



MINERGIE-P[®] - und Passivhaus Luftheizung und andere Wärmeverteilsysteme

27. Dezember 2006

Impressum

Auftraggeber	AWEL Amt für Abfall, Wasser, Energie und Luft Abteilung Energie Hansruedi Kunz Stampfenbachstrasse 12 8090 Zürich Tel. 043 259 42 72 Email: hansruedi.kunz@bd.zh.ch Web: www.awel.zh.ch
	MINERGIE® Agentur Bau Bruno Hari Optingenstrasse 54 3000 Bern 25 Tel 031 340 35 30 Email: bruno.hari@minergie.ch Web: www.minergie.ch
Auftragnehmer	HTA Luzern Zentrum für Integrale Gebäudetechnik Technikumstr. 21 6048 Horw Email: ument@hta.fhz.ch Web: www.hta.fhz.ch
Projektleitung	Urs-Peter Menti, dipl. Masch. Ing. ETH/SIA
Sachbearbeitung	Adrian Tschui, dipl. HS Ing. FH Philipp Schnyder, dipl. HS Ing. FH
Begleitende Fachpersonen	Prof. Gerhard Zweifel, dipl. Masch. Ing. ETH/SIA Huber Heinrich, dipl. Masch. Ing. / HLK Ing. FH

Zusammenfassung

1. Ausgangslage

Ein MINERGIE-P[®]- oder Passivhaus weist aufgrund der für diese Standards geltenden Anforderungen einen sehr tiefen Heizleistungsbedarf von rund 10 W/m² oder weniger auf. Dieser tiefe Heizleistungsbedarf führt dazu, dass neben den konventionellen Wärmeverteils- und Wärmeabgabesystemen wie Fussbodenheizung oder Heizkörper auch die Luftheizung zum Thema wird.

MINERGIE-P[®]- und Passivhäuser werden zur Reduktion der energetischen Lüftungsverluste, vor allem aber zur Sicherstellung einer hohen Luftqualität mit einem steuerbaren Luftwechsel ausgerüstet (Komfortlüftung). Bei einem Heizleistungsbedarf von 10 W/m² kann die aus hygienischen Gründen notwendige minimale Luftmenge ausreichen, um gleichzeitig auch die notwendige Wärme im Gebäude zu verteilen. Auf ein zusätzliches Wärmeverteilsystem kann verzichtet werden, was entsprechende Kosteneinsparungen erwarten lässt.

Landläufig stehen Luftheizungen für einfache, flinke und kostengünstige Systeme. Aber bei Gebäuden mit einer Luftheizung tauchen immer wieder kleinere und grössere Probleme auf. Die Luftheizung hat also neben ihren Vorteilen auch Nachteile und es gibt Grenzen für deren Einsatz. Dies ist mitunter ein Grund für Diskussionen in der Fachwelt über den sinnvollen Einsatz der Luftheizung.

Es stellt sich nun die Frage, ob bzw. wie Behaglichkeit und Komfort mit Luftheizungen gewährleistet werden können und welche Vor- sowie Nachteile die Luftheizung gegenüber den anderen Wärmeverteils- und Wärmeabgabesystemen aufweist. Ergänzend zum bereits existierenden Positionspapier „Komfortlüftungen“ möchte der Verein MINERGIE[®] in einem Positionspapier „Luftheizung“ klar und fundiert zu diesem Thema Stellung beziehen.

MINERGIE[®] und das AWEL (Amt für Abfall, Wasser, Energie und Luft; Kt. Zürich) haben deshalb bei der HTA Luzern eine Studie in Auftrag gegeben, die aufgrund von Literaturrecherchen klare Fakten zur Luftheizung festhält und diese durch Interviews mit erfahrenen Fachleuten sowie Bewohnern/-innen ergänzt. Zudem werden die Anforderungen definiert, damit eine Luftheizung ein zufrieden stellendes Raumklima bei standardkonformem Energieverbrauch gewährleistet.

2. Vorgehen

Die Studie wird als Kombination zwischen einer Semesterarbeit von Studierenden der Abteilung Gebäudetechnik der HTA Luzern und einer Projektarbeit am Zentrum für Integrale Gebäudetechnik (ZIG) durchgeführt. In der Semesterarbeit werden die Literaturrecherche und ein Teil der Interviews durchgeführt, in der Projektarbeit werden ergänzende Interviews durchgeführt und die Schlussfolgerungen gezogen.

Bei der Literaturrecherche werden primär die im deutschsprachigen Raum vorhandene Fachliteratur aber auch Fachzeitschriften und andere Publikationen nach relevanten Aussagen zum Thema Luftheizung untersucht.

Der Kreis der mit Luft beheizten Gebäude ist in der Schweiz zurzeit noch überschaubar und die Auswahl von möglichen Untersuchungsobjekten entsprechend gering. Die für die Bewohnerinterviews getroffene Auswahl von sechs Objekten kann nicht als repräsentativ bezeichnet werden, die Durchführung einer repräsentativen Umfrage hätte den Rahmen dieser Studie gesprengt. Aber auch so können aus den Interviews wertvolle Informationen und Erkenntnisse gewonnen werden, zumal die Aussagen aus den Gesprächen einen hohen Deckungsgrad auf-

weisen. Die Interviews werden persönlich und mit Hilfe eines standardisierten Fragebogens durchgeführt.

Analog ist das Vorgehen bei den sieben Interviews mit Fachleuten. Hier werden einerseits Personen aus dem Umfeld der HTA Luzern (Dozierende, Mitarbeitende), vor allem aber Fachplaner (HLK-Ingenieure und Architekten) aus der Praxis zu ihren Erfahrungen mit Luftheizungen befragt. Auch hier hat keine im statistischen Sinne repräsentative Auswahl stattfinden können. Die Interviews werden ebenfalls persönlich und mit einem standardisierten Fragebogen durchgeführt.

Die durchgeführten Berechnungen und theoretischen Überlegungen werden in einem Nomogramm zusammengefasst, welches aufzeigt, wie die im Zusammenhang mit einer (Luft-) Heizung interessierenden Faktoren sich gegenseitig beeinflussen und mit welchen Randbedingungen die gestellten Anforderungen erfüllt werden können. Dieses Nomogramm ermöglicht auf eine einfache Weise Einsatzgebiete und Einsatzgrenzen von Luftheizungen aufzuzeigen. Gleichzeitig kann es dem Planer als erste Dimensionierungshilfe dienen.

3. Resultate

Die Luftheizung ist in Kombination mit MINERGIE-P[®]- und Passivhäusern noch ein relativ neues Thema, dennoch ist schon einiges an Wissen und Erfahrungen dokumentiert. Die im Rahmen der Studie durchgeführten Interviews verdeutlichen jedoch die noch immer sehr kontroversen Meinungen und unterschiedlichsten Erfahrungen mit diesem System. Während die einen Fachplaner in der Luftheizung ein einfaches, günstiges und funktionierendes System sehen, sprechen andere Fachplaner von einem aufwändigen, problembehafteten Prinzip. So erstaunt es nicht, wenn die einen Fachleute ohne zu zögern wieder eine Luftheizung planen und einbauen würden, andere wiederum lieber die Finger davon lassen. Bemerkenswerterweise würde von den befragten sieben Bewohnern/-innen die Mehrheit wieder eine Luftheizung wählen, auch wenn sie – vor allem in der Anfangsphase – von Problemen nicht verschont wurden. Dies zeugt von einem System, das bei fachgerechter Planung und Ausführung sowie unter Beachtung der Einsatzgrenzen zufriedene Nutzer bringen kann.

Auf Basis eines Vergleiches verschiedener Wärmeverteils- und -abgabesysteme (Luftheizung, Heizkörper, Fussbodenheizung, Bauteilaktivierung, Punktwärmequelle [z.B. Kachelofen]) wurden in der Studie die Vor- und Nachteile einer Luftheizung ermittelt:

Die Vorteile der Luftheizung

- Die Luftheizung bedingt kein eigenes Wärmeverteilsystem sondern nutzt für den Wärmetransport die ohnehin in der Wohnung / im Haus zu verteilende Frischluft. Somit ist eine Luftheizung ein einfaches System.
- Wird bewusst ein einfaches Heizsystem gewünscht, so kann die Luftheizung diesem Anspruch gerecht werden und es sind Kosteneinsparungen von ein paar Tausend Franken gegenüber einem System mit kontrollierter Lüftung und zusätzlicher statischer Heizung möglich.
- Wenn die Luftheizung richtig eingestellt wird, funktioniert diese – analog zu den Wasser führenden Systemen – automatisch und wartungsarm.

Die Nachteile der Luftheizung

- Die Zuluftmenge bei der Luftheizung soll wie bei der kontrollierten Lüftung aufgrund des hygienischen Bedarfs festgelegt werden. Ein Erhöhen der Luftmenge ist zu vermeiden, da sonst mehr Energie für die Luftförderung verbraucht wird, die Luft zu stark austrocknet und auch die Lärmbelastigungen zunehmen. Durch die im Merkblatt SIA 2023 definierten Luftmengen sind die Einsatzgrenzen der Luftheizung abhängig von der Belegung klar definiert (Abbildung 1):

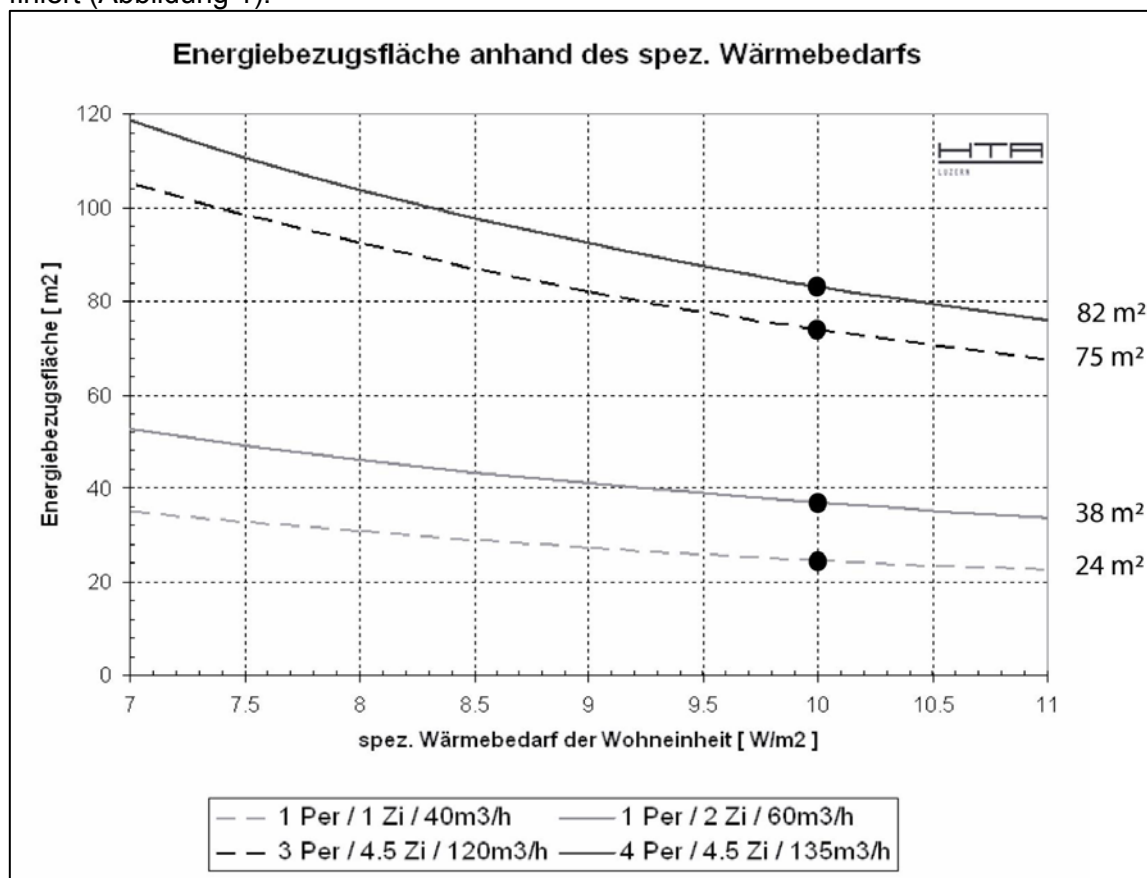


Abbildung 0: Theoretische, maximal mit einer Luftheizung beheizbare Energiebezugsfläche in Abhängigkeit des Heizleistungsbedarfs und der Personen-Belegungsdichte

- Die Leistung bei einer Luftheizung ist begrenzt (Abbildung 0). Kann bei einem Heizkörper oder einer Fussbodenheizung eine ungenügende Heizleistung durch Verstellen der Heizkurve meist noch korrigiert werden, ist dies bei der Luftheizung aufgrund der nach oben limitierten Zulufttemperatur nicht möglich. Oft wird dann eine ungenügende Leistung durch (elektrische) Zusatzheizungen kompensiert. Auch durch einen Umluftbetrieb lässt sich die Heizleistung erhöhen. Dies führt neben dem Mehrverbrauch an Ventilatorenergie aber auch zu Geruchs-, Schadstoff- und Lärmbelastigungen sowie zu einem erhöhten Platzbedarf (und entsprechenden Mehrkosten). Das Merkblatt SIA 2023 spricht sich gegen den Einsatz von Umluftsystemen aus, da sie mehr Probleme als Nutzen bringen.
- Ein offen gelassenes Fenster oder tiefere interne Lasten als in der Planung angenommen führen zu einem erhöhten Leistungsbedarf, welcher die Luftheizung schnell an die Leistungsgrenze führen kann. Die gewünschte Raumlufttemperatur wird nicht mehr eingehalten und es dauert aufgrund der limitierten Leistung relativ lange, bis der Raum wieder auf die gewünschte Temperatur aufgeheizt ist.

- Bei der kontrollierten Wohnungslüftung bewährt sich die Kaskadenlüftung (Lüftung im Überströmbereich): die frische Luft wird in die Schlafzimmer geführt, strömt dann in die Wohnbereiche und wird via Nasszellen wieder abgesaugt. So kann mit minimaler Luftmenge in jedem Raum eine gute Luftqualität gewährleistet werden. Kombiniert mit einer Luftheizung funktioniert dieses Prinzip nicht mehr in seiner Ursprünglichkeit, weil die Wärme direkt nur noch den Schlafzimmern zugeführt würde. Dies steht diametral zum gewohnten Anspruch eines kühleren Schlafzimmers und wärmerer Nasszellen. Im Gegensatz zur einfachen Lüftung sind deshalb bei der Luftheizung zusätzliche Lufteinlässe im Wohnbereich und eine Zusatzheizung im Badzimmer vorzusehen. Dies bedingt eine frühzeitige Zusammenarbeit zwischen ArchitektIn und HaustechnikIn damit Haustechnik- und Raumkonzept miteinander koordiniert werden können.
- Gemäss Mustervorschriften der Kantone im Energiebereich (MuKE n) ist jeder beheizte Raum mit einer Einzelraumregulierung zu versehen. Streng genommen ist somit bei einer Luftheizung mindestens ein Lufteinlass in jedem Raum mit einem Nachwärmer auszurüsten. In Anbetracht der guten Energieeffizienz solcher Bauten sind Ausnahmegewilligungen durch die Baubewilligungsbehörde jedoch möglich. Ein entsprechendes Gesuch ist frühzeitig einzureichen.
- Exponierte Räume und Wohnungen haben aufgrund der grösseren Verluste (Ecksituationen, Dach etc.) einen höheren Heizleistungsbedarf. Gleichzeitig weisen die längeren Zuluftleitungen zu diesen Zonen höhere Wärmeverluste auf. Wird dies nicht in den Berechnungen berücksichtigt und z.B. durch einen besseren Dämmstandard kompensiert, ist als Resultat ein ungenügender thermischer Komfort in exponierten Zonen zu erwarten.
- Die Effizienz der Wärmeerzeugung hängt je nach System mehr oder weniger stark vom Temperaturniveau des Wärmeträgers (Wasser, Luft) ab. Besonders ausgeprägt ist dies bei Systemen mit tiefen Temperaturen wie z.B. der Wärmepumpe: Je tiefer die benötigte Vorlauftemperatur, desto höher ist die Energieeffizienz der Wärmepumpe. Während bei der Fussbodenheizung bei gut gedämmten Gebäuden mit Vorlauftemperaturen von 30°C theoretisch eine Jahresarbeitszahl (JAZ) von 4.5 erreicht werden kann, weist die gleiche Wärmepumpe mit der Luftheizung (Lufttemperatur 50°C) nur noch eine JAZ von 2.5 auf. Die Folge ist ein deutlich höherer Endenergiebedarf, der zur Deckung des gleichen Heizbedarfs benötigt wird.
- Neben der konsequenten Planung ist – wie auch bei der Komfortlüftung - eine exakte Einzelraumregulierung zwingend, damit die Anlage wie gewünscht funktioniert.

Kosten

Bei den Investitionskosten muss berücksichtigt werden, dass es sich bei der Luftheizung nicht zwangsläufig um ein günstigeres System handelt: Die Einsparung bei der Wärmeverteilung kann durch den notwendigen Nachwärmer, eine anspruchsvollere Luftverteilung sowie die umfangreichere Planung und Inbetriebnahme durchaus wieder kompensiert werden.

Anforderungen an Planung und Ausführung

Durch eine umsichtige Planung und fachgerechte Ausführung kann das Risiko eines Nicht-Funktionierens des Systems reduziert werden. Zur fachgerechten Planung einer Luftheizung gehören mindestens:

- Bestimmen des Heizleistungsbedarfs der einzelnen Räume
- Erarbeiten eines Luftführungskonzeptes
- Luftvolumenströme nach Hygiene und Heizleistung bestimmen und vergleichen
- Dimensionierung und Koordination Luftkanalnetz und Auslässe
- Dämmung des Kanalnetzes, Berechnung/Berücksichtigung der Kanalverluste
- Kontrolle der Volumenströme bei den Ein- und Auslässen (bei Inbetriebnahme)

Der Volumenstrom

Die Volumenstromermittlung bei der Luftheizung erfolgt analog wie bei der kontrollierten Wohnungslüftung. Der hygienisch bedingte Volumenstrom muss aber zusätzlich mit dem für die Beheizung nötigen Volumenstrom verglichen werden, wobei ersterer dimensionierend sein muss. Nachfolgend ist das Vorgehen bei der Volumenstromermittlung zusammengefasst:

- Grösserer Volumenstrom von Zu- und Abluft für Wohneinheit und für die einzelnen Räume bestimmen [SIA 2023].
- Nötiger Volumenstrom zur Deckung des Heizleistungsbedarfs über die Luft bestimmen.
- Die beiden Volumenströme miteinander vergleichen. Luftheizung ist dann realisierbar, wenn der hygienisch bedingte Volumenstrom grösser oder gleich gross ist wie der zur Beheizung nötige Luftvolumenstrom.

Bei MINERGIE-P[®]- und Passivhäusern wird die Luftheizung wegen des tiefen Heizwärmebedarfs weiterhin eine Rolle spielen. Werden die engen Einsatzgrenzen respektiert und durch eine fachgerechte Planung und Ausführung die möglichen Fehlerquellen vermieden, so entsteht durchaus ein Haus mit geringem Energiebedarf, in welchem die Bewohner komfortabel wohnen können. Ganz nach dem Motto: „Luftheizung: Ja, aber...“.

Inhaltsverzeichnis

1	Ausgangslage	1
2	Zielsetzung	2
3	Vorgehen	3
4	Grundlagen	4
	4.1 Energiestandards	4
	4.2 Behaglichkeit.....	5
	4.3 Anforderungen an das Heizsystem (Wärmeabgabe).....	7
5	Analyse Heizsysteme (Wärmeverteilung und -abgabe)	13
	5.1 Heizkörper.....	13
	5.2 Bauteilintegrierte Heizsysteme	14
	5.3 Punktwärmequelle	16
	5.4 Luftheizung	17
	5.5 Systemvergleich.....	25
6	Theoretische Überlegungen / Nomogramm	28
	6.1 Normen, Merkblätter	28
	6.2 Volumenstromermittlung / Nomogramm	28
7	Interviews	33
	7.1 Fachplaner	33
	7.2 Bewohner/-innen.....	39
8	Hinweise Planung, Ausführung, Betrieb	44
	8.1 Planung.....	44
	8.2 Ausführung.....	46
	8.3 Betrieb.....	47
9	Synthese	48
10	Abschliessende Bemerkungen	52
11	Literaturrecherche	53
	11.1 Fachliteratur	53
	11.2 Normen und Richtlinien.....	56
	11.3 Internetseiten	56
12	Verständnis	57
	12.1 Begriffe.....	57
	12.2 Abkürzungen	60
13	Anhang	61

1 Ausgangslage

Lüftungen sind ein sensibles und anspruchsvolles Thema, besonders auch im Wohnungsbau da dort die Anforderungen seitens der Nutzer besonders hoch sind. Da MINERGIE® aus Komfort- und Energiegründen den Einsatz einer kontrollierten Wohnungslüftung konsequent fordert, ist es dem Verein MINERGIE® aufgrund der vielen zum Teil vorgefassten und zum Teil auch kontroversen Meinungen zu diesem Thema ein Anliegen, bezüglich den Vorteilen und Anforderungen an die kontrollierte Lüftung klar und fundiert Stellung zu beziehen. Mit einem Positionspapier zu den Komfortlüftungen ist dies bereits passiert.

Bei Niedrigstenergiehäusern wie MINERGIE-P® oder Passivhaus können verschiedenste Wärmeverteils- und Wärmeabgabesysteme eingesetzt werden. Zum einen gibt es die Möglichkeit, das Gebäude konventionell über eine Fussbodenheizung, Deckenheizung oder Heizkörper zu heizen, zum anderen kann dem Gebäude die aufgrund des tiefen Wärmebedarfs nur noch sehr kleine Heizleistung auch über die sowieso geforderte mechanische Lüftung zugeführt werden, ohne dass der hygienisch notwendige Luftwechsel erhöht werden muss.

Jedes dieser verschiedenen Systeme hat seine Berechtigung und auch seine Vor- und Nachteile. Seit einiger Zeit beschäftigt vor allem auch die Frage eines sinnvollen und optimalen Einsatzes der Luftheizung die interessierte Fachwelt. Beim MINERGIE-P®-Gebäude und auch beim Passivhaus ist die Luftheizung zwar keine Anforderung, sie kommt jedoch überdurchschnittlich häufig zum Einsatz. Beim Passivhaus war die Luftheizung bis vor einigen Jahren noch zwingend gefordert, unter anderem auch weil aufgrund des Wegfalls eines separaten Wärmeverteilsystems eine markante Kosteneinsparung vermutet wurde.

Es stellt sich nun die Frage, ob bzw. wie Behaglichkeit und Komfort mit Luftheizungen gewährleistet werden können und welche Vor- sowie Nachteile die Luftheizung gegenüber den anderen Wärmeverteils- und Wärmeabgabesystemen aufweist. Ergänzend zum Positionspapier „Komfortlüftungen“ möchte der Verein MINERGIE® in einem Positionspapier „Luftheizung“ klar und fundiert zu diesem Thema Stellung beziehen.

2 Zielsetzung

Ziel dieser Studie ist, anhand von Literaturrecherchen, eigenen Überlegungen und von Interviews mit Bewohnern und Planenden von Gebäuden mit Luftheizungen die Einsatzmöglichkeiten und -grenzen für die spezifische Anwendung in dichten und gut gedämmten Wohngebäuden aufzuzeigen. Während die Interviews mit den Bewohnern die Softfaktoren im Fokus haben, sollen bei den Interviews mit den Planenden vor allem die gemachten Erfahrungen erfragt werden. Schlussendlich geht es um eine Positionierung der Luftheizung im Vergleich zu anderen Systemen.

Im Zentrum steht dabei die Frage, ob und unter welchen Voraussetzungen eine Luftheizung Sinn macht. Im Detail will man wissen, welche Punkte dann in Planung, Ausführung und Betrieb beachtet werden müssen. Natürlich will man die Luftheizung bei gleichen oder tieferen Gesamtkosten zu einer gleichen oder besseren Behaglichkeit führen, wobei als Vergleich die bekannten Wärmeverteiler- und Wärmeabgabesysteme zur Verfügung steht. Ein wichtiger Punkt in dieser Beurteilung ist auch die Fehlertoleranz der Systeme: Was passiert bei einer falschen Dimensionierung, Ausführung oder bei falschem Verhalten der Nutzer im Betrieb? Kann darauf reagiert werden und wie?

Der in dieser Studie zu erarbeitende Überblick zum heutigen Stand der Luftheizung soll Basis für zwei Dokumente liefern: für ein Positionspapier und einen Leitfaden. Das Positionspapier soll – nach einer allfälligen Überarbeitung durch MINERGIE® – der breiteren Öffentlichkeit (Journalisten, Politiker, aber auch Bauherrschaften etc.) als Grundlage für die Meinungsbildung dienen. Weiter ist ein Leitfaden für Fachleute (Architekten, Planende, Industrie) zu entwerfen. Dieser Leitfaden soll eine thematisch umfassende und leicht lesbare Zusammenfassung dieser Studie wiedergeben.

3 Vorgehen

Die Studie wird in zwei Teilen durchgeführt. Der erste Teil umfasst Literaturrecherche sowie einen Teil der Interviews und wird im Rahmen einer Semesterarbeit von zwei HLK-Studenten an der HTA Luzern durchgeführt. Der zweite Teil der Arbeit umfasst weitere Interviews, theoretische Überlegungen sowie die Synthese und wird als Studienarbeit am Zentrum für Integrale Gebäudetechnik an der HTA Luzern durchgeführt.

Bei der Literaturrecherche werden primär die im deutschsprachigen Raum vorhandene Fachliteratur aber auch Fachzeitschriften und andere Publikationen nach relevanten Aussagen zum Thema Luftheizung untersucht.

Der Kreis der mit Luft beheizten Niedrigstenergiebauten ist in der Schweiz zurzeit noch überschaubar und die Auswahl von Untersuchungsobjekten entsprechend gering. Die für die Bewohnerinterviews getroffene Auswahl von sechs Objekten kann nicht als repräsentativ bezeichnet werden, die Durchführung einer repräsentativen Umfrage hätte den Rahmen dieser Studie gesprengt. Trotzdem können aus den Interviews wertvolle Informationen und Erkenntnisse gewonnen werden, zumal die Aussagen aus den Gesprächen einen hohen Deckungsgrad aufweisen – wie später noch gezeigt wird. Die Interviews werden persönlich und mit Hilfe eines standardisierten Fragebogens durchgeführt.

Analog ist das Vorgehen bei den sieben Interviews mit Fachleuten. Hier werden einerseits Personen aus dem Umfeld der HTA Luzern (Dozierende, Mitarbeitende), vor allem aber Fachplaner (HLK-Ingenieure, Architekten etc.) aus der Praxis zu ihren Erfahrungen mit Luftheizungen befragt. Auch hier hat keine im statistischen Sinne repräsentative Auswahl stattfinden können, trotzdem lassen sich aber wertvolle Erkenntnisse gewinnen. Die Interviews werden ebenfalls persönlich und mit einem standardisierten Fragebogen durchgeführt.

Die im Rahmen der Studie durchgeführten Berechnungen und theoretischen Überlegungen werden in einem Nomogramm zusammengefasst, welches aufzeigt, wie die im Zusammenhang mit einer (Luft-)Heizung interessierenden Faktoren sich gegenseitig beeinflussen und mit welchen Randbedingungen die gestellten Anforderungen erfüllt werden können. Dieses Nomogramm ermöglicht auf eine einfache Weise Einsatzgebiete und Einsatzgrenzen von Luftheizungen aufzuzeigen. Gleichzeitig kann es dem Planer als erste Dimensionierungshilfe dienen.

Die Erkenntnisse aus Recherche, Interviews, Berechnungen und theoretischen Überlegungen werden dann aggregiert und in einer Synthese zusammengefasst. Die Erstellung des Positionspapiers und des Leitfadens im Grobentwurf bilden den Abschluss dieser Studie.

4 Grundlagen

4.1 Energiestandards

Der MINERGIE®-Standard stellt keine direkten Anforderungen an das Wärmeverteil- oder Wärmeabgabesystem. Lediglich die Energiemenge ist beim Heizwärmebedarf auf 80% des Grenzwerts nach [Norm SIA 380/1] festgelegt. Der Heizleistungsbedarf eines MINERGIE®-Gebäudes beträgt rund 15-20 W/m². Die gewichtete Energiekennzahl für Raumheizung, Warmwasser und Lüftung/Klimatisierung darf bei MINERGIE® 42 kWh/m²a (Nutzung Wohnen) nicht übersteigen.

Der MINERGIE-P® Standard stellt ebenfalls keine direkten Anforderungen ans Wärmeverteil- und Wärmeabgabesystem, ausser dass bei einer reinen Luftheizung ohne zusätzliche Wärmeabgabeunterstützung eine maximale Leistung von 10 W/m² nicht überschritten werden darf. Die Energiemenge ist beim Heizwärmebedarf auf 20% des Grenzwerts nach [Norm SIA 380/1] bzw. unter einem Formfaktor A/EBF von 1.1 auf 10kWh/m²a beschränkt (Nutzung Wohnen). Die gewichtete Energiekennzahl für Raumheizung, Warmwasser und Lüftung/Klimatisierung beträgt bei MINERGIE-P® 30 kWh/m²a (Nutzung Wohnen), also rund 75% des entsprechenden Wertes bei MINERGIE®.

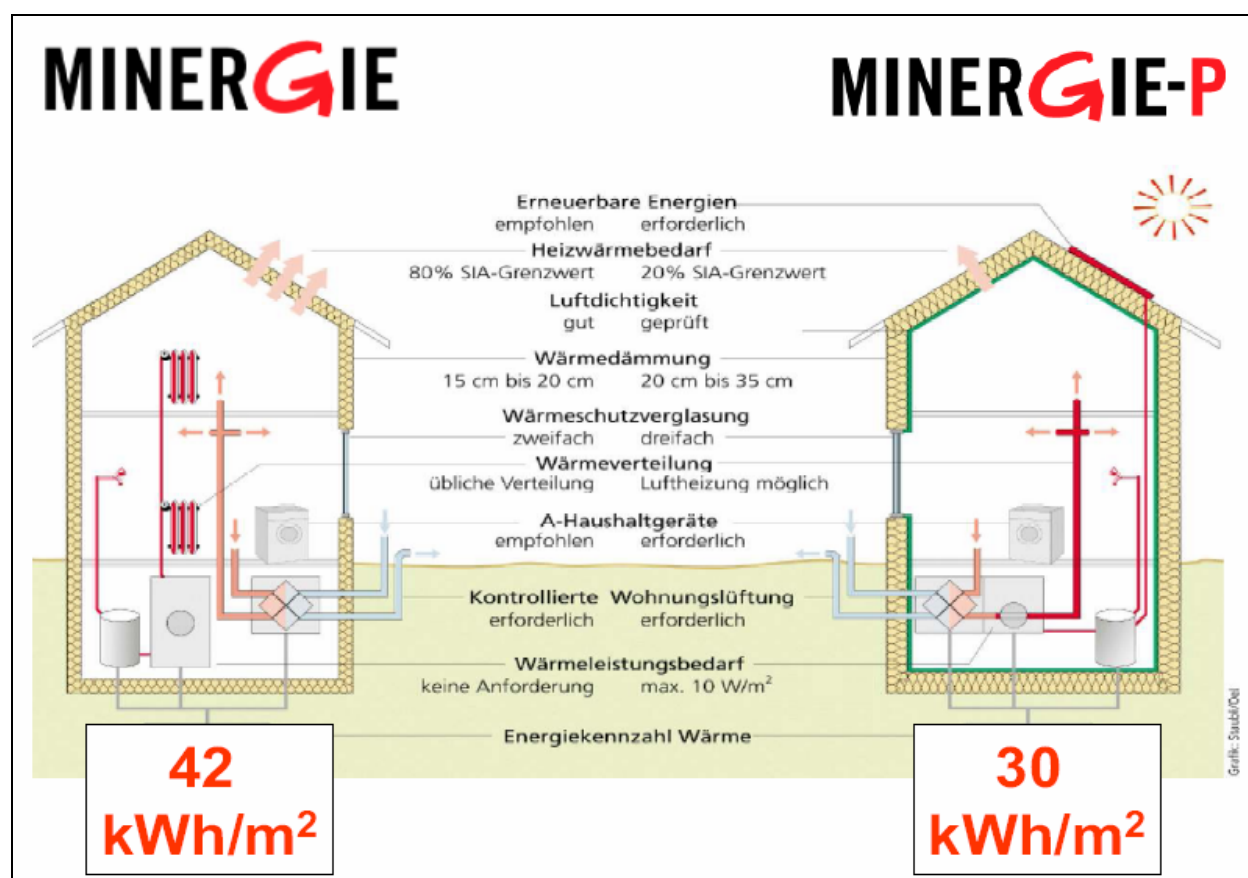


Abbildung 1: Vergleich der beiden MINERGIE®-Label.

Das Passivhaus wiederum setzt keine maximale Heizleistung fest. Vom Passivhaus Institut (PHI) wird eine maximale Wärmeleistung von 10 W/m^2 (bezogen auf die Nettofläche) jedoch empfohlen. Die Nutzenergie für Heizen (ohne Warmwasser) ist auf 15 kWh/m^2 festgelegt und entspricht unter Berücksichtigung der unterschiedlichen Randbedingungen (betrachtete Fläche, interne Gewinne, Ausnutzungsgrad und Wärmespeicherfähigkeit) in etwa den 10 kWh/m^2 von MINERGIE-P® bei kompakten Gebäuden [StatSe02].

	Passivhaus	MINERGIE-P®
Heizwärmebedarf	$Q_h \leq 15 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$ Nach PHPP	$Q_h \leq 20\% \text{ Hg}$ $Q_h \leq 10 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$ Nach SIA 380/1
Gewichtete Endenergiekennzahl Wärme (inkl. WW)		$E_w \leq 30 \text{ kWh}/\text{m}^2$ (Wohnbauten) ($25 \text{ kWh}/\text{m}^2$ bei DL-Bauten)
Primärenergiekennzahl	$P_E \leq 120 \text{ kWh}/\text{m}^2\text{a}$	
Heizleistungsbedarf		$q_h \leq 10 \text{ W}/\text{m}^2$ bei Luftheizung aus H (380/1).
Luftwechsel	$n_{50} \leq 0,6 \text{ h}^{-1}$	$n_{50} \leq 0,6 \text{ h}^{-1}$
Geräte		EU-Label: A / A+

Tabelle 1: Vergleich der wichtigsten Anforderungen von Passivhaus und MINERGIE-P®

In allen diesen drei Gebäudestandards wird eine kontrollierte Wohnungslüftung vorausgesetzt. Um die sehr tiefen Energiekennzahlen zu erreichen, werden primär die zwei folgenden Lüftungen eingesetzt: Komfortlüftung mit Wärmerückgewinnung (einfache Lüftungsanlage) und Komfortlüftung mit Wärmepumpe.

4.2 Einführung Behaglichkeit

Prinzipiell soll sich der Mensch in seiner Wohnung beziehungsweise seinem Haus wohl fühlen. Dafür müssen folgende Behaglichkeitskriterien erfüllt sein:

- Thermische Behaglichkeit
- Raumluftqualität (IAQ)
- Visuelle Behaglichkeit
- Akustische Behaglichkeit

Grundsätzlich können diese Parameter durch eine gute Planung des ganzen Gebäudes wie auch durch eine konsequent seriöse Ausführung gewährleistet werden. Behaglichkeit ist aber zu einem gewissen Teil auch ein subjektiv empfundener Zustand und immer auch nicht-messbaren Einflüssen und Empfindungen ausgesetzt.

4.2.1 Thermische Behaglichkeit

Die thermische Behaglichkeit setzt sich aus verschiedenen Faktoren zusammen. Wie Untersuchungen zeigen [SN7730], dominieren sechs Einflussgrössen. Es sind dies die vier physikalische Grössen:

- Lufttemperatur
- Oberflächentemperatur der den Raum umschliessenden Flächen
- Luftgeschwindigkeit
- Luftfeuchte

und die zwei auf den Menschen bezogenen Grössen

- Tätigkeitsgrad
- Bekleidung

Weitere Einflussfaktoren sind von geringerer Bedeutung oder stellen nur Vermutungen dar. Interne und externe Wärmegevinne sowie die wärmetechnischen Eigenschaften der Gebäudehülle bestimmen zu einem wesentlichen Teil den Verlauf der thermischen Behaglichkeitsparameter.

4.2.2 Raumlufqualität

Eine hohe Raumlufqualität bedeutet, dass ein Gesundheitsrisiko vernachlässigbar und nur eine geringe Personenanzahl unzufrieden ist.

Die in dieser Studie betrachteten Objekte (MINERGIE-P[®], Passivhaus) müssen zwingend über eine kontrollierte Wohnungslüftung (KWL) verfügen, da sonst neben dem geforderten Komfort auch die sehr tiefen Wärmeleistungen nicht eingehalten werden können. Eine kontrollierte Wohnungslüftung soll neben der energetischen Wirkung vor allem auch die Raumlufqualität positiv beeinflussen. Mindestens darf die KWL die Luft bezüglich des Gehaltes an Staub, Bakterien, Pilzen und biologischen Inhaltsstoffen sowie bezüglich des Keimspektrums nicht schlechter machen, als wenn keine kontrollierte Wohnungslüftung vorhanden ist. Bei einer fachmännischen Planung und Ausführung der KWL kann dies nach heutigem Wissenstand gewährleistet werden.

Die geforderte Luftqualität bestimmt den hygienisch notwendigen Luftwechsel. Die untere Limite des benötigten Luftwechsels ist durch die geforderte Raumlufqualität bzw. durch die vorhandenen Schadstoffquellen bestimmt (Geruch, CO₂, weitere Schadstoffe). Die obere Limite wird durch den zu minimierenden Energieverbrauch und – im Winter – durch die Vermeidung von zu trockener Raumluf definiert.

Interessant bezüglich dieser Studie ist der signifikante Zusammenhang zwischen dem Geruchsempfinden des Menschen und der Lufttemperatur / Luftfeuchte [Böck00]. Selbst aus che-

mischer Sicht saubere Luft wird mit zunehmender Lufttemperatur und Luftfeuchte generell als weniger "sauber" empfunden. Das heisst, dass eine hohe Luftenthalpie zum subjektiven Eindruck von unsauberer Luft führen kann. Der Einfluss der Enthalpie nimmt bei zunehmender Konzentration der Luftverunreinigungen allerdings ab.

Der Mensch ist nicht in der Lage, eine objektive Beurteilung der Luftqualität bzw. der Geruchsbelastigung zu machen [Böck00]. Zudem kann der Mensch nur solche Geruchsstoffe identifizieren, denen er in seinem Leben bereits einmal ausgesetzt war. Der Eindruck der Intensität eines Geruchs ist auch von Erfahrungen abhängig.

Mit der von Fanger entwickelten Dezipol-Methode besteht eine erste Möglichkeit die Raumluftqualität von Innenräumen zu charakterisieren [DIN7730].

4.2.3 Visuelle Behaglichkeit

Wohnungswissenschaftler und Bauaufsichtsbehörden gehen davon aus, dass Sonne und Tageslicht wesentliche Kriterien bei der Beurteilung der Wohnqualität sind. So wurden bei Untersuchungen auf die Frage: „Aus was würden Sie bei einer neue Wohnung besonderen Wert legen“ folgende Antworten gegeben (wirtschaftliche Aspekte ausgenommen) [Barrier70], [Frey78]:

- genügend Sonne
- geräumige Wohnung
- genügend Tageslicht

4.2.4 Akustische Behaglichkeit

Mit der [SIA181] sind bereits sehr tiefe Schallemissionen im Wohnraum vorgeschrieben und werden mit der nächsten Ausgabe voraussichtlich noch einmal reduziert. Die [SIA2023] bezieht sich auf die [SIA181] betont jedoch im Raum den Schalldruckpegel von 25 dB(A) nicht zu überschreiten. So gilt es, bei der gesamten Haustechnikplanung und -ausführung äusserste Sorgfalt walten zu lassen, um die strengen Anforderungen zu erfüllen. Werden diese strengen Anforderungen eingehalten, sollten für die Bewohner keine akustischen Behaglichkeitsprobleme auftreten.

4.3 Anforderungen an das Heizsystem (Wärmeabgabe)

Beim Vergleich verschiedener Heizsysteme sind unterschiedliche Aspekte zu berücksichtigen. Im Folgenden wird zu hier relevanten Aspekten definiert, welche Anforderungen von einem Heizsystem (mit Schwerpunkt auf der Wärmeabgabe) erfüllt werden müssen. Basis bilden z.T. Normenwerke, aber auch eigene Erfahrungswerte und Überlegungen. Es wird offensichtlich, dass es das optimale Heizsystem in der Realität nicht gibt und dass die einzelnen Anforderungen je nach System mehr oder weniger gut erfüllt werden können.

4.3.1 Behaglichkeit

Die als angenehm empfundene Raumtemperatur hängt von Bekleidung, Tätigkeit und persönlichen Empfindungen ab. Die Empfindungstemperatur soll erfahrungsgemäss zwischen 18 und 24°C liegen - die Oberflächentemperatur am Boden sollte zwischen 19 und 26°C liegen. Die Oberflächentemperaturen der weiteren Umschliessungsflächen sind anhand der Strahlungstemperaturasymmetrie definiert, welche noch erläutert wird. Ist der Mensch von warmen Flächen umgeben kann die Raumlufthtemperatur auch tiefer liegen bzw. er kleidet sich leichter, als wenn er von kühlen Flächen umgeben ist [SN7730].

Möglichst grosse Heizflächen mit relativ niedriger Temperatur führen zu einer gleichmässigen Verteilung der Raumlufthtemperatur. Die Folge ist, dass im ganzen Raum eine gleichmässige, hohe Behaglichkeit herrscht.

Prinzipiell soll der Unterschied zwischen Luft- zur Strahlungstemperatur möglichst klein sein. Somit soll zwischen allen den Raum umschliessenden Flächen und der Raumlufthtemperatur (Oberflächen-)Temperaturen möglichst ein Gleichgewicht angestrebt werden. Weil all diese Temperaturen nicht immer gleich gehalten werden können, sind gewisse Behaglichkeitsregeln einzuhalten [Dipper02]:

- Der vertikale Temperaturunterschied der Luft zwischen 0,1 m und 1,3 m über dem Fussboden soll nicht grösser als 3 K sein.
- Die Oberflächentemperatur des Fussbodens darf nicht mehr als 10K schwanken.
- Die Strahlungstemperaturasymmetrie aufgrund von kälteren Fensterflächen oder ähnlichem soll nicht mehr als 5 K betragen.

Diese Behaglichkeitsregeln sind je nach erlaubtem Prozentsatz an Unzufriedenen abzuändern. Als Grundlage dient die [SN7730].

Die Heizung darf nicht zu Zugerscheinungen führen, bzw. sie hilft mit, diese zu vermeiden. Die Anforderungen sind wie folgt definiert: Die höchstzulässige mittlere Luftgeschwindigkeit im Aufenthaltsbereich darf bei 20, 23 bzw. 26°C Lufttemperatur 0.10, 0.15 bzw. 0.18 m/s nicht überschreiten [SIA180].

Die Definition des Aufenthaltsbereichs richtet sich nach der Nutzung des Raumes und ist von Fall zu Fall festzulegen. Im Allgemeinen kann der Aufenthaltsbereich wie folgt definiert werden [SIA382/1].

- 1.00 m Abstand von Fenster
- 0.50 m Abstand von allen Innenwänden und fensterlosen Aussenwänden
- 0.10 m Abstand vom Boden
- 1.30 m Abstand vom Boden bei vorwiegend sitzender Tätigkeit
- 1.80 m Abstand vom Boden bei vorwiegend stehender Tätigkeit

4.3.2 Ankopplung an die thermische Speichermasse

Eine grosse thermische Speicherkapazität z.B. von Wänden, Böden und Decken hilft bei der für Niedrigstenergiebauten typischen und wichtigen Nutzung der solaren Energie mit (Speicherung der Energiegewinne über Stunden und Tage) und vermag Spitzenlasten zu brechen, d.h. zu verkleinern [Dipper02]. Dabei ist jedoch zu beachten, dass bei einem massiven Bauteil im Tagesgang nur die ersten 10-15 cm speicherwirksam sind, wobei dies materialabhängig ist [DIN4108-2]. Bei geringer thermischer Masse sollte das Heizsystem eine geringe Trägheit aufweisen, um auf Laständerungen flink reagieren zu können und so ein Über- oder Unterschwingen der Raumtemperatur zu verhindern [Glück01], mit zunehmender Speichermasse wird die Trägheit des Heizsystems jedoch zunehmend irrelevant, ebenso bei Systemtemperaturen nahe der Raumtemperatur (hoher Selbstregelleffekt).

Bei Wohnungen mit tiefem Wärmebedarf (Niedrigstenergiebauten) kann eine grosse Masse mit grosser Oberfläche die (geringen) Wärmeverluste über eine lange Zeit ausgleichen, so dass im Raum auch bei ausgeschalteter Heizung lange Zeit (Stunden, Tage) kein markanter Temperaturrückgang spürbar wird (siehe auch Hinweis zum Thema Nachtabsenkung im Kapitel 4.3.3). Zusammengefasst heisst das, die Thermostabilität kann durch die Gebäudemasse - und somit von der Oberfläche - unterstützt werden [Glück01].

4.3.3 Regelung

Die Regelung hat zusammen mit der Heizung dafür zu sorgen, dass sich die Raumtemperatur raumweise nach den individuellen Bedürfnissen einstellen lässt. D.h. die Heizung hat einstellbare Sollwerte pro Raum und die Regelung hält die Raumtemperatur ohne (größere) Schwankungen auf diesem Sollwert, was ein schnelles Reagieren auf Lastwechsel bedingt [Bauer97]. Insbesondere beim Ein- und Ausschalten von Fremdwärmeeinwirkungen (z.B. Elektrogeräte oder Sonneneinstrahlung) ist dies wünschenswert [Kühl05]. Die in Kapitel 4.3.2 erwähnte Selbstregelung kann im Idealfall eine aktive Regelung der Heizung in weiten Bereichen überflüssig machen.

Eine Nachtabsenkung der Raumlufttemperatur um 1-2 K ist in Niedrigstenergiehäusern kaum mehr wirksam bzw. gar nicht mehr möglich. Als Nachtabstaltung durchgeführt lässt sich wenigstens der Strombedarf der Hilfs-Antriebe etc. senken [Eicke98], eine Auswirkung auf die Raumtemperaturen bzw. auf den Heizwärmebedarf ist dadurch aber kaum zu erwarten. Je nach Energiekonzept kann es sogar sinnvoll sein, das Gebäude während der Nacht zu überhitzen und tagsüber die in den Bauteilen gespeicherte Energie zu nutzen (vor allem bei thermoaktiven Bauteilsystemen denkbar).

4.3.4 Wirkungsgrad

Ein System besteht aus Wärmeerzeugung und Wärmeverteilung. Bei diesen Prozessen wird die Wärme umgewandelt oder an ein anderes Medium übergeben. All diese Teilprozesse haben Verluste. Es gilt alle Verluste so klein wie möglich zu halten, um den resultierenden Anlage- bzw. Gesamt-Wirkungsgrad möglichst gross zu realisieren. Positive Auswirkungen auf den Wirkungsgrad hat u.a. ein Minimum an Exergie-Einsatz (kein Strom, minimale Mediumstemperaturen) [Glück01].

In dieser Studie wird von einer Wirkungsgradverschlechterung in Zusammenhang mit der Heizmedientemperatur gesprochen. Bei konventionellen Wärmeerzeugern verschlechtert sich der Wirkungsgrad um wenige Prozentpunkte. Bei der Wärmepumpe ist die Leistungszahl stark von der Kondensationstemperatur (Heizmedium) und der Verdampfungstemperatur abhängig. Einen Überblick über diese Abhängigkeit ist in der Abbildung 2 ersichtlich.

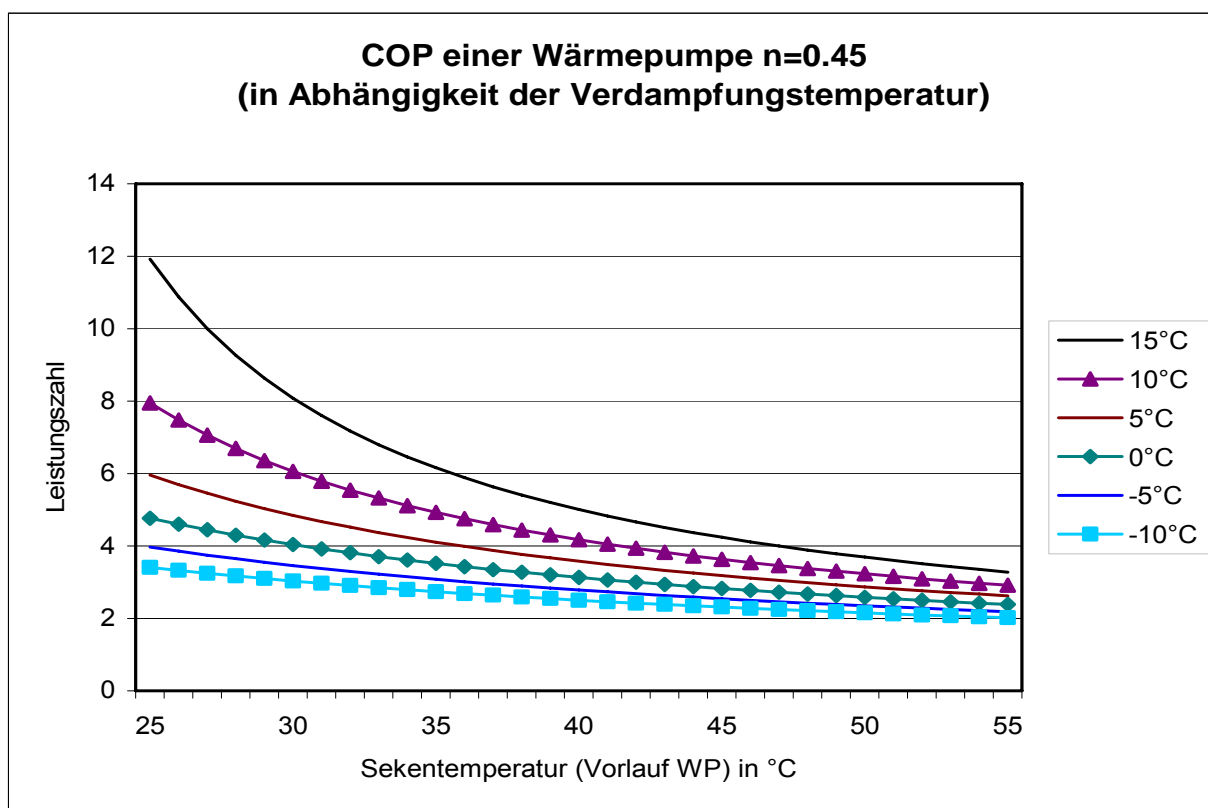


Abbildung 2: COP einer Wärmepumpe mit einem Gütegrad von 0.45. Die Verschiedenen Kurven im Diagramm sind Leistungszahlkurven bei unterschiedlichen Verdampfungstemperaturen.

Man sieht sofort, dass je tiefer die benötigte Vorlauftemperatur ist, desto höher ist die Energieeffizienz der Wärmepumpe. Während bei der Fussbodenheizung bei gut gedämmten Gebäuden mit Vorlauftemperaturen von 30°C eine Jahresarbeitszahl (JAZ) von 4.5 erreicht werden kann, weist die gleiche Wärmepumpe mit der Luftheizung (Lufttemperatur nach dem Lufterhitzer 50°C) nur noch eine JAZ von 2.5 auf. Die Folge ist ein deutlich höherer Endenergiebedarf, der zur Deckung des gleichen Heizbedarfs benötigt wird.

4.3.5 Planung, Ausführung

Das Heizsystem soll möglichst nahe am effektiven Bedarf geplant werden, jedoch immer unter Berücksichtigung der nötigen Sicherheiten. Das optimale System feist eine hohe Fehlertoleranz auf, ohne dass man z.B. bei der zu installierenden Leistung grosse Reserven vorsehen muss. Die Erfahrung zeigt, dass es oft falsche Planungsgrundlagen bei der Belegungsdichte [Dorer03] oder den internen Wärmequellen [PHTag03] sind, die zu einer falschen Dimensionierung der Systeme führen. Diese falschen Grundlagen rühren meist daher, dass zum Zeitpunkt der Planung die entsprechenden Werte gar noch nicht bekannt sind (z.B. Anzahl Bewohner in einer Wohnung). Gerade deshalb ist eine grosse Fehlertoleranz wichtig.

Die Belegung hat einen grossen Einfluss auf das Konzept eines Niedrigstenergiehauses [Dorer03]. Diese Unsicherheiten spiegeln sich auch in der Literatur wider, werden z.B. für die Belegungsdichte sehr unterschiedliche Werte kommuniziert: 45 bis 60 m²/Person (EFH); 35 bis 40 m²/Person (MFH). Zudem sind die bekannten Durchschnittswerte in der Schweiz merklich höher als in Deutschland. So ergab die letzte Volkszählung in der Schweiz, dass die durchschnittliche Wohnfläche pro Person bei Mietwohnungen auf 44 m², bei Eigentumswohnungen auf 50 m² gestiegen ist. Markant ist die Zunahme bei spezifischen Wohnflächen in den Einpersonenhaushalten, der Durchschnittswert stieg hier auf 75 m²/Person an. Diese grosse Spannweite erleichtert die bedarfsgerechte Planung nicht.

Die Studie [Frei04] untersuchte sechs Passivhäuser in der Schweiz. Während bei der Planung von einer Belegung von 3 und mehr Personen ausgegangen wurden, zeigt sich in Realität, dass die Belegung auch in diesen Passivhäusern ziemlich exakt beim Schweizer Durchschnitt von 2.3 Personen pro Wohneinheit liegt.

Normangaben [DIN4108] von 5 W/m² sind erfahrungsgemäss zu hoch.

4.3.6 Nutzer

Der Nutzer erwartet von einer Heizung, dass diese ihm jederzeit ein seinen momentanen Ansprüchen entsprechendes Raumklima schafft. Je weniger persönlicher Aufwand für den Betrieb, aber auch die Wartung und den Unterhalt der Anlage nötig ist, desto besser (im Allgemeinen). Weitere Anforderungen an ein Heizsystem sind Betriebssicherheit, Zuverlässigkeit und Wartungsarmut.

Für den durchschnittlichen Nutzer steht der Komfort deutlich an erster Stelle und der Energieverbrauch ist für ihn sekundär [Dipper02]. Für heutige Bewohner von Niedrigstenergiehäusern mag dies vielleicht nur bedingt gelten, sind diese im Normalfall betreffend Energiefragen besonders sensibilisiert.

Aus Nutzer- aber auch aus Betreibersicht soll ein System möglichst fehlertolerant sein, so dass bei einem Fehlverhalten oder einer Fehlmanipulation nicht direkt ein ungenügendes Raumklima resultiert.

Erfahrungen zeigen immer wieder, dass das Nutzerverhalten einen entscheidenden Einfluss auf den (Heiz-)Energieverbrauch hat. Eine Veränderung des Heizenergieverbrauches um +/-50% nur durch den Nutzer sind keine Seltenheit [Bauer97]. Die erwähnte Untersuchung zeigt aber keine eindeutige Korrelation zwischen Anzahl Bewohnern und Energieverbrauch. Es kann gesagt werden, dass das Verhalten der Nutzenden auf den Energieverbrauch immer noch einen grösseren Einfluss hat als die Anzahl Bewohner oder die Wohnungsgrösse [Frei04] [Lebel04].

5 Analyse Heizsysteme (Wärmeverteilung und -abgabe)

Im folgenden Kapitel werden die in Niedrigstenergiegebäuden am häufigsten anzutreffenden Heizsysteme beschrieben, erläutert und analysiert. Dabei wird klar ein Fokus auf die Luftheizung gerichtet, welche auch detaillierter umschrieben und analysiert wird. Den Abschluss des Kapitels bildet eine Gegenüberstellung der verschiedenen Systeme.

5.1 Heizkörper

In der Umgangssprache wird der Begriff Heizkörper für Radiatoren und Konvektoren verwendet. Das sind technische Bauteile für die Wärmeübertragung von im Heizmedium enthaltener thermischer Energie an die Umgebungsluft via Strahlung und/oder Konvektion.

Die Heizkörper werden an den Wänden befestigt. Bei älteren Gebäuden sind die Heizkörper üblicherweise unter kalten Oberflächen (Fenster) platziert, um den Kaltluftabfall zu stoppen. In Niedrigstenergiehäusern ist es aufgrund der meist sehr nahe bei der Raumlufttemperatur liegenden Oberflächentemperaturen egal, wo der Heizkörper montiert wird. Trotzdem muss aber die Anordnung sehr gut durchdacht werden, da Heizkörper die Freiheit bei der Einrichtung der einzelnen Räume stark beeinträchtigen können. Werden die Heizkörper an Innenflächen aufgestellt, können unter Umständen Investitionskosten (kürzere Leitungen) und Energie (Reduktion Transmissionsverluste) gespart werden.

5.1.1 Temperaturen

Ein Gebäude auf einem guten Energiestandard hat einen tiefen Heizleistungsbedarf und die Oberflächentemperaturen der (Aussen-)Wände und Fenster sind relativ nahe bei der Raumtemperatur. Aufgrund dessen ist der Strahlungswärmeausgleich durch den Heizkörper weniger wichtig als in konventionellen Gebäuden. Dies gilt auch für den Kaltluftabfall, welcher in Wohnbauten mit 3-fach-Verglasung eigentlich kein Problem darstellen sollte.

Mit der Reduktion beim Heizleistungsbedarf kann bei gleich bleibender Heizfläche die Vorlauftemperatur des Heizsystems reduziert werden oder umgekehrt. Es kann aber auch sowohl die Vorlauftemperatur als auch die Heizfläche (leicht) reduziert werden. Es ist darauf zu achten, dass bei Oberflächentemperaturen von rund 55°C Staub verschwelt. In Niedrigstenergiegebäuden sind Vorlauftemperaturen die zu so hohen Oberflächentemperaturen führen unüblich.

5.1.2 Regelung

Eine Einzelraumregelung mit Thermostaten ist möglich. [TUGraz04] Heizkörper mit Thermostatventilen und mit grossem Wasserinhalt sind relativ träge und geben nach einer Sollwert-Reduktion immer noch während einer gewissen Zeit Wärme ab (verzögerte Reaktion auf ändernde Lasten). Dies wirkt sich negativ auf den Energiebedarf aus.

5.1.3 Leistung / Energie

Abhängig von der verfügbaren Radiatorfläche und der Vorlauftemperatur (Auslegung) ist eine relativ hohe Heizleistung verfügbar, meist auch mit entsprechenden Reserven für ein intensivierte Heizen während einer Aufheizphase. Zu beachten ist, dass reine Konvektoren bei einer Reduktion der Vorlauftemperaturen einen starken Leistungsabfall aufweisen [Schrod96] (konvektive Wärmeabgabe nimmt überproportional zur Temperatur ab).

Simulationen zeigen, dass der Heizwärmebedarf bei Flächenradiatoren gleichwertig ist wie der Heizwärmebedarf im gleichen Objekt mit der Luftheizung. [Feist597]

5.1.4 Fehlertoleranz

Aufgrund der meist einfach zu realisierenden Leistungsreserven haben Heizkörpersysteme eine relativ hohe Fehlertoleranz betreffend Dimensionierungsfehlern: Durch eine Korrektur der Heizkurve, bzw. ein Anheben der Vorlauftemperatur oder durch eine Erhöhung des Massenstromes kann fehlende Heizleistung kompensiert werden. Es ist aber zu beachten, dass bei einer starken Massenstromerhöhung Lärmbelastigungen auftreten können. [TUGraz04] Ein Anheben der Vorlauftemperatur führt – je nach Wärmeerzeugungsart – zu einer mehr oder weniger starken Verschlechterung der Effizienz.

5.2 Bauteilintegrierte Heizsysteme

Zu den bauteilintegrierten Heizsystemen gehören

- Fussbodenheizung
- Deckenheizung
- Bauteilaktivierung

Alle diese Systeme sind Flächenheizungen, d.h. es werden relativ grosse Flächen temperiert. Das führt dazu, dass die zur Wärmeabgabe und Deckung des Heizbedarfs benötigte Übertemperatur gegenüber dem Raum relativ gering ist. Die geringe Temperaturdifferenz zwischen Oberfläche und Raumlufttemperatur führt wiederum zu einem hohen Selbstregelungseffekt, d.h. schon bei relativ geringer Überhitzung des Raumes nimmt die Heizleistung stark ab, bzw. schon bei geringer Unterkühlung des Raumes ist ohne Veränderung der Vorlauftemperatur bereits eine relativ grosse Heizleistung verfügbar. Je näher die Bauteiltemperatur bei der gewünschten Raumtemperatur liegt, desto grösser ist der Selbstregelungseffekt.

Die drei erwähnten Systeme unterscheiden sich primär betreffend Verlegeort und Verlegetiefe der Wasser führenden Rohre und somit betreffend der thermisch aktivierten Gebäudemasse (Unterlagsboden, Decke, Betonplatte). Diese ist mitbestimmend für den Selbstregelungseffekt.

Im Wohnbau am weitesten verbreitet ist die Fussbodenheizung. Erste Fussbodenheizungen wurden bereits von den Römern verwendet (Hypokaustum). Etwa 700 n. Chr. sind Fussbodenheizungen auch bei den Koreanern zu finden ("Ondol"). Der große Durchbruch der Fussboden-

heizung hat sich in den letzten 25 Jahren rasant vollzogen. Wichtige Gründe dafür sind die hohe Behaglichkeit und die architektonische Freiheit bei der Raumgestaltung.

Bauteilaktivierungen sind im Wohnbau noch eher selten anzutreffen, können aber mit noch tieferen Vorlauftemperaturen betrieben werden als Fussbodenheizungen. Dies erhöht einerseits den Selbstregelungseffekt und bietet andererseits bei der Wärmeerzeugung mit Wärmepumpen grosse Effizienzvorteile (besseres COP). Bauteilaktivierungen haben die Eigenschaft, dass sie nach oben und nach unten Wärme abgeben. Eine Sollwerteingabe in einem Raum beeinflusst somit andere Räume. Dieser Effekt beschränkt den Einsatz primär auf Gebäude, wo in allen beheizten Geschossen gleiche Heizleistungen notwendig sind (somit im MFH-Bereich z.T. heikel).

Deckenheizungen geniessen historisch bedingt einen eher schlechten Ruf, da früher zum Heizen eines Raumes hohe Oberflächentemperaturen nötig waren, die zu einem Diskomfort führten (homogene Deckentemperaturen $> 30^{\circ}\text{C}$ empfindet der Mensch als unangenehm). Bei den Heizleistungen in einem Niedrigstenergiegebäude sind keine Oberflächentemperaturen über 30°C mehr nötig, und somit ist auch die Deckenheizung problemlos einsetzbar.

Die verschiedenen Varianten von Flächenheizungen weisen beim Niedrigstenergiegebäude nur noch geringfügige thermische Behaglichkeitsdifferenzen untereinander auf. [Richte03]

5.2.1 Temperatur

Fussbodenheizungen werden mit Vorlauftemperaturen im Bereich von maximal $30\text{-}40^{\circ}\text{C}$ betrieben, Bauteilaktivierungen liegen bei der Vorlauftemperatur nochmals deutlich tiefer ($26\text{-}32^{\circ}\text{C}$). Diese tiefen Vorlauftemperaturen führen auf Seite Wärmeerzeugung zu guten COP-Werten (falls diese mit einer Wärmepumpe erfolgt) und zu relativ geringen Verlusten bei der Wärmeverteilung.

Die Oberflächentemperaturen bei solchen Heizsystemen sind entsprechend tief. Gerade in Niedrigstenergiegebäuden, wo sehr oft gar keine Heizleistung nötig ist, liegt die Oberflächentemperatur meist beim Wert der Raumlufftemperatur oder nur um ein bis zwei Kelvin darüber. [TUGraz04] Somit kann nicht erwartet werden – was aber vom Nutzer vor allem bei einer Fussbodenheizung oft der Fall ist – dass mit einer Fussbodenheizung ein angenehm warmer Boden entsteht. [Mundt03] Die Empfindung „warmer Boden“ hängt zudem stark mit dem Bodenbelag zusammen. Bei Steinböden oder keramischen Böden sind Oberflächen über 30°C nötig, damit sie – barfuss betreten – als warm empfunden werden. So hohe Oberflächentemperaturen sind bei diesen Heizsystemen in Niedrigstenergiebauten nie vorhanden. Bei Parkettböden sind etwas tiefere Temperaturen nötig, damit barfuss der Boden als „warm“ empfunden wird, bei Teppichböden ist dies schon der Fall, wenn die Oberflächentemperatur der Raumlufftemperatur entspricht.

In MINERGIE-P[®]-Gebäuden oder in Passivhäusern entsteht mit einer Fussbodenheizung ein angenehmes Klima, weil durch die grosse temperierte Fläche ein ausgeglichenes Temperaturfeld auf sämtlichen den Raum umschliessenden Oberflächen entsteht, nicht aber weil ein ange-

nehm warmer Boden entsteht. Die verschiedenen Varianten von Flächenheizungen weisen beim Niedrigstenergiehaus nur noch geringfügige thermische Behaglichkeitsdifferenzen untereinander auf. Auch die Deckenheizung ist in diesem Bereich problemlos einsetzbar.

5.2.2 Regelung

Bauteilaktivierungen sind träge Systeme und arbeiten aufgrund der tiefen Systemtemperaturen – wie oben bereits erwähnt – stark mit dem Selbstregelungseffekt: Diese Systeme funktionieren weitgehend selbstregulierend, da sie mit Oberflächentemperaturen von ca. 25°C in warmen Räumen kaum, in kalten dagegen umso mehr Wärme abgeben.

Vor allem bei den nach oben und nach unten wirkenden Systemen (thermoaktive Bauteilsysteme) kann es Probleme mit der Raumtemperaturregelung geben [PHI05], da die Wärme in zwei Räume/Geschosse mit allenfalls unterschiedlichem Lastprofil abgegeben wird.

5.2.3 Leistung / Energie

Fussboden- oder Deckenheizungen sowie Bauteilaktivierungen haben ihre Leistungsgrenze bei rund 30-40 W/m². [TUGraz04] Höhere Leistungen sind nicht mehr möglich (ansonsten können die Behaglichkeitskriterien an die Oberflächentemperaturen nicht mehr erfüllt werden). Mit einem spezifischen Heizleistungsbedarf unter 10-15 W/m² liegt man bei Niedrigstenergiebauten jedoch weit von dieser Grenze entfernt.

Aufgrund der grossen Wärmeabgabeflächen, der resultierenden kleinen Vorlauftemperatur und der möglichen Einsparung eines Speichers (Gebäudemasse = Speicher) ist eine Kombination mit Wärmepumpen sinnvoll und nahe liegend. Die Wärmeerzeugung erfolgt dadurch relativ energieeffizient. Eine schwere Fussbodenheizung (mit grossen Wassermengen) kann sich negativ auf den Energiebedarf auswirken. Simulationen bestätigen die Tendenz von Fussbodenheizungen zu einem grösseren Energiebedarf. [Feist597]

5.2.4 Fehlertoleranz

Aufgrund der hohen Selbstregulierung und der grossen Leistungsreserve (durch Erhöhen der Vorlauftemperatur realisierbar) sind Bauteilsysteme betreffend der verfügbaren Heizleistung sehr tolerante Systeme. Fehler in der Dimensionierung oder ein falsches Nutzerverhalten wirken sich nicht signifikant auf die resultierende Behaglichkeit aus.

5.3 Punktwärmequelle

Eine Punktwärmequelle ist ein Zimmerofen der als Wärmequelle von einzelnen Räumen meist jedoch von ganzen Wohnungen genutzt wird. Die Bauformen reichen vom einfachen Holzspeicherofen bis zu Kamin- oder Kachelöfen. Es gibt neben der einfachen Punktquelle auch die Möglichkeit in entfernten Zonen Wärme über Satelliten abzugeben oder mit angebrachten Absorbieren / Wärmetauschern die Wärme über eine wassergeführte Heizung zu verteilen.

5.3.1 Betrieb

Typisch für Punktwärmequellen ist, dass sie meist von Hand beschickt werden und relativ hohe Leistungen (vor allem hohe Leistungsdichten) aufweisen. Durch das selbständige Bestücken des Ofens mit dem Energieträger (Holz, Pellets, etc.) hat der Nutzer einen sehr direkten Bezug zum Heizsystem – gleichzeitig wird die Regulierung der Heizleistung aber auch zu einem grossen Anteil vom Nutzer selbst bewerkstelligt und entsprechend beeinflusst (z.B. muss der Nutzer den Heizbedarf rechtzeitig abschätzen und entsprechend reagieren). Solche Systeme weisen nur eine bedingte Autonomie auf, d.h. sie können nur betrieben werden, wenn die Wohneinheit bewohnt ist (Ferienabwesenheit etc.).

5.3.2 Fehlertoleranz

Betreffend Leistung ist eine sehr grosse Reserve vorhanden, da Punktwärmequellen für Niedrigstenergiebauten im Allgemeinen überdimensioniert sind. Aufgrund der hohen Leistungsdichte können Räume mit Punktwärmequellen deshalb relativ schnell überhitzen, was sich wiederum negativ auf den Energieverbrauch auswirkt. Solche Übertemperaturen werden vom Nutzer jedoch nicht zwingend als unangenehm empfunden (und somit auch nicht zwingend immer „weggelüftet“).

5.4 Luftheizung

Im Wohnbau wird in den letzten Jahren vermehrt die Luftheizung als Wärmeabgabesystem gewählt, was sicher auch mit dem vermehrten Einsatz von Wohnungslüftungsgeräten und mit dem immer kleiner werdenden Heizleistungsbedarf zusammenhängt. Eine Luftheizung ist eine einfache Lüftungsanlage mit einer zusätzlichen Lufterwärmung zum Heizen. [SIA 2023] Die Wärme gelangt bei der Luftheizung direkt mit der Luft in die Räume, auf eine Wasser führende Heizverteilung kann verzichtet werden.

Bei einer Temperaturdifferenz zwischen Zuluft und Raumluft von 30 K können bei einem typischen, hygienisch bedingten Zuluftvolumenstrom von rund $1 \text{ m}^3/\text{m}^2\text{h}$ einem Raum die für ein Niedrigstenergiegebäude typischen $10 \text{ W}/\text{m}^2$ Heizleistung zugeführt werden. Dies zeigt, dass eine Luftheizung primär im Bereich der MINERGIE-P[®]- und Passivhäuser einsetzbar ist und dass schon bei MINERGIE[®]-Gebäuden die Heizleistung im reinen Frischluftbetrieb nicht mehr ausreicht.

Bei höherem Wärmeleistungsbedarf kann zwar mit einem Umluftsystem die Heizleistung erhöht werden, ohne dass die Zulufttemperatur oder der Aussenluftvolumenstrom erhöht werden müssen. Die Gefahr beim Umluftsystem ist aber, dass Raumbelastungen in der ganzen Wohnung verteilt werden. Deshalb ist von solchen Systemen eher abzuraten.

5.4.1 System

Wärmeerzeugung

Für die Wärmeerzeugung bei einer Luftheizung sind grundsätzlich alle bekannten Systeme denkbar. Die Wärme für den Nachwärmer muss auf einem sehr hohen Niveau bereitgestellt werden (ca. 50°C), was speziell für die Arbeitszahl der Wärmepumpen und den Wirkungsgrad solarthermische Wärmeerzeuger schlecht ist (vgl. Kapitel 4.3.4). Aber auch die Wirkungsgrade aller anderen Wärmeerzeuger verschlechtern sich bei steigender Systemtemperatur.

Wird mittels einer Wärmepumpe geheizt, ist ein Zwischenspeicher nötig bzw. zu empfehlen, damit ein Puffer zwischen Wärmeerzeugung und Wärmeabgabe vorhanden ist. Bei massiven Gebäuden mit Fussbodenheizung oder thermisch aktiviertem Bauteilsystem übernimmt die Gebäudemasse diese Speicherfunktion.

Wärmeverteilung

Wie erwähnt wird bei der Luftheizung die Wärme mit der ohnehin zu fördernden Frischluft den verschiedenen Räumen zugeführt. Deshalb ist die Luftheizung sehr direkt mit der kontrollierten Wohnungslüftung verknüpft. Bei der kontrollierten Wohnungslüftung wird im allgemeinen eine Kaskadenlüftung eingesetzt, d.h. die Frischluft wird primär in die Schlafzimmer gebracht, strömt in die Wohnräume über und wird via Küche und Nasszellen wieder abgesaugt. Wird das gleiche Prinzip auch für die Luftheizung verwendet, hat man relativ viel Wärme in den Schlafzimmern und die kleinste Wärmezufuhr in den Nasszellen – was den Behaglichkeitsansprüchen des Nutzers (kühle Schlafzimmer, warme Nasszellen) widerspricht. Dem Bad muss dann – z.B. über eine Zusatzheizung (Handtuchwärmer) oder über gezielte Wärmeverluste der Wärmeverteilung (siehe unten) – zusätzliche Wärme zugeführt werden.

Grundsätzlich ging man in den ersten Passivhäusern 1997 noch davon aus, dass eine Kaskadenlüftung auch für eine Luftheizung genüge [Feist697]. Es zeigt sich aber, dass bei der Luftheizung eine Kaskadenlüftung nicht funktioniert [Fraefel98] [Glück01]. Die Wärme muss zu jedem zu beheizenden Raum einzeln zugeführt werden (oder wenigstens ein zusätzlicher Auslass im Wohnzimmer).

Bei der Wärmeverteilung wird ein Teil der Wärme bereits über das Verteilnetz abgegeben. Aus diesem Grund sollen die Zuluftkanäle möglichst vollständig innerhalb des Dämmperimeters verlaufen, damit die unvermeidlichen Wärmeverluste im Gebäude bleiben. Ausserhalb des Dämmperimeters verlaufende Zuluftkanäle sind sehr gut zu dämmen. Die Wärmeverluste über das Zuluftkanalnetz können – solange sie innerhalb des Dämmperimeters erfolgen – durchaus auch ihre Vorteile haben (Kapitel 5.4.2).

Je grösser die Wärmeverluste über das Kanalnetz sind (auch wenn gewollt), desto kleiner ist die am „Bestimmungsort“ beim Lufteinlass noch verfügbare Wärme. In exponierten Räumen kann wegen der Wärmeabgabe des Zuluftkanals die benötigte Wärmeenergie unter Umständen nicht geliefert werden: Die Zulufttemperatur ist in diesen Räumen relativ tief, gerade diese Räume haben aber einen relativ hohen Heizleistungsbedarf.

Berechnungen zeigen, dass nach 5 m ungedämmtem Kanal bereits 1/3 des Wärmeinhalts des Zuluftstromes an den Beton abgegeben sind [Dorer03]. Ein Zentimeter Wärmedämmung kann die Verluste bereits um 50% reduzieren [Dorer03]. Im Extremfall kann die Zulufttemperatur unter die Raumlufttemperatur sinken, wenn der Luftkanal nahe oder ausserhalb des Wärmedämmperimeters geführt wird.

Der Wärmetransport zwischen verschiedenen Räumen findet je zu 50% über Konvektion (Luftbewegung) und Transmission statt. Bei offenen Türen und schlecht dämmenden Innenwänden findet so ein relativ schneller Temperaturengleich zwischen den einzelnen Räumen im Haus statt [Dorer03].

Volumenstrom

Es zeigt sich, dass ein Aussenluftvolumenstrom von 22 m³/h je Person ausreichend ist und nach [SIA2023] sogar im Winter um trockene Luft zu vermeiden auf 15 m³/h je Person reduziert werden kann. In der Übergangszeit sind 30 m³/h wegen der Feuchteabfuhr angebracht. [DIN1946-6] schreibt, dass 30 m³/h je Person bei einer Belegungsdichte von 30 m²/Person ein Luftwechsel von 1 m³/m²h entsteht.

Hohe Luftraten für die nötige Heizleistung und tiefe Luftraten zur Vermeidung zu trockener Raumluft können im MINERGIE-P®- oder Passivhaus – wenn überhaupt – nur knapp erfüllt werden [Dorer03]. Muss der Volumenstrom in der Heizsaison erhöht werden, so kann dies zu Schallproblemen führen und/oder die Kanäle müssen grösser dimensioniert werden – zudem nimmt der Energieverbrauch für die Luftförderung zu. Es wird aber explizit davor gewarnt, den Volumenstrom wegen der Heizfunktion über dem hygienisch notwendigen Wert anzusetzen, da die entfeuchtende Wirkung der Lüftung bei Aussenlufttemperaturen unter 0°C sehr stark zunimmt (siehe Abbildung 3), was zu unangenehmen Raumzuständen mit geringen relativen Luftfeuchten (unter 30% r.F.) führen würde (hoher Staubgehalt, elektrostatische Aufladungen, trockene Schleimhäute). So sollte die Bemessung des Volumenstromes für den hygienischen Luftwechsel (LW) mit dem LW für die Wärmeabgabe identisch sein. Es ist auch wichtig darauf zu achten, dass die Luftwechsel im Betrieb den geplanten Luftwechseln entsprechen. In untersuchten Passivhäusern sind die ausgeführten LW zwischen 2 und 10% grösser gegenüber den geplanten. [Frei04].

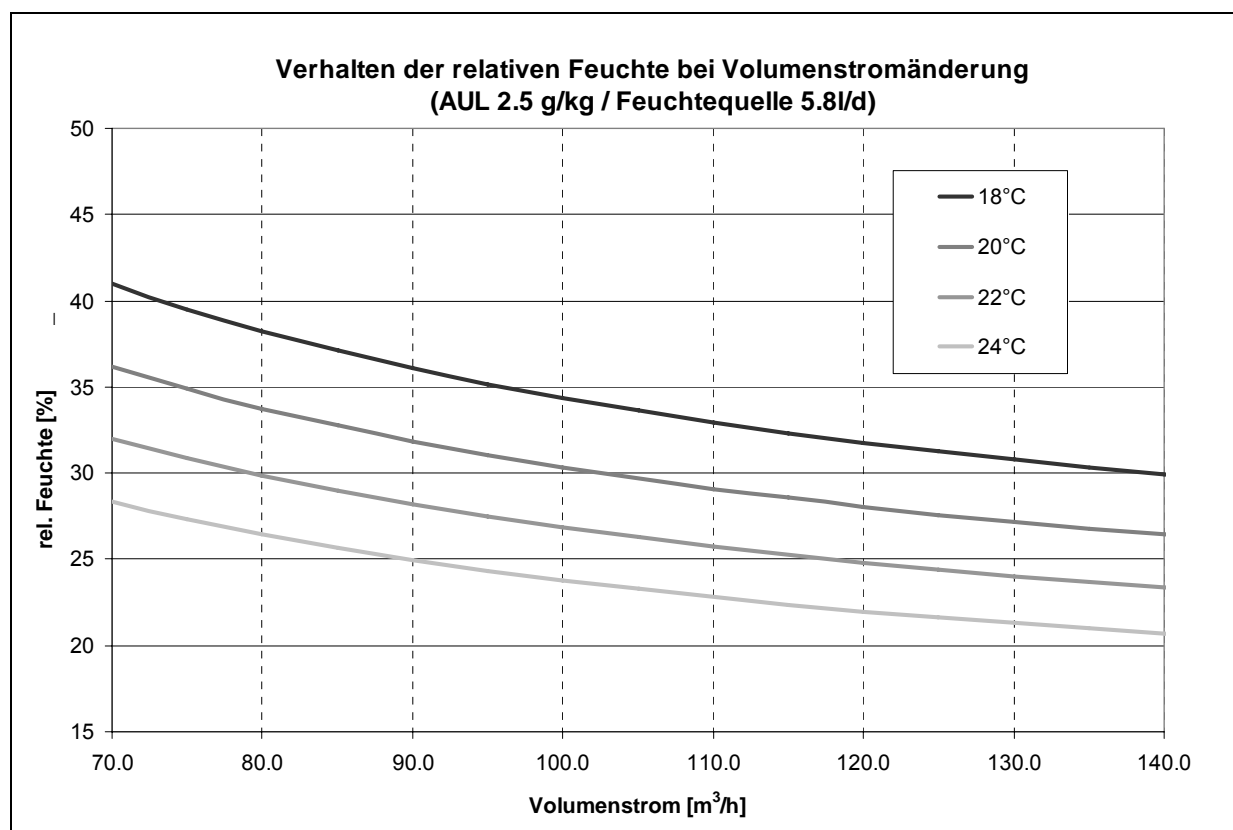


Abbildung 3: Verhalten der relativen Feuchte bei Volumenstromänderung.

5.4.2 Temperaturen

Generell wird in allen Räumen mit der gleichen Temperatur geheizt [TUGraz04]. Massgebend sind im Zusammenhang mit der Luftheizung zwei Temperaturen: Die Lufttemperatur unmittelbar nach dem Nachwärmer und die Zulufttemperatur am Auslass. Die Literaturangaben über maximale Temperaturen wegen der Staubversengung variieren sehr stark: Es sind Angaben von 50°C bis zu 130°C anzutreffen [Dorer03], wobei die meisten Quellen Temperaturen von 55°C bis 60°C angeben [TUGraz04] [Feist697] [Fraefel98]. Die in der Schweiz gültige [SIA2023] begrenzt die Zulufttemperatur beim Lufftherhitzer auf 50°C und beim Raumeintritt auf 40°C. Die Zulufttemperatur, bei welcher die Luft noch als „frisch“ im Sinne von sauber empfunden wird, liegt bei 32 °C [Feist697].

Die Auswirkungen auf die Effizienz der Wärmeerzeugung bei hohen Systemtemperaturen sind weiter vorne bereits beschrieben (Kapitel 5.4.1).

5.4.3 Regelung

Die Luftheizung ist sehr träge beim Aufheizen des Gebäudes, da sie in Niedrigstenergiegebäuden über eine entsprechend begrenzte Leistung verfügt. Bei massiven Bauten tritt dieses Phänomen besonders in Erscheinung. Der als flink eingestuftem Luftheizung wird durch eine hohe Gebäudemasse eine rasche Temperatur-Regulierung erschwert [Glück01]. Hinzu kommt, dass bei wenig gedämmten Zuluftkanälen die Zulufttemperatur auch wesentlich langsamer reagiert, als von einer Luftheizung erwartet wird [Dorer03]. Bei Leichtbauten und gut gedämmten Kanälen ist die Luftheizung tatsächlich flink, da die Heizleistung direkt der Raumluft zugeführt wird.

Viele Regelungen messen die Lufttemperatur in einem Referenzraum. Eine ausreichende Raumlufttemperatur ist schnell erreicht, jedoch ist die Gebäudestruktur (strahlende Oberflächen) noch nicht aufgewärmt. Die häufig gemessene Lufttemperatur entspricht nicht der empfundenen Temperatur, wodurch die Luftheizung den Heizbetrieb zu früh unterbricht [Glück01] (während bei Flächenheizungen der Heizbetrieb eher zu spät unterbrochen wird). Korrekterweise müsste man die Globetemperatur messen, um diese Abweichungen zu minimieren.

Gemäss MuKE n muss bei Vorlauftemperaturen über 30°C eine Einzelraumregulierung vorgesehen werden. Da bei einer Luftheizung die Vorlauftemperatur deutlich über diesen 30°C liegt, ist somit pro Raum ein Zuluftauslass mit Volumenstromregler vorzusehen. In der Praxis wird dies selten bis nie ausgeführt und es ist – bei genügendem Luftaustausch innerhalb des Objektes primär über die Türen – für ein behagliches Raumklima auch nicht zwingend nötig. Trotzdem muss für Objekte mit Luftheizung und ohne Einzelraumregulierung beim Kanton eine Ausnahmebewilligung beantragt werden.

5.4.4 Leistung / Energie

Luft hat bekanntlich eine um etwa 3400-mal tiefere Wärmekapazität als Wasser. Dies bedeutet, dass für die gleiche Heizleistung ein entsprechend grösserer Massen- bzw. Volumenstrom nötig ist. Die Empfehlung des Passivhaus-Instituts (PHI) liegt bei einer maximalen Heizlast von 10 W/m². Bei Minergie-P darf diese maximale Heizlast von 10 W/m² nicht überschritten werden. Für den Normalbetrieb eines Niedrigstenergiehauses mag diese Leistung genügen. Sobald aber grössere Leistungen nötig werden (z.B. bei einem offen gelassenen Fenster oder für eine Schnellaufheizung nach den Ferien) ist keine Leistungsreserve mehr vorhanden, um in solchen Ausnahmesituationen genügend Heizleistung zur Verfügung zu haben. Eine fehlerhafte Auslegung der Heizlast oder im Laufe des Betriebes sich verändernde Bedingungen (z.B. Abnahme der internen / externen Wärmegewinne) können später nicht mehr durch den bestehenden Wärmeerzeuger ausgeglichen werden [PHTag03]. Dies ist bei der Systemwahl „Luftheizung“ zu berücksichtigen.

Simulationen haben ergeben, dass der Energiebedarf bei einer Luftheizung leicht tiefer ist als bei einer Fussbodenheizung, aber ungefähr gleich wie bei Flächenradiatoren [Feist597]. Eine andere Untersuchung zeigt, dass eine Kombination von Luftheizung und Flächenheizung einen grossen Energiebedarf zur Folge hat [PHI05].

Soll bei einer Luftheizung die empfundene Temperatur im Raum um 1 K erhöht werden, so ist die Raumlufftemperatur um gegen 2 K zu erhöhen (bei gleich bleibender Oberflächentemperatur der den Raum umschliessenden Flächen). Damit nehmen die Lüftungs- und Transmissionsverluste um rund 10% zu. Bei einer Flächenheizung muss zur Erhöhung der empfundenen Temperatur um 1 K die Raumlufftemperatur ebenfalls nur um rund 1 K angehoben werden, was zu einer Erhöhung Lüftungs- und Transmissionsverluste von lediglich 5% führt.

5.4.5 Thermische Behaglichkeit

Bei der Luftheizung ist die mittlere Strahlungstemperatur der umschliessenden Flächen tendenziell tiefer als bei Flächenheizungen, Punktwärmequellen oder Heizkörpern. Dies führt dazu, dass zur Erzielung der gleichen Raumtemperatur eine höhere Raumlufftemperatur nötig ist. Dies führt wiederum dazu, dass die relative Luftfeuchtigkeit etwas geringer wird

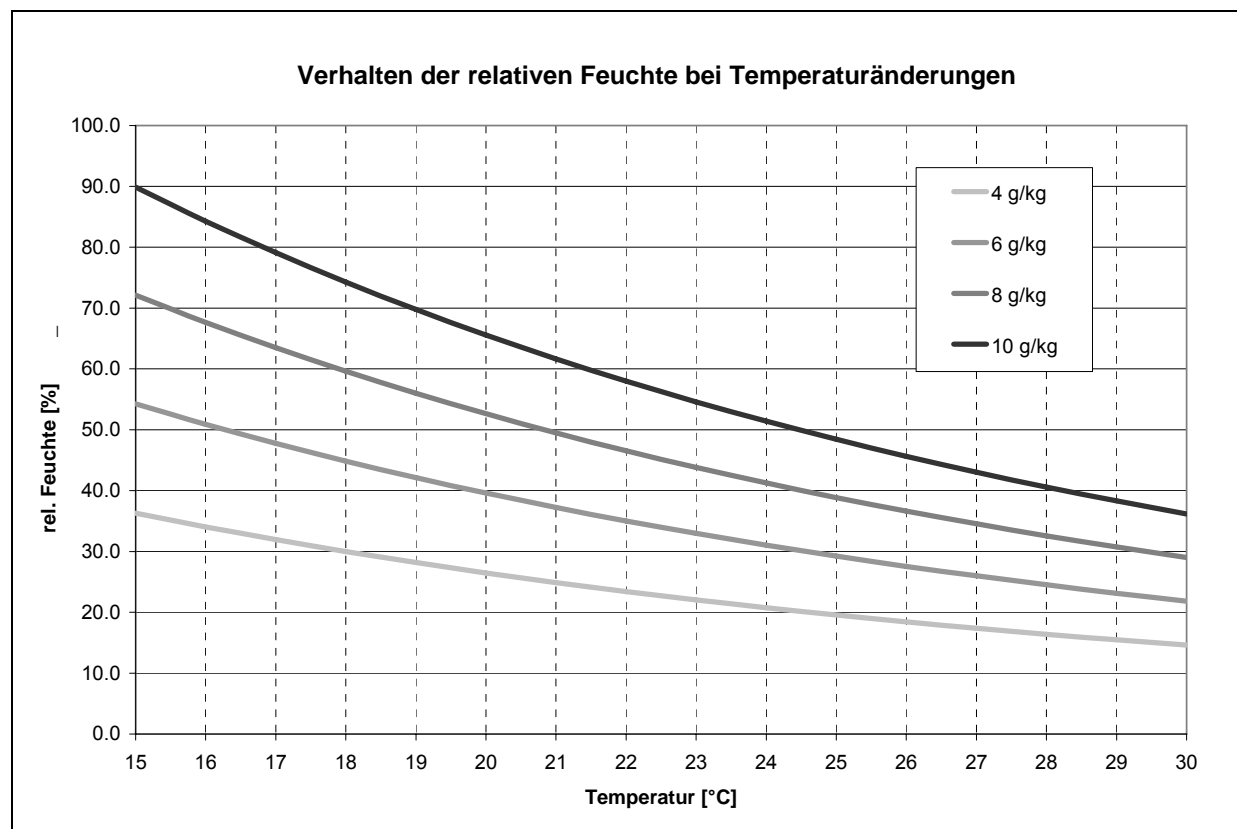


Abbildung 4: Verhalten der relativen Feuchte bei Temperaturänderung.

Die Grenzwerte für die Zulufttemperatur betragen ca. 16°C respektive 50°C um Diskomfort zu vermeiden [Dorer03]. Die in der Schweiz gültige [SIA2023] begrenzt die Zulufttemperatur sogar bei 40°C.

Die Lufttemperatur ist im idealen geschlossenen Raum ohne Belegung und ohne interne Lasten nicht homogen [Glück01]. Im realen Zustand findet aber aufgrund der verschiedenen thermischen Lasten und aufgrund von Personenbewegungen eine Luftdurchmischung statt. Tendenziell ist aber – vor allem bei einer Luftheizung – eine Temperaturschichtung zu erwarten, die durch die Platzierung von Luftaus- und Lufteinlass noch verstärkt werden kann [Schrod96].

Grundsätzlich ist der Luftauslass möglichst nicht im Bereich von Aufenthaltszonen zu platzieren, da direkt beim Luftauslass sonst Zugerscheinungen entstehen können und dort vor allem auch die Lufttemperatur lokal höher.

5.4.6 Schall

Die Schallproblematik einer Luftheizung muss sehr früh in der Planungsphase beachtet werden. Sie unterscheidet sich prinzipiell nicht von der einer kontrollierten Wohnungslüftung ohne Nachwärmer, da die Luftheizung mit dem hygienisch erforderlichen LW dimensioniert werden soll. Bei der Luftheizung kann es höchstens dadurch zu zusätzlichen Schallproblemen kommen, weil mehr Räume eine Zuluftzuführung haben. Somit ist die Gefahr von Telefonie-Erscheinungen zwischen zwei benachbarten Räumen grösser. In der Schweiz werden aber die einzelnen Räume meist von einem zentralen Verteiler aus versorgt und dies minimiert das Problem von Telefonie-Geräuschübertragung.

Bei sachgemässer Planung und Ausführung kann davon ausgegangen werden, dass bei einer Luftheizung keine Schallprobleme auftreten [TUGraz04]. Falls aber durch die Lüftungsanlage Lärmbelästigungen auftreten muss davon ausgegangen werden, dass diese bei einer Luftheizung öfters auftreten als bei einer reinen Lüftung, da die durchschnittliche Lüftungsstufe bei der Luftheizung übers Jahr gesehen höher ist als bei der reinen Lüftung (hygienische oder thermische Anforderung definiert die Lüftungsstufe).

5.4.7 Fehlertoleranz

Planungsfehler wirken sich sehr rasch negativ aus [TUGraz04]. Ein Fehler in der Leistungsbeziehung (z.B. aufgrund falscher Annahmen zur Nutzung / Belegung) kann kaum mehr durch das System selber korrigiert werden und kann dann meist nur noch via elektrische Zusatzheizung kompensiert werden. Wurde ein konventioneller Wärmeerzeuger ins System eingebunden, wird häufig die Heizkurve zur Korrektur des Planungsfehlers angehoben. Planungs- oder Ausführungsfehler, die zu akustischen Problemen führen können bestenfalls nur noch mit baulichen Massnahmen behoben werden. Auch bei Zugerscheinungen (zum Beispiel bei den Luftauslässen) helfen meist nur noch bauliche Massnahmen.

Relevante Aspekte einfacher Lüftungsanlagen sind auch bei einer Luftheizung (einfache Lüftungsanlage mit Lufterwärmung) zu berücksichtigen. Spezielle Punkte bei der Planung oder Ausführung hervorgerufen durch eine Luftheizung sind im Kapitel 8 zusammengefasst.

5.4.8 Kosten

Kostenvergleiche sind immer sehr heikel, da für solche Vergleiche eine sehr saubere Systemabgrenzung gemacht werden muss und die effektiv entstandenen Kosten jeweils noch von vielen, nicht beeinflussbaren Faktoren abhängen (Konjunktur, Marktsituation etc.). Trotzdem sollen hier einige Aussagen zum Thema Kosten gemacht werden, auch wenn diese immer mit der nötigen Vorsicht zu geniessen sind.

Einer der Grundgedanken der Luftheizung im Niedrigstenergiehaus ist die Mitbenützung der Luftkanäle für die Heizung, was die Installation einer separaten Wärmeverteilung erspart [Fraefel98]. Die Idee, dass ein Luftheizungssystem zwar mehr als eine normale Heizung aber weniger als eine getrennte Heizung und Lüftung (KWL) kostet, stand im Vordergrund [Feist99].

Diese Überlegung soll anhand einer groben Abschätzung für aktuelle Zahlen aus der Schweiz verglichen werden: Vergleicht man eine Luftheizung mit einer Fussbodenheizung (inkl. KWL) so entstehen durch die Fussbodenheizung Mehrkosten von rund 30 – 40 Fr./m², was bei einer Wohneinheit von 120 m² rund Fr. 5'000.- ergibt. Bei der Luftheizung entstehen gegenüber der reinen Lüftungsanlage Mehrkosten für den Nacherwärmer von rund Fr. 3'000.- bis 5'000.-. Somit liegt die Preisdifferenz im Bereich von Fr. 0.- bis 2'000.-. [Diese Zahlen basieren auf Angaben eines Ingenieurbüros aus der Schweiz und stimmen mit den Angaben aus den geführten Interviews (siehe Kapitel 7.1) gut überein.] Werden – wie es ohne Ausnahmegewilligung des Kantons gesetzlich vorgeschrieben ist – in allen Räumen Volumenstromregler eingebaut, reduziert sich die Preisdifferenz nochmals deutlich, bzw. die Luftheizung führt sogar zu Mehrkosten.

Dass der vermutete Kostensprung dank des Verzichtes auf eine eigenständige Wärmeverteilung nicht so gross ist wie vermutet zeigt auch eine Studie aus Deutschland [Feist99]. Hier handelt es sich um einen Kostenvergleich bei 20 bzw. 32 Anlagen, wo eine Luftheizung (mit zentraler Zuluftnacherwärmung) mit einer kontrollierter Wohnungslüftung und Heizkörpern verglichen wird. Die Wärmeverteilung über Luft ist in den analysierten Objekten mit DM 12'000.- nur geringfügig günstiger als die Variante mit den Heizkörpern welche DM 13'600.- kostet. Die Wärmeerzeugung ist in diesem Vergleich nicht enthalten, da hier bei beiden Varianten die praktisch gleichen Investitionskosten entstehen.

Auch aus den Interviews (siehe Kapitel 7.1) geht hervor, dass eine gut geplante und seriös ausgeführte Luftheizung bei den Investitionen kaum zu Kosteneinsparungen führen wird.

Bei den Betriebskosten (Energie) ist zu beachten, dass das zusätzliche Heizregister zu einem leicht höheren Druckverlust der ganzen Lüftungsanlage führt. Bei 120 m³/h kann in etwa mit folgenden Druckverlusten gerechnet werden:

- Filter: 15 Pa
- Nachheizregister: 10 Pa
- Zu- und Abluftelemente: 30 Pa
- Kanalnetz: 25 Pa

Somit ergibt sich für den zusätzlichen Nachwärmer eine zusätzliche elektrische Leistung von ca. 10 bis 15% [PHTag99]. Für Wartung und Unterhalt sind bei einer Luftheizung keine signifikanten Unterschiede zu einem anderen System zu erwarten.

5.5 Systemvergleich

Aufgrund der in den Kapiteln 5.1 bis 5.3 beschriebenen Systemen und ihren Eigenschaften wird im Folgenden ein Systemvergleich der wichtigsten Kriterien gemacht. Dies hilft, die Vor- und Nachteile der einzelnen Systeme klarer zu umreissen.

Wo möglich basiert der Vergleich auf konkreten Werten und Fakten. In diversen Punkten bleibt der Vergleich aber rein qualitativ und z.T. auch subjektiv, da aufgrund der Tatsache, dass das Gebäude und das Gebäudetechnikkonzept einen grossen Einfluss auf die Eigenschaften des Systems selber haben, eine quantitative Beurteilung nicht möglich ist.

Im Weiteren werden für den Vergleich folgende Annahmen getroffen:

- Die Wärmeverteilsysteme werden in MINERGIE-P®- bzw. Passivhäuser eingesetzt.
- Alle Wärmeverteilsysteme sind ergänzend zu einer einfachen Lüftungsanlage.

Verglichen werden nach wie vor die Systeme Luftheizung, Heizkörper, bauteilintegrierte Heizsysteme und Punktwärmequelle.

Dunkelgrau hinterlegte Felder bedeuten sinngemäss: heikel, kritisch, grosse Vorsicht; **hellgrau** hinterlegte Felder bedeuten sinngemäss: nicht optimal, Vorsicht angebracht. Diese Bewertung ist subjektiv und deshalb als Tendenz zu verstehen ohne Anspruch auf absolute Präzision.

	Kriterium	Luftheizung	Heizkörper	Fussb-, Decken- / Bauteilheizung	Punktwärmequelle
System	Wärmeerzeugung	Alle Systeme möglich, COP bei WP relativ schlecht (siehe Kapitel 4.3.4)	Alle Systeme möglich, COP bei WP mittelmässig	Alle Systeme möglich, COP bei WP gut bis sehr gut	Wärmeerzeugung integriert, nicht wählbar
	Wärmeverteilung	Kein zusätzlicher Platzbedarf; Risiko von Undichtheiten; Wärmeverluste aufgrund hoher Medientemperaturen und grosser Kanaloberflächen relativ hoch; evt. aber gewollt.	Geringer Platzbedarf für Wasserleitungen, relativ hohe Vorlauftemperaturen, aber hohe Energiedichte und somit geringe Oberfläche der Leitungen (Wärmeverluste!)	Geringer Platzbedarf für Wasserleitungen, tiefe Vorlauftemperaturen und somit geringe Verluste	Keine; Wärmeabgabe direkt in einen Raum
	Wärmeabgabe	100% Konvektion, beim Lufteinlass lokal warme, trockene Luft möglich (tiefes ϕ), Lufteinläs-	Heizkörper mit gewissem Platzbedarf, Positionierung mehr oder weniger egal, kleiner Einfluss auf	Primär über Strahlung im Niedertemperaturbereich, System nicht sichtbar, kein Einfluss auf	Primär über Strahlung, hohe Temperaturen, Wärmeabgabe nur in den Raum mit der Wärmequelle

	Kriterium	Luftheizung	Heizkörper	Fussb., Decken- / Bauteilheizung	Punktwärmequelle
		se sind richtig zu positionieren, geringer Einfluss auf Möbelierungsfreiheit	Möbelierungsfreiheit lokal hohe Strahlungstemperaturen möglich	Möbelierungsfreiheit	
	Kombination mit kontrollierter Wohnungslüftung	Problemlos, es ist darauf zu achten, dass der Luftwechsel nicht für die Heizung erhöht wird	Problemlos	Problemlos	Problemlos
Bauliches	Bauliche Anforderungen	Evt. grössere Deckenstärke durch zusätzliche Dämmung der Lüftungskanäle	Keine	Evt. grössere Deckenstärke bei Tabs, eher kein Teppich als Bodenbelag	Keine Steigzonen nötig; keine Unterzüge oder hohe Türstürze, da sonst Warmluftzirkulation beeinträchtigt
	Installation Wärmeverteilung	Kein zusätzlicher Platzbedarf	Kleiner Platzbedarf	Kleiner Platzbedarf	Keine Wärmeverteilung
Regelung	Regelung, thermische Speichermasse	Keine ausgeprägte Nutzung der thermischen Speichermasse; kein Selbstregel-effekt; flinkes System da hoher konvektiver Anteil, Einzelraumregelung möglich aber aufwändig (und nicht Standard, obwohl gesetzlich vorgeschrieben)	Keine ausgeprägte Nutzung der thermischen Speichermasse, kein Selbstregel-effekt; relativ flinkes System, Strahlung / Konvektion gemischt, Einzelraumregelung einfach möglich	Mittlere bis hohe Nutzung der thermischen Masse, hoher Selbstregel-effekt, an und für sich träges System (wird aber durch Selbstregel-effekt kompensiert), Einzelraumregelung erschwert	Kaum Nutzung der thermischen Speichermasse des Gebäudes, Regelung sehr schwierig
Komfort	Komfort und Behaglichkeit	Im Auslegefall hohe Zulufttemperaturen; Raumlufttemperatur aufgrund der fehlenden Strahlungsflächen tendenziell höher als bei den anderen Systemen, daher etwas trockenere Luft (re.F.)	Hohe Behaglichkeit, lokal sind Strahlungsasymmetrien möglich	Sehr hohe Behaglichkeit als Folge ausgeglichener Oberflächentemperaturen	Hohe Strahlungsasymmetrien, grosse Temperaturunterschiede zwischen den einzelnen Räumen, Gefahr der Überhitzung

	Kriterium	Luftheizung	Heizkörper	Fussb., Decken- / Bauteilheizung	Punktwärmequelle
Leistung und Betrieb	Leistung	In Niedrigstenergiebauten ausreichend, aber keine Reserven vorhanden, exponierte Zonen evt. kritisch; Bad kritisch / Zusatzheizung nötig	Bei richtiger Dimensionierung unkritisch, Reserven vorhanden	Bei richtiger Dimensionierung unkritisch, Reserven vorhanden	Leistungsdichte lokal eher zu hoch, Gefahr der Überhitzung
	Energiebedarf	Flinkes System, daher Energiebedarf im normalen Rahmen	Flinkes System, daher Energiebedarf im normalen Rahmen, allenfalls Mehrbedarf wenn erhöhte Transmissionsverluste infolge Heizkörper an Aussenwand	Selbstregeleffekt ist flink, daher Energiebedarf im normalen Rahmen (oder tendenziell leicht höher, bei temporärer Überhitzung um ein paar K)	Schwierig zu regulieren, grosse Überhitzungsgefahr, Mehrbedarf zu erwarten
	Betrieb, Wartung + Unterhalt	Kein Aufwand	Kein Aufwand	Kein Aufwand	Grosser Aufwand, korrekte Bedienung z.T. anspruchsvoll
Fehlertoleranz	Fehlertoleranz Dimensionierung, andere Nutzung	Gering, keine Reserven vorhanden	Gross	Gross	Mittel, Wärmeverteilprobleme sind kaum lösbar
	Fehlertoleranz Betrieb	Betreffend Temperaturverteilung im Gebäude fraglich (offene Türen...)	Mittel, über Thermostatventil schnell korrigierbar	Hoch, da hoher Selbstregelungseffekt	Gering, Fehler in Bedienung führt schnell zu Überhitzung
Aufwand	Planungsaufwand	Hoch	Gering	Gering	Mittel
	Investitionskosten (ohne Planung)	Tief (bei Verzicht auf Einzelraumregulierung)	Mittel	Mittel	Mittel

Tabelle 2: Vergleich verschiedener Heizsysteme

6 Theoretische Überlegungen / Nomogramm

6.1 Normen, Merkblätter

Durch das Normenwesen wird der heutige Stand der Technik festgehalten. Diverse Systemparameter sind so definiert oder empfohlen. Die folgende Auflistung ist ein Überblick über die wichtigsten Parameter, welche einen Bezug zur Luftheizung haben.

Parameter	Grenze	Literatur
Lufttemperatur nach Heizregister	max. 50°C	SIA 2023
Lufttemperatur am Auslass	max. 40°C	SIA 2023
Raumlufttemperatur	Wohnen 20°C WC 18°C Bad/Dusche 22°C	SIA 384.201 (SN EN 12831)
Minimaler Aussenluft-Volumenstrom	22-36m ³ /(h * Person)	SIA 2023
Minimaler Zuluft-Volumenstrom	30m ³ /(h * Zimmer)	SIA 2023
Minimaler Abluft-Volumenstrom	Küche 40 m ³ /h Bad/Dusche 40 m ³ /h WC (ohne Du) 20 m ³ /h Reduktion: <3Zi-Whg -30%	SIA 2023
Feuchtegehalt der Raumluft	Winter min. 30% Sommer max. 60% r.F.	SIA 382/1
Befeuchtung der Zuluft	Vermeiden	SIA 2023

6.2 Volumenstromermittlung / Nomogramm

Bei konzeptionellen Überlegungen sind Faustformeln immer ein willkommenes Hilfsmittel. Der Einsatz einer Luftheizung ist anhand des benötigten Volumenstromes zu beurteilen. Will man den Volumenströmen genügend Beachtung schenken, so müssen diese berechnet werden. Eine visuelle Darstellungsmöglichkeit der Volumenstromberechnung ist das Nomogramm. In einem Nomogramm werden mehrere Diagramme bewusst in Abhängigkeit zueinander dargestellt. Folgend werden alle Volumenstromdiagramme erläutert.

6.2.1 Nomogramm: Volumenstrom anhand der Wärmeleistung

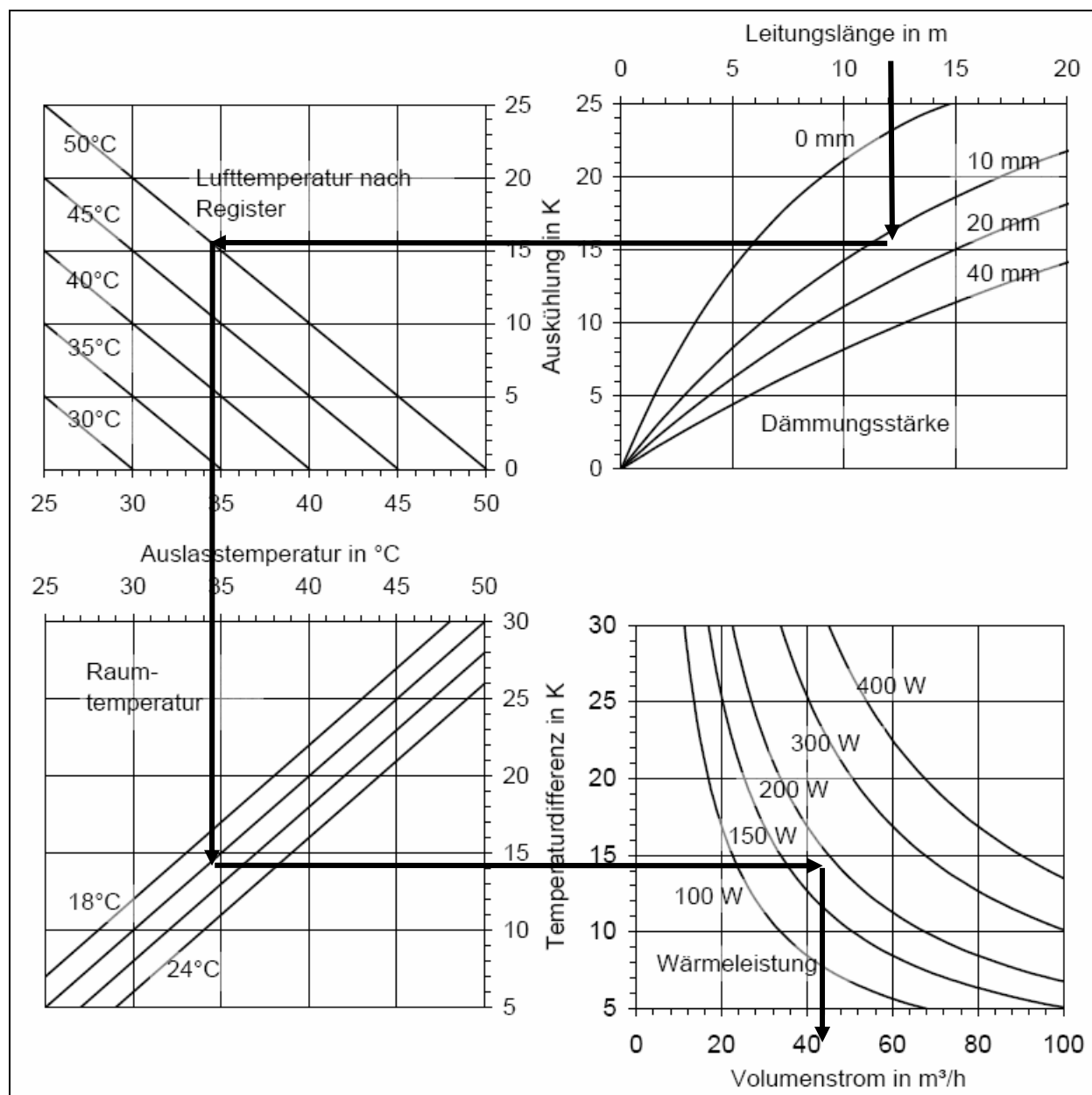


Abbildung 5: Nomogramm für die Ermittlung des Volumenstroms anhand der Wärmeleistung. Die Systemgrenze für die Betrachtung dieses Nomogramms ist ein Raum. Die Verluste der Wärmeverteilung wurden nicht dem Raum zugerechnet.

Ablesebeispiel Abbildung 5:

12m Rohre mit einer Dämmung von 10mm haben 15K Temperaturverlust zu Folge. Mit einer Lufttemperatur nach dem Erhitzer von 50°C resultiert somit beim Auslass in den Raum eine Zulufttemperatur von 35°C. Bei einer Raumlufttemperatur von 20°C bleiben somit noch 15K für die Wärmezufuhr in den Raum zur Verfügung. Bei einem Heizleistungsbedarf für den Raum von 180W wird schlussendlich ein Volumenstrom von 44m³/h benötigt.

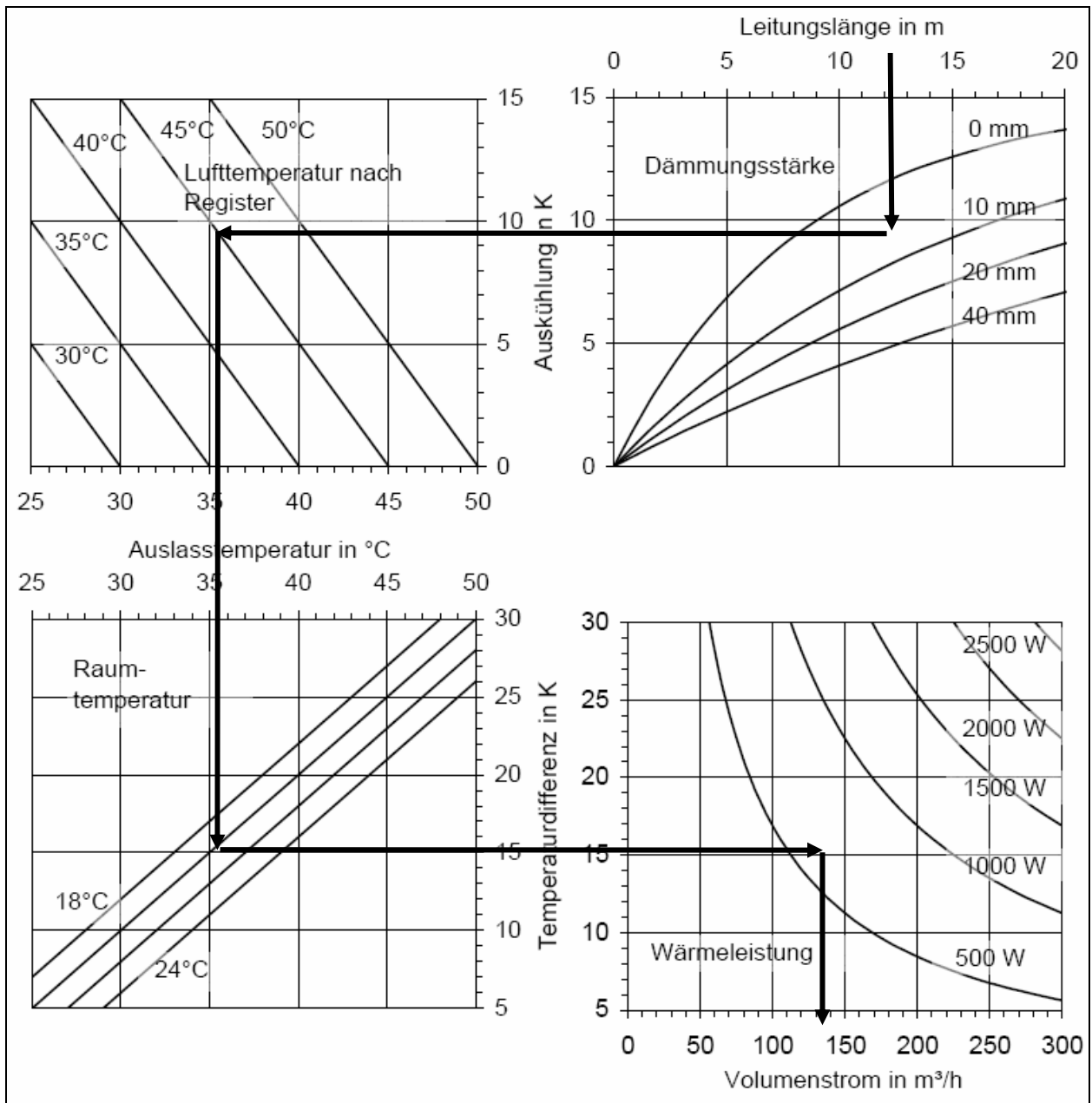


Abbildung 6: Nomogramm für die Ermittlung des Volumenstroms anhand der Wärmeleistung. Die Systemgrenze für die Betrachtung dieses Nomogramms ist eine Wohneinheit. Die Verluste der Wärmeverteilung wurden zu 50% als Nutzenergie der Wohneinheit eingerechnet.

Ablesebeispiel Abbildung 6:

12.5m Rohre mit einer Dämmung von 6mm haben 10K Temperaturverlust zu Folge. Mit einer Lufttemperatur nach dem Erhitzer von 45°C resultiert somit beim Auslass in den Raum eine Zulufttemperatur von 36°C. Bei einer Raumlufthtemperatur von 20°C bleiben somit noch 15K für die Wärmezufuhr in den Raum zur Verfügung. Bei einem Heizleistungsbedarf für die Wohneinheit von ca 650W wird schlussendlich ein Volumenstrom von etwa 135m³/h benötigt.

6.2.2 Grundlagen Nomogramm: Volumenstrom anhand der Wärmeleistung

Beim den Nomogrammen „Volumenstrom anhand der Wärmeleistung“ wurden die Formeln 1 bis 7 (siehe Anhang 1.1) verwendet. Bei der Betrachtungsgrenze Wohneinheit (Abbildung 6) wurden die Wärmeverluste der Wärmeverteilung nur zu 50% als Verlust berücksichtigt. D.h. die andere Hälfte der Verluste wird der betrachteten Wohnung unkontrolliert als Nutzenergie zugeführt. Bei der Betrachtungsgrenze Raum (Abbildung 5) wurde vom schlechtesten Fall ausgegangen und somit die Wärmeverluste der Wärmeverteilung zu 100% als Verlust betrachtet.

6.2.3 Nomogramm: Volumenstrom anhand des Feuchtegehalts der Luft

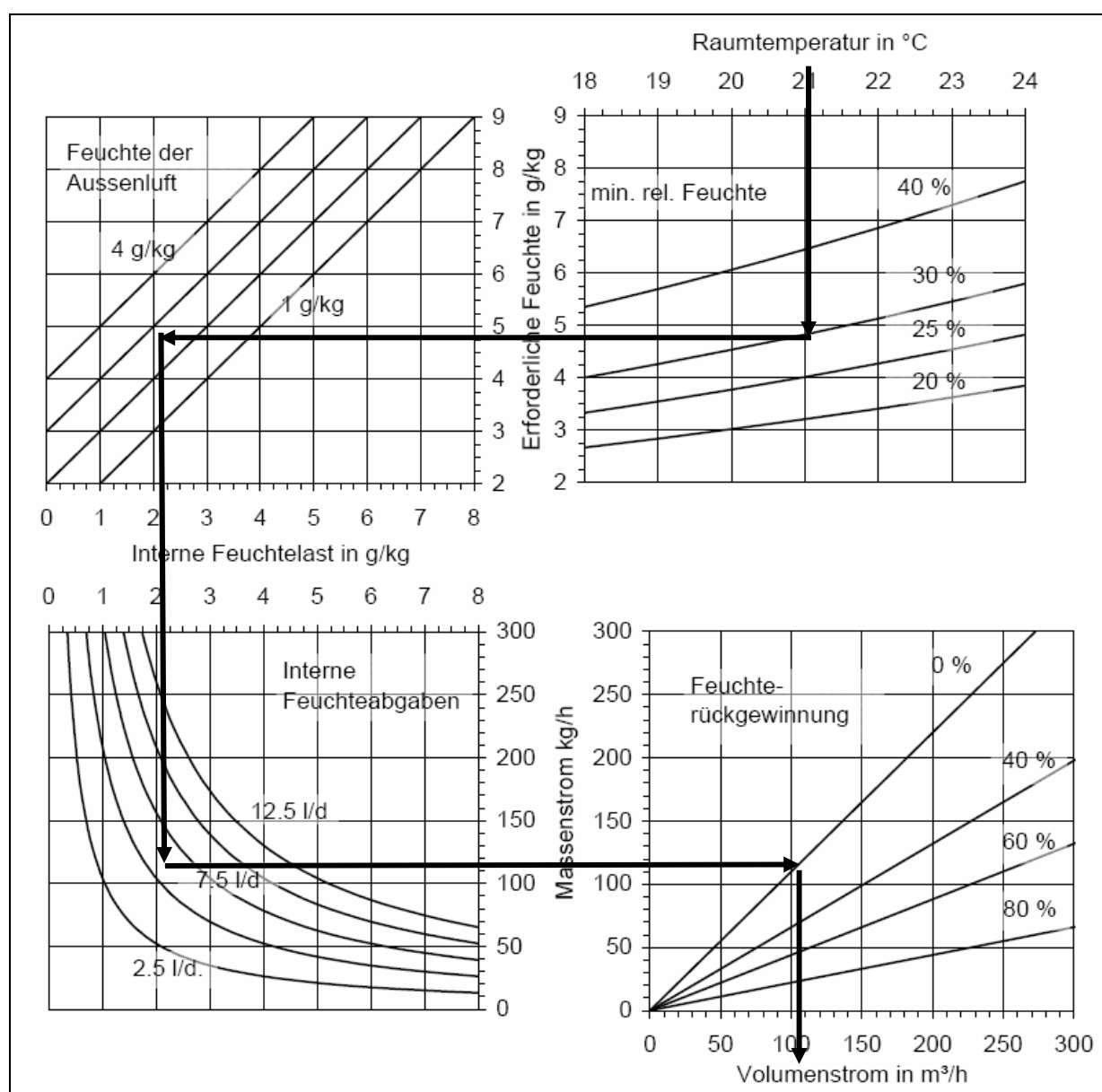


Abbildung 7: Nomogramm für die Ermittlung des Volumenstroms anhand des minimalen Feuchtegehalts der Raumluft. Die Systemgrenze für die Betrachtung dieses Nomogramms ist eine Wohneinheit.

Ablesebeispiel Abbildung 7:

Die Raumluft benötigt bei einer Temperatur von 21°C und einer relativen Feuchte von 30% 4.8g Wasser für 1kg Luft. Bei einem Aussenluft-Feuchtegehalt von 2.57g/kg (<95% Luzern, Tabelle 4) resultiert für die definierte Raumluft eine benötigte Interne Feuchtelast von ca 2.1g/kg. In einem 3-Personen-Haushalt (5.5l/d, Tabelle 3) ohne Wärmerückgewinnung resultiert schlussendlich ein maximaler Volumenstrom von ungefähr 105m³/h.

6.2.4 Grundlagen Nomogramm: Volumenstrom anhand des Feuchtegehalts

Beim den Nomogrammen „Volumenstrom anhand der Wärmeleistung“ wurden die Formeln 8 bis 14 (siehe Anhang 1.2) verwendet.

6.2.5 Hilfsmittel Nomogramm: Volumenstrom anhand des Feuchtegehalts

Die Schwierigkeit bei der Anwendung des „Nomogramms: Volumenstrom anhand des Feuchtegehalts“ liegt bei der zu wählenden Feuchtelast in der Wohneinheit und Aussenfeuchte. Als Hilfsmittel wurden die Tabellen 3 und 4 erstellt.

Feuchtelast in einem	
3 Personenhaushalt:	
Personen	2.5 l/d
Pflanzen	0.7 l/d
Küche	0.8 l/d
Bad	0.8 l/d
Sonstiges	0.7 l/d

Tabelle 3: Feuchtelast einer Wohneinheit mit drei Personen

Aussenfeuchten			
[zu xx% des Jahres werden yy g/kg übersteigen]:			
	m.ü.M.	95%	99%
Basel	316	2.56	1.52
Bern	565	2.39	1.51
Chur	555	1.96	1.21
Davos	1590	1.24	0.75
Genf	420	2.45	1.66
Lugano	273	2.35	1.58
Luzern	456	2.57	1.64
Sion	482	2.22	1.58
St. Gallen	779	2.12	1.36
St. Moritz-Samedan	1709	0.87	0.34
Zürich	436	2.33	1.47

Tabelle 4: Aussenfeuchten je Messstation und Anteil pro Jahr

Die Grundlagen der Tabelle 3 wurden aus [Hartma01] zusammengefasst. Die Rohdaten der Tabelle 4 wurde mit dem Programm Meteo Norm 5.1 generiert und sind anschliessend ausgewertet worden.

7 Interviews

7.1 Fachplaner

7.1.1 Ausgangslage

Es wurden ausschliesslich Fachplaner befragt, welche selber schon Objekte mit Luftheizungen realisiert haben oder mindestens beteiligt waren. Sämtliche befragten Personen haben sowohl positive wie auch negative Erfahrungen mit Luftheizungen gemacht. Die detaillierten Antworten sind im Anhang beigelegt. Hier wird eine grobe Zusammenfassung der Antworten dokumentiert.

Die Aussagen werden hier sinngemäss und ohne Wertung seitens der Autoren dieser Studie dokumentiert. Eine Wertung und ein Vergleich mit den selber angestellten Überlegungen und mit den Ergebnissen der Literaturrecherche wird im Kapitel 8.2 durchgeführt.

Auffällig ist, dass sich Aussagen zu bekannten fachspezifischen Themen wie zum Beispiel zur Behaglichkeit oder zu Themen im Zusammenhang mit der kontrollierten Wohnungslüftung nur minimal unterscheiden. Direkt im Zusammenhang mit der Luftheizung stehende Aussagen differieren jedoch stark auseinander (z.B. Art der Volumenstrombestimmung, Kosten oder Planungsaufwand). Dies kann als Indiz gewertet werden, dass noch relativ wenig Erfahrung mit diesem System vorhanden ist.

Antworten, welche direkt die Planung, Ausführung oder den Betrieb einer Luftheizung betreffen werden hier nicht explizit aufgeführt sondern fliessen direkt in die Hinweise im Kapitel 8 ein.

7.1.2 Antworten (Auswahl)

Hier eine Auswahl von Behauptungen, zu denen die Fachplaner Stellung bezogen:

■	Trifft zu
■	Trifft eher zu
■	Trifft eher nicht zu
■	Trifft nicht zu
?	Keine / andere Antwort

Behauptung	1	2	3	4	5	6	7
Eine Luftheizung ist günstiger als ein konventionelles Wärmeverteilsystem							?
Eine Luftheizung spart die Installationskosten einer Wärmeverteilung ein							
Eine Luftheizung beeinflusst die Behaglichkeit positiv							?
Eine Luftheizung beeinflusst die Behaglichkeit negativ							?
Eine Luftheizung trocknet die Raumluft aus							

Behauptung	1	2	3	4	5	6	7
Eine Luftheizung trocknet die Raumluft mehr als eine einfache Lüftungsanlage aus	■	■	■				
Eine Luftheizung benötigt mehr Platz als eine einfache Lüftungsanlage	■	■	■	■			
Eine Luftheizung verursacht Schallprobleme	■	■					
Eine Luftheizung führt zu Beschwerden, Problemen	■						
Die Branche hat zu wenig Erfahrung mit Luftheizungen	■	■	■	■	■	■	■
Heizen und Lüften soll prinzipiell nicht durch das gleiche System erfolgen	■	■	■	■	■		

Tabelle 5: Auswertung verschiedener Aussagen (trifft zu / trifft nicht zu)

Auf die Frage, was den interviewten Personen als erstes zu den Stichworten Luftheizung, Heizkörper und Bodenheizung einfällt bzw. welches die Vor- und Nachteile der Systeme sind, kamen folgende Antworten:

Luftheizung		
	Mehrfachnennung	Einzelnennung
Vorteil / positiv	<ul style="list-style-type: none"> - Einfache Technik, wenig Technik - Tiefe Kosten - unabhängige Kanalführung - flinkes System 	<ul style="list-style-type: none"> - Behaglichkeit gut - Verzicht auf aktives Heizsystem - wenig Wasserleitungen, Elektrosmog positiv
Nachteil / negativ	<ul style="list-style-type: none"> - Keine oder aufwändige Einzelraumregulierung - Komforteinbusse - Wärmetransport mit Luft 	<ul style="list-style-type: none"> - Einsatz nur im Passivhaus möglich - anspruchsvolles System - Luftgeschwindigkeiten - Luftvolumenstrombestimmung - Luftvolumenstrom nicht reduzierbar - Hohe Vorlauftemperatur - Komforteinbusse - Warme Luft führt zum Gefühl von trockener Luft
Neutral	<ul style="list-style-type: none"> - sehr gute Gebäudehülle als Voraussetzung 	<ul style="list-style-type: none"> - je besser das Gebäude ist, desto weniger hat das Wärmeverteilsystem einen Einfluss

Tabelle 6: Vor- und Nachteile / Eigenschaften Luftheizung

Heizkörper		
	Mehrfachnennung	Einzelnenennung
Vorteil / positiv	<ul style="list-style-type: none"> - einfaches System - bekannt, gewohnt, Knowhow vorhanden - Einfache und gute Einzelraumregulierung - Temperatur und Luftvolumen separat regulierbar 	<ul style="list-style-type: none"> - Viele Systemvarianten möglich - Fehlertolerant - Kein Kaltluftabfall - Besseres Wärmegefühl in der Nähe von Heizkörpern - Ästhetik - Viele Wasserleitung, Elektrosmog negativ - Flexibel im Bezug auf Lasten
Nachteil / negativ	<ul style="list-style-type: none"> - Einschränkungen bei der Möbelierung - Platzbedarf, weiteres Element - Ästhetik - Kosten 	<ul style="list-style-type: none"> - Hohe Vorlauftemperatur - Grosse Luftbewegung - Zusätzliches Wärmeverteilsystem - Aufwand bei der Reinigung - Heizkörper vor Glasfronten
Neutral	-	-

Tabelle 7: Vor- und Nachteile / Eigenschaften Heizkörper

Bodenheizung		
	Mehrfachnennung	Einzelnenennung
Vorteil / positiv	<ul style="list-style-type: none"> - Selbstregelleffekt (tiefe Vorlauftemperatur) 	<ul style="list-style-type: none"> - bekannt, gewohnt, Knowhow vorhanden - Alternative Energien gut nutzbar - Gutes Strahlungsprofil - Kein Kaltluftabfall - Wasserleitungen nicht sichtbar - Viele Wasserleitungen, Elektrosmog negativ - Einzelraumregulierung - Komfort / Behaglichkeit - Temperatur und Luftvolumenstrom separat regulierbar
Nachteil / negativ	<ul style="list-style-type: none"> - träges System - Kosten 	<ul style="list-style-type: none"> - grosse Irrglauben in der Bevölkerung - zusätzliches Wärmeverteilsystem - Einzelraumregulierung nur theoretisch
Neutral	-	<ul style="list-style-type: none"> - Sehr gute Gebäudehülle als Voraussetzung - Nur mit einfacher Lüftung verwenden

Tabelle 8: Vor- und Nachteile / Eigenschaften Bodenheizung

Als nächstes wurde gefragt, welche Mythen, falschen Erwartungen und Vorurteile zu den einzelnen Systemen vorherrschen. Hier die Antworten:

System	Vorurteil
Luftheizung	<ul style="list-style-type: none"> - Trocknet die Luft aus (2x) - Weniger Platzbedarf - Luftheizung ist günstiger - Grosser Energietransport - Lüften = Heizen - Passivhaus = Haus ohne Heizung - Feuchte, ionisierte Luft
Heizkörper	<ul style="list-style-type: none"> - Ästhetik (2x) - Kaltluftabfallkompensation - Einzelraumregulierung (da sie vom Nutzer nicht oder nicht richtig genutzt wird)
Bodenheizung	<ul style="list-style-type: none"> - Warmer Fussboden (5x) - Aufgedunsene Füsse (2x) - Keine Deckenheizung - Nicht möglich zu kühlen - Einzelraumregulierung (da sie vom Nutzer nicht oder nicht richtig genutzt wird)

Tabelle 9: Mythen, falsche Erwartungen, Vorurteile zu den einzelnen Systemen

Die Fachplaner wurden auch zu den Kosten für die einzelnen Systeme befragt. Die hier gemachten Aussagen sind jedoch mit grosser Vorsicht zu geniessen, da saubere Systemabgrenzungen immer schwierig sind. Die Aussagen werden jedoch der Vollständigkeit halber trotzdem hier dokumentiert:

System	Kosten System
Luftheizung	<ul style="list-style-type: none"> - ~30'000 Fr / EFH (Haustechnik ohne Erzeugung) - ~5-6'000 Fr. / EFH (KWL 25'-30'000.-) - ~2-3'000 Fr. / Whg. MFH (KWL 15'-20'000 / Whg.) - ~25'000 Fr. / Wärmeerzeugung - ~45'000 Fr. / EFH (150-180 Fr. / m2)
Heizkörper	<ul style="list-style-type: none"> - ~45-50 Fr/m2EBF - ~1'000 Fr. / Heizkörper - ~40'000 Fr. / EFH (50-100 Fr. / m2) - ~10'000 Fr. / Whg. MFH (50-100 Fr. / m2) - ~25'000 Fr. / Wärmeerzeugung - ~20'000 Fr. / KWL
Bodenheizung	<ul style="list-style-type: none"> - ~45-50 Fr/m2EBF - ~40'000 Fr. / EFH (50-100 Fr. / m2) - ~10'000 Fr. / Whg. MFH (50-100 Fr. / m2) - ~25'000 Fr. / Wärmeerzeugung - ~20'000 Fr. / KWL

Tabelle 10: Typische Kosten der einzelnen Systeme (gemäss Angaben Fachplaner)

Weitere Fragen und Antworten waren:

Wo ist der Mehraufwand einer Luftheizung gegenüber einer einfachen Lüftungsanlage?

- Luftherhitzer (5x)
 - Mehr Luftauslässe (3x)
 - Dämmung der Kanäle (2x)
 - Planungsaufwand
 - Höherer Aufwand Inbetriebnahme
 - Heizkörper im Bad
 - Luftmengenregulierung
 - Umluft bei schlechter Gebäudehülle
 - Anbindung Heizung, Regulierung
 - Grössere Luftverteilung
-

Wie verhalten sich die Kosten im Vergleich mit den anderen Wärmeverteilssystemen?

- Luftheizung ist am teuersten (2x)
 - Energiekosten sind eher höher
 - Betriebskosten sind vergleichbar
 - Luftheizung ist günstiger
-

Wie sieht der Planungsaufwand im Vergleich Luftheizung zu einfacher Lüftungsanlage aus?

- Planungsaufwand Luftheizung ist grösser als Planungsaufwand Lüftung (3x)
 - Planungsaufwand Luftheizung ist grösser als Planungsaufwand Lüftung + Heizung
 - Planungsaufwand Luftheizung ist gleich gross wie Planungsaufwand Lüftung
 - Planungsaufwand Luftheizung ist kleiner als Planungsaufwand Lüftung
-

Messungen lassen vermuten, dass der Energieverbrauch bei einer Luftheizung tendenziell höher ist als bei anderen Wärmeverteilssystemen. Woran könnte das liegen?

- Höhere Vorlauftemperaturen führen zu schlechteren Wirkungsgraden bei der Wärmeerzeugung, Nutzenergie bleibt aber gleich (3x)
 - Raumlufttemperatur muss bei der Luftheizung höher sein für die gleiche Behaglichkeit, deshalb höhere Verluste (2x)
 - Höhere Vorlauftemperaturen führen zu höheren Verlusten bei der Wärmeverteilung
 - Transportenergie bei Luft grösser als bei Wasser
 - Lüftung läuft länger auf höherer Stufe, wegen des Heizbedarfs
 - Keine Einzelraumregulierung, Thermostatventile können solare Gewinne besser kompensieren
 - Anlageundichtheit
-

Wo sind die Einsatzgrenzen von Luftheizungen?

- Geld (4x)
 - Platzbedarf (4x)
 - Belegung / Nutzung, Nutzungswechsel (4x)
 - Gebäudehülle, spezifische Heizleistung < 10 W/m² (3x)
 - Keine (3x)
 - Passivhausstandard als Voraussetzung (2x)
 - Maximaler Volumenstrom pro Raum (2x)
 - Beschattung
-

Wie ist der Zeitaufwand für die Instruktion der Nutzer im Vergleich zu anderen Wärmeverteilungssystemen?

- Gleich (3x)
 - Grösser (2x)
-

Welche Punkte führen häufig zu Meinungsverschiedenheiten zwischen Planer und Architekten im Bezug auf die Luftheizung?

- Platzbedarf für zusätzliche Dämmung der Kanäle
- Statische Probleme durch Einlage in Decke
- Luftheizung = günstig
- Energieverbrauch

Die meisten Antworten betrafen hier die kontrollierte Wohnungslüftung oder allgemeine Meinungsverschiedenheiten zwischen den Akteuren. Hier aufgeführt werden nur die im direkten Zusammenhang zur Luftheizung stehenden Aussagen.

Welches sind die häufigsten Rückmeldungen die sie von Bewohnern in Bezug auf die Luftheizung bekommen?

- Zu tiefe Raumlufttemperatur nach Inbetriebnahme
- Trockene Luft (jedoch nicht häufiger als bei der einfachen Lüftungsanlage)
- Gute Behaglichkeit, gute Luft (Mehrheit) / trockene Luft, keine Einzelraumregulierung (Minderheit)
- Durchwegs positive Rückmeldungen
- Nasszellen zu kalt
- Nach Anlaufschwierigkeiten funktioniert es

Auch hier betrafen die meisten Antworten die kontrollierte Wohnungslüftung, die Schuld wird aber meistens bei der Luftheizung gesucht. Hier aufgeführt wurden nur die im direkten Zusammenhang zur Luftheizung stehenden Aussagen.

7.1.3 Schlussbemerkung

Wie erwähnt, haben die befragten Fachleute alle Erfahrung mit Luftheizungen. Im Grundtenor haben sie eine vorsichtig positive Haltung gegenüber diesem System, auch wenn einzelne in ersten Objekten quasi als Pionieren schlechte Erfahrungen damit gemacht haben. Ziemlich einheitlich ist die Meinung, dass man ein einfaches, allenfalls günstiges System haben kann aber nicht gleichzeitig auch ein sehr gutes, d.h. die Luftheizung kann dem Anspruch gut und günstig nicht gerecht werden. Ebenfalls einheitlich ist die Meinung, dass die Luftheizung ein heikles System ist, das aber bei einer fundierten Planung und seriösen Ausführung funktionieren kann. Wichtig ist deshalb, dass schon möglichst früh im Vorprojekt Fachplaner beigezogen werden.

Erwähnenswert ist auch, dass doch in relativ vielen Punkten sehr unterschiedliche Meinungen und Ansichten vorherrschen, sei dies z.B. bei der Dimensionierung des Volumenstromes oder auch bei den Kosten bzw. beim Aufwand, welche eine Luftheizung verursacht. Dies lässt darauf schliessen, dass noch wenig Erfahrung vorhanden ist und sich noch keine einheitliche Lösung etabliert hat. Auch auf Seite Installation scheint diese Erfahrung noch zu fehlen, sagen doch einzelne Fachleute aus, dass die Qualität der Installation häufig nur sehr mässig ist.

Ebenso interessant wie schwierig zu werten sind Aussagen zu Themen wie Elektrosmog und ionisiertes Wasser bei Wasser führenden Systemen, bewegt man sich da im Grenzbereich der Wissenschaften.

Kurz: Die Interviews haben gezeigt, dass das Thema umstritten ist und aus den verschiedensten Perspektiven diskutiert wird. Die Zusammenlegung von Heizen und Lüften ist mindestens umstritten – vor allem auch, weil die Erfahrung (noch) fehlt. Wichtig ist deshalb, den Planungsaufwand und den Aufwand für die Instruktion der Nutzer nicht zu unterschätzen.

7.2 Bewohner/-innen

7.2.1 Ausgangslage

Es wurden ausschliesslich BewohnerInnen befragt, welche selber in einem Objekt mit einer Luftheizung wohnen. Die interviewten Bewohner/-innen stammen alle aus den Kantonen Luzern und Zürich. Die Auswahl der Personen erfolgte aufgrund von Hinweisen von Seiten Auftraggeber oder aufgrund von bestehenden Kontakten zu Personen welche in mit Luftheizungen beheizten Objekten wohnen. Wesentliches Kriterium für die Auswahl der Personen war auch ihre Verfügbarkeit und Bereitschaft, an der Befragung teilzunehmen. Aus all diesen Gründen kann sicher nicht von einer repräsentativen Auswahl gesprochen werden.

Wichtig ist auch die Tatsache, dass es sich bei den betroffenen Objekten ausschliesslich um Mehrfamilienhäuser handelt. Dies ist bei der Interpretation der Antworten zu berücksichtigen, da Mehrfamilienhäuser tendenziell über kleinere Wohnflächen verfügen als Einfamilienhäuser und Überlegungen in Kapitel 6 zeigen, dass die Wohnfläche pro Person einen merklichen Einfluss auf die Funktionalität einer Luftheizung haben kann.

Die detaillierten Auswertungen sind im Anhang dieses Berichtes beigefügt. Hier wird eine Zusammenfassung der Antworten dokumentiert. Die Aussagen werden sinngemäss und ohne Wertung seitens der Autoren dieser Studie dokumentiert. Eine Wertung und ein Vergleich mit den selber angestellten Überlegungen und mit den Ergebnissen der Literaturrecherche wird im Kapitel 8.2 durchgeführt.

Die Befragung teilte sich grob in vier Phasen:

- Bezug zur Luftheizung
- Fragen zur Behaglichkeit
- Weiterempfehlung?
- Erfahrungen

Ohne Angabe der Anzahl Nennungen handelt es sich bei den aufgelisteten Antworten um Einfachnennungen.

7.2.2 Antworten (Auswahl)

Warum wurde eine Luftheizung als Wärmeverteilung gewählt?

- War Vorgabe für ein Passivhaus (2x)
 - Keine bewusste Wahl, war schon im Haus vorhanden (2x)
 - Luftheizung wurde vom Planer vorgeschlagen
 - Interesse am ökologischen Bauen
-

Was wurde betreffend Kosten kommuniziert und wie waren die Kosten in Realität?

- Es wurde nichts kommuniziert (3x)
 - Der angekündigte Kostenknick wegen des Wegfalls der separaten Heizverteilung trat nicht ein; die Mehraufwendungen für die Lüftung übertrafen die Einsparungen bei der Heizung
-

Wie empfinden Sie die Bedienung und den Unterhalt der Lüftungsanlage?

- Einfach (6x)
 - Luftvolumenstromstufen frei wählbar oder über Automat
 - Raumtemperatur-Sollwert vom Nutzer einstellbar
 - einzige Wartung ist das Filterwechseln
-

Wie beurteilen Sie die Behaglichkeit?

Raumlufttemperatur:

- Grundsätzlich positiv (4x)
 - Grundsätzlich negativ (1x): Im Sommer zu warm (> 28°C), im Winter zu kalt (Wohnzimmer = 20°C, Badzimmer = 18°C)
-

- Negativ: Überhitzung bei plötzlichen solaren Lasten und/oder hohen internen Lasten
- Negativ: Keine Solltemperaturen für die einzelnen Räume möglich

Luftfeuchte:

- Grundsätzlich positiv, zwischen 40 und 50% (2x)
- Im Winter negativ (3x) [wobei einer Person bewusst ist, dass dies nicht direkt mit der Luftheizung zu tun hat]

Luftzug:

- Positiv, nicht bemerkbar (5x)
- Negativ, im Fussbereich (1x)

Gerüche:

- Positiv, kein Problem (5x)

Schall:

- Positiv, kein Problem (5x)
- Am Anfang gewöhnungsbedürftig, allenfalls Störung auf Stufe 3 oder bei Umluftbetrieb

Oberflächentemperatur Bodenbelag:

- Angenehm (4x, alle mit Holz / Parkett)
- Zu kalt (1x, mit Steinplatten)

Schadstoffe wie Rauch, Tiere, Farben

- Kein Problem
 - Nur im Umluftbetrieb / bei Rauchern als Besucher entstehen unangenehme Belastungen
-

Wie haben Besucher auf die Luftheizung reagiert und wie haben sie sich geäussert?

- Keine Reaktion (2x)
 - Raumlufttemperatur wird eher als zu frisch empfunden
 - Bei plötzlicher Solarstrahlung wird der Anstieg der Raumlufttemperatur bemerkt
 - Angenehmes Wohnklima wird angesprochen
-

Würden Sie sich heute nochmals für eine Luftheizung entscheiden?

- 5x Ja, jedoch ohne Umluft, jedoch Zuluft zusätzlich dämmen, jedoch eher zentrale Versorgung
 - 1x unentschlossen
 - 2x Nein: Heizen und Lüften trennen
-

Was würden Sie einem Bekannten im Zusammenhang mit der Luftheizung raten?

- Ja, da gesünder und billiger
 - Ja, abhängig von der Lage der Wohnung (eher nicht, wenn exponiert)
-

- Ja, aber sorgfältig planen
 - EFH ja, MFH nein
 - Ja, aber als Ergänzung ein Schwedenofen
 - Ja, einziges Problem ist die Regulierung
 - Ja, wenn schon kontrollierte Wohnungslüftung, dann auch heizen mit dem gleichen System
 - Ja, wegen der Aesthetik
 - Nein, besser mit Radiatoren heizen
-

Weitere Statements:

- Die meisten Bewohner bevorzugen 22°C Raumtemperatur statt 20°C
- Eine Erfolgskontrolle, Optimierung im ersten Jahr ist sehr zu empfehlen
- Ein zusätzlicher Schwedenofen erlaubt rasche Erhöhungen der Raumlufttemperatur und erhöht die Behaglichkeit
- Luftheizung heisst gesundes Wohnen. Seit ich eine Luftheizung habe, bin ich nicht mehr krank geworden (5 Jahre)
- Seit ich in dieser Wohnung wohne, bin ich mehr erkältet (eine zweite, in der gleichen Wohnung wohnende Person ist nicht öfters erkältet).

7.2.3 Schlussbemerkung

Es kann festgehalten werden, dass die interviewten Personen durchwegs grosses Interesse an der Thematik zeigten und sich auch überdurchschnittlich dafür interessieren, was die Grundlagen der Luftheizung sind und wie sie funktioniert. Dennoch war einzelnen Bewohnern der Unterschied zwischen einer Luftheizung und einer KWL ohne Luftnachwärmung nicht bekannt.

Gegenüber Neuem, im speziellen der Luftheizung ist man offen. Entsprechend kann auch davon ausgegangen werden, dass diese Bewohner bewusster mit ihrem Gebäude und der darin installierten Gebäudetechnik umgehen. So beobachten die meisten Bewohner – oft angeregt durch Aussagen von Bekannten – die Raumlufttemperatur und die Luftfeuchtigkeit durch eigene Messungen und nehmen dadurch ihr Raumklima auch bewusster wahr. Sie sind auch bereit für eine Verbesserung der Behaglichkeit kleine Änderungen in ihrem Wohnverhalten sich anzueignen.

Vor allem bei den Fragen zur Behaglichkeit ist zu bedenken, dass die Antworten stark von Vergleichen mit der vorherigen Wohnsituation geprägt sind und daher eher als relative Aussagen und weniger als absolute Aussagen zu sehen. Da alle Bewohner vorher nicht in einem Niedrigstenergiehaus mit KWL wohnten, hängen die gemachten Erfahrungen in ihrem neuen Heim wohl nur zu einem Teil direkt mit der Luftheizung zusammen.

Die meisten Bewohner würden sich wieder für eine Luftheizung entscheiden, wobei die gewonnenen Erfahrungen Änderungen im Konzept hervorbringen würden. Vor allem wenn der Befragte auch in den Bauprozess involviert war, wird für ein weiteres Objekt eher von einer Variante KWL mit separater Wärmeabgabe über FBH oder Heizkörper ausgegangen, da der Aufwand für Planung, Installation und Inbetriebsetzung (Luftvolumenstromabgleich) der Luftheizung meist

sehr gross war. Auffallend sind die Bemerkungen (Reklamationen) über Planer, Ingenieure und Ausführende, welche zuwenig Erfahrung im Bau von Niedrigstenergiehäuser und deren Komponenten haben.

8 Hinweise Planung, Ausführung, Betrieb

Hinweise für die Planung werden hier in Form einer Checkliste wiedergegeben. Diese Hinweise basieren auf den Literaturrecherchen, vor allem aber auf Inputs aus den diversen Interviews. Das folgende Kapitel ist nicht als Planungshandbuch zu verstehen, welches konkrete Werte und Wege vorgibt, sondern als Checkliste zur Überprüfung, ob bei der Planung an alle wichtigen Punkte gedacht wurde. Die Checkliste richtet sich primär an Fachplaner und Architekten und ist in der hier vorliegenden Form nicht abschliessend. Vorgaben oder Hinweise aus Normen werden hier nicht mehr explizit erwähnt sondern können in den entsprechenden Dokumenten nachgesehen werden (siehe Kapitel 6.1)

8.1 Planung

8.1.1 Luftheizung

Eine seriöse, vorsichtige Planung ist der entscheidende Punkt, ob eine Luftheizung funktionieren wird oder nicht. In der Planung begangene Fehler lassen sich später im Betrieb kaum mehr vernünftig korrigieren. Es empfiehlt sich deshalb, für die Planung und später auch für die Begleitung der Ausführung sowie für die Inbetriebnahme genügend Zeit einzuplanen.

Grundsätzlich gilt, dass bei der Planung einer Luftheizung alle bei der Planung einer einfachen Lüftungsanlage zu berücksichtigenden Punkte mit zu berücksichtigen sind.

Allgemein

- Bereits im Vorprojekt Fachplaner hinzuziehen
- Variantenvergleich verschiedener Systeme machen; Abwägen der Vor- und Nachteile unter Berücksichtigung der Kosten, der Machbarkeit, der Energie-Effizienz, des Platzbedarfs und der Behaglichkeit; im Diskurs mit Bauherr / Nutzer

Informationspolitik

- Aktiv informieren (Bauherrn, Architekten, Unternehmer, Betreiber)
- Bauherrn möglichst in Entscheidungsprozesse integrieren

Gebäude

- Nutzung und Zimmerzuordnung überdenken und evt. definieren
- Belegung hinterfragen und evt. zu definieren
- Spezifische Heizleistung soll maximal 10 W/m² betragen.
- Hausinterner Wärmeaustausch prüfen (erfahrungsgemäss werden 50% der Wärme über Transmission durch die Innenwände und 50% über freie Konvektion transportiert); Achtung bei Leichtbau-Innenwänden: diese haben oft eine relativ starke Dämmwirkung

Behaglichkeit

- Exponierten Wohnungen/Räumen auf Behaglichkeit prüfen

Luftführung

- keine Luftverteilung ausserhalb des Dämmperimeters anordnen
- Zuluftkanäle dämmen

Durchlass

- Jeder Raum, welcher eine Wärmeleistung benötigt, hat einen Auslass
 - zusätzlichen Auslass in der Küche vorzusehen
 - Im Bad und WC kein Auslass vorsehen
 - Reine Kaskadenlüftung vermeiden

Volumenstrom

- grösserer Volumenstrom für Wohneinheit bestimmen
 - Volumenstrom anhand des minimalen Aussenluftanteiles
 - Volumenstrom anhand der minimalen Abluftvolumenströme
- grösserer Volumenstrom für einzelne Räume bestimmen
 - Volumenstrom anhand des minimalen Aussenluftanteiles
 - Volumenstrom anhand der minimalen Abluftvolumenströme
- Bestimmter Volumenstrom mit Bedarf vergleichen
 - Volumenstrom anhand der benötigten Wärmeleistung
 - Volumenstrom anhand des minimalen Feuchtegehalts der Raumluft
 - Keine Erhöhung des bestimmten Volumenstroms vornehmen
- Kein Umluftbetrieb realisieren

Komponentenwahl

- Luftseitigen Strömungswiderstand des Nachwärmers beachten
- Wärmeleistung überprüfen (gewählte Systemtemperatur)
- Evt. Herstellerangaben garantieren lassen

Regulierung

- Bei Verzicht auf eine Einzelraumregulierung Ausnahmegewilligung erhalten
- Position Referenzthermostat überprüfen (Einflussgebiet Auslasses)
- Zonenaufbereitung hinterfragen

8.1.2 Einfache Lüftungsanlage

Bei den Interviews waren viele Aussagen betreffend Probleme und Erfahrungen nicht auf die Luftheizung fokussiert. Da eine exakte Planung aber Voraussetzung für eine Luftheizung ist, werden in diesem Kapitel auszugsweise wichtige Punkte für die Planung einfacher Lüftungsanlagen (KWL) zusammengeführt.

Gebäude

- Platzbedarf einplanen
 - Lüftungsgerät / -Monoblock
 - Steigzone
 - Schalldämpfer
 - Regeleinrichtungen (Klappen o.ä.)
 - Revisionsplatzbedarf (Hersteller)
 - Filterwechsel (Hersteller)
 - Evt. zusätzliche Filterboxen (z.B. Feinfilter oder Pollenfilter)
- Boden so ausgestalten, dass er als Speichermasse für die solaren Gewinne genutzt werden kann (z.B. bei der Wahl des Bodenbelages)

Luftführung

- Strömungsgeschwindigkeiten beachten (Schallprobleme)
- Runde oder ovale Kanäle zwecks Reinigung bevorzugen
- Koordination mit Architekt / Statiker falls dickere Deckenplatten nötig
- Koordination mit Sanitärfachperson

Durchlass

- Die Herstellerangaben sind zu beachten:
 - Nicht alle Typen in allen Positionen von Luftdurchlässen geeignet
 - Kleine Durchlässe erzeugen Schallprobleme. Überström-Durchlässe beachten.
- Bei Disposition auf Möblierung achten
- Disposition der Durchlässe auf Kurzschluss prüfen

Volumenstrom

- Regulierarmaturen verwenden (Abgleich)

Regulierung

- Übersteuerung referenzregulierter Sonnenstoren ermöglichen
- Keine Nachtabsenkung realisieren (gilt für Niedrigstenergiebauten)

Akustik

- Regulierarmaturen können Geräusche verursachen
- Druckverlust wohnungsinterne Überström-Durchlässe überprüfen (max. 3 Pa)

8.2 Ausführung

Während der Ausführung gilt es vor allem darauf zu achten, dass die Anlage so ausgeführt wird, wie sie geplant wurde. Da die Luftheizung ein wenig fehlertolerantes System ist, wirken sich hier Abweichungen zwischen Ist und Soll besonders verheerend aus.

Luftheizung

- Information und Instruktion der beteiligten Unternehmer (Sensibilisierung)
- Auch Detailprobleme möglichst im Team (Architekt, Planer, Unternehmer) lösen
- Dichtheit der Zuluftkanäle (sehr wichtig)
- Mobile Heizung für Aufheizphase und Bauaustrocknung nötig

Einfache Lüftungsanlage

- Genügend Zeit für Inbetriebnahme inkl. Einregulierung (v.a. Volumenstrom) vorsehen
- Auf Hygiene achten, Abdeckungen auf den Spirorohren verwenden
- Korrekt gedämmte, dichte Gebäudehülle
- Korrekt gedämmte Luftkanäle (sehr wichtig)

8.3 Betrieb

Die Luftheizung ist ein wartungsarmes und bedienerfreundliches System, entsprechend wenig Punkte gilt es hier zu beachten:

Luftheizung

- Information und Instruktion der Bewohner und Betreiber, vor allem auch Information, dass Einregulierungsphase relativ lange gehen kann
- Kontrolle der Auslegeparameter im Laufe der Inbetriebnahme
- Kontrolle des Nacherwärmers auf Verschmutzung und Korrosion (einmal jährlich, gemäss SIA Merkblatt 2023)
- Erfolgskontrolle mit Betriebsoptimierung (im Laufe des ersten Betriebsjahres)

Einfache Lüftungsanlage

- Filterwechsel (einmal jährlich, gemäss SIA Merkblatt 2023)

9 Synthese

Ziel dieser Studie ist es, einen Überblick zum Thema Luftheizung in Wohnbauten zu verschaffen. Wie die Interviews und die Recherchearbeiten zeigen, ist noch relativ wenig Wissen zum Thema Luftheizung vorhanden und vor allem auch nicht dokumentiert. Viel dokumentiertes Wissen stammt vom Deutschen Passivhaus-Institut in Darmstadt oder aus dessen Umfeld. Obwohl noch relativ wenig Wissen vorhanden ist, sprengt es den Rahmen einer solchen Studie, sämtliches Wissen aufzubereiten und einzuordnen. Deshalb gilt es Prioritäten zu setzen und Schwerpunkte zu bilden.

Im folgenden Kapitel wird versucht, nochmals die wesentlichen Punkte zusammenzutragen, einander gegenüber zu stellen und zu bewerten. So soll ein abgerundetes Bild zum Thema Luftheizung entstehen, das es dem Planer, dem Bauherrn oder dem sonstigen Interessierten ermöglicht, sich eine eigene Meinung zu bilden und anstehende Entscheidungen korrekt zu treffen.

Das MINERGIE-P®- oder Passivhaus ist nicht ein Haus ohne Heizung

Es besteht vielerorts der Irrglauben, dass ein MINERGIE-P® oder Passivhaus ein Haus ohne Heizung ist. Tatsache ist, dass bei einer Luftheizung auf ein Wärmeverteilsystem im konventionellen Sinn verzichtet werden kann. Aber auch bei einem MINERGIE-P®- oder Passivhaus ist eine Wärmequelle nötig und muss den Räumen zeitweise Wärme zugeführt werden.

Die Luftheizung funktioniert nur im MINERGIE-P® oder im Passivhaus

Eine Luftheizung funktioniert nur dann problemlos, wenn die aus hygienischen Gründen nötige Luftmenge auch zum Beheizen des Gebäudes genügt. Unter normalen Randbedingungen ist dies bei einer Gebäudehülle der Fall, welche zu einem maximalen Heizleistungsbedarf von 10 W/m² oder weniger führt. Sollen mit einer Luftheizung höhere spezifische Leistungen gedeckt werden, so entsteht im Winter entweder trockene Raumluft oder es muss mit Umluft gefahren werden, was andere Komfortprobleme nach sich zieht (Geruchsverbreitung, Schall, ...).

Die Luftheizung ist einfach und günstig

Wenn ohnehin Luft im Gebäude herumtransportiert werden soll, dann hat das natürlich seinen Reiz, mit dieser Luft gleich auch die Wärme zu transportieren. Eine einfache Luftheizung führt zu einem geringen apparativen Mehraufwand (wenn sowieso eine einfache Lüftung vorhanden ist) und kann günstiger realisiert werden, als ein konventionelles Heizsystem. Die Luftheizung ist flink und kann schnell auf ändernde Lasten reagieren.

Die Luftheizung braucht wenig Platz

Gegenüber der einfachen Lüftungsanlage braucht die Luftheizung nur wenig mehr Platz, nämlich für die Dämmung der Zuluftkanäle. Ansonsten ist die Luftheizung ein platzsparendes System. Dadurch dass die Wärmeabgabeelemente den Lufteinlässen entsprechen, schränkt die Luftheizung in keiner Weise betreffend Möblierung oder Raumgestaltung den Nutzer zusätzlich ein.

Die Luftheizung verursacht wenig Aufwand im Betrieb

Einmal richtig eingestellt, verursacht die Luftheizung fast keinen Aufwand mehr. Wie bei jeder Lüftungsanlage müssen gelegentlich die Filter gewechselt werden und der Luftheritzer sollte alle 12 Monate auf Verschmutzung, Beschädigung und Korrosion geprüft werden. Ansonsten sind keine Unterhaltsarbeiten nötig.

Die Luftheizung ist in ihrer Leistung beschränkt

Die Luftheizung ist in ihrer Leistung beschränkt. Wenn die zur Verfügung stehende Leistung nicht mehr ausreicht um den Bedarf zu decken – sei dies wegen einem Fehler bei der Dimensionierung, einer schlechten Ausführung oder einer von den Annahmen abweichenden Nutzung – dann besteht kaum eine Möglichkeit, die Leistung des Systems zu vergrössern (wie es z.B. bei den Wasser führenden Systemen durch ein Verstellen der Heizkurve möglich ist). Meist sind dann nur noch elektrische Zusatzheizungen die Lösung, da ein Anheben des Volumenstroms zu trockener Luft und/oder zu Schallproblemen sowie einem erhöhten Energieverbrauch führt und ein Anheben der Zulufttemperatur gesetzlich nicht erlaubt ist oder zu Staubverschmelzung und schlechten Wirkungsgraden bei der Wärmeerzeugung führt.

Die hohen Zulufttemperaturen reduzieren die Energieeffizienz

Die Luftheizung bedingt hohe Temperaturen um mit der limitierten Luftmenge die nötige Energie zu transportieren. Die hohen Temperaturen haben im Wesentlichen zwei Nachteile: Einerseits die schlechte Energieeffizienz bei der Wärmeerzeugung, welche vor allem bei Wärmepumpen markant ist und andererseits die relativ hohen Verteilverluste im Kanalnetz.

Tendenziell hat man bei der Luftheizung die Wärme am falschen Ort

Durch das von der kontrollierten Wohnungslüftung herrührende Kaskadenprinzip wird die Wärme mit der Luftheizung primär in die Schlafzimmer geführt und die Nasszellen erhalten nur noch wenig Wärme. Die Temperatur gleicht sich zwar tendenziell aus und es wird überall gleich warm, dies widerspricht jedoch dem Wunsch nach kühlen Schlafzimmern und warmen Nasszellen.

Exponierte Räume und Wohnungen haben aufgrund ihrer Lage (Dachsituation, Ecksituation etc.) die Tendenz, einen überdurchschnittlich hohen Heizleistungsbedarf aufzuweisen. Gleichzeitig liegen diese Zonen jedoch meistens an der Peripherie eines Gebäudes mit entsprechend langen Zuleitungen für Lüftung / Heizung. Ergo müssen die Kanäle in solchen Situationen extrem gut gedämmt werden oder es ist mit anderen Massnahmen dafür zu sorgen, dass in exponierten Zonen die zur Verfügung stehende Heizleistung zur Gewährleistung von angenehmen Raumtemperaturen ausreichend ist.

Die Luftheizung reagiert sensibel auf den Benutzer

Ein offen gelassenes Fenster oder tiefere interne Lasten als in der Planung angenommen führen zu einem erhöhten Leistungsbedarf, welcher die Luftheizung schnell an die Leistungsgrenze führen kann.

In luftbeheizten Räumen ist die Lufttemperatur tendenziell höher als in flächenbeheizten Räumen

Die empfundene, operative Temperatur setzt sich aus der Lufttemperatur und den Strahlungstemperaturen der Raum umschliessenden Flächen zusammen. Bei Flächenheizungen genügt meist eine Lufttemperatur von 20-21°C um zusammen mit den warmen Oberflächen die vom Nutzer meist gewünschten 21-22°C zu erzielen. Bei einer Luftheizung muss aufgrund der leicht kühleren Oberflächen die Lufttemperatur auf rund 22-23°C erhöht werden, was einerseits zu höheren Lüftungsverlusten und andererseits zu einer leicht tieferen relativen Luftfeuchte führt.

Eine Luftheizung ohne Einzelraumregulierung (mittels Volumenstromregler) ist gegen das Energiegesetz

Gemäss MuKE n müssen Systeme mit Vorlauftemp. über 30°C eine Einzelraumregulierung haben. Mit Zulufttemperaturen von 50°C fällt somit auch die Luftheizung unter diesen Zwang, d.h. alle Zuluft einlässe sind mit einem Volumenstromregler auszurüsten, was entsprechende Mehrkosten zur Folge hat. Will man nach gängiger Praxis auf diese Einzelraumregulierung verzichten, ist mindestens beim Kanton vorgängig eine Ausnahmegewilligung zu beantragen (diese Bewilligungen werden in der Regel aufgrund des geringen Heizbedarfs solcher Objekte erteilt).

Die Luftheizung funktioniert nicht mehr bei grossen oder schwach belegten Wohnungen

Ziel ist, mit dem hygienisch notwendigen Luftwechsel die nötige Heizleistung zu bewerkstelligen. Bei grossen Wohnflächen oder schwach belegten Wohnungen mit entsprechend hohen m²-Zahlen pro Bewohner, nimmt die spezifische Zuluftmenge pro m² ab. Somit nimmt auch die zur Verfügung stehende spezifische Heizleistung mit der Luft pro m² ab. Obwohl diese in einer solchen Wohnung tendenziell grösser sein müsste, da aufgrund der schwachen Belegung auch mit tieferen internen Lasten zu rechnen ist.

Der Aufwand für Planung und Einregulierung ist eher hoch

Eine Luftheizung hat viele potentielle Stolpersteine. Deshalb ist eine sorgfältige und entsprechend aufwändige Planung zwingende Voraussetzung. Auch die Einregulierungsphase bedingt – z.T. auch aufgrund fehlender Erfahrung – einen nicht zu unterschätzenden Aufwand. Dieser Mehraufwand gegenüber einem konventionellen System macht oft eine allfällige Einsparung bei den Anlagenkosten wieder zunichte.

Interviews zeigen: Bewohner von mit Luftheizungen bewohnten Wohneinheiten sind mehrheitlich zufrieden

Trotz einiger vorhandener Nachteile mag es erstaunen, dass die befragten Bewohner/-innen mit Behaglichkeit und Komfort in ihren Objekten mehrheitlich zufrieden sind, auch wenn oft erst nach einer längeren Einführungsphase. Voraussetzung für diese Zufriedenheit sind aber eine gute Planung, eine saubere Ausführung und bewusste Bewohner.

Sorgfältige Planung und Ausführung lassen einzelne Nachteile vermeiden

Viele der aufgeführten Nachteile lassen sich beheben, vermeiden oder reduzieren, wenn sich die Planer und die Nutzer dieser Gefahren bewusst sind. Dazu ist aber Erfahrung, Fachwissen und vor allem Information sowie Kommunikation zwischen den Beteiligten und zwischen Fachleuten und Bewohner/-innen nötig.

Gut geplant und gut ausgeführt hat die Luftheizung sicher ihre Berechtigung. Dabei sind aber die Grenzen, welche vor allem aufgrund des beschränkten Leistungsspektrums gegeben sind, unbedingt zu beachten. Grundsätzlich sind Vor- und Nachteile miteinander zu vergleichen, auch im Hinblick auf mögliche Nutzungsänderungen sowie auf gewünschte Reserven. Rechtfertigen die Vorteile die Inkaufnahme der Nachteile? Oder kann mit einem anderen System der gleiche Nutzen besser und sicherer erreicht werden?

10 Abschliessende Bemerkungen

Die Studie kann die schon zuvor kontrovers geführte Diskussion zum Thema Luftheizung kaum beenden. Sie kann aber die mehr oder weniger bekannten Fakten zusammentragen und bewerten. Die Faktoren, welche die Beantwortung der Frage „Macht eine Luftheizung Sinn?“ beeinflussen, sind zu vielschichtig als dass es eine allgemeingültige Antwort geben kann. Deshalb muss die Antwort auf diese Frage ein „Ja – mit Wenn und Aber“ bleiben. Die Wenn's und Aber's lassen sich aber dank der Literaturrecherche und den Interviews relativ umfassend auflisten.

Interessant ist, dass nicht wenige Befürworter der Luftheizung dieses System mit Begriffen wie „ökologisch“, „gesund“ oder „nachhaltig“ in Verbindung bringen. Dies muss nicht falsch sein, aber es konnte hier aber auch nicht bewiesen werden, dass die Luftheizung diesen Begriffen gerecht wird.

Ebenfalls nicht bewiesen werden konnte die verbreitete Meinung, dass Luftheizungen zwingend ein günstiges System sind. Der propagierte Kostensprung kann dank des Verzichtes auf eine zusätzliche Wärmeverteilung auftreten, wenn aber ein zu anderen Heizsystemen qualitativ gleichwertiges, gutes System gewünscht wird, dann ist dieser Kostensprung mit grosser Wahrscheinlichkeit nur noch marginal, wenn überhaupt vorhanden.

Offensichtlich und unbestritten ist die Tatsache, dass – verglichen mit anderen Heizsystemen – im Umgang mit der Luftheizung noch sehr wenig Erfahrung vorhanden ist, sowohl bei den Fachleuten als auch bei den Nutzern. Hier zeigt sich echter Handlungsbedarf in der Kommunikation und in der Information. Es ist wichtig, dass die gemachten Erfahrungen analysiert und die Erkenntnisse weiterverbreitet werden. So kann vermieden werden, dass die gleichen Fehler sich immer wiederholen. Ein Element dieser Bemühungen kann das Positionspapier und der Leitfaden von MINERGIE® zum Thema Luftheizung sein.

11 Literaturrecherche

11.1 Fachliteratur

- [Barrier70] Barrier, A. und Gilgen, A.. Natürliche Belichtung von Wohnungen. Forschungsauftrag FAP. ETH Zürich. 1970
- [Bauer97] Bauer Franz, Kamm Klaus. Gesundheits-Ingenieur Heft 5; Literaturrecherche "Niedrigenergiehäuser". Oldenbourg Industrieverlag GmbH. München. 1997
- [Böck00] Böck Reinhard, Spiess Thomas. Gesundheits-Ingenieur Heft 5+6; Grundlagen zur Charakterisierung von Geruchsimmissionen in Innenräumen. Oldenbourg Industrieverlag GmbH. München. 2000
- [CeHo96] Günter Cerbe, Hans-Joachim Hoffmann. Einführung in die Thermodynamik; Von den Grundlagen zur technischen Anwendung. Carls Hanser Verlag. München. 1996 (11. Auflage)
- [Dipper02] Dipper Jörg, Glaus Gunther; Schmidt Michael; Bouse Dieter. Wärme - Effiziente Wärmeversorgung in Wohngebäuden. Landesgewerbeamt Baden-Württemberg - Informationszentrum Energie. Baden-Württemberg. 2002 (4. Auflage)
- [Dorer03] Viktor Dorer; Anne Haas; Beat Frei; Florian Reichmut; Heiri Huber. Optimierte Luftheizung für Passivhäuser (Vernehmlassung). Bundesamt für Energie BFE. Bern. 2003
- [Eicke98] Eicke-Hennig Werner, Steinmüller Bernd, Zeller Joachim. Bauphysik 20 Heft 5; Förderprogramm "30 Niedrigenergiehäuser in Hessen" - Erfahrungen und Schlussfolgerungen. Ernst & Sohn. Berlin. 1998
- [Feist597] Wolfgang Feist. Protokollband Nr. 5 "Energiebilanz und Temperaturverhalten". Passivhaus Institut. Darmstadt. 1997
- [Feist697] Wolfgang Feist. Protokollband Nr. 6 "Haustechnik im Passivhaus". Passivhaus Institut. Darmstadt. 1997
- [Feist99] Feist Wolfgang, Rainer Pfluger, Vahid Sariri. Protokollband Nr. 17 "Dimensionierung von Lüftungsanlagen in Passivhäusern". Passivhaus Institut. Darmstadt. 1999
- [Fraefel98] Fraefel Rudolf, Heiri Huber; Viktor Dorer; Felix Schmid. Klima Suisse: Leitfaden kontrollierte Wohnungslüftung. Klima Suisse. Zürich. 1998
- [Frei04] Frei Beat; Reichmut Florian; Huber Heiri. Vergleichende Auswertung schweizerischer Passivhäuser. ENET. Arbon. 2004
- [Freym78] Freymuth, H. und Seidl, M.: Abstandsflächen im Wohnungsbau. Innenministerium des Landes Nordrhein-Westfalen. 1978

-
- [Glück01] Glück Bernd. Gesundheits-Ingenieur Heft 4; Luftheizung oder wasserbeaufschlagte Flächenheizung in Gebäuden mit niedrigem Heizwärmebedarf?. Oldenbourg Industrieverlag GmbH. München. 2001
- [Kühl05] Kühl Lars. Gesundheits-Ingenieur Heft 3; Wärmeversorgungssysteme für hochwärmegedämmte Gebäude. Oldenbourg Industrieverlag GmbH. München. 2005
- [Lebel04] Lenel Severin; Gemperle Silvia. Praxistest MINERGIE (Schlussbericht). ENET. Arbon. 2004
- [MuKE] Mustervorschriften der Kantone im Energiebereich
- [Mundt03] Mundt Elisabeth; Müller Birgit. Skript Heizung im Niedrigenergiehaus. Technische Universität Berlin. Berlin. 2003
- [PHI05] Passivhaus Institut. Dynamisches Verhalten und Wärmeübergabeverluste von Flächenheizungen. Hessisches Ministerium für Wirtschaft, Verkehr und Landesentwicklung. Hessen. 2005
- [PHTag00] Bisanz Carsten. 4. Passivhaus Tagung - Heizlast und Heizwärmeverteilung im Passivhaus. Passivhaus Institut. Darmstadt. 2000
- [PHTag01] Stärz Norbert. 5. Passivhaus Tagung - Planungsgrundsätze für Wohnungslüftungen. Passivhaus Institut. Darmstadt. 2001
- [PHTag03] Kaufmann Berthold; Feist Wolfgnag. 7. Passivhaus Tagung - Die Frischluftheizung hat sich bewährt. Passivhaus Institut. Darmstadt. 2003
- [PHTag03] Haas Anne; Dorer Viktor. 7. Passivhaus Tagung - Aspekte der Wärme- und Luftverteilung. Passivhaus Institut. Darmstadt. 2003
- [PHTag03] Werner Betschart. 7. Passivhaus Tagung - Wohin bewegt sich die Energieszene Schweiz. Passivhaus Institut. Darmstadt. 2003
- [PHTag03] Berthold Kaufmann; Wolfgnag Feist. 7. Passivhaus Tagung - Passivhaus und Qualitätssicherung. Passivhaus Institut. Darmstadt. 2003
- [PHTag04] Strasser Franz; Engelbert Sinz; Peter Holzer. 8. Europäische Passivhaustagung - Holzöfen in Passivhäusern. Passivhaus Institut. Darmstadt. 2004
- [PHTag96] Wolfgang Feist. 1. Passivhaus Tagung - Passivhäuser - Behaglichkeit ohne Heizung. Passivhaus Institut. Darmstadt. 1996
- [PHTag97] Werner Johannes; Thomas Kirtschig. 2. Passivhaus Tagung - Zuluftnachheizung als Heizwärmeverteilungssystem. Passivhaus Institut. Darmstadt. 1997
- [PHTag99] Pfluger Rainer. 3. Passivhaus Tagung - Projektieren von Lüftungsanlagen. Passivhaus Institut. Darmstadt. 1999
- [Richte03] Richter W.. Handbuch der thermischen Behaglichkeit - Heizperiode (Zusammenfassung). Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin. Dortmund/Berlin/Dresden. 2003
- [Schrod96] Schrode Ansgar. Niedrigenergiehäuser. Verlagsgesellschaft Rudolf Müller. Köln. 1996

- [StatSe02] Binz A.; Moosmann A.; Viridén K.; Wydler J.; Haas A.; Althaus H.J.. Statusseminar 12; MINERGIE und Passivhaus-Standard. ZEN (Zentrum für Nachhaltigkeit am Bau). Bern. 2002
- [StatSe02] Spescha Otmar. Statusseminar 12; Sind Passivhäuser bezahlbar. ZEN (Zentrum für Nachhaltigkeit am Bau). Bern. 2002
- [TUGraz04] Streicher Wolfgang (Projektleitung), 20 weitere Autoren. Leitfaden "Benutzerfreundliche Heizungssysteme für Niedrigenergie- und Passivhäuser". Technische Universität Graz, Institut für Wärmetechnik. Graz. 2004

11.2 Normen und Richtlinien

- [DIN1946-6] Raumluftechnik - Teil 6: Lüftung von Wohnungen; Anforderungen, Ausführung, Abnahme (VDI-Lüftungsregeln). 1998-10
- [DIN4108] Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden - Teil 2: Mindestanforderungen an den Wärmeschutz. 2003-07;
- [SN7730] SN EN ISO 7730:2006 de. Ergonomie der thermischen Umgebung - Analytische Bestimmung und Interpretation der thermischen Behaglichkeit durch Berechnen des PMV- und des PPD-Indexes und Kriterien der lokalen thermischen Behaglichkeit. SNV Schweizerische Normen-Vereinigung. Winterthur. 2006-02
- [SIA180] SIA 180. Wärme- und Feuchteschutz im Hochbau. 1999
- [SIA181] SIA 181 1988. Schallschutz im Hochbau. 1988
- [SIA2023] SIA 2023. Lüftung in Wohnbauten. Merkblatt. 2004-06

11.3 Internetseiten

Energiestandards

<http://www.minergie.ch>

Offizielle Homepage von Minergie

<http://www.passiv.de>

Offizielle Homepage des PHI

<http://www.wea.bve.be.ch/messwerte/energieordner/d/>

Energieordner. Anwendungs- und Vollzugshilfen zur Energiegesetzgebung
Ausgabe 2003

Untersuchungen/Berichte

<http://www.empa-ren.ch>

Forschungs-, Pilot- und Demonstrationsprogramm: Rationelle Energienutzung in Gebäuden

<http://www.statistik.admin.ch>

Bundesamt für Statistik

12 Verständnis

12.1 Begriffe

Abluft	Luft, welche den versorgten Raum oder den Raum, in welchen die Luft übergeströmt ist, verlässt.
Absorber (einer Punktwärmequelle)	Die Absorbertechnik lehnt sich direkt an die Sonnenenergie Nutzungstechnik. Auch hier wird Wärme aus Strahlung und Konvektion auf einen Wasserkreislauf übertragen. Der Absorber ist auf dem Schamottemantel des Ofenspeichers angebracht und kommt dabei nicht mit den Rauchgasen in Kontakt. Die Absorberplatten erwärmen das Wasser, welches bei Erreichen der Temperatur in den Hauptspeicher fliesst.
Aussenluft	Luft, welche von aussen in das System oder in eine Öffnung eintritt.
Aussenlufttrate	Aussenluft-Volumenstrom pro Person und Stunde in $m^3/(h \cdot \text{Person})$.
Durchströmbereich	Raum oder Raumgruppe, durch den Luft hindurchströmt (z.B. Wohnzimmer, das mit Luft aus Schlafzimmer versorgt wird, die dann in Nassräume überströmt). Komponenten
Einfache Lüftungsanlage	Lüftungsanlage mit den Funktionen Luftzuführung, Filtern, zumeist Wärmerückgewinnung (WRG), Abluftabführung. Der Verein MINERGIE® verwendet für die einfache Lüftungsanlage den Begriff Konfortlüftung.
Einzelwohnungs- Lüftungsanlage	Lüftungsanlage mit wohnungsweiser Luftaufbereitung; oft auch dezentrale (Lüftungs-) Anlage genannt.
Energiebezugsfläche bzw. EBF0	EBF Summe aller ober- und unterirdischen Geschossflächen, für deren Benutzung ein Beheizen oder Klimatisieren notwendig ist. Es wird zwischen der Energiebezugsfläche mit (EBF) und ohne Raumhöhenkorrektur (EBF0) unterschieden (Vergleichshöhe = 3 m).
Exfiltration	Unbeabsichtigter und unkontrollierter Luftaustritt durch Undichtheiten der Gebäudehülle, verursacht durch Auftrieb, Wind oder Zuluftüberschuss des mechanischen Systems.
Fensterlüftung	Luftaustausch, bewirkt durch das Öffnen von Fenstern.
Fortluft	Luft, welche in die Atmosphäre ausgestossen wird.
Gebäudehüllfläche A	Summe der Flächen, welche bei der Berechnung des Heizwärmebedarfs als Systemgrenze für die Wärmebilanzierung verwendet werden.

	det werden.
Gebäudehüllzahl A/EBF	Verhältnis der Gebäudehüllfläche A zur Energiebezugsfläche EBF.
Globetemperatur	Messtechnische Temperatur, welche annähernd der empfundenen Temperatur (der Strahlungstemperatur) entspricht.
Grundlüftung(sbetrieb)	Minimale Lüftung bei Abwesenheit von Bewohnern.
Heizwärmebedarf Q_h	Wärme, die dem beheizten Raum während eines Jahres bzw. während der Berechnungsperiode (Monat) zugeführt werden muss, um den Sollwert der Innentemperatur einzuhalten, bezogen auf die Energiebezugsfläche.
Infiltration	Unbeabsichtigter und unkontrollierter Lufteintritt durch Undichtigkeiten der Gebäudehülle, verursacht durch Auftrieb, Wind oder Abluftüberschuss des mechanischen Systems.
Intensivlüftung(sbetrieb)	Kurzfristig intensiver Lüftungsbetrieb bei starker Belastung des Innenraumes.
Jahresarbeitszahl	Die Jahresarbeitszahl beurteilt die Effizienz von Wärmepumpen im Betrieb, d.h. unter Berücksichtigung aller Verluste und den Hilfsenergien.
Kaskadenlüftung	Belüftung von Räumen in Serie, mit Einblasen bei Räumen mit geringer Raumlufbelastung und Absaugen in den Räumen mit grosser Raumlufbelastung.
Konfortlüftung	Siehe einfache Lüftungsanlage
Luftdurchlass	Bauelement, das dazu dient, die geplante Luftbewegung in einen oder aus einem behandelten Raum zu erzielen.
Luftdurchlässigkeit der Gebäudehülle	Qualitative, aber auch quantifizierbare Kenngrösse für die Luftdurchlasseigenschaft der Gebäudehülle. Eine Beurteilung der Luftdurchlässigkeit erfolgt mit einem Differenzdruck-Test (Blowerdoor-Test) und bezieht sich auf einen allseitig gleichen Differenzdruck über der Hülle. Bei der Messung wird der Volumenstrom bei verschiedenen Differenzdrücken gemessen und daraus eine geeignete Kenngrösse ermittelt. Als Kenngrössen werden angewendet: <ul style="list-style-type: none">• n_{50}-Wert, Luftleckagestrom bei Normalbedingungen bei einem Differenzdruck von 50 Pa, geteilt durch das Nettovolumen des Raumes bzw. der Raumgruppe;• $v_{a,4}$-Wert, Luftleckagestrom bei Normalbedingungen und 4 Pa Druckdifferenz (aus Messungen extrapoliert), bezogen auf die Hüllenfläche.

(Luft-)Erdregister	Luftkanäle, die zwischen Aussenluftfassung und Gebäude im gebäudenahen Erdreich verlegt sind und als Wärmetauscher zum Erdreich wirken (leichte Kühleffekte im Sommer, Erwärmung im Winter).
Lüftungsanlage	Gesamtheit der Bauelemente, die zur ventilatorunterstützten Lüftung erforderlich sind.
Lüftungsanlage mit Lufterwärmung	Anlage wie einfache Lüftungsanlage, aber zusätzlich mit Lufterwärmung zum Heizen. Wenn die Heizung vollständig über die Lüftung erfolgt (Nur-Luft-System), wird die Lüftungsanlage auch als «Luftheizung» bezeichnet.
Lüftungskanal	Lüftungskanal, Lüftungsleitung Luftführungselement (in Rohr- oder Schlauchform, rund, rechteckig oder oval).
Lüftungskonzept	Alle Vorkehrungen, welche einen geplanten Luftaustausch bewirken.
Luftvolumenstrom	Pro Zeiteinheit durch einen definierten Querschnitt durchströmendes Luftvolumen in m ³ /h oder m ³ /s.
Mechanische Lüftung	Luftaustausch, angetrieben von einem oder mehreren Ventilatoren.
Mehrwohnungs-Lüftungsanlage	Lüftungsanlage mit zentralem Luftaufbereitungsgerät für mehrere Wohnungseinheiten; oft auch Zentralanlage oder zentrale Lüftungsanlage genannt. Ausführung als einfache Lüftungsanlage oder als Lüftungsanlage mit Lufterwärmung.
Nachtlüftung	Lüftung (natürlich oder mechanisch), um dank nächtlicher Untertemperatur im Freien eine Kühlung der Räume, inkl. der Gebäudestruktur, zu bewirken.
Natürliche Lüftung	Luftaustausch, angetrieben von Wind- und/oder Auftriebskräften (Fensterlüftung, thermische Lüftung über vertikalen Schacht, so genannte Schachtlüftung, sowie Infiltration/Exfiltration).
Staubverschmelzung	Staub, welcher durch heisse Oberflächen verschwelt.
Stosslüftung	Bewusste, intensive Fensterlüftung während einer eingeschränkten Zeitperiode.
Überströmbereich	Zone, in der die Luft aus einem Raum in einen anderen Raum durchtritt (Durchlass, Türspalt).
Zuluft	Luft im System nach der Luftbehandlung bis zum Eintritt in den versorgten Raum.

12.2 Abkürzungen

KWL	Kontrollierte Wohnugslüftung
EBF	Energiebezugsflächen
PHI	Passivhaus-Institut Darmstadt
EFH	Einfamilienhaus
MFH	Mehrfamilienhaus
FBH	Fussbodenheizung
WEZ	Wärmeerzeuger
LW	Luftwechsel
JAZ	Jahresarbeitszahl

13 Anhang

Im Anhang sind folgende Unterlagen zu finden:

- [1] Verwendete Formeln
- [2] Interview Bewohner
- [3] Interview Fachpersonen

[1]

Formelverzeichnis

1 Anhang Formelverzeichnis

In der Erläuterung der Formelzeichen bedeuten die Zahlen in den Klammern gewählte Konstanten für die Erstellung der Nomogramme.

1.1 Volumenstrom anhand der Wärmeleistung

1.1.1 Temperaturverlust durch die Wärmeverteilung

$$\Delta t = (t_{LE} - t_{Umg}) \cdot \left(1 - e^{-\left(\frac{1 \cdot 2 \cdot \pi}{\dot{V} \cdot \rho \cdot c_L \cdot \left(\frac{2}{\alpha_i \cdot d} + \frac{1}{\lambda} \cdot \ln\left(\frac{d+2 \cdot \delta}{d} \right) + \frac{2}{\alpha_a \cdot (d+2 \cdot \delta)} \right)} \right)} \right) \quad \text{[Formel 1]}$$

Δt	Temperaturverlust durch die Wärmeverteilung	K
l	Leitungslänge / Lüftungsrohrlänge	m
δ	Dicke der Dämmung / Dämmstärke	m
t_{LE}	Temperatur nach Lufterhitzer (50)	°C
t_{Umg}	Temperatur der Umgebung (20)	°C
d	Durchmesser Rohr (0.08)	m
V'	Volumenstrom (30/3600)	m ³ /s
ρ	Dichte der Luft (1.15)	kg/m ³
c_L	Wärmekap. der Luft (1006)	J/(kg K)
λ	Wärmeleitfähigkeit Dämmung (0.04)	W/(m K)
α_a	Wärmeübergang (8)	W/(m ² K)
α_i	Wärmeübergang (siehe Berechnung ca. 10)	W/(m ² K)

Basis für die Formel 1 sind die Formeln 2 bis 4

1.1.2 Temperaturverlust durch die Wärmeverteilung

$$\Delta t = (t_{LE} - t_{Umg}) \cdot \left(1 - e^{-\left(\frac{l \cdot U'}{\dot{V} \cdot \rho \cdot c_L} \right)} \right) \quad [\text{Formel 2}]$$

Δt	Temperaturverlust durch die Wärmeverteilung	K
t_{LE}	Temperatur nach Lufterhitzer (50)	°C
t_{Umg}	Temperatur der Umgebung (20)	°C
e	Eulersche Zahl (2.718281...)	-
l	Leitungslänge / Lüftungsrohrlänge	m
U'	Wärmedurchgangs-Koeffizient eines Rohres	W/(m K)
\dot{V}	Volumenstrom (30/3600)	m ³ /s
ρ	Dichte der Luft (1.15)	kg/m ³
c_L	Wärmekap. der Luft (1006)	J/(kg K)

1.1.3 Wärmedurchgangs-Koeffizient eines Rohres

$$U' = \frac{2 \cdot \pi}{\frac{2}{\alpha_i \cdot d} + \frac{1}{\lambda} \cdot \ln\left(\frac{d + 2 \cdot \delta}{d}\right) + \frac{2}{\alpha_a \cdot (d + 2 \cdot \delta)}} \quad [\text{Formel 3}]$$

[CeHo96]

U'	Wärmedurchgangs-Koeffizient eines Rohres	W/(m K)
α_i	Wärmeübergang (siehe Berechnung ca. 10)	W/(m ² K)
α_a	Wärmeübergang (8)	W/(m ² K)
d	Durchmesser Rohr (0.08)	m
λ	Wärmeleitfähigkeit Dämmung (0.04)	W/(m K)
δ	Dicke der Dämmung / Dämmstärke	m

1.1.4 Wärmeübergangskoeffizient

$$\alpha_i = 4.2 \cdot \frac{w_0^{0.75}}{d^{0.25}} = 4.2 \cdot \frac{\left(\frac{4 \cdot \dot{V}}{d^2 \cdot \pi} \cdot \frac{273.15}{t_L + 273.15} \right)^{0.75}}{d^{0.25}} = 10.54 \quad [\text{Formel 4}]$$

1.1.5 Wärmeleistungsbedarf

$$\dot{V}_{\text{Zul}} = \frac{Q_{\text{Raum}}}{\rho \cdot c_L \cdot \Delta t_{\text{Raum}}} \cdot 3600 \frac{\text{s}}{\text{h}} \quad \text{bzw.} \quad \dot{V}_{\text{Zul}} = \frac{Q_{\text{Whg}}}{\rho \cdot c_L \cdot \Delta t_{\text{Raum}}} \cdot 3600 \frac{\text{s}}{\text{h}} \quad [\text{Formel 5}]$$

[CeHo96]

ρ	Dichte der Luft (1.15)	kg/m ³
c_L	Wärmekap. der Luft (1006)	J/kgK
V'	Volumenstrom	m ³ /h
Q_{Raum} bzw. Q_{Whg}	Wärmeleistungsbedarf	W
Δt_{Raum}	Temperaturgefälle zum Heizen	K

Basis für die Formel 5 sind die Formeln 6 und 7

1.1.6 Temperaturgefälle zum Heizen

$$\Delta t_{\text{Raum}} = t_{\text{Ausl}} - t_i \quad [\text{Formel 6}]$$

Δt_{Raum}	Temperaturgefälle zum Heizen	K
t_{Ausl}	Temperatur beim Luftauslass	°C
t_i	Temperatur im Raum	°C

1.1.7 Temperatur beim Luftauslass

$$t_{\text{Ausl}} = t_{\text{LE}} - \Delta t \quad [\text{Formel 7}]$$

Δt	Temperaturverlust durch die Wärmeverteilung	K
t_{LE}	Temperatur nach Lufterhitzer	°C
t_{Ausl}	Temperatur beim Luftauslass	°C

1.2 Volumenstrom anhand des Feuchtegehalts der Luft

Ein nicht stark beeinflussbarer aber für die Behaglichkeit wichtiger Parameter ist der Feuchtegehalt der Luft. Die Raumlufffeuchte wird durch den mechanischen Luftwechsel, der internen Feuchtelast und dem Feuchtegehalt der Aussenluft beeinflusst.

1.2.1 Berechnung des abs. Feuchtegehalts im Raum

$$x_i = 0.622 \cdot \frac{p_s \cdot \frac{\varphi_i}{100}}{p - p_s \cdot \frac{\varphi_i}{100}} \cdot 1000 \frac{\text{g}}{\text{kg}} = 0.622 \cdot \frac{288.68 \cdot \left(1.098 + \frac{t_i}{100}\right)^{8.02} \cdot \frac{\varphi_i}{100}}{p - 288.68 \cdot \left(1.098 + \frac{t_i}{100}\right)^{8.02} \cdot \frac{\varphi_i}{100}} \cdot 1000 \frac{\text{g}}{\text{kg}}$$

[CeHo96]

[Formel 8]

x_i	abs. Feuchte im Raum	g/kg
t_i	Temperatur im Raum	°C
φ_i	rel. Feuchte im Raum	% r.F.
p	Luftdruck (969000)	Pa

Basis für die Formel 8 ist die Formel 9

1.2.2 Sättigungsdruck der Raumluff

$$p_s = 288.68 \cdot \left(1.098 + \frac{t_i}{100}\right)^{8.02} \quad \text{[Formel 9]}$$

p_s	Sättigungsdruck der Raumluff	Pa
t_i	Temperatur im Raum	°C

1.2.3 erforderliche zusätzliche abs. Feuchte

$$x_{\text{erf}} = x_i - x_e \quad \text{[Formel 10]}$$

x_{erf}	erforderliche zusätzliche abs. Feuchte	g/kg
x_i	abs. Feuchte im Raum	g/kg
x_e	abs. Feuchte aussen	g/kg

1.2.4 erforderlicher Aussenluftmassenstrom f=(Feuchte)

$$\dot{m}'_{Zul} = \frac{\dot{m}_D}{x_{erf}} \cdot \frac{1000 \frac{g}{kg}}{24h} \quad [\text{Formel 11}]$$

\dot{m}'_{Zul}	erforderliche Aussenluftmassenstrom	kg/h
\dot{m}'_D	Feuchtelast (Dampflast) im Raum	l/h bzw. kg/h
x_{erf}	erforderliche zusätzliche abs. Feuchte	g/kg

1.2.5 erforderlicher Aussenluftvolumenstrom f=(Feuchte)

$$\dot{V}'_{Zul} = \frac{\dot{m}'_{Zul}}{\rho} \cdot \frac{1}{1 - \frac{\eta_f}{100}} \quad [\text{Formel 12}]$$

\dot{m}'_{Aul}	erforderliche Aussenluftmassenstrom	kg/h
\dot{V}'_{Aul}	erforderliche Aussenluftvolumenstrom	m ³ /h
x_{erf}	erforderliche zusätzliche abs. Feuchte	g/kg
ρ	Dichte der Luft (1.15)	kg/m ³

[2]

Interview Bewohner



Auswertung Interview Bewohner

Erstellt: 01.12.2005 Sph / Tsa
03.05.2006 rev. Sph

Die Zahlen in der Klammer stehen für eine Person.
Die Reihenfolge der Antworten ist zufällig gewählt.
Die Antworten sind sinngemäss niedergeschrieben.

Was für ein Wärmeverteilsystem haben Sie? Luftheizung Bodenheizung Konvektoren Punktwärmequelle

Bemerkung / Ergänzung: EBF: _____ m² Personen: _____ Anz. Luftmenge: _____ m³/h

Was heisst für Sie Wohnen?

- Sich wohl fühlen. (3x)
- Gerne sich an einem Ort aufhalten. (2x)
- Sich geborgen fühlen.
- Wärme empfinden
- Zuhause
- Ein Ort mit Ausstrahlung
- Einrichten, wie man will. (offener Grundriss)
- Familie, Gemeinschaft
- Vergleich: Wie gut Essen.

Wie ist die Entscheidung für dieses "Wärmeverteilsystem" gelaufen?

- War früher für ein Passivhaus zwingend. (2x)
- Gekauft wie vorgefunden.
- Gemietet wie vorgefunden.
- Ziel war es die Ökologie zu berücksichtigen. Die Luftheizung wurde vom Planer vorgeschlagen beziehungsweise empfohlen.
- Es bestand Interesse für MINERGIE oder allgemein für eine ökologische Bauweise.

Was wurde bezüglich Kosten kommuniziert und wie verhielten sich schlussendlich die Kosten?

- Der Gesamtkostenplan wurde eingehalten.
- Angekündete Kosten wurden nicht überschritten.
- Der angekündete Kostenknick wegen der wegfallenden Heizung traf nicht ein. Die Mehraufwendungen für die Lüftung übertrafen die gesparten Ausgaben der Heizung.
- Es wurde nichts kommuniziert, nicht einmal dass der elektrische Nachwärmer der Luftheizung über den Wohnungszähler läuft.
- Es wurde nichts kommuniziert.
- Es wurde nichts kommuniziert.

Wie empfinden Sie die Bedienung und den Unterhalt der Lüftungsanlage?

- Einfach: 3 Luftvolumenstrom-Stufen. Der Filter wird durch den Hausabwart gewechselt.
- Einfach: 3 wählbare Luftvolumenstrom-Stufen. Zusätzlich kann eine Raumluft-Solltemperatur eingestellt werden.
- Einfach: 3 Luftvolumenstrom-Stufen oder automatischer Betrieb wählbar. Zusätzlich kann eine Raumluft-Solltemperatur eingestellt werden.
- Einfach: 3 wählbare Luftvolumenstrom-Stufen. Von Zeit zu Zeit müssen die Bodenauslässe und die Wandeinlässe gereinigt werden.
- Einfach: Von Zeit zu Zeit muss der Filter ausgetauscht werden (Ersatzfilter bei Abwart).
- Einfach: Ein/Aus und Mit/Ohne Nachwärmer. Einzige Wartung: Von Zeit zu Zeit muss der Filter ausgetauscht werden.

Wie beurteilen Sie die Behaglichkeitsparameter?

Raumlufttemperatur

- Positiv
- Grundsätzlich positiv. Bei Sonnenschein steigt die Temperatur rasch um ein bis zwei Kelvin an.
- Grundsätzlich positiv. Bei Besuch (mehreren Personen) wird es rasch zu warm.
- Grundsätzlich positiv. Ich würde jedoch verschiedene Raumlufttemperaturen einstellen, wenn ich es könnte.
- Negativ. Im Sommer sinkt die Raumlufttemperatur selten unter 28°C und im Winter erreicht man im Wohnzimmer knappe 20°C. Das Bad mit nur noch etwa 18°C ist viel zu kalt.

Luftfeuchtigkeit

- Grundsätzlich positiv
- Grundsätzlich positiv (45-50%)
- Im Winter negativ (ca. 40%)
- Im Winter negativ
- Im Winter negativ. Wäre aber bei anderen Wärmeverteilensystemen auch zu tief. Zwei Stunden vor dem Schlafengehen der Kinder, werden diese Zimmer mittels Luftbefeuchter konditioniert.

Luftzug

- Nicht bemerkbar, positiv (3x)
- Nicht bemerkbar, positiv. Beim ZUL-Auslass ist barfuss ein Luftzug spürbar.
- Nicht bemerkbar, positiv (Herr X)
- Bemerkbar an den Füßen, negativ (Frau X)

Gerüche

- Kein Problem, wir haben eine dritte Stufe. (2x)
- Kein Problem, wir haben nicht einmal einen Dampfabzug.
- Kein Problem, wir haben nicht einmal eine Stufenregelung.
- Kein Problem, kurzzeitige Belastung beim Kochen ist ja normal.
- Kein Problem, wir empfinden vielleicht einmal Fleischgerüche als unangenehm.

Fortsetzung: Wie beurteilen Sie die Behaglichkeitsparameter?

Schall

- Kein Problem
- Kein Problem, ich hatte am Anfang am Abend vor dem Schlafen einwenig Mühe.
- Kein Problem, Lüftung ist hörbar, aber der Kühlschrank ist jedoch lauter wie die Lüftung.
- Kein Problem, bei Stufe drei jedoch im WC gut hörbar.
- Grundsätzlich kein Problem, bei Umluftbetrieb sind die kleinen Einlässe gut hörbar. Im WC ist es weniger störend, im Wohnbereich und Bad ist es jedoch störend.

Bodenbelag

- Angenehm (Birkenbaum)
- Angenehm (Parkett) (2x)
- Angenehm (Parkett und Steinplatten). Die Steinplatten sind wenig kühler als der Parkett.
- Zu Kalt empfunden (Steinplatten)

Schadstoffe wie Rauch, Tiere oder Farben

- Nur im Umluftbetrieb und Raucher als Besucher kann es zu unangenehmen Schadstoffbelastungen kommen.

Ergänzungen / Bemerkungen

- Fenster werden angenehm empfunden.
- Regelung nicht Raumweise
- Eine Nachbarsfamilie empfindet den Temperaturunterschied zwischen Wohnzimmer und Kinderzimmer als unangenehm.
- Warum ist das Schlaffzimmer am kältesten?

Was haben andere Personen (Bekannte und Besucher) empfunden und wie haben diese sich zur Luftheizung geäußert?

- Keine Reaktionen. Vielleicht einmal eine Bemerkung, dass wir keine Heizkörper haben.
- Keine Reaktionen. Bei Gesprächsaufnahme meinerseits konnte kein Zugang zur Luftheizung gefunden werden. Die Luftheizungen sind für viele einfach utopisch.
- Strassenlärm hört man nicht.
- Kann man Wäsche in einer solchen Wohnung trocknen?
- Die Besucher (speziell Frauen) können nicht entscheiden ob sie die Pullover anbehalten oder abziehen (häufiges an- bzw. abziehen).
- Der Elektroheizstab an der Wohnzimmerdecke wird angesprochen (Was ist das?).
- Die Raumlufttemperatur (20-22°C) wird z.T. als frisch empfunden.
- Im Sommer wird die Wohnung als angenehm kühl empfunden (24°C).
- Wenn die Sonne plötzlich scheint, wird der Raumlufttemperatur-Anstieg bemerkt.
- Angenehmes Wohnklima wird angesprochen.

Was würden Sie Ihrem besten Freund bezüglich des Wärmeverteilsystems Luftheizung raten?

- Luftheizung ja: Gesünder und billiger
- Luftheizung ja/nein: Stockwerkabhängig, in exponierten Wohnungen Probleme.
- Luftheizung ja: ZUL-Kanäle isolieren!
- Luftheizung nein: Kontrollierte Wohnungslüftung ein muss. Radiator, da einzeln regulierbar und nicht träge.
- EFH Luftheizung ja, MFH Luftheizung nein: Skepsis gegenüber Luftheizung.
- Zusätzlich ein Schwedenofen.
- Mein Freund soll bei mir Probewohnen.
- Luftheizung ja: Einziges Problem Regulierung
- Luftheizung ja: Wenn schon kontrollierte Wohnungslüftung, dann auch Luftheizung.
- Luftheizung ja: Estetik
- Kontrollierte Wohnungslüftung nur zu empfehlen.
- Will mein Freund Kinder?
- Wie warm braucht mein Freund?
- Mag er Holz? Oder doch lieber Massiv?

Würden Sie sich heute nochmals für eine Luftheizung entscheiden?

- Ja (Mieter)
- Ja, jedoch keine Umluft.
- Ja, jedoch noch mehr Dämmung (allgemein).
- Ja, jedoch Zuluft zusätzlich dämmen.
- Ja, wobei die dezentrale Versorgung noch durchzudenken wäre. (Zentrale Versorgung hat den Vorteil der Wartung, welche nur durch eine Person ausgeführt wird. Dezentral ist man nicht abhängig von den anderen Mieter.)
- Ja und Nein, sicher Energiebewusst bauen, sicher kontrollierte Wohnungslüftung, Luftheizung noch unklar.
- Nein, Heizen und Lüften trennen.
- Nein, Heizen und Lüften trennen. Wärmebedarf und Frischluftbedarf laufen entgegengesetzt. Fussbodenheizung da Erfahrung vorhanden.

Was wollen Sie uns noch für unsere Arbeit mit auf den Weg geben?

- Schalldetails sehr gut planen.
- Möglichst einfach (keine Umluft).
- Dichtheit Kanalnetz
- Fortluft-Auslass nicht unter Balkonen
- Zonenaufbereitung macht nur Sinn bei geschlossenen Türen.
- Schlitzauslass in Vorhangschiene ist nur zu empfehlen.
- ZUL-Kanaldämmung sehr wichtig
- Eingelegte ZUL-Kanäle haben zu Rissen in Decke geführt. (Entlang der Rohre)
- Schalldetails sehr gut planen (Abluft)
- Die meisten Bewohner wollen 22°C.
- Sonnenstoren nicht durch Reverenzwohnung steuern. Übersteuerung durch Bewohner ermöglichen.
- Die Zimmerzuordnung ist zu überdenken. Elternschlafzimmer erhalten immer häufiger die Kinder. Anstelle eines Kinder- oder Elternzimmers gibt es auch immer mehr Büroräume.
- Exponierte Wohnungen sind speziell zu beachten.
- Die beim Einzug bekommene Wegleitung hat viele nicht einhaltbare Punkte.
- Am Anfang lief vieles schief, nach Einregulierung und Anpassung jedoch Betrieb in Ordnung. Die Einregulierung benötigt sehr viel Zeit.
- Einregulierung und Inbetriebnahme zeitintensiv
- Volumenstromregulierung wichtig.
- Belegung ist ein grosser Einfluss.
- Erfolgskontrolle im ersten Jahr nur zu empfehlen.
- Ein Schwedenofen erlaubt eine rasche Raumlufttemperatur-Erhöhung und steigert die Behaglichkeit.
- Während der Heizperiode entstehen Risse im Parkett bei den Bodenauslässen, nach dem Heizbetrieb schliessen sich diese Risse beziehungsweise Spalten wieder.
- Luftheizung heisst gesundes Wohnen. Seit Einzug in diese Wohnung (vor 5 Jahren) bin ich nicht mehr erkrankt.
- Eher erkältet seit Einzug in Wohnung, Freund jedoch nicht.
- Ein guter Betrieb der Luftheizung ist erst nach Anlaufschwierigkeiten beziehungsweise der Einregulierung möglich.



HTA -> HOCHSCHULE FÜR TECHNIK+ARCHITEKTUR LUZERN
ZIG -> ZENTRUM FÜR INTEGRALE GEBÄUDETECHNIK

[3]

Interview Fachpersonen



Auswertung Interview Fachpersonen

Erstellt:	27.03.2006	Sph	Die Zahlen in der Klammer stehen für eine Person.
	03.05.2006 rev.	Sph	Die Reihenfolge der Antworten ist zufällig gewählt. Die Antworten sind sinngemäss niedergeschrieben.

Pro & Contra (Bestätigen oder dementieren Sie folgende Aussagen)

Eine Luftheizung ist günstiger als ein konventionelles Wärmeverteilsystem.

trifft zu	(2) (3) (5) (7)
trifft eher zu	()
trifft eher nicht zu	(1)
trifft nicht zu	(6)
andere	günstiger machbar (4)

Eine Luftheizung spart die Installationskosten einer Wärmeverteilung ein.

trifft zu (2) (3) (7)

trifft eher zu (1) (5) (6)

trifft eher nicht zu ()

trifft nicht zu ()

Eine Luftheizung beeinflusst die Behaglichkeit positiv.

trifft zu (7)

trifft eher zu ()

trifft eher nicht zu ()

trifft nicht zu (1) (2) (3) (5) (6)

andere eine Frage des Preises (4)

Eine Luftheizung beeinflusst die Behaglichkeit negativ.

trifft zu	(5)
trifft eher zu	(7)
trifft eher nicht zu	(6)
trifft nicht zu	(1) (2) (3)
andere	eine Frage des Preises (4)

Eine Luftheizung trocknet die Raumlufte aus.

trifft zu	(7)
trifft eher zu	(1) (6)
trifft eher nicht zu	()
trifft nicht zu	(2) (3) (4) (5)

Eine Luftheizung trocknet die Raumluft mehr als eine einfache Lüftungsanlage aus.

trifft zu (6) (7)
trifft eher zu (1)
trifft eher nicht zu ()
trifft nicht zu (2) (3) (4) (5)

Eine Luftheizung benötigt mehr Platz als eine einfache Lüftungsanlage.

trifft zu (1) (2) (4) (6)
trifft eher zu ()
trifft eher nicht zu ()
trifft nicht zu (3) (5) (7)

Eine Luftheizung verursacht Schallprobleme.

trifft zu ()

trifft eher zu (7)

trifft eher nicht zu (1)

trifft nicht zu (2) (3) (4) (5) (6)

Eine Luftheizung führt zu Beschwerden / Probleme.

trifft zu ()

trifft eher zu ()

trifft eher nicht zu (3)

trifft nicht zu (1) (2) (4) (5) (6) (7)

Die Branche hat zuwenig Erfahrung mit Luftheizungen.

trifft zu (1) (2) (3) (4)

trifft eher zu (5) (6) (7)

trifft eher nicht zu ()

trifft nicht zu ()

Heizen und Lüften soll prinzipiell nicht durch dasselbe System erfolgen.

trifft zu (4) (5) (7)

trifft eher zu (6)

trifft eher nicht zu (1)

trifft nicht zu (2) (3)

Überblick

Was fällt Ihnen zur Thematik „Wärmeverteilung - Luftheizung“ ein. (Analog: Heizkörper bzw. Bodenheizung)

Luftheizung

Je besser das Gebäude ist, desto weniger hat das Wärmeverteilsystem einen Einfluss (6)
Einfach und günstig (2) (7)
Anspruchsvolles System (1)
Sehr gute Gebäudehülle (1) (3) (7)
Einsatz nur im Passivhaus (2)
Reduzierte Installation / Technik (2)
Kleinere Wärmekapazität (3)
Akustik (3) (5), Hygiene (3) (5)
Luftgeschwindigkeiten (3)
Kaltluftabfall Lüftung (3)
Unabhängige Kanalführung (3) (5)
Lüftungseffizienz? (5)
Zonenregulierung? (3)
Wenig Wasserleitungen / Elektrosmog positiv (3)

Heizkörper

Je besser das Gebäude ist, desto weniger hat das Wärmeverteilsystem einen Einfluss (6)
Einfaches System (3) (5)
Bekannt, gewohnt, Know-how gut (3) (5)
Viele Systemvarianten möglich (3)
Gute Einzelraumregulierung (1) (7)
Einfache Regulierung (5) (7)
Fehlertolerant (5)
Hohe Vorlauftemperatur (1)
Grosse Luftbewegung (3)
Kein Kaltluftabfall (3)
Besseres Wärmegefühl in der Nähe von HK (2)
Ästhetik (3)
Einschränkungen in der Möblierung (2) (3)
viele Wasserleitungen / Elektrosmog negativ (3)

Bodenheizung

Je besser das Gebäude ist, desto weniger hat das Wärmeverteilsystem einen Einfluss (6)
Bekannt, gewohnt, Know-how gut (3)
Grosse Irrglauben in der Bevölkerung (3)
Träges System (1) (3)
Tiefe Vorlauftemperatur (1)
Selbstreguleffekt (bei tiefer Vorlauftemp.) (5)
Sehr gute Gebäudehülle (5)
Alternative Energien gut nutzbar (2)
Strahlungsprofil gut (3)
Kein Kaltluftabfall (3)
Wasserleitungen verdeckt montiert (3)
viele Wasserleitungen / Elektrosmog negativ (3)
Nur mit einfacher Lüftung verwenden (5)

Welche Vorteile haben diese Wärmeverteilssysteme?

Luftheizung

Flinkes System (1) (6)
Niedrige Kosten (2) (3)
Wenig Technik (2) (7)
Flexible Verteilung (5)
Behaglichkeit gut (3)
Verzicht auf aktives Heizsystem (5)
Kein Wasser (Elektrosmog) (3)

Heizkörper

Bekannt (5)
Einzelraumregulierung (1) (3) (4) (7)
Flexibel in Bezug auf Lasten (5)
Besseres Wärmegefühl in der Nähe von HK (2)
Temperatur und Luftvol. sep. regulierbar (3) (7)

Bodenheizung

Unsichtbar (5)
Einzelraumregulierung (4)
Komfort / Behaglichkeit (5)
Tiefe Vorlauftemperatur (4)
Selbstregeleffekt (tiefe Vorlauftemp.) (1) (6)
Alternative Energien gut nutzbar (2)
Temperatur und Luftvol. sep. regulierbar (3)

Welche Nachteile haben diese Wärmeverteilssysteme?

Luftheizung

Wärmetransport mit Luft (6)
keine Einzelraumregulierung (1) (3) (7)
Aufwendige Einzelraumregulierung (4)
Luftvolumenstrombestimmung (3)
Luftvolumenstrom nicht reduzierbar (2)
Hohe Vorlauftemperatur (4)
Komforteinbusse (4) (6)
warme Luft führt zum Gefühl v. trockener Luft (5)

Heizkörper

Platzbedarf / weiteres Element (5) (6) (7)
Ästhetik (1) (7)
Heizkörper vor Glasfronten (4)
Einschränkungen in der Möblierung (2) (7)
Zusätzliches Wärmeverteilssystem (5)
Kosten (3) (5)
Aufwand bei der Reinigung (6)

Bodenheizung

Träges System (1) (7)
Träges System (hohe Vorlauftemp.) (6)
Zusätzliches Wärmeverteilssystem (5)
Kosten (3) (5) (7)
Einzelraumregulierung nur theoretisch (6)

Welches sind die häufigsten Vorurteile, falschen Erwartungen und Irrglauben die der Laie hat?

Luftheizung

Trocknet Luft aus (1) (5)
Weniger Platzbedarf (4)
Luftheizung ist günstiger (4)
Grosser Energietransport (2)
Sehen Vorteile gemäss PH, sehen jedoch nicht die Komforteinbusse gemäss PH) (4)
Lüften = heizen (6)
Passivhaus = Haus ohne Heizung (4)
Feuchte, ionisierte Luft (4)

Heizkörper

Ästhetik (1) (7)
Kaltluftabfallkompensation (4)
Einzelraumregulierung (wird von Benutzer nicht genutzt bzw. nicht optimal / richtig genutzt) (3)

Bodenheizung

Warmer Fussboden (1) (2) (3) (4) (7)
Aufgedunsene Füsse (4) (5)
Keine Deckenheizung (4)
Nicht möglich zu kühlen (4)
Einzelraumregulierung (wird von Benutzer nicht genutzt bzw. nicht optimal / richtig genutzt) (3)

Welche Kosten nehmen Sie bei den jeweiligen Wärmeverteilssystemen an?

Luftheizung

~30'000 Fr / EFH (Haustechnik ohne Erzeugung) (2)
~5-6'000 Fr. / EFH (KWL 25'-30'000.-) (5)
~2-3'000 Fr. / Whg. MFH (KWL 15'-20'000 / Whg.) (5)
~25'000 Fr. / Wärmeerzeugung (5)
~45'000 Fr. / EFH (150-180 Fr. / m2) (7)

Heizkörper

~45-50 Fr/m²_{EBF} (2)
~1'000 Fr. / Heizkörper (3) (5)
~40'000 Fr. / EFH (50-100 Fr. / m2) (5) (7)
~10'000 Fr. / Whg. MFH (50-100 Fr. / m2) (5)
~25'000 Fr. / Wärmeerzeugung (5)
~20'000 Fr. / KWL (7)

Bodenheizung

~45-50 Fr/m²_{EBF} (2)
~40'000 Fr. / EFH (50-100 Fr. / m2) (5) (7)
~10'000 Fr. / Whg. MFH (50-100 Fr. / m2) (5)
~25'000 Fr. / Wärmeerzeugung (5)
~20'000 Fr. / KWL (7)

Planung allgemein (Interview ab hier nur auf Luftheizung bezogen)

Welche Fehler und Erfahrungen haben Sie gemacht? Bzw. auf welche Punkte soll man in der Planung speziell achten?

Informationspolitik (Bauherr – Betreiber – Benutzer) (3) (5)

Möglichst im Vorprojekt schon Fachplaner hinzuziehen. (Fachplaner = Lüftungsfachperson mit Erfahrung mit Luftheizung) (5)

Randbedingungen haben einen grossen Einfluss (6)

Spezifische Wärmeleistung; $<10 \text{ W/m}^2$ (1), Wärmeabgabe Luftverteilung (1),

Nicht zu hoher Volumenstrom; 4-Zi-Whg $\sim 150 \text{ m}^3/\text{h}$ (1), Jeder m^3/h ist wichtig. (6)

Luftverteilung zu klein: Akustikprobleme (7)

Hygiene Luftverteilung: runde oder ovale Kanäle ein muss. (7)

Dämmung Luftverteilung (1) (5), möglichst keine Luftverteilung ausserhalb Dämmperimeter (1)

Dichtheit Luftverteilung (1) (3), Gebäudehülle muss sehr gut sein, erst dann ist eine Luftheizung möglich (2) (3)

Räume thermische getrennt bei Leichtbau. (6) Kaskade nicht mehr möglich. (6)

Umluft sehr problematisch (Geruchsübertragung) (4)

Belegung: Personen/ m^2 (EFH ~ 2 Personen/ 200m^2) (2)

Lieferantendaten garantieren lassen. Lieferantendaten bezogen auf realistische Umgebungsbedingungen? (3)

Abgleich mindestens mit Klappen (nicht mit Schaumstoffstücken o.ä.) (7)

Mit Klappen lässt sich das Luftnetz nicht abgleichen (nur Tellerventile lassen sich so fein abgleichen) (4)

Einzelraumregulierung nicht realisierbar (4)

Thermostaten müssen ein grosses I-Glied aufweisen, damit der Aufheizbetrieb gewährleistet ist. (4)

Die Kalkulation der Luftheizung haben Sie uns beschrieben. Wo ist der Mehraufwand gegenüber einer einfachen Lüftungsanlage (KWL)?

Luftherhitzer (1) (2) (3) (4) (6),
Grössere Luftverteilung (1), grössere Dämmung (1), Dämmung ~1000 Fr. (2),
Planung (auch im Vergleich KWL + H) (1),
Inbetriebnahme (Einregulierung, zusätzliches Abdichten und Dämmen) (1),
EFH ~5000-8000.- (1)
+1 Auslass (Wohnen) ~500 Fr. (2), mehr Auslässe (4) (6)
Anbindung Heizung, Regelung (3)
Abgleich, Zonenregulierung, schlechte Gebäudehülle --> Umluft (4)
Wärmeerzeugung abzüglich Nasszellen-Abluft (5)
, evt. Badheizkörper, Luftmengenregulierung (6)

Wie sieht der Planungsaufwand im Vergleich Luftheizung und einfachen Lüftungsanlage (ohne Luftherhitzer) aus?

Planungsaufwand Luftheizung > einfache Lüftungsanlage (1) (3)
Planungsaufwand Luftheizung = einfache Lüftungsanlage *1/3 (Mehraufwand: Luftmengenbetrachtung und Energiefluss im Haus) (2)
Planungsaufwand Luftheizung > einfache Lüftungsanlage und Heizung (1) (4)
Planungsaufwand Luftheizung = einfache Lüftungsanlage (5) (6) (7)
Planungsaufwand Luftheizung < einfache Lüftungsanlage und Heizung (3)

Planung im Detail

Ist das zentrale oder das dezentrale System zu bevorzugen?

Zentrales System ist zu bevorzugen. (5)

Dezentrales System ist zu bevorzugen. (1) (2) (4) (6)

Egal welches System, System ist objektspezifisch zu wählen. (3) (7)

Begründung

Vorteile dezentrales System:

Volumenströme individuell einstellbar (2), psychologisch besser, da Volumenströme selber wählbar (2), individuelle Heizkostenabrechnung möglich (3) (7), einfachere Regelung (4), flexible Nutzung möglich (auch Ferien berücksichtbar) (6), bessere WRG (4), kleinerer Aufwand beim Verteilsystem (Material, Unterhalt, Planung) (6)

Nachteile dezentrales System:

Aufwand Heizungsverteilung gross (3),

Vorteile zentrales System:

professionelles Lüftungsgerät (5), richtige bzw. professionelle Elemente (5), ETV signifikant besser (5), Hygiene (5), Betrieb und Unterhalt durch eine Person (5) (7)

Nachteile zentrales System:

Verteilverluste (1), anspruchsvollere Steuerung / Regelung (1), grösserer Platzbedarf (1),

Neutral:

kein Preisunterschied (4)

Wie dimensionieren Sie den Zuluftvolumenstrom?

Hygienischer LW pro Raum, 30-36 m³ / Person (5)

Primär: Hygienischer LW pro Wohneinheit, sekundär Hygienischer LW pro Raum (2)

Grösster Volumenstrom aus: Heizlast, Hygiene Feuchte, Hygiene Aussenluft; Anzustreben ist nach Hygiene Aussenluft (3) (6)

Über die Heizlast (1) (4), jeder Raum wird einzeln berechnet (1)

Was muss man bei Luftaus- und Einlässen speziell beachten? (Im Vergleich zur einfachen Lüftungsanlage)

Ein zusätzlicher Auslass in der Küche (1), ein zusätzlicher Auslass im Wohnzimmer (1)

Nicht alle Typen sind für Luftheizung geeignet (2), Position (Vorgaben Hersteller) (2), Bodenauslässe nicht hygienisch (2),

Distanz zwischen Auslass und Einlass (Kurzschluss) (3) (4)

Position tendenziell im Raum oben (bei einfacher Lüftungsanlage im Raum unten) (3)

Möblierung beachten (bei Lichtschalter empfohlen) (5)

Geräusche und Ästhetik (7)

Welche Aspekte soll man bezüglich des Schallschutzes beachten? (nicht nur bei Luftheizung)

Schalldämpfer nach Gerät (2) (3) (4), Schalldämpfer vor jedem Raum (Telephoniegeräusche) (2) (3)

Strömungsgeräusche durch den Kanal (3) (5), Schalldämpfer möglichst beim Auslass platzieren (3)

Schalleistung Ventilator (1), Überströmung Zimmer (1),

Bei Klappen jeder Auslass separat schall dämpfen. (4)

Wo sind die Systemgrenzen einer Luftheizung? (Machbarkeits- und Einsatzgrenzen)

Keine Grenzen (3), Geld (4), Platzbedarf (4)

Passivhausstandard (5) (6), Spezifische Leistung von 10 W/m² (1), Gebäudehülle (2) (7), Belegung (2), Nutzung Wohnen (2) (7),

ein maximaler Volumenstrom von 30-36 m³/(h*Raum) (1) (5)

Nutzungswechsel (z.B. Wohnen zu Büro) (7), Beschattung (7)

Welche Punkte führen häufig mit den Architekten zu Meinungsunterschieden bzw. Konflikte?

Analog: **Welche Punkte führen häufig mit den Haustechnikplanern zu Meinungsunterschieden bzw. Konflikte?**

Bei guter Informationspolitik sollte es zu keinen Meinungsunterschieden bzw. Konflikten kommen. (3)

Disposition der möglichst zentralen Steigzone (1),

Anordnung Leitungen (wenn möglich nicht eingelegt) (2),

Keine Heizung = Platzgewinn (1), Platzbedarf (5)

Durchmesser der Luftverteilung wegen der zusätzlicher Dämmung (1),

Statische Probleme durch Einlagen in Decke (4)

optische Aspekte (2) (4) (6), Aussenluftfassung (5), Fortluft über Dach (5),

Einschränkung Möblierung (6),

Energieverbrauch häufig kein Thema (2), Luftheizung = günstig (2),

Aussagen wie: Fenstereinbau geht den Ingenieur nichts an (2)

Vorstellungen bezüglich Machbarkeit (6), Termine (7)

Abnahme durch Ingenieur oft oberflächlich (7)

Ausführung

Welche Erfahrungen haben Sie bei der Ausführung gemacht?

Alle am Bau tätigen Personen sind zu sensibilisieren, d.h. zu informieren. (3)

Einregulierung noch wichtiger und somit noch zeitaufwändiger (1), Einregulierung (1) (2) (6),

Qualität mangelhaft, Details schnell und billig gelöst (5), viele Rohre sind gequetscht. (7)

Dichtheit des Luftnetzes (1) (2) (3) (6), Dichtheit der Gebäudehülle (3),

Saubere Dämmung (1),

Hygiene (dreckige Spirorohre, da die Abdeckung nicht verwendet wird) (2) (4)

Kompaktlüftungsgeräte entsprechen nicht dem heutigen Wissensstand bezüglich des Hygienestandards. (5)

H-Ingenieur auch L plant. (7)

Bilanz

Wie verhalten sich die Kosten im Vergleich mit den anderen Wärmeverteilssystemen (Heizkörper / Bodenheizung)?

Luftheizung ist am teuersten (1) (4), Energieverbrauch eher höher (1), Betriebskosten sind gleich bzw. vergleichbar (1)

Luftheizung günstiger (2)

SIA 380/1 < PH/Minergie-P < Minergie (3)

Siehe Kostenberechnung (5)

Messungen bzw. Erfolgskontrollen zeigen eine gewisse Tendenz des Höheren Energiebedarfs von Bauten mit Luftheizung.

Woran könnte das liegen?

Nutzenergie bleibt gleich (2)

Transportenergie höher als bei Wasser, da länger höhere Lüftungsstufe (Reduktion im Heizfall nicht möglich) (1),

höhere Vorlauftemperatur führt zu schlechteren Wärmeerzeugungs-Wirkungsgrade (speziell WP) (1) (2) (4) und Wärmeverteilverlusten (1),

nicht Einzelraumregulierung (1),

Thermostatenventile können die Energie der Sonne besser berücksichtigen. (3)

Luftheizung benötigt mehr Raumlufttemperatur für gleiche Behaglichkeit. (5) (6)

Anlageundichtheit (6)

Betrieb

Wie ist der Zeitaufwand im Vergleich mit den anderen Wärmeverteilssystemen bei der Übergabe / Instruktion der Bewohner?

Zeitaufwand Luftheizung = Zeitaufwand einfache Lüftungsanlage + Heizung (1) (5)

Zeitaufwand Luftheizung ~ Zeitaufwand einfache Lüftungsanlage (2)

Zeitaufwand Luftheizung > Zeitaufwand andere Wärmeverteilssysteme, da schon bekannt (3) (7)

Welche Rückmeldungen jeglicher Art haben Sie von Bewohner in Bezug zur Luftheizung erhalten?

Wenn die Raumlufthtemperatur gut ist nicht mehr als bei den anderen Systemen. (1) (7)

Nach der Inbetriebnahme zu tiefe Raumlufthtemperatur. (1)

Trockene Luft (wird nicht häufiger, als bei der einfachen Lüftungsanlage genannt) (2)

Mehrheit: zufrieden, gute Behaglichkeit, gute Luft; Minderheit: trockene Luft, Einzelraumregulierung nicht möglich (3)

Kein Platzbedarf für zusätzlichen Pollenfiltereinbau. (4)

Zu wenig Platz für Filterwechsel. (4)

Meiste Rückmeldungen bezogen sich nicht auf die Luftheizung, die Luftheizung war aber schuld am Problem. (4)

Durchwegs positiv, Bewohner wissen über die mögliche (grosse) Temperaturschwankung (5)

Es funktioniert (nach Anlaufschwierigkeiten) (6)

Nasszellen zu kalt. (7)

Haben Sie Kenntnisse über Schäden, welche durch eine Luftheizung verursacht wurden?

Nein (1) (2) (3) (4) (5) (6) (7)