. Das Profil der Aufwärtsfahrten unterscheidet sich je nach Regelung. Bei der alten Antriebstechnik ohne Frequenzregelung und Energiespeicherung steigt die Leistung auch bei Aufwärtsfahrten erheblich an. Teilweise ist in den Messungen sogar anhand der Lastgänge nicht erkennbar, ob es sich um eine Auf- oder Abwärtsfahrt handelt, da die Leistungspeaks in etwa gleich groß sind. Bei den neuen Aufzügen mit Frequenzregelung hingegen ist die Leistung während der Aufwärtsfahrten deutlich geringer als bei Abwärtsfahrten. Die negativen Ströme zeigen, dass der neue Aufzug Strom während der Abwärtsfahrt wieder zurückspeist. Das Verhältnis von aufgenommener Energie bei der Abwärtsfahrt zu abgegebener Energie bei der Aufwärtsfahrt wird als Rekuperationsgrad bezeichnet und liegt zwischen 30 und 40 % [Nip05]. Ein Problem bei diesen rückspeisenden Umrichtern ist, dass der Strom nicht in den Antrieb zurückspeist wird sondern als Strom von anderen Anlagen abgenommen werden muss.

Der Vergleich der Messergebnisse hat ergeben, dass der Energieverbrauch bei Aufzügen mit Frequenzregelung bei gleicher Fahrtenauslastung niedriger ist. Dieser Zusammenhang ist graphisch in der Abbildung 2.38 zu sehen.

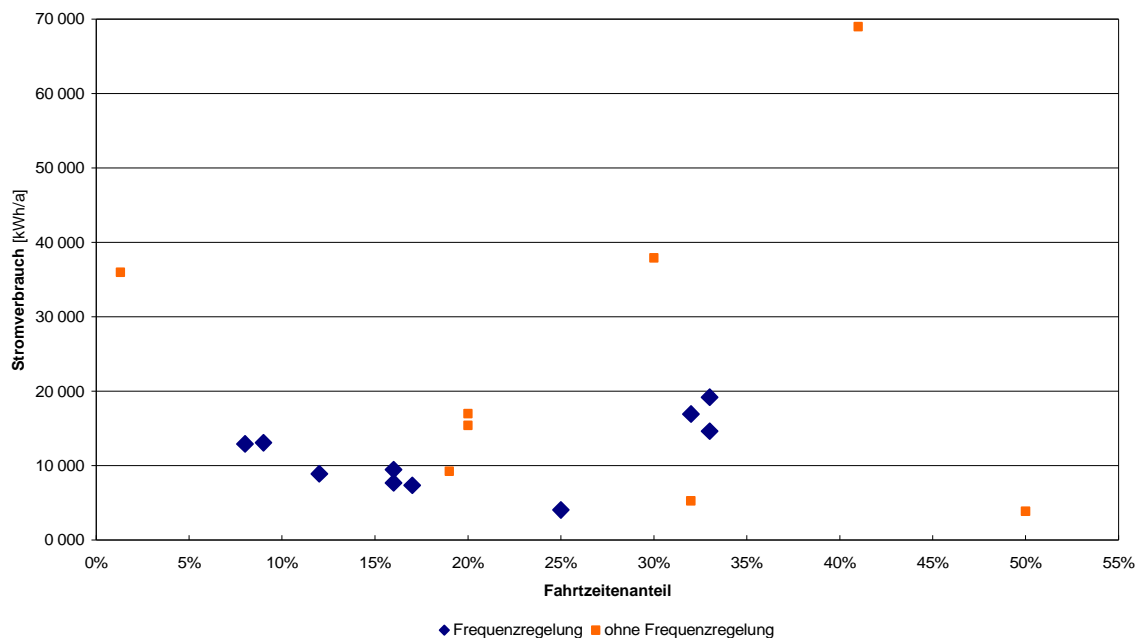


Abbildung 2.38: Jahresenergieverbrauch in Abhängigkeit der Regelung und der Auslastung

Im Bereich der Fahrzeitenanteile zwischen 15 und 20 % ist erkennbar, dass der Energieverbrauch bei nahezu gleichen Fahrzeiten bei einer Frequenzregelung um etwa 5 000 kWh niedriger ist. Bei einem Strompreis von 0,13 €/kWh entspricht dies jährlichen Mehrkosten von 650 € pro Aufzug. In zwei Krankenhäusern konnte ein direkter Vergleich zwischen einem alten Aufzug ohne Frequenzregelung und einem neu installierten Aufzug mit Frequenzregelung angestellt werden. Die jährlichen Energiekosteneinsparungen betragen in einem Fall 35 % und in dem anderen Fall 75 %. Der Unterschied in der Höhe der Energieeinsparung ist auf die unterschiedliche Auslastung zurückzuführen. Je stärker ein Fahrstuhl frequentiert ist, desto höher ist der Energieverbrauch und desto größer ist das Einsparpotenzial. Zudem ist aus der Abbildung 2.38 erkennbar, dass der Großteil der untersuchten Krankenhäuser über Aufzüge mit Frequenzregelung verfügt. Durch eine Frequenzregelung und den Einsatz von effizienteren Netzteilen kann bei neuen Aufzügen auch die Leistung

pro installiertes Kilogramm Nennlast reduziert werden und damit die Gesamtleistung. Dieser Zusammenhang kann den Trendlinien in Abbildung 2.39 entnommen werden. Die Punkte im ersten Diagramm stammen aus den Messungen, die Daten im unteren Diagramm sind aus den Herstellerangaben der untersuchten Aufzüge errechnet worden. Es ist erkennbar, dass die installierte Leistung bei gleichbleibender und teilweise sogar zunehmender Nennlast abnimmt. Bei neueren Anlagen (Baujahr < 1995) liegt die Nennleistung pro Nennlast in der Regel unter 10 W/kg.

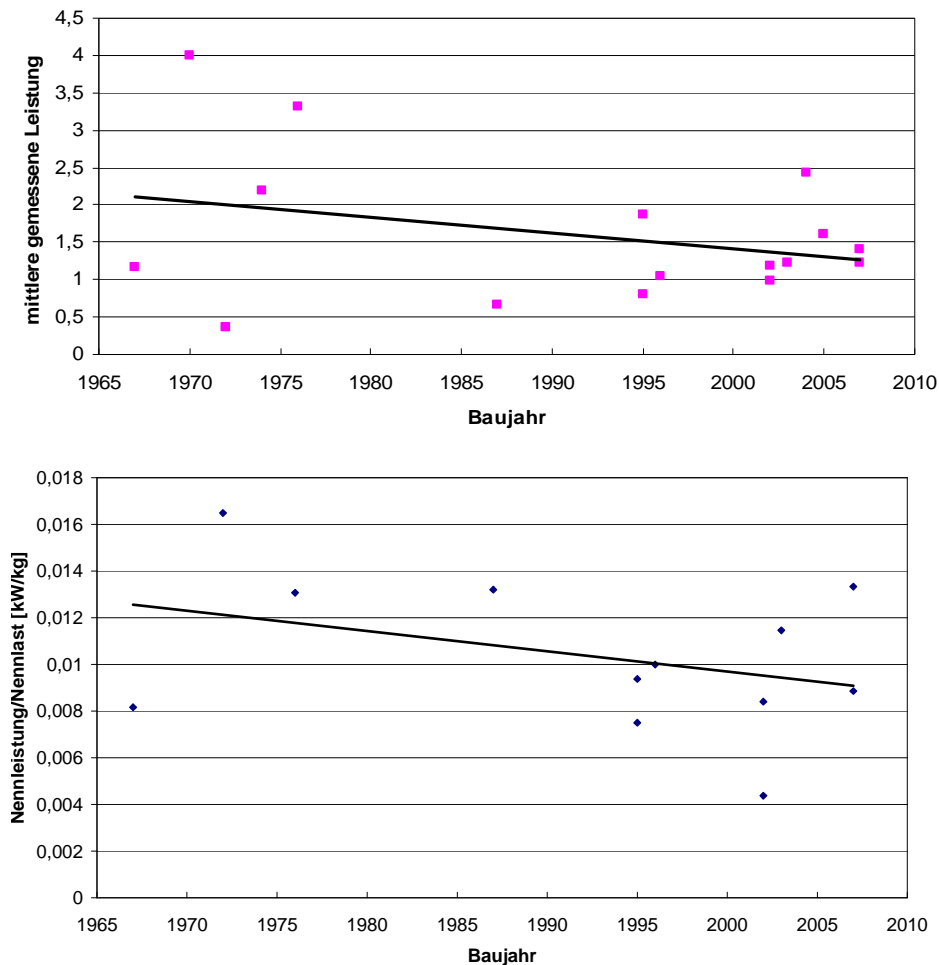


Abbildung 2.39: Einfluss des Baujahrs auf die mittlere Leistung im Betrieb und die installierte Leistung pro Nennlast

Die Messergebnisse sind in der nachfolgenden Abbildung 2.40 geordnet nach Baujahren zusammengefasst. Neben der Fahr- und Standby-Leistung sind die Nennlast, die Auslastung bezogen auf die Nennleistung sowie die Fahrtenzeit aufgetragen. Auch hier ist festzustellen, dass die neueren Aufzüge effizienter sind. Das Verhältnis von gemessener Leistung zu installierter Leistung kann als Kennwert für die Dimensionierung genommen werden. Je kleiner das Verhältnis ist, desto mehr ist der Fahrstuhl überdimensioniert. Ein Wert unter 10 %, wie er bei den Aufzügen der Baujahre 1972 und 1987 auftritt, bedeutet, dass der Aufzug auf eine zu hohe Belastung ausgelegt ist, die nicht annähernd eintritt.

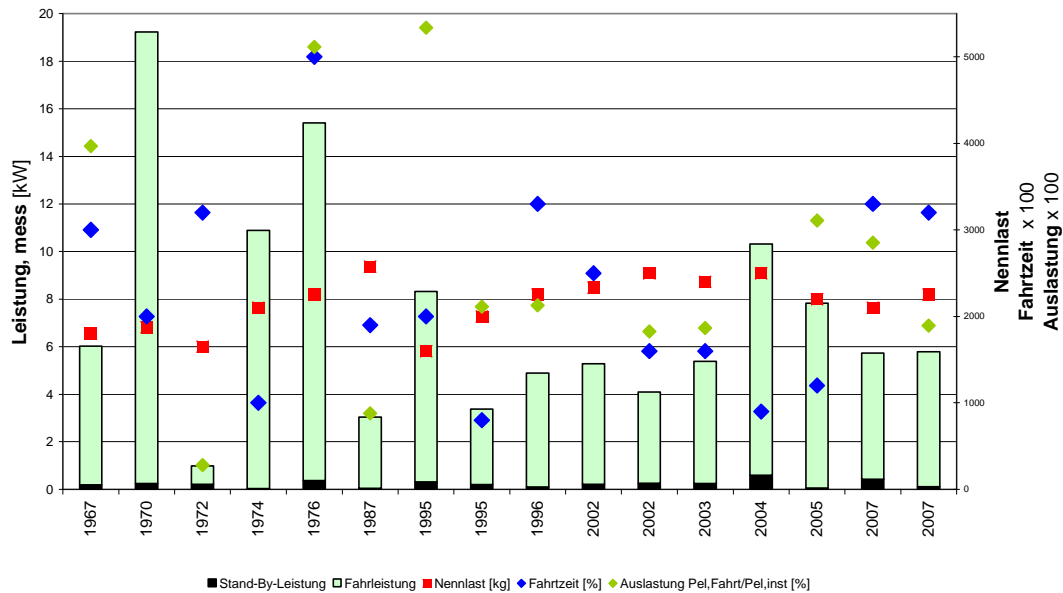


Abbildung 2.40: Vergleich der Messwerte geordnet nach den Baujahren der Aufzüge

Anhand der Standby-Leistung kann zunächst keine Tendenz zwischen neuen und alten Aufzügen festgestellt werden. Dies ist darauf zurückzuführen, dass in den neuen Aufzügen einerseits der Standby-Verbrauch minimiert wird, andererseits die Regelung komplexer ist. Aus diesem Grund ist in der Abbildung 2.40 auf den ersten Blick nicht zu erkennen, dass der Standby-Verbrauch minimiert wird. Die Ursache liegt darin, dass deutlich mehr Technik und eine aufwändigere Regelung installiert sind und daher die höhere Effizienz durch mehr Verbraucher ausgeglichen wird. Die neuen Regelungen ermöglichen einen höheren Fahrkomfort, d.h. die Fahrgäste werden ruck- und vibrationsarm bei minimalen Geräuschemissionen befördert. Zudem werden die Fahrten so gesteuert, dass Leerfahrten vermieden werden und somit Energie eingespart wird. Ein weiterer Vorteil bei den neuen Steuerungen ist die genauere Positionierung, so dass die Aufzüge bündig mit dem Boden anhalten und ein sicheres Verlassen der Kabine ohne Stolpern gewährleisten.

Als Durchschnittswert aus diesen Messungen hat sich ein Verbrauch pro Aufzug von 17 794 kWh/a ergeben, bei einem Fahrtenanteil von 24 %. Bei einer gemittelten Aufzugsanzahl pro Krankenhaus von 12 Stück ergibt sich ein jährlicher Verbrauch von 213,5 MWh/a. Der Verbrauchswert pro Aufzug kann als grober Anhaltswert für die Beurteilung des Energieverbrauchs eines Aufzugs verwendet werden, wenn die Fahrtenzeit identisch ist.

Eine weitere wichtige Kennzahl zur Beurteilung der Effizienz eines Aufzugs, die ebenfalls mit Hilfe des Fahrzeitenanteils ermittelt werden kann, ist der Verbrauch des Aufzugs pro gefahrene 10 Sekunden. Um diese Kennzahl zu bestimmen muss zunächst ermittelt werden, wie lange eine Fahrt dauert. Im Durchschnitt betrug die Zeit für eine Fahrt vom Erdgeschoß bis zur obersten Etage in etwa 20 Sekunden. Die Fahrtverbrauchskennzahl wird aus der Multiplikation dieser Zeit und der gemessenen mittleren Fahrleistung berechnet und auf 10 Sekunden umgerechnet. Anhand dieses Wertes und mit Hilfe des Fahrtenzählers kann auf einfache Weise der Jahresverbrauch für den Fahrbetrieb errechnet werden. Die Zeit der Grundlast, die für die Berechnung des Standby-Verbrauchs wichtig ist, wird aus der Differenz der Jahreszeit und der Fahrzeit ermittelt. Indem diese Zeit mit der Grundlastleistung multipliziert wird, kann der Grundlastverbrauch berechnet werden. Aus der Summe der beiden Verbräuche ergibt sich der Jahresgesamtverbrauch.

2.5.4 Vergleich und Best-practice-Lösung

Der Energieverbrauch bei Aufzügen kann immer nur durch den Austausch von Anlagenkomponenten oder den Austausch des kompletten Aufzugs realisiert werden. Aus den Messungen in denen zwei Aufzüge unterschiedlichen Baujahrs bei gleicher Belastung in einem Krankenhaus untersucht worden sind, geht hervor, dass der Energieverbrauch sehr stark reduziert werden kann, um bis zu 75 %. Demnach ist das Baujahr ein wichtiger Wert für die Beurteilung der Aufzugsanlage. Bei Anlagen, die vor 1990 in Betrieb genommen worden sind, sollte über einen Austausch nachgedacht werden.

Aufzüge werden mittlerweile mit einem Energieeffizienzlabel nach VDI 4707 (ähnlich dem bei Haushaltsgeräten: A = sehr sparsam) bewertet, so dass die Auswahl effizienter Anlagen erleichtert wird. Die entscheidenden Kriterien für dieses Label sind der Energieverbrauch im Fahr- und Standby-Betrieb. Nachfolgend sind, getrennt für die Bereiche Standby und Fahrt, stichpunktartig die Kriterien aufgelistet, die bei einem energieeffizienten Aufzug eingehalten werden sollten:

Tabelle 2.3: Best-practice für energieeffiziente Aufzüge [Hak08]

Standby-Betrieb	Fahrtbetrieb
<ul style="list-style-type: none">• Fahrkorbbeleuchtung durch Energiesparlampen, bei Nichtbenutzung ausschalten	<ul style="list-style-type: none">• Optimale Auslegung (keine Überdimensionierung der Gegen-/ Ausgleichsgewichte)
<ul style="list-style-type: none">• Anzeigetafel mit LED-Technik, bei längerem Stillstand abschalten	<ul style="list-style-type: none">• Alte Seilantriebe durch neuere Antriebe mit größerem Wirkungsgrad einsetzen (Wirkungsgrad > 0,8)
<ul style="list-style-type: none">• Frequenzumrichter im Stillstand ausschalten	<ul style="list-style-type: none">• Intelligente Aufzugssteuerung zur Vermeidung von Fehlfahrten (Vollsammelsteuerung, CAN-Bus)
<ul style="list-style-type: none">• Türantriebe mit Stromausschaltung an Haltestellen, spannungsfrei	<ul style="list-style-type: none">• Reibungen bei Umlenkrollen und Schienen durch ausreichend Schmierung und Austausch von Lagern minimieren
<ul style="list-style-type: none">• Aufzugssteuerung mit „Sleepmodus“ während der Ruhezeiten (nachts)	<ul style="list-style-type: none">• Getriebelose (Gearless) Aufzugsmaschine mit Frequenzregelung

Die Vorteile der getriebelosen Seilantriebe gegenüber den Antrieben mit Getriebe sind geringere Geräuschemissionen, Wartungsfreiheit, höherer Fahrkomfort, kompaktere Bauweise und vor allem höhere Wirkungsgrade. Demgegenüber stehen 30 % höhere Investitionskosten und eine begrenzte Hubhöhe. Aufgrund der Hubhöhengrenze kann dieser Aufzugstyp nicht in jedem Gebäude eingebaut werden. Eine Alternative dazu wäre ein Getriebemotor mit Asynchronmotor.

Durch den Einsatz einer intelligenten Steuerung werden die Fahrten in einer sinnvollen Reihenfolge abgearbeitet. Dadurch, dass der Benutzer durch Richtungstasten die Fahrtrichtung dem Steuerungssystem mitteilt, wird das Anfahren der verschiedenen Etagen gesteuert, und es werden unnötige Fahrwege und damit Energie eingespart.

An einem Beispiel soll das Einsparpotenzial, dass durch den Einsatz eines neuen Aufzugssystem, das alle in Tabelle 2.3 aufgeführten Kriterien erfüllt, berechnet werden. Bei dem auszutauschenden Beispielaufzug wird davon ausgegangen, dass es sich um einen Seilantrieb mit Getriebe und ohne Fre-

quenzregelung handelt. Dementsprechend werden die schlechtesten Standby- und Fahrleistungen aus den Messungen angesetzt. Diese Werte sind aus den mittleren Messwerten berechnet worden und betragen für die Standby-Leistung 0,6 kW und für die Fahrleistung 19 kW. Anhand der Messungen ist festzustellen, dass die durchschnittliche Fahrtenzeit 24 % beträgt. Daraus lässt sich ein jährlicher Energieverbrauch pro Aufzug von 43 940 kWh ermitteln. Bei einer durchschnittlichen Aufzugsanzahl von 12 Stück pro Krankenhaus und einem spezifischen Strompreis von 0,13 €/kWh ergeben sich jährliche Gesamtenergiekosten von 68 547 € (pro Aufzug 5 712 €). Werden die alten Aufzüge durch neue effiziente Aufzüge ersetzt, kann die Leistung deutlich reduziert werden (Standby: 0,1 kW, Fahrt: 5,7 kW) und jährlich pro Aufzug ca. 30 000 kWh oder 4 068 € eingespart werden. Pro Aufzug sind für die kompletten Modernisierungsmaßnahmen (Antrieb, Umrichter, Steuerung, Beleuchtung) etwa 30 000 € als Investitionskosten anzusetzen [Kös08]. Daraus lässt sich eine Amortisationszeit von 7,4 Jahren errechnen.

Anhand des Boxplot-Vergleiches können Aufzugsanlagen verglichen und Einsparpotenziale durch einen Austausch abgeschätzt werden. Der Vergleich zeigt einen hohen Anteil alter Aufzugsanlagen. Der Aufzug des KH 18 gehört fast zu den ältesten 25 % und hat den höchsten Verbrauch sowohl während der Fahrt als auch im Stand-by-Betrieb. Außerdem ist der Anteil der Fahrzeit der höchste Wert der Untersuchung, so dass sehr hohe Stromkosten entstehen.

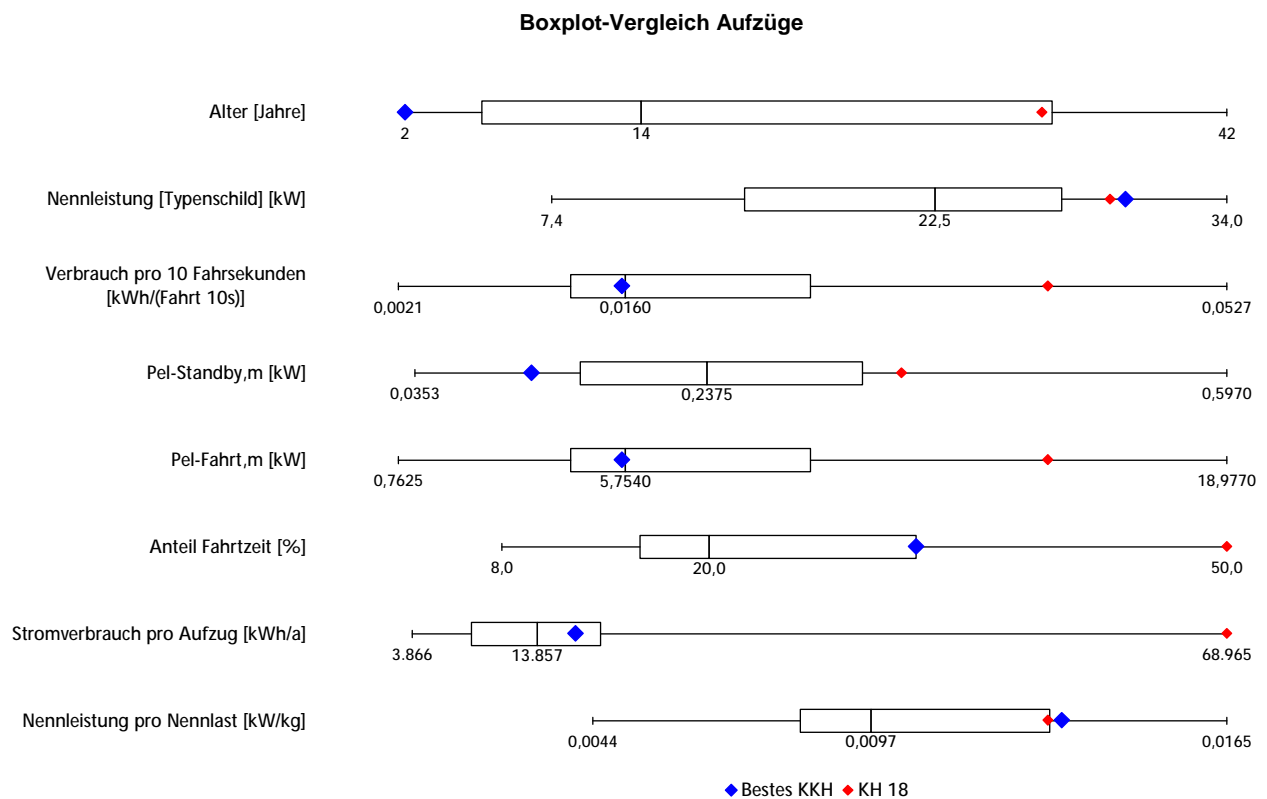


Abbildung 2.41: Boxplot als Überblick und Einschätzungshilfe der Kennwerte für Aufzüge

Der beste Aufzug aus den Messungen ist im Vergleich einer der jüngsten Fahrstühle und hat niedrige Verbrauchswerte sowohl im Standby- als auch im Fahrbetrieb. Aufgrund der hohen Auslastung ist der Stromverbrauch des Aufzuges vergleichsweise hoch.

3 Fazit

Im vorgestellten Forschungsprojekt wurde der Energieverbrauch von 20 Krankenhäusern untersucht. Hierzu wurden umfangreiche Lastgangmessungen durchgeführt, mit deren Hilfe direkte Einsparmaßnahmen in den Krankenhäusern aufgezeigt werden konnten. Auf der Basis der Messergebnisse konnten Jahresenergieverbräuche für die untersuchten Verbrauchssektoren berechnet werden, die in einem Boxplot-Vergleich analysiert wurden. Dabei wurden den spezifischen Energieverbrauchswerten energierelevante Einflussgrößen gegenübergestellt, so dass für jedes Krankenhaus ermittelt werden konnte, welche Einflussgrößen für einen erhöhten Energieverbrauch verantwortlich sind. Es wurden Einsparmaßnahmen entwickelt und bewertet. Durch die bedarfsangepasste Einstellung der Regelung können immer noch große Einsparpotenziale erschlossen werden. Da die Betriebsweisen und Lastverläufe der Anlagen nicht im Detail bekannt sind, bleiben Einsparungen in diesem Bereich ungenutzt. In einigen Krankenhäusern kann der Ersatz alter Anlagen durch hocheffiziente, neue Anlagen deutliche Einsparungen und einen wirtschaftlichen Vorteil erzielen. Möglichkeiten zur Sanierung der Gebäudehülle wurde in diesem Projekt nicht im Detail betrachtet, bieten aber gerade bei alten Gebäuden ein großes Einsparpotenzial. Mit Hilfe einfacher Werkzeuge (Diagramme, Kennzahlen, Beispielrechnungen) können Energieverbräuche einzelner Verbraucher überschlägig berechnet werden, um Einsparpotenziale abschätzen zu können. Auf Basis der Energiemessungen und der Praxiserfahrungen aus den Krankenhäusern sowie anhand eigener Recherchen wurden Best-practice-Lösungen entwickelt, die in vielen Krankenhäusern umgesetzt und durch die besonders effektiv Energieeinsparungen erzielt werden können. In einigen Krankenhäusern wurden die Untersuchungsergebnisse direkt in Maßnahmen umgesetzt, in einem Krankenhaus wurde bereits eine Best-practice-Lösung realisiert. Im Bereich der Wärmeversorgung wurde für die Krankenhäuser, die ausreichende Daten über Baualter, Gebäudegeometrien und Raumnutzung liefern konnte, ein Referenzwärmebedarf ermittelt, mit dem der gemessene Wärmeverbrauch verglichen werden kann. Gleichzeitig wurden für die verschiedenen Gebäude die Anteile der Transmissions- und Lüftungswärmeverluste sowie die solaren und inneren Gewinne ermittelt. Das Projekt hat gezeigt, dass den Krankenhäusern in vielen Fällen nicht ausreichend Daten über die energierelevanten Einflussfaktoren vorliegen. Diese sind jedoch erforderlich, um eine Energieverbrauchsstruktur oder eine Kostenverteilung zu erstellen und effektive Energiesparmaßnahmen zu entwickeln. Auf der Basis von grundlegenden Flächenangaben (Wand, Fenster, Dach, Erdreich) in Verbindung mit dem Gebäudealter sowie den Flächen nach Nutzungsarten gruppiert (OP-Säle, Intensivstationen, mechanisch belüftete Flächen wie Behandlung, OP-Nebenzimmer, innenliegende Räume und natürlich belüfteter Flächen) können Vergleichswerte für den Wärme- und Kälteverbrauch berechnet werden. Die inneren Wärmequellen durch Stromverbraucher müssen noch detaillierter ermittelt werden, um die Berechnungen weiter zu präzisieren. Weiterhin muss die Datenbasis bezüglich der Energieversorgungsanlagen weiter verbessert werden, um kontinuierlich die Effizienz und Sicherheit der Energieversorgung bewerten zu können. Hierzu gehören neben den Bestandsdaten auch Lastgänge, die eine Beurteilung der Energienutzung ermöglichen und eventuelle Fehlfunktionen aufzeigen. Dabei ist zu berücksichtigen, dass die Datenmenge auf das Wesentliche begrenzt wird, um eine Analyse mit vertretbarem Aufwand zu ermöglichen.

4 Literaturverzeichnis

- [BIN04] Ranft, F. und Haas-Arndt, D.: *Energieeffiziente Altbauten*. TÜV Verlag Köln, 2004.
- [Bud07] BBT Thermotechnik GmbH, Buderus Deutschland (Hrsg.): *HAST-AKKU Energie- und Speichermanagement für Kesselanlagen und Fernwärmeanschlüsse*. Systemkomponente Ausgabe 06/2007, <http://www.hast-akku.de/uploads/media/Praesentation-HAST-AKKU.pdf>, 29.06.2009.
- [Bur03] Burger, Prof. Dr.-Ing. H. und Rogatty, W.: *Anpassung der Heizleistung an die Heizlast*. Artikel aus „BHKS Almanach 2003“, TGC – Technische Gebäudeausrüstung Consulting Bonn, 2003
- [Des08a] Statistisches Bundesamt (Hrsg.): *Gesundheit – Grunddaten der Krankenhäuser, Fachserie 12 Reihe 6.1.1*. Statistisches Bundesamt Wiesbaden, 2008
<http://www.destatis.de>
- [Des08b] Statistisches Bundesamt (Hrsg.): *Gesundheit – Kostennachweis der Krankenhäuser, Fachserie 12 Reihe 6.3*. Statistisches Bundesamt Wiesbaden, 2008
<http://www.destatis.de>
- [Dic09] Dickhoff, A. (BUND Berlin e.V.): *Energieeffizienz in Kliniken – BUND Gütesiegel „Energie sparendes Krankenhaus“ zeichnet Nutzung intelligenter Energie aus*. Vortrag auf der Klinergie 2020, März 2009 http://www.klinergie.de/fileadmin/user_upload/pdf/09-03-25_Dickhoff_Vortrag_KLINERGIE.pdf, 10.06.2009.
- [Frö04] Fröling, J. und Maier, B.: *Hygiene muss nicht teuer sein*. Artikel aus der Zeitschrift : TGA Fachplaner, Jg.: 3, Nr. 2, 2004
- [Mai03] Maier, B. und Franzheim S.: *Trinkwassererwärmer im Objektbereich*. Artikel in TGA Fachplaner 5-2003, Alfons W. Gentner Verlag Stuttgart, 2003
- [Hak08] Hake, O.: *Energieeinsparungen im Aufzugsbau, Der Aufzug und der Kühlschrank*. S. 46 Lift-Journal 5/2008.
http://www.kleffmann-verlag.de/downloads/artikel/artikel_uid_1422.pdf, 25.06.2009.
- [Hol08] Holeck, S.: *Energieoptimierung in Krankenhäusern*. Dissertation an der Fakultät für Architektur der Bauhaus-Universität Weimar, 2007.
- [Jan07] Jagnow, Dr. K. et al.: *OPTIMUS – Technische Optimierung und Energieeinsparung*. Forschungsprojekt (Az-18315) der Deutschen Bundesstiftung Umwelt DBU Osnabrück, 2007
- [Log05] Loga, T. et al.: *Kurzverfahren Energieprofil*. Fraunhofer IRB Verlag Stuttgart, 2005.

- [Kob09] Kober, R. (Hrsg.): *Energieeffiziente Gebäudeklimatisierung Raumluft in A++ Qualität*. Promoter Verlag Karlsruhe, 2009.
- [Kös08] Kösters, K.: *Energetische Betrachtung von Aufzügen im Krankensektor*. Studienarbeit Ruhr-Universität Bochum, 2008.
- [Nip05] Nipkow, J.: *Elektrizitätsverbrauch und Einspar-Potenziale bei Aufzügen*. Schweizerische Agentur für Energieeffizienz, Zürich, 2005.
- [Sch08a] Schramek, Prof. Dr.-Ing. E.-R. (Hrsg.): *Taschenbuch für Heizung und Klimatechnik 07/08*. Oldenbourg Industrieverlag München, 73. Auflage, 2007.
- [Sch08b] Schmickler, F.-P.: *Trinkwassererwärmungsanlagen- ein Vorschlag für die richtige Auslegung im Nichtwohnungsbau*. Artikel in „gi - Gesundheitsingenieur“ Heft 6/2005, Oldenbourg Industrieverlag München, 2005
- [Tip03] Tippkötter, R.: *Rationelle Energienutzung in Krankenhäusern*. Vieweg Verlag Wiesbaden, 2005.
- [Wol04] Wolff, Prof. Dr.-Ing. D. et al.: *Felduntersuchung: Betriebsverhalten von Heizungsanlagen mit Gas-Brennwertkesseln*. Forschungsprojekt (Az-14133) der Deutschen Bundesstiftung Umwelt DBU Osnabrück, 2004

5 Anhang

Beschreibung der Kennwerte des Krankenhausvergleiches und ihre Abkürzungen

Wärmeversorgung 1

$q_{\text{Heiz-ges-mess, TRY}}$ [kWh/m²a]

ist der spezifische Heizwärmebedarf ohne den Warmwasserbedarf und ergibt sich aus der gemessenen Heizwärme bezogen auf ein Testreferenzjahr dividiert durch die Gesamtbruttogeschossfläche des Krankenhauses.

$q_{\text{BH-mess, TRY}}$ [kWh/m²a]

ist der spezifische Heizwärmebedarf für die gemessenen Bettenhausbereiche ohne den Warmwasserbedarf und ergibt sich aus der gemessenen Heizwärme bezogen auf ein Testreferenzjahr dividiert durch die Bruttogeschossfläche des gemessenen Bereiches.

$q_{\text{OP-mess, TRY}}$ [kWh/m²a]

ist der spezifische Heizwärmebedarf für die Operationssäle ohne den Warmwasserbedarf und ergibt sich aus der gemessenen Heizwärme bezogen auf ein Testreferenzjahr dividiert durch die Bruttogeschossfläche des gemessenen Bereiches.

$q_{\text{Lüft-mess, TRY}}$ [kWh/m²a]

ist der spezifische Heizwärmebedarf für den gemessenen mechanisch belüfteten Bereich und ergibt sich aus der gemessenen Heizwärme bezogen auf ein Testreferenzjahr dividiert durch die Bruttogeschossfläche des gemessenen Bereiches.

spez. Brennstoffkosten [€/kWh]

sind die Kosten für eine Kilowattstunde des verwendeten Brennstoffs, sie werden aus den Daten der Heizkostenabrechnung gewonnen.

spez. Wärmepreis [Ct/kWh]

ist der Preis für eine Kilowattstunde erzeugter Wärme und berechnet sich aus den spezifischen Brennstoffkosten und einem allg. Nutzungsgrad für die jeweilige Anlageart.

Heizkosten-ges-TRY : Ages-mess [€/m²a]

ist das Produkt aus dem gemessenen Gesamtheizenergiebedarf und den spezifischen Brennstoffkosten bezogen auf die Gesamtbruttogeschossfläche des Krankenhauses.

Heizkosten-BH-TRY : ABH-mess [€/m²a]

ist das Produkt aus dem gemessenen Heizenergiebedarf der gemessenen Bettenhäuser und den spezifischen Brennstoffkosten bezogen auf deren Bruttogeschossfläche.

Heizkosten-OP-TRY : AOP-mess [€/m²a]

ist das Produkt aus dem gemessenen Heizenergiebedarf der gemessenen Operationssäle und den spezifischen Brennstoffkosten bezogen auf deren Bruttogeschossfläche.

Heizkosten-Lüft-TRY : ALüft-mess [€/m²a]

ist das Produkt aus dem gemessenen Heizenergiebedarf der gemessenen mechanisch

belüfteten Bereiche und den spezifischen Brennstoffkosten bezogen auf die klimatisierte Fläche ohne Operationssäle.

Wärmeversorgung 2

$q_{\text{Heiz-ges-mess, TRY}}$ [kWh/m²a]
siehe oben.

U-Wert [W/m²K]

beschreibt den flächenbezogenen durchschnittlichen Wärmeverluststrom der Gebäudehülle aller Krankenhausgebäude durch Transmission und damit den Wärmedämmstandard. Für jedes Gebäude werden in Abhängigkeit vom Gebäudealter für die Dach-, Wand-, Keller- und Fensterflächen U-Werte ermittelt, mit denen die Transmissionswärmeverluste der Bauteile berechnet werden. Der dargestellte U-Wert ist der flächengewichtete Durchschnitt aller Bauteile und Gebäude.

A_T/V [m²/m³]

dieser Kennwert (Kompaktheit) bezieht die Hüllflächen der Krankenhausgebäude, die Transmissionswärmeverluste verursachen, auf das gesamte umbaute Volumen. Ein hoher Wert für A_T/V bedeutet eine geringe Kompaktheit und damit höhere Wärmeverluste.

$A_{\text{natLüft}}$: AKH [%]

ist der prozentuale Anteil der nicht klimatisierten (natürlich belüfteten) Flächen an der Gesamtbruttogeschossfläche des Krankenhauses.

A_{OP} : AKH [%]

ist der prozentuale Anteil der Flächen der Operationssäle an der Gesamtbruttogeschossfläche des Krankenhauses.

$A_{\text{Lüft}}$: AKH [%]

ist der prozentuale Anteil der mechanisch belüfteten Fläche an der Gesamtbruttogeschossfläche des Krankenhauses.

Bettzahl [-]

ist die Anzahl der Planbetten des jeweiligen Krankenhauses.

A_{KH} : Bett [m²/Bett]

bezieht die Gesamtbruttogeschossfläche des Krankenhauses auf die Anzahl der Planbetten.

Wärmeversorgung 3

$q_{\text{Heiz-ges-mess, TRY}}$ [kWh/m²a]
siehe oben.

Nutzungsgrad [-]

wird je nach Art der Wärmebereitstellung anhand von Untersuchungsergebnissen auf einen Wert zwischen 0,73 und 1 festgesetzt (Fernwärme: 1, Brennwärtekessel: 0,95, Niedertemperaturkessel: 0,85, Festtemperaturkessel: 0,73).

Alter Kessel [-]

ist das Alter der installierten Wärmeversorgungsanlage.

Q'_{inst} [kW]

ist die Summe der installierten Leistung zur Wärmebereitstellung.

$Q'_{\text{inst}} : A$ [kW/m²]

ist die installierte Leistung bezogen auf die Gesamtbruttogeschossfläche des Krankenhauses.

$T_{\text{a,mess-m}}$ [°C]

ist der Mittelwert der gemessenen Außentemperatur im Messzeitraum.

V'_m [m³/h]

ist der Mittelwert des gemessenen Volumenstroms am Heizkessel.

$T_{\text{VL,m}}$ [°C]

ist die durchschnittliche gemessene Temperatur im Vorlauf des Heizsystems.

$T_{\text{RL,m}}$ [°C]

ist die durchschnittliche gemessene Temperatur im Rücklauf des Heizsystems.

dT_m [K]

ist die durchschnittliche Temperaturdifferenz zwischen Vor- und Rücklauf des Heizungssystems.

$Q_{\text{mess-TRY}} : Q'_{\text{inst}}$ [h/a]

ist der spezifische Heizwärmebedarf ohne Trinkwarmwasser bezogen auf die installierte Leistung, es ergibt sich die Jahresvolllaststundenzahl.

$Q'_{\text{extrap,max}} : Q'_{\text{inst}}$ [-]

bezieht die maximal Wärmeleistung bei -10 °C Außentemperatur auf die installierte Leistung. Die maximale Leistung wird mit Hilfe der Außentemperaturen aus den Messdaten extrapoliert.

Wärmeversorgung 4

$q_{\text{Heiz-ges-mess, TRY}}$ [kWh/m²a]

siehe oben.

$q_{\text{ges-ref}}$ [kWh/m²a]

ist die theoretisch benötigte Wärme als Summe aus Transmissions- und Lüftungswärmeverlusten sowie den inneren und solaren Gewinnen bezogen auf die gesamte Bruttogeschossfläche.

$q_{\text{ges-ref-Trans}}$ [kWh/m²a]

ist der theoretische, jährliche Transmissionswärmeverlust bezogen auf die gesamte Bruttogeschossfläche.

$q_{\text{ges-ref-Lüft}}$ [kWh/m²a]

ist der theoretische, jährliche Lüftungswärmeverlust bezogen auf die gesamte Bruttogeschossfläche.

$q_{\text{ges-ref-iGewinne}}$ [kWh/m²a]

ist der theoretische, jährliche innere Wärmegewinn durch Personen, elektrische Geräte und Beleuchtung bezogen auf die gesamte Bruttogeschossfläche.

$q_{\text{ges-ref-Sol}}$ [kWh/m²a]

ist der theoretische, jährliche Wärmegewinn durch solare Einstrahlung bezogen auf die gesamte Bruttogeschossfläche.

$Q_{\text{ges-ref-Trans}} : Q_{\text{ges-ref}}$ [%]

ist der theoretische Transmissionswärmeverlust bezogen auf den theoretischen Gesamtwärmebedarf.

$Q_{\text{ges-ref-Lüft}} : Q_{\text{ges-ref}}$ [%]

ist der theoretische Lüftungswärmeverlust bezogen auf den theoretischen Gesamtwärmebedarf.

$Q_{\text{ges-ref-iGew}} : Q_{\text{ges-ref}}$ [%]

ist der theoretische innere Wärmegewinn bezogen auf den theoretischen Gesamtwärmebedarf.

$Q_{\text{ges-ref-Sol}} : Q_{\text{ges-ref}}$ [%]

ist der theoretische solare Wärmegewinn bezogen auf den theoretischen Gesamtwärmebedarf.

$Q_{\text{Heiz-ges-mess, TRY}} : Q_{\text{ges-ref}}$ [%]

ist das Verhältnis aus dem gemessenen und auf das Testreferenzjahr extrapolierten Heizwärmebedarf und dem berechneten, theoretischen Heizwärmebedarf.

Einsparpotenzial Pumpstrom $dT_{\text{theoretisch}} (>0)$ [%]

das Einsparpotenzial, das durch die Ausnutzung der optimalen Temperaturdifferenz zwischen Vor- und Rücklauf erreichbar ist. Bei der Berechnung werden Fernwärmeverbindungen von Heizkesselversorgungsanlagen unterschieden.

Brennstoff-Einsparpotenzial η_{95} [%]

ist die mögliche Brennstoffeinsparung, die durch Einsatz der Best-practice-Lösung und einem Nutzungsgrad von 95 % erzielt wird. Bei Krankenhäusern mit Fernwärmeanschluss wird dieser Wert nicht ermittelt.

Einsparpotenzial Wärmepreis [%]

ergibt sich aus dem Vergleich des Wärmepreises des dargestellten Krankenhauses zum besten Wärmepreis der Untersuchung.

Trinkwassererwärmung

T_{WW} [°C]

ist die Temperatur des Wasservolumenstroms bestehend aus wiedererwärmter Zirkulation und

aufgeheiztem Frischwasser, der die Warmwasserbereitung verlässt und in das Netz eingespeist wird.

$dT_{\text{(WW-Zirk)}}$ [°C]

ist die Temperaturdifferenz zwischen ein- und ausströmendem Wasser bezogen auf die Endpunkte des Netzes. Eine große Temperaturdifferenz zwischen eintretendem Trinkwarmwasser und austretendem Zirkulationswasser deutet auf zu hohe Wärmeverluste und auf ein Risiko zur Legionellenbildung hin.

$Q_{\text{Zirk}} / Q_{\text{TWE}}$ [-]

setzt den Wärmeverlust des Zirkulationswassers mit dem Gesamtwärmebedarf für die Trinkwassererwärmung ins Verhältnis. Beide Größen berechnen sich aus den Volu-

menströmen, Temperaturdifferenzen sowie den temperaturabhängigen Größen Dichte und Wärmekapazität.

$$V'_{\text{Zirk}} / V'_{\text{WW}} [-]$$

vergleicht den Zirkulationsvolumenstrom mit dem gesamten Volumenstrom an Warmwasser in das Verteilnetz.

$$Q'_{\text{TWE}} / E_{\text{HEIZ,GES}} [-]$$

beschreibt den Anteil der Trinkwassererwärmung an dem gesamten Wärmebedarf des Krankenhauses.

$$Q'_{\text{TWE}} / \text{Planbett} [\text{kW/Bett}]$$

ist die durchschnittliche Heizleistung der Trinkwassererwärmung je Planbett des Krankenhauses.

$$V'_{\text{FW}} / \text{Planbett} [\text{l}/(\text{Bett} \cdot \text{d})]$$

ist der durchschnittliche Frischwasserbedarf je Planbett und Tag.

$$V'_{\text{WW,max}} / \text{Planbett} [\text{l}/(\text{Bett} \cdot \text{d})]$$

ist der maximale tägliche Warmwasserbedarf im Warmwassernetz während des Messzeitraums bezogen auf die Planbetten, der Volumenstrom in das Netz beinhaltet auch die Zirkulation.

$$Q'_{\text{TWE}} / \text{Patient} [\text{kW/Pat}]$$

ist die durchschnittliche Heizleistung der Warmwasserbereitung pro Patient im Messzeitraum.

$$V_{\text{Speicher}} [\text{m}^3]$$

ist das Volumen des Warmwasserspeichers.

$$V'_{\text{WW,max}} [\text{m}^3/\text{h}]$$

ist der maximale Volumenstrom aus der Warmwasserbereitung in das Netz des Krankenhauses.

$$V'_{\text{WW,max}} / V_{\text{Speicher}} [1/\text{h}]$$

setzt den maximalen Volumenstrom mit der Größe des Speichers ins Verhältnis.

$$Q'_{\text{TWE,max}} [\text{kW}]$$

ist die maximale gemessene Leistung der Warmwasserbereitung während des Messzeitraumes.

$$Q'_{\text{TWE,max}} / V_{\text{Speicher}} [\text{kW}/\text{m}^3]$$

bezieht die maximale Heizleistung auf das Volumen des Warmwasserspeichers.

$$\text{Kosten TWE pro m}^2 [\text{€}/\text{m}^2\text{a}]$$

bezeichnet die jährlich anfallenden Kosten für die Bereitstellung von warmem Trinkwasser. Als Berechnungsgrundlage dient der spezifische Wärmepreis des Krankenhauses sowie dessen Bruttogeschossfläche.

Lüftungen

$$P_{\text{el, gesamt}} [\text{kW}]$$

ist die gesamte elektrische installierte Leistung aller Lüftungen. Diese Gesamtleistung ergibt sich aus der Summe der einzelnen Lüfterleistungen, die vom Hersteller angegeben wird.

V_{gesamt} [m³/h]

ist der Volumenstrom, auf den die Lüftung ausgelegt ist und der vom Hersteller angegeben wird.

AOP [m²]

ist die Fläche des gemessenen Operationssaals.

AI_{nt} [m²]

ist die Fläche der gemessenen Intensivstation.

ARLT, Rest [m²]

ist die gemessene mechanisch belüftete Fläche.

AKH [m²]

ist die Bruttogeschoßfläche des gesamten Krankenhauses.

Wel/AOP [kWh/m²a]

ist die auf die OP-Fläche bezogene jährliche elektrische Arbeit, die dem gemessenen und auf ein Jahr extrapolierten Stromverbrauch der Lüftung entspricht.

P_mTeillast/P_mVolllast [-]

dieses Verhältnis stellt die aus den Messungen ermittelte mittlere elektrische Lüfterleistung im Teillastbereich der mittleren elektrischen Lüfterleistung im Volllastbereich gegenüber. Ist dieser Wert niedrig, bedeutet dies, dass die Lüftung nahezu konstant bei Volllast betrieben wird und nicht dem Bedarf entsprechend geregelt wird.

tVolllast/tJahr [-]

beschreibt den Volllaststundenanteil, d.h. wie viele Stunden im Jahr die Anlage im gemessenen Volllastbereich betrieben wird. Anhand des Lastverlaufs der elektrischen Leistung kann ermittelt werden, wie viele Stunden die Anlage im Voll- und im Niederlastbereich betrieben wurde.

(tVolllast+tTeillast)/tJahr [-]

ist das Verhältnis, wie viele Stunden im Jahr eine Anlage betrieben wird. Aus den Messungen werden die Betriebszeiten auf ein Jahr hochgerechnet und durch die Stundenanzahl eines Jahres dividiert. Wird eine Anlage nie ausgeschaltet, beträgt dieser Wert 100 %.

Wel_{Teillast}/Wel [-]

ist das Verhältnis vom Stromverbrauch im Teillastbereich zum Gesamtstromverbrauch. Die Verbrauchswerte stammen aus den Messungen und sind auf ein Jahr hochgerechnet.

P_{el,inst} [kW]

ist die installierte elektrische Lüfterleistung für einen bestimmten Bereich, bspw. für den OP oder die Intensivstation.

Wel/P_{max} [h/a]

sind die Volllaststunden. Es wird der Jahresstromverbrauch auf die maximale gemessene elektrische Leistung bezogen. Im Gegensatz zu dem Wert tVolllast/tJahr werden hier die Betriebsstunden angegeben, die die Anlage laufen würde, wenn sie immer bei maximaler elektrischer Leistung betrieben würde. Dieser Wert ist ein Anhaltswert für die Auslastung einer Maschine. Je höher er ist, desto besser ist die Auslastung.

P_{max}/AOP_{mess} [kW/m²]

ist die flächenbezogene maximale elektrische Leistung. Die gemessene maximale Lüfterleistung wird auf die nur von dieser Lüftung belüftete Fläche des OPs bezogen.

$W_{el}/(P_{max} \cdot 8760)$ [-]

ist das Verhältnis der gemessenen elektrischen Arbeit und dem elektrischen Energiebedarf, der sich aus einem durchgehenden Betrieb bei maximal gemessener Lüfterleistung ergibt.

$Fläche_{OP}/Gesamtfläche$ [-]

ist ein prozentualer Wert, der angibt wie viel Prozent der Gesamtbruttogeschoßfläche eines Krankenhauses als OP genutzt wird.

SFP-Wert [W/m^3s]

(Specific Fan Power) ergibt sich aus der Division der elektrischen Ventilatorleistung und dem geförderten Luftvolumenstrom. Je geringer er ist, desto weniger Leistung wird pro gefördertem m^3 Luft benötigt und desto energiesparender ist ein Ventilator. Die Werte für die Leistung und den Volumenstrom sind den Herstellerangaben des jeweiligen Lüfters zu entnehmen.

$W_{el}/AL_{lüft,mess}$ [kWh/m^2a]

ist die auf die OP-Fläche bezogene jährliche elektrische Arbeit, die dem gemessenen und auf ein Jahr extrapolierten Stromverbrauch der Lüftung entspricht.

Kälteversorgung

$COP_{mess,mittel}$ [-]

ist die gemessene mittlere Kältezahl. Sie berechnet sich aus der Division der mittleren gemessenen Kälteleistung zur elektrischen oder thermischen Antriebsleistung der Kältemaschine und ist eine Art Wirkungsgrad für Kältemaschinen.

Q'_{inst}/A [kW/m^2]

ist die installierte Kälteleistung (Herstellerangabe) einer Kältemaschine dividiert durch die von dieser Kältemaschine gekühlte Fläche.

$Temp_{VL,mittel}$ [$^{\circ}C$]

ist die mittlere gemessene Vorlauftemperatur der Kältemaschine.

$Temp_{RL,mittel}$ [$^{\circ}C$]

ist die mittlere gemessene Rücklauftemperatur der Kältemaschine.

$dT_{,mittel}$ [K]

ist die Temperaturdifferenz zwischen Vor- und Rücklauf der Kältemaschine.

$V'_{,mittel}$ [m^3/h]

ist der mittlere gemessene Volumenstrom des Kältemittels.

$T_a_{,mittel}$ [$^{\circ}C$]

ist die mittlere Außentemperatur während des Messzeitraums.

Auslastung Q'/Q'_{inst} [-]

dieses Verhältnis stellt die mittlere gemessene Kälteleistung der installierten Leistung, die vom Hersteller angegeben wird, gegenüber. Ist dieser Wert sehr klein dann ist die Kältemaschine wahrscheinlich überdimensioniert und wird deswegen kaum ausgelastet.

Speichervolumen/ Q'_{inst} [m^3/kW]

ergibt sich aus der Division des Kältespeichervolumens durch die installierte Kälteleistung. Beide Werte sind den Herstellerangaben zu entnehmen.

Kältemenge pro Fläche [kWh/m²a]

ermittelt sich aus dem in der Messung ermittelten Kälteverbrauch, der aufs Jahr hochgerechnet wird, und anschließender Division durch die gekühlte Fläche.

Kosten pro Fläche [€/m²]

sind die auf die Kühlfläche bezogenen Verbrauchskosten der Kältemaschine. Sie berechnen sich aus dem Produkt des spezifischen Kältepreises [€/kWhKälte] und der Kältemenge pro Fläche.

Benutzungsdauer [h/a]

gibt an wie viele Stunden im Jahr eine Kältemaschine bei maximaler Kälteleistung betrieben würde. Sie berechnet sich aus der Division der jährlichen Kältemenge, die mit Hilfe der Messungen ermittelt wurde, durch die installierte Kälteleistung (Herstellerangabe).

Spezifischer Kältepreis [€/kWh]

berechnet sich aus der Division des spezifischen Strom- oder Wärmepreises [€/kWh] durch den COP. Er drückt aus, wie viel eine Kilowattstunde Kälte kostet und ist geringer als der spezifische Strom- oder Wärmepreis.

Q_{inst} [kW]

ist die installierte Kälteleistung der Kältemaschine, die vom Hersteller angegeben wird.

Aufzüge

Nennleistung [kW]

ist die vom Hersteller angegebene elektrische Leistung des Aufzugs.

Verbrauch pro 10 Fahrsekunden [kWh/10s]

errechnet sich aus dem Produkt der aus den Messungen ermittelten mittleren Fahrleistung und der Zeiteinheit von 10 Sekunden.

Pel-Standby,m [kW]

ist die mittlere Leistung die im Stand-by-Betrieb gemessen wurde.

Pel-Fahrt,m [kW]

ist die mittlere Leistung die während der Fahrt gemessen wurde.

Anteil Fahrtzeit [-]

gibt den prozentualen Anteil des Messzeitraumes an, in dem mit dem Aufzug gefahren wurde.

Stromverbrauch pro Aufzug [kWh/a]

beschreibt den jährlichen Stromverbrauch eines Aufzugs. Er setzt sich zusammen aus dem Verbrauch im Stand-by- und im Fahrbetrieb (auf ein Jahr hochgerechnet).

Nennleistung pro Nennlast [kW/kg]

errechnet sich aus der Division der vom Hersteller angegebenen Nennleistung durch die ebenfalls vom Hersteller festgelegte Nennlast.

Verwendung von Boxplots

Zur übersichtlichen Darstellung und zum einfachen Vergleich vieler Daten wurde ein Boxplot-Vergleich entwickelt. In Abbildung 5.1 sind die Datenbasis und ein Beispiel eines Boxplots dargestellt. Die Datenbasis stellen 13 Volumenströme dar. Sollten die Volumenströme mit einer großen Zahl weiterer Einflussgrößen verglichen werden, müsste für jede Größe ein Balkendiagramm erstellt und den anderen gegenübergestellt werden. Um die Informationen eines Diagramms zu komprimieren, werden folgende statistische Größen berechnet: Minimum, 1. Quartile, Median, 3. Quartile, Maximum. Die erste Quartile bedeutet, 25 % der Werte sind kleiner als die erste Quartile. Der Median ist im Prinzip die 2. Quartile und bedeutet, 50 % der Werte sind kleiner. Bei der 3. Quartile sind es entsprechend 75 % der Werte, die kleiner sind. Ein Boxplot besteht aus der Box, die sich aus der 2. und der 3. Quartile ergeben. Die Box wird geteilt durch den Median. Die Whisker zeigen den Abstand des Minimums zur 1. Quartile und den Abstand des Maximums zur 3. Quartile.

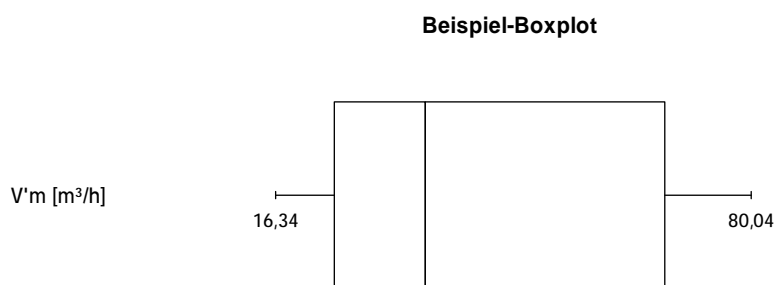
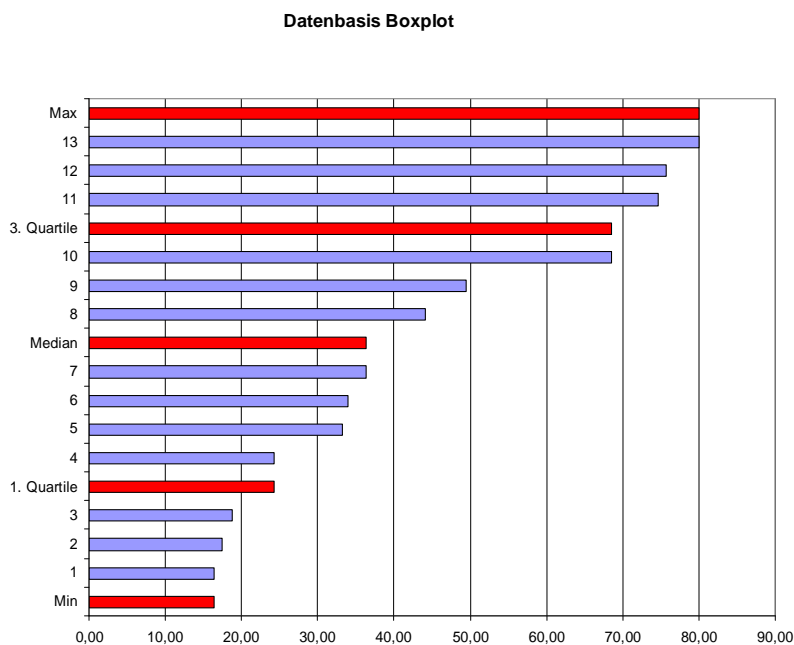


Abbildung 5.1: Datenbasis und Beispiel eines Boxplots

Pauschale U-Werte von Gebäuden

Die Wärmedämmung hat sich im Laufe der vergangenen 100 Jahren aufgrund verschiedener Baustandards und rechtlichen Bestimmungen kontinuierlich verändert. Untersuchungen ha-

ben gezeigt, dass Gebäude eines Baualters annähernd den gleichen Wärmedämmstandard besitzen. Am Institut für Wohnen und Umwelt IWU wurde ein Kurzverfahren entwickelt, mit dem die Gebäudedaten zur energetischen Bewertung ermittelt werden können. Die bei der energetischen Beurteilung einsetzbaren pauschalen U-Werte sind in Tabelle 5.1 aufgeführt. Je nach Baualter und Bauteilkonstruktion können Wärmedurchgangskoeffizienten für die Bauteile Dach, Geschossdecke, Außenwand, Fenster und Bauteile gegen Erdreich ermittelt werden. Mit diesen Werten und den dazugehörigen Gebäudedaten kann der Transmissionswärmebedarf abgeschätzt werden.

Tabelle 5.1: Pauschale U-Werte von Gebäuden nach Baualtersklassen [Log05]

		Baualtersklasse*							
		bis 1918	1919 bis 1948	1949 bis 1957	1958 bis 1968	1969 bis 1978	1979 bis 1983	1984 bis 1994	ab 1995
		Pauschalwerte für den Wärmedurchgangskoeffizienten in W/(m²K)							
Dach	massive Konstruktion (insbes. Flachdächer)	2,1	2,1	2,1	2,1	0,6	0,5	0,4	0,3
	Holzkonstruktion (insbes. Steildächer)	2,6	1,4	1,4	1,4	0,8	0,5	0,4	0,3
oberste Geschoss- decke	massive Decke	2,1	2,1	2,1	2,1	0,6	0,5	0,4	0,3
	Holzbalkendecke	1,0	0,8	0,8	0,8	0,6	0,4	0,3	0,3
Außenwand	massive Konstruktion (Mauerwerk, Beton, ...)	1,7	1,7	1,4	1,4	1,0	0,8	0,6	0,5
	Holzkonstruktion (Fachwerk, Fertighaus, ...)	2,0	2,0	1,4	1,4	0,6	0,5	0,4	0,4
Bauteile gegen Erdreich oder Keller	massive Bauteile	1,2	1,2	1,5	1,0	1,0	0,8	0,6	0,6
	Holzbalkendecke	1,0	0,8	0,8	0,8	0,6	0,6	0,4	0,4
Fenster	Holzfenster, einfach verglast	g _v = 0,87	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	–	–
	Holzfenster, zwei Scheiben**	g _v = 0,75***	2,7	2,7	2,7	2,7	2,7	2,7	1,6
	Kunststofffenster, Isolierverglasung	g _v = 0,75***	–	–	–	3,0	3,0	3,0	1,9
	Alu- oder Stahlfenster, Isolierverglasung	g _v = 0,75***	–	–	4,3	4,3	4,3	4,3	1,9
Fenster: g-Werte	Holzfenster, einfach verglast	0,87	0,87	0,87	0,87	0,87	–	–	–
	Holzfenster, zwei Scheiben**	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,60
	Kunststofffenster, Isolierverglasung	–	–	–	0,75	0,75	0,75	0,75	0,60
	Alu- oder Stahlfenster, Isolierverglasung	–	–	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,60

*) Baualtersklasse des Gebäudes (bzw. des Bauteils bei neu eingebauten Bauteilen, insbes. Fenster)

***) Isolierverglasung, Kastenfenster oder Verbundfenster

***) ab Baualtersklasse 1995: g_v = 0,6

Nachträgliche Wärmedämmung

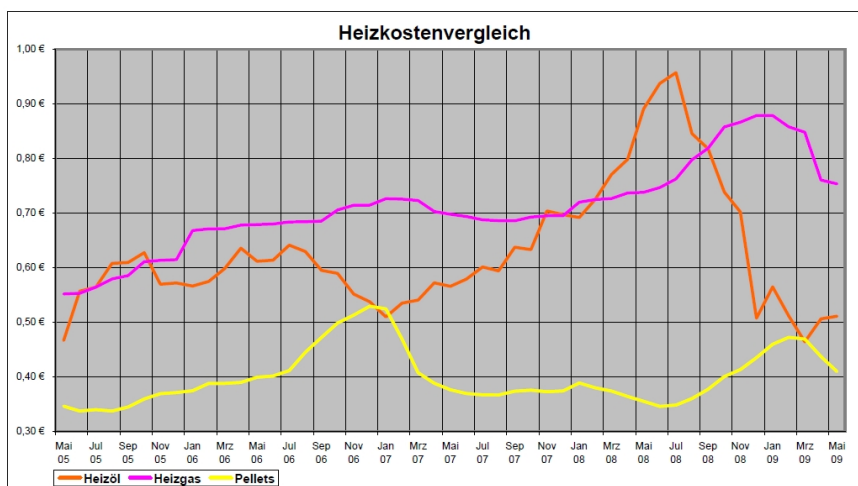
Für die Wärmeversorgung sind, sofern die Krankenhäuser ausreichende Daten liefern konnten, Referenzwerte u.a. für die Transmissionswärmeverluste der Gebäude berechnet worden. Anhand der Referenzwerte kann das Einsparpotenzial abgeschätzt werden. Anschließend kann mit der folgenden Tabelle die Kosten für eine nachträgliche Wärmedämmung überschlägig berechnet werden.

Kosten einer nachträglichen Wärmedämmung	Kosten in € pro m ² Fassadenfläche
Gerüst liefern, aufbauen, vorhalten	5,00
Vorbereitung (Schmutz, lose Teile entfernen)	1,10
Tiefgrund	2,20
WDVS-Kleber, Gewebe, überspachteln	13,60
Endbeschichtung (Siliconharzputz)	11,20
Fenster abkleben, 1,66 €/m ² Fensterfläche	0,25
Sockel-/Anschlussschienen 11,83 €/lfd. m	4,40
Anschlussfugen 9,75 €/lfd. m	1,50
Eckprofil (Ecken + Öffnungen) 4,80 €/lfd. m	2,80
Öffnungswangen (nicht einbezogen)	
Zwischensumme (ohne MwSt)	42,05
Ausführungs-Alternativen	
1. WDVS-Platten, Klebmasse ansetzen, verdübeln, 8 cm PS15SE	24,10
2. wie vor, jedoch 12 cm Polystyrol PS15SE	26,50
3. wie vor, jedoch 16 cm Polystyrol PS15SE	28,50
Gesamtkosten Alternative 1 (ohne MwSt)	65,45
Gesamtkosten Alternative 2 (ohne MwSt)	67,71
Gesamtkosten Alternative 3 (ohne MwSt)	69,77
Differenz Alternative 1 zu 2	+2,40 €/m ² = +3,7 %
Differenz Alternative 1 zu 3	+4,40 €/m ² = +6,7 %

Abbildung 5.2: Kostenbestandteile einer nachträglichen Wärmedämmung [BIN04]

Brennstoffpreisvergleich

In Abbildung 5.3 ist die Preisentwicklung für Brennstoffe der vergangenen Jahre dargestellt. Aktuell liegt der Preisvorteil von Holzpellets gegenüber Heizöl bei 1,015 Ct/kWh und im Vergleich zu Erdgas bei 3,344 Ct/kWh (Preisverlauf s. Anhang). Der Preis von Holzhackschnittel ist in der Regel noch günstiger als der von Holzpellets. Biomasse-Heizkessel sind aufgrund der hohen Investitionskosten und der niedrigen Verbrauchskosten für die Grundlastversorgung geeignet und können so zu günstigen Wärmegestehungskosten beitragen.



Preis für 1 ltr. Heizöl bei Abnahme von mindestens 3000 ltr. incl. MwSt.
 Preis für für 1 ltr Öläquivalent incl. Grundpreismulage und incl. MWSt in kWh
 Preis für für 1 ltr Öläquivalent incl. MWSt in kWh bei Mindestabnahme 6 t im Umkreis von 100-200 km, incl. aller Nebenkosten (Einblaspauschale, Wiegen etc.)

Heizöl + Heizgas: Deutsches Energiemagazin "Brennstoffspiegel"
 Holzpellets: [Deutscher Energie-Pellet-Verband e.V.](http://www.deutscher-energie-pellet-verband.de)

Abbildung 5.3: Preisentwicklung von Brennstoffen Stand: Mai 2009, Quelle: Initiative Pro Schornstein e.V.

Brennwertkessel - Teillastverhalten und Temperaturabhängigkeit des Nutzungsgrades

Im Gegensatz zu Niedertemperaturkesseln können Brennwertkessel die Kondensationswärme des im Abgas befindlichen Wassers nutzen. Dazu muss die Rücklauftemperatur des Heizsystems unter 58 °C liegen. Der Wirkungs- und damit auch der Nutzungsgrad ändern sich deutlich mit steigender Rücklauftemperatur. Die Abhängigkeit des Nutzungsgrades von Brennwertkesseln von der Auslastung und von den Systemtemperaturen ist in Abbildung 5.4 dargestellt.

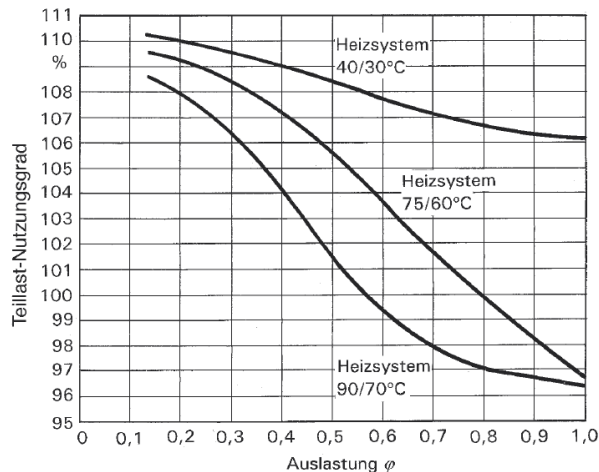


Abbildung 5.4: Nutzungsgrad von Brennwertkesseln in Abhängigkeit von der Heizsystemtemperatur [Sch08a]

Einstellung der Heizkurve

Moderne Heizkessel können entsprechend der Außentemperatur die Vorlauftemperatur anpassen, um so die Wärmeverluste auf ein Minimum zu begrenzen. Mit Hilfe der Heizkurve kann das Betriebsverhalten des Kessels an den Heizwärmebedarf des Objektes angepasst werden, um sowohl bei sehr niedrigen Außentemperaturen als auch in der Übergangszeit ausreichend Heizwärme zur Verfügung zu haben. Bei der Einstellung der Heizkurve unterscheidet man Niveau und Neigung. Mit dem Niveau der Heizkurve ändern sich die Vorlauftemperatur sowohl bei niedrigen als auch bei hohen Außentemperaturen und damit die Heizleistung, die die Heizkörper der Heizungsanlage zur Verfügung stellen können (Parallelverschiebung). Die Neigung hingegen beschreibt den Zusammenhang zwischen von Vorlauf- zur Außentemperaturänderung und ist von der Wärmedämmung des Gebäudes und der Art der Heizflächen abhängig. Als Faustregel gilt, dass die Neigung bei einem gut wärmegeprägten Gebäude mit Radiatoren 1,0 bis 1,2 (Mittelstellung) beträgt, mit Fußbodenheizung 0,3 bis 0,5 (Heizkurve flacher) und bei älteren Gebäuden mit Radiatoren 1,4 bis 1,6 (Heizkurve steiler). Die Einstellung der Heizkurve muss anhand der Raumtemperaturen überprüft werden, die sich sowohl an kalten Tagen als auch in der Übergangszeit einstellen.

Kann sowohl in der Übergangszeit als auch an kalten Tagen die Raumtemperatur nicht gehalten werden, muss das Niveau der Heizkurve erhöht werden. Ist die Heizleistung nur an kalten Tagen, nicht aber in der Übergangszeit ausreichend, muss das Niveau angehoben und die Neigung reduziert werden. Bei zu hoher Heizleistung und entsprechend zu hohen Raumtemperaturen in der Übergangszeit muss hingegen das Niveau sinken und die Neigung steiler

verlaufen. Bei zu geringen Temperaturen nur an kalten Tagen muss bei gleichem Niveau die Neigung ebenfalls steiler verlaufen.

Bei hydraulisch nicht abgeglichenen Systemen ist eine einwandfreie Einstellung der Heizkurve nicht möglich, da gleichzeitig ein Teil der Abnehmer mit zu wenig Wärme, ein anderer Teil mit zu viel Wärme versorgt werden kann. Nur bei hydraulisch abgeglichenen Systemen ist eine optimale Wärmeabgabe aller Heizkörper gewährleistet. Ohne einen hydraulischen Abgleich kommt es zur ungleichen Wärmeverteilung in den einzelnen Räumen, ungleichmäßigen Aufheizzeiten, schlechtem Regelverhalten der Thermostatventile, Geräuschbelästigung und zu hohen oder zu niedrigen Rücklauftemperaturen.

Heizkennlinie / Heizkurve

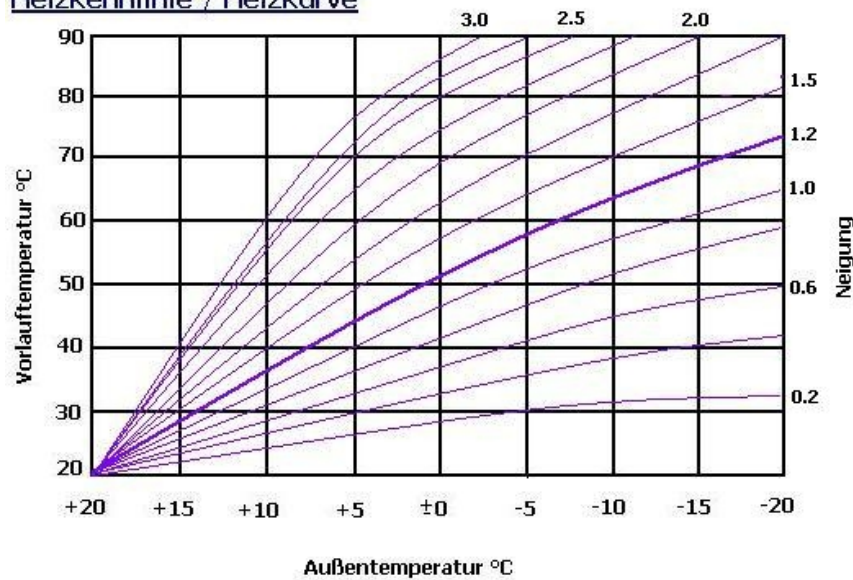


Abbildung 5.5: Heizkurve mit unterschiedlicher Steilheit

Abschätzung des Pumpstrombedarfs

Zur Abschätzung des Pumpstrombedarfs und des Einsparpotenzials zur Ausnutzung der Auslegungstemperaturdifferenz ist Abbildung 5.6 der Zusammenhang Pumpstromkosten und Pumpenleistung aufgezeigt. Mit dem Diagramm kann für verschiedene Pumpenleistungen der Pumpstrom bei vollem Volumenstrom ermittelt und die Einsparungen bei reduziertem Volumenstrom abgeschätzt werden. Die Berechnung basiert auf Betriebsstunden von 5 400 h/a und einem Strompreis von 0,10 €/kWh.

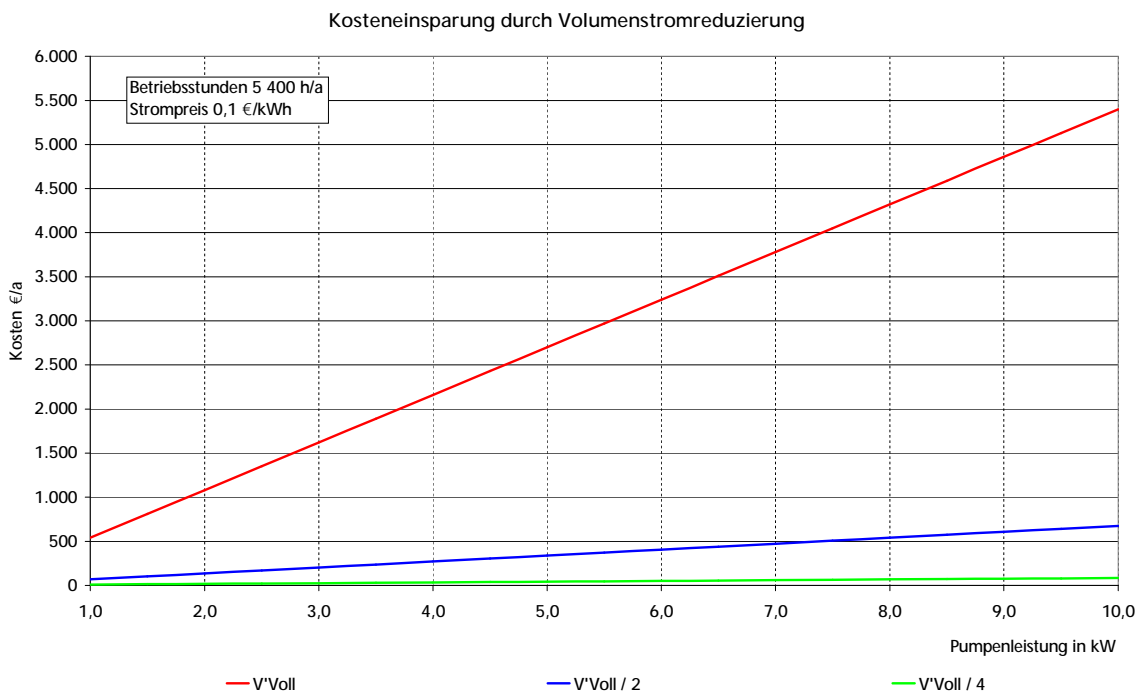


Abbildung 5.6: Pumpstromkosten in Abhängigkeit von Pumpenleistung und Volumenstrom

Heizkesselbetrieb im Jahresverlauf

Heizkesselanlagen werden für eine Auslegungstemperatur von beispielsweise -10 °C ausgelegt, um auch an sehr kalten Tagen die erforderliche Heizwärme liefern zu können. Mehr als 85 % der Wärme wird jedoch an Tagen mit Außentemperaturen oberhalb von -5 °C benötigt (Abbildung 5.7). Eine Absenkung der Systemtemperaturen und die damit verbundene reduzierte Wärmeleistung der Wärmeübertrager und Heizkörper spielt daher die überwiegende Heizzeit kein Problem dar. Weiterhin ist die überwiegende Zahl alter Heizkörper überdimensioniert, so dass selbst bei sehr niedrigen Außentemperaturen kein Engpass entsteht.

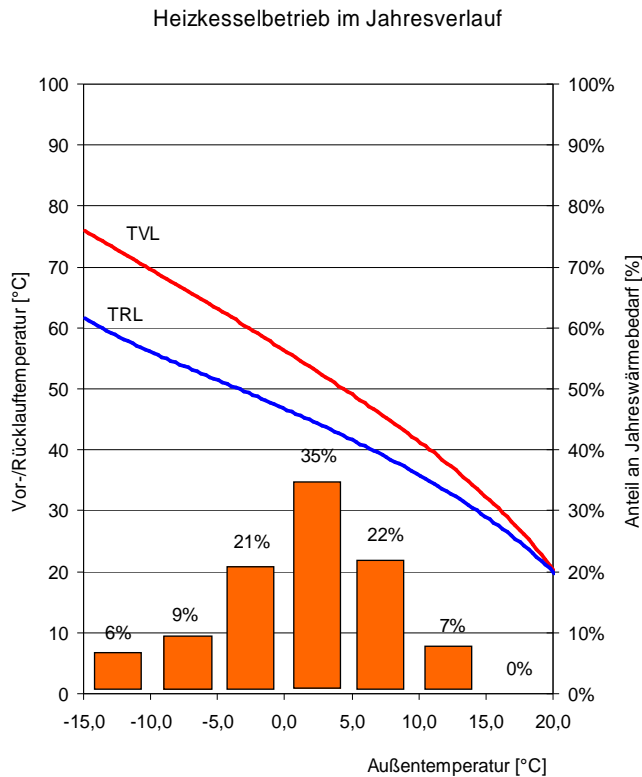
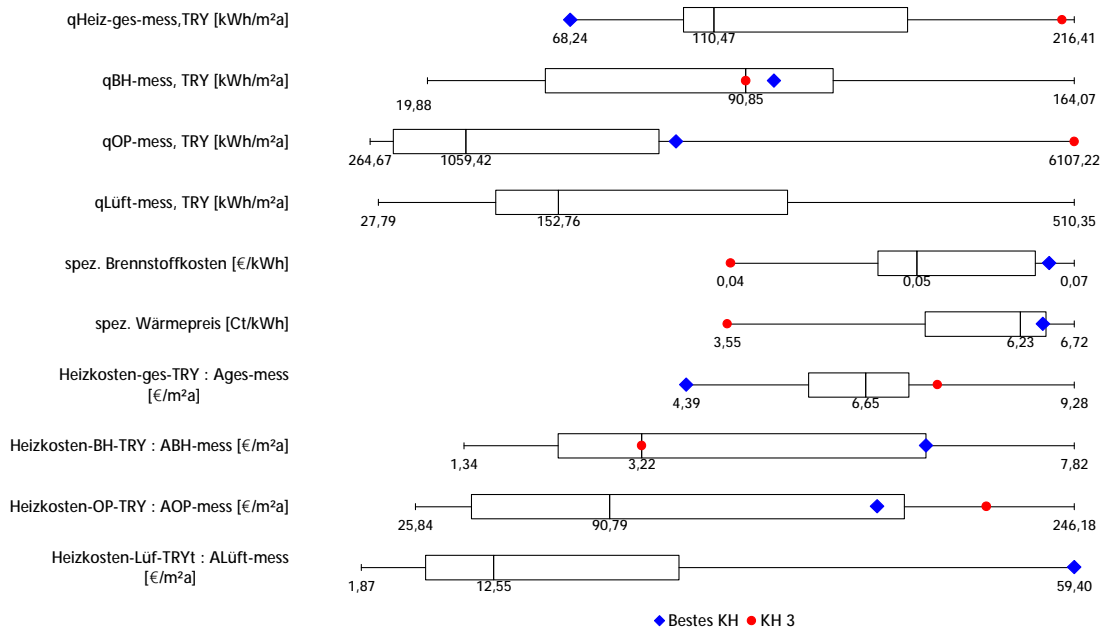


Abbildung 5.7: Der überwiegende Teil der Heizwärme wird oberhalb von -5 °C benötigt

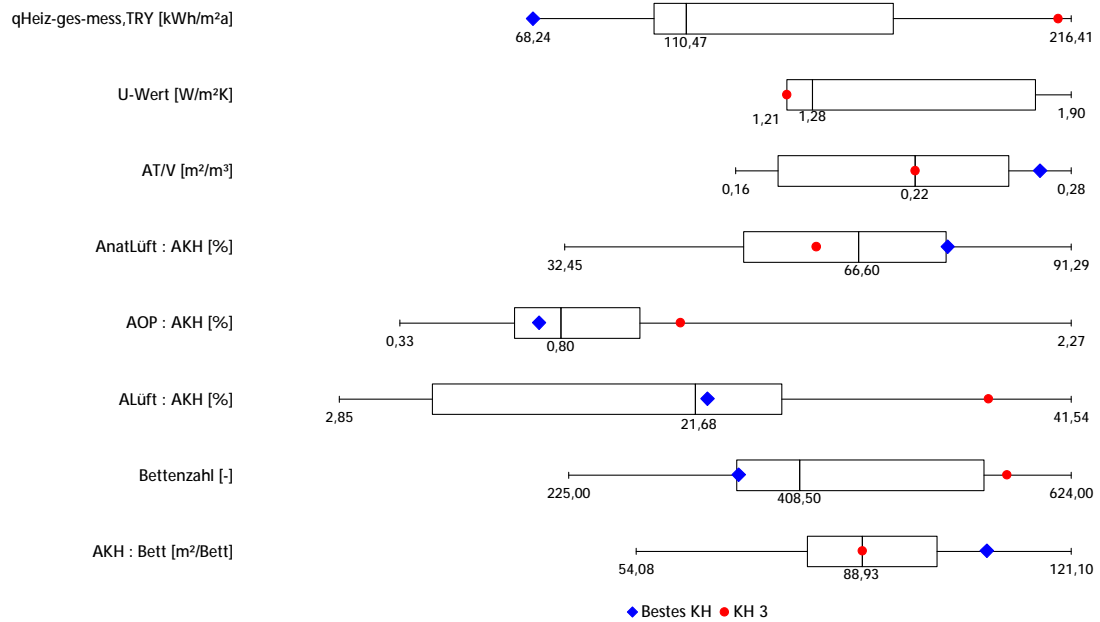
Boxplotvergleich Wärmeversorgung

Vergleich 1 Wärmeversorgung



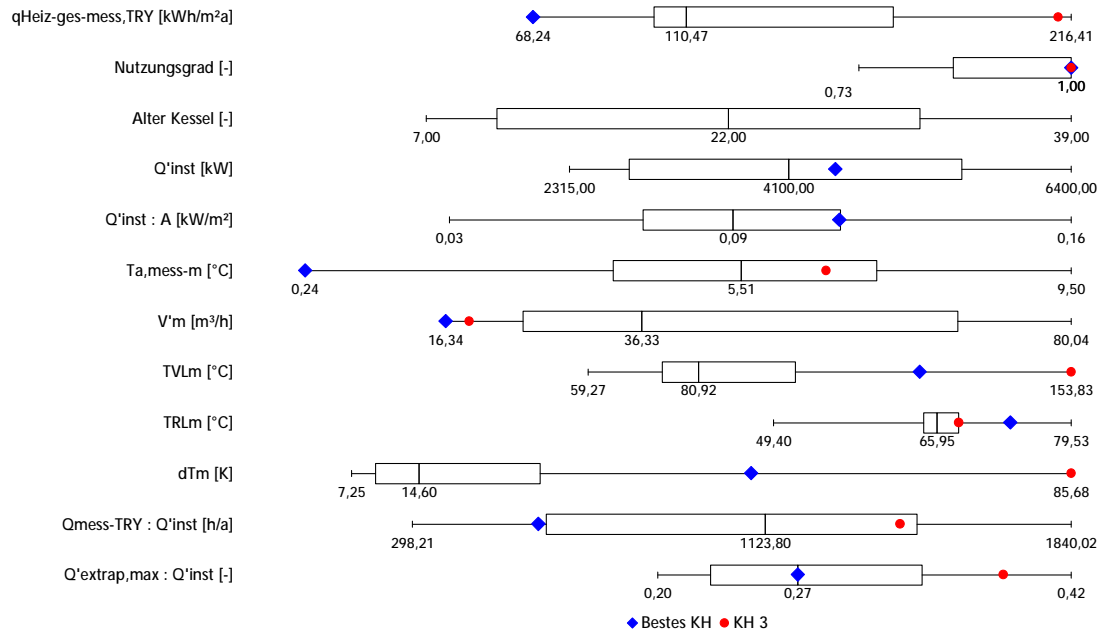
	Anzahl	Minimum	Q1	Median	Q3	Maximum
qHeiz-ges-mess,TRY [kWh/m²a]	11	68,24	101,54	110,47	167,41	216,41
qBH-mess, TRY [kWh/m²a]	7	19,88	46,16	90,85	110,34	164,07
qOP-mess, TRY [kWh/m²a]	12	264,67	458,16	1059,42	2661,92	6107,22
qLüft-mess, TRY [kWh/m²a]	8	27,79	109,38	152,76	311,51	510,35
spez. Brennstoffkosten [€/kWh]	12	0,04	0,05	0,05	0,06	0,07
spez. Wärmepreis [Ct/kWh]	10	3,55	5,36	6,23	6,46	6,72
Heizkosten-ges-TRY : Ages-mess [€/m²a]	7	4,39	5,93	6,65	7,20	9,28
Heizkosten-BH-TRY : ABH-mess [€/m²a]	5	1,34	2,34	3,22	6,25	7,82
Heizkosten-OP-TRY : AOP-mess [€/m²a]	8	25,84	44,55	90,79	189,37	246,18
Heizkosten-Lüf-TRYt : ALüft-mess [€/m²a]	6	1,87	7,05	12,55	27,50	59,40

Vergleich 2 Wärmeversorgung



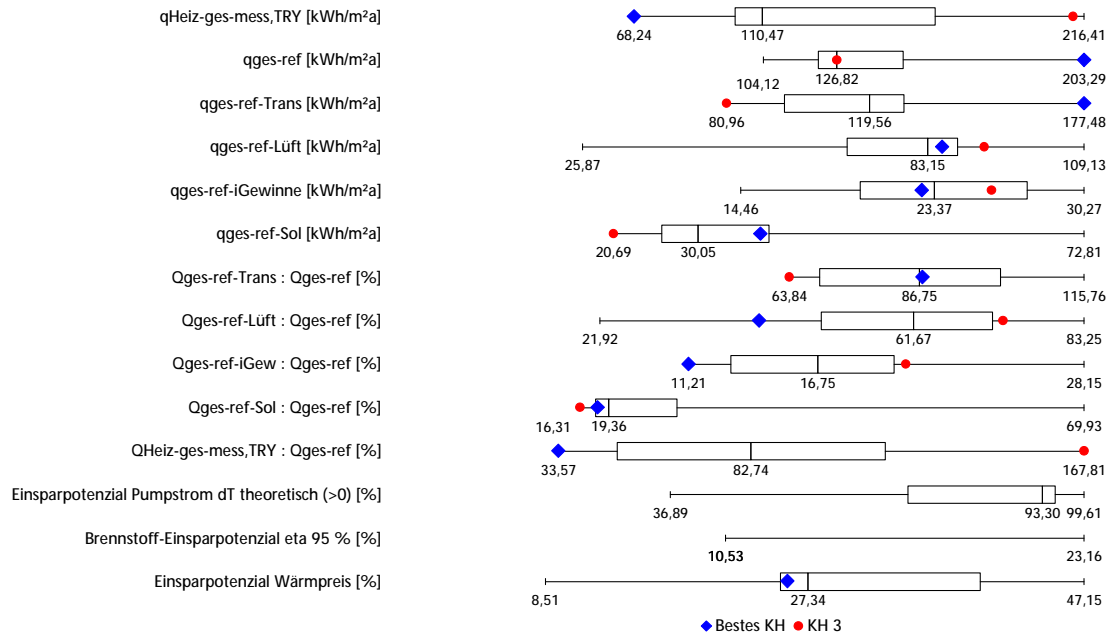
	Anzahl	Minimum	Q1	Median	Q3	Maximum
qHeiz-ges-mess,TRY [kWh/m²a]	11,00	68,24	101,54	110,47	167,41	216,41
U-Wert [W/m²K]	5,00	1,21	1,21	1,28	1,82	1,90
AT/V [m²/m³]	9,00	0,16	0,18	0,22	0,26	0,28
AnatLüft : AKH [%]	12,00	32,45	53,25	66,60	76,75	91,29
AOP : AKH [%]	11,00	0,33	0,66	0,80	1,03	2,27
ALüft : AKH [%]	12,00	2,85	7,78	21,68	26,25	41,54
Bettenzahl [-]	18,00	225,00	358,50	408,50	554,75	624,00
AKH : Bett [m²/Bett]	13,00	54,08	80,48	88,93	100,43	121,10

Vergleich 3 Wärmeversorgung



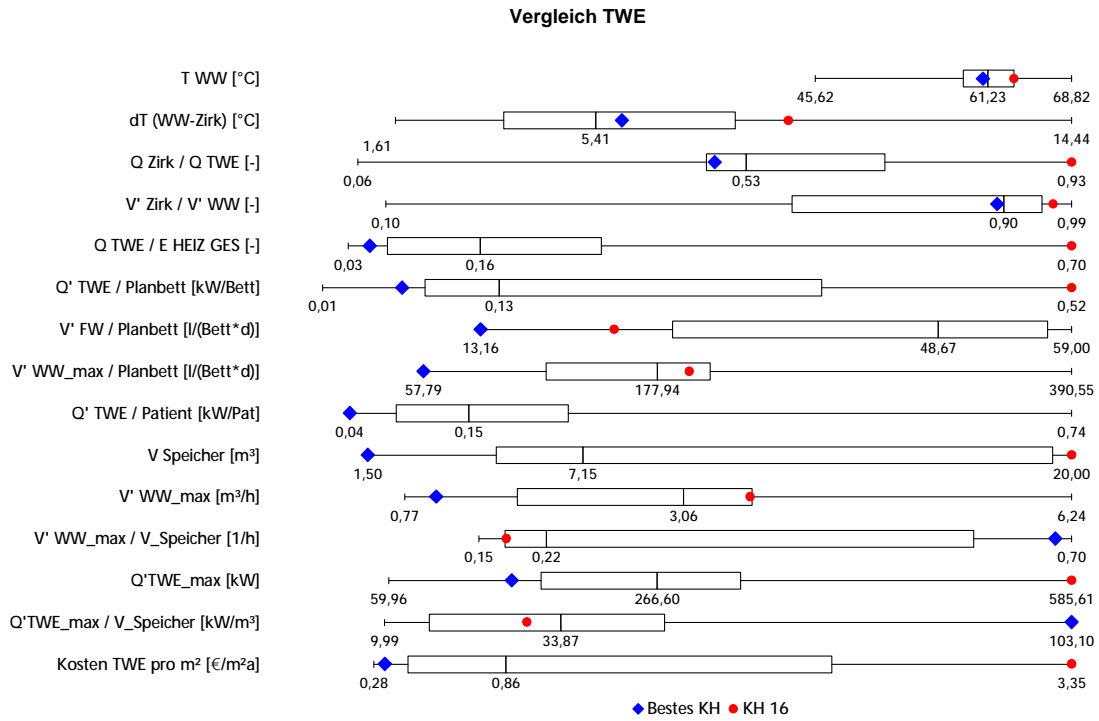
	Anzahl	Minimum	Q1	Median	Q3	Maximum
qHeiz-ges-mess,TRY [kWh/m²a]	11	68,24	101,54	110,47	167,41	216,41
Nutzungsgrad [-]	17	0,73	0,85	1,00	1,00	1,00
Alter Kessel [-]	7	7,00	10,50	22,00	31,50	39,00
Q'inst [kW]	13	2315,00	2800,00	4100,00	5510,00	6400,00
Q'inst : A [kW/m²]	10	0,03	0,07	0,09	0,12	0,16
Ta,mess-m [°C]	19	0,24	3,96	5,51	7,15	9,50
V'm [m³/h]	13	16,34	24,22	36,33	68,51	80,04
TVLm [°C]	13	59,27	73,81	80,92	99,85	153,83
TRLm [°C]	13	49,40	64,60	65,95	68,15	79,53
dTm [K]	13	7,25	9,87	14,60	27,79	85,68
Qmess-TRY : Q'inst [h/a]	12	298,21	611,20	1123,80	1479,12	1840,02
Q'extrap,max : Q'inst [-]	11	0,20	0,23	0,27	0,34	0,42

Vergleich 4 Wärmeversorgung



	Anzahl	Minimum	Q1	Median	Q3	Maximum
qHeiz-ges-mess,TRY [kWh/m²a]	11	68,24	101,54	110,47	167,41	216,41
qges-ref [kWh/m²a]	7	104,12	121,13	126,82	147,39	203,29
qges-ref-Trans [kWh/m²a]	7	80,96	96,60	119,56	128,84	177,48
qges-ref-Lüft [kWh/m²a]	8	25,87	69,77	83,15	88,15	109,13
qges-ref-iGewinne [kWh/m²a]	7	14,46	19,97	23,37	27,66	30,27
qges-ref-Sol [kWh/m²a]	7	20,69	26,02	30,05	37,91	72,81
Qges-ref-Trans : Qges-ref [%]	7	63,84	69,21	86,75	101,07	115,76
Qges-ref-Lüft : Qges-ref [%]	7	21,92	49,96	61,67	71,65	83,25
Qges-ref-iGew : Qges-ref [%]	7	11,21	13,02	16,75	20,01	28,15
Qges-ref-Sol : Qges-ref [%]	7	16,31	17,96	19,36	26,63	69,93
QHeiz-ges-mess,TRY : Qges-ref [%]	5	33,57	48,58	82,74	117,08	167,81
Einsparpotenzial Pumpstrom dT theoretisch (>0) [%]	9	36,89	72,91	93,30	95,24	99,61
Brennstoff-Einsparpotenzial eta 95 % [%]	5	10,53	10,53	10,53	10,53	23,16
Einsparpotenzial Wärmepreis [%]	8	8,51	25,38	27,34	39,70	47,15

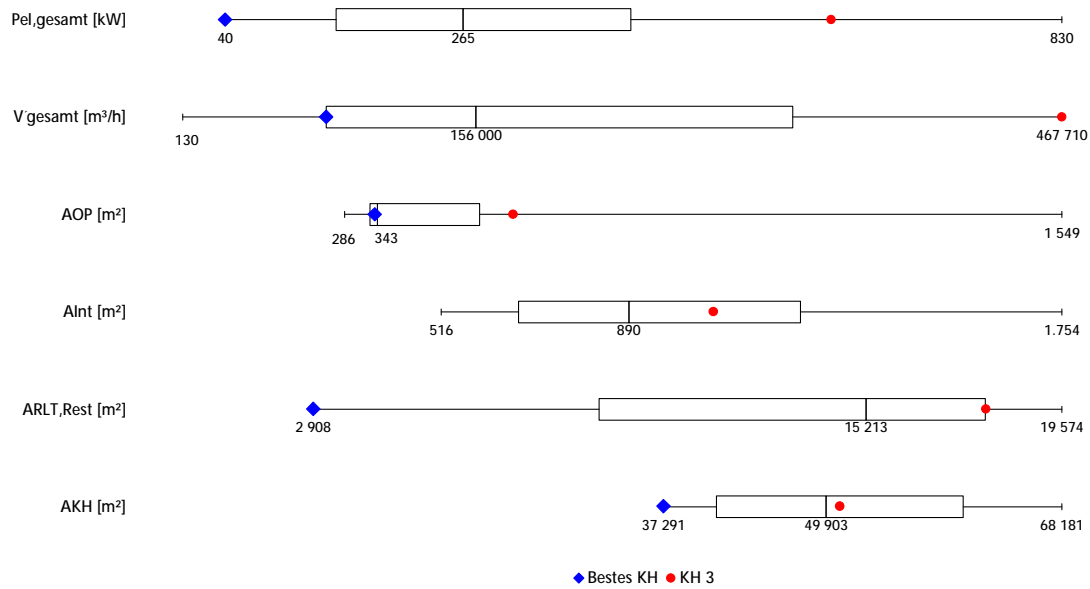
Boxplotvergleich Warmwasserversorgung



	Anzahl	Minimum	Q1	Median	Q3	Maximum
T WW [°C]	17	45,62	59,03	61,23	63,60	68,82
dT (WW-Zirk) [°C]	17	1,61	3,66	5,41	8,05	14,44
Q Zirk / Q TWE [-]	17	0,06	0,49	0,53	0,70	0,93
V' Zirk / V' WW [-]	15	0,10	0,63	0,90	0,95	0,99
Q TWE / E HEIZ GES [-]	15	0,03	0,07	0,16	0,27	0,70
Q' TWE / Planbett [kW/Bett]	7	0,01	0,08	0,13	0,35	0,52
V' FW / Planbett [l/(Bett*d)]	6	13,16	28,05	48,67	57,14	59,00
V' WW_max / Planbett [l/(Bett*d)]	14	57,79	120,83	177,94	204,98	390,55
Q' TWE / Patient [kW/Pat]	5	0,04	0,08	0,15	0,25	0,74
V Speicher [m³]	10	1,50	4,88	7,15	19,50	20,00
V' WW_max [m³/h]	16	0,77	1,69	3,06	3,62	6,24
V' WW_max / V_Speicher [1/h]	9	0,15	0,18	0,22	0,61	0,70
Q'TWE_max [kW]	15	59,96	177,25	266,60	330,71	585,61
Q'TWE_max / V_Speicher [kW/m³]	8	9,99	16,05	33,87	47,94	103,10
Kosten TWE pro m² [€/m²a]	8	0,28	0,43	0,86	2,29	3,35

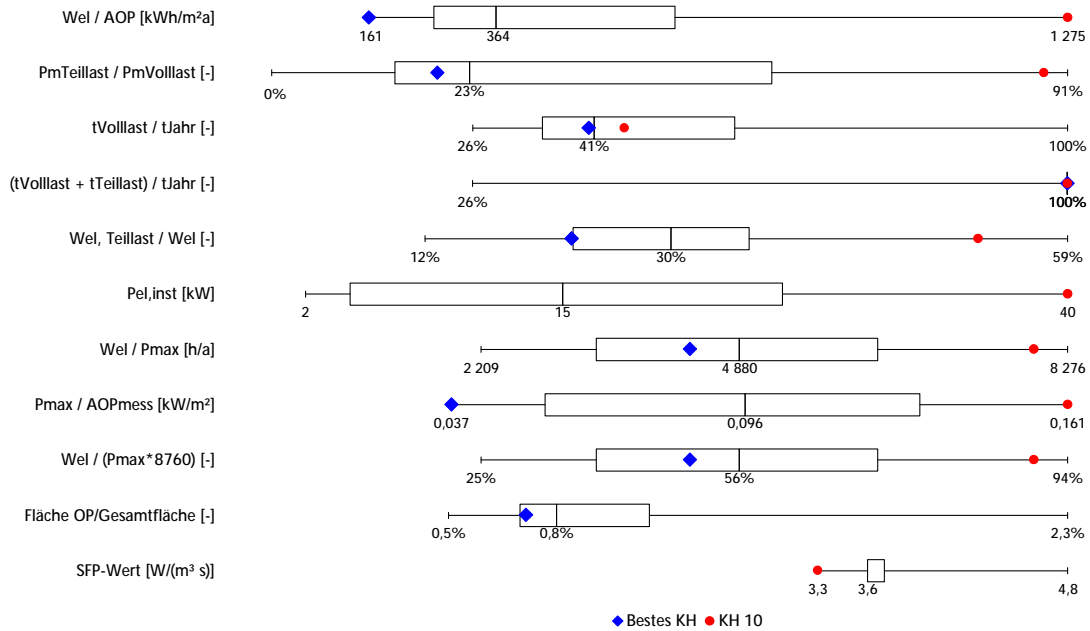
Boxplotvergleich Lüftungsanlagen

Vergleich Lüftung gesamt



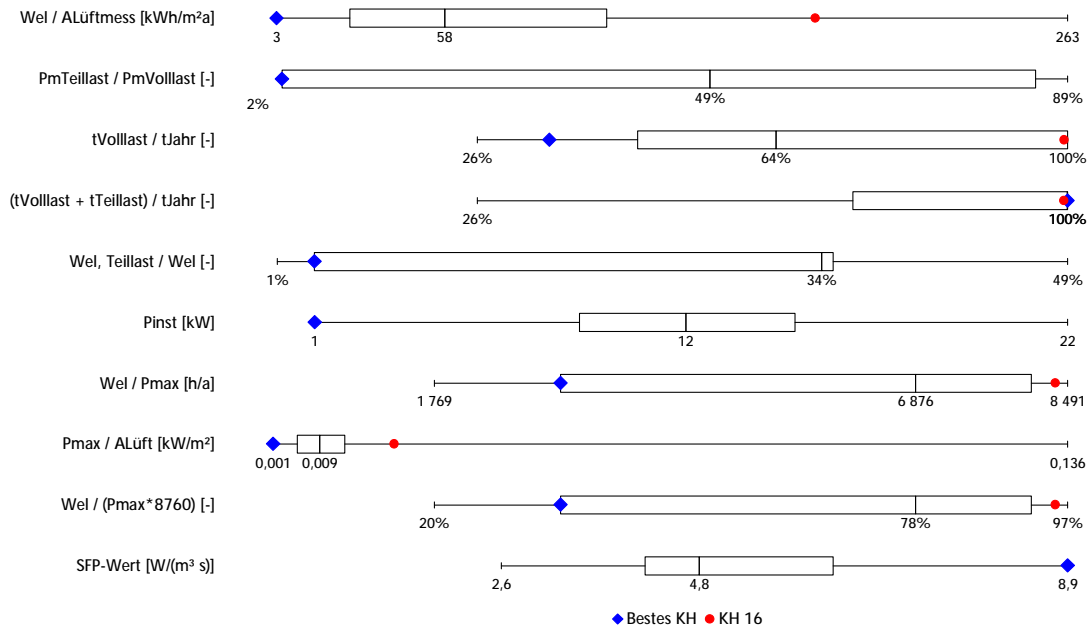
	Anzahl	Minimum	Q1	Median	Q3	Maximum
Pel,gesamt [kW]	8	40	145	265	423	830
V gesamt [m³/h]	013	130	76 375	156 000	324 520	467 710
AOP [m²]	006	286	330	343	524	1 549
AInt [m²]	4	516	670	890	1.232	1.754
ARLT,Rest [m²]	006	2 908	9 275	15 213	17 869	19 574
AKH [m²]	006	37 291	41 402	49 903	60 539	68 181

Vergleich Lüftung OP



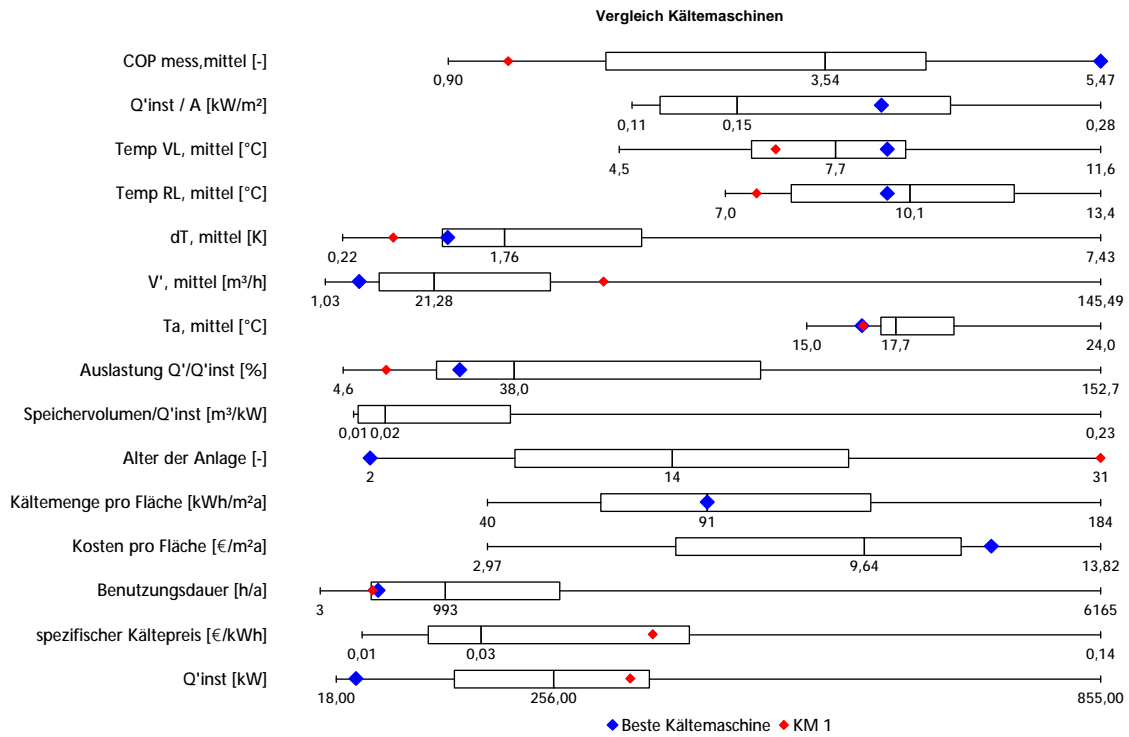
	Anzahl	Minimum	Q1	Median	Q3	Maximum
Wel / AOP [kWh/m ² a]	13	161	265	364	649	1 275
PmTeillast / PmVolllast [-]	13	0%	15%	23%	58%	91%
tVolllast / tJahr [-]	15	26%	34%	41%	58%	100%
(tVolllast + tTeillast) / tJahr [-]	15	26%	100%	100%	100%	100%
Wel, Teillast / Wel [-]	11	12%	23%	30%	36%	59%
Pel,inst [kW]	6	2	4	15	26	40
Wel / Pmax [h/a]	15	2 209	3 399	4 880	6 310	8 276
Pmax / AOPmess [kW/m ²]	13	0,037	0,056	0,096	0,131	0,161
Wel / (Pmax*8760) [-]	15	25%	39%	56%	72%	94%
Fläche OP/Gesamtfläche [-]	6	0,5%	0,7%	0,8%	1,1%	2,3%
SFP-Wert [W/(m ³ s)]	5	3,3	3,6	3,6	3,7	4,8

Vergleich Lüftung Nicht-OP



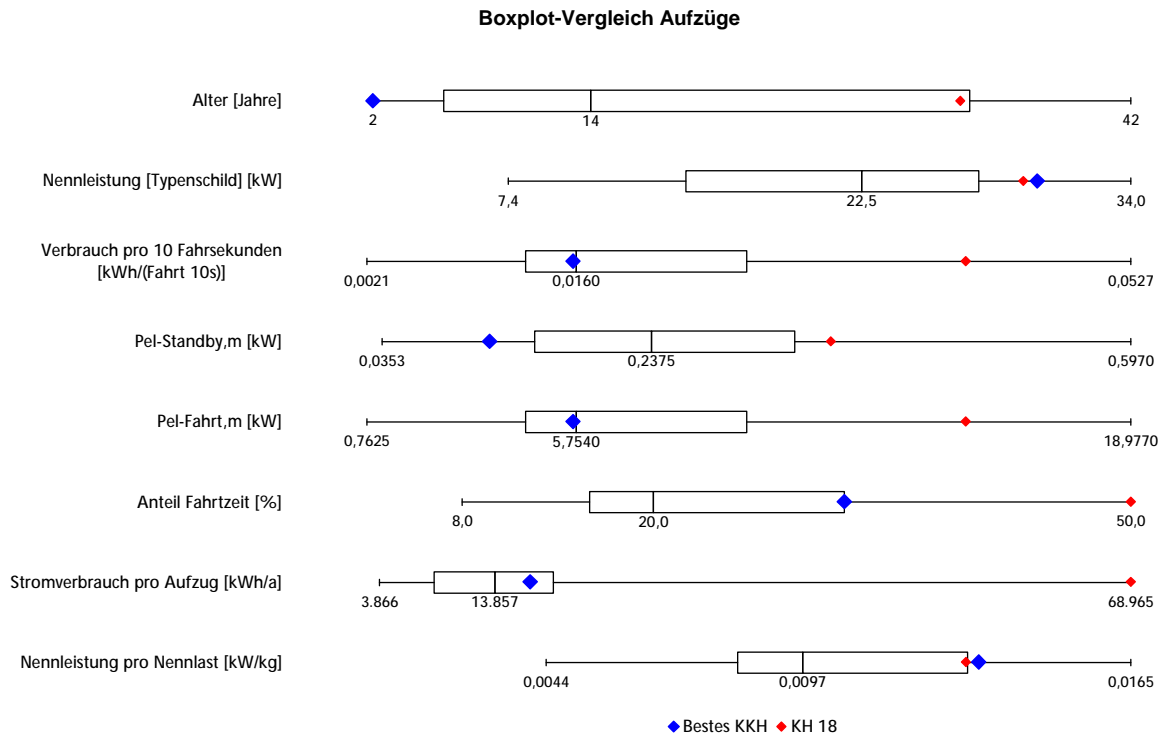
	Anzahl	Minimum	Q1	Median	Q3	Maximum
Wel / ALüftmess [kWh/m²a]	9	3	27	58	112	263
PmTeillast / PmVolllast [-]	5	2%	2%	49%	86%	89%
tVolllast / tJahr [-]	13	26%	46%	64%	100%	100%
(tVolllast + tTeillast) / tJahr [-]	13	26%	73%	100%	100%	100%
Wel, Teillast / Wel [-]	5	1%	3%	34%	35%	49%
Pinst [kW]	4	1	9	12	15	22
Wel / Pmax [h/a]	13	1 769	3 109	6 876	8 104	8 491
Pmax / ALüft [kW/m²]	9	0,001	0,005	0,009	0,013	0,136
Wel / (Pmax*8760) [-]	13	20%	35%	78%	93%	97%
SFP-Wert [W/(m³ s)]	5	2,6	4,2	4,8	6,3	8,9

Boxplotvergleich Kälteversorgung



	Anzahl	Minimum	Q1	Median	Q3	Maximum
Q_{inst}/A [kW/m²]	28,00	0,90	2,00	3,54	4,25	5,47
Temp VL, mittel [°C]	9,00	0,11	0,12	0,15	0,22	0,28
Temp RL, mittel [°C]	29,0	4,5	6,4	7,7	8,7	11,6
dT, mittel [K]	29,0	7,0	8,1	10,1	11,9	13,4
V', mittel [m³/h]	29,00	0,22	1,17	1,76	3,06	7,43
Ta, mittel [°C]	42,00	1,03	11,06	21,28	42,97	145,49
Auslastung Q/Q_{inst} [%]	44,0	15,0	17,2	17,7	19,5	24,0
Speichervolumen/Q_{inst} [m³/kW]	36,0	4,6	22,8	38,0	86,2	152,7
Alter der Anlage [-]	7,00	0,01	0,01	0,02	0,06	0,23
Kältemenge pro Fläche [kWh/m²a]	37	2	8	14	21	31
Kosten pro Fläche [€/m²a]	7	40	66	91	130	184
Benutzungsdauer [h/a]	7,00	2,97	6,30	9,64	11,36	13,82
spezifischer Kältepreis [€/kWh]	28	3	407	993	1894	6165
Q_{inst} [kW]	16,00	0,01	0,02	0,03	0,06	0,14
COP_{mess,mittel} [-]	30,00	18,00	147,60	256,00	361,00	855,00

Boxplotvergleich Aufzüge



	Anzahl	Minimum	Q1	Median	Q3	Maximum
Alter [Jahre]	16	2	6	14	34	42
Nennleistung [Typenschild] [kW]	13	7,4	15,0	22,5	27,5	34,0
Verbrauch pro 10 Fahrsekunden [kWh/(Fahrt 10s)]	20	0,0021	0,0126	0,0160	0,0273	0,0527
Pel-Standby,m [kW]	20	0,0353	0,1498	0,2375	0,3450	0,5970
Pel-Fahrt,m [kW]	20	0,7625	4,5488	5,7540	9,8183	18,9770
Anteil Fahrtzeit [%]	18	8,0	16,0	20,0	32,0	50,0
Stromverbrauch pro Aufzug [kWh/a]	20	3.866	8.598	13.857	18.930	68.965
Nennleistung pro Nennlast [kW/kg]	12	0,0044	0,0083	0,0097	0,0131	0,0165