

Passivhäuser für verschiedene Klimazonen

Abschlussbericht

gefördert unter dem Az: 26577 von der
Deutschen Bundesstiftung Umwelt

Herausgeber:

Wolfgang Feist, Passivhaus Institut und Universität Innsbruck,
Institut für Konstruktion und Materialwissenschaften

Autoren:

<i>Passivhaus Institut</i>	<i>Rongen Architekten</i>
Jürgen Schnieders	Ludwig Rongen
Wolfgang Feist	Reiner Wirtz
Tanja Schulz	
Benjamin Krick	

unter Mitarbeit von:

<i>Passivhaus Institut</i>	<i>Rongen Architekten</i>
Esther Gollwitzer	Kamil Wisniewski
Jan Steiger	Dorota Zawada
Susanna Gallas	Marcin Zawada
Anna Zieba	Yongheng Zhuo

Damstadt, November 2011

Projektkennblatt
der
Deutschen Bundesstiftung Umwelt



Az	26577	Referat	25	Fördersumme	122.817 €
----	--------------	---------	-----------	-------------	------------------

Antragstitel **Passivhäuser für verschiedene Klimazonen – Beispielhafte architektonische und technische Konzeptentwicklungen für 5 verschiedene Klimazonen**

Stichworte Passivhaus, Internationalisierung

Laufzeit	Projektbeginn	Projektende	Projektphase(n)
20 Monate	9.12.08	8.8.10	1

Zwischenberichte	Jul 2009 Feb 2011	Jan 2010	Jul 2010
------------------	----------------------	----------	----------

Bewilligungsempfänger	Passivhaus Institut Rheinstraße 44/46 64283 Darmstadt	Tel	06151/82699-0
		Fax	06151/82699-11
		Projektleitung	

Jürgen Schnieders

Bearbeiter

Jürgen Schnieders

Kooperationspartner Architekturbüro RONGEN ARCHITEKTEN
Propsteigasse 2
41849 Wassenberg

Zielsetzung und Anlaß des Vorhabens

Um die weltweit gesteckten Klimaschutzziele auch nur annähernd zu erreichen, ist es zwingend erforderlich, den durch Gebäudebeheizung und auch durch Gebäudekühlung verursachten Energieverbrauch drastisch - und zwar weltweit - zu senken. Die Suche nach alternativen Energiequellen wird die Probleme nicht allein lösen können. Es gilt vielmehr, Energie zu sparen, wo immer dies möglich ist. Das Bauen im Passivhausstandard kann hierzu einen bedeutenden Beitrag leisten. In Mitteleuropa lassen sich mit Passivhäusern erwiesenermaßen ca. 80% des Heizenergiebedarfs gegenüber konventionellen Neubauten einsparen. Genauso sollte es auch möglich sein, den Energieverbrauch für die Gebäudekühlung drastisch zu senken. Das Projekt soll am Beispiel von 5 Standorten, die die weltweit relevantesten Klimazonen und Regionen repräsentieren, diese Möglichkeiten illustrieren und damit zur Nachahmung anregen.

Darstellung der Arbeitsschritte und der angewandten Methoden

Die folgenden Standorte wurden ausgewählt: Jekaterinburg, Russland; Tokio, Japan; Shanghai, China; Dubai, Vereinigte Arabische Emirate; Las Vegas, USA.

Zunächst wurden grundlegende bauliche Einflussfaktoren auf Heiz- und Kühllast bzw. -bedarf ermittelt. Unter Beachtung lokaler Bautraditionen und Anforderungen wurde dann für jeden Standort ein Passivhaus entwickelt. Da die erfolgreiche Umsetzung von Passivhäusern auf eine sorgfältige Gestaltung und Umsetzung von Details angewiesen ist, sollten die Beispielobjekte bis zur Ausführungsreife durchentwickelt werden. Dabei waren u.a. zu berücksichtigen: Architektonischer Entwurf in hoher Gestaltqualität unter weitestgehender Berücksichtigung lokaler Traditionen (ästhetisch und funktional); Funktionalität der Bauteilaufbauten, bspw. in Bezug auf ihr feuchtetechnisches Verhalten; Wärmebrücken und Anschlussdetails, bspw. zur Gründung in kalten Klimata; Konzeptstudien für ggf. zu entwickelnde Komponenten, bspw. Lüftungswärme-/feuchterückgewinnung und Fensterkonstruktionen in kalten sowie in feucht-warmen Klimata; Haustechnikkonzepte, bspw. zur Entfeuchtung in feucht-warmen Klimata; Grenzen der technischen und wirtschaftlichen Realisierbarkeit von Passivhäusern an den jeweiligen Standorten.

Die Bearbeitung erfolgte in enger Zusammenarbeit zwischen den oben genannten, im Passivhausbau erfahrenen Partnern aus den Bereichen Bauphysik/Technik und Architektur.

Ergebnisse und Diskussion

Es konnte gezeigt werden, dass an den fünf untersuchten Standorten nicht nur kostengünstige Reihenhäuser, sondern auch architektonisch anspruchsvolle Gebäude im Passivhausstandard realisiert werden können. Architektonische Freiheiten und Gestaltungsmöglichkeiten, auch innerhalb von über Jahrhunderte gewachsenen Baukulturen, sind weiterhin gegeben.

Das kontinentale Klima in Jekaterinburg ist im Winter sonniger als das mitteleuropäische, aber mit Außentemperaturen bis -30 °C erheblich kälter. Gefragt sind daher primär Lösungen für den Winter. Wichtig ist ein ausgezeichneter Wärmeschutz rundum. Wünschenswert und technisch realisierbar wären weiter verbesserte Komponenten, insbesondere bzgl. Frostschutz der Lüftung und Fenster.

Tokio und Shanghai weisen ähnliche Klimata auf, mit nur gelegentlichem Frost im Winter, feucht-warmen Sommern und bedeutend höherer Solarstrahlung als in Mitteleuropa. Hier ist sowohl Beheizung als auch aktive Kühlung erforderlich, relativ guter Wärmeschutz wird für Winter und Sommer benötigt. Die hohe sommerliche Luftfeuchte verbietet Konzepte mit Nachtlüftung. Durch eine geeignet geregelte Feuchterückgewinnung lässt sich der Energiebedarf für die Entfeuchtung weit senken. Eine Trennung von Entfeuchtung und sensibler Kühlung kann ebenfalls zur Energieeinsparung beitragen. Passive Solarenergie-nutzung im Winter ist möglich, erfordert aber einen wirkungsvollen beweglichen Sonnenschutz.

Das Wüstenklima von Las Vegas zeichnet sich durch starke tages- und jahreszeitliche Temperaturunterschiede, hohe Solarstrahlung und niedrige Luftfeuchte aus. Der Wärmeschutz kann auf ähnlichem Niveau liegen wie in Tokio oder Shanghai, aktive Heizung und Kühlung sind erforderlich. Je nach Gebäudekonstruktion kommt man hier mit einem Zweifach-Sonnenschutzglas aus, hilfreich können helle, die intensive Solarstrahlung reflektierende Außenoberflächen sein. Entfeuchtung ist nicht erforderlich, stattdessen bietet sich eine Feuchterückgewinnung zur Anhebung der Luftfeuchte an. Das trockene Klima erlaubt den Einsatz einer Betonkerntemperierung als Heiz- und Kühlsystem.

In Dubai verlangt der heiße Sommer mit Temperaturen bis 45 °C nach einem guten Wärmeschutz und hellen Oberflächen, eine Heizung ist dann nicht mehr erforderlich. Dreifach-Sonnenschutzglas, idealerweise kombiniert mit einer feststehenden Verschattung, minimiert die solaren Lasten. Damit lässt sich die Kühllast so weit reduzieren, dass sie durch die Zuluft gedeckt werden kann. Nachtlüftung kommt während der 8 Monate langen Kühlperiode aufgrund der hohen Außentemperaturen und Luftfeuchten nicht in Betracht, sie kann lediglich im Winter unterstützend wirken.

Eine Analyse der weltweit verfügbaren Klimadaten zeigte, dass Passivhäuser mit ihren begrenzten Heiz- und Kühlleistungen fast überall auf der Welt realisiert werden können. Überraschenderweise sind weniger die heißen Regionen problematisch, sondern die sehr kalten.

Eine Besonderheit stellen die Tropen mit ihren geringen jahreszeitlichen Temperaturschwankungen dar. Dort ist keine Heizung erforderlich, auch bei kleinen Kühllasten kann jedoch ein sehr hoher jährlicher Kühlbedarf entstehen. Die ökonomische Analyse zeigt, dass für diese Klimata Baustandards, die über das funktionale Passivhausniveau noch hinausgehen, wirtschaftlich die beste Lösung darstellen.

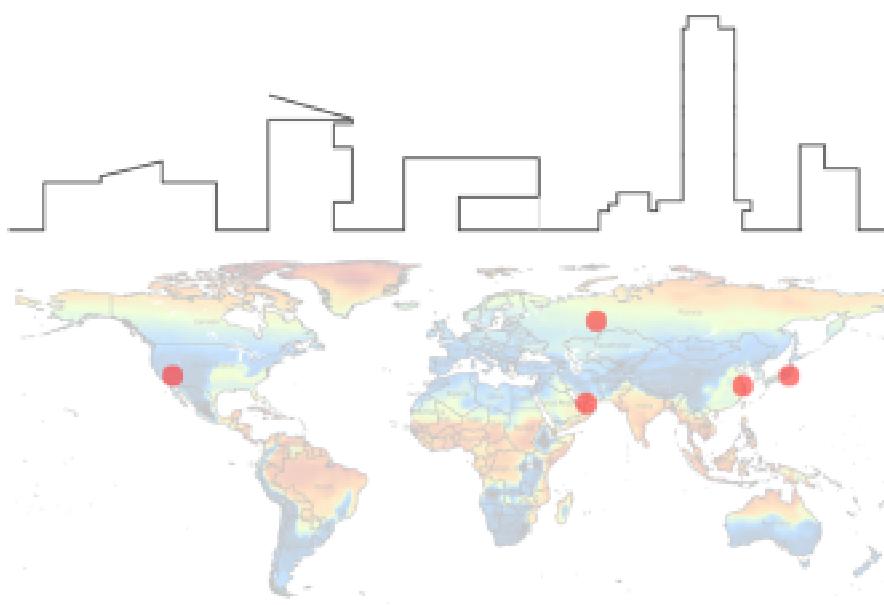
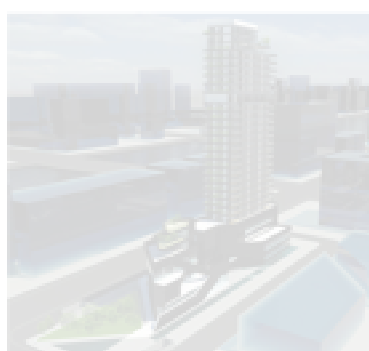
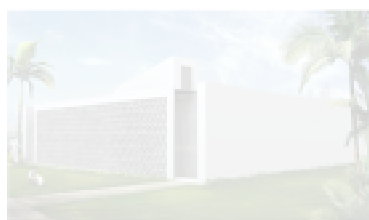
Eine Anpassung des Passivhauskonzepts an die lokalen Bautraditionen, Klimata und ästhetischen Vorstellungen wird in jedem Falle erforderlich werden. Die hygrothermischen Berechnungen zeigen, dass je nach Standort auch unterschiedliche Bauteilaufbauten eingesetzt werden müssen. Konstruktionen, die sich in einem bestimmten Klima bewährt haben, können anderswo vollkommen ungeeignet sein.

Öffentlichkeitsarbeit und Präsentation

Die Projektergebnisse wurden bei verschiedenen Veranstaltungen vorgestellt, so z.B. auf der Konferenz Passive and Low Energy Cooling for the Built Environment Palenc 2010 auf Rhodos, auf der Big 5 International Building and Construction Show im November 2010 in Dubai und bei der Passivhaus Tagung im Mai 2011 in Innsbruck. Der Endbericht soll in gedruckter Form in englischer Sprache erhältlich sein, ferner werden die Inhalte in deutscher und englischer Sprache Teil der von der DBU unterstützten Passipedia (www.passipedia.de). Die gewonnenen Erkenntnisse werden vollständig in die künftige Arbeit des Bewilligungsempfängers einfließen. Weitere Veröffentlichungen sind geplant.

Fazit

Am Beispiel der fünf untersuchten Standorte, in Teilaspekten sogar weltweit, konnte gezeigt werden, wie das Passivhaus-Prinzip der Lastminimierung auch in anderen Klimata so umgesetzt werden kann, dass komfortable, energieeffiziente und ökonomisch wie architektonisch interessante Gebäude entstehen. Damit wurde die Grundlage für eine erfolgreiche Realisierung von Passivhäusern in anderen Klimazonen geschaffen.



Passivhäuser für verschiedene Klimazonen

Herausgeber:

Wolfgang Feist, Passivhaus Institut und Universität Innsbruck

Autoren:

Passivhaus Institut
Jürgen Schnieders
Wolfgang Feist
Tanja Schulz
Benjamin Krick

RoA RONGEN ARCHITEKTEN GmbH
Ludwig Rongen
Reiner Wirtz

unter Mitarbeit von:

Passivhaus Institut
Esther Gollwitzer
Jan Steiger
Susanna Gallas
Anna Zieba

RoA RONGEN ARCHITEKTEN GmbH
Kamil Wisniewski
Dorota Zawada
Marcin Zawada
Yongheng Zhuo

Passivhäuser für verschiedene Klimazonen

November 2011

Herausgeber:

Wolfgang Feist, Passivhaus Institut und Universität Innsbruck,
Institut für Konstruktion und Materialwissenschaften

Autoren:

<i>Passivhaus Institut</i>	<i>Rongen Architekten</i>
Jürgen Schnieders	Ludwig Rongen
Wolfgang Feist	Reiner Wirtz
Tanja Schulz	
Benjamin Krick	

unter Mitarbeit von:

<i>Passivhaus Institut</i>	<i>Rongen Architekten</i>
Esther Gollwitzer	Kamil Wisniewski
Jan Steiger	Dorota Zawada
Susanna Gallas	Marcin Zawada
Anna Zieba	Yongheng Zhuo

Passivhaus Institut ● Rheinstr. 44/46 ● 64283 Darmstadt ● www.passiv.de

Rongen Architekten ● Propsteigasse 2 ● 41849 Wassenberg ● www.rongen-architekten.de

Die Autoren danken den Fördergebern, der Deutschen Bundesstiftung Umwelt und Saint-Gobain CRIR, für die finanzielle und inhaltliche Unterstützung dieses Forschungsprojekts.

gefördert durch



www.dbu.de



Inhalt

1	Einleitung	11
1.1	Projektziele	11
1.2	Grundprinzip Passivhaus	12
1.3	Struktur des Berichts	13
1.4	Hauptergebnisse	15
2	Dynamische Gebäudesimulationen für Referenz-Passivhäuser	17
2.1	Allgemeines zu den Referenz-Passivhäusern	17
2.2	01 - Jekaterinburg	20
2.2.1	Referenz-Passivhaus	20
2.2.2	Ergebnisse	21
2.3	02 - Tokio	25
2.3.1	Referenz-Passivhaus	25
2.3.2	Ergebnisse	26
2.4	03 - Shanghai	30
2.4.1	Referenz-Passivhaus	30
2.4.2	Ergebnisse	31
2.5	04 - Las Vegas	33
2.5.1	Referenz-Passivhaus	33
2.5.2	Ergebnisse	34
2.6	05 - Dubai	37
2.6.1	Referenz-Passivhaus	37
2.6.2	Ergebnisse	39
2.7	Einfluss des Nutzerverhaltens	42
3	Standortspezifische Besonderheiten	43
4	Beispielgebäude	45
4.1	Allgemeines zu den Beispielgebäuden	45
4.2	01 - Jekaterinburg	46
4.2.1	Entwurfskonzept	46
4.2.2	Grundrisse	46
4.2.3	Ansichten / Schnitte	47
4.2.4	Detailausbildung	48
4.2.5	Fazit	49
4.3	02 - Tokio	51
4.3.1	Entwurfskonzept	51
4.3.2	Grundrisse	51
4.3.3	Ansichten / Schnitte	52
4.3.4	Detailausbildung	53
4.3.5	Perspektiven / Schaubilder	54
4.3.6	Fazit	55

4.4	03 - Shanghai	56
4.4.1	Entwurfskonzept	56
4.4.2	Grundrisse	56
4.4.3	Ansichten / Schnitte.....	59
4.4.4	Detailausbildung	60
4.4.5	Perspektiven / Schaubilder	60
4.4.6	Fazit	61
4.5	04 - Las Vegas	62
4.5.1	Entwurfskonzept	62
4.5.2	Grundrisse	62
4.5.3	Ansichten / Schnitte.....	64
4.5.4	Detailausbildung	65
4.5.5	Perspektiven / Schaubilder	66
4.5.6	Fazit	67
4.6	05 - Dubai	68
4.6.1	Entwurfskonzept	68
4.6.2	Grundrisse	68
4.6.3	Ansichten / Schnitte.....	71
4.6.4	Detailausbildung	72
4.6.5	Perspektiven / Schaubilder	73
4.6.6	Fazit	74
5	Hygrothermische Untersuchungen	75
5.1	Problemstellung.....	75
5.2	Berechnungsverfahren.....	75
5.3	Bewertungskriterien	75
6	Auswertungen weltweiter Klimadaten	78
6.1	Rechenverfahren für die Heiz- und Kühllast	78
6.2	Passivhäuser weltweit.....	79
6.2.1	Funktionale Passivhäuser	80
6.2.2	Kostenoptimierte Häuser.....	87
6.3	Passivhaus-Definition.....	94
6.3.1	Heizung und Heizlast.....	95
6.3.2	Kühlung und Kühllast.....	95
7	Literatur	98
Anhang A	Glossar	104
A.1	Berechnungswerkzeuge.....	104
A.2	Luft und Lüftung.....	104
A.3	Energie	105
A.4	Sonstiges	106



1 Einleitung

Der vorliegende Text stellt den Projektabschlussbericht zum Forschungsprojekt „Passivhäuser für verschiedene Klimazonen“ dar. Die im Projekt erarbeiteten Ergebnisse sind hier zusammengefasst. Eine umfassende Dokumentation der Projektergebnisse mit wichtigen Details und genaueren Erläuterungen auf mehr als 500 Seiten ist im ausführlichen Projektbericht zu finden, der in deutscher und englischer Sprache beim Passivhaus Institut erhältlich ist.

1.1 Projektziele

Der Gebäudesektor ist für einen wesentlichen Anteil am menschengemachten CO₂-Eintrag in die Atmosphäre verantwortlich. Positiv ausgedrückt: Energieeinsparung bei Gebäudeheizung und -kühlung hat das Potenzial, die Belastung der Atmosphäre mit klimawirksamen Gasen wirksam zu vermindern. Das Bauen im Passivhausstandard kann hierzu einen bedeutenden Beitrag leisten.

In Mitteleuropa lassen sich mit Passivhäusern erweisenmaßen ca. 80 % Heizwärme gegenüber aktuellen Neubauten einsparen. Die vorliegende Studie zielt nun auf die grundsätzliche Übertragung des Passivhauskonzepts auf Klimazonen, die sich gravierend von der mitteleuropäischen unterscheiden.

Den sehr erfolgreichen ersten Passivhausprojekten in Deutschland ging eine umfassende und streng systematische wissenschaftliche Vorarbeit voraus. Mit Hilfe detaillierter dynamischer Gebäudesimulation konnten wichtige Planungsparameter im Vorfeld identifiziert und ihre jeweilige Bedeutung für das Gesamtsystem herausgearbeitet werden. Im Ergebnis wurde ein gutes Grundverständnis des themischen Verhaltens von Passivhäusern bereits vor dem Bau des ersten Pilotprojektes erreicht. So konnten ernste Planungsfehler von Beginn an vermieden werden und das Konzept konnte rasch eine größere Zahl von überzeugten Weiterentwicklern und Anwendern finden.

Es gibt in Klimazonen jenseits von Mitteleuropa derzeit Pilotprojekte, aber noch nicht die breite Basis von Praxiserfahrungen wie in Mitteleuropa. Gleichzeitig ist die systematische wissenschaftliche Aufarbeitung der jeweiligen Planungsgrundlagen noch nicht im eigentlich wünschenswerten Umfang möglich gewesen. Durch die Untersuchung exemplarischer Standorte weltweit soll diese Studie daher eine erste fundierte Orientierung über sinnvolle Ansätze für Passivhäuser und den Einfluss einzelner Planungsparameter an den jeweiligen Orten zu geben. Es handelt sich um einen Forschungsbericht, der zwar ein solides theoretisches Fundament und zahlreiche Planungshinweise zu bieten versucht, dessen Ergebnisse aber noch nicht auf einer breiten Basis in der praktischen Anwendung überprüft sind.



Auch kann und will dieser Bericht kein vollständiges Passivhaus-Planungshandbuch für die untersuchten Klimata sein. Die Grundlagen (z.B. [Feist 2001]) werden hier nicht im Detail aufbereitet, fundierte Grundkenntnisse der in Mitteleuropa vorhandenen Forschungsergebnisse und Erfahrungen zu Passivhäusern, publiziert in den Protokollbänden des Arbeitskreises kostengünstige Passivhäuser [AKKP 1996–2012], Projektberichten, den Tagungsbänden der Internationalen Passivhaustagungen [IPHC 1996-1012], werden weitgehend vorausgesetzt. Insbesondere wird hingewiesen auf die neue Wissensdatenbank Passipedia [Passipedia 2011]. Dort ist eine beständig wachsende Menge von grundlegenden wie auch detaillierten Informationen zum Passivhaus in deutscher und englischer Sprache zu finden.

1.2 Grundprinzip Passivhaus

Das in Deutschland zu Beginn der 1990er Jahre entwickelte und inzwischen weit über Europa hinaus erfolgreiche Passivhauskonzept hat die Bereitstellung eines für den Menschen optimal behaglichen Innenraumklimas mit minimalem Energieeinsatz zum Ziel. Es bedient sich dazu verschiedener Strategien zur Verminderung der am und im Gebäude auftretenden Energieströme. Dabei stehen passive Maßnahmen im Vordergrund. Wärmedämmung und die Vermeidung von Wärmebrücken, der Einsatz hochwertiger Fenster und luftdichter Konstruktionen gehören dazu, der Name Passivhaus bringt den Primat dieser Maßnahmen in optimierter Kombination zum Ausdruck. Je nach klimatischen Bedingungen kommen wenige technische Einrichtungen geringer Leistung hinzu: In den meisten Fällen wird eine Lüftungsanlage mit Wärme- und/oder Feuchteübertragung erforderlich, an anderen Orten ergänzt durch Einrichtungen für Wärmezufuhr (Heizung) und/oder Wärmeentzug (Kühlung) bzw. zur Entfeuchtung der Innenraumluft. Die zu installierende Leistung dieser Komponenten ist regelmäßig so gering, dass sich besonders innovative und kostensparende Konzepte (z.B. durch Beheizung/Kühlung der Räume allein durch Behandlung der hygienisch erforderlichen Zuluftmenge) realisieren lassen. Über die Jahresperiode kumuliert tritt damit der gewünschte Effekt eines extrem geringen Energieeinsatzes ein, obwohl gleichzeitig hygrothermisch optimale Behaglichkeitsbedingungen zur Verfügung gestellt werden.

Das erste Passivhaus in Darmstadt-Kranichstein, hervorgegangen aus einem Forschungsprojekt, erreichte bei hoher Nutzerzufriedenheit die folgenden, gemessenen Energieverbräuche ([Feist 1994]):

- Heizwärme: 11.9 kWh/(m²a)
- Warmwasser: 6.1 kWh/(m²a)
- Kochgas: 2.6 kWh/(m²a)
- Gesamter Stromverbrauch, inkl. aller Haushaltsanwendungen: 11.2 kWh/(m²a)



Wie überall im vorliegenden Bericht beziehen sich diese Werte auf die *Wohnfläche*, d.h. die Summe der Netto-Grundflächen aller Räume innerhalb der thermischen Hülle, ohne die Flächen von Innen- und Außenwänden oder Treppen.

Auch die in heute realisierten Passivhäusern gemessenen Energieverbräuche liegen im Durchschnitt nahe an den mit geeigneten Planungswerkzeugen, insbesondere dem [PHPP], vorhergesagten Werten. Für eine Zertifizierung durch das Passivhaus Institut verlangt wird ein Heizwärmebedarf, bezogen auf 20 °C Raumtemperatur, von 15 kWh/(m²a). Alternativ ist der Nachweis einer Heizlast von höchstens 10 W/m² zulässig, beide Anforderungen haben sich in Deutschland als grob äquivalent erwiesen. Als weitere Anforderungen werden verlangt ein Primärenergieverbrauch unter 120 kWh/(m²a) und eine ausgezeichnete Luftdichtheit: Luftwechsel höchstens 0,6 h⁻¹ bei 50 Pa Druckdifferenz. Die Dichtheit der Hülle kann im Gegensatz zu anderen Parametern leicht auf der Baustelle überprüft werden, von erfahrenen Planern wird der genannte Grenzwert reproduzierbar erreicht oder sogar deutlich unterschritten.

Die Arbeit an einer Definition für Passivhäuser in anderen Klimazonen ist einer der Gegenstände der vorliegenden Studie. Simultan hierzu wurden für die Planung von Passivhäusern an den einzelnen Standorten jedoch bereits Kriterien benötigt. Da der Passivhausstandard einerseits auf einen geringen Energieverbrauch, andererseits auf kostengünstige Realisierbarkeit zielt, werden in dieser Studie jeweils zwei alternative Kriterien für Heizung und Kühlung verwendet: Entweder ein Nutzenergiebedarf von 15 kWh/(m²a) oder eine maximale, tagesmittlere Heiz- bzw. Kühllast von 10 W/m². Leistungen in dieser Größe können über die Zuluft noch eingebracht werden. Lediglich in den Simulationsrechnungen wird statt des pauschalen Grenzwerts von 10 W/m² die Klimatisierbarkeit über die Zuluft anhand der tatsächlichen Modellparameter überprüft.

1.3 Struktur des Berichts

Der vorliegende Bericht befasst sich mit dem Neubau von Wohngebäuden anhand von theoretischen Überlegungen. Messergebnisse, Beschreibungen oder Pläne von tatsächlich realisierten Objekten sind im Bericht nicht zu finden. Weder Nichtwohngebäude noch Altbauten werden explizit behandelt, eine Anwendung der hier analysierten Techniken und Komponenten in solchen Gebäuden wird jedoch in aller Regel problemlos möglich sein.

Der Bericht gliedert sich wie folgt:

Zu Beginn werden die zu untersuchenden Standorte festgelegt und die benötigten Klimadaten ermittelt.

Dann wird für jeden Standort ein Referenz-Passivhaus definiert, d.h. eines, das allein über die aus Gründen der Luftqualität benötigte Zuluft klimatisierbar ist. Ausgehend von diesem Gebäude wird illustriert, welche Bedeutung verschiedene bauliche Ein-



flussgrößen besitzen. Daraus ergibt sich bereits eine erste Orientierung, worauf bei der Planung besonders zu achten ist. Eine architektonische Anpassung an den jeweiligen Standort spielt bis dahin noch keine Rolle.

Drittens werden technische Aspekte, die in Mitteleuropa keine Rolle spielen oder die in anderen Klimazonen besonders relevant werden, z.B. der Frostschutz für die Lüftungsanlage oder der Umgang mit hoher Außenluftfeuchte, näher beleuchtet.

Daran anschließend werden Gebäudeentwürfe für fünf klima- und standortangepasste Passivhäuser entwickelt und die zugehörigen Konzepte, die Bauteilaufbauten, Anschlussdetails und Energiebilanzen präsentiert.

Der hygrothermischen Untersuchung der verwendeten Bauteilaufbauten widmet sich ein eigener Abschnitt. Dort wird untersucht, ob für die vorgeschlagenen Konstruktionen – einwandfreie Ausführung vorausgesetzt – in den jeweiligen Klimata hygri-sche Probleme, z.B. langfristige Auffeuchtungen, Schimmelwachstum oder Kondensat im Bauteilinnern, befürchtet werden müssen.

Zum Abschluss werden Verfahren für die Ermittlung von Auslegungsdaten für die Heiz- und Kühllast beschrieben und, basierend auf einer Datenbank mit weltweiten Klimadaten, die wichtigsten Eigenschaften von Passivhäusern an beliebigen Standorten auf der Welt charakterisiert.

Einige häufiger wiederkehrende Begriffe können im Glossar auf Seite 104 nachgeschlagen werden.



1.4 Hauptergebnisse

Fünf Standorte in verschiedenen Klimazonen wurden näher betrachtet: 01 - Jekaterinburg, 02 - Tokio, 03 - Shanghai, 04 - Las Vegas, 05 - Dubai. Für alle Standorte konnte gezeigt werden, dass Passivhäuser technisch realisierbar sind.

Das kontinentale Klima in 01 - Jekaterinburg ist im Winter sonniger als das mitteleuropäische, aber mit Außentemperaturen bis -30 °C erheblich kälter. Gefragt sind daher primär Lösungen für den Winter, der Sommer ist durch einfache passive Maßnahmen leicht beherrschbar. Wichtig ist ein ausgezeichneter Wärmeschutz rundum, auch in Bezug auf die Lüftung und Luftdichtheit, der an die Grenzen des heute Marktverfügbaren geht. Die in Mitteleuropa bewährten Frostschutzstrategien für die Lüftungswärmerückgewinnung sind nicht mehr geeignet. Wünschenswert und technisch realisierbar wären weiter verbesserte Komponenten, insbesondere Fenster. Eine Feuchterückgewinnung ist zur Anhebung der winterlichen Raumluftfeuchte zweckmäßig.

02 - Tokio und 03 - Shanghai weisen ähnliche Klimata auf, mit nur gelegentlichem Frost im Winter, feucht-warmen Sommer und bedeutend höherer Solarstrahlung als in Mitteleuropa. Hier ist sowohl Beheizung als auch aktive Kühlung erforderlich. Guter Wärmeschutz wird für Winter und Sommer benötigt, allerdings auf etwas niedrigerem Niveau als in Mitteleuropa. Die hohe sommerliche Luftfeuchte verbietet unter maximalen Kühllastbedingungen Konzepte mit Nachtlüftung. Durch eine geeignet geregelte Feuchterückgewinnung lässt sich der Energiebedarf für die Entfeuchtung weit senken. Eine Trennung von Entfeuchtung und sensibler Kühlung kann ebenfalls zur Energieeinsparung beitragen. Passive Solarenergienutzung im Winter ist möglich, erfordert aber für den Sommer einen wirkungsvollen beweglichen Sonnenschutz.

Das Wüstenklima von 04 - Las Vegas zeichnet sich durch starke tages- und jahreszeitliche Temperaturunterschiede, hohe Solarstrahlung und niedrige Luftfeuchte aus. Der Wärmeschutz kann auf ähnlichem Niveau liegen wie in Tokio oder Shanghai, aktive Heizung und Kühlung sind erforderlich. Je nach Gebäudekonstruktion kommt man hier mit einem Zweifach-Sonnenschutzglas aus, hilfreich können helle, die intensive Solarstrahlung reflektierende Außenoberflächen sein. Entfeuchtung ist nicht erforderlich, stattdessen bietet sich eine Feuchterückgewinnung zur Anhebung der Luftfeuchte in der Heizzeit an. Das trockene Klima erlaubt den Einsatz einer Betonkerntemperierung als Heiz- und Kühlsystem.

In 05 - Dubai verlangt der heiße Sommer mit Temperaturen bis 45 °C nach einem guten Wärmeschutz und hellen Oberflächen, eine Heizung ist dann nicht mehr erforderlich. Dreifach-Sonnenschutzglas, idealerweise kombiniert mit einer feststehenden Verschattung, minimiert die solaren Lasten. Damit lässt sich die Kühllast so weit reduzieren, dass sie durch die Zuluft gedeckt werden kann. Nachtlüftung kommt wäh-



rend der 8 Monate langen Kühlperiode aufgrund der hohen Außentemperaturen und Luftfeuchten nicht in Betracht, sie kann lediglich im Winter unterstützend wirken.

Eine Analyse der weltweit verfügbaren Satellitendaten zeigte, dass Passivhäuser mit ihren begrenzten Heiz- und Kühlleistungen fast überall auf der Welt realisiert werden können. Überraschenderweise sind weniger die heißen Regionen problematisch (die maximalen tagesmittleren Außentemperaturen liegen fast nie über 40 °C, dafür reichen die marktverfügbaren Komponenten gerade noch aus), sondern die sehr kalten. Für Tagesmitteltemperaturen bis -70 °C ohne nennenswerte Solarstrahlung müssten ausreichend gute Außenbauteile, insbesondere Fenster, handwerklich angefertigt werden. Auch wirtschaftlich erscheint eine Reduzierung der Heizleistung bis auf Passivhausniveau in den extrem kalten Klimata derzeit nicht zweckmäßig. Diese Tatsache mag theoretisch interessant sein, ist aber nicht praktisch relevant, da diese Regionen praktisch unbesiedelt sind.

Eine Besonderheit stellen die Tropen mit ihren geringen jahreszeitlichen Temperaturschwankungen dar. Dort ist keine Heizung erforderlich, auch bei kleinen Kühllasten kann jedoch ein sehr hoher jährlicher Kühlbedarf entstehen. Die ökonomische Analyse zeigt, dass für diese Klimata Baustandards, die über das funktionale Passivhausniveau noch hinausgehen, wirtschaftlich die beste Lösung darstellen.

Eine Anpassung des Passivhauskonzepts an die lokalen Bautraditionen, Klimata und ästhetischen Vorstellungen wird in jedem Falle erforderlich werden. Die hygrothermischen Berechnungen zeigen, dass je nach Standort auch unterschiedliche Bauteilaufbauten eingesetzt werden müssen. Konstruktionen, die sich in einem bestimmten Klima bewährt haben, können anderswo vollkommen ungeeignet sein.

Es konnte gezeigt werden, dass an den fünf untersuchten Standorten nicht nur kostengünstige Reihenhäuser, sondern auch architektonisch anspruchsvolle Gebäude im Passivhausstandard realisiert werden können, wiewohl dann unter Umständen ein höherer baulicher Aufwand als bei schlichten Baukörpern mit mäßigen Fensterflächen erforderlich wird. Das Passivhauskonzept eröffnet architektonische Freiheiten und Gestaltungsmöglichkeiten, auch innerhalb von über Jahrhunderte gewachsenen Baukulturen.



2 Dynamische Gebäudesimulationen für Referenz-Passivhäuser

In diesem Abschnitt werden zunächst für jeden Standort Referenz-Passivhäuser definiert. Sie basieren auf der Geometrie eines kleinen, zweigeschossigen Reihenendhauses mit 120 m² Wohnfläche. Jedes dieser Referenz-Passivhäuser stellt von seinen thermischen Eigenschaften her ein funktionales Passivhaus dar, d.h. es ist über die aus hygienischen Gründen benötigte Zuluft klimatisierbar und wurde zu diesem Zweck auf entsprechend geringe Heiz- und Kühllasten ausgelegt. Eine Anmerkung: Wenn hier und im Rest dieser Studie von Klimatisierbarkeit über die Zuluft die Rede ist, so ist damit nicht notwendig eine Vollklimaanlage mit den Funktionen Heizung, Kühlung, Be- und Entfeuchtung gemeint, sondern lediglich die Realisierung komfortabler Innenraumbedingungen.

In einem zweiten Schritt werden für jeden Standort, basierend auf den Referenz-Passivhäusern, Parameterstudien durchgeführt, die die Bedeutung einzelner baulicher Parameter illustrieren. Daran wird deutlich, worauf bei der Planung von Passivhäusern an den jeweiligen Standorten besonders zu achten ist. Ähnliche Parameterstudien wurden bereits zur Entwicklung der Referenz-Passivhäuser durchgeführt, dokumentiert wird hier also letztlich das Ergebnis eines iterativen Prozesses.

Das grundlegende Gebäudemodell basiert auf einer real gebauten Reihenhaussiedlung in Hannover im Rahmen des CEPHEUS Projekts und ist bis auf geringfügige Anpassungen identisch mit dem in [Schnieders 2009] bereits verwendeten Modell. Die zugehörige Gebäudebeschreibung wird in Abschnitt 2.1, soweit noch zutreffend, wiederholt. Die Berechnungen erfolgen mit dem hygrothermischen, dynamischen Gebäudesimulationsprogramm DYNBIL. Näheres zum Programm ist im Glossar zu finden.

2.1 Allgemeines zu den Referenz-Passivhäusern

Die Simulation betrachtet ein Reihenendhaus mit zwei Stockwerken und Keller (Abbildung 1). Die Geometrie ist typisch für kostengünstigen Wohnungsbau für junge Familien, wie er überall in Europa gängig ist, mit einem Wohn-/Ess-/Kochbereich im Erdgeschoss und zwei bis drei Schlafzimmern im ersten Stock.

Das Haus ist 6 m breit und 11 m tief (Innenmaße), die Energiebezugsfläche, d.h. die Summe der Wohnflächen, beträgt 120 m². Im Folgenden wird das Gebäude kurz beschrieben. Details zum Simulationsmodell sind (in englischer Sprache) im ausführlichen Projektbericht zu finden. Die Fensterflächen sind mäßig groß, um die Investitionskosten und die solaren Lasten im Sommer zu begrenzen. Das Gebäude ist in Mischbauweise errichtet. Der solare Absorptionskoeffizient außen beträgt 0,6 für die Wände, 0,72 für das Dach, sofern nicht anders angegeben.



Abbildung 1: Ungefähres Aussehen der Passivhaus-Reihe v von Südwesten. Das linke Reihenhäuserhaus wurde als Referenz-Passivhaus verwendet (Zeichnung: Saint-Gobain Isover).

Neben den geometrischen Daten haben die Gebäude weitere gemeinsame Eigenschaften (sofern nicht in der jeweiligen Übersicht über die Gebäudedetails anders angegeben). Alle Gebäude werden als sehr gut luftdicht angenommen ($n_{50} = 0,3$ bis $0,5 \text{ h}^{-1}$ gemäß EN 13829). Die Luftwechselrate, die vom mechanischen Lüftungssystem mit Wärmerückgewinnung geliefert wird, wird durch die Anforderungen an die Raumluftqualität bestimmt und beträgt $0,35 \text{ h}^{-1}$ bzw. $1 \text{ m}^3/\text{h}$ pro Quadratmeter Wohnfläche. An einigen Standorten wird zusätzlich durch gekippte Fenster gelüftet, wenn die Außentemperaturen unterhalb der Raumtemperaturen liegen.

Wärmebrücken werden grundsätzlich vermieden. Das Wärmedämmverbundsystem wird nicht durch einbindende Innenwände gestört, die Dämmlagen von Dach und Wand schließen in voller Stärke aneinander an. Eine Ausnahme stellen die Durchdringungen des lastabtragenden Mauerwerks durch die Kellerdecke dar. Obwohl diese Wärmebrücken ebenfalls leicht vermieden werden können, z.B. durch Porenbetonblöcke in der Dämmebene, sind solche Konstruktionen in vielen Teilen der Welt unüblich. An vielen Standorten ist eine Wärmebrückenreduzierung aufgrund des milden Klimas auch nicht notwendig. Für einige Standorte wird eine Wärmebrückenreduzierung mit einem Ψ -Wert von $0,02 \text{ W}/(\text{mK})$ angesetzt, für andere, ohne Wärmebrückenreduzierung, ergibt sich $\Psi = 0,6 \text{ W}/(\text{mK})$.

Die Fenster sind in der Dämmebene eingebaut und überdämmt, Ψ_{Einbau} beträgt $0,01 \text{ W}/(\text{mK})$.

Mit Ausnahme von 01 - Jekaterinburg erschien es unmöglich, ein komfortables Innenklima nur mit passiver Kühlung zu erreichen, zumindest in den Grenzen des angenommenen grundlegenden architektonischen Entwurfs. In diesen Fällen wird eine



Zuluftkühlung vorgeschlagen. Je nach der typischen Feuchte der Außenluft kann dieses System einen taktenden oder modulierenden Kompressor für höhere bzw. niedrigere sensible Kühllanteile besitzen.

Wenn ein Zuluft-Heiz-/Kühlsystem vorhanden ist, ist die Heizleistung auf 10 W pro m² Wohnfläche begrenzt. Um stets ausreichende Entfeuchtung zu erlauben, beträgt die Nennkühlleistung 25 W/m², wobei eine zusätzliche Begrenzung durch die Bedingung entsteht, dass die mittlere Oberflächentemperatur der Kühlturbine nicht unter 0 °C fallen darf.

Die internen Wärme- und Feuchtequellen hängen von einer Reihe von Faktoren ab. Bei der Berechnung werden Wärmeströme in das Frischwasser (in Dubai: Wärmegewinne aus diesem), durch Verdunstung von Wasser aus Zimmerpflanzen, Handtüchern etc., Ablaufverluste von Wasser aus Wasch- und Spülmaschinen sowie vom Kochen berücksichtigt. Die internen Quellen hängen daher nicht nur vom angenommenen Nutzerprofil, sondern auch vom Standort und von der Jahreszeit ab. Fast alle Simulationen werden für ein Standardnutzerprofil durchgeführt.

Die Entscheidung, welche Komponenten der Gebäudehülle bei der Entwicklung der Referenz-Passivhäuser am besten optimiert werden sollten, ist keineswegs eindeutig. Die ausgewählte Komponentenkombination orientiert sich grob an den derzeitigen Verhältnissen der Kosten von Gebäudekomponenten in Deutschland. Im Rahmen dieser Studie wurden keine detaillierten Erhebungen zu Baukosten in den verschiedenen Ländern durchgeführt. Es wird daher nicht der Nachweis versucht, dass die Auswahl von Gebäudekomponenten für die Referenzpassivhäuser, in welcher Weise auch immer, optimal sei. Die Vorschläge sollten als mögliche Lösungen für eine Passivhausplanung angesehen werden, aber nicht notwendig als die optimale Lösung.

Der ausführliche Projektbericht enthält zu jedem Standort eine Charakterisierung des Klimas und eine ausführliche Parameterstudie, in der die Einflüsse verschiedener baulicher Parameter betrachtet werden. Daraus leitet sich jeweils das Fazit zur Passivhausbauweise am jeweiligen Standort ab.



2.2 01 - Jekaterinburg

2.2.1 Referenz-Passivhaus

In den kalten Wintern von Jekaterinburg ist ein ausgezeichneter Wärmeschutz unerlässlich. Die Heizlast lässt sich nur dann über die Zuluft decken, wenn ca. 50 cm Dämmung, konsequente Wärmebrückenvermeidung, eine sehr gut luftdichte Hülle und die besten derzeit am Markt verfügbaren Fensterrahmen und Verglasungen kombiniert werden. Sinnvollerweise wird man in einem solchen Gebäude eine sehr hochwertige Wärmerückgewinnung installieren.

Die niedrigen Außentemperaturen führen im Winter zu sehr geringen absoluten Außenluftfeuchten und entsprechend trockener Raumluft. Wenn die Raumluftfeuchten im Winter nicht monatelang zwischen 10 und 20% liegen sollen, ist eine Feuchterückgewinnung aus der Abluft erforderlich, was bei Plattenwärmeübertragern bislang mit einer schlechteren Wärmerückgewinnung einhergeht. Die in der Simulation gewählte Kombination von Wärme- und Feuchterückgewinnung ist physikalisch möglich, so derzeit am Markt jedoch noch nicht verfügbar.

Der Sommer ist trotz des kontinentalen Klimas mild genug, dass auf eine bewegliche Verschattung, möglicherweise sogar auf den Bypass der Wärmerückgewinnung verzichtet werden kann.

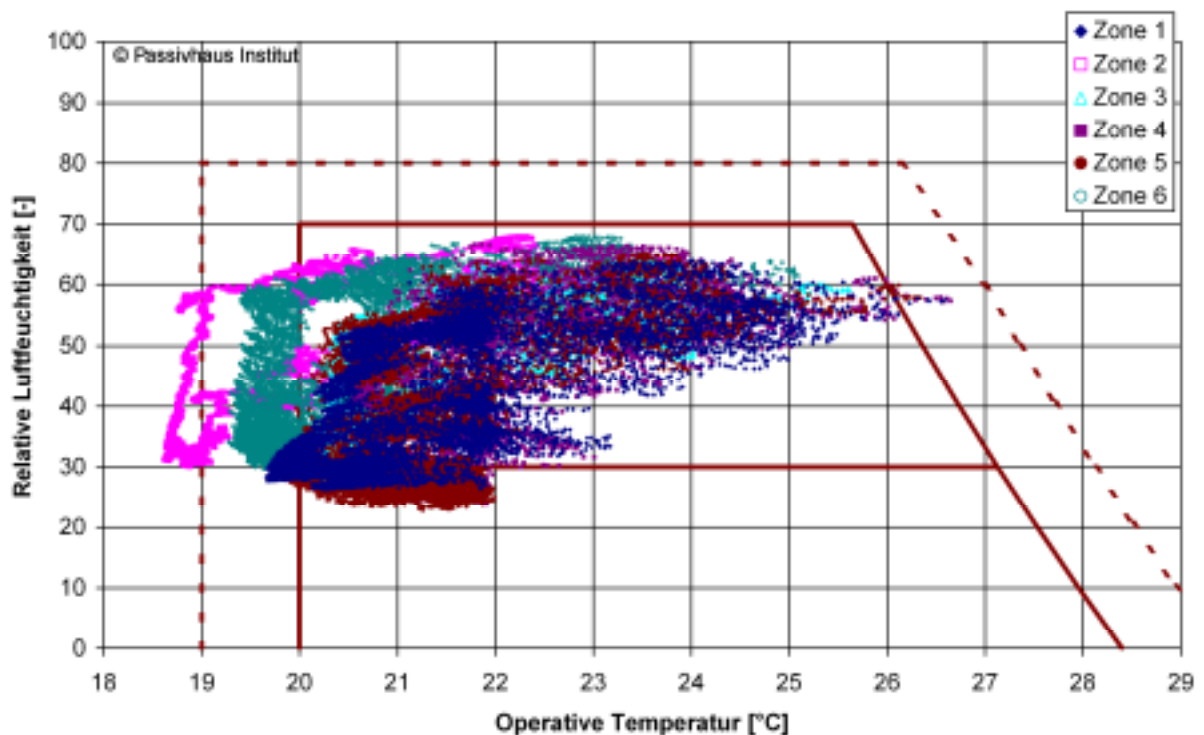
Eigenschaften	
Wand: U-Wert, Dämmstärke	0,064 W/(m ² K); 50 cm
Dach: U-Wert, Dämmstärke	0,042 W/(m ² K); 80 cm
Kellerdecke: U-Wert, Dämmstärke	0,083 W/(m ² K); 40 cm
Wärmebrückenreduzierung Keller	ja
Absorptionskoeffizient außen Wand / Dach	0,6 / 0,72
U-Wert Fensterrahmen	0,67 W/(m ² K)
U-/g-Wert Verglasung	0,51 W/(m ² K); 0,52
Verschattung	keine
Luftwechsel bei 50 Pa Druckdifferenz n ₅₀	0,3 h ⁻¹
Wärmebereitstellungsgrad Lüftung	0,92
Feuchteverhältnis Lüftung	0,6
WRG-Bypass	kein
Nachtlüftung über Fenster	ja
Klimatisierung über die Zuluft	ja, + Badheizkörper
Betrieb Kühlturbine	-
Feuchteregelung Kühlung	-



2.2.2 Ergebnisse

	Ideales Heiz- und Kühlsystem	Klimatisierung über Zuluft	<i>ungedämmt, ideales Heiz- und Kühlsystem</i>
Heizwärmebedarf (20 °C) [kWh/(m ² a)]	22.4	23.2	602.2
Nutzkältebedarf (26 °C @ 60%) [kWh/(m ² a)]	0.0	0.0	0.7
Entfeuchtungsbedarf (70% r.F.) [kWh/(m ² a)]	0.0	0.0	0.1
24-h Mittelwert Heizlast [W/m ²]	10.3	10.0	191.5
24-h Mittelwert sensible Kühllast [W/m ²]	0.9	0.0	8.4
24-h Mittelwert latente Kühllast [W/m ²]	0.1	0.0	1.1

Innenraumbedingungen bei Klimatisierung über die Zuluft:





Wenn die Heizlast auf 10 W/m^2 reduziert wird, liegt der Heizwärmebedarf im Beispiel bei $22 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$. Das ist zwar deutlich mehr als die gewohnten $15 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$, gegenüber ungedämmten Gebäuden an demselben Standort wird der Heizwärmebedarf jedoch auf weniger als 4 % reduziert. Durch die Feuchterückgewinnung bleibt die Luftfeuchte auch im Winter noch nahe am Komfortbereich. Energie für Kühlung und Entfeuchtung ist nicht erforderlich.

Badheizkörper

Die Temperaturverteilung bei Zuluftheizung ist insgesamt recht homogen. Niedrige Temperaturen treten jedoch in Zone 2 (WC EG) und, weniger deutlich, in Zone 6 (Bad OG) auf. Diese sind auf die internen Wärmeverluste zurückzuführen, die in den Nassräumen aufgrund der sehr niedrigen Kaltwassertemperaturen auftreten und nicht durch noch bessere Dämmung kompensiert werden können.

Das WC im EG wird jeweils nur wenige Minuten am Stück genutzt, die etwas niedrigeren Temperaturen dürften dort vertretbar sein. Für Bäder hat sich auch in Mitteleuropa ohnehin die Installation einer zusätzlichen Wärmequelle bewährt: Ein Badheizkörper erlaubt es einerseits, im Bad höhere Temperaturen als im Rest der Wohnung einzustellen, was von manchen Nutzern gewünscht wird, andererseits können dort Handtücher vorgewärmt oder einzelne nasse Kleidungsstücke rasch getrocknet werden.

Kellertemperaturen

Aufgrund der niedrigen jahresmittleren Außentemperaturen von nur $2,4 \text{ }^\circ\text{C}$ und des kontinentalen Klimas gibt es im Keller über lange Zeiträume Temperaturen deutlich unter $0 \text{ }^\circ\text{C}$ (Abbildung 2). Ein Versuch, die Kellerwand mit 10 cm Dämmung auszustatten, verbessert die Situation nicht substantiell.

Auf Frostbeständigkeit aller dort verwendeten Materialien und Gegenstände ist daher zu achten, Wasser- und Abwasserleitungen benötigen eine Begleitheizung. Der Energiebedarf einer solchen Begleitheizung kann prinzipiell beliebig klein werden, wenn die Leitungen nach außen gut genug gedämmt sind und eine Durchströmung von Abwasserleitungen mit Luft unter $0 \text{ }^\circ\text{C}$ vermieden wird. Letzteres ist aus Gründen des Wärmeschutzes ohnehin erforderlich, von einer Be- und Entlüftung von Abwasserleitungen im Gebäude über Dach ist in kalten Klimata somit dringend abzuraten.

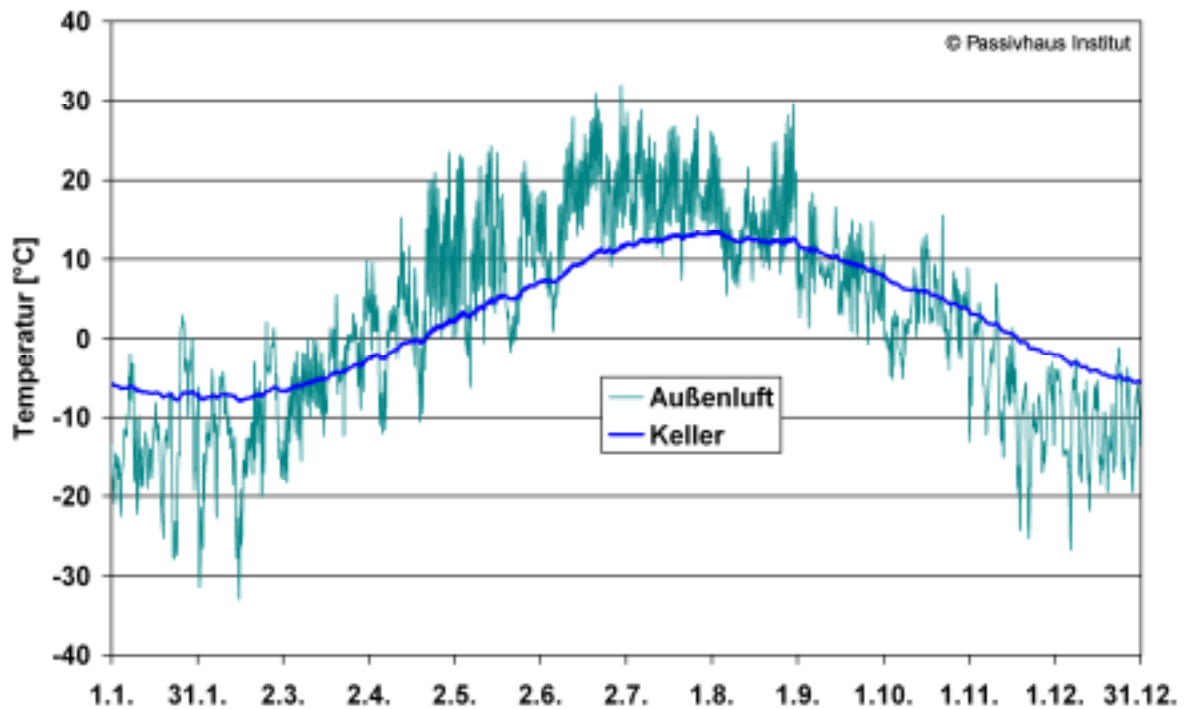


Abbildung 2: Keller- und Außenlufttemperatur in 01 - Jekaterinburg. Im Keller herrschen monatelang Temperaturen unter dem Gefrierpunkt.

Frostschutz Lüftungsanlage

Die niedrigen Außentemperaturen machen einen wirkungsvollen Frostschutz für die Lüftungswärmerückgewinnung erforderlich. Diese Thematik wird separat in Abschnitt 3 diskutiert.

Fazit

Jekaterinburg hat kalte, im Vergleich zu Mitteleuropa sonnige Winter und mäßig warme Sommer. Für den sommerlichen Wärmeschutz sind keine besonderen Maßnahmen erforderlich; theoretische Kühllasten treten in den meisten Fällen nur während weniger Stunden im Jahr auf.

Ein ausgezeichneter Wärmeschutz ist dagegen Voraussetzung für die Realisierung eines Passivhauses: Als primär wichtig erweisen sich in der Parameterstudie eine möglichst kompakte Bauweise, extrem gute Luftdichtheit und eine äußerst effiziente Lüftungswärmerückgewinnung (ggf. mit Erdwärmetauscher, vgl. dazu auch die Überlegungen in Abschnitt 3). Wichtig sind auch ein sehr gutes Drei- oder sogar Vierfach-Wärmeschutzglas im wärmegeprägten Fensterrahmen. Bei den Fenstern bestehen noch wichtige Innovationspotentiale, beispielsweise durch bessere Rahmen und Dreifach-Vakuumverglasungen, die gerade für kalte Standorte neue Spielräume eröffnen können.



Die sehr gute Dämmung von Wand, Dach und Bodenplatte ist in diesem Klima zwar für ein Passivhaus erforderlich, die letzten Zentimeter bringen aber nur noch einen relativ geringen Nutzen. Als wesentlich bedeutsamer als in milderen Klimata erweist sich ein guter Wärmeschutz der Kellerdecke.

Die Nutzung solarer Gewinne, z.B. durch Südorientierung und hohe Glasanteile in den Fenstern bietet sich für die Optimierung der jährlichen Energiebilanz an. Die Größe der Fensterflächen insbesondere auf der Südseite ist für den Heizwärmebedarf von geringerer Bedeutung, hier lassen sich sogar solare Nettogewinne erzielen.

Interessant ist die Tatsache, dass größere Südfenster im Beispiel zu etwas geringerem Heizwärmebedarf, aber etwas höherer Heizlast führen. Unterschiedlich stark wirkt sich auch die Orientierung des Gebäudes aus: Die Heizlast variiert mit der Orientierung um ca. 15 %, der Heizwärmebedarf um ca. 30 %.

Fensterflächen, die wesentlich größer sind als für den visuellen Komfort erforderlich, können im Sommer zu Überhitzung führen und eine außenliegende, bewegliche Verschattung erforderlich machen. Das gilt insbesondere für ost- und westorientierte Fenster. Für den Sommerfall ist auch ein gewisses Minimum an Wärmekapazität zu empfehlen; bei reiner Holzbauweise könnten wiederum bewegliche Verschattungselemente erforderlich werden. Im Winter spielt die Wärmespeicherung in den Bauteilen dagegen keine große Rolle.

Feuchterückgewinnung aus der Abluft verhindert unzutraglich geringe Luftfeuchte und bietet damit Vorteile für den Komfort, ist aus energetischer Sicht aber nicht von Belang.



2.3 02 - Tokio

2.3.1 Referenz-Passivhaus

Die Außentemperaturen im gewählten Klimadatensatz sinken im Winter bis auf -10 °C. Da jedoch mehr Solarstrahlung als in Mitteleuropa zur Verfügung steht, sind die Anforderungen an den Wärmeschutz etwas moderater. 15 bis 20 cm Dämmung reichen für die oberirdischen Bauteile aus, aufgrund des höheren Solarstrahlungsangebots weist eine Zweifach-Wärmeschutzverglasung eine bessere Energiebilanz auf als ein Dreifachglas.

Die sommerlichen Temperaturen am Standort Hyakuri sind milder als in der Stadtmitte von Tokio. Sie wären für sich genommen vielleicht noch durch passive Kühlung beherrschbar, aufgrund der hohen Luftfeuchten im Juli und August ist jedoch eine verstärkte Nachtlüftung kontraproduktiv, da sie zu viel Feuchtigkeit ins Gebäude bringen würde. Die Außenluftfeuchte ist zwar nicht so hoch, dass eine Feuchterückgewinnung unerlässlich wäre, aktive Kühlung ist jedoch erforderlich. Die Kühlung wird nicht nur über die Temperatur, sondern auch über die Raumluftfeuchte geregelt.

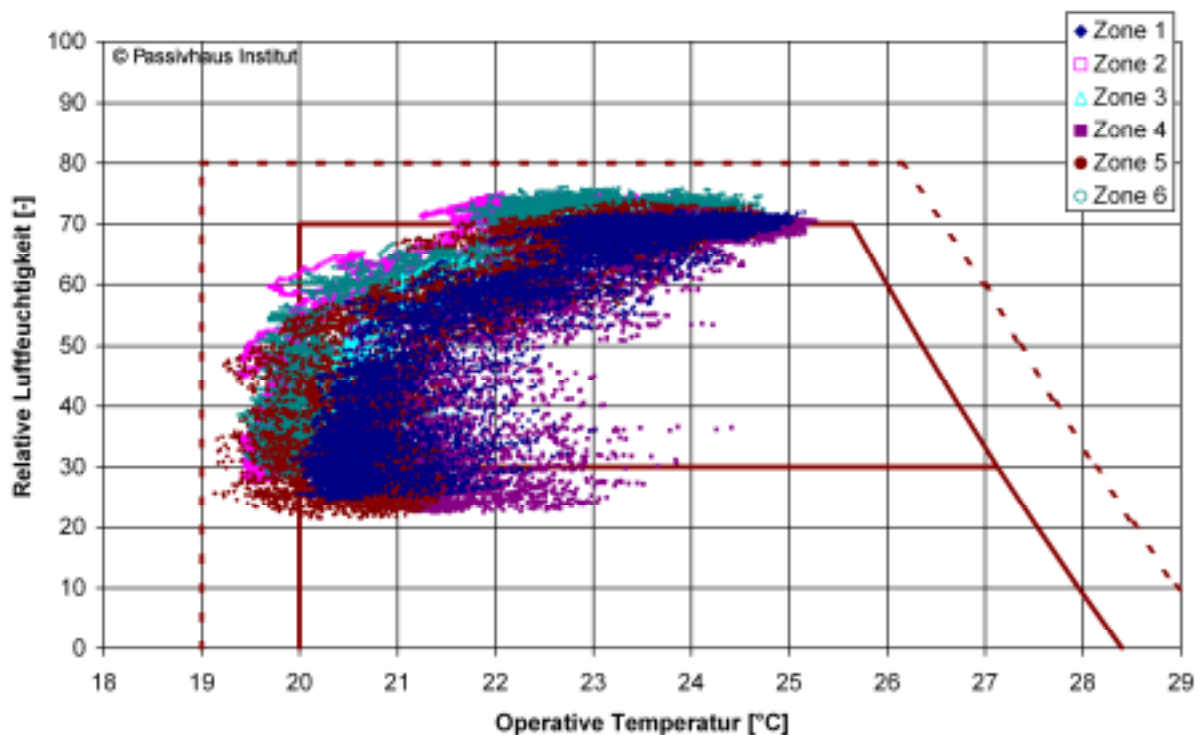
Eigenschaften	
Wand: U-Wert, Dämmstärke	0,202 W/(m ² K); 15 cm
Dach: U-Wert, Dämmstärke	0,155 W/(m ² K); 20 cm
Kellerdecke: U-Wert, Dämmstärke	0,289 W/(m ² K); 10 cm
Wärmebrückenreduzierung Keller	nein
Absorptionskoeffizient außen Wand / Dach	0,6 / 0,72
U-Wert Fensterrahmen	0,72 W/(m ² K)
U-/g-Wert Verglasung	1,19 W/(m ² K); 0,6
Verschattung	beweglich
Luftwechsel bei 50 Pa Druckdifferenz n ₅₀	0,5 h ⁻¹
Wärmebereitstellungsgrad Lüftung	0,85
Feuchteverhältnis Lüftung	0
WRG-Bypass	geregelt
Nachtlüftung über Fenster	nein
Klimatisierung über die Zuluft	ja
Betrieb Kühlturbine	kontinuierlich
Feuchteregelung Kühlung	ja



2.3.2 Ergebnisse

	Ideales Heiz- und Kühlsystem	Klimatisierung über Zuluft	ungedämmt, ideales Heiz- und Kühlsystem
Heizwärmebedarf (20 °C) [kWh/(m ² a)]	13.0	14.5	205.5
Nutzkältebedarf (26 °C @ 60%) [kWh/(m ² a)]	1.2	7.1	10.4
Entfeuchtungsbedarf (70% r.F.) [kWh/(m ² a)]	8.4	10.3	14.5
24-h Mittelwert Heizlast [W/m ²]	9.7	9.2	77.7
24-h Mittelwert sensible Kühllast [W/m ²]	3.4	6.9	21.3
24-h Mittelwert latente Kühllast [W/m ²]	8.2	11.3	13.7

Innenraumbedingungen bei Klimatisierung über die Zuluft:





Die Beheizung über die Zuluft ist unproblematisch, die Raumluftfeuchte im Winter noch akzeptabel. Auch im Sommer lässt sich über die Zuluft leicht hoher Komfort herstellen. Der geringe sensible Nutzkältebedarf in Verbindung mit dem hohen Entfeuchtungsbedarf führt dazu, dass die Kühlung hauptsächlich zum Zwecke der Entfeuchtung betrieben wird. Sind beide Systeme – wie im dargestellten Beispiel mit Klimatisierung über die Zuluft – nicht getrennt regelbar, führt das zu niedrigen Raumlufttemperaturen, die in gewissem Rahmen wiederum eine verstärkte Entfeuchtung erforderlich machen, weil die kältere Luft eine höhere relative Feuchte aufweist.

Haustechnik

Bereits mit der für das Referenz-Passivhaus gewählten, einfachen Haustechnik werden gegenüber einem ungedämmten Gebäude gleicher Geometrie fast 90 % Nutzenergie eingespart, und zwar überwiegend im Winter. Haustechnische Varianten wie die Möglichkeit einer Entfeuchtung ohne sensible Kühlung können zur weiteren Reduzierung des sommerlichen Klimatisierungsbedarfs beitragen.

Kellerfeuchte

Die hohen sommerlichen Luftfeuchten haben vor allem für den unbeheizten Keller des Referenz-Passivhauses Konsequenzen. Der Keller ist mäßig dicht gebaut ($n_{50} = 3 \text{ h}^{-1}$) und wird über Infiltration belüftet. Wie Abbildung 3 zeigt, würde eine solche Konstruktion zu Schwierigkeiten führen: Zwar werden die Jahresgänge von Temperatur und absoluter Luftfeuchte durch das Erdreich und die Feuchtespeicherung in den Kellerwänden gedämpft, trotzdem liegen die relativen Luftfeuchten im Keller den Sommer über monatelang jenseits von 80 %, während gleichzeitig die Lufttemperatur um 20 °C beträgt. Insbesondere auf dem etwas kühleren Kellerboden, unter Umständen aber auch an den Wänden ist daher mit hoher Wahrscheinlichkeit Schimmelwachstum zu erwarten. Feuchte Keller bzw. Kriechkeller sind in vergleichbaren Klimata der USA tatsächlich ein häufiges Problem, dem dort ggf. mit Entfeuchtern entgegengewirkt wird. Eine sinnvolle Lösung dürfte es für diese Klimata sein, ganz auf Kellerräume zu verzichten.

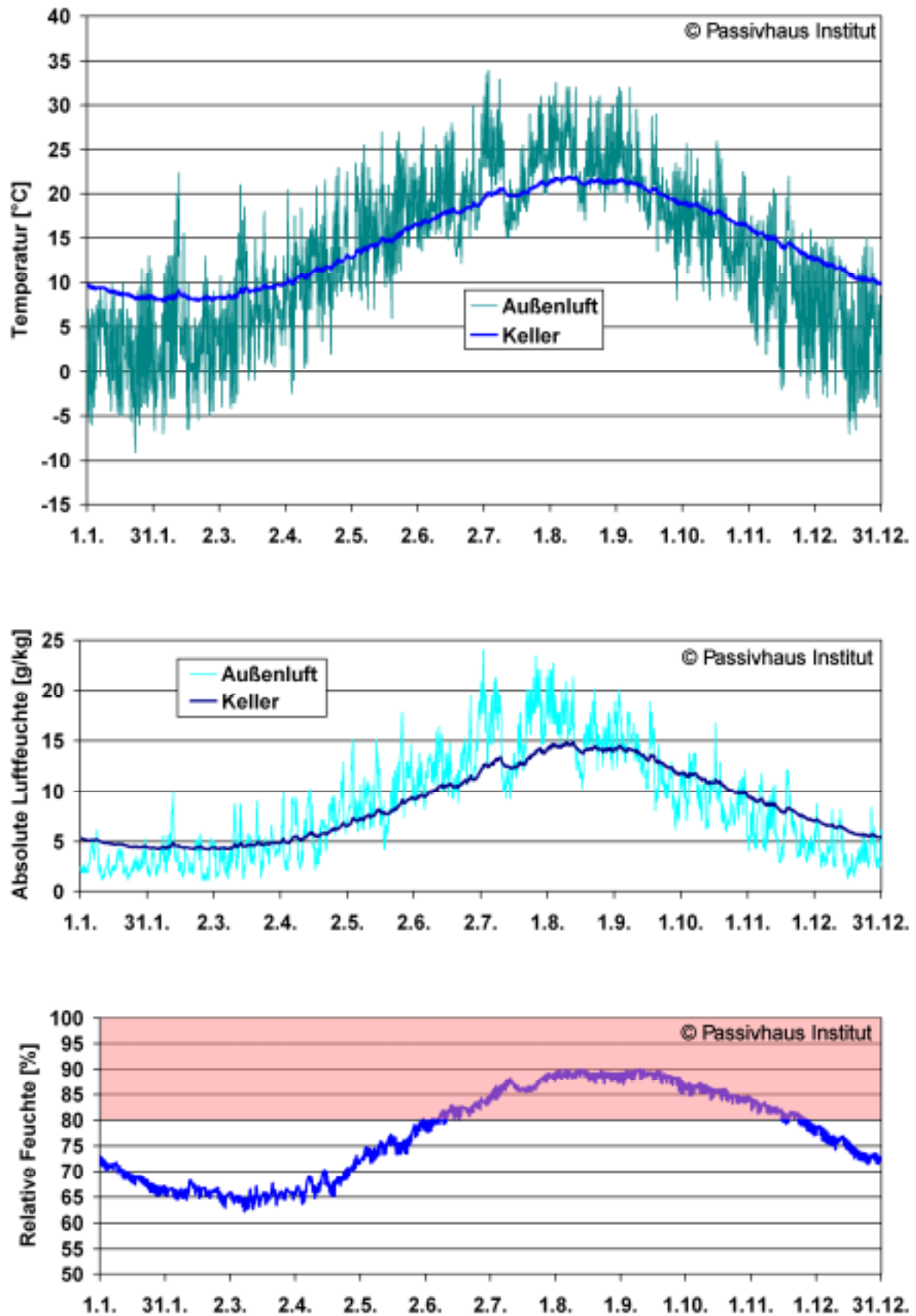


Abbildung 3: Temperaturen und Luftfeuchtigkeiten im Keller für das Referenz-Passivhaus mit idealer Klimatisierung, 02 - Tokio



Fazit

Generell macht sich eine kompakte Bauweise sehr positiv bemerkbar, und zwar nicht nur im Winter, sondern auch (in geringerem Maße) in Bezug auf die Kühllast. Zur Reduzierung der Kühllast ist auch ein guter Wärmeschutz im Dach zweckmäßig, der sich mit dem für den Winter erforderlichen Wärmeschutz gut ergänzt.

Für den Sommerfall ist insbesondere die hohe Luftfeuchtigkeit bedeutend, mit Taupunkttemperaturen bis weit über 20 °C. Feuchterückgewinnung führt dennoch nicht generell zu bedeutenden Verbesserungen im jährlichen Entfeuchtungsbedarf; sie reduziert jedoch die maximalen Entfeuchtungs- und Heizlasten – was allerdings keine bedeutenden finanziellen Einsparungen ermöglichen dürfte.

Zweifach-Wärmeschutzglas und wärmegeädämmte Fensterrahmen sind empfehlenswert. Aufgrund der hohen Solarstrahlung und der vergleichsweise milden Temperaturen sind Südorientierung und große Südfensterflächen für den Winter vorteilhaft. Der Nutzkältebedarf wird von der Orientierung dagegen kaum beeinflusst, da die angenehme gute, bewegliche Verschattung die solaren Lasten durch die Fenster ohnehin weitgehend minimiert.

Durch eine schwere Bauweise lassen sich einige Kilowattstunden Heizwärme pro Quadratmeter und Jahr einsparen, auch die Lasten können in der Größenordnung von 1 W/m² reduziert werden. Der Einfluss aber ist nicht so groß, dass er eine drastische Abweichung von gängigen Bautraditionen rechtfertigen würde.

Auf der haustechnischen Seite erscheint es zweckmäßig, die Kühl- und Entfeuchtungsfunktion zu trennen: Über lange Zeiträume muss bei relativ milden Außentemperaturen nur entfeuchtet, nicht jedoch gekühlt werden.



2.4 03 - Shanghai

2.4.1 Referenz-Passivhaus

Das Klima von Shanghai ist nur geringfügig wärmer als das von Tokio, dementsprechend besitzen die Parameter des Referenz-Passivhauses an beiden Standorten nahezu dieselben Werte. Im feuchteren und wärmeren Sommer Shanghais wird allerdings kein Bypass für die Lüftungs-Wärmerückgewinnung verwendet, stattdessen wird im Sommer eine Strategie der Wärme- und Feuchterückgewinnung verfolgt.

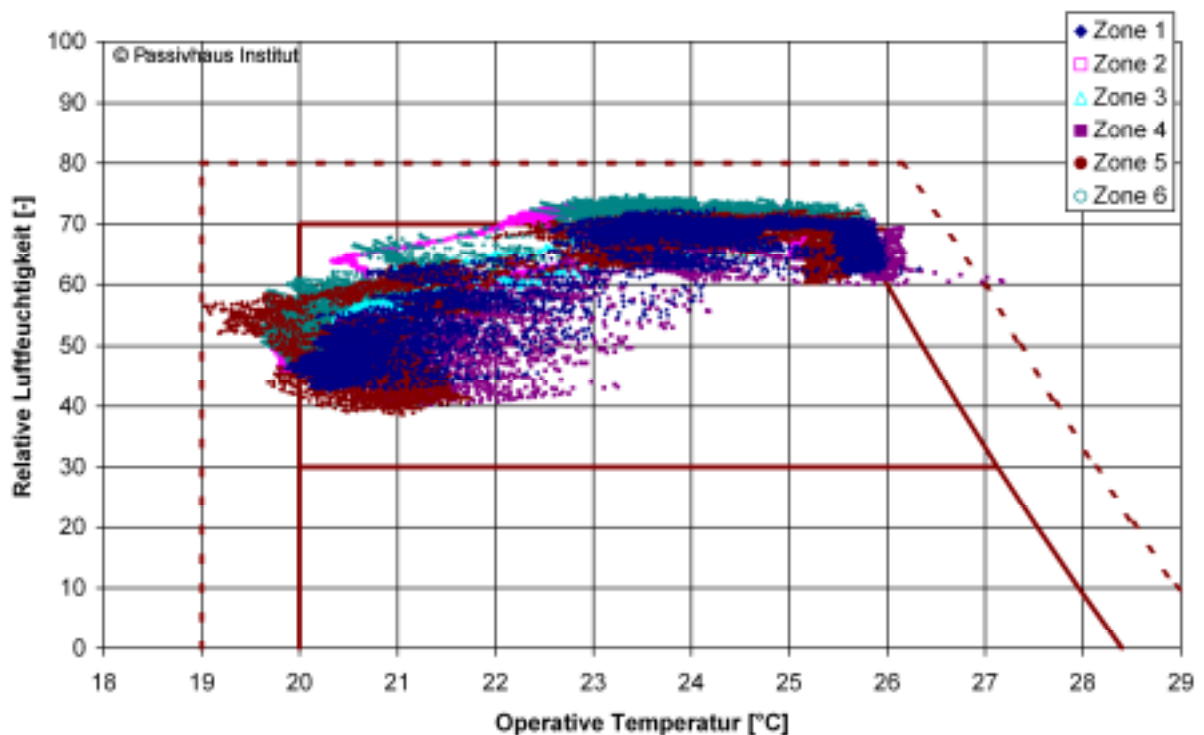
Eigenschaften	
Wand: U-Wert, Dämmstärke	0,202 W/(m ² K); 15 cm
Dach: U-Wert, Dämmstärke	0,155 W/(m ² K); 20 cm
Kellerdecke: U-Wert, Dämmstärke	0,289 W/(m ² K); 10 cm
Wärmebrückenreduzierung Keller	nein
Absorptionskoeffizient außen Wand / Dach	0,6 / 0,72
U-Wert Fensterrahmen	0,72 W/(m ² K)
U-/g-Wert Verglasung	1,19 W/(m ² K); 0,6
Verschattung	beweglich
Luftwechsel bei 50 Pa Druckdifferenz n ₅₀	0,5 h ⁻¹
Wärmebereitstellungsgrad Lüftung	0,85
Feuchteverhältnis Lüftung	0,6
WRG-Bypass	kein
Nachtlüftung über Fenster	nein
Klimatisierung über die Zuluft	ja
Betrieb Kühlturbine	kontinuierlich
Feuchteregelung Kühlung	ja



2.4.2 Ergebnisse

	Ideales Heiz- und Kühlsystem	Klimatisierung über Zuluft	ungedämmt, ideales Heiz- und Kühlsystem
Heizwärmebedarf (20 °C) [kWh/(m ² a)]	9.9	11.0	160.8
Nutzkältebedarf (26 °C @ 60%) [kWh/(m ² a)]	7.7	11.4	37.0
Entfeuchtungsbedarf (70% r.F.) [kWh/(m ² a)]	10.2	11.8	23.5
24-h Mittelwert Heizlast [W/m ²]	10.1	10.0	79.1
24-h Mittelwert sensible Kühllast [W/m ²]	7.2	5.7	42.8
24-h Mittelwert latente Kühllast [W/m ²]	5.9	7.8	16.0

Innenraumbedingungen bei Klimatisierung über die Zuluft:





Durch die im Vergleich zu Tokio milderen Winter und die installierte Feuchterückgewinnung ist die Raumlufffeuchte in der kalten Jahreszeit wesentlich höher, sie bleibt ganzjährig über 40%. Die wesentlich höhere Außenlufffeuchte im Sommer führt dazu, dass Kühlung per Nachtlüftung nicht zweckmäßig ist. Das Gebäude bleibt im Sommer weitgehend geschlossen, um die Raumluff trocken zu halten.

Das Verhältnis von sensiblem und latentem Nutzkältebedarf passt gut zur Charakteristik der Zuluftkühlung; das vereinfachte, reale Kühlsystem hat ungefähr den gleichen Energiebedarf wie das ideale System.

Fazit

Erwähnenswerte Unterschiede zur Situation in O2 - Tokio gibt es vor allem in der sommerlichen Lüftungsstrategie. Die Lüftungsanlage mit Feuchterückgewinnung führt in Shanghai zu einer nennenswerten Energieeinsparung im Sommer.

Die Dämmung der Wand und des Daches wirkt sich in Shanghai im Sommer stärker aus als in Tokio.

Große Südfenster machen sich auch hier im Energiebedarf positiv bemerkbar, vorausgesetzt es wird im Sommer eine wirkungsvolle, bewegliche Außenverschattung genutzt. Größere Fensterflächen erhöhen allerdings etwas die sensible Kühllast, die ohnehin schon bedeutend größer ist als im Klima von Tokio. Der Einfluss von Südorientierung und Fensterfläche auf die Heizlast ist in Shanghai interessanterweise kleiner, was auf ein geringeres Solarstrahlungsangebot in den kritischen Winterperioden zurückzuführen ist.



2.5 04 - Las Vegas

2.5.1 Referenz-Passivhaus

Aufgrund der nur wenig von der gewünschten Raumtemperatur verschiedenen Jahresmitteltemperatur von 20 °C ist keine Dämmung zum Erdreich erforderlich. Typische Dämmstoffstärken für Wand und Dach liegen um 20 cm. Das Wüstenklima mit minimaler Luftfeuchte und hohen tages- und jahreszeitlichen Temperaturschwankungen stellt in erster Linie Herausforderungen in Bezug auf die Beherrschung des Sommerfalls, das Referenz-Passivhaus ist daher vollständig in einer weißen, infrarot-reflektierenden Farbe gehalten. Die Fenster besitzen eine 2-fach-Sonnenschutzverglasung, auf weitere Verschattungseinrichtungen kann interessanterweise verzichtet werden.

Entfeuchtung ist nicht erforderlich. Im Gegenteil, um die Luftfeuchte sommers wie winters in den Komfortbereich anzuheben, wird eine Feuchterückgewinnung mit hoher themischer und auch hygrischer Effizienz installiert.

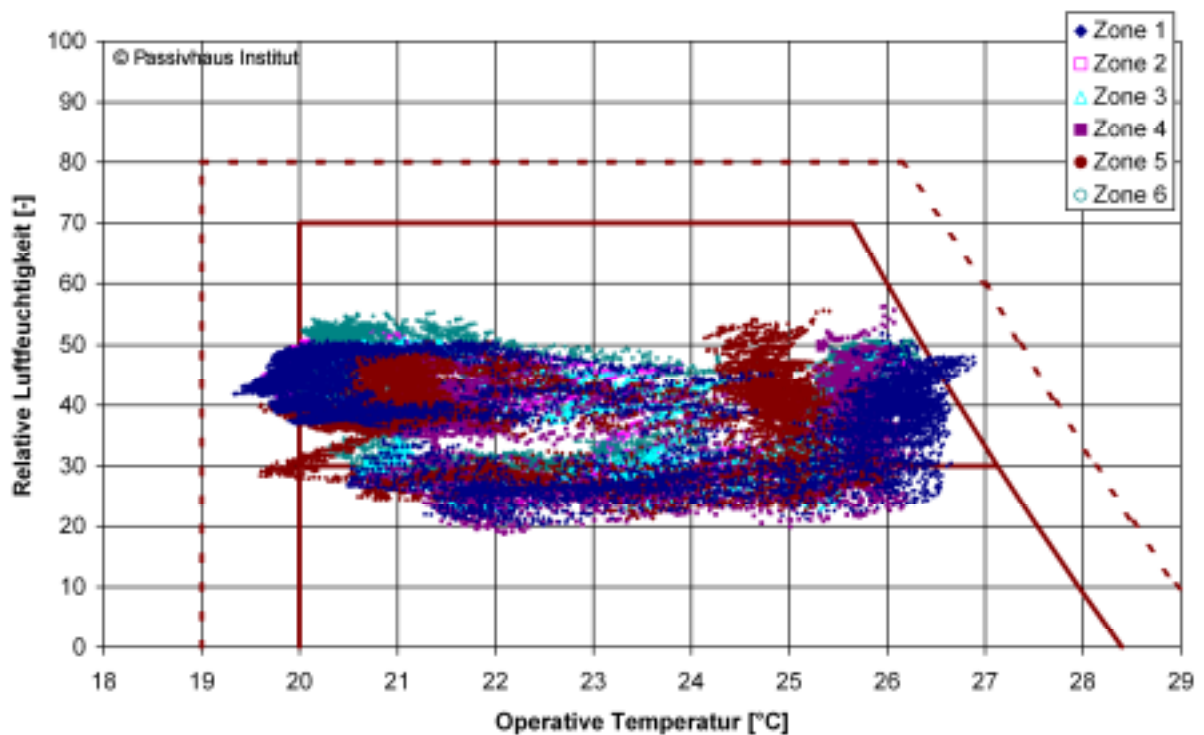
Eigenschaften	
Wand: U-Wert, Dämmstärke	0,125 W/(m ² K); 25 cm
Dach: U-Wert, Dämmstärke	0,200 W/(m ² K); 15 cm
Kellerdecke: U-Wert, Dämmstärke	1,661 W/(m ² K); 0 cm
Wärmebrückenreduzierung Keller	nein
Absorptionskoeffizient außen Wand / Dach	0,15 / 0,15
U-Wert Fensterrahmen	1.6 W/(m ² K)
U-/g-Wert Verglasung	1,19 W/(m ² K); 0,31
Verschattung	keine
Luftwechsel bei 50 Pa Druckdifferenz n ₅₀	0,5 h ⁻¹
Wärmebereitstellungsgrad Lüftung	0,85
Feuchteverhältnis Lüftung	0,8
WRG-Bypass	geregelt
Nachtlüftung über Fenster	ja
Klimatisierung über die Zuluft	ja
Betrieb Kühlturbine	taktend
Feuchteregelung Kühlung	nein



2.5.2 Ergebnisse

	Ideales Heiz- und Kühlsystem	Klimatisierung über Zuluft	ungedämmt, ideales Heiz- und Kühlsystem
Heizwärmebedarf (20 °C) [kWh/(m ² a)]	13.2	14.5	103.3
Nutzkältebedarf (26 °C @ 60%) [kWh/(m ² a)]	12.0	15.2	76.9
Entfeuchtungsbedarf (70% r.F.) [kWh/(m ² a)]	0.0	1.3	0.0
24-h Mittelwert Heizlast [W/m ²]	9.3	9.2	61.9
24-h Mittelwert sensible Kühllast [W/m ²]	10.3	8.5	51.8
24-h Mittelwert latente Kühllast [W/m ²]	0.0	1.2	0.0

Innenraumbedingungen bei Klimatisierung über die Zuluft:





Heiz- und Kühlbedarf betragen jeweils knapp 15 kWh/(m²a). Eine weitere Reduzierung des Heizwärmebedarfs wäre ohne großen technischen Aufwand möglich, beispielsweise durch Klarglas mit beweglicher Verschattung anstelle des Sonnenschutzglases. Da die Heizlast jedoch bereits ausreichend niedrig ist, wird hier die kostengünstigere und bezüglich des Nutzerverhaltens robustere Lösung ohne bewegliche Verschattung vorgeschlagen.

Effekte der Feuchterückgewinnung

Die Feuchterückgewinnung kann die Häufigkeit niedriger Feuchten in gewissem Maße reduzieren, solange die Fenster geschlossen bleiben. Abbildung 4 zeigt, dass in den Zeiten, wo verstärkte Sommerlüftung betrieben wird, nämlich im Frühjahr und Herbst, die Raumluftfeuchte drastisch zurückgeht.

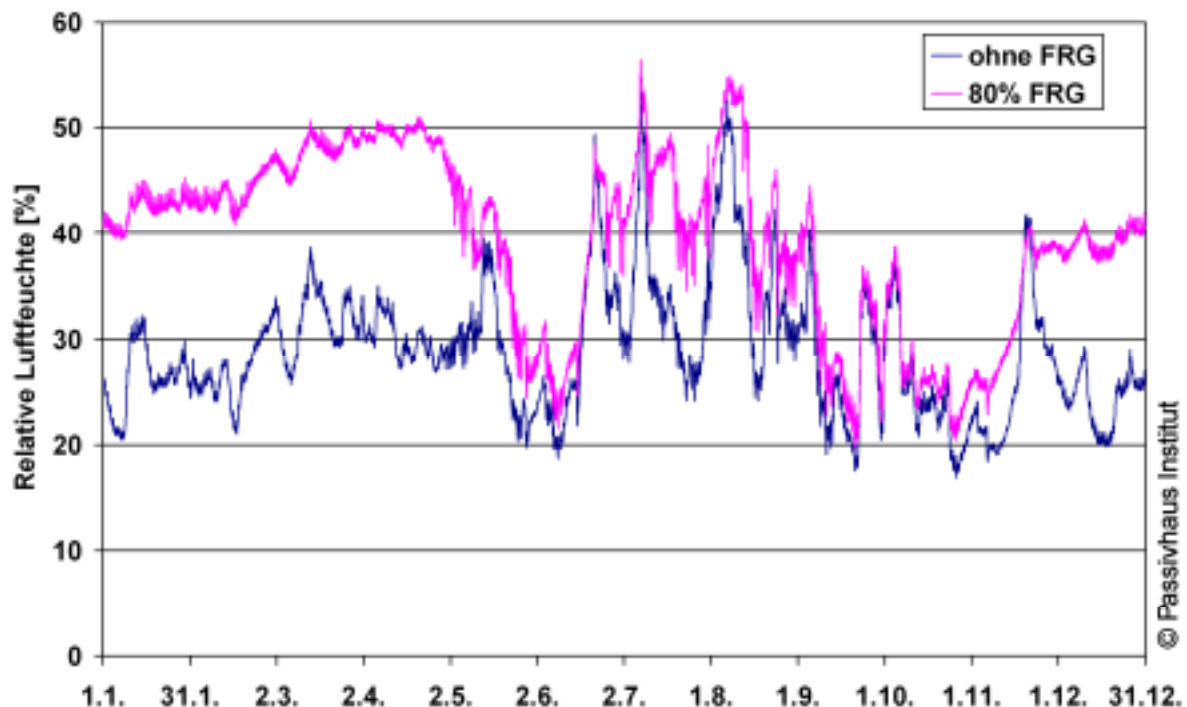


Abbildung 4: Mittlere relative Raumluftfeuchte (flächengewichtetes Mittel der Wohnräume) in 04 - Las Vegas mit und ohne Feuchterückgewinnung

Haustechniksystem

Eine Klimatisierung über die Zuluft ist problemlos und ohne nennenswerten Mehrbedarf gegenüber einer idealen Klimatisierung möglich. Der sensible und latente Kühlanteil werden jeweils in angemessener Weise gedeckt; insbesondere kommt es nicht zu einer unnötigen weiteren Entfeuchtung der Außenluft durch die starke Abkühlung der Zuluft, da der Taupunkt der Außenluft meist über der Oberflächentemperatur der Kühlturbine liegt.



Ob auch eine Klimatisierung über eine Betonkerntemperierung möglich wäre, von der man sich bei ebenfalls geringem baulichem Aufwand wegen der höheren Vorlauf-temperaturen einen besseren COP der Wärmepumpe erhoffen könnte, wird in Abschnitt 3 näher betrachtet.

Fazit

Der Heizwärmebedarf ließe sich gegenüber dem Referenzfall durch besseren Wärmeschutz noch etwas weiter reduzieren, er ist aber bereits sehr gering, und die Heizlast lässt sich für das Referenz-Passivhaus problemlos über die Zuluft decken.

Eine Dämmung der Kellerdecke würde den Heizwärmebedarf ebenfalls nochmals um einige Kilowattstunden reduzieren; für Nutzkältebedarf und Kühllast bringt diese Maßnahme dagegen nichts.

Lüftungsanlage mit Wärmerückgewinnung und luftdichte Hülle reduzieren den Heizwärme- und Nutzkältebedarf spürbar.

Auf bewegliche Verschattungen kann nur verzichtet werden, weil die Fensterflächen und -orientierung angemessen gewählt sind, um einerseits im Winter ausreichend solare Gewinne zu erzielen, andererseits die solaren Lasten im Sommer zu begrenzen.

Im trockenen Wüstenklima von Las Vegas ist keine sommerliche Entfeuchtung erforderlich. Eine Lüftung mit Feuchterückgewinnung erhöht die mittlere Luftfeuchte der Raumluft; trotzdem ist die Luftfeuchte über lange Zeiträume unter 30%. Die Möglichkeit zur Nachtlüftung mit großen Volumenströmen im Sommer, ggf. auch automatisch geregelt, kann den Nutzkältebedarf spürbar reduzieren.

Der Nutzkältebedarf lässt sich auch durch schwere Bauweise etwas senken, weil die Nachtlüftung dadurch effektiver wird. Die Kühllast ist davon aber kaum betroffen, denn in den kritischen Hitzeperioden ist eine Auskühlung des Gebäudes mittels Nachtlüftung aufgrund der hohen Außentemperaturen ohnehin nicht möglich.

Kompakte Bauweise macht sich in Bezug auf den Heizfall wie auch die Kühllast positiv bemerkbar, der jährliche Nutzkältebedarf wird dagegen nur wenig beeinflusst. Ähnliches gilt für die Dämmung von Wand und Decke.



2.6 05 - Dubai

2.6.1 Referenz-Passivhaus

In Dubai sinken die Außentemperaturen auch im Winter fast nie unter 10 °C, die Tagesmittelwerte nicht unter 15 °C. Entsprechend einfach ist es, hier Gebäude ohne Heizwärmebedarf zu errichten. Der Planer kann seine Arbeit dadurch ganz auf eine Minimierung des Kühlbedarfs ausrichten. Hierfür sind allerdings bei sommerlichen Tagesmitteltemperaturen, die monatelang weit über 30 °C liegen, alle verfügbaren Maßnahmen zu ergreifen, soll die Kühllast 10 W/m² nicht überschreiten.

Im Beispiel wurde ein guter Wärmeschutz gewählt, der die Transmissionslasten auf ein vertretbares Maß reduziert. Auch zum Keller hin wird gut gedämmt, da durch die hohe Jahresmitteltemperatur von 27 °C die Kellertemperaturen deutlich oberhalb des Komfortbereichs liegen. Der gute Wärmeschutz wird kombiniert mit weißen, infrarot-reflektierenden Oberflächen, um die solaren Lasten durch die opaken Bauteile zu begrenzen.

Ein Dreifach-Sonnenschutzglas mit einem g-Wert von 25 % minimiert die Transmissions- und solaren Lasten, die durch die Fenster ins Gebäude gelangen. Solche Gläser sind noch in farbneutraler Ausführung mit hoher Lichttransmission im sichtbaren Spektrum lieferbar, weiter reduzierte g-Werte führen u. U. zu Einschränkungen in der Tageslichtqualität. Eine bewegliche Verschattung ist dann nicht mehr erforderlich.

Das Sonnenschutzglas wird kombiniert mit einem vergrößerten Dachüberstand von 1 m Tiefe rund um das Gebäude, der die Direktstrahlung auf die Mehrzahl der Fassaden deutlich reduziert.

Die hohen sommerlichen Temperaturen und Luftfeuchtigkeiten machen eine hocheffiziente Wärme- und Feuchterückgewinnung sinnvoll.



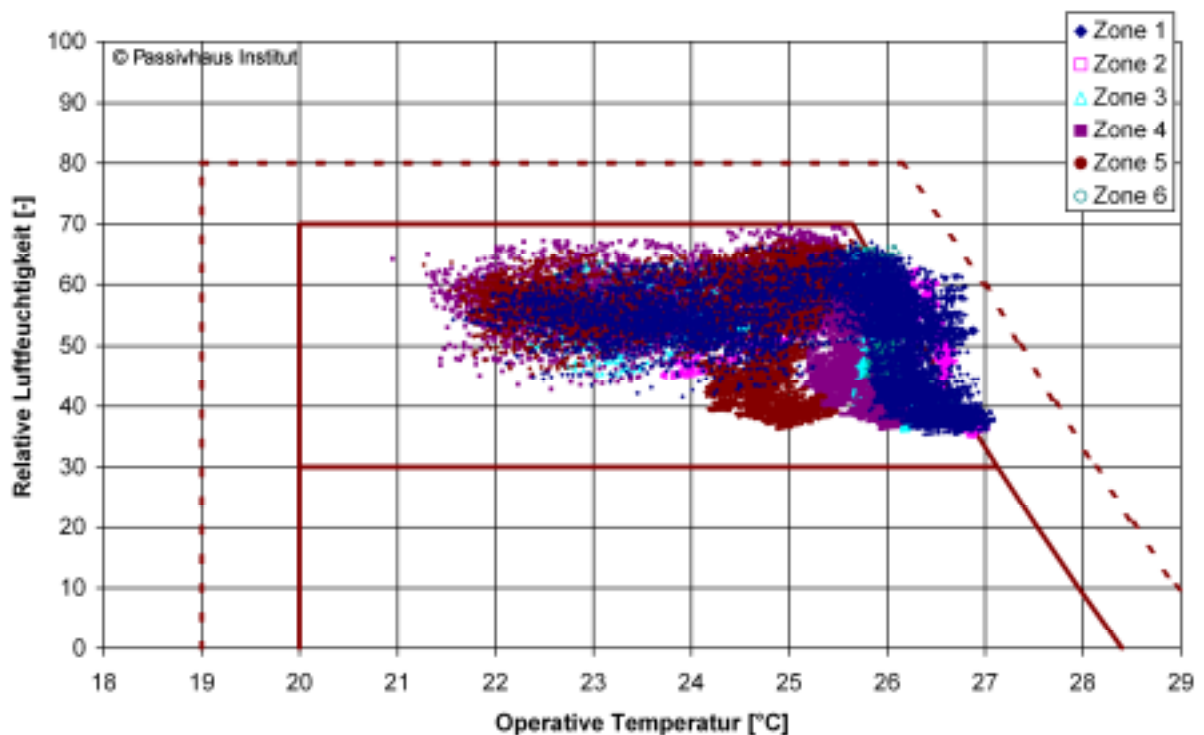
Eigenschaften	
Wand: U-Wert, Dämmstärke	0,125 W/(m ² K); 25 cm
Dach: U-Wert, Dämmstärke	0,155 W/(m ² K); 20 cm
Kellerdecke: U-Wert, Dämmstärke	0,205 W/(m ² K); 15 cm
Wärmebrückenreduzierung Keller	ja
Absorptionskoeffizient außen Wand / Dach	0,15 / 0,15
U-Wert Fensterrahmen	1.6 W/(m ² K)
U-/g-Wert Verglasung	0,70 W/(m ² K) / 0,25
Verschattung	fix
Luftwechsel bei 50 Pa Druckdifferenz n ₅₀	0,5 h ⁻¹
Wärmebereitstellungsgrad Lüftung	0,85
Feuchteverhältnis Lüftung	0,8
WRG-Bypass	kein
Nachtlüftung über Fenster	ja
Klimatisierung über die Zuluft	ja
Betrieb Kühlturbine	kontinuierlich
Feuchteregelung Kühlung	ja



2.6.2 Ergebnisse

	Ideales Heiz- und Kühlsystem	Klimatisierung über Zuluft	<i>ungedämmt, ideales Heiz- und Kühlsystem</i>
Heizwärmebedarf (20 °C) [kWh/(m ² a)]	0.0	0.0	1.1
Nutzkältebedarf (26 °C @ 60%) [kWh/(m ² a)]	38.7	37.7	201.6
Entfeuchtungsbedarf (70% r.F.) [kWh/(m ² a)]	10.0	21.9	28.3
24-h Mittelwert Heizlast [W/m ²]	0.0	0.0	4.1
24-h Mittelwert sensible Kühllast [W/m ²]	10.0	8.8	59.9
24-h Mittelwert latente Kühllast [W/m ²]	4.8	6.3	18.3

Innenraumbedingungen bei Klimatisierung über die Zuluft:





Eine Beheizung des gut gedämmten Gebäudes ist in der Tat nicht mehr erforderlich. Die etwa 8 Monate lange Kühlperiode führt trotz der geringen sensiblen Kühllast von 10 W/m^2 auf einen vergleichsweise hohen jährlichen Nutzkältebedarf von $39 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$. Die Außentemperaturen in der Kühlperiode sind so hoch, dass ein automatischer Wärmerückgewinnungs-Bypass oder die Möglichkeit zur Nachtlüftung nicht wirksam werden können. Öffnbare Fenster sind aber für die 4 kältesten Monate im Jahr sinnvoll und erforderlich, sie ermöglichen in dieser Periode eine passive Kühlung.

Temperaturdifferenzierung

Gewöhnlich sorgt die Verteilung der beheizten oder gekühlten Zuluft durch die Lüftungsanlage in Passivhäusern für ausreichend gleichmäßige Temperaturen (vgl. [Schnieders 2004]). Das trifft auch für das Referenz-Passivhaus mit Zuluftkühlung in Dubai noch zu, allerdings bewegt sich dieses Gebäude bereits im Grenzbereich. Das ist bereits in der obigen Grafik zu den Innenraumbedingungen erkennbar, noch deutlicher wird es in Abbildung 5.

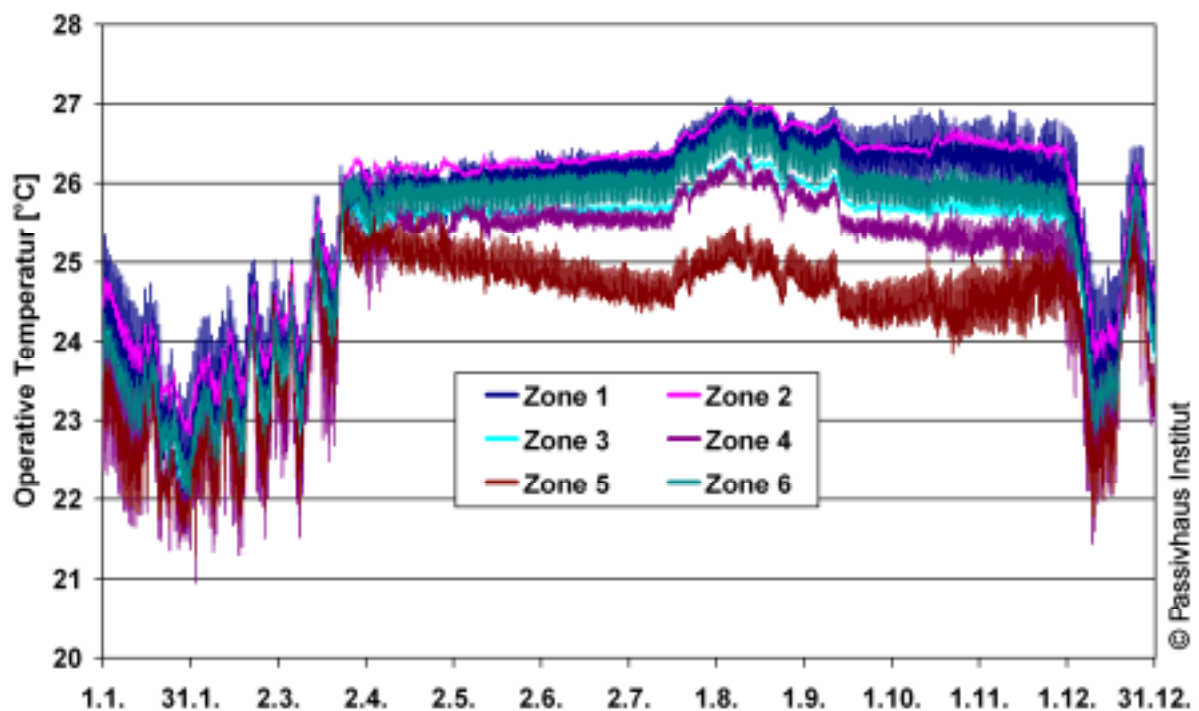


Abbildung 5: Jahresverlauf der operativen Raumtemperaturen in 05 - Dubai.

Die operativen Raumtemperaturen liegen zu Beginn der Kühlperiode noch in einer Bandbreite von ca. 1 K, im Herbst wird die Abweichung bis zu 2 K groß. Man kann erkennen, dass die Bandbreite über mehrere Monate hinweg anwächst. Die im Vergleich zu den anderen Standorten relativ große Differenz kommt vermutlich dadurch zu Stande, dass in Dubai fast die volle Kühlleistung während mehrerer Monate ununterbrochen benötigt wird, so dass kleine Ungenauigkeiten in der Leistungsanpassung



(hier: Zone 5, nordorientiert und mit deutlich kleineren Fenstern als die übrigen Wohnräume, erhält zu viel Kühlleistung) sich über lange Zeit aufbauen können.

Temperaturdifferenzen bis zu 2 K treten auch in den Wintermonaten auf, wenn weder geheizt noch gekühlt wird. Wenn dieser Unterschied von den Nutzern bereits als störend empfunden wird, lässt er sich in einem bewohnten Gebäude leicht reduzieren, indem im Sommer zeitweise die Innentüren geöffnet bleiben. Im Winter kann auch die Nachtlüftung individuell angepasst werden.

Fazit

Unter den in Dubai gegebenen Randbedingungen von hohen Temperaturen und intensiver Solarstrahlung kann die Kühllast nur durch eine Kombination von gutem Wärmeschutz (auch zum Erdreich) und gering absorbierenden Außenoberflächen auf das erforderliche Niveau reduziert werden.

Das Dach benötigt dabei, den Berechnungen zufolge, weniger Dämmung als die Außenwände. Durch eine genauere Analyse konnte die Ursache ermittelt werden: Vom Dach kann mehr Wärme an den kalten Himmel abgestrahlt werden als von den Wänden, in der Kühlperiodenbilanz gibt das Dach dadurch netto mehr Wärme pro Quadratmeter ab als die Wände. Dieses Verhältnis kehrt sich erwartungsgemäß um, wenn der solare Absorptionskoeffizient größer wird.

Eine luftdichte Hülle und mechanische Lüftung mit Wärmerückgewinnung sind hilfreich für die Minimierung des Energiebedarfs. Lüftungs-Feuchterückgewinnung reduziert den Energiebedarf für die Entfeuchtung in gewissem Umfang und erscheint daher als angemessene Technologie.

Eine Dreifach-Sonnenschutzverglasung in Verbindung mit einem großen Dachüberstand und ausschließlich nach Süden und Norden orientierten Fenstern minimiert die Transmissionswärmelasten und reduziert die Solarlasten durch die Fenster. Klarglas könnte nur in Verbindung mit einer wirksamen außenliegenden Verschattung eingesetzt werden. Eine Minimierung der Fensterflächen auf das für ausreichenden Ausblick und gute Tageslichtnutzung unbedingt Erforderliche würde den Jahresnutzkältebedarf nochmals spürbar verringern.

Die Speicherkapazität der Gebäudes spielt aufgrund der extrem langen Kühlperiode mit praktisch konstanten Raumtemperaturen so gut wie keine Rolle. Auch die Kompaktheit des Gebäudes ist weniger wichtig als in den kälteren Klimata.



2.7 Einfluss des Nutzerverhaltens

In die themische Gebäudesimulation gehen verschiedene Randbedingungen ein, die stark vom Verhalten der Nutzer eines Gebäudes beeinflusst werden. Dazu gehören z.B. die eingestellten Raumtemperaturen und -feuchtigkeiten, das Öffnen von Fenstern, die Bedienung von Verschattungseinrichtungen, die Geräteausstattung und -nutzung der Haushalte, Belegungsdichte und Anwesenheit. Wie Feldstudien zeigen, schwankt beispielsweise der Heizwärmeverbrauch identischer Wohneinheiten mit unterschiedlichen Nutzern typischerweise um einen Faktor 4, wobei der dominierende Faktor die eingestellte Raumtemperatur ist.

Im Forschungsprojekt wurde der Einfluss der internen Wärmequellen und des Lüftungsverhaltens näher untersucht. Die internen Wärmequellen wirken sich auf die Beheizbarkeit über die Zuluft kaum aus, der jährliche Energiebedarf der Passivhäuser schwankt dagegen bei unterschiedlichen internen Wärmequellen erheblich. In Klimata, in denen die maximal verfügbare Kühlleistung tatsächlich häufiger benötigt wird, ist ferner die Verwendung effizienter Geräte nicht nur für den Primärenergiebedarf wichtig, sondern auch für den sommerlichen Komfort. Je nach Anforderungen muss möglicherweise eine gewisse Reserve-Kühlleistung vorgehalten werden.

Bezüglich der Nachtlüftung zur Unterstützung der Raumkühlung ist zu beachten, dass an feuchten Standorten massive Nachtlüftung den Kühlenergiebedarf *erhöhen* kann, weil sie zu einem unerwünschten Feuchteeintrag führt, der die Einsparung im sensiblen Kühlbedarf überkompensiert.



3 Standortsspezifische Besonderheiten

Im Forschungsprojekt wurden einige spezielle Aspekte behandelt, die beim Bau von Passivhäusern in Mitteleuropa weniger relevant sind als in anderen Klimazonen oder die sich in anderen Klimazonen grundsätzlich anders darstellen. Die wichtigsten Ergebnisse sind nachfolgend zusammengefasst, Details finden sich im ausführlichen Projektbericht.

- Eine **frostfreie Gründung** kann in kalten Klimata erhebliche Gründungstiefen erforderlich machen. Insbesondere bei gut gedämmten Bodenplatten ohne Keller besteht eine Gefahr des Unterfrierens, die jedoch je nach Klima durch Frostschürzen bewältigt werden kann. Pfahlgründungen im Permafrost werden durch den guten Wärmeschutz von Passivhäusern eher vereinfacht. Problematische Gründungssituationen ergeben sich insbesondere im Grenzbereich zum Permafrost – allerdings nicht nur bei Passivhäusern
- In kalten Klimata ist der **Frostschutz der Lüftungswärmerückgewinnung** besonders zu beachten. Die in Mitteleuropa übliche direktelektrische Vorheizung kommt schon aus Gründen der Primärenergieeinsparung nicht in Frage. Mögliche andere Frostschutzstrategien wurden daher systematisch untersucht. Insgesamt am geeignetsten für kalte, kontinentale Klimata erscheint eine Kombination auf passiver Vorerwärmung der Außenluft im Erdreich und einem Wärmeübertrager mit Feuchterückgewinnung.
- Die aus Energie- und Komfortgründen benötigten **Fensterqualitäten** hängen vom Standort ab. Es konnte gezeigt werden, dass für wärmere Standorte, wie z.B. Rom, ebenso wie für mitteleuropäische Regionen (Frankfurt) vielfach erprobte Lösungen für Passivhausfenster zur Verfügung stehen. Auch für kältere Standorte wie Warschau gibt es bereits ein zertifiziertes Produkt. An einem Beispiel konnte nachgewiesen werden, dass weiter verbesserte Fenster für Passivhäuser in kalten Klimata, mit Fenster-U-Werten (eingebaut) bis herab zu 0,5 W/(m²K), technisch realisierbar sind.
- Viele feucht-warme Klimata, wie beispielsweise das von 02 - Tokio, weisen im Sommer längere Perioden auf, in denen es mäßig warm, aber sehr feucht ist. Wie man den **Entfeuchtungsbedarf** senken kann, wurde in der Studie detailliert untersucht. Als vollkommen ungeeignet erwies sich eine passive Feuchtespeicherung in den Bauteilen. Sinnvoll ist dagegen der Betrieb einer Wärme- und Feuchterückgewinnung, und zwar entweder kontinuierlich *ohne* den in Mitteleuropa stets empfohlenen Sommerbypass, oder, aufwendiger, mit einem automatischen, feuchte- bzw. enthalpiegeregelten Bypass, der eine weitere Reduzierung des Energiebedarfs erlaubt.



- Verschiedene Varianten der **Wärme- und Kälteversorgung**, insbesondere in feucht-warmen Klimata, wurden betrachtet. Im Passivhaus kommt stets die Zuluftheizung und -kühlung in Betracht, wobei wegen der niedrigen Zulufttemperaturen besonders auf gegen Kondensat gedämmte Zuluftleitungen sowie auf angepasste Luftauslässe, die Kondensat, Nebelbildung und Zugluft verhindern, zu achten ist. Alternativ ist eine Heizung, Kühlung und Entfeuchtung in allen Zuluftträumen, z.B. mittels Multi-Split, möglich. Eine Kühlung nur in einem einzelnen Raum erwies sich dagegen als nicht ausreichend. Eine Alternative ist die Kühlung der Zwischendecke des untersuchten Reihenhauses, wobei ausreichende Entfeuchtung sicherzustellen ist, um Kondensat bzw. Schimmel an den gekühlten Flächen zu vermeiden. In trockenen Klimata wie beispielsweise 04 - Las Vegas erscheint diese Variante besonders vorteilhaft.
- Je nach Klima kann eine Trennung von Kühlung und Entfeuchtung sinnvoll sein, um den Energiebedarf weiter zu senken. Bei den hier untersuchten Klimata war dies insbesondere in 02 - Tokio und 05 - Dubai der Fall.



4 Beispielgebäude

4.1 Allgemeines zu den Beispielgebäuden

Eine wesentliche Aufgabe des Forschungsprojekts „Passivhäuser für verschiedene Klimazonen“ bestand darin, Passivhäuser für die ausgewählten Standorte zu planen, vom ersten Vorentwurf bis zu den ausführungsfähigen Details.

Art und Maß der baulichen Nutzung wurden in Abstimmung mit der Fördermittelgeberin (Deutsche Bundesstiftung Umwelt) und dem Kofinanzierer (St. Gobain) für jeden Standort festgelegt und danach mit Kennern des lokalen Marktes abgestimmt.

Die Gebäude sollen sich darüber hinaus städtebaulich Charakter der näheren Umgebung einfügen, diese sensibel ergänzen, ohne sich ihr aber unterzuordnen. Die Entwürfe sollten auch regionaltypische Gestaltelemente – allerdings modern interpretiert und umgesetzt in einer Architektursprache unserer Zeit – aufgreifen.



Abbildung 6: Wohnhaus Las Vegas

Schon die Vorentwürfe wurden deshalb frühzeitig auch mit lokal ansässigen KollegInnen / ExpertInnen insbesondere auch auf die lokale Entwurfsakzeptanz hin diskutiert und die daraus resultierenden Empfehlungen in den laufenden Entwurfsprozessen umgesetzt.



4.2 01 - Jekaterinburg

4.2.1 Entwurfskonzept

Die vorgesehene Konstruktion für das Passivhaus in Jekaterinburg ist ein vorgefertigter Stahlzellenmodulbau, um insbesondere auch die langen Winterperioden für das Bauen – nämlich die Vorfertigung in einer Halle – zu nutzen.

4.2.2 Grundrisse

Für Jekaterinburg sollte ein gemischt genutztes, mehrgeschossiges Gebäude mit kleineren, bei Bedarf zusammenschaltbaren Gewerbeeinheiten (Büros, kleinere Ladenlokale, Fitness-Studio o.a.) im Erdgeschoss entwickelt werden.

Kellergeschoss

Das Gebäude ist teilunterkellert. Der Keller ist unbeheizt. Der Keller wird über das ebenfalls nicht beheizte Treppenhaus mit Aufzug erschlossen.

Erdgeschoss

Im Erdgeschoss sind Ladenlokale bzw. kleinere Büros mit einer Nutzfläche zwischen 52 m² und 120 m² sowie der 27 m² große Technikraum vorgesehen. Die Geschäftsräume mit ihren großzügigen Fensterflächen sind nach Süden, die Erschließungszone mit Nebenräumen und der Technikraum nach Norden orientiert.

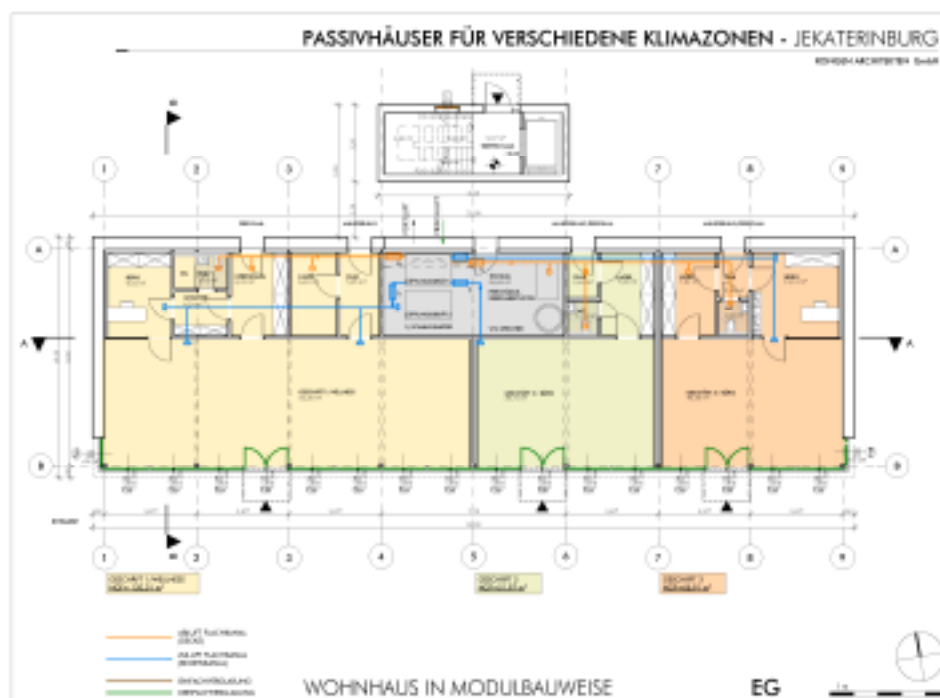


Abbildung 7: Wohn- und Geschäftshaus Jekaterinburg – Grundriss Erdgeschoss



Obergeschoss

Im ersten und zweiten Obergeschoss sind vier Wohnungen mit einer Wohnfläche zwischen 41 m² und 121 m² geplant. Die beiden größeren Wohnungen sind Maisonette-Wohnungen, die sich über das erste und zweite Obergeschoss erstrecken. Im dritten Obergeschoss sind zwei Wohnungen mit einer Wohnfläche von jeweils 91 m² und 141 m² geplant.

Allen Wohnungen ist eine eigene Loggia, die im Sommer zum attraktiven Freisitz wird, zugeordnet. Verglaste Loggien wurden offenen Balkonen vorgezogen. So sind die ‚Freisitze‘ auch noch in den Übergangszeiten (Frühjahr/Herbst) zu nutzen.

Erschlossen werden die Obergeschosse über eine brückenartige Verbindung zwischen dem außerhalb der thermischen Hülle liegenden Treppenhaus und der Passivhaus-Eingangstür für das jeweilige Geschoss.



Abbildung 8: Wohn- und Geschäftshaus Jekaterinburg – Grundriss 1. Obergeschoss

4.2.3 Ansichten / Schnitte

Die relativ wenigen, überwiegend kleinen noch verbleibenden Fenster auf der Nordseite hätten mit Blick auf die Energieeffizienz durchaus noch weiter reduziert werden können. Zur Vermeidung einer ‚toten‘ Fassade, wurde nach der Optimierung im PHPP darauf verzichtet, noch mehr Fenster aus dem Entwurf heraus zu nehmen.

An den Giebelseiten des Gebäudes wird der Eintrag von Flugschnee durch Schneebarrieren aus beispielsweise engmaschigen Netzen verhindert.

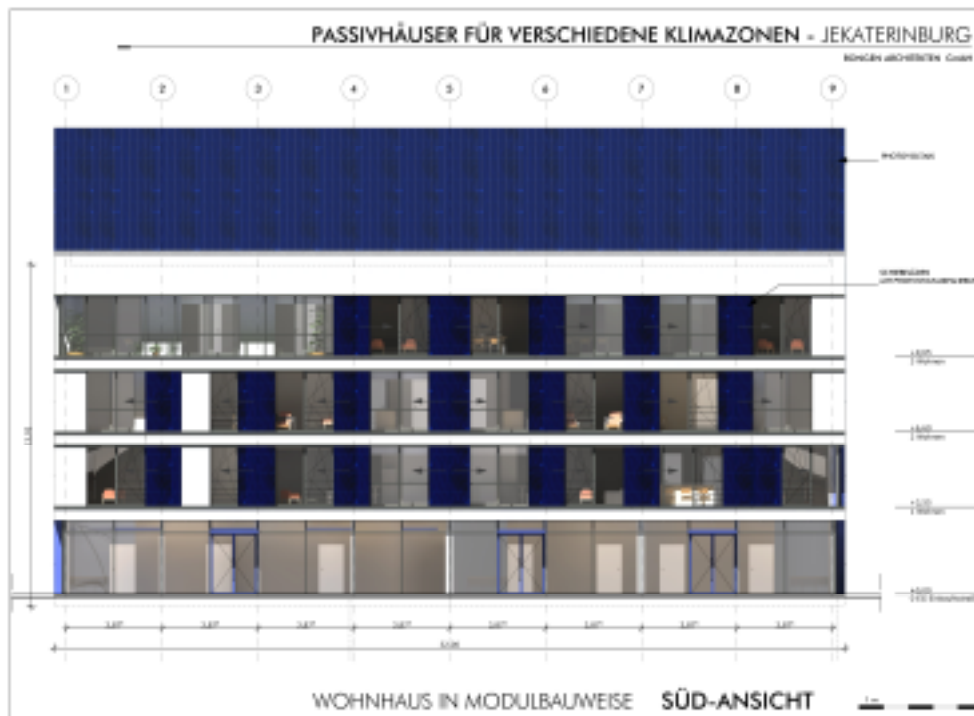


Abbildung 9: Wohn- und Geschäftshaus Jekaterinburg – Straßenansicht (Süd)

Die großen Fensterflächen auf der Südseite machen einen beweglichen Sonnenschutz erforderlich. Dazu sind im Erdgeschoss Sonnenschutzrollos bzw. Raffstores, in den Obergeschossen Schiebeläden aus Fotovoltaikpaneelen vorgesehen. Die PV-Paneele haben damit eine Doppelfunktion, sie sind nicht nur Stromproduzenten, sondern gleichzeitig auch Verschattungselemente.

4.2.4 Detailausbildung

Hinweis: Die Luftdichtheitsebene ist in allen Details als rote Linie gekennzeichnet.

Flachdach / Attika über Loggia

Der auskragende Teil des Flachdachs und die Attika ‚liegen‘ auf der Stahlrahmenkonstruktion der Loggia auf.

Die ‚im Wesentlichen‘ selbsttragenden Loggien sind biegesteife Stahlrahmen, die an den tragenden Rahmenkonstruktionen der Module ‚hängen‘. Die Stahlrahmen der Loggien sind über Kopfplatten an mit U-Profilen (200 mm x 75 mm, Wandstärke 8,5 mm), die zwischen den Stützen der tragenden Rahmen der Stahlmodule eingeschweißt sind, verschraubten Stahlprofilen IPE 160 montiert. Die Stahlprofile IPE 160 werden durch Schöck Isokörbe KST-QST16 thermisch getrennt.

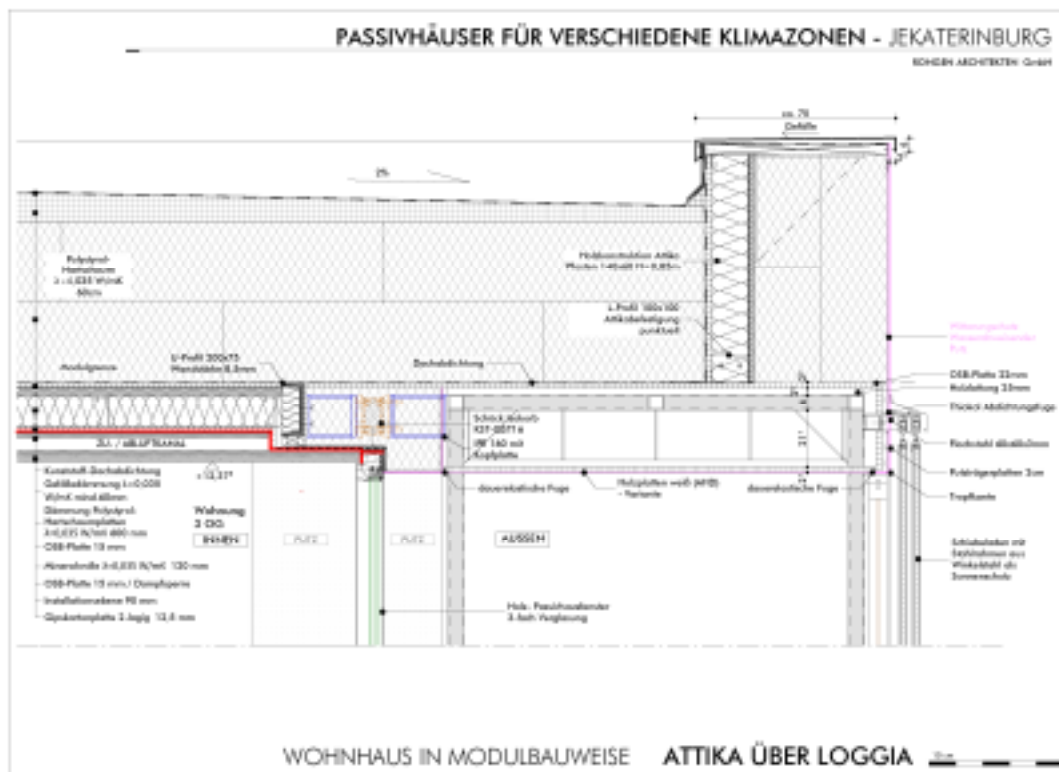


Abbildung 10: Wohn- und Geschäftshaus Jekaterinburg – Detail Attika über Loggia

Die verschiebbaren, 1-fach-verglasten Fenster sowie die ebenfalls verschiebbaren Sonnenschutzelemente (Fotovoltaikpaneele oder Schiebeläden) sind an den Stahlrahmen der Loggien befestigt.

Ansonsten ist die Attikakonstruktion im Wesentlichen identisch mit der des übrigen Flachdachs.

4.2.5 Fazit

Der gewählte Stahl-Modulbau ist sicher nicht wenig anspruchsvoll, was den Umgang mit Wärmebrücken betrifft. Mit dem Nachweis, dass der für den Standort Jekaterinburg entwickelte Entwurf als Passivhaus realisierbar ist, ist leicht nachvollziehbar, dass dieser Entwurf als konventioneller Massivbau mit WDVS (Wärmedämmverbundsystem)-Fassade erst recht als Passivhaus machbar wäre.

Die Loggien, die gerade im Sommer zu Freisitzen werden, welche die Wohnqualität steigern, bringen - auf den Passivhausstandard bezogen- weitere Erschwernisse mit sich, deren Bewältigung bewusst in Kauf genommen wurde:

Dadurch, dass das Treppenhaus mit Aufzug außerhalb des beheizten Gebäudevolumens angeordnet ist, kann der sich an anderer Stelle durch die besonderen Entwurfsanforderungen ergebende Mehraufwand z. T. wieder kompensiert werden.



Die Leichtbauweise des Modulbaus verlangt wegen ihrer gegenüber einem Massivbau geringeren Speichermasse allerdings eine besondere Berücksichtigung des sommerlichen Wärmeschutzes. Dies wird noch verstärkt durch den großen Fensterflächenanteil auf der Südseite. Die massive Südorientierung minimiert zwar den Heizwärmebedarf, führt allerdings zu einer vergleichsweise hohen Heizlast, weshalb auf Heizkörper in den Wohnungen nicht verzichtet werden kann.



Abbildung 11: Wohn- und Geschäftshaus Jekaterinburg – Perspektive Strasse

Die ‚freie Nachtkühlung‘ über die Fenster im Sommer ist für dieses Haus wesentlich.

Eine sehr gute Luftdichtheit und eine kontrollierte Lüftungsanlage mit einem hohen Wärmerückgewinnungsgrad sind unerlässlich und noch viel wichtiger als vergleichsweise in Mitteleuropa. Um in Jekaterinburg ein gemischt genutztes Gebäude in vorgefertigter Modulbauweise unter den angenommenen Qualitätsansprüchen an die Funktion, die Gestaltung und auch den Wohnkomfort zu realisieren, sind sehr hohe Dämmstärken, sehr gute Verglasungen mit Fensterrahmen in hoher Passivhausqualität zwingend erforderlich.



4.3 02 - Tokio

4.3.1 Entwurfskonzept

In Tokio ist die Nachfrage nach Einfamilienhäusern relativ groß. Die für Einfamilienhäuser vorgesehenen Grundstücke sind sehr teuer und demzufolge in aller Regel relativ klein und eng. Das fiktive Grundstück für Tokio sollte Bestandteil einer beengten städtebaulichen Situation und daher auch klein, eng und durch mögliche Nachbargebäude verschattet sein.

4.3.2 Grundrisse

Erdgeschoss

Der Entwurf sieht ein Passivhaus auf drei Ebenen (Erdgeschoss bis 2. Obergeschoss) vor. Auf einen Keller wurde verzichtet.

Die Erschließung erfolgt über einen kleinen Windfang von der Ostseite. Im Erdgeschoss sind neben dem offenen Wohn-, Ess- und Kochbereich noch das Gäste-WC und ein Abstellraum vorgesehen.

1. Obergeschoss

Das Elternschlafzimmer, ein kleiner Schreibbereich, das für Japaner wichtige Familienbad (i. d. R. nehmen Japaner täglich vor dem Schlafen gehen ein Bad) und eine Galerie mit offenem Luftraum zum Erdgeschoss sowie der Technik- und teilweise Abstellraum befinden sich im ersten Obergeschoss.

Das Familienbad ist in drei Bereiche unterteilt. Es besteht aus einem separaten Vorraum mit Waschtisch, einem separaten WC und dem Raum für das eigentliche Bad mit Badewanne und Dusche.

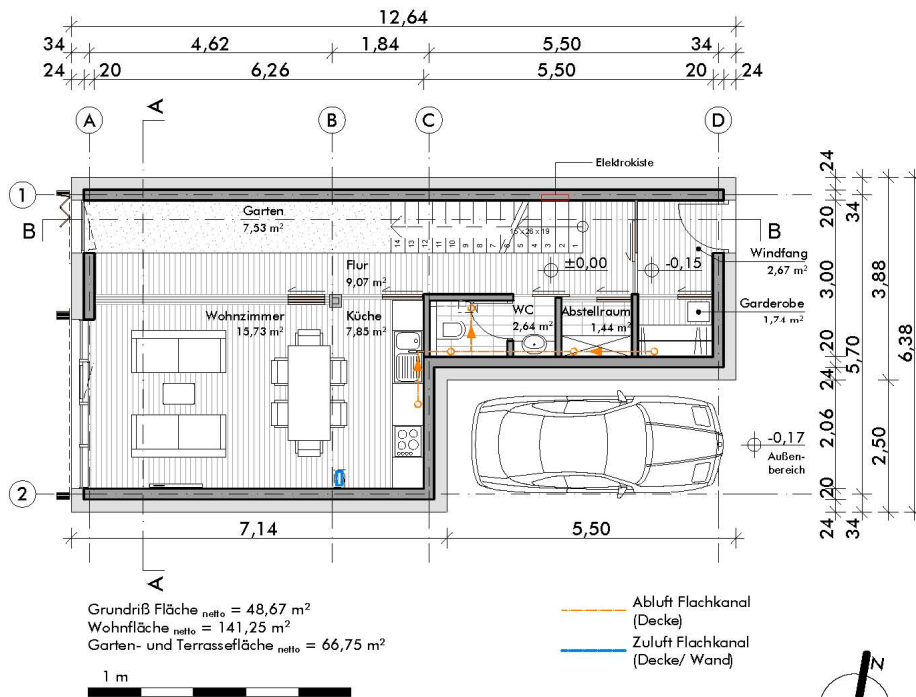
2. Obergeschoss

Die Wohnfläche des kleinen Hauses wird den Umständen geschuldet intensiv genutzt, so sind im zweiten Obergeschoss neben den beiden Kinderzimmern und dem Kinderbad im Flurbereich auch noch zwei Schreibplätze für die Kinder untergebracht.

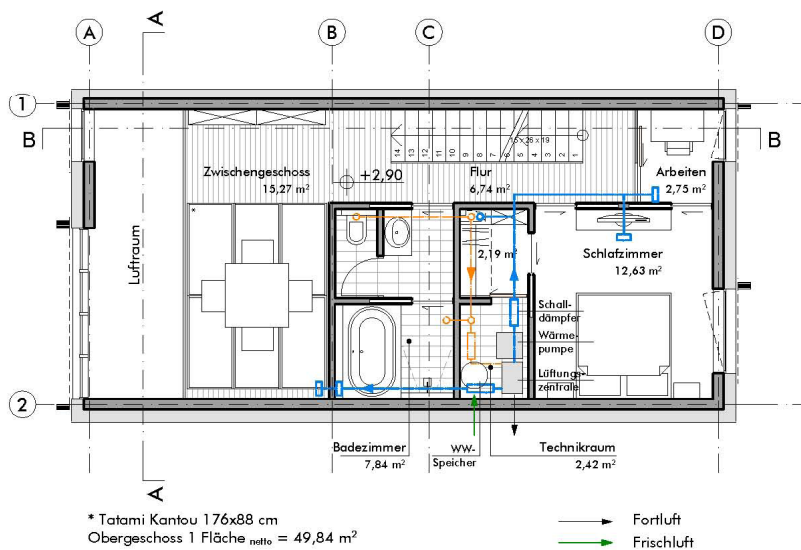
Dem Obergeschossflur ist nach Osten hin eine 15,5 m² große Dachterrasse vorgelagert, von wo aus eine Außentreppe auf das Hauptdach führt, das als Dachgarten genutzt wird.



RONGEN ARCHITEKTEN G m b H
 Passivhäuser für verschiedene Klimazonen - Tokio



ERDGESCHOSS



OBERGESCHOSS 1

Abbildung 12: Wohnhaus Tokio – Grundrisse Erdgeschoss und 1. Obergeschoss

4.3.3 Ansichten / Schnitte

Als fiktives Grundstück wurde eine enge Baulücke mit Nachbarbebauungen in einem Abstand von jeweils nur 2,00 m an der Süd- und Nordseite angenommen. Die Nordseite ist fensterlos. Im zweiten Obergeschoss ist nach Süden nur eine einzige Öff-



nung vorgesehen: Eine doppelflügelige Fenstertür als Ausgang zur Dachterrasse. Diese Fenstertür hält einen Abstand von 5,74 m vom Nachbargebäude ein.

4.3.4 Detailausbildung

Gebäudesohle

Die 20 cm dicke Stahlbetonsohle ruht auf einer 10 cm starken Schaumglasdämmung, $\lambda=0,040$ W/mK. Eine zwischen der Schaumglasdämmung und der Stahlbetonsohle eingebrachte PE-Folie sorgt dafür, dass beim Betonieren der Gebäude-sohle kein Beton in die Schaumglasdämmung eindringt.

Die auf der 20 cm dicken Stahlbetonbodenplatte eingebaute Wärmedämmung, $\lambda=0,032$ W/mK, ist 9 cm dick und wirkt gleichzeitig als Trittschalldämmung. Darauf folgt dann eine Dampfsperre, ein 6 cm starker Estrich und als Bodenbelag dann ein 2 cm starkes Parkett.

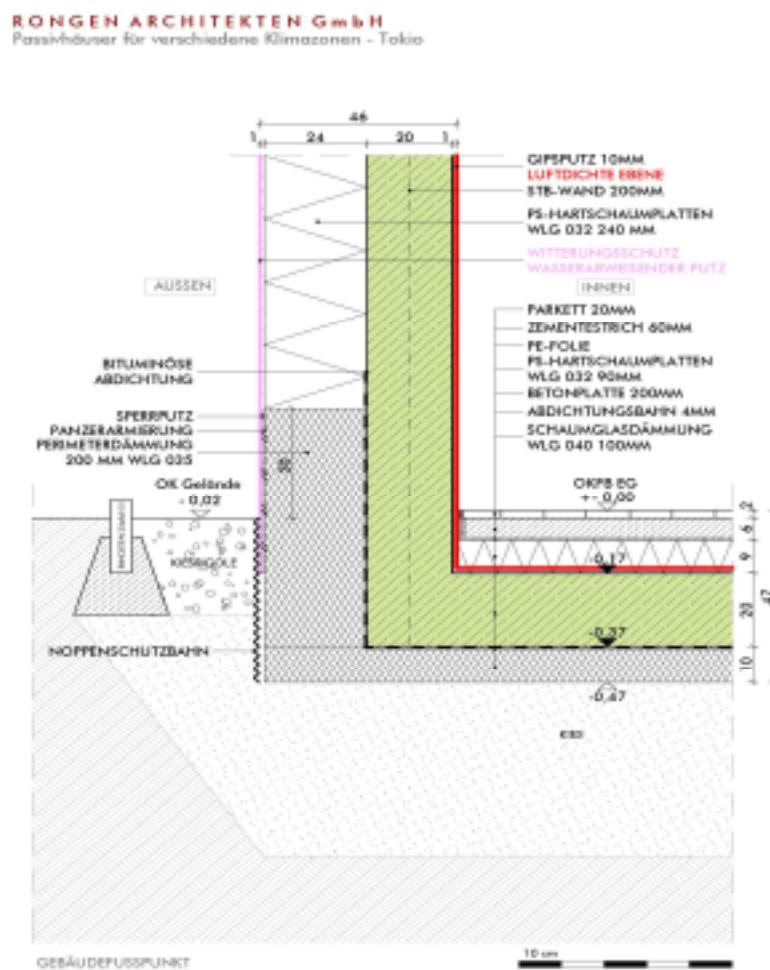


Abbildung 13: Wohnhaus Tokio – Detail Gebäudefußpunkt



4.3.5 Perspektiven / Schaubilder

Die Faltläden sind nicht nur ein optimaler, flexibler Sonnenschutz sie spiegeln auch die typisch japanische Architektursprache wieder.

RONGEN ARCHITEKTEN GmbH
Passivhäuser für verschiedene Klimazonen - Tokio



Abbildung 14: Wohnhaus Tokio – Perspektive Gartenseite



4.3.6 Fazit

Ein solch kleines und stark gegliedertes Passivhaus (ungünstiges AV – Verhältnis) funktioniert in Tokio wegen der hohen Strahlungswerte und der milden Wintertemperaturen.

Um für das auf Grund der beengten Grundstücksverhältnisse relativ kleine Haus ein Maximum an Wohnfläche zu erreichen, sollten Dämmstoffe, die einer geringen Wärmeleitfähigkeitsgruppe angehören und natürlich auch sehr gute Passivhausfenster gewählt werden.

Durch die starke Verschattung in dem angenommenen urbanen Kontext hat Dreifachglas im Gegensatz zu den Simulationen für das Reihenendhaus die bessere Energiebilanz.

Für die Kühllast wurde ein Reduktionsfaktor von 15 % für die Faltläden angesetzt, was der Situation entsprechen soll, dass alle Läden geschlossen sind.

Zu einem gewissen Teil kann das Haus auch nachts über Fensterlüftung herunter gekühlt werden, allerdings nur in Perioden in denen dies nicht einen zu hohen Feuchteintrag bedeuten würde. Andernfalls würde der latente Kühlbedarf enorm ansteigen.

Damit die Kühllast gedeckt werden kann, wird zum Kühlen und Heizen eine Außenluftwärmepumpe vorgeschlagen und statt mit einem 0,3-fachen mit einem 0,5-fachen Luftwechsel gefahren.

Zur Reduzierung der Entfeuchtungslasten ist eine Feuchterückgewinnung vorgesehen.



4.4 03 - Shanghai

4.4.1 Entwurfskonzept

Für Shanghai sollte ein Hochhaus als Passivhaus entwickelt werden. Die Nachfrage an Wohnhochhäusern ist in den chinesischen Metropolen im Allgemeinen nach wie vor sehr hoch. Zunehmend fragen chinesische Investoren, ob auch Hochhäuser als Passivhäuser realisiert werden können.

Für das zu planende Hochhaus wurde ein fiktives Grundstück mit der Flächenausdehnung 200 x 300 m angenommen.



Abbildung 15: Wohnhochhaus Shanghai – Städtebaulicher Rahmen

4.4.2 Grundrisse

Der Entwurf sieht drei Tiefgaragengeschosse, fünf Sockelgeschosse, 21 ‚Normalgeschosse‘ und drei Geschosse mit Penthäusern für den eigentlichen Tower vor. Von den 24 Geschossen des Towers sind 23 Geschosse reine Wohngeschosse. Das fünfte Sockelgeschoss sowie das 21. Geschoss des Towers sind als Technikgeschosse konzipiert.

Sockelgeschosse 1F bis 5F

Im ersten Sockelgeschoss (1F) auf Straßenniveau sind neben den erforderlichen vertikalen Erschließungsflächen (Aufzüge, Fluchttreppen) 10 kleinere Shops von 12 m² bis 60 m² Nutzfläche, ein Supermarkt (455 m² Nutzfläche) sowie Gemeinschaftstoiletten vorgesehen.

Im zweiten Sockelgeschoss (2F) sind neben den erforderlichen vertikalen Erschließungsflächen (Aufzüge, Fluchttreppen) 6 Shops von 42 m² bis 455 m² Nutzfläche, ein Multifunktionsraum (75 m² Nutzfläche) und ein Restaurant (189 m² Nutzfläche) sowie auch hier Gemeinschaftstoiletten vorgesehen.

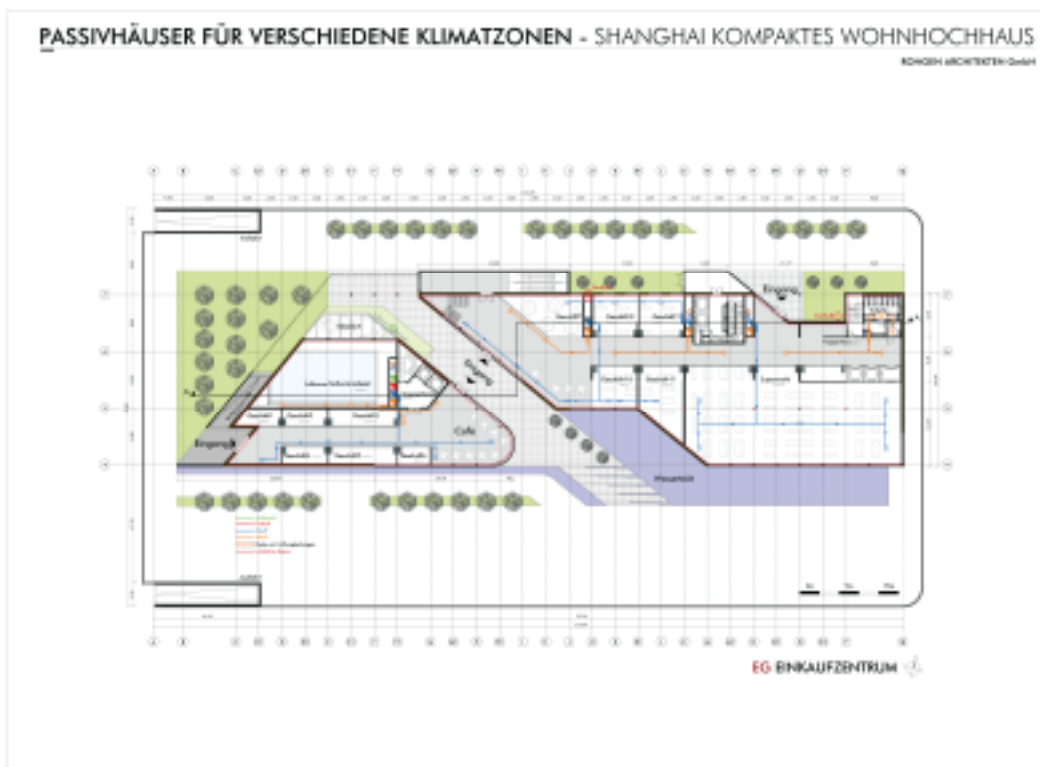


Abbildung 16: Wohnhochhaus Shanghai – Grundriss Ebene 1 (Straßenniveau)

Im dritten Sockelgeschoss (3F) sind neben den erforderlichen vertikalen Erschließungsflächen (Aufzüge, Fluchttreppen), ein Fitness-Center (156 m² Nutzfläche), 5 Shops von 46 m² bis 223 m² Nutzfläche, ein Multifunktionsraum für Feiern, Vorträge u. a. (75 m² Nutzfläche) und ein Restaurant (189 m² Nutzfläche) mit Nebenflächen sowie auch hier Gemeinschaftstoiletten vorgesehen.

Außerdem sind in diesem Geschoss zwei Dachterrassen (73 m² und 289 m²) für die Gemeinschaft vorgesehen.

Das fünfte Sockelgeschoss wird als Technikgeschoss und zum Teil auch als Dachgarten für die Allgemeinheit genutzt.

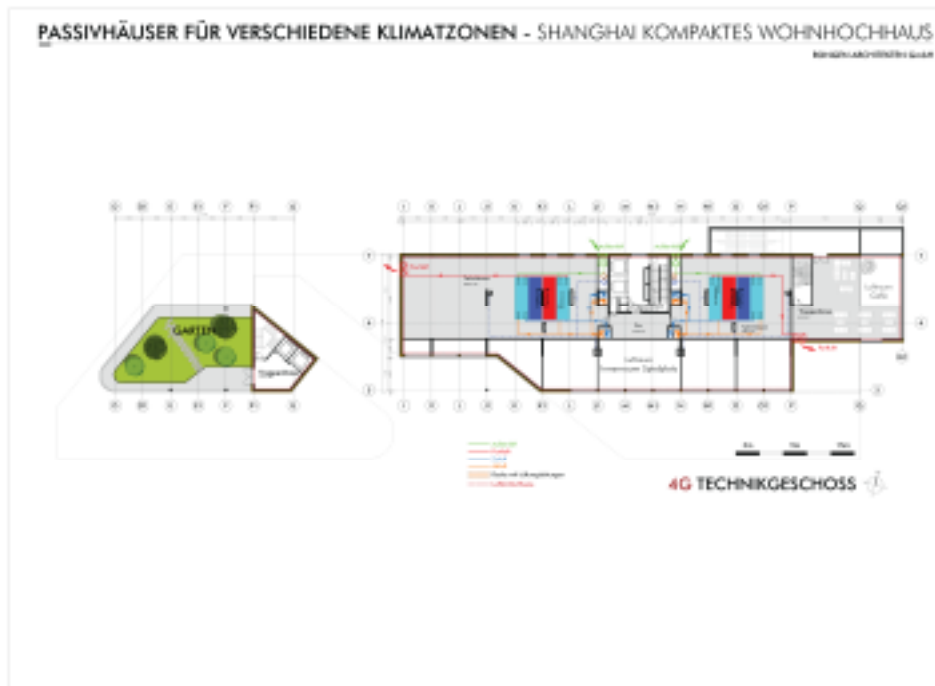


Abbildung 17: Wohnhochhaus Shanghai – Grundriss Ebene +5

Wohngeschosse 6F bis 26F

Mit dem sechsten Sockelgeschoss beginnt der eigentliche Wohnturm. Im sechsten Geschoss sind fünf Wohnungen von 72 m² bis 99 m² geplant. Das siebte bis einschließlich 20. Geschoss sind identische, reine Wohngeschosse mit jeweils fünf Wohnungen von 72 m² bis 99 m² Wohnfläche.



Abbildung 18: Wohnhochhaus Shanghai – Grundriss Ebenen +7 bis +20



Außer der 72 m² großen Wohnung ist allen Wohnungen jeweils ein eigener Balkon zugeordnet.

Das 21. Geschoss ist für zwei je 151 m² große Technikräume und insgesamt 261 m² Freifläche als Fluchtbereich im Brandfall vorgesehen.

Penthouse-Geschosse 27F bis 29F

Für das 27. bis einschließlich 29. Geschoss sind drei identische, 193 m² große Penthouse-Wohnungen (einschl. eines 44 m² großen Büros) vorgesehen, die sich lediglich in den zugeordneten Freiflächen unterscheiden.

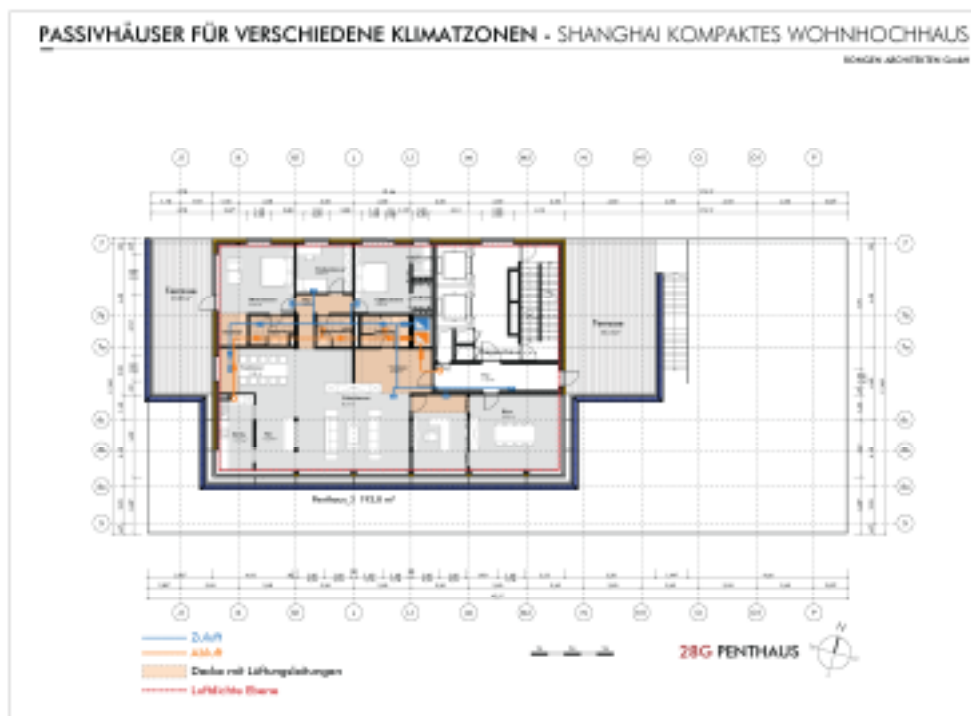


Abbildung 19: Wohnhochhaus Shanghai – Grundriss Ebene +29 – oberste Wohnebene

In allen drei Penthouse-Wohnungen ist – wie auch schon in allen übrigen Wohnungen (Geschosse 6F bis 20F und 22F bis 26F) – das horizontale Leitungsnetz so geplant, dass i. d. R. nur Decken in Nebenräumen abgehängt werden müssen bzw. nur Teilbereiche über Einbauschränken zu verkleiden sind.

4.4.3 Ansichten / Schnitte

Die an der Südseite sowie an der Ost- und Westfassade unterschiedlich tiefen Balkone prägen die Fassaden, genauso die an der Nordseite großzügigen Verglasungen der Sockelgeschosse.

Verschattungselemente sollen helfen, die sommerlichen Kühllasten ‚auf natürliche Weise‘ zu senken.



4.4.4 Detailausbildung

Auskragungen Balkone und Dachterrassen

Die auskragenden Balkone und Dachterrassen werden über geeignete, punktuell eingebaute Isokörbe (z. B. Schöck Isokorb XT 120 mm) statisch wirksam mit den Stahlbetondecken (an den Stimmseiten) verbunden. Die Isokörbe liegen in der Dämmebene. Durch die Isokörbe werden die Stahlbetondecken und die auskragenden Stahlbetonbalkon- oder -terrassenplatten thermisch getrennt.

Die Wärmedämmung (Polystyrol-Hartschaum, $D = 200 \text{ mm}$, $\lambda=0,032 \text{ W/mK}$) auf der Stahlbetondecke des obersten Regelgeschosses wird mit der Außenwanddämmung über einen Isokorb verbunden. Um eine ebene Fläche der Dachterrasse zu realisieren wird die Dämmung auf der Auskragung der Stahlbetonterrassenplatte bis zur aufgehenden Stahlbetonbrüstung der Dachterrasse durchgeführt.

Die innere Luftdichtheitsebene ist als rote Linie eingetragen.

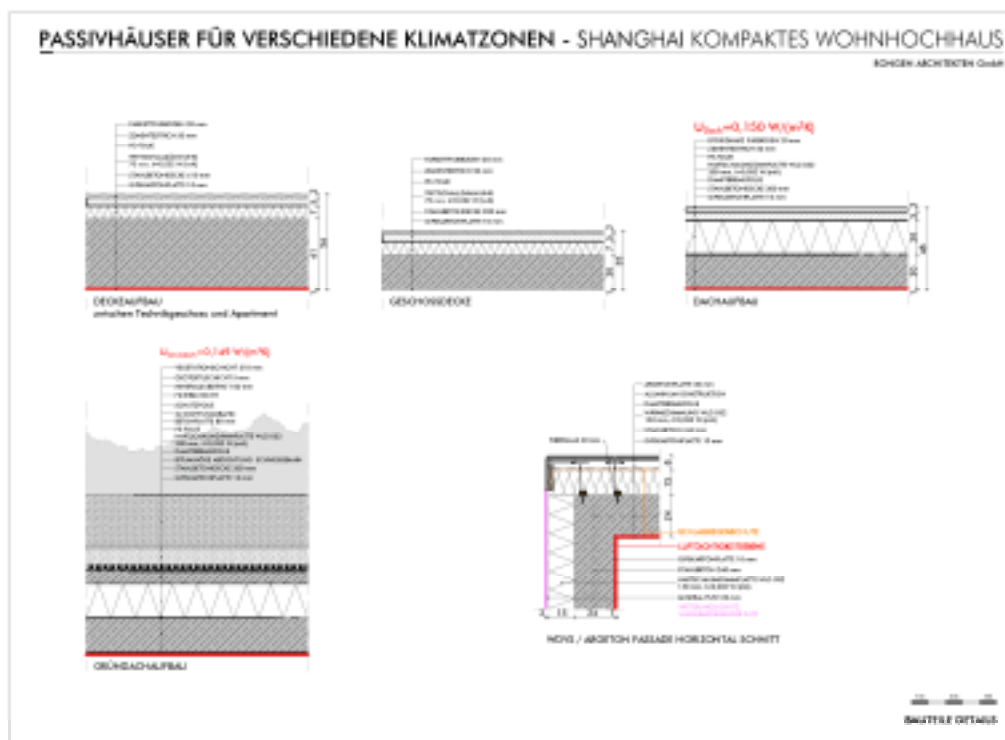


Abbildung 20: Wohnhochhaus Shanghai – Detail

4.4.5 Perspektiven / Schaubilder

Das ‚Passiv-Hochhaus‘ für Shanghai ist geprägt durch den 5-geschossigen, gemischt genutzten Gebäudesockel und den klaren, kompakten ‚Wohnturm‘.



Abbildung 21: Wohnhochhaus Shanghai – Perspektive

4.4.6 Fazit

Die extrem kompakte Kubatur und der gute Strahlungszugang führen dazu, dass die Beheizung des Gebäudes kein Problem ist.

Deswegen wäre es technisch natürlich am einfachsten gewesen, ein Dreifach-Sonnenschutzglas einzusetzen. Dann hätte man auf die windresistenten Außenjalousien verzichten können, und außerdem wären auch die Wärmebrücken durch die Jalousiebefestigung entfallen. Es wurde aber bewusst nicht der einfachste Weg gewählt; denn gerade auch für Hochhäuser spielt die Gestaltfreiheit eine nicht unwesentliche Rolle, um gerade bei dem besonders Stadtbild prägenden Gebäudetypus ‚Hochhaus‘ Uniformität zu vermeiden.

Im Falle einer konkreten Realisierung eines Passiv-Hochhauses für Shanghai müsste dann in Abhängigkeit vom konkreten Entwurf, der von verschiedenen Faktoren (Vorgaben der Bauherren, i. d. R. gestalterische Vorgaben der Genehmigungsbehörden u. a.) beeinflusst wird, entschieden werden, auf welche Art und Weise z. B. der erforderliche Sonnenschutz sichergestellt werden kann.

Besonders wichtig ist eine ausgezeichnete Luftdichtheit zwischen dem Treppenhaus und dem themisch geregelten Volumen des restlichen Gebäudes sowie im Treppenhaus selbst, da durch den starken thermischen Auftrieb ansonsten die Infiltration sehr groß würde. Auch die Geschosse untereinander müssen sehr luftdicht sein, dies betrifft vor allem die Abschottung innerhalb von Schächten.



4.5 04 - Las Vegas

4.5.1 Entwurfskonzept

Las Vegas gilt offensichtlich als beliebter Altersruhesitz für wohlhabende Amerikaner. Deshalb sollte eine großzügige, komfortable Einfamilienhausvilla entworfen werden. So entstand ein Solitärbaukörper auf einem fiktiven, undefinierten Grundstück, das überall, auch irgendwo in der Wüste, liegen könnte.

Das Haus soll sich – je nach Wunsch der betreffenden BewohnerInnen – entweder nach außen hin introvertiert oder aber offen und extrovertiert zeigen können.



Abbildung 22: Wohnhaus Las Vegas – Grundriss Erdgeschoss

Hauptsächlich wird das Haus über den Innenhof mit Tageslicht versorgt.

4.5.2 Grundrisse

Kellergeschoss

Im Kellergeschoss unterhalb der Terrasse ist ausschließlich die Schwimmbadtechnik untergebracht.



Erdgeschoss

Dem Wohnhaus sind ein Vorhof, über den das Haus erschlossen wird, und überdachte, nach außen abgeschottete Kfz- und Fahrradstellplätze sowie ein Abstellraum für Mülltonnen vorgelagert. Der direkte Zugang vor der Haustür wird von einer transluzenten Membran überdeckt. Das Erdgeschoss präsentiert sich als offener Wohnbereich. Die nach Süden hin großzügige Verglasung bietet einen freien Ausblick über den Innenhof und den Pool hinaus in die Landschaft. Im Erdgeschoss gibt es ausschließlich Fenster nach Süden.

Obergeschoss

Das an der Ost- und Westseite nach Süden stark auskragende Obergeschoss bietet den BewohnerInnen schattige Plätze im Außenbereich und darüber hinaus auch eine teilweise Verschattung des Außenpools. Im Obergeschoss sind vier Schlafräume mit jeweils eigenem Bad sowie eine zum Erdgeschoss hin offene Galerie geplant.

Die Schlafräume im Obergeschoss werden über die nach Osten bzw. Westen orientierten Fenster zum ‚Innenhof‘ bzw. nach Norden, die Galerie nach Süden hin natürlich belichtet. Durch den eingeschossigen Vorbau ist auch nach Norden immer ein ausreichender Gebäudeabstand zu einem eventuellen Nachbargebäude gegeben. Nach Osten und Westen sind keine Fenster vorgesehen.



Abbildung 23: Wohnhaus Las Vegas – Grundriss Obergeschoss



4.5.3 Ansichten / Schnitte

Die Fassaden sind zur Reduzierung der Kühllast als sehr helle – möglichst weiße (cool colours) – Fassaden vorgeschlagen.

Der eingeschossige ‚Garagenvorbau‘ verdeckt den erdgeschossigen Teil der Fassade an der Nordseite. In der Nordfassade gibt es bis auf die horizontalen Fensterbänder im Obergeschoss (Flur, Bibliothek, zwei Schlafräume) und der Hauseingangstür keine weiteren Öffnungen.



Abbildung 24: Wohnhaus Las Vegas – Nordansicht mit Haupteingang

In der jeweils spiegelbildlichen Ost- und Westfassade sind keinerlei Wandöffnungen vorgesehen. Die halbtransparenten, beweglichen Schiebeläden (Streckmetall, bedrucktes Glas oder auch Holz als nachwachsender Baustoff) im Erdgeschoss, die auch für die Südfassade vorgeschlagen sind, schaffen im geschlossenen Zustand eine intimere, nach außen hin extrovertierte Situation mit Schutz vor unerwünschten Einblicken. Sie tragen außerdem z. T. zur weiteren Verschattung der Aufenthaltsbereiche im Freien bei.

Die West- und Ostfassade als geschlossene Wandscheiben kommen den nicht unerheblichen statischen Anforderungen an die mehr als 9,00 m nach Süden auskragenden Obergeschosse entgegen.



4.5.4 Detailausbildung

Gebäudesockel

Die auf einer ca. 50 cm dicken Kies- und einer 5 cm starken Sauberkeitsschicht ruhende Bodenplatte ist oberseitig mit Polystyrol-Hartschaumplatten, $D = 90$ mm, $\lambda=0,035$ W/(mK), gedämmt. Darauf folgt ein 6 cm dicker schwimmender Estrich und als Bodenbelag ein 2 cm starkes Parkett.

Die 17,5 cm dicken erdgeschossigen Außenwände sind aus Kalksandstein vorgesehen, was zur Erhöhung der thermischen Speicherfähigkeit der Außenwände beiträgt. Als unterste Schicht der Außenwände ist eine „Kimmschicht“ aus hochwärmedämmenden, druckbelastbaren Steinen vorgesehen, um die Wärmebrückeneffekte im Sockelbereich zu minimieren.

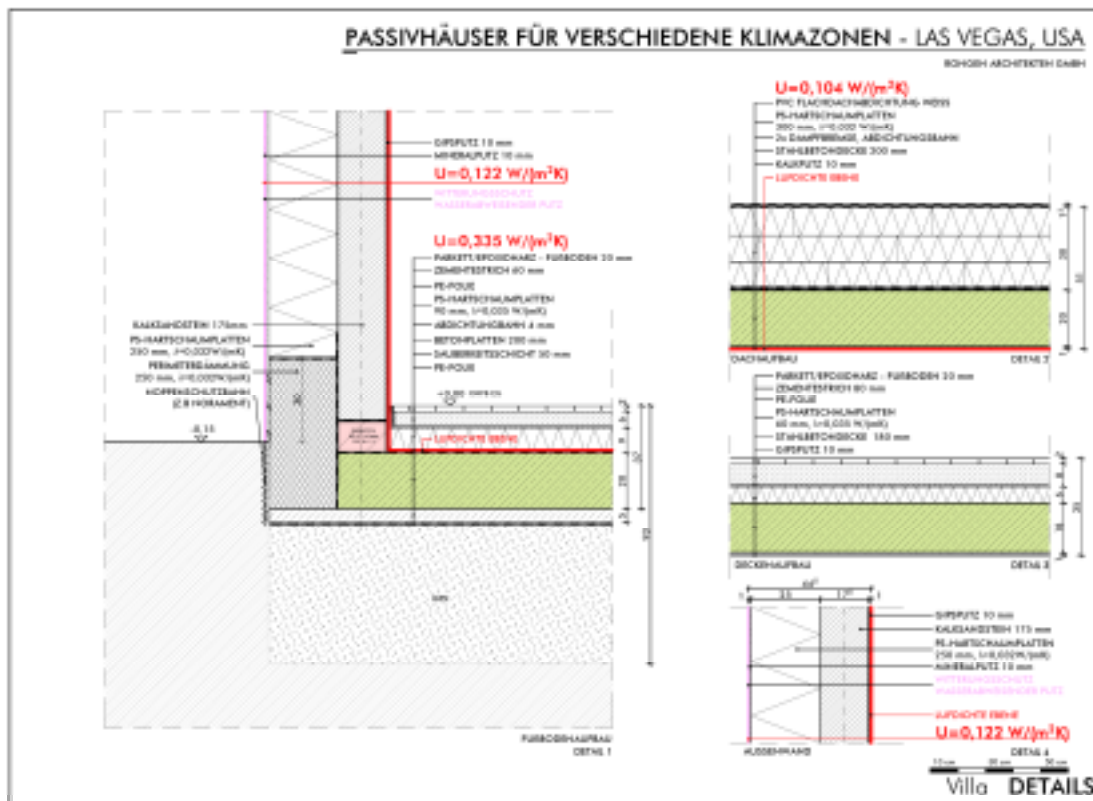


Abbildung 25: Wohnhaus Las Vegas – Details

Auf das 25 cm starke Wärmedämmverbundsystem, $\lambda=0,032$ W/(mK), wird als „Außenhaut“ ein wasserabweisender mineralischer Außenputz aufgebracht. Der untere, in das Erdreich übergehende Teil der Wärmedämmung muss eine wasserresistente Dämmung (Perimeterdämmung) sein und sollte bis mindestens 30 cm über Geländeneiveau hochgeführt werden, damit die Dämmung auch unter Feuchteeinwirkung ihre Dämmeigenschaften nicht verliert. Die Luftdichtheitsebene ist als rote Linie eingezeichnet.



4.5.5 Perspektiven / Schaubilder

Die Schaubilder machen deutlich, dass die besonderen Entwurfsansätze wie

- auskragendes Obergeschoss
- Schiebelelemente im Erdgeschoss
- großflächige Südverglasung

die Wohnqualität im Innen- wie im Außenbereich steigern.

Die sich dadurch zwangsläufig ergebenden Schwierigkeiten in Bezug auf den Passivhausstandard werden bewusst in Kauf genommen und müssen – auch in der extremen Klimazone Las Vegas – bewältigt werden. Auch hier soll es für das Passivhaus gegenüber Standardgebäuden keine Einbußen an die Wohnqualität geben.



Abbildung 26: Wohnhaus Las Vegas

Das Gebäude kann an jedem Standort, auf jedem freien Grundstück – auch irgendwo in der Wüste von Las Vegas – stehen. Durch die Möglichkeit, das Haus nach außen hin abschotten zu können ist die Intimität der Bewohner stets gegeben.



Abbildung 27: Wohnhaus Las Vegas

4.5.6 Fazit

Der bauliche Aufwand zu diesem Entwurf mag, bedingt durch die statisch höheren Anforderungen an die Auskragungen des Obergeschosses und die gegenüber einem weniger anspruchsvollen Entwurf größere Außenoberfläche, aufwändiger sein.

Die Anstrengungen, bei diesem Haus Passivhausstandard zu erreichen, sind sicher höher als bei einem Reihenhaus an diesem Standort (insgesamt sehr gute Wärmedämmung z.B. auch der Bodenplatte; sehr gute Lüftungsanlage mit hohem Wärmerückgewinnungsgrad; gute 3-fach-Verglasung mit einem geringen g-Wert von 0,35, einem $U_g = 0,6 \text{ W/m}^2\text{K}$ und einem $U_f = 0,75 \text{ W/m}^2\text{K}$).

Der Heizwärmebedarf ist unproblematisch, allerdings ist die Kühllast bei diesem in Bezug auf seine Kompaktheit bewusst nicht optimierten Entwurf nur schwer weiter zu reduzieren. Dagegen wird eine intensive nächtliche Fensterlüftung helfen, wenigstens den Kühlbedarf weiter zu reduzieren. Die Kühllast wäre aber durch Betonkern-temperierung (BKT), die in diesem Klima völlig unproblematisch wäre, problemlos zu decken. Für die Heizung wäre eine BKT weniger effektiv, was hier völlig unbedeutend wäre.

Zur Reduzierung der Kühllast sollten der Solarspeicher und z. T. auch die Warmwasser-Verteilleitungen außerhalb der thermischen Hülle untergebracht werden. Der Passivhausnachweis erfolgt über Heizwärme- und Nutzkältebedarf.



4.6 05 - Dubai

4.6.1 Entwurfskonzept

Für Dubai ist es relativ einfach, ein Haus ohne Heizwärmebedarf zu planen. Umso schwieriger ist es aber, die Kühllast auf 10 W/m^2 zu begrenzen. So wurde in der Entwurfsphase die allererste Priorität für eine für den Baukörper in Bezug auf die Kühllast optimale Gestaltung (Form/A/V-Verhältnis, Flächenzonierung {welche Nutzung an welcher Stelle?}, Fensteranordnung, Farbgebung) bestimmt.

Es wurde ein Gebäude konzipiert, das als freistehendes Einfamilienhaus, als Doppelhaus, als Reihenhaus und auch als Teppichbebauung realisiert werden kann. Je höher die Baudichte, umso geringer die der im Sommer sehr warmen Außenluft direkt ausgesetzten Gebäudehüllflächen und damit auch die Kühllasten. Das Souterraingeschoss des zweigeschossigen Wohnhauses liegt geschützt im Erdreich.

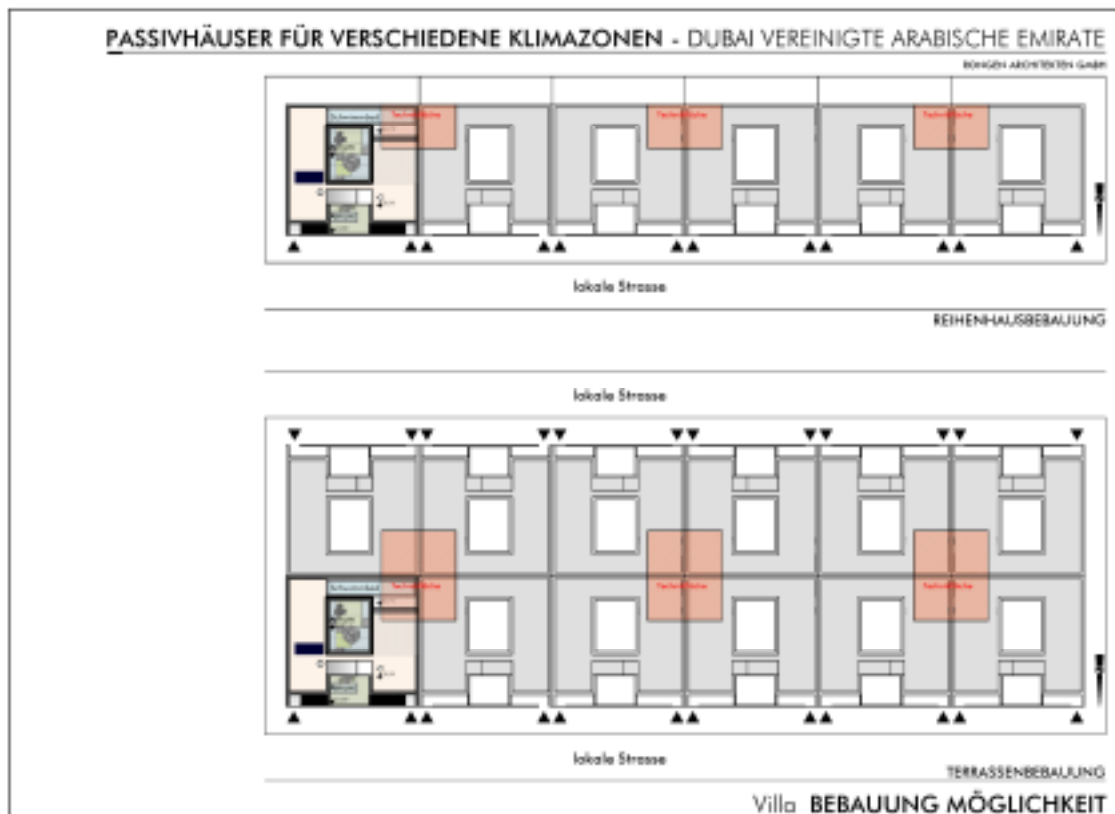


Abbildung 28: Wohnhaus Dubai – Erschließungsbezogene Anordnungsvarianten

4.6.2 Grundrisse

Erdgeschoss

Das nach außen eingeschossig wirkende Wohnhaus wird über einen mit Fotovoltaikpaneelen überdachten und durch eine gitterartig strukturierte, ‚offene Ornamentwand‘



zur Straße hin abgeschotteten ‚Eingangsvorhof‘ erschlossen. Die Ornamentwand ist eine Antwort auf die ornamentreiche islamische Architektursprache.

Die gut durchlüftete ‚offene Ornamentwand‘ und die Fotovoltaikpaneele sorgen zusammen für eine ununterbrochen natürliche Belüftung und Verschattung dieses ‚Eingangsvorhofes‘. In Ergänzung dazu soll auch der begrünte, mit einer Wasserfläche ausgestattete und einer verschiebbaren Membran überdeckte Innenhof dazu beitragen, die Kühllast mit Hilfe von Verschattung und Verdunstungskälte zu senken und so für ein günstigeres Mikroklima schon in der Eingangszone zu sorgen.



Abbildung 29: Wohnhaus Dubai – Grundriss Erdgeschoss

Vom ‚Eingangsvorhof‘ aus gibt es zwei direkte Eingänge in das Wohnhaus, einen für die Familie und einen für die Gäste des Hausherrn. Für das Passivhaus für Dubai spielte neben der traditionellen Gestaltsprache auch die islamische Baukultur eine nicht unwesentliche Rolle. So musste das separate Besucherzimmer für den Besuch des Hausherrn einen direkten Zugang von außen erhalten (Trennung Frau/Mann), der nicht durch die Privatsphäre, den ‚intimen Wohnbereich‘ der Familie, führen durfte. Das Besucherzimmer wird zum einen über den ‚Eingangsvorhof‘ und zum anderen über ein Fenster in der Diele natürlich belichtet.

Im Erdgeschoss befinden sich zudem der offene Wohnraum, der Schlafbereich für Gäste, der ‚zentrale‘ Technikraum und sonstige Nebenräume (WC, Abstellräume).



Die Aufenthaltsräume sind überwiegend zum ebenfalls mit einer verschiebbaren Membran überdachten zentralen Innenhof hin orientiert, so kann das Haus ‚nach außen hin‘ fensterlos bleiben.

Das Leitungsnetz für die Lüftungsleitungen wird vom ‚zentralen‘ Technikraum über die Nebenräume bis in die Aufenthaltsräume verteilt. Das Leitungsnetz ist so geplant, dass die Gesamtleitungslänge möglichst minimiert werden und – außer in nur wenigen Nebenräumen – auf abgehängte Decken verzichtet und so die Geschosshöhe insgesamt geringer gehalten werden kann.

Souterraingeschoss

Die Schlafräume der Familie sind im Souterraingeschoss untergebracht. Auch diese sind zum Innenhof hin orientiert und werden von dort aus mit Tageslicht versorgt.

Auch hier sind die Lüftungsleitungen so geplant, dass nur die Decken von Nebenräumen abgehängt werden müssen und somit die Geschosshöhe für das gesamte Geschoss niedriger, nämlich ohne zusätzlich zu verkleidende Lüftungsleitungen, gehalten werden kann.



Abbildung 30: Wohnhaus Dubai – Grundriss Untergeschoss



Flachdach

Zur Steigerung der Wohnqualität ist auf dem Flachdach ein Außenpool, der in Dubai nicht fehlen sollte, geplant. Bei Bedarf kann der Außenpool verschattet werden, auch wenn dies nicht dem in Dubai gewohnten Bild für Außenschwimmbäder entspräche.

Die beiden Innenhöfe werden zur Verschattung jeweils durch eine transluzente, verschiebbare Membran abgedeckt. Dadurch, dass der Außenpool auf dem Flachdach untergebracht ist, kann der Innenhof relativ eng gehalten werden, was ebenfalls zur Reduzierung der Kühllast beitragen soll.

4.6.3 Ansichten / Schnitte

Das Haus präsentiert sich nach außen weitestgehend geschlossen. Eine die Eingangszone zur Straße hin abschottende Ornamentwand in Kombination mit den nach außen weißen, vollständig geschlossenen Fassaden fügt sich auch gestalterisch in die regionale, ornamentreiche islamische Architektursprache – bewusst modern in der Sprache unserer Zeit interpretiert – ein.

Die Verschattungselemente (Schiebeläden) der Fenster im Innenhof sind mit der gleichen Ornamentik versehen wie die Ornamentwand vor dem ‚Eingangsvorhof‘.

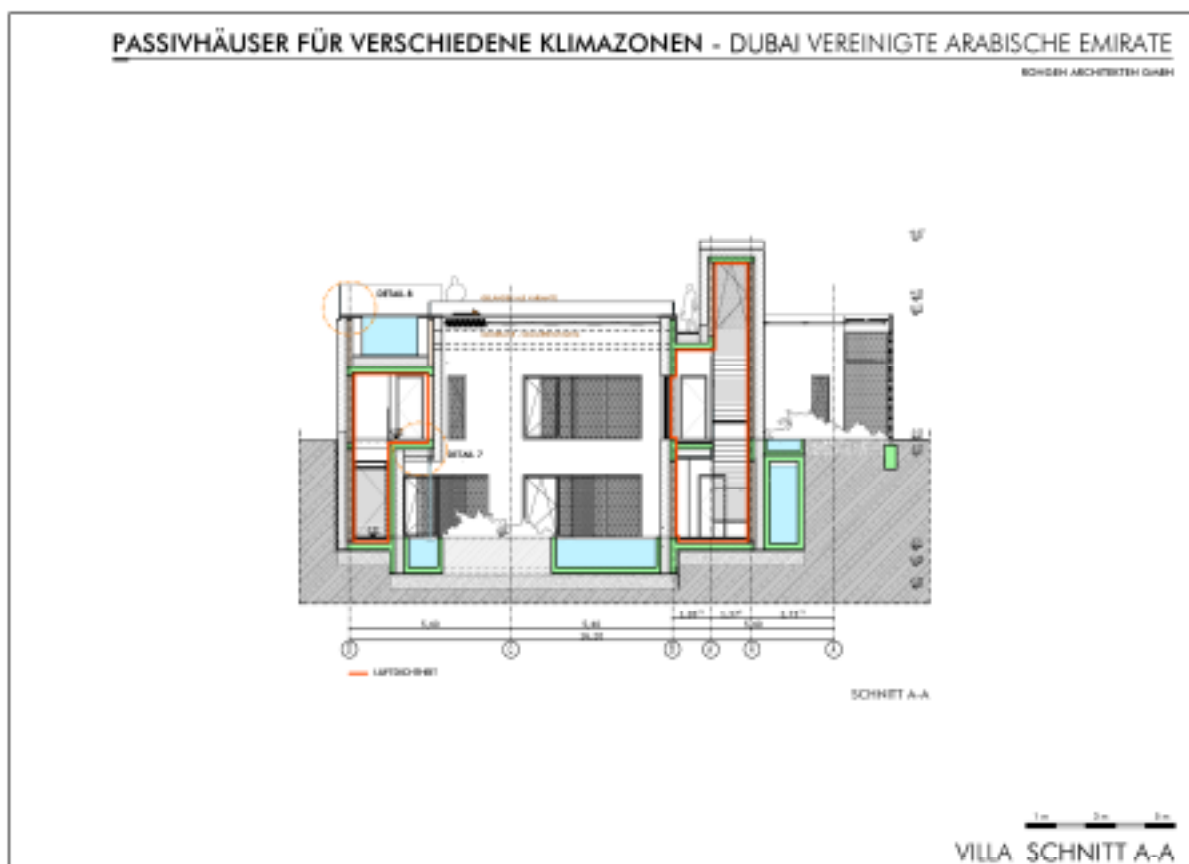


Abbildung 31: Wohnhaus Dubai – Schnitt A-A



Da die Räume überwiegend über den Innenhof mit Tageslicht versorgt werden, könnte nach außen hin komplett auf Fenster verzichtet werden. Die beiden Innenhöfe werden über eine transluzente, verschiebbare Membran im Sommer geschützt.

4.6.4 Detailausbildung

Hinweis: Die Luftdichtheitsebene ist in allen Details als rote Linie gekennzeichnet.

Detail Attika

Die obere Befestigung der Fenster (Fenstersturzbereich) und Sonnenschutzelemente (Schiebeläden) erfolgt über Edelstahlwinkel, die die Dämmebene nicht durchdringen.

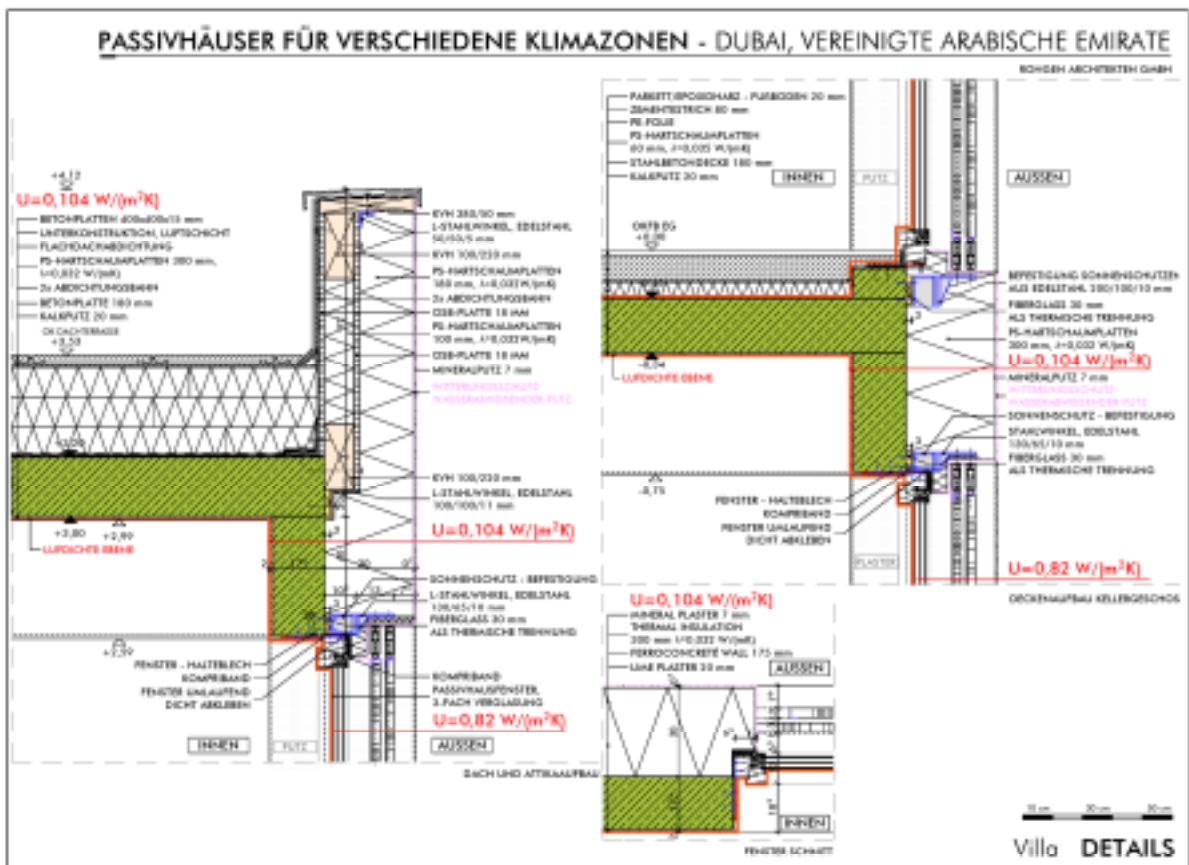


Abbildung 32: Wohnhaus Dubai – Detail

Zwischen diesen Edelstahlwinkeln und den Winkeln zur Befestigung der Schiebeläden sowie der Stirnseiten der Stahlbetondecke sind thermische Trennungen aus 30 mm dickem Fiberglas vorgesehen.

Die tragende Unterkonstruktion der Attika ist eine mit Edelstahlwinkeln vor die Stirnseite der Stahlbetondecke montierte Holzkonstruktion. So kann die dreilagige Wär-



medämmung bis zum äußeren Rand des Flachdachs durchgezogen werden. Der obere, auf der Stahlbetondecke montierte Haltewinkel für die Attika wird in alle Richtungen überdämmt.

Die Attika wird einschließlich der Wärmedämmung bis etwa 60 cm über die Flachdachebene hinaus hoch geführt.

4.6.5 Perspektiven / Schaubilder

Die ‚halbtransparente‘ Außenwand, die den ‚Eingangsvorhof‘ verschattet und weitestgehend gegenüber der Straße abschließt sowie die nach außen überwiegend geschlossenen weißen Fassaden fügen sich gestalterisch in die islamische, ornamentreiche Architektursprache – bewusst modern in der Sprache unserer Zeit interpretiert – ein. Die Ornamentik der den ‚Eingangsvorhof‘ zu Straße hin ‚abschließenden‘ Außenwand ist identisch mit der Ornamentik der Schiebeläden, die die Fenster bei Bedarf verschatten sollen.

Für den Fall der Realisierung als Doppelhaus-, Reihenhaus- oder Teppichbebauung sollte für jedes Haus eine individuelle, identitätsstiftende Ornamentik entworfen werden.



Abbildung 33: Wohnhaus Dubai – Perspektive Innenhof



4.6.6 Fazit

Wegen der extrem hohen sommerlichen Außentemperaturen in Dubai war schon das Entwurfskonzept von Anfang darauf ausgerichtet, die direkte Sonneneinstrahlung auf das Haus selbst und auch in die Innenräume hinein erheblich zu reduzieren.

So wurde das Haus mit einem Geschoss ‚in die Erde gedrückt‘ und in diesem Geschoss – abweichend von traditionellen mitteleuropäischen Wohnformen – der Schlafbereich vorgeschlagen, wogegen der Wohn- und Gästebereich im oberen Geschoss (in diesem Fall das Erdgeschoss) vorgesehen sind.

Die natürliche Belichtung erfolgt ausschließlich über Fenster zu den beiden im Sommer von einer transluzenten Membran überdeckten Innenhöfen. Nach außen gibt sich das Haus vollkommen geschlossen.

Der ‚Eingangsvorhof‘ wird durch Fotovoltaikpaneele verschattet.

In den begrünten Innenhöfen sind Wasserflächen, im zentralen Innenhof außerdem ein Wasserfall geplant.

Der Atriumgrundriss hätte sicherlich noch etwas kompakter ausfallen können, was aber einen Verzicht auf andere Qualitäten (verschatteter ‚Eingangsvorhof‘, verschattete Innenhöfe u. a.) bedeutet hätte.

Dieser Entwurf ist als Passivhaus realisierbar, wenn zusätzlich zu Cool Colours Oberflächen extrem gut gedämmt wird und die Fensterflächen auf das für die natürliche Belichtung notwendige Maß reduziert werden. Im Optimierungsprozess zum Entwurf ist dies auch geschehen.

So lässt sich die Kühllast auf 10 W/m² reduzieren. Zur weiteren Reduzierung der Kühllast werden der Solarspeicher und z. T. auch die Warmwasser-Verteilungen außerhalb der thermischen Hülle untergebracht.

Das Außenschwimmbad auf dem Dach bringt natürlich – bedingt durch unvermeidbare Wärmebrücken (schon allein durch das notwendige Treppenhaus zum Dach) – zusätzliche Wärmelasten mit sich. Deshalb aber auf das Dachschwimmbad zu verzichten würde einen erheblichen Verlust an Wohnqualität gerade in diesem Klima bedeuten. Ein Außenschwimmbad gehört zum Standard komfortabler Einfamilienhäuser in Dubai.

Interessanterweise bietet eine Teppichbebauung in Bezug auf die Kühllast kaum Vorteile. Durch die Cool Colours ist die Energiebilanz der Außenwände fast ausgeglichen.



5 Hygrothermische Untersuchungen

5.1 Problemstellung

Für Passivhäuser im mitteleuropäischen Klima gibt es eine Reihe von geeigneten und gut erprobten Bauteilaufbauten, die hinsichtlich ihres hygrothermischen Verhaltens als unproblematisch gelten. Die weltweite Verbreitung des Passivhausstandards erfordert u. a. die Anpassung der thermischen Gebäudehülle hinsichtlich der energetischen Eigenschaften. In diesem Zusammenhang stellt sich die Frage, in wieweit die bewährten Bauteilaufbauten auch unter veränderten klimatischen Randbedingungen dauerhaft und gesundheitlich unbedenklich sind. Die nachfolgend vorgestellte Betrachtung des feuchtetechnischen Verhaltens der in Abschnitt 4 beschriebenen Bauteilaufbauten soll Aufschluss über eventuelle Risiken geben bzw. geeignete Konstruktionsprinzipien und Varianten benennen.

5.2 Berechnungsverfahren

Für die Modellierung der Wand- und Dachaufbauten wird das Programm [Delphin 5] des Instituts für Bauklimatik der TU Dresden verwendet. Die Grundlage zur Berechnung des thermisch-hygrischen Verhaltens der Bauteile liefert das implementierte Modell des gekoppelten Wärme- und Feuchtetransports in kapillarporösen Baustoffen. Die Auswahl der Baustoffdaten erfolgt aus der in Delphin 5 zur Verfügung gestellten Datenbank. Die für die Berechnung erforderlichen Außenklimarandbedingungen werden aus der Datenbank [Meteonom 2010] entnommen und fließen in Form von Stundenwerten in die Feuchtesimulation ein. Für die hygrische Betrachtung sind vor allem die Außentemperatur und -feuchte von Bedeutung. Um die Schadensfreiheit der Konstruktionen auch unter kritischen Randbedingungen zu überprüfen, wird bei den Berechnungen zusätzlich Schlagregen und optional Solar- und Himmelsgegenstrahlung berücksichtigt.

Das Innenklima entspricht den Ergebnissen der dynamischen Gebäudesimulation (Abschnitt 3) und wird in Delphin 5 in Form von Stundenwerten der Innentemperatur und -feuchte verwendet. Dabei beträgt die Raumtemperatur 20 bis 25 °C und die relative Luftfeuchte unter 70%.

5.3 Bewertungskriterien

Zur Beurteilung des gewählten Schichtenaufbaus und der Materialien hinsichtlich Dauerhaftigkeit und gesundheitlicher Unbedenklichkeit werden geeignete Kriterien benötigt. Ein standardisierter Satz von Kriterien hat sich auf diesem Gebiet noch nicht etabliert. Nach Auswertung der Literatur wurden folgende Kriterien ausgewählt:



Gesamtverhalten der Konstruktion

Weist die Konstruktion eine permanente jährliche Zunahme der Gesamtfuchtemasse über den Einschwingzeitraum hinaus auf, so wird sie als ungeeignet bewertet.

Kondensat

hygroskopische Materialien: keine Begrenzung der Kondensatmenge
nicht hygroskopische Materialien: Kondensat max. 150 g/m² Bauteilfläche

Gesundheitliche Unbedenklichkeit

Überprüfung des Schimmelrisikos anhand LIM. Besteht in Materialschichten innenseitig der luftdichten Ebene ein Schimmelrisiko, so wird die Konstruktion als ungeeignet bewertet.

Dauerhaftigkeit von Holz und Holzwerkstoffen

Der Feuchtegehalt 20 Masseprozent von Holzkonstruktionen und 15 Masseprozent von Holzwerkstoffen darf nicht überschritten werden.

Die in Abschnitt 4 vorgeschlagenen Konstruktionen für Außenwände und Dächer wurden anhand dieser Kriterien bewertet. Details und zahlreiche grafische Darstellungen der Temperatur- und Feuchteverläufe sind im ausführlichen Projektbericht zu finden.

In **01 - Jekaterinburg** herrschen lange und kalte Winter, die für Passivhäuser Dämmstärken von 500 mm auf Außenwänden und 800 mm im Dach erfordern. Die Wand und das Dach werden mit EPS- bzw. XPS-Dämmung untersucht.

Bei den Leichtbau- und Massivbauwänden treten keine kritischen Kondensatmengen auf. Die Wahl eines dampfdiffusionsoffenen Putzes bietet eine größere Sicherheit gegen unzulässiges Auffeuchten der Konstruktion und ist daher zu empfehlen.

Für das in Leichtbauweise auszuführende Dach lassen sich bei einer dampfdiffusionsoffenen und -dichten Dachhaut zufriedenstellende Ergebnisse erzielen. Vorzusehen ist hier allerdings eine raumseitige Dampfbremse, die einen s_d -Wert von 50 m aufweisen sollte.

In **02 - Tokio** herrschen im Winter, verglichen mit Deutschland, etwas mildere Außentemperaturen, aber geringere relative Feuchten. Die Sommer sind nicht bedeutend wärmer, aber sehr viel feuchter. Es besteht im Sommer ein deutlich höheres Dampfdruckgefälle von außen nach innen als in Mitteleuropa.

EPS-WDVS zeigen keine hohe Kondensatbelastung, weder bei Leichtbau- noch bei Massivbaukonstruktionen und dies unabhängig davon, ob der Außenputz dampf-



diffusionsoffen oder -dicht ist. Empfehlenswert ist zumindest bei der massiven Variante ein dampfdiffusionsoffener Putz, da sich hierdurch die Bauteilfeuchten etwas senken lassen.

Als Dachkonstruktion wird ein massives Wamdach und alternativ ein Umkehrdach mit XPS-Dämmung untersucht. Beide Varianten sind unkritisch und empfehlenswert.

In **03 - Shanghai** herrschen im Winter ähnliche Temperaturen wie in Deutschland, aber höhere Sommertemperaturen. Für ein komfortables Innenklima ist daher sowohl eine Beheizung im Winter als auch eine moderate Kühlung im Sommer erforderlich. Im Sommerhalbjahr entstehen außen hohe Dampfdrücke, die bei klimatisierten Innenräumen eine Umkehrung des Dampfdruckgefälles bewirken. Im Gegensatz zum mitteleuropäischen Klima ist das Gefälle im Sommer durch die Kühlung und Entfeuchtung im Gebäude sogar größer als im Winter, was für den Konstruktionsaufbau und die Wahl der dampfbremsenden Schichten von Bedeutung ist.

Die untersuchte Wandkonstruktion mit Mineralwolle-WDVS in Shanghai weist keine unzulässigen Kondensatmengen auf. Wichtig ist hierfür ein geeigneter Putz.

Sowohl das betrachtete massive Gründach, welches als Umkehrdach ausgeführt wird, als auch das Wamdach mit XPS-Dämmung können empfohlen werden.

04 - Las Vegas liegt in einer trocken-heißen Klimazone. Die Winter sind mild mit Werten, die nur sehr vereinzelt unter 0 °C sinken und durchschnittlich bei +10 °C liegen. Dabei herrschen relative Feuchten zwischen 40 und 50 %. Im Sommer liegen die Durchschnittstemperaturen über 30 °C bei etwa 20 % relativer Feuchte. Es besteht das ganze Jahr über ein ausgeprägtes Dampfdruckgefälle, das von innen nach außen gerichtet ist.

Aufgrund der ganzjährig sehr geringen Außen- und Innenluftfeuchte gibt es sowohl bei den Leichtbau- als auch bei den Massivbauwänden auch bei sehr dampfdiffusionsdichten Außenputzen keinerlei kritische Feuchten oder Kondensatmengen.

In **05 - Dubai** herrschen im Winter mit 15 bis 20 °C sehr milde Temperaturen, so dass eine Beheizung der Gebäude nicht erforderlich ist. Der Sommer ist mit im Mittel über 30 °C sehr heiß, was eine maschinelle Kühlung und Entfeuchtung zur Folge hat. Während das Dampfdruckgefälle im Winter nicht sehr ausgeprägt ist, liegt der Dampfdruck im Sommer innen deutlich unter dem der Außenluft.

Die Außentemperaturen steigen bis auf 30 bis 40 °C an, das stellt für sonnenbeschienene Fassaden eine hohe thermische Belastung dar. Es werden Oberflächentemperaturen von 50 °C an den Wänden erreicht.

Obwohl in Dubai deutlich höhere relative Außenluftfeuchten herrschen als in Las Vegas, erweisen sich auch hier alle untersuchten Aufbauten mit dampfdiffusionsdichtem Außenputz als unkritisch.



6 Auswertungen weltweiter Klimadaten

Es ist im Zusammenhang mit der vorliegenden Studie von Interesse, nicht nur die fünf Beispielstandorte, sondern sämtliche Klimata der Welt zu betrachten. Behandelt werden die Erzeugung von weltweiten Heiz- und Kühllastdaten, die Realisierbarkeit von Passivhäusern unter technischen und ökonomischen Gesichtspunkten sowie Ansätze für eine künftige, weltweit gültige Definition des Passivhauses.

Für die Untersuchungen wurden vom Passivhaus Institut aufbereitete Satellitendaten der NASA verwendet, die über das sogenannte EOSWEB-Interface ([NASA 2009c]) kostenlos erhältlich sind. Die freie Bereitstellung dieser Daten war eine wesentliche Grundlage für die in diesem Abschnitt vorgestellten Arbeiten.

Die Verwendbarkeit der Satellitendaten wurde im Rahmen des Projekts ausführlich geprüft. Insgesamt kann nach der vom PHI durchgeführten Anpassung und Aufbereitung die Übereinstimmung mit Daten aus anderen Quellen als zufriedenstellend bezeichnet werden. Die Datensätze konnten einerseits als stundenweise Klimadaten für die dynamische Gebäudesimulation verwendet werden, andererseits wurden daraus Datensätze für PHPP-Berechnungen erstellt.

6.1 Rechenverfahren für die Heiz- und Kühllast

Eine entscheidende Größe bei der Auslegung von Passivhäusern sind die zu erwartenden maximalen Leistungen für die Klimatisierung. Die hierfür üblichen Verfahren, in Deutschland etwa die EN 12831 oder die VDI 2078, sind für diese Anwendung ungeeignet, denn die damit berechneten Leistungen sind bedeutend zu hoch. Die gängigen Heizlastverfahren berücksichtigen die solaren und internen Wärmegewinne nicht in angemessener Weise, da in der Wärmebilanz konventioneller Gebäude die Wärmeverluste dominieren. Die Kühllastverfahren ermitteln Stundenwerte der Kühlleistung. Das ist für schlecht gedämmte, rasch reagierende Gebäude angemessen, für thermisch träge Passivhäuser mit minimierten Lasten ist dagegen die Verwendung von Tagesmittelwerten der Kühllast sinnvoll. In der Passivhausplanung werden daher andere Verfahren verwendet, die im Zuge des Forschungsprojekts einer Revision unterzogen wurden. Die technischen Details zur Ermittlung der Heiz- und Kühllastdaten enthält der ausführliche Projektbericht, die geprüften weltweiten Klimadaten sind für Abonnenten der Passipedia unter www.passipedia.org verfügbar.

Ein Vergleich mit Ergebnissen aus der dynamischen Gebäudesimulation zeigt zunächst, dass die Berechnung mit dem PHPP meist auf der sicheren Seite liegt. Die Qualität der Vorhersage hängt dabei deutlich vom Dämmniveau des Referenzgebäudes, d.h. vom Klima ab. Für Klimata, in denen eine Heizungsauslegung im Passivhaus überhaupt relevant ist, liefert das Verfahren in aller Regel verlässliche Werte.



Eine weitere Prüfung der ermittelten Heizlastdaten erfolgte durch Vergleich mit den im PHPP bereits seit längerer Zeit vorhandenen Datensätzen, die insbesondere für Deutschland und Österreich als bewährt betrachtet werden können (vgl. die experimentelle Überprüfung in [Feist 2005a]). Auch hier ergab sich grundsätzlich gute Übereinstimmung.

Die Kühllastdaten für das PHPP werden bisher auf Basis von Testreferenzjahren ermittelt, indem der höchste Tagesmittelwert kombiniert wird mit der jeweils höchsten Solarstrahlung auf die Horizontale und die Haupthimmelsrichtungen, die an den 30 wärmsten Tagen aufgetreten ist. Bei der Anwendung auf weltweite Klimata führte dieses Verfahren insbesondere in Äquatornähe auf eine erhebliche Überschätzung der tatsächlichen Kühllast. Die Außentemperaturen ändern sich hier im Jahresverlauf kaum, so dass die Kühllast potentiell bei beliebigem Sonnenstand, d.h. bei beliebiger Deklination, auftreten kann. Bei hoher Deklination, wenn die Sonne über den nördlicheren Breitenkreisen steht, erhält die Nordfassade direkte Solarstrahlung, die Südfassade dagegen nicht. Während der übrigen Monate ist es umgekehrt. Eine Kombination der größten Solarstrahlungen auf die Nord- und Südfassade würde folglich zu unrealistisch hohen Kühllasten führen. Daher wurden aus den EOSWEB-Datensätzen neue Kühllastdaten ermittelt, die je nach Deklination der Sonne zwei Perioden unterscheiden.

6.2 Passivhäuser weltweit

Die EOSWEB-Daten erlauben es, verschiedene Berechnungen auf Grundlage einer einheitlichen Datenbasis für die gesamte Erdoberfläche durchzuführen. Diese Möglichkeit wird nachfolgend genutzt, um zu untersuchen, wie funktionale Passivhäuser (d.h. solche, die mit einer Heiz- bzw. Kühlleistung von höchstens 10 W/m^2 komfortabel gehalten werden können) an verschiedenen Standorten gestaltet werden müssen. Die zugehörigen Nutzenergieverbräuche werden ermittelt, und es wird festgestellt, in welchen Klimata der Welt überhaupt aktiv geheizt bzw. gekühlt werden muss. Diese Untersuchungen werden mittels dynamischer Gebäudesimulation mit DYNBIL durchgeführt.

Anschließend werden ökonomische Betrachtungen zu optimalen Dämmstandards für die Außenbauteile angestellt. Die Heiz- und Kühllasten und die Energiebedarfswerte von Gebäuden mit diesen kostenoptimalen Komponenten werden, basierend auf Berechnungen mit dem PHPP, näher untersucht. Vielerorts wird sich zeigen, dass die kostenoptimalen Häuser sich nicht erkennbar von den funktionalen Passivhäusern unterscheiden. Die Ergebnisse dieses Abschnitts bilden die Grundlage für die Überlegungen zur Passivhaus-Definition in Abschnitt 6.3.

Will man die nachfolgend in Form von Weltkarten dargestellten Ergebnisse auf einzelne Standorte beziehen, so ist die mäßige räumliche Auflösung der Daten zu beachten. In exponierten Tal- oder Berglagen sowie an der Küste können Klima-



bedingungen herrschen, die sich stark von den mittleren in der zugehörigen Gitternetzzone unterscheiden. Dies macht sich vor allem in Bergregionen bemerkbar. Dort erfolgt die Besiedlung oft fast ausschließlich in den Tälern, also deutlich unter der mittleren Höhe der zugehörigen Gitternetzzone und in völlig anderem Mikroklima. Insofern können aus den Abbildungen nur begrenzt Aussagen z.B. über einzelne Städte hergeleitet werden.

6.2.1 Funktionale Passivhäuser

Für jeden der 18656 Standorte in den Satellitendaten wurde ein funktionales Muster-Passivhaus entwickelt, d.h. ein Gebäude, das sich über die Zuluft beheizen und kühlen lässt. Die so in einem standardisierten Verfahren entwickelten Muster-Passivhäuser, die sich im wesentlichen durch einen Gesamt-Wärmeschutz-Standard unterscheiden, werden sicherlich nicht im Detail für den jeweiligen Standort optimiert sein. Neben dem Wärmeschutz gibt es weitere Einflüsse auf den Energiebedarf, etwa Kompaktheit, Orientierung oder Fensterflächenanteil, durch deren geschickte Wahl der Planer beispielsweise die Kosten eines energieeffizienten Gebäudes in weitem Rahmen beeinflussen kann.

Je nach Standort können passiv-solare Techniken, d.h. vergrößerte Fensterflächen in Richtung zum Äquator und ausreichende thermische Speichermasse, attraktiv werden. Interessant ist das beispielsweise in weiten Teilen des nordamerikanischen Kontinents. Besonders die Höhenlagen der Gebirge zeichnen sich durch eine größere Bedeutung passiv-solarer Techniken aus. Das liegt einerseits an den dort klareren Luftzuständen mit höheren Solarangeboten, vor allem aber an den verlängerten Heizperioden, weil es in den Höhenlagen kälter ist. Insbesondere zu den Rändern der verlängerten Heizperioden werden die solaren Angebote höher – diese kommen jetzt als potentiell nutzbare Angebote dazu.

Die Optimierung eines Entwurfs für den jeweiligen Standort erfolgt am besten anhand des konkreten Objekts mit Energiebilanzverfahren wie dem PHPP, ggf. auch mit aufwendigeren dynamischen Simulationen. Unabhängig von solchen Überlegungen eignet sich die hier verwendete Methode der Anpassung des Dämmstandards gut dafür, einige wichtige Aspekte im weltweiten Vergleich zu illustrieren. Die Berechnungen, die den Ergebnissen in diesem Abschnitt zu Grunde liegen, wurden mittels hygrothermischer dynamischer Gebäudesimulation auf Stundenbasis mit DYNBIL durchgeführt.

Es zeigte sich, dass funktionale Passivhäuser mit heute verfügbarer Technik fast überall auf der Welt gebaut werden können. Lediglich in den extrem kalten Regionen in Sibirien, Grönland und im Norden Kanadas werden Komponenten und Bauteilqualitäten benötigt, die zumindest teilweise noch nicht marktverfügbar bzw. schwer baupraktisch in der gebotenen Qualität umzusetzen sind. In diesen Klimata können Passivhäuser zur Zeit nur eingeschränkt realisiert werden, wenn beispielsweise eine ge-



wisse Größe und Kompaktheit gegeben ist, und in jedem Falle nur mit hohem baulichem Aufwand.

Der Heizwärmebedarf der jeweiligen Muster-Passivhäuser ist in Abbildung 34 dargestellt. Abhängig primär von der geografischen Breite sind deutliche Unterschiede im jährlichen Energiebedarf zu erkennen, obwohl alle Häuser etwa dieselbe Heizlast haben. In den äquatornahen Regionen, mit geringen jahreszeitlichen Schwankungen der Umgebungsbedingungen, ergeben sich relativ hohe Werte. Hier würde man jedoch ohnehin einen deutlich verbesserten Wärmeschutz realisieren, um den Kühlenergiebedarf zu reduzieren, wodurch auch der Heizwärmebedarf Null wird. Die Ergebnisse sind somit für diese Region als praktisch irrelevant zu betrachten.

Außerhalb der Wendekreise ist ein systematischer Anstieg der Heizwärmebedarfswerte zu den Polen hin festzustellen. Die Unstetigkeiten im Verlauf des Heizwärmebedarfs, die besonders in Kanada und Russland zu erkennen sind, resultieren aus den Anpassungen des Dämmstandards in diskreten Schritten. Besonders hohe Werte treten auch in Teilen der Anden auf, wo die Temperaturen niedrig genug sind, dass geheizt werden muss, aber kaum jahreszeitliche Schwankungen stattfinden.

Als besonders anspruchsvoll bezogen auf den Kühlfall erweist sich ein Streifen entlang der südlichen Sahara durch die arabische Halbinsel bis nach Pakistan, ferner das Zentrum Australiens. Ähnlich wie in den sehr kalten Regionen sind auch die sehr heißen nur von wenigen Menschen bewohnt, für den Klimaschutz sind Gebäudeenergieverbräuche in diesen Regionen praktisch unbedeutend.

Sind für den Sommer keine zusätzlichen baulichen Anstrengungen erforderlich, bedeutet das keineswegs, dass keine aktive Kühlung benötigt wird. Die Südstaaten der USA und der Südosten Chinas beweisen das Gegenteil, wie ein Vergleich mit Abbildung 35 zeigt. Dort ist der sensible Nutzkältebedarf der funktionalen Passivhäuser dargestellt.

Auch hier gibt es eine deutliche Abhängigkeit von der geografischen Breite, zum Äquator hin nimmt der Nutzkältebedarf zu. Er erreicht maximal $73 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$, in 1 % aller Gitternetzstellen weltweit werden mehr als $63 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$ benötigt. Die sehr hohen Kühlbedarfswerte sind auf das ausgeglichene Klima in Äquatornähe zurückzuführen, in dem sich geringe Kühllasten bereits mit mäßigem Aufwand erreichen lassen, diese Lasten aber fast ganzjährig anstehen. Das Bild wandelt sich ein wenig, wenn man überall einen Mindestwärmeschutz verlangt, d.h. U-Werte um $0,2 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$, wie man sie etwa in Südeuropa für den Winterfall benötigen würde, eine Zweifach-Wärmeschutzverglasung mit reduziertem Energiedurchlass, helle Farben der Außenoberflächen und eine Lüftungs-Wärmerückgewinnung. Deutlich sichtbare Einsparungen ergeben sich aus dieser Anforderung z.B. in Indonesien und an den äquatornahen Küsten, also in relativ dicht besiedelten Gebieten. Der maximale Nutzkältebedarf beträgt in diesem Fall noch $57 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$, nur 1 % aller Standorte welt-

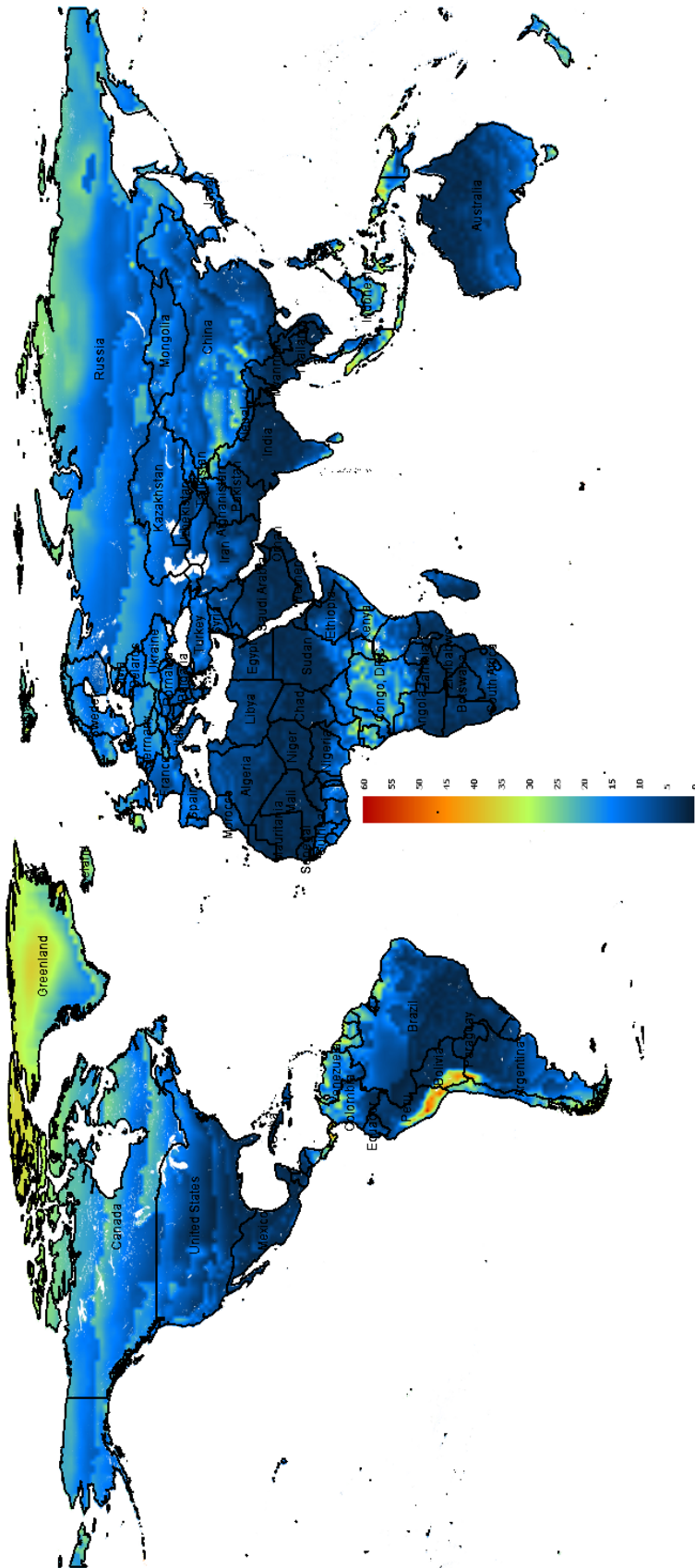


weit benötigt nun noch mehr als 45 kWh/(m²a). Technisch wären an vielen Standorten offensichtlich noch weitere Verbesserungen möglich.

Zusätzlich zur sensiblen Kühlung wird insbesondere in den Tropen und an den Küsten Energie für die Entfeuchtung benötigt. Diese Energiemengen sind bei geeigneter Gebäudekonstruktion meist deutlich geringer als die für die sensible Kühlung benötigten, wie aus Abbildung 37 hervorgeht. Dort wurde neben der passivhausüblich sehr gut luftdichten Gebäudehülle eine Feuchterückgewinnung mit einem Feuchteverhältnis von 60 % angesetzt, sofern dies im Jahresmittel zu einer Energieeinsparung führt. Letzteres ist gewöhnlich überall dort der Fall, wo ein nennenswerter Entfeuchtungsbedarf entsteht. Lüftungsgeräte, die noch höhere Anteile der Feuchte zurückgewinnen können, sind grundsätzlich verfügbar.

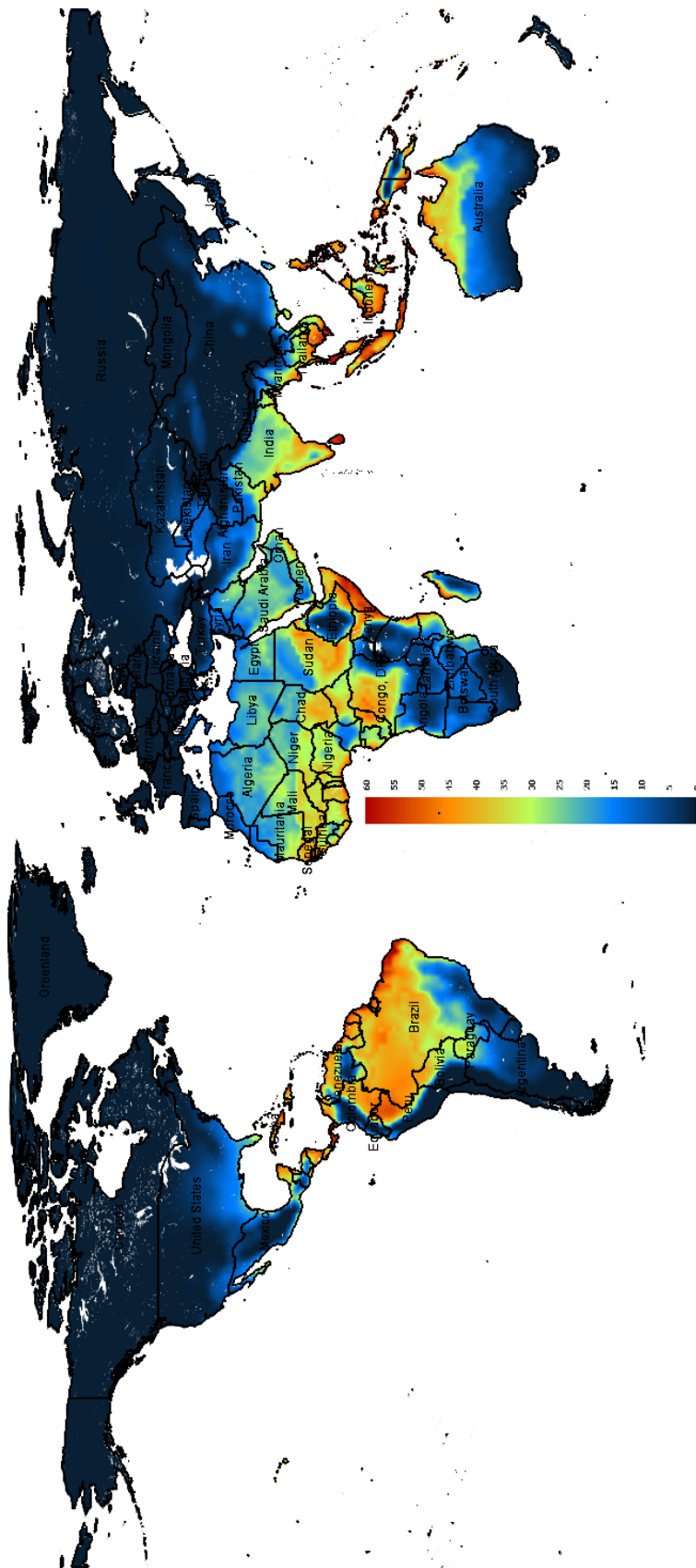
Es lässt sich festhalten, dass in sehr weiten Teilen der Erde gut gedämmt werden muss, um ein Passivhaus zu realisieren, in den dichter besiedelten Regionen jedoch meist etwas weniger als in Mitteleuropa. Beinahe ohne Dämmung lässt sich eine geringe Heiz- bzw. Kühllast in Hochlagen nahe des Äquators erreichen, wo die Jahresmitteltemperatur mild und die jahreszeitlichen Temperaturschwankungen gering sind. Das ist der Fall z.B. rund um den Viktoriasee, in geeigneten Höhenlagen der Anden, im Hochland von Äthiopien und Mexiko und in den Bergen von Neuguinea. Daraus folgt aber keineswegs, dass der Verzicht auf baulichen Wärmeschutz in all diesen Regionen empfehlenswert wäre (s. auch dazu die ökonomischen Untersuchungen in Abschnitt 6.2.2).

Separat untersucht wurde die Frage, an welchen Orten der Erde man in einem Passivhaus noch ohne aktive Kühlung auskommen kann. Interessanterweise lässt sich diese Frage meist recht eindeutig und unabhängig von der genauen Wahl des Kriteriums beantworten. Gekühlt werden muss definitiv in fast ganz Afrika, in Asien südlich des Himalaya, in Mittel- und Südamerika mit Ausnahme von Chile und der Region südlich von Uruguay, im Süden der USA und dem größten Teil von Australien.



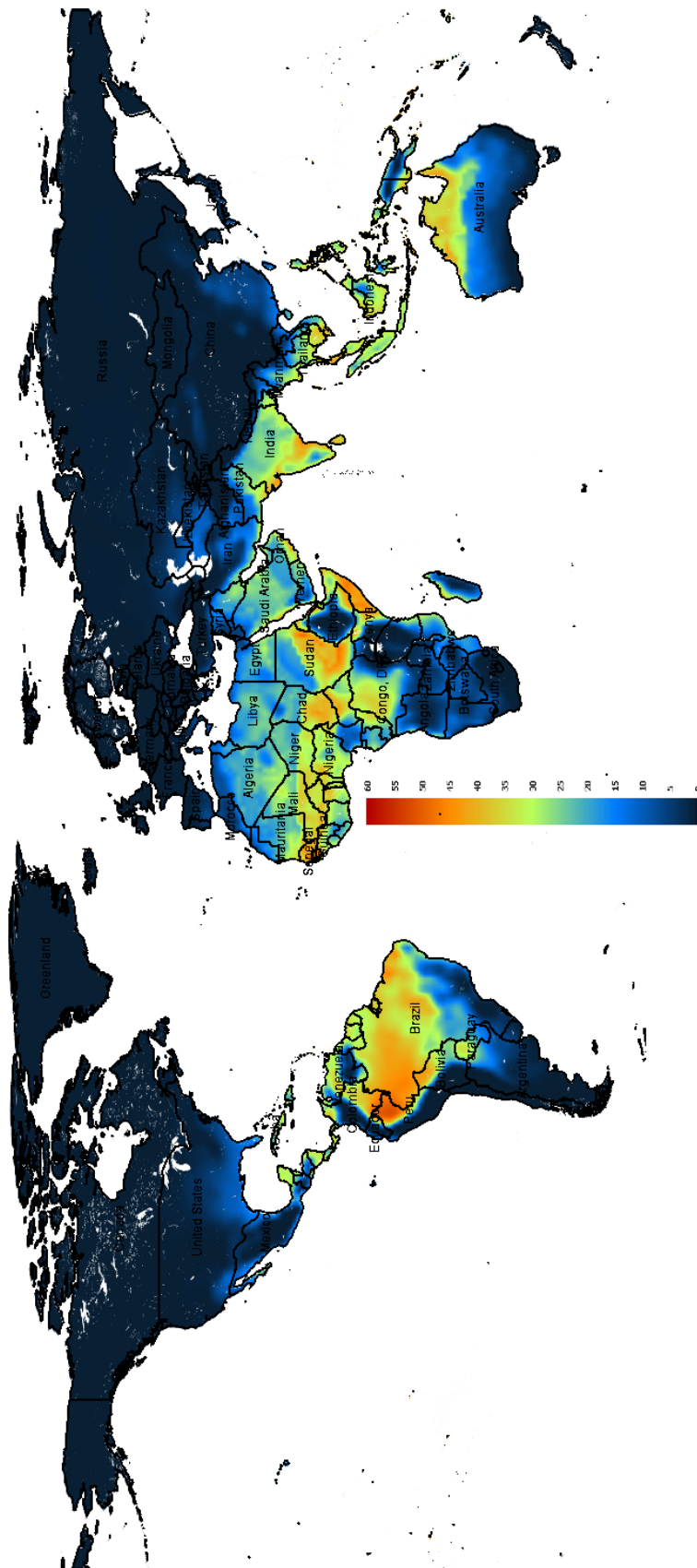
© Passivhaus Institut

Abbildung 34: Heizwärmebedarf funktionaler Passivhäuser



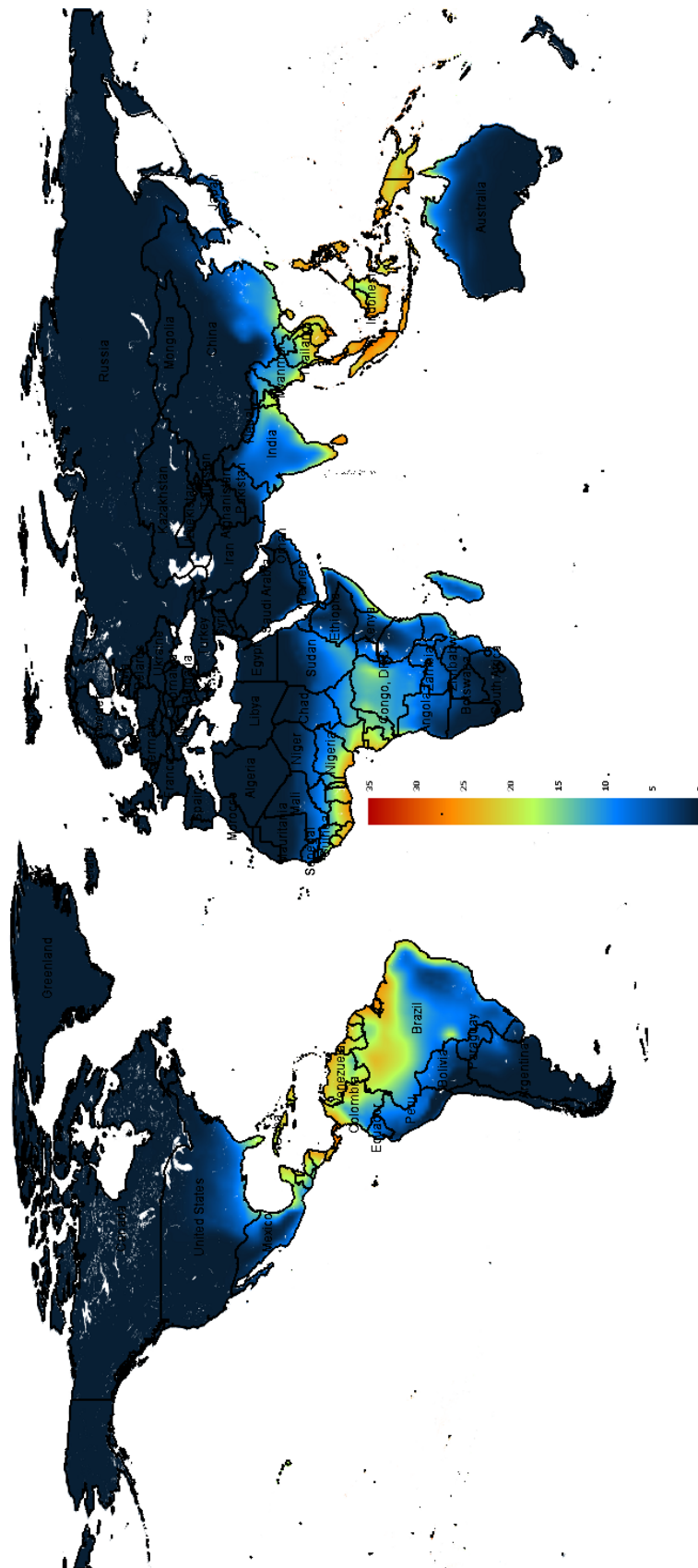
© Passivhaus Institut

Abbildung 35: Sensibler Nutzkältebedarf funktionaler Passivhäuser



© Passivhaus Institut

Abbildung 36: Wie Abbildung 35, jedoch mit Mindestwärmeschutz für warme Klimata



© Passivhaus Institut

Abbildung 37: Entfeuchtungsbedarf funktionaler Passivhäuser, gerechnet mit 60 % Feuchterückgewinnung überall dort, wo dies zu Energieeinsparung führt



6.2.2 Kostenoptimierte Häuser

Die Frage, was weltweit unter einem Passivhaus zu verstehen ist, kann wie in Abschnitt 6.2.1 aufgrund der Heiz- bzw. Kühllast angegangen werden. Einen alternativen Blickwinkel erlaubt eine ökonomische Betrachtung einzelner Bauteile oder des gesamten Gebäudes, denn eine weite Verbreitung von Passivhäusern ist nur zu erwarten, wenn sie einzel- oder zumindest volkswirtschaftlich ökonomisch darstellbar sind. Ebendies ist in Mitteleuropa der Fall, wie zahlreiche Untersuchungen nachgewiesen haben, und war eine der Voraussetzungen für die weite Verbreitung des Passivhausstandards.

In diesem Abschnitt sollen nun Gebäude bezüglich ihres Energiebedarfs für die Klimatisierung unter ökonomischen Gesichtspunkten optimiert werden. Das angemessene Verfahren hierfür ist die sogenannte Kapitalwertmethode. Da die Kosten von Bauprodukten, Arbeit und Energie sich weltweit stark unterscheiden, können solche Betrachtungen nur orientierenden Charakter haben.

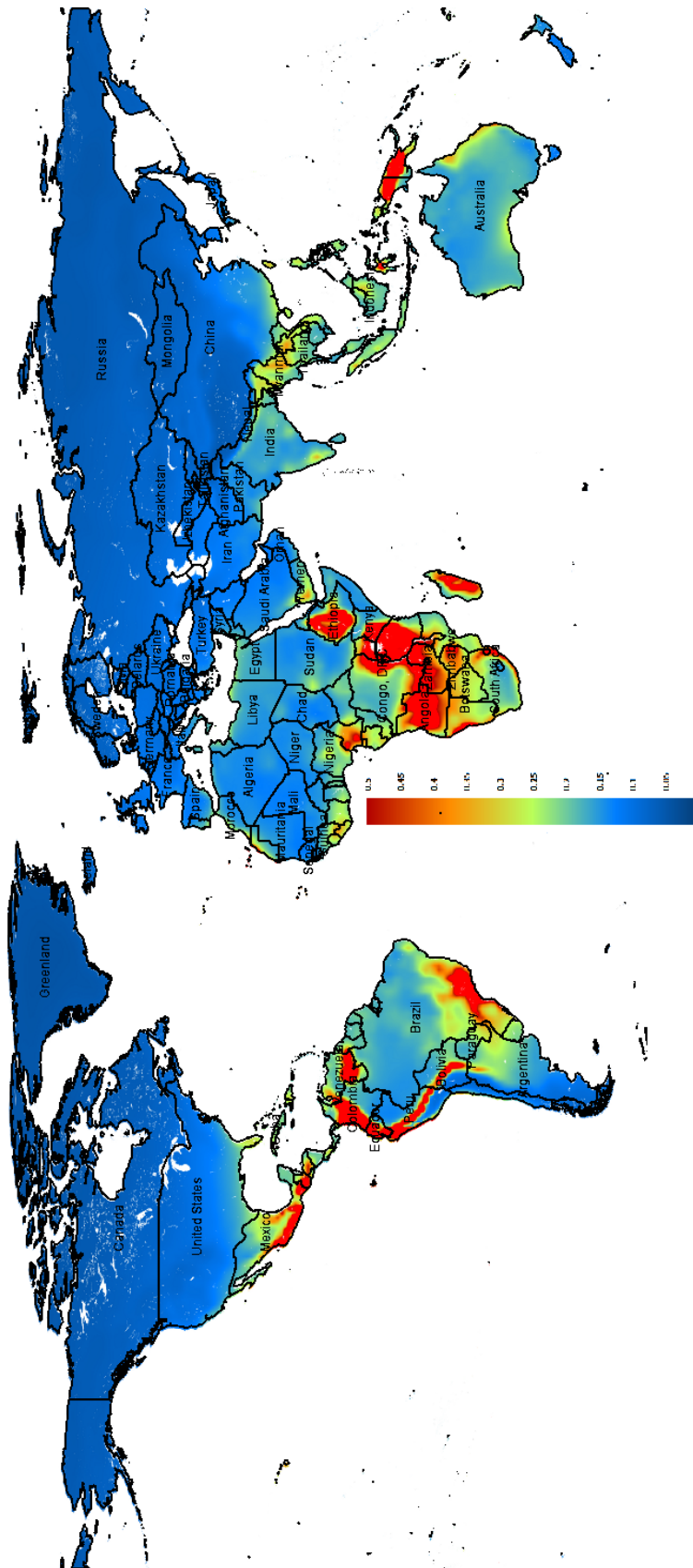
Die gewählten Kosten orientieren sich an der Einschätzung der Autoren bezüglich mittlerer Preise über den Betrachtungszeitraum. Skaleneffekte durch hohe Stückzahlen auch für bisher noch exotische Produkte sind bereits eingepreist.

Die verwendeten Randbedingungen und Details zum Rechengang sind im ausführlichen Projektbericht zu finden.

Mit Hilfe der Kapitalwertmethode lässt sich nun unter den gegebenen Randbedingungen ein optimaler U-Wert ermitteln. Die Ergebnisse sind in Abbildung 38 dargestellt.

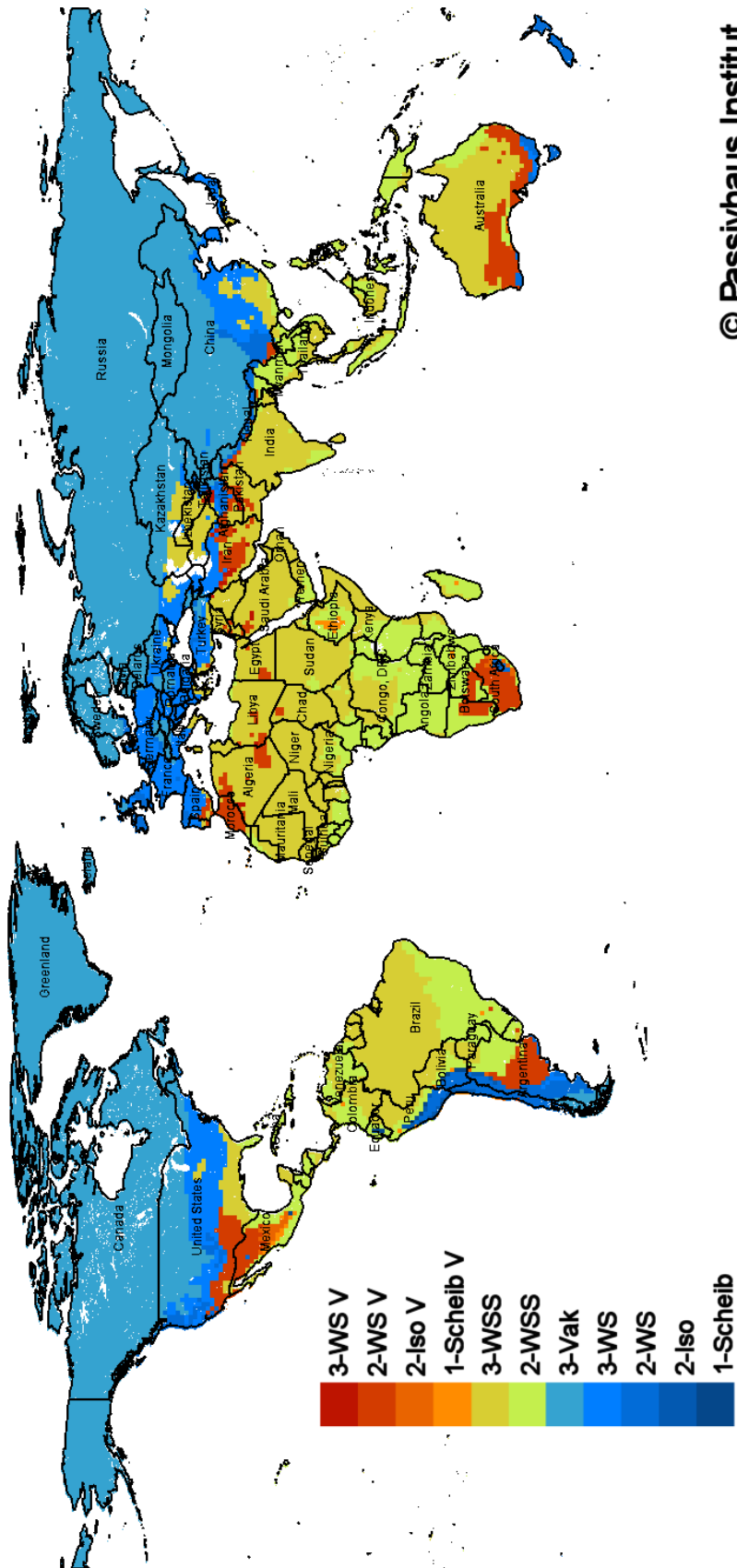
Interessanterweise sind U-Werte oberhalb von $0,5 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ nur in Ausnahmefällen ökonomisch sinnvoll. Typisch sowohl für die Tropen (mit oft ganzjährigen Kühlperioden) als auch für mittlere Breiten (mit kürzeren Heizperioden, aber größeren mittleren Temperaturdifferenzen) sind Optima zwischen $0,1$ und $0,3 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$.

Die optimalen Verglasungen zeigt Abbildung 39. Hier fallen zunächst die großen Flächen im Norden Amerikas und Asiens auf, in denen die bisher noch nicht erhältliche Dreifach-Vakuumverglasung ein ökonomisches Optimum darstellt. Diese Tatsache ist den langen Heizperioden und großen Temperaturdifferenzen in diesen Regionen geschuldet. Bis derartige Gläser tatsächlich zu den hier angesetzten Preisen marktfähig sind, werden noch viele Jahre vergehen. Aktuell steht die Dreifach-Vakuumverglasung deswegen hier nur prototypisch für gegenüber dem Dreifach-Wärmeschutzglas nochmals themisch deutlich verbesserte Gläser.



© Passivhaus Institut

Abbildung 38: Kostenoptimaler U-Wert v von Außenbauteilen für Heizung und Kühlung



© Passivhaus Institut

Abbildung 39: Kostenoptimale Verglasungen unter Berücksichtigung v on Heizung und Kühlung. Kürzel mit nachgestelltem V bedeuten bewegliche Außenverschattung, nachgestelltes S bedeutet Sonnenschutzglas.



In heißen Regionen erweisen sich Zwei- oder Dreifach-Sonnenschutzgläser als optimal. Eine bewegliche Verschattung in Verbindung mit Klarglas lohnt sich aufgrund der hohen Kosten nur in Regionen, in denen Heiz- und Kühlgradstunden hohe Werte annehmen, d.h. an bestimmten Standorten um 35° nördlicher oder südlicher Breite.

Die auf diese Weise kostenoptimierten Außenbauteile wurden nun in einer PHPP-Berechnung für ein Beispielgebäude eingesetzt und auf diese Weise der jährliche Energiebedarf ermittelt.

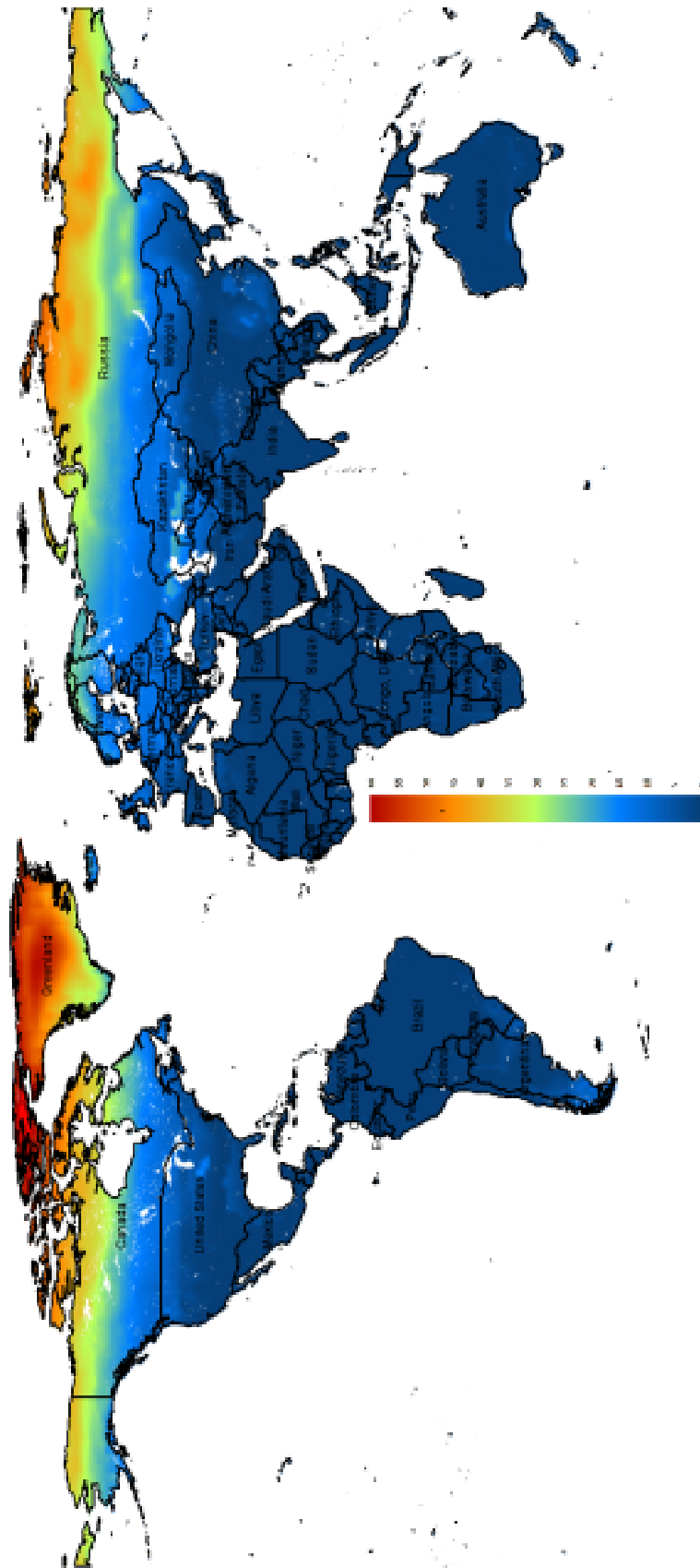
Abbildung 40 zeigt den Heizwärmebedarf der kostenoptimierten Häuser. In mittleren Breiten bis etwa 60° N entspricht der Heizwärmebedarf der funktionalen Passivhäuser ungefähr dem der kostenoptimierten Häuser, d.h. hier stellt das funktionale Passivhaus auch ein ökonomisches Optimum dar. Nur in den extremen Klimata jenseits von 60 bis 65° N, die nur sehr dünn besiedelt sind, liegt das funktionale Passivhaus nicht mehr im wirtschaftlich optimalen Bereich.

Die Heizlasten erfüllen in den mittleren Breiten, praktisch in den gesamten dichter besiedelten Teilen der Welt, die klassische Passivhaus-Bedingung (Heizlast unter 10 W/m²), Wohngebäude in diesen Gebieten sind somit allein über eine Erwärmung der Zuluft auf maximal 50 °C beheizbar. Das erlaubt auch für diese Gebiete äußerst kostengünstige Lösungen für die Gebäudeheizung. Nur in Sibirien, Grönland und im Norden Kanadas sind die Heizlasten der kostenoptimierten Häuser bedeutend größer.

Der Nutzkältebedarf der kostenoptimierten Häuser ist in Abbildung 41 dargestellt. Die höchsten auftretenden Werte (im Süden der Sahara) betragen bis 60 kWh/(m²a). Diese Werte sind teilweise höher als die für die funktionalen Passivhäuser berechneten. Die typischen Kühllasten in den relevanten Kühlregionen liegen im Bereich von 10 W/m².

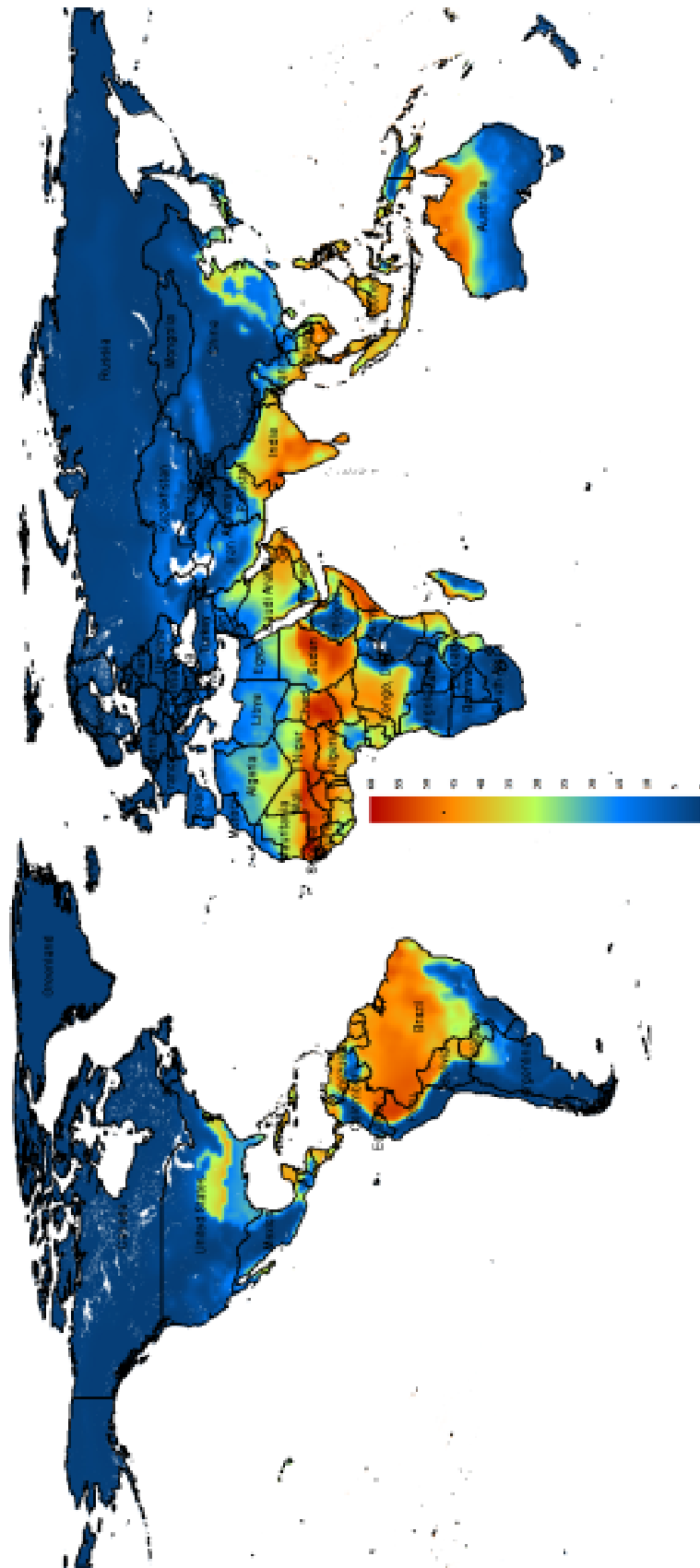
Entfeuchtung in bedeutendem Umfang ist in einem breiten Gürtel um den Äquator und rund um den Golf von Mexiko erforderlich. Der Energiebedarf hierfür liegt (durch den Einsatz der Feuchterückgewinnung) nur an wenigen Stellen der Erde über 25 kWh/(m²a), hohe Werte gibt es insbesondere in der Nähe von Küsten mit warmen Meeresströmungen. Die Regionen mit Entfeuchtungsbedarf ziehen sich an den Küsten entlang weiter in Polrichtung, so gibt es beispielsweise auch im Mittelmeerraum Regionen, in denen in vergleichsweise geringem Umfang entfeuchtet werden muss (in der Auflösung von Abbildung 42 nicht erkennbar).

Werden auch die übrigen wohnungsbezogenen Energieanwendungen ökonomisch optimiert, eine thermische Solaranlage und eine Wärmepumpe mit einem eher geringen COP von 2,5 (inklusive Pumpen, Ventilatoren etc.) installiert, so sind Primärenergiekennwerte unter 120 kWh/(m²a) für alle Aufwendungen des Wohnens mit höchstem Komfort weltweit realisierbar – auf Basis der Passivhaus-Technologie.



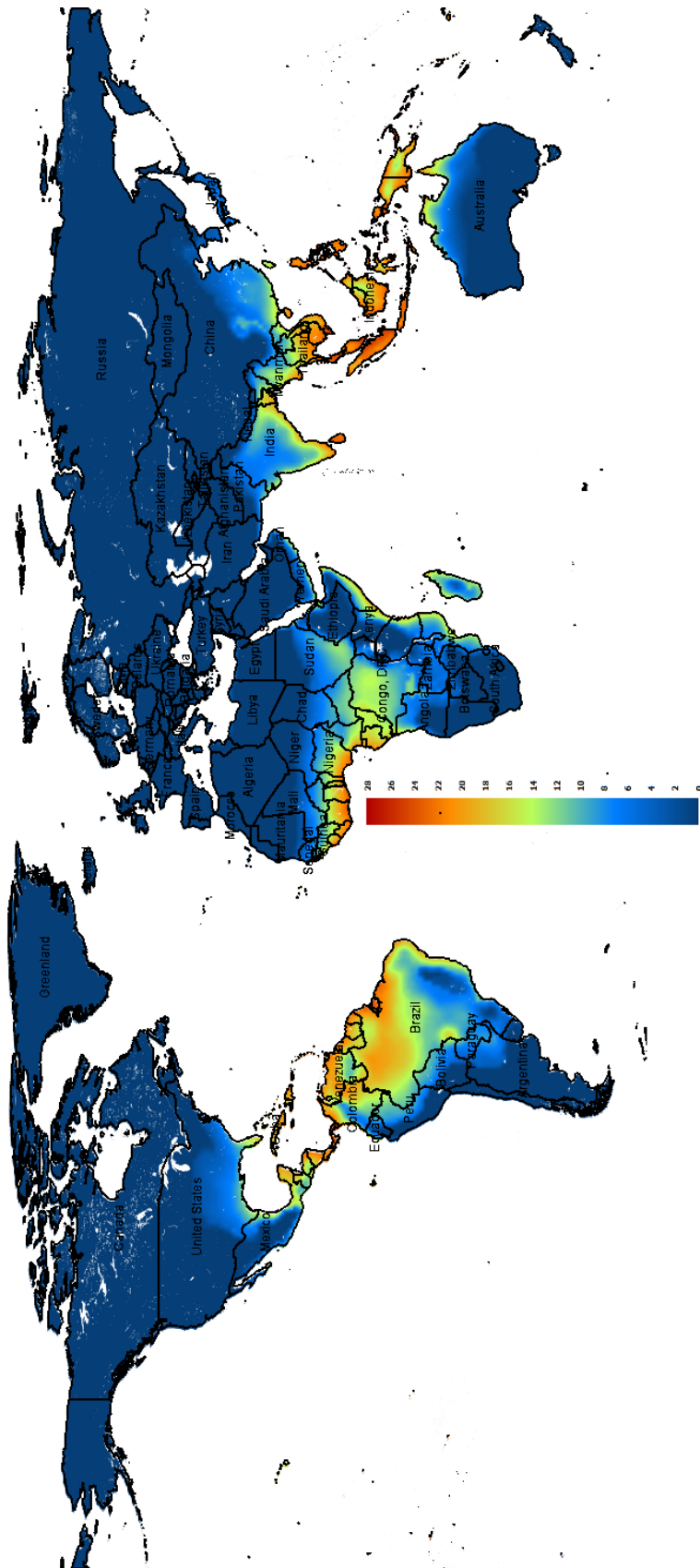
© Passivhaus Institut

Abbildung 40: Heizwärmebedarf der kostenoptimierten Häuser in kWh/(m²a)



© Passivhaus Institut

Abbildung 41: Sensibler Nutzkältebedarf der kostenoptimierten Häuser in kWh/(m²a)



© Passivhaus Institut

Abbildung 42: Entfeuchtungsbedarf der kostenoptimierten Häuser in kWh/(m²a)



6.3 Passivhaus-Definition

Das Passivhaus ist in erster Linie funktional definiert:

„Ein Passivhaus ist ein Gebäude, in welchem die thermische Behaglichkeit [ISO 7730] allein durch Nachheizen oder Nachkühlen des Frischluftvolumenstroms, der für ausreichende Luftqualität erforderlich ist, gewährleistet werden kann - ohne dazu zusätzlich Umluft zu verwenden.“ [Feist 2007]

In Bezug auf die Heizung und in weiten Regionen auch in Bezug auf die Kühlung führt dies zu einem ökonomischen Optimum der Lebenszykluskosten, weil bedeutende Einsparungen aufgrund der Entbehrlichkeit zusätzlicher Systeme erzielt werden können.

Die Kriterien für ein Passivhaus lauteten bis 2011 wie folgt:

Jahresheizwärmebedarf Q_H :

$$Q_H \leq 15 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a}),$$

alternativ maximale Heizlast P_H anstelle des Heizwärmebedarfs:

$$P_H \leq 10 \text{ W}/\text{m}^2.$$

Luftwechsel, bezogen auf das Volumen der zugänglichen Räume, bei einer Druckdifferenz von 50 Pa:

$$n_{50} \leq 0,6 \text{ h}^{-1}.$$

Primärenergiebedarf W_p aller Energieumsätze im Gebäude einschließlich Hilfsstrom, Warmwasserbereitung und vor allem auch Haushaltsstrom:

$$W_p \leq 120 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a}).$$

Sensibler Nutzkältebedarf Q_K :

$$Q_K \leq 15 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a}).$$

Die tatsächliche Beheizbarkeit über die Zuluft im konkreten Projekt wird nicht gefordert, um Fehloptimierungen im Einzelfall durch unnötig hohe Luftmengen bzw. schlechte oder sogar fehlende Wärmerückgewinnung vorzubeugen.

Im Rahmen der vorliegenden Studie wurden die Kriterien auf Grundlage der durchgeführten Simulationsrechnungen und ökonomischen Untersuchungen überarbeitet.



6.3.1 Heizung und Heizlast

Das funktionale Kriterium wird beibehalten, ebenso die Heizwärmebedarfsgrenze von 15 kWh/(m²a) als alternatives Nachweiskriterium. Zwar kann der Heizwärmebedarf für die funktionalen Passivhäuser weltweit zwischen 0 und 50 kWh/(m²a) schwanken, an den meisten Standorten bleibt er jedoch unter 35 kWh/(m²a). Es konnte zwar eine gewisse Korrelation des Jahresheizwärmebedarfs mit der geografischen Breite bzw. der Jahresmitteltemperatur identifiziert werden, der Heizwärmebedarf des funktionalen Passivhauses schwankt jedoch, auch unter Vernachlässigung einiger Ausreißer, für identische Jahresmitteltemperaturen in einer typischen Bandbreite von etwa 15 kWh/(m²a). Die vorhandene Korrelation reicht also letztlich nicht aus, zusätzlich zur funktionalen Definition ein alternatives Passivhauskriterium, basierend auf dem Heizwärmebedarf allein, einzuführen.

6.3.2 Kühlung und Kühllast

Analog zum Heizfall wurde auch für den Sommer untersucht, wie die maximale tagesmittlere Leistung ("Kühllast") und der jährliche sensible Nutzenergiebedarf für die Raumkühlung ("Nutzkältebedarf") zusammenhängen.

Auch hier versuchen wir wieder, eine Korrelation des Verhältnisses von Nutzkältebedarf und Kühllast mit klimatischen Grundgrößen zu bestimmen. Das ist schwieriger als im Winterfall, denn der Nutzkältebedarf hängt davon ab, ob die Temperaturen nur kurz oder – im Extremfall – das ganze Jahr so hoch sind, dass gekühlt werden muss. Entsprechend findet man bei gleicher Kühllast Nutzkältebedarfswerte zwischen nahe Null und bis über 70 kWh/(m²a) (sic!). Die sehr hohen Werte treten an den tropischen Küsten auf, wo ganzjährig, aber gleichmäßig Temperaturen herrschen, die eine aktive Kühlung erforderlich machen.

In den Fällen mit extrem hohem Energiebedarf kann im Grunde nicht von einem Passivhaus gesprochen werden, auch wenn das Kühllastkriterium formal erfüllt ist. Zumindest stellenweise ist trotz kleiner Kühllast der Nutzkältebedarf deshalb so unangemessen hoch, weil das Klima derart gleichmäßig und mild ist, dass auch ein ungedämmtes Haus bereits eine ausreichend geringe Kühllast besitzt, diese Kühllast dann aber nahezu das ganze Jahr über ansteht. Solche Gebäude müsste man nicht nur ganz anders planen – die Betrachtung tagesmittlerer Kühllasten ist hier sicher nicht mehr ausreichend –, sie sind vor allem auch unwirtschaftlich, wie Abbildung 38 und Abbildung 39 zeigen. Für eine energieeffiziente und zukunftsfähige Baukonzeption in diesen Regionen wird daher für den Nutzkältebedarf ein gewisser Mindest-Effizienzstandard verlangt.

Auch für den Nutzkältebedarf ist eine deutliche Abhängigkeit vom Standort vorhanden. Um diese abzubilden, wurde auf eine zweidimensionale Regression zurückgegriffen. Als geeignete Regressionsgröße erwiesen sich neben dem Jahresmittel der



Außentemperatur die neu eingeführten Trockengradstunden. Darunter ist das Zeitintegral der Differenz von Taupunkttemperatur und einer Bezugstemperatur, in diesem Falle 13 °C, über alle Zeiträume, in denen diese Differenz positiv ist, zu verstehen:

$$TGH = \int_{T_{\text{Tau}} > 13^{\circ}\text{C}} (T_{\text{Tau}} - 13^{\circ}\text{C}) dt$$

Auch für die Entfeuchtung ließ sich in analoger Weise eine Anforderung an ein energieeffizientes Gebäude definieren.

Das Primärenergiekriterium kann an sämtlichen Standorten weltweit eingehalten werden und bleibt daher vorläufig bestehen. Es soll in naher Zukunft in Richtung Nachhaltigkeit weiterentwickelt werden, siehe hierzu [Feist 2012].

Nachfolgend ist der aus den durchgeführten Untersuchungen resultierende Vorschlag für vorläufige Passivhaus-Kriterien in beliebigen Klimata zusammengefasst.



Vorläufige Kriterien für Passivhäuser in verschiedenen Klimazonen

1. Heizung: Es ist mindestens eine der folgenden Anforderungen zu erfüllen:

- a) Die maximale tagesmittlere Heizlast beträgt 10 W/m².
- b) Der Heizwärmebedarf ist kleiner als 15 kWh/(m²a).

2. Kühlung: Die in 2.1 und 2.2 genannten Anforderungen müssen lediglich in der Summe erfüllt werden.

2.1. Sensible Kühlung¹⁾: Es ist mindestens eine der folgenden Anforderungen zu erfüllen:

- a) Der sensible Nutzkältebedarf ist kleiner als 15 kWh/(m²a).
- b) Die maximale tagesmittlere, sensible Kühllast beträgt 10 W/m², und der sensible Nutzkältebedarf ist kleiner als

$$Q_k = 4 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{aK}) T_a + 0,3 \text{ W}/(\text{m}^2\text{aK}) \text{ TGH} - 75 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a}),$$

wobei T_a die jahresmittlere Außentemperatur und TGH die Trockengradstunden für einen Taupunkt von 13 °C am jeweiligen Standort darstellt. Keinesfalls darf der sensible Nutzkältebedarf jedoch 45 kWh/(m²a) übersteigen.

2.2. Entfeuchtung: Der Nutzenergiebedarf für die Entfeuchtung beträgt höchstens

$$Q_T = 0,3 \text{ W}/(\text{m}^2\text{aK}) \text{ TGH},$$

wobei TGH die Trockengradstunden für einen Taupunkt von 13 °C am jeweiligen Standort darstellt.

3. Luftdichtheit: Der Drucktestluftwechsel bei 50 Pa Druckdifferenz darf 0,6 h⁻¹ nicht übersteigen.

4. Primärenergiebedarf¹⁾: Der Primärenergiebedarf darf 120 kWh/(m²a) nicht übersteigen.

Diese Kriterien wurden auf Grundlage der oben dokumentierten Untersuchungen hergeleitet. Sie müssen in Zukunft anhand konkreter Bauprojekte ausführlich in der Praxis erprobt und weiter konkretisiert werden, bevor eine erweiterte Definition des Passivhausstandards gültig werden kann.

¹⁾ Bei diesen Kriterien sind in Zukunft mit zunehmendem Kenntnisstand noch Veränderungen zu erwarten.



7 Literatur

- [AKKP 1996-2012] Arbeitskreis kostengünstige Passivhäuser, Protokollbände. Passivhaus Institut, Darmstadt, 1996-2012
- [AK 35] Feist, Wolfgang (Hrsg.): Arbeitskreis kostengünstige Passivhäuser, Protokollband Nr. 35, Wärmebrücken und Tragwerksplanung – die Grenzen des wärmebrückenfreien Konstruierens. Darmstadt, Passivhaus Institut, 2007
- [AMeDAS 2005] Architectural Institute of Japan: Expanded AMeDAS Weather Data
- [ASHRAE 160] ASHRAE Standard 160P, Design Criteria for Moisture-Control Design Analysis in Buildings, 2008.
- [Baechler 2004] Baechler, Micheal C., Pat M. Love, et al: Building America Best Practices Series: Volume 1, Builders and Buyers Handbook for Improving New Home Efficiency, Comfort, and Durability in the Hot and Humid Climate. U.S. Department of Energy, Energy Efficiency and Renewable Energy, November 2004.
- [Baechler 2006] Baechler, Micheal C., Pat M. Love, et al: Building America Best Practices Series: Volume 4, Builders and Buyers Handbook for Improving New Home Efficiency, Comfort, and Durability in the Mixed-Humid Climate. U.S. Department of Energy, Energy Efficiency and Renewable Energy, September 2006.
- [Bisanz 1999] Bisanz, Carsten: Heizlastauslegung im Niedrigenergie- und Passivhaus. Fachinformation PHI-1999/2, Darmstadt, Passivhaus Institut, Januar 1999
- [Borsch-Laaks 2005] Borsch-Laaks, Robert. Vorbeugender baulicher Holzschutz in Holzschutz im Hochbau. Johann Müller (Hrsg.). Fraunhofer IRB Verlag 2005.
- [Delphin 5] Delphin 5.6.5: Simulationssoftware für den gekoppelten Wärme-, Feuchte-, Luft- und Salztransport in porösen Materialien. Institut für Bauklimatik Dresden.
- [DIN 4108-3] Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden - Teil 3: Klimabedingter Feuchteschutz; Anforderungen, Berechnungsverfahren und Hinweise für Planung und Ausführung. Beuth, Berlin 2001.
- [DIN 4108-6] DIN 4108-6 : 2000-11, Wärmeschutz und Energieeinsparung in Gebäuden, Teil 6: Berechnung des Jahresheizwärme- und des Jahresheizenergiebedarfs. Beuth, Berlin 2000
- [DIN 68800-2] Holzschutz - Teil 2: Vorbeugende bauliche Maßnahmen im Hochbau. Beuth, Berlin 2009.
- [Drexel 2011] Drexel, Christof: Elektrische Frostfreihaltung: bis zu 90% Energieeinsparung durch zyklisches Vorwärmen. In: 15. Internationale Passivhaustagung, Innsbruck, 27./28.5.2011, Tagungsband. Darmstadt, Passivhaus Institut, Mai 2011
- [Duffie 2006] Duffie, John A. und William A. Beckman: Solar Engineering of Thermal Processes, 3rd ed., John Wiley & Sons, 2006



- [DWD 2004] Christoffer, Jürgen, Thomas Deutschländer, Monika Webs: Testreferenzjahre von Deutschland für mittlere und extreme Witterungsverhältnisse. Selbstverlag des Deutschen Wetterdienstes, Offenbach 2004
- [E DIN EN ISO 13788] Wärme- und feuchtetechnisches Verhalten von Bauteilen und Bauelementen - Raumseitige Oberflächentemperatur zur Vermeidung kritischer Oberflächenfeuchte und Tauwasserbildung im Bauteilinneren - Berechnungsverfahren; Deutsche Fassung prEN ISO 13788:2011. Beuth, Berlin 2011.
- [EERE 2011] EnergyPlus Energy Simulation Software, Weather Data, http://apps1.eere.energy.gov/buildings/energyplus/cfm/weather_data.cfm, 20.6.11
- [EN 1096-4] DIN EN 1096-4, Glas im Bauwesen - Beschichtetes Glas - Teil 4: Konformitätsbewertung/Produktnorm; Deutsche Fassung EN 1096-4:2004. Beuth, Berlin 2005
- [EN 12831] DIN EN 12831, Heizungsanlagen in Gebäuden - Verfahren zur Berechnung der Nom-Heizlast; Deutsche Fassung EN 12831:2003. Beuth, Berlin 2003
- [EN 13790] DIN EN ISO 13790, Energieeffizienz von Gebäuden - Berechnung des Energiebedarfs für Heizung und Kühlung (ISO 13790:2008). Beuth, Berlin 2008
- [Energy and Buildings 2002] Energy and Buildings Volume 34, Number 6, Special Issue on Thermal Comfort Standards, Elsevier, July 2002
- [Feist 1994] Feist, Wolfgang und Johannes Werner: Energiekennwerte im Passivhaus Damstadt: 11,9 (Heizung) + 6,1 (Warmwasser) + 2,6 (Kochgas) + 11,2 (Gesamtstrom) kWh/(m²a). Passivhaus-Bericht Nr. 4; Institut Wohnen und Umwelt; Damstadt, September 1994
- [Feist 1994a] Feist, Wolfgang: Interne Gewinne werden überschätzt. Sonnenenergie & Wärmetechnik 1/94
- [Feist 1997] Feist, Wolfgang (Hrsg.): Arbeitskreis kostengünstige Passivhäuser, Protokollband Nr. 5, Energiebilanz und Temperaturverhalten, Damstadt, Passivhaus Institut, Januar 1997
- [Feist 1997a] Feist, Wolfgang (Hrsg.): Arbeitskreis kostengünstige Passivhäuser, Protokollband Nr. 10, Meßtechnik und Meßergebnisse, Damstadt, Passivhaus Institut, Dezember 1997
- [Feist 1997b] Feist, Wolfgang (Hrsg.): Arbeitskreis kostengünstige Passivhäuser, Protokollband Nr. 11, Kostengünstige Passivhäuser, Damstadt, Passivhaus Institut, Dezember 1997
- [Feist 1998] Feist, Wolfgang (Hrsg.): Arbeitskreis kostengünstige Passivhäuser, Protokollband Nr. 13, Energiebilanzen mit dem Passivhaus Projektierungs Paket, Damstadt, Passivhaus Institut, Dezember 1998
- [Feist 1999] Feist, Wolfgang: Anforderungen an die Wohnungslüftung im Passivhaus. In: Arbeitskreis kostengünstige Passivhäuser, Protokollband Nr. 17, Dimensionierung



von Lüftungsanlagen in Passivhäusern, Darmstadt, Passivhaus Institut, Oktober 1999

[Feist 2001] Feist, Wolfgang: Gestaltungsgrundlagen Passivhäuser. Darmstadt 2001 (Bezug: www.passiv.de)

[Feist 2005] Feist, Wolfgang, Søren Peper, Oliver Kah, and Matthias von Oesen: Climate Neutral Passive House Estate in Hannover-Kronsberg: Construction and Measurement Results. PEP Project Information No. 1, Darmstadt, Passivhaus Institut 2005. Available from www.passivhaustagung.de/zehnte/englisch/texte/PEP-Info1_Passive_Houses_Kronsberg.pdf

[Feist 2005a] Feist, Wolfgang: Heizlast in Passivhäusern – Validierung durch Messungen, Endbericht. IEA SHC TASK 28 / ECBCS ANNEX 38, Darmstadt, Passivhaus Institut, Juni 2005

[Feist 2005b] Feist, Wolfgang (Hrsg.): Arbeitskreis kostengünstige Passivhäuser, Protokollband Nr. 29, Hochwärmegedämmte Dachkonstruktionen, Darmstadt, Passivhaus Institut, Juni 2005

[Feist 2007] Feist, Wolfgang: Passivhäuser in der Praxis. In: Fouad, Nabil (Hrsg.): Bauphysikkalender 2007; Ernst & Sohn, Berlin 2007

[Feist 2011] Feist, Wolfgang (Hrsg.): Arbeitskreis kostengünstige Passivhäuser, Protokollband Nr. 42, Ökonomische Bewertung von Energieeffizienzmaßnahmen, Darmstadt, Passivhaus Institut, 2011

[Feist 2012] Feist, Wolfgang (Hrsg.): Arbeitskreis kostengünstige Passivhäuser, Protokollband Nr. 46, Nachhaltige Energieversorgung mit Passivhäusern, Darmstadt, Passivhaus Institut, 2012

[Glaser 1958] Glaser H.: Vereinfachte Berechnung der Dampfdiffusion durch geschichtete Wände bei Ausscheidung von Wasser und Eis. Kältetechnik 10 (1958), H. 11, 358-364 (Teil 1), H. 12, 386-390 (Teil 2).

[Gundersen 2003] Gundersen, Per: New Generation Slab-on-Ground Foundations. Erhalten durch persönliche Mitteilung, November 2003

[Gundersen 2004] Gundersen, Per, Jan Vincent Thue und Kim Robert Lisø: Nye løsninger for varmeisolering og frostsikring av gulv på grunnen med ringmur, Prosjektrapport 2004, Norges byggforskningsinstitutt, Oslo 2004

[HTA 2008] Hochschule für Technik + Architektur Luzern, Prüfbericht Nr: HP-07653, Objekt: Lüftungsgerät Homevent RS180. How, Juni 2008

[IPHC 1996-2012] Tagungsbände der Internationalen Passivhaustagungen (International Passive House Conference), Passivhaus Institut, Darmstadt 1998-2012

[ISO 13793] DIN EN ISO 13793, Wärmetechnisches Verhalten von Gebäuden - Wärmetechnische Bemessung von Gebäudegründungen zur Vermeidung von Frost-



hebung (ISO 13793:2001); Deutsche Fassung EN ISO 13793:2001, Beuth, Berlin 2001

[ISO 7730] DIN EN ISO 7730:2006-05, Ergonomie der thermischen Umgebung – Analytische Bestimmung und Interpretation der thermischen Behaglichkeit durch Berechnung des PMV- und des PPD-Indexes und Kriterien der lokalen thermischen Behaglichkeit (ISO 7730:2005); Deutsche Fassung EN ISO 7730:2005. Beuth, Berlin, May 2006

[Kah 2008] Kah, Oliver, Wolfgang Feist, Rainer Pfluger, Jürgen Schnieders, Berthold Kaufmann, Tanja Schulz, Zeno Bastian: Bewertung energetischer Anforderungen im Lichte steigender Energiepreise für die EnEV und die KfW-Förderung. Passivhaus Institut, Darmstadt 2008. Download über www.bbr.bund.de/cIn_007/nn_22276/BBSR/DE/Veroeffentlichungen/BBSROnline/2008/ON182008.html, 22.8.11

[Kah 2009] Kah, Oliver: Wirtschaftlichkeit von Energiesparmaßnahmen bei der Gebäudemodernisierung. In: Arbeitskreis kostengünstige Passivhäuser, Protokollband Nr. 39, Schrittweise Modernisierung mit Passivhaus-Komponenten, Darmstadt, Passivhaus Institut, September 2009

[Klimadiagramme 2009] www.klimadiagramme.de, 23.2.09

[Krick 2011] Krick, Benjamin: Neue Zertifizierungskriterien für Passivhaus geeignete transparente Bauteile. In: 15. Internationale Passivhaustagung, Innsbruck, 27./28.5.2011, Tagungsband. Darmstadt, Passivhaus Institut, Mai 2011

[Lautner 2011] Lautner, Urs: Persönliche Mitteilung, April 2011

[Lstiburek 2002] Lstiburek, Joseph: Relative Humidity. Research Report - 0203. Building Science Corporation, Westford, 2002

[Marquardt 1992] Marquardt, Helmut. Korrosionshemmung in Betonsandwichwänden durch nachträgliche Wärmedämmung. Dissertation Technische Universität Berlin, 1992.

[Meteonorm 2010] Meteonorm 6.1: Global Meteorological Database for Solar Energy and Applied Meteorology. Meteotest, Bern, 2010

[Morris 2002] Morris, Paul, Winandy, Jerrold E. Limiting Conditions for Decay in Wood Systems. The International Research Group on Wood Preservation. 33rd Annual Meeting Cardiff, South Wales, UK, 2002.

[Mrziglod-Hund 2001] Mrziglod-Hund, Monika und Karl-Heinz Dahlem: Vermeiden der Unterfrierung einer elastischen Bodenplatte eines nicht unterkellerten Wohngebäudes durch Verlegen eines „Frostschimes“ aus EPS oder XPS. wksb 46 (2001), S. 18-22

[NAHB] National Association of Home Builders: Frost-Protected Shallow Foundations, Washington D.C., ohne Datum.

<http://www.homeconcepts.ca/miscellaneous/resource-drawings/FPSF.pdf>, 28.7.11



- [NASA 2009] http://veimages.gsfc.nasa.gov/116/population_density.tif
- [NASA 2009a] http://veimages.gsfc.nasa.gov/1438/earth_lights.gif
- [NASA 2009b] Surface meteorology and Solar Energy (SSE) Release 6.0 Methodology, VERSION 2.4, January 30, 2009.
power.larc.nasa.gov/documents/SSE_Methodology.pdf, 25.9.09
- [NASA 2009c] <http://eosweb.larc.nasa.gov/cgi-bin/sse/sse.cgi>, 5.10.09
- [Niachou 2005] Niachou, K., M. Santamouris, and S. Hassid: Performance of natural, hybrid and mechanical ventilation systems in urban canyons. In: Palenc 2005, 1st International Conference "Passive and Low Energy Cooling for the Built Environment", May 2005, Santorini, Greece
- [NOAA 2011] http://www.ngs.noaa.gov/PUBS_LIB/GeodeticBMs, 27.7.11
- [Passipedia 2011] Passivhaus-Wissensdatenbank. Passivhaus Institut.
<http://www.passipedia.org>. 29.8.11
- [Passipedia 2011a] passipedia.passiv.de/passipedia_de/planung/haustechnik/kompaktgeraete_fuer_lueftung_heizung_und_warmwasserbereitung, 5.8.11
- [Pfluger 2001] Pfluger, Rainer und Wolfgang Feist: Meßtechnische Untersuchung und Auswertung; Kostengünstiger Passivhaus-Geschoßwohnungsbau in Kassel Marbachshöhe. CEPHEUS-Projektinformation Nr. 15, Fachinformation PHI-2001/2, Damstadt, Passivhaus Institut, Juni 2001
- [PHPP] Feist, Wolfgang (Hrsg.): Passivhaus Projektierungs Paket. Damstadt, Passivhaus Institut, 1998 - 2011.
- [PHPP 2007] Feist, Wolfgang (Hrsg.): Passivhaus Projektierungs Paket 2007, Anforderungen an qualitätsgeprüfte Passivhäuser. Damstadt, Passivhaus Institut, 2007. Englisch: Feist, Wolfgang (Ed): Passive House Planning Package 2007, Specifications for Quality Approved Passive Houses, Damstadt, Passivhaus Institut, December 2007
- [Rudd 2007] Rudd, Armin und Hugh Henderson: Monitored Indoor Moisture and Temperature Conditions in Hot-Humid US Residences. ASHRAE Transactions, Volume 113, Part 1, Dallas 2007
- [Ruisinger 2009] Ruisinger, Ulrich, Grunewald, John, Feuchteatlas zur Vermeidung planungsbedingter Feuchteschäden. Dresden 2009.
- [Schnieders 1998] Schnieders, Jürgen und Wolfgang Feist: Passivhaus-Reihenhäuser: Über die Zuluft beheizbar? Simulation des thermischen Gebäudeverhaltens bei Variation ausgewählter Parameter und bei Zuluftnachheizung. CEPHEUS-Projektinformation Nr. 5, Fachinformation PHI-1998/12, Damstadt, Passivhaus Institut, Dezember 1998



[Schnieders 2001] Schnieders, Jürgen, Wolfgang Feist, Rainer Pfluger und Oliver Kah: CEPHEUS – Wissenschaftliche Begleitung und Auswertung, Endbericht, CEPHEUS-Projektinformation Nr. 22, Fachinformation PHI 2001/9, Darmstadt, Passivhaus Institut, Juli 2001

[Schnieders 2004] Schnieders, Jürgen: Einflussgrößen auf die Temperaturunterschiede in der Wohnung. In: Arbeitskreis kostengünstige Passivhäuser, Protokollband Nr. 25, Temperaturdifferenzierung in der Wohnung, Darmstadt, Passivhaus Institut, 2004

[Schnieders 2005] Dynamisches Verhalten und Wärmeübergabeverluste von Flächenheizungen, Darmstadt, Passivhaus Institut, Februar 2005

[Schnieders 2009] Schnieders, Jürgen: Passive Houses in South West Europe – A quantitative investigation of some passive and active space conditioning techniques for highly energy efficient dwellings in the South West European region. 2nd, corrected edition. Passivhaus Institut, Darmstadt 2009

[Sedlbauer 2001] Sedlbauer, K. - Vorhersage von Schimmelpilzbildung auf und in Bauteilen. Dissertation Universität Stuttgart, 2001.

[Thevenard Brunger 2002] Thevenard, Didier, Alfred Brunger: ASHRAE Research Project 1015-RP Typical Weather Years for International Locations, Final Report (revised, version 1.1), Ontario, October 2002

[Tostmann 2001] Tostmann, Karl-Helmut. Korrosion: Ursachen und Vermeidung. Wiley-VCH 2001.

[VDI 2078] VDI 2078, Berechnung der Kühllast klimatisierter Räume (VDI-Kühllastregeln), Beuth, Berlin 1996

[Viitanen 2009] Viitanen, Hannu. Critical Conditions for Mould and Decay Resistance of Wood. VTT Technical Research Centre of Finland. VTT Symposium 263, Wood and Fiber Produkt Seminar, 2009.

[VUW 2009] Kottek, M., J. Grieser, C. Beck, B. Rudolf, and F. Rubel: World Map of the Köppen-Geiger climate classification updated. Meteorol. Z., 15, 259-263, 2006. DOI: 10.1127/0941-2948/2006/0130. Download von <http://koeppen-geiger.vu-wien.ac.at>, 22.2.09

[Wikipedia 2009] <http://de.wikipedia.org/wiki/Weltbevölkerung>, 22.2.09

Anhang A Glossar

A.1 Berechnungswerkzeuge

Dynbil	<p>DYNBIL ist ein dynamisches thermisches Gebäudesimulationsprogramm, das am Passivhaus Institut entwickelt wurde. DYNBIL berücksichtigt auch Feuchtespeicher- und -transportvorgänge. Das Raummodell arbeitet mit einem Luft- und einem Strahlungsknoten, die sauber voneinander getrennt sind. Wärmeübergänge an Innenoberflächen werden abhängig von der Lage im Raum und der aktuellen Temperaturdifferenz ermittelt, an Außenoberflächen wird die vollständige solare und infrarote Strahlungsbilanz sowie der Einfluss der Windgeschwindigkeit berücksichtigt. U- und g-Werte von Fenstern werden abhängig von der aktuellen Temperatur und Solarstrahlung in jedem Zeitschritt neu berechnet. Die Wandmodelle verwenden keine Transferfunktionen, sondern ein Vorwärts-Differenzen-Verfahren, dadurch ist der Energieerhaltungssatz auch über lange Zeiträume erfüllt. Das Programm wurde unter deutschen Klimaverhältnissen anhand mehrerer detailliert vermessener Bauprojekte validiert.</p>
PHPP	<p>Das Passivhaus Projektierungs Paket (PHPP) ist eine umfangreiche Excel-Arbeitsmappe, die speziell für die Planung von Passivhäusern entwickelt und umfassend validiert wurde. Das PHPP ermittelt anhand eines Energiebilanzverfahrens den Jahresheizwärme- und -nutzkältebedarf, Heiz- und Kühllast werden in einer stationären Bilanz mittels geeignet angepasster Randbedingungen berechnet. Das Programm enthält auch eine vollständige Primärenergiebilanz einschließlich der wichtigen Warmwasser- und Haushaltsstromverbräuche. Durch Konzentration auf die wesentlichen Eingabegrößen, die dadurch relativ einfache Bedienung, vernachlässigbare Rechenzeiten und die gute Vorhersage tatsächlicher Verbräuche ist das PHPP zum Standardwerkzeug in der Passivhausplanung geworden.</p>

A.2 Luft und Lüftung

absolute Luftfeuchte	Wassergehalt der Luft in kg Wasser pro kg trockener Luft
relative Luftfeuchte	Absolute Luftfeuchte bezogen auf die absolute Luftfeuchte gesättigter Luft bei der gleichen Temperatur. Bei 100 % relativer Feuchte beträgt die absolute Luftfeuchte: bei 0 °C 4 g/kg, bei 10 °C 8 g/kg, bei 20 °C 15 g/kg, bei 30 °C 27 g/kg.
Außenluft, Abluft, Zuluft, Fortluft	Bezeichnung der Stutzen an einem Gerät zur Lüftungswärmerückgewinnung. Außenluft strömt von außen ins Gerät, Zuluft vom Gerät ins Gebäude, Abluft vom Gebäude ins Gerät, Fortluft vom Gerät nach außen.
Wärmerückgewinnung	bezeichnet kurz die Eigenschaft eines Lüftungsgeräts, Wärme zwischen Außen-/Zuluft und Ab-/Fortluft auszutauschen
Wärmebereitstellungsgrad	Der Anteil der im Lüftungsgerät übertragenen Wärmemenge, bezogen auf die passiv maximal übertragbare Wärmemenge (bei $T_{fo} = T_{au}$). Muss für innerhalb der thermischen Hülle aufgestellte Geräte außen-/fortluftseitig gemessen werden und enthält den Stromverbrauch der Lüftermotoren.

Anhang A Glossar

Feuchterückgewinnung	bezeichnet kurz die Eigenschaft eines Lüftungsgeräts, Feuchtigkeit zwischen Außen-/Zuluft und Ab-/Fortluft auszutauschen
Feuchteverhältnis	Der Anteil der im Lüftungsgerät übertragenen Wassermenge, bezogen auf die passiv maximal übertragbare Wassermenge (bei $x_{fo} = x_{au}$).
Hygienisch erforderliche Zuluftmenge	Die Luftmenge, die zur Gewährleistung guter Luftqualität in Bezug auf CO ₂ , VOC, Feuchteabfuhr, Gerüche und sonstige Luftschadstoffe erforderlich ist. Als sinnvolle Auslegungsgröße haben sich 30 m ³ /h pro Person bewährt. Bei 30 m ² Wohnfläche pro Person ergibt sich daraus ein Luftvolumenstrom von 1 m ³ /h pro m ² Wohnfläche; wird dieser um 30 K erwärmt, entspricht dies einer Heizleistung von 10 W/m ² . Im Kühlfall ist die nutzbare Temperaturdifferenz etwas kleiner, durch Verdunstung aus den Bauteilen können aber im Auslegungsfall oft zusätzlich einige W/m ² transportiert werden.
sensible Kühlung	Abfuhr fühlbarer Wärme, d.h. Reduzierung der Temperatur
latente Kühlung	Abfuhr latenter Wärme, d.h. Reduzierung der Luftfeuchte

A.3 Energie

COP	Coefficient of Performance, bei einer Wärmepumpe das Verhältnis von Nutzwärme und eingesetzter Elektroenergie
Heizlast	maximal erforderliche Nutzwärmeleistung, die zugeführt werden muss, um komfortable Innenraumbedingungen zu gewährleisten. In dieser Arbeit ist gewöhnlich der höchste Tagesmittelwert der erforderlichen Heizleistung gemeint – kurzzeitige Schwankungen können im Passivhaus auch bei Leichtbauten durch die Gebäudemasse ausgeglichen werden. Einheit: W bzw. W/m ²
Heizwärmebedarf	jährlich zuzuführende Nutzwärmemenge, um komfortable Innenraumbedingungen zu gewährleisten. Einheit: kWh bzw. kWh/m ²
Kühllast	maximal erforderliche Nutzwärmeleistung, die abgeführt werden muss, um komfortable Innenraumbedingungen zu gewährleisten. In dieser Arbeit ist gewöhnlich der höchste Tagesmittelwert der erforderlichen sensiblen Kühlleistung gemeint – kurzzeitige Schwankungen können im Passivhaus auch bei Leichtbauten durch die Gebäudemasse ausgeglichen werden. Einheit: W bzw. W/m ²
Nutzkältebedarf	jährlich abzuführende Nutzwärmemenge, um komfortable Innenraumbedingungen zu gewährleisten. Einheit: kWh bzw. kWh/m ²
Entfeuchtungsbedarf	jährlich abzuführende Feuchtemenge, um komfortable Innenraumbedingungen zu gewährleisten, ausgedrückt durch die für die Kondensation dieser Feuchte benötigte Nutzenergie. Einheit: kWh bzw. kWh/m ²

A.4 Sonstiges

Energiebezugsfläche	Alle Energien und Leistungen werden in dieser Arbeit auf die Wohnfläche bezogen, d.h. auf die Summe der Netto-Grundflächen aller Räume innerhalb der thermischen Hülle. Dazu zählen z.B. nicht die Flächen von Innen- und Außenwänden oder Treppen. Dieser Wert ist gerade bei gut gedämmten Gebäuden oft bedeutend kleiner als die Bruttogeschossfläche, die auf die Energiebezugsfläche bezogenen Werte sind entsprechend größer.
g-Wert	Gesamtenergiedurchlassgrad einer Verglasung, bestehend auf Solarstrahlungstransmission und sekundären Wärmegewinnen an den Raum, die aufgrund von Strahlungsabsorption in den Scheiben und anschließendem Wärmetransport in den Raum zu Stande kommen. Der g-Wert ändert sich kontinuierlich, abhängig von der Solarstrahlung und den Temperaturen der Scheiben. Dies wird in DYNBIL explizit berücksichtigt. In dieser Arbeit angegebene g-Werte beziehen sich auf EN 410, insbesondere auf senkrechten Strahlungseinfall.
U-Wert	Wärmedurchgangskoeffizient eines Bauteils. Der U-Wert einer Verglasung ändert sich kontinuierlich, abhängig von der Solarstrahlung und den Temperaturen der Scheiben. Dies wird in DYNBIL explizit berücksichtigt. In dieser Arbeit angegebene U-Werte beziehen sich in der Regel auf EN 673, d.h. insbesondere auf eine Temperaturdifferenz über die Verglasung von 15 K. Einheit: $W/(m^2K)$
ideale Heizung / Kühlung / Entfeuchtung	In der Simulation wird der jeweilige Sollwert durch die Regelung exakt eingehalten. Reale Eigenschaften des Wärmeübergabesystems, etwa Regelabweichungen, Hysteresen, begrenzte Leistungen wirken sich nicht aus.