



Goblet Lavandier & Associés

Ingénieurs Conseils S.A.

Department of Energy and Building Physics

Förderbedingungen von Niedrigenergie- und Passivhäusern in Luxemburg

Überlegungen zur Förderung von Niedrigenergie- und Passivhäusern hinsichtlich des Anforderungskriteriums, dass in Gebäuden keine fest installierte Klimaanlage vorhanden sein darf und Übertragung dieses Kriteriums auf den Einsatz von Wärmepumpen mit Kühlfunktion.

Kühlen von Wohngebäuden mit Wärmepumpen

Auftraggeber	Wirtschaftsministerium Luxemburg
Bearbeitung	Markus Lichtmeß Goblet Lavandier & Associés
Datum	08. August 2014
Version	1.2

1 Aufgabenstellung

Der Bau von Passiv- oder Niedrigenergiehäusern wird in Luxemburg staatlich gefördert. Das Förderprogramm wurde 2013 erneuert und ist bis voraussichtlich Ende 2016 gültig. In diesem Zeitfenster sollten nach den Plänen der Luxemburger Regierung einige energieeffiziente Pilotprojekte realisiert werden, sodass sich möglichst große Lerneffekte bei der Planung und Ausführung solcher Gebäude ergeben [1], denn ab 2017 wird der Passivhausstandard obligatorisch. Die Förderung unterteilt sich im Neubau in eine Gebäude bezogene (Gebäude mit Lüftungsanlage) und eine Anlagentechnik bezogene Förderung (technische System zur Wärmeerzeugung). Zur Gewährung einer Förderung werden bestimmte Anforderungen gestellt [2].

Für **Gebäude** müssen folgende Voraussetzungen erfüllt sein:

- Passivhaus: Klassen A-A-A sowie luftdichte Gebäudehülle ($\leq 0,6/h$)
- Niedrigenergiehaus: Klassen B-B-B sowie luftdichte Gebäudehülle ($\leq 1,0/h$)
- Mechanische Lüftungsanlage mit Wärmerückgewinnung
- Keine fest installierte Klimaanlage
- Einhaltung des sommerlichen Wärmeschutzes nach DIN 41082-2¹ (zusätzlich wird eine Steuerung des Sonnenschutzes in Abhängigkeit von der solaren Einstrahlung gefördert, die jedoch nicht obligatorisch ist)

Für die **Anlagentechnik** (hier Wärmepumpen) müssen folgende Voraussetzungen erfüllt sein:

- Wärmepumpe mit Geothermie: $COP \geq 4,3$ bei B0/W35, E4/W35
- Luftwärmepumpe oder Kompaktgerät: Passivhaus, $COP \geq 3,1$ bei A2/W35

Hinsichtlich der baulichen Förderung kann das Kriterium *keine fest installierte Klimaanlage* bedeuten, dass moderne Wärmepumpen, die ab Werk eine Kühlung (aktiv oder passiv) ermöglichen, durch die Förderstelle als *fest installierte Klimaanlage* angesehen werden. Dies kann dazu führen, dass keine Förderung für den Bau eines Passiv- oder Niedrigenergiehauses gewährt wird, obwohl es sich um ein energieeffizientes Gebäude handelt. Im Rahmen dieses Berichts soll dieses Anforderungskriterium in Bezug auf Gebäude mit effizientem sommerlichen Wärmeschutz und einer möglichen Kühlung über Wärmepumpen näher beleuchtet werden.

1.1 Kühlen von Wohngebäuden

Das Kühlen von Wohngebäuden muss, im Gegensatz zum Heizen und zur Trinkwarmwassererwärmung, eher als ergänzende Steigerung der Behaglichkeit betrachtet werden. Hierbei ist das Ziel nicht die Einhaltung einer maximalen Raumtemperatur im Sommer, sondern vielmehr die Kappung maximaler Temperaturspitzen und eine allgemeine und moderate Senkung der Raumtemperatur, zur Verbesserung der thermischen Behaglichkeit während den Sommermonaten. Zur Vermeidung von sommerlicher Überwärmung hat die Begrenzung der solaren Einstrahlung in das Gebäude *oberste Priorität*. Dies kann durch Realisierung von Gebäudeentwürfen mit moderaten Fensterflächenanteilen und durch den Einsatz effizienter Sonnenschutzsysteme erfolgen. Darüber hinaus stehen passive Maßnahmen, wie die Nutzung der thermischen Speicherfähigkeit des Gebäudes in Kombination mit einer Nachtlüftung, zur Verfügung. Die internen Lasten in einem Einfamilienhaus sind, im Vergleich zu einem Bürogebäude, vergleichsweise niedrig, sodass der solaren Komponente eine große Aufmerksamkeit beigemessen werden muss.

¹ Im Förderreglement wird auf den falschen Normteil verwiesen; es wird das Beiblatt 2 anstelle des Teils 2 der DIN 4108 angegeben.



1.1.1 Kühlkältebedarf

Durch die Förderanforderung an den sommerlichen Wärmeschutz nach DIN 4108-2 [3] und durch die zusätzliche Subventionierung einer Sonnenschutzsteuerung ist der Kühlkältebedarf stark reduziert. Folgende Beispiele zeigen, wie weit der Kühlkältebedarf reduziert wird und welche Größenordnungen er annimmt, wenn die Einhaltung der Anforderungen berücksichtigt wird. Eine einstrahlungsabhängige Steuerung ist besonders dann sinnvoll, wenn die Nutzer tagsüber über abwesend sind, da ein rechtzeitiges Eingreifen dann ggf. nicht erfolgen kann.

Tabelle 1: Gebäudegeometrien und -charakteristika

Bereich	Einheit	G1	G2
Gebäudeart	-	WG	WG
Typ	-	EFH	EFH
Außenfassade	m ²	248	428
Fenster	m ²	33	61
Zu unbeheizt ²	m ²	0	0
Boden	m ²	96	120
Dach	m ²	111	139
Hüllfläche	m ²	455	687
Energiebezugsfläche ³	m ²	163	306
Bruttovolumen	m ³	595	1.116
Kompaktheit A/V _e	m ⁻¹	0,77	0,62
Fensterflächenanteil	%/Fassade	13%	14%
Fensterflächenanteil	%/A _n	20%	20%
Zonenzahl	-	1	1
Heizen	ja/nein	ja	ja
Kühlen	ja/nein	ja	ja
Belichten	ja/nein	nein	nein
Trinkwarmwasser	ja/nein	ja	ja
Lüften ⁴	ja/nein	ja	ja

Energiebedarf auf Nutzenebene

Für ein übliches (G1) und ein größeres (G2) Einfamilienhaus (Tabelle 1) wird eine Energiebilanz durchgeführt unter der Annahme, dass das Gebäude ganzjährig aktiv gekühlt wird. Die energetische Bewertung erfolgt in Anlehnung an DIN V 18599-2, mit den für Wohngebäude angepassten Randbedingungen aus Teil 10 [4]. Als Berechnungswerkzeug wird EnerCalc⁵ eingesetzt.

Die Nutzeneffizienzwerte werden für den Wärmeschutzstandard A (Passivhaus, Tabelle 2) berechnet und für unterschiedliche Varianten von Sonnenschutzsystemen (Tabelle 3) dargestellt. Zur primärenergetischen Bewertung wird eine Sole-Wasser-Wärmepumpe zum Heizen und zur Trinkwassererwärmung eingesetzt.

Tabelle 2: Typische Bauausführungen in den unterschiedlichen Effizienzklassen.

Klassengrenze	A ⁺⁶	A	B	C	D	Min. ⁷	E	F	G	H	I
U-Wert Fenster	0,78	0,78	0,92	1,12	1,36	1,50	1,90	2,30	2,70	3,20	5,00
U-Wert Boden	0,15	0,15	0,22	0,28	0,34	0,40	0,50	0,60	0,90	1,00	1,08
U-Wert Wand	0,12	0,12	0,17	0,23	0,27	0,32	0,45	0,60	0,90	1,10	1,70
U-Wert Dach	0,10	0,10	0,13	0,17	0,21	0,25	0,30	0,40	0,65	1,23	1,95
Wärmebrücken ⁸	0,01	0,01	0,03	0,05	0,10	0,10	0,10	0,05	0,05	0,05	0,05
Lüftungsanlage ⁹	85 %	85 %	85 %	-	-	-	-	-	-	-	-
Luftdichtheit	0,6	0,6	1,0	2,0	3,0	3,0	4,0	4,0	6,0	6,0	6,0

² Flächen zu unbeheizten Räumen.

³ Die Energiebezugsfläche entspricht gemäß den Verordnungen über die Gesamtenergieeffizienz dem beheizten Teil der Nettogrundfläche.

⁴ Bei Wohngebäuden wird die Lüftungsanlage in Abhängigkeit des vorhandenen Wärmeschutzniveaus zum Ansatz gebracht. Für Gebäude der Wärmeschutzklasse A und B (Nullenergie- Passiv, und Niedrigenergiehaus) ist eine Lüftungsanlage erforderlich, um zum einen die höhere Energieeffizienz zu erreichen und zum anderen kann, aufgrund der hohen Gebäudeluftdichtigkeit, eine manuelle Fensterlüftung praktisch nicht mehr in allen Fällen ausreichend sein.

⁵ EnerCalc Version 4.43.102. Mit dem Rechenansatz von EnerCalc kann neben den üblichen energetischen Bilanzen auch der Ansatz von Nullenergiegebäuden gemäß den vorgesehenen Rechenregeln für Luxemburg berücksichtigt werden. Dies erlaubt den Einfluss von im Gebäude erzeugtem Strom auf die energetische Bewertung. <http://www.enob.info/?id=enercalc>, Abruf 11/13

⁶ Derzeit gibt es noch keine finale Definition für die Anforderungen an ein nearly zero-energy building in Luxemburg. Hinsichtlich des Wärmeschutzes wird das nZEB-Gebäude voraussichtlich dem Klasse A-Standard (Passivhausstandard) entsprechen, da eine weitere Verschärfung des Wärmeschutzstandards nicht kosteneffizienter sein wird.

⁷ Mindestanforderungen gemäß aktuellem Règlement grand-ducal für Wohn- und Nichtwohngebäude.

⁸ Ab Klasse F ist der Zuschlag für Wärmebrücken zum Teil im U-Wert enthalten und wird in der Berechnung reduziert angenommen.

⁹ In der Tabelle wird die Effizienz der Wärmerückgewinnung in Prozent angegeben und entspricht dem Wärmebereitstellungsgrad eines Wärmerückgewinnungssystems unter Betriebsbedingungen gemäß.

Tabelle 3: Varianten des Sonnenschutzes¹⁰

Bezeichnung	N°1	N°2	N°3	N°4	N°5	N°6	N°7	N°8	N°9
Sonnenschutz Typ	Jalousie	Jalousie	Behang	Jalousie	Jalousie	Behang	Behang	Behang	kein
Farbe	hell	hell	hell	hell	hell	hell	hell	grau	-
Beschreibung	10°	45°	-	10°	45°	-	-	-	-
Anordnung	außen	außen	außen	außen	außen	außen	innen	innen	-
Energiedurchlass g_{tot}	0,03	0,07	0,12	0,03	0,07	0,12	0,30	0,40	0,50
Steuerung ¹¹	auto	auto	auto	manuell	manuell	manuell	manuell	manuell	-

Die nachfolgenden Bilder zeigen die für die beiden Beispielgebäude (G1 und G2) ermittelten Nutzenergiebedarfe für Heizwärme, Kühlkälte, Lüfterstrom und den aggregierten Hilfsenergiebedarf. Für die primärenergetische Bewertung wird er Hilfsenergiebedarf der jeweiligen Energieanwendung zugeordnet. Hierbei ist zu beachten, dass die automatische Steuerung ein rechtzeitiges Aktivieren des Sonnenschutzes in Abhängigkeit der solaren Einstrahlung unterstellt, was ggf. auch über ein entsprechendes Nutzerverhalten erfolgen kann.

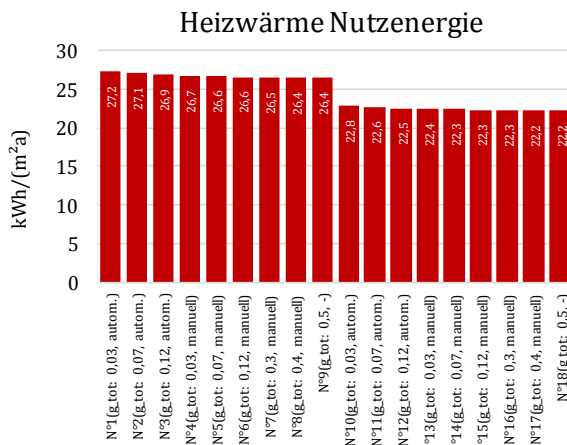


Abbildung 1: Heizwärmebedarf (G1 und G2)

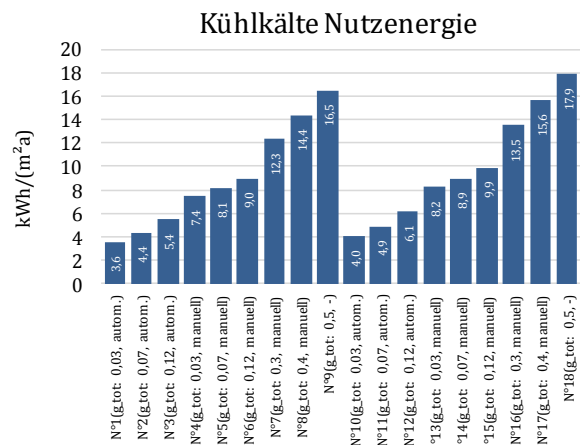


Abbildung 2: Nutzkältebedarf (G1 und G2)

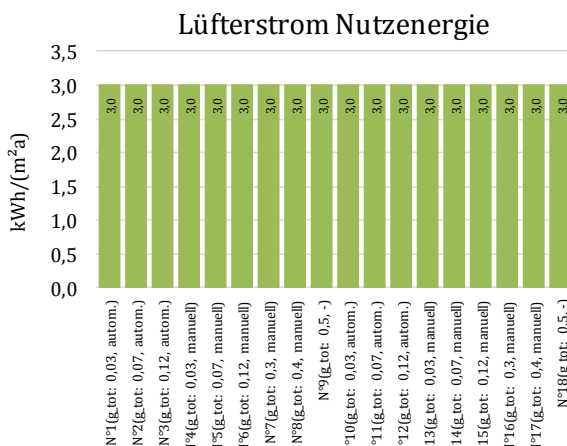


Abbildung 3: Lüfterstrombedarf (G1 und G2)

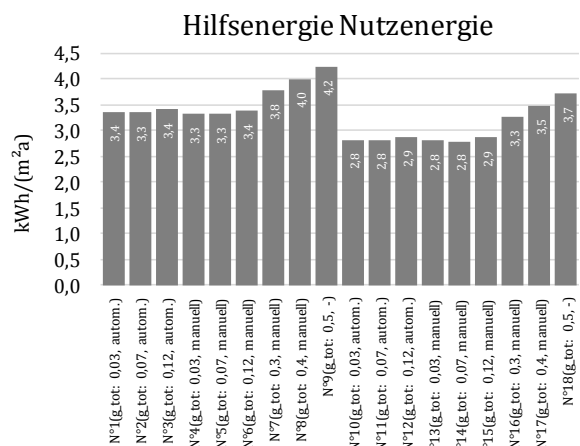


Abbildung 4: Hilfsenergiebedarf (G1 und G2)

¹⁰ Zur Bewertung des Einflusses von Sonnenschutzsystemen auf den Kühlkältebedarf, wird für die Berechnung, abweichend von der normativen Vorgabe nach DIN V 18599-2, für den Betrieb von Sonnenschutzsystemen in ein Winter- und Sommerhalbjahr unterschieden. Im Winterhalbjahr (Okt.-Mrz.) wird der Sonnenschutz als nicht aktiviert angenommen (d. h. die Aktivierungsparameter zur Anpassung der g_{air} -Werte werden in diesem Zeitraum zu Null gesetzt). Im Sommerhalbjahr (Apr.-Sep.) werden die Aktivierungsparameter zum Ansatz gebracht und der Einfluss des Sonnenschutzes in die thermischen Energiebilanzen einbezogen.

¹¹ Die der DIN V 18599 zugrunde liegenden Aktivierungsparameter a für automatisch betriebene Sonnenschutzsysteme wurden für den Fall der einstrahlungsintensitätsabhängigen Steuerung mit einer Grenzbestrahlungsstärke von 300 W/m^2 bestimmt. In der Praxis übliche Werte liegen zwischen 100 und 200 W/m^2 , was zu einer Reduzierung des Kühlenergiebedarfs führen beiträgt.

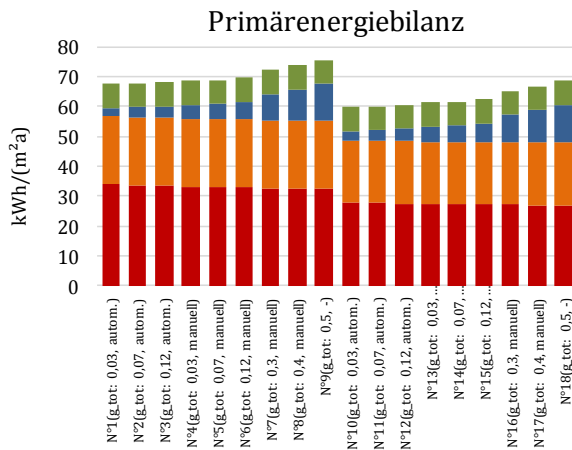


Abbildung 5: Primärenergiebilanz, absolute Darstellung (G1 und G2)

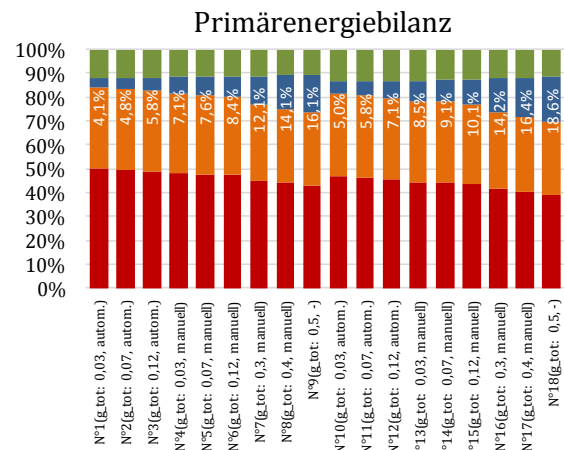


Abbildung 6: Primärenergiebilanz, relative Darstellung (G1 und G2)

Bei Gesamt-Energiedurchlassgraden g_{tot} unter 0,10 werden mit der angepassten Energiebilanz nach DIN V 18599 spezifische Nutzenergiebedarfe von etwa 3 bis 5 kWh/(m²·a) erreicht. Über dynamische Simulationsrechnungen detailliert bestimmte Werte liegen meist deutlich darunter (bis nahezu Null), da z. B. das Sommerlüftungsverhalten und die Steuerung des Sonnenschutzes realitätsnäher abgebildet werden können [5].

Unter der Annahme, dass der Kühllältebedarf mit einem SEER (Jahresarbeitszahl für Kältemaschinen) von 0,27 bereitgestellt wird, beträgt der Anteil des primärenergetischen Kühlenergiebedarfs am Gesamt-Primärenergiebedarf (Heizen, Trinkwarmwasser, Lüften, Hilfsenergie und Kühlen) bei optimiertem Sonnenschutz etwa 4 bis 5 %. Im Rechenmodell wird hierbei eine ganzjährige Kühlung des Gebäudes auf Solltemperatur unterstellt. Die Auswertung zeigt, dass die Anforderung an den sommerlichen Wärmeschutz zu einer deutlichen Reduzierung des Kühllältebedarfs führt.

1.1.2 Thermischer Raumkomfort und Behaglichkeit

Das Bedürfnis zur Anpassung der Raumtemperatur im Sommer ist auch wesentlich von der mittleren Außenlufttemperatur abhängig. Mit der EN 15251 steht ein Bewertungsverfahren zur Verfügung, mit dem die Über- und Unterschreitung einer Komfortgrenze in Abhängigkeit des gleitenden Mittelwerts der Außenlufttemperatur bestimmt werden kann. Dabei wird in drei Komfortkategorien unterteilt, wobei die Kategorie I der mit den höchsten Anforderungen entspricht.

Für ein Beispielgebäude mit einem Fensterflächenanteil von $0,20 \text{ m}^2_{Fe}/\text{m}^2_{An}$ wird auf der Basis einer stündlichen Berechnung eine vereinfachte Übertemperaturbewertung durchgeführt. Dabei wird, wie bei der vorigen energetischen Bewertung auch, die Effizienz des Sonnenschutzes (g_{tot} -Wert) und dessen Steuerung einbezogen. Als Werkzeug wird SimRoom¹² eingesetzt. Berechnet wird die Gebäude-Leerlaufstemperatur (oder auch Gleichgewichtstemperatur genannt) ohne Berücksichtigung der Anlagentechnik zum Heizen oder Kühlen in einem vereinfachten Ein-Zonen-Raummodell. Die Gebäude-Leerlaufstemperatur entspricht der Raumlufttemperatur, die sich einstellt, wenn das Gebäude weder aktiv beheizt oder gekühlt wird. Der Einfluss unterschiedliche Lüftungsstrategien kann berücksichtigt werden.

In Abbildung 7 bis Abbildung 10 werden die Gebäude-Leerlaufstemperaturen für vier unterschiedliche Varianten in jeweils einem Komfort-Diagramm aufgetragen.

¹² SimRoom Version 1.05, Versionsinformationen unter www.enec.de

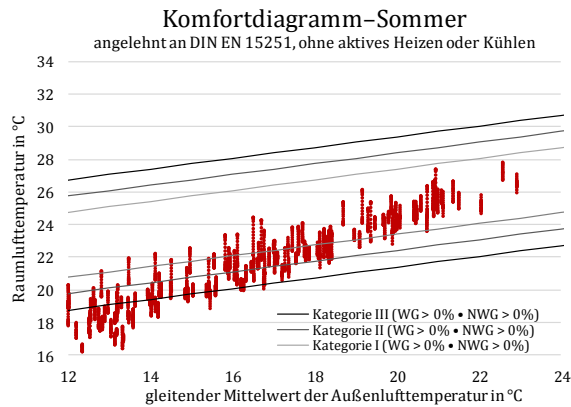


Abbildung 7: Variante 1, $g_{tot} = 0,1$, $n = 0,5$ 1/h, mittelschwere Bauweise, Steuerung $SS = 150$ W/m²

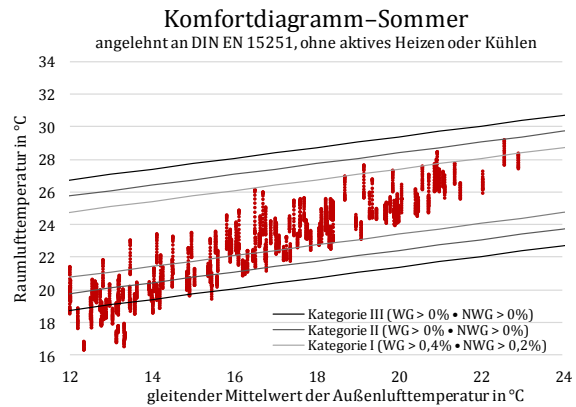


Abbildung 8: Variante 2, $g_{tot} = 0,1$, $n = 0,5$ 1/h, mittelschwere Bauweise, Steuerung $SS = 300$ W/m²

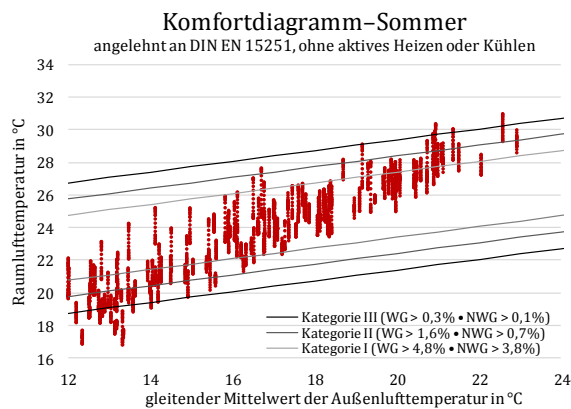


Abbildung 9: Variante 3, $g_{tot} = 0,3$, $n = 0,5$ 1/h, mittelschwere Bauweise, Steuerung $SS = 300$ W/m²

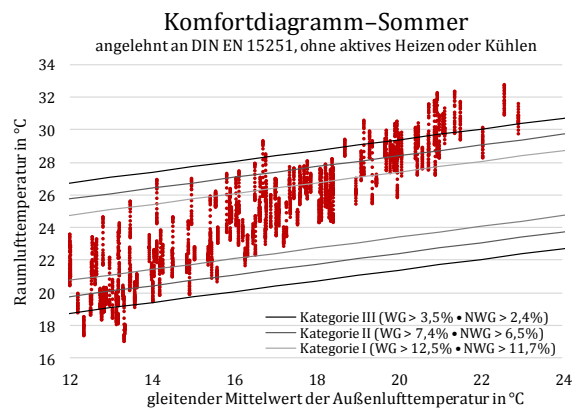


Abbildung 10: Variante 4, $g_{tot} = 0,5$, $n = 0,5$ 1/h, mittelschwere Bauweise, Steuerung $SS = \text{keine}$

Maßgebend für die Bewertung ist in diesem Zusammenhang die Überschreitungshäufigkeit der Raumlufttemperatur über die jeweilige Komfortgrenze. Als Grenzwert kann eine Überschreitungshäufigkeit von maximal 3 % angesehen werden. Die Auswertung zeigt, dass bei Variante 1¹³ mit einem Gesamt-Energiedurchlassgrad von $g_{tot} \leq 0,1$ in Kombination mit einer sensiblen einstrahlungsintensitätsabhängigen Steuerung des Sonnenschutzes (oder ein äquivalent rechtzeitiges Aktivieren durch den Nutzer), das Komfortkriterium der Kategorie I nicht verletzt wird. Wird der Sonnenschutz ab einer Einstrahlungsintensitätsgrenze von 300 W/m² aktiviert, wird das Komfortkriterium bei Variante 2 zu 0,4 % im Jahr verletzt. Bei Ansatz eines Sonnenschutzes mit einem Gesamt-Energiedurchlassgrad g_{tot} von 0,3 kann für Variante 3 eine 4,8 %ige Überschreitung bestimmt werden. Wird kein zusätzlicher Sonnenschutz vorgesehen (Variante 4) kann die Raumlufttemperatur sehr hohe Werte annehmen und das Komfortkriterium wird zu 12,5 % verletzt. Hierbei ist zu beachten, dass bei sehr hohen Raumtemperaturen in der Regel eine verstärkte Fensterlüftung zur Kompensation erfolgt und es stellen sich Raumtemperaturen in Abhängigkeit der vorhandenen Außenlufttemperatur ein.

Auch hier zeigt sich, dass durch eine gute Planung des sommerlichen Wärmeschutzes (Gebäudeentwurf und Sonnenschutzkonzept) zu hohe Raumtemperaturen weitgehend vermieden werden können und ein behaglicher thermischer Komfort sichergestellt werden kann. Eine zusätzliche Kühlung ist für Wohngebäude in der Regel nicht notwendig und sollte weiterhin nicht forciert werden, kann aber zur weiteren Verbesserung des thermischen Komforts dienen. Sind die baulichen Bedingungen gegeben und erfolgt die Aktivierung des Sonnenschutzes rechtzeitig, ist der zu erwartende Kühlenergiebedarf sehr gering.

¹³ Diese Variante entspricht in etwa den Anforderungen gemäß dem Förderprogramm für Niedrigenergie- und Passivhäuser.

1.2 Wärmepumpen und Kühlung

Wärmepumpen erweisen sich als energieeffiziente Erzeuger zur Bereitstellung von Heizwärme und zur Trinkwassererwärmung. Ihre Effizienz ist wesentlich abhängig von der Quellen- und Vorlauftemperatur – also vom zu überwindenden Temperaturhub. Hier haben Luft-Wasser-Wärmepumpen naturgemäß einen Effizienznachteil, da die Außenluft als Wärmequelle gerade dann niedrige Temperaturen annimmt, wenn der größte Heizbedarf erforderlich ist. Wird eine Wärmepumpe zur sommerlichen Kühlen genutzt, erfolgt das in der Regel über das vorhandene Wärmeübergabesystem – in Wohngebäuden mit Wärmepumpen sind das, aufgrund der niedrig erforderlichen Heizungsvorlauftemperaturen, meist Fußboden- oder Wandheizsysteme.

1.2.1 Möglichkeiten der Kühlung

Die Kühlung von Wohngebäuden kann bei Wärmepumpen über die beiden Grundprinzipien aktive und passive Kühlung erfolgen.

Bei der **passiven Kühlung** (auch "Sonden-Direktkühlung", "Natural Cooling", "Free-Cooling" genannt), nimmt die Soleflüssigkeit die Wärme über einen Wärmetauscher aus dem Heizkreis auf und führt sie ins Erdreich ab [6]. Da bei der passiven Kühlung die Umgebungstemperatur im Erdreich genutzt wird, ist das Kühlpotential naturgemäß begrenzt. Steigt die Temperatur im Erdreich über den Tagesverlauf oder den Sommer hinweg an, verringert sich das Kühlpotential. Die Wärmepumpe bleibt hierbei ausgeschaltet und es werden lediglich die Umwälzpumpen betrieben. Die Arbeitszahlen für die passive Kühlung liegt in der Regel deutlich über 15 [7].

Bei der **aktiven Kühlung** wird die Funktionsweise der Wärmepumpe umgekehrt (reversible Wärmepumpe). Wie bei der passiven Kühlung auch werden das Erdreich zur Wärmesenke und das Gebäude zur Wärmequelle. Die aus dem Gebäude entzogene Wärme wird mit der Wärmepumpe auf ein höheres Temperaturniveau gebracht und an das Erdreich abgegeben. Dadurch kann – im Vergleich zur passiven Kühlung – das Erdreich über einen längeren Zeitraum als Wärmesenke genutzt werden. Der Kältekreis wird entweder geräteintern umgekehrt oder es erfolgt eine externe Umschaltung der Primär- und Sekundärkreisanschlüsse. Die Arbeitszahlen liegen je nach Randbedingungen über 4. Eine aktive Kühlung kann auch mit Luft-Wärmepumpen erfolgen. Aufgrund des im Vergleich zum Erdreich höheren Niveaus der Außenlufttemperatur während der Kühlperiode, liegt die Systemeffizienz bei Luft-Wasser-Wärmepumpen im Kühlfall deutlich unter der an Geothermie angebundenen Wärmepumpen.

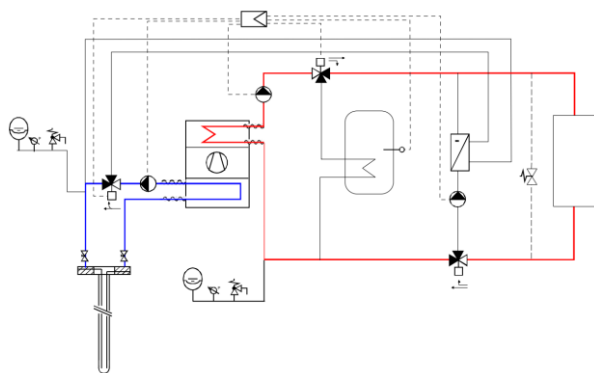


Abbildung 11: Schaltung im Heizbetrieb, aus [6].

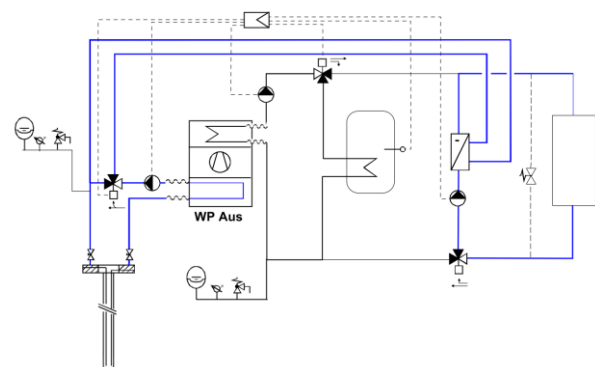


Abbildung 12: Schaltung im passiven Kühlbetrieb, aus [6].

Da das Erdreich bei der Kühlfunktion als Wärmesenke fungiert, führt dies im Kühlfall zu einer Beladung des Erdreichs mit Wärme, welche theoretisch wieder zum Heizen zur Verfügung steht. Bei einer Einzelsonde ist dieser Effekt nicht ausgeprägt, sodass die Sondenlänge z. B. nicht verkürzt werden kann. Die Verbesserung des Systemnutzungsgrads durch passive Kühlung für den reinen Heizbetrieb liegt nach [6] bei 2,5 %. Inkludiert man die Warmwasserbereitung in die Bilanz so kann für den Fall der passiven Kühlung nach [6] mit einer Erhöhung der Arbeitszahl um 7 bis 8 % im Sommer und in der Übergangszeit gerechnet werden. Für größere Sondenfelder und Gebäuden mit großem Kühlbedarf kann das anders sein, da die Kühlung im Sommer über das Erdreich maßgeblich zur Regenerierung des Sondenfelds beitragen kann.

Simulationsrechnungen in [6] zeigen zudem, dass für ein Einfamilienhaus die Auslegungskriterien einer Erdwärmesonde für den Heizbetrieb auch für den passiven Kühlbetrieb genügen und der Kühlenergiebedarf meist vollständig darüber gedeckt werden kann.

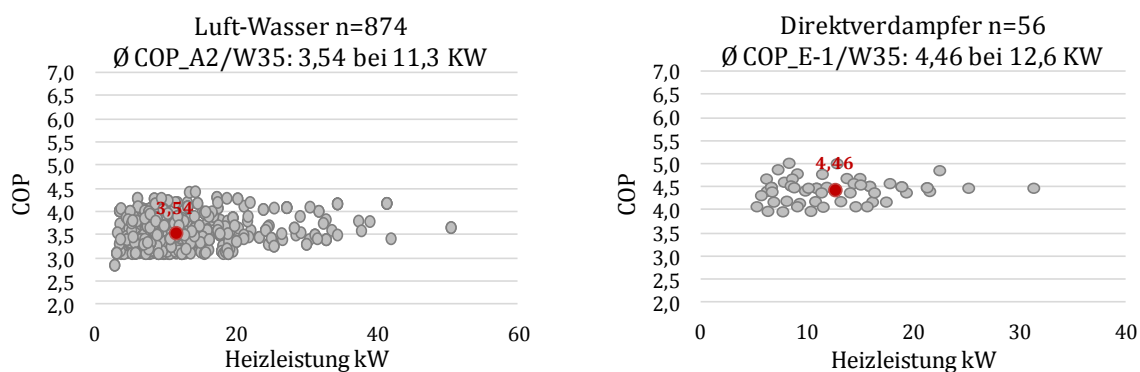
In jedem Fall sind hydraulische und regelungstechnische Vorkehrungen zu treffen, dass die Oberflächentemperatur bei Flächenkühlsystemen nicht unter 19 °C fällt, um Tauwasserausfall zu vermeiden [8]. Bei der Fußbodenkühlung sollte zudem eine Oberflächentemperatur von >20 °C aus Behaglichkeitsgründen eingehalten werden [6]. Dies wird in der Regel über einen Drei-Wege-Mischer mit Taupunktüberwachung gewährleistet, der die Vorlauftemperatur begrenzt. Die Raumtemperatur kann mit dieser Art Kühlung erfahrungsgemäß zwischen 2 und 4 K abgesenkt werden [6].

1.2.2 Marktanalyse

Die in Luxemburg gültigen Förderbedingungen orientieren sich an den deutschen Förderbedingungen (nach bafa = Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle) [9]. Es werden Mindestanforderungen an die Effizienz von Wärmepumpen (COP) für unterschiedliche Systeme vorgeschrieben. Der größte Unterschied zu den deutschen Förderbedingungen ist, dass Luftwärmepumpen, aufgrund ihrer in der Praxis niedrigen Jahresarbeitszahlen, in Luxemburg nur in Passivhäusern unterstützt werden.

Zur Feststellung der Effizienz existiert eine umfangreiche Datenbank von Wärmepumpen mit zertifizierten COP-Werten [10]. Darin sind Hersteller aus ganz Europa vertreten, weshalb die Datenbank als Marktindikator gut auf Luxemburg übertragbar ist.

Folgende Bilder zeigen die Wärmepumpen der Datenbank für die unterschiedlichen Systeme Luft-Wasser, Direktverdampfer, Sole-Wasser und Wasser-Wasser. Es handelt sich hierbei um veröffentlichte Herstellerdaten mit zertifiziertem COP-Wert [10].



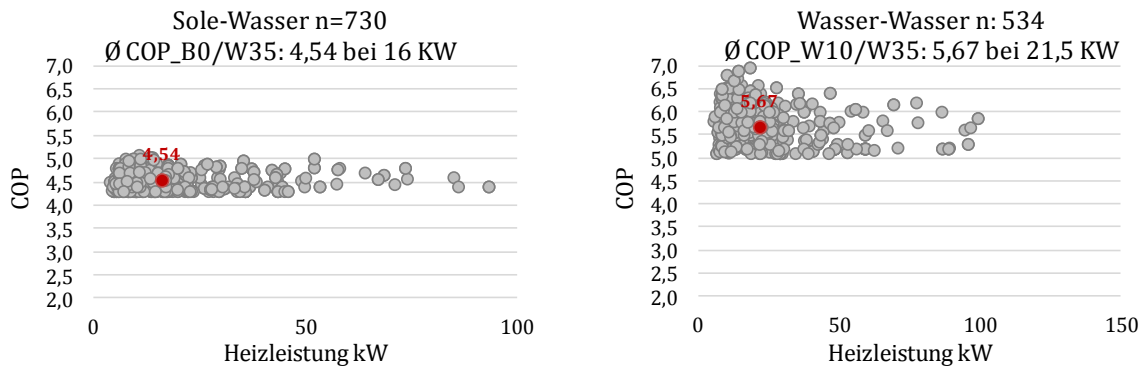


Abbildung 13: Analytierte Wärmepumpen aus [10].

Es zeigt sich, dass die Bandbreite der Effizienz über alle Typologien ausgeprägt ist. Bei Luftwärmepumpen reichen die erreichten COP-Werte nach EN 14511 von 2,85 bis 4,43 (A2/W35). Bei Sole-Wasser-Wärmepumpen von 4,3 bis 5,08 (E0/W35), bei Wärmepumpen mit Direktverdampfertechnologie von 3,99 bis 5,04 (E-1/W35) und bei Wasser-Wasser Wärmepumpen von 5,1 bis 6,96 (W10/W35).

1.2.3 Effiziente Wärmepumpen

Einige der effizienten Sole-Wasser-Wärmepumpen haben eine integrierte Kühlfunktion, die als passive (nur Betrieb der Umwälzpumpe) und/oder als aktive Kühlung (Umkehrung des Kälteprozesses) ausgebildet sein können. Für einen Technologievergleich werden Sole-Wasser-Wärmepumpen mit einem COP > 5 ausgewertet. Es handelt sich hierbei um 13 von 730 Sole-Wasser-Wärmepumpen, die am Markt vertreten sind. Nach Herstellerangaben ist mit den meisten dieser Wärmepumpen ein Kühlen entweder passiv oder aktiv möglich (vgl. Tabelle 4).

Tabelle 4: Effiziente Sole-Wasser-Wärmepumpen mit einem COP > 5 (n=13 von n=730)¹⁴

Hersteller, Bezeichnung	COP	Kühlen
1A HEIZEN STROBL UG, 1A ET-SW 13 T10	5,02	k. A.
BioEnergieTeam GmbH, TerraSol 17 T10	5,02	kühlen möglich
Buschbeck GmbH, B3	5,02	k. A.
KONIG-Wärmepumpen GmbH, KSEA 13 T10	5,02	kühlen möglich (passiv)
Orange Energy GmbH & Co. KG, SW114NT	5,02	kühlen möglich (aktiv und passiv)
Stiebel Eltron GmbH & Co. KG, WPC 10	5,02	kühlen möglich
Stiebel Eltron GmbH & Co. KG, WPF 10	5,02	kühlen möglich
tecalor GmbH, TTC 10	5,02	kühlen möglich (passiv)
tecalor GmbH, TTf 10	5,02	kühlen möglich (passiv)
WATERKOTTE GmbH, EcoTouch Ai1 Geo 5010.5	5,08	kühlen möglich
WATERKOTTE GmbH, EcoTouch Ai1 Geo 5013.5	5,03	kühlen möglich
WATERKOTTE GmbH, EcoTouch DS 5017.5 Ai (NC) A	5,03	kühlen möglich (passiv)
WATERKOTTE GmbH, EcoTouch DS 5017.5 Ai RC	5,03	kühlen möglich (passiv und aktiv)

Ausgehend vom Bau eines üblichen Passivhauses mit 160 m² Wohnfläche und einem Kühlkältebedarf¹⁵ von 4 kWh/(m²a) und einem Heizwärmebedarf von 22 kWh/(m²a)¹⁶ werden Vergleichsrechnungen durchgeführt, inwiefern der Einsatz einer sehr effizienten Wärmepumpe mit passiver und/oder aktiver Kühlfunktion im Vergleich zu einer durchschnittlichen Wärmepumpe ohne Kühlfunktion ist. Als Bewertungsmaßstab dient der Primärenergiebedarf.

¹⁴ Auswertung von Herstellerangaben und Produktdatenblättern.

¹⁵ Beim Kühlkältebedarf wird davon ausgegangen, dass die baulichen und technischen Förderrandbedingungen zum sommerlichen Wärmeschutz lückenlos eingehalten sind.

¹⁶ Grenzwert der Wärmeschutzklasse A für Ein- und Zweifamilienhäuser gemäß Luxemburger Energieeinsparverordnung.

Tabelle 5: Vergleichsrechnung effiziente Wärmepumpe mit Kühlung und durchschnittliche Wärmepumpe ohne Kühlung

Variante		WP-Standard	WP Effizient	WP Effizient	WP Effizient
Kühlung	Art	keine	nur passiv	passiv/aktiv ¹⁷	nur aktiv
Wohnfläche	m ²	160	160	160	160
Heizwärmebedarf	kWh/(m ² a)	22	22	22	22
Verteil- und Übergabeverluste	-	1,2	1,2	1,2	1,2
Heizenergiebedarf	kWh/(m ² a)	26,4	26,4	26,4	26,4
COP nur Heizbetrieb ¹⁸	-	4,54	5,02	5,02	5,02
Anlagenaufwandszahl	-	0,22	0,20	0,20	0,20
Endenergiebedarf Strom	kWh/(m ² a)	5,81	5,26	5,26	5,26
Primärenergiefaktor	-	2,66	2,66	2,66	2,66
Primärenergie Heizen	kWh/(m²a)	15,5	14,0	14,0	14,0
Kühlkältebedarf	kWh/(m ² a)	4,0	4,0	4,0	4,0
Verteil- und Übergabeverluste	-	1,00	1,00	1,00	1,00
Kühlenergiebedarf	kWh/(m ² a)	4,0	4,0	4,0	4,0
EER nur Kühlbetrieb	-	-	15,0	10,6	4,0
Anlagenaufwandszahl	-	-	0,07	0,09	0,25
Endenergiebedarf Strom	kWh/(m ² a)	0,0	0,3	0,4	1,0
Primärenergiefaktor	-	2,66	2,66	2,66	2,66
Primärenergie Kühlen	kWh/(m²a)	0,0	0,7	1,0	2,6
Primärenergiekennwert	kWh/(m²a)	15,5	14,7	15,0	16,6

2 Fazit

Gemäß dem *nationalen Plan Luxemburgs zur Erhöhung der Zahl der Niedrigstenergiegebäude* [1] sind für die erfolgreiche Einführung von *nearly zero-energy Buildings* (Niedrigstenergiegebäude) und deren verbindliche Einführung im Jahr 2020 für Wohngebäude die Realisierung effizienter Pilotprojekte erforderlich. Darüber sollen Erfahrungen bei Planung und Ausführung von energieeffizienten Gebäuden eruiert werden, sodass dieser Effizienzstandard zeitgemäß in die Praxis umgesetzt werden kann. Jegliche Beschränkung von Fördermitteln, die unter anderen auch zu diesem Zweck entwickelt wurden, wirkt dem entgegen.

Die Nutzung von Wärmepumpen nimmt gerade im Hinblick auf *nearly zero-energy Buildings* einen größeren Stellenwert ein [1], [11]. Durch die Einführung von modulationsfähigen Wärmepumpen kann nach [12] in absehbarer Zeit zudem mit einer deutlichen Effizienzsteigerung gerechnet werden. Auch zeigt sich, dass in der letzten Dekade immer mehr neue Gebäude mit Wärmepumpen anstatt mit konventionellen Gas- oder Ölheizungen ausgestattet wurden [13], wobei in Deutschland und einigen anderen europäischen Ländern derzeit Luft-Wasser-Wärmepumpen im Trend liegen [13], [14], [15], [16].

Die Bewertung der Zweckmäßigkeit bezüglich der zusätzlichen Anforderung für die Gebäudeeffizienzförderung zum sommerlichen Wärmeschutz¹⁹ zeigt, dass sich die mögliche Überwärmung bzw. der dadurch resultierende Kühlkältebedarf von Wohngebäuden signifikant reduzieren lässt und dass die Anforderung sinnvoll ist. Für zwei Beispielgebäude wird unter Zugrundelegung der Einhaltung des Kriteriums ein üblicher Nutzkältebedarf von etwa 4 kWh/(m²a) bestimmt – un-

¹⁷ Bei der Variante passiv/aktiv wird eine gemischt betriebene Kühlung unterstellt. Dabei wird davon ausgegangen, dass etwa 60 % des jährlichen Kältebedarfs über die passive Kühlung gedeckt werden kann und 40 % mit aktiver Kühlung (im Fall einer reversiblen Wärmepumpe) erfolgt.

¹⁸ Im Rahmen des Vergleichs von Sole-Wasser-Wärmepumpen wird der COP vereinfacht gleich der Jahresarbeitszahl JAZ gesetzt. Die energetisch relevanten Systemdifferenzen werden dadurch hinreichend genau beschrieben. Die Berechnung der Jahresarbeitszahl kann z. B. mit folgendem Werkzeug erfolgen: <http://www.waermepumpe.de/nc/waermepumpe/effizienz/jaz-rechner.html>

¹⁹ Detaillierter Nachweis nach DIN 4108 Bbl.2, gemäß dem dynamischen Normverweis: Ausgabe 2013.

ter der Voraussetzung einer *durchgehenden* Kühlung. Wie bereits aufgeführt, liegen praktische erreichte Kennwerte in der Regel darunter [5]. Die Auswertung zur thermischen Behaglichkeit für ein übliches Einfamilienhaus macht zudem deutlich, dass sich die Raumtemperaturen weitestgehend im Komfortbereich befinden und eine Kühlung von Wohngebäuden in der Regel nicht notwendig ist. Eine passive und/oder aktive Kühlung mit einer Sole-Wasser-Wärmepumpe hat unter dieser Voraussetzung einen relativ moderaten Einfluss auf die Gesamt-Primärenergiebilanz und stellt in der Praxis eine Komfortverbesserung dar.

Vergleicht man die Anforderungen zur Begrenzung des Energieeinsatzes zur Klimatisierung mit den Anforderungen zum winterlichen Wärmeschutz von Wohngebäuden, so sollte analog zur Wärmeschutzklasse auch erst der Bedarf minimiert werden, bevor Anforderungen an die Effizienz von technischen Systemen gestellt werden. Das erfolgt derzeit auch durch die Applikation des Kriteriums *sommerlicher Wärmeschutz*, wird jedoch mit dem generellen Ausschluss durch das technische System überschrieben.

Die Auswertung von am Markt befindlichen Wärmepumpen zeigt, dass viele der effizientesten Sole-Wasser-Wärmepumpen in irgendeiner Weise eine Möglichkeit zur Kühlung aufweisen. Gerade für die Variante der passiven Kühlung sind, bei direktem Anschluss der Wärmepumpe an die Fußbodenheizung, oft keine weiteren umfangreichen hydraulischen Installationen erforderlich, da die Funktion bereits werksseitig vorgesehen ist und die Wärmepumpe muss dazu nicht reversibel betrieben werden. Diese Systeme zeichnen sich durch eine hervorragende Energieeffizienz aus. Im Vergleich zu einer durchschnittlichen Sole-Wasser-Wärmepumpe ohne Kühlfunktion liegt der Primärenergieaufwand zum Heizen und Kühlen bei Verwendung der effizientesten Wärmepumpe ($COP > 5$) mit passiver Kühlung unterhalb einer marktüblichen ($COP 4,54$) ohne Kühlfunktion.

Aktuell werden seitens der Umweltverwaltung in Luxemburg keine Passiv- und Niedrigenergiehäuser gefördert, wenn eine *fest installierte Klimaanlage* vorhanden ist. Dabei werden neben den eigentlichen Klimageräten (reine Kältemaschinen) auch Wärmepumpen mit entweder passiver oder aktiver Kühlfunktion als ein solches System interpretiert, obwohl sie vorwiegend als Heizsystem dienen.

Die Ausweitung des Kriteriums *fest installierte Klimaanlage* auf Wärmepumpen mit integrierter Kühlfunktion sollte unter diesem Hintergrund neu bewertet werden. Für Luft-Wasser-Wärmepumpen mag das Argument der Energieeffizienz noch nachvollziehbar sein, da hier zudem auch keine passive Kühlung möglich ist. Wird hingegen das Erdreich als Wärmequelle zum Heizen und zum Kühlen genutzt, so liegt die Systemeffizienz für beide Anwendungen bei effizienten Wärmepumpen – insbesondere bei passiver Kühlung – sogar unterhalb marktüblicher Standards. Hingegen ist es erlaubt mobile Klimageräte zu verwenden, die eine erheblich schlechtere Energieeffizienz aufweisen.

3 Literaturverzeichnis

- [1] Wirtschaftsministerium-LU, M. Lichtmeß und J. Knissel, „Nationaler Plan Luxemburgs zur Erhöhung der Zahl der Niedrigstenergiegebäude,“ Wirtschaftsministerium Luxemburg, Luxemburg, 2013.
- [2] Großherzogtum Luxemburg, „Règlement grand-ducal du 12 décembre 2012 instituant un régime d’aides pour la promotion de l’utilisation rationnelle de l’énergie et la mise en valeur des énergies renouvelables dans le domaine du logement,“ Großherzogtum Luxemburg, Luxemburg, 2012.
- [3] DIN Deutsches Institut für Normung e.V., „Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden - Teil 2: Mindestanforderungen an den Wärmeschutz,“ Beuth, Berlin, 2013.
- [4] DIN Deutsches Institut für Normung e.V., „DIN V 18599:2007 Teil 1 bis 10,“ Beuth, Berlin, 2007.
- [5] A. Maas und S. Schlitzberger, „DIN V 18599 für Wohngebäude - verbesserte Bewertungsansätze und Überprüfung der Anwendungsmöglichkeit auf das Effizienzhaus Plus Konzept,“ Fraunhofer IRB Verlag, Stuttgart, 2014.
- [6] Afjei, Dott und Huber, „Heizen und Kühlen mit erdgekoppelten Wärmepumpen,“ Schweizerische Eidgenossenschaft, BFE Bundesamt für Energie, Bern, 2007.
- [7] Viessmann, „Kühlen mit Viessmann Wärmepumpen,“ Viessmann Group, Allendorf, 2007.
- [8] Bundesindustrieverband Deutschland Haus-, Energie- und Umwelttechnik e.V., „Wärmeübergabe- und Kühlsysteme in Verbindung mit einer Wärmepumpe,“ Interessengemeinschaft Energie Umwelt Feuerungen GmbH, Informationsblatt Nr.37, Köln, 2013.
- [9] M. Lichtmeß und J. Knissel, Überarbeitung des Förderprogramms für energieeffiziente Neu- und Altbauten aus dem Jahre 2009, Luxemburg: Wirtschaftsministerium, 2013.
- [10] Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle, „Erneuerbare Energien, Wärmepumpen mit Prüfzertifikat des COP-Wertes,“ bafa: Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle, Eschborn, 2014.
- [11] European Commission, „Directive 2010/31/EU of 19 May 2010 on energy performance of buildings,“ European Commission, EU, 2010.
- [12] R.-M. Lücking und G. Hauser, „Die thermische Konditionierung von Gebäuden im Kontext eines zukünftigen Energieversorgungssystems,“ Fraunhofer IRB, Stuttgart, 2011.
- [13] Bundesverband Wärmepumpe e.V., „BWP-Branchenstudie 2013, Szenarien und politische Handlungsempfehlungen,“ Bundesverband Wärmepumpe (BWP) e.V., Berlin, 2013.
- [14] EurObserv’ER 2013, „Wärmepumpen Barometer,“ Observatoire des énergies renouvelables, Europe, 2013.
- [15] R. Doelling, „Interview mit Thomas Nowak, Generalsekretär des Europäischen Wärmepumpen Verband (EHPA),“ 09.08.2013. [Online]. Available: <http://www.heizungsfinder.de/blog/zukunft-und-potenziale-des-europaeischen-waermepumpenmarktes>. [Zugriff am 04 08 2014].
- [16] Bundesverband Wärmepumpe e.V., „Pressemitteilung: Absatzzahlen 2013: Wärmepumpen-Markt trotz hohen Strompreisen,“ 2014. [Online]. Available: <http://www.waermepumpe.de/presse/pressemitteilungen/pressemitteilung/article/absatzzahlen-2013-waermepumpen-markt-trotzt-hohen-strompreisen.html>. [Zugriff am 04 08

2014].

[17] Le gouvernement du grand-duché de Luxembourg, “Règlement grand-ducal du 30 novembre 2007 concernant la performance énergétique des bâtiments d’habitation (14.12.2007),” Service central de législation, Luxembourg, 2007.

[18] Le gouvernement du grand-duché de Luxembourg, „Règlement grand-ducal du 5 mai 2012 concernant la performance énergétique des bâtiments d’habitation et fonctionnels (11.05.2012),“ Service central de législation, Luxembourg, 2012.