

# Lernen von traditioneller Bauweise

*Untersuchung zur Übertragbarkeit von Konzepten zur passiven Klimatisierung  
am Beispiel von traditionellen Wohnhäusern in Thessaloniki, Griechenland*

Vorgelegt im Promotionsausschuss der HafenCity Universität Hamburg  
zur Erlangung des akademischen Grades

Doktor-Ingenieurin (Dr.-Ing.)

Dissertation von

Sonja Schelbach  
geb. in Oldenburg (Oldb)

Hamburg, Oktober 2014

## **Betreuer**

Prof. Dr. rer. nat. Udo Dietrich  
Prof. Dr.-Ing. habil. Wolfgang Willkomm



Abb. 001. Wohnhaus in der Oberstadt von Thessaloniki (eigene Aufnahme 2013)

***Traditionelle Bauweisen zu betrachten heißt,  
einen ganzen Katalog an Ideen und  
Lösungsmöglichkeiten vor sich aufzuschlagen,  
der Planer muss sich nur dessen bedienen.***

(Frey 2010:64)



## Danksagung

Ich möchte mich zunächst ganz herzlich bei Herrn Prof. Dietrich und Herrn Prof. Willkomm für die Betreuung der Arbeit bedanken. Herrn Dietrich danke ich besonders für die vielen Gespräche mit Hinweisen und Anregungen, die über den Zeitraum von vier Jahren den stetigen Fortgang der Arbeit unterstützten. Den Betreuungsgesprächen mit Herrn Willkomm verdanke ich wiederholt neue Impulse und einen immer wieder kritischen Blick auf die eigene Arbeit.

Herr Prof. Bernd Leitl vom Meteorologischen Institut der Universität Hamburg hat es ermöglicht, Messungen in einem Windkanal durchführen zu können. Er hat ferner die Auswertung der Ergebnisse begleitet, dafür meinen herzlichen Dank. An Thomas Giordano, der aus den USA für ein Sommerpraktikum nach Hamburg kam und dann für die Messungen im Windkanal viel Zeit im Keller des Instituts verbringen musste, ebenso vielen Dank.

Die Untersuchungen von Materialproben waren möglich durch die Unterstützung von Herrn Prof. Khorasani und seinen Mitarbeiterinnen im Baustofflabor der HafenCity Universität. Ich möchte mich auch dafür bedanken.

Ebenfalls bedanken möchte ich mich bei den Menschen in und aus Griechenland, die mir bei der Bearbeitung weitergeholfen haben. Theofilos Papadopoulos, für seine große Hilfe im Kontakt mit Bewohnern der traditionellen Wohnhäuser, Michael

Nomikos für die Diskussionen, die Beantwortung vieler Fragen und den Besuch einer Baustelle in Ano Poli, Aeneias Oikonomou für unser wunderbares Gespräch in der Bibliothek der Fakultät für Architektur an der Universität von Athen, Katerina Tsikaloudaki für die Hilfe bei den Bibliotheksrecherchen und Elisavet Panteli für die wiederholte Hilfe bei Übersetzungen aus der griechischen Sprache.

Vielen Dank an dieser Stelle noch an alle Kollegen und Studierenden der HCU für größere und kleinere Unterstützungen, welche geholfen haben, manche zunächst sehr hoch erscheinende Hürde zu meistern. Bereichert hat meine Arbeit der regelmäßige Austausch mit anderen Doktoranden der HCU, mein besonderer Dank gilt Jana und Katrin für die Unterstützung bei der schriftlichen Ausarbeitung.

Mein Dank geht auch an die Initiative Pro Exzellenzia und die Promotionsförderung der HafenCity Universität Hamburg für die finanzielle Unterstützung der Arbeit.

Ganz besonders möchte ich mich nun noch bei meiner Familie bedanken. Bei meinem Mann Niels, der nie in Frage gestellt hat, dass ich diese Dissertation fertigstellen werde, meinen beiden Kindern, die vor allem am Ende klaglos in Kauf nahmen, dass ich ganz von der Fertigstellung in Anspruch genommen war und meinen Eltern, die mich als Mutter entlastet haben und stets ein großes Interesse an dem Fortgang der Arbeit hatten.

## Lernen von traditioneller Bauweise - KURZZUSAMMENFASSUNG

Von traditioneller Bauweise lernen bedeutet, auf einen reichen Erfahrungsschatz zurückzugreifen, der durch das Studium alter Gebäude offenbar wird. Um an einem Standort ressourcensparend und klimaangepasst zu bauen, könnte dieses Wissen von Anfang an in die Planung von Gebäuden einfließen und dazu führen, dass diese durch eine möglichst optimale Anpassung an den Standort energieeffizient sind. Aus diesen Überlegungen entstand die grundlegende Fragestellung für die vorliegende Arbeit: Was kann man von traditioneller Bauweise an einem Standort lernen und wie kann man diese Erkenntnisse heute anwenden?

Für eine beispielhafte Untersuchung wurden zur Beantwortung dieser Frage traditionelle Wohnhäuser in der Oberstadt Thessalonikis, Griechenland ausgewählt und zunächst überprüft, ob es anhand dieses Beispiels möglich ist, Konzepte zur Anpassung an die lokalen klimatischen Bedingungen zu erkennen. Die Übertragbarkeit dieser Konzepte in unsere heutige Zeit wurde am Beispiel von Sanierungsmaßnahmen zur Energieeffizienz von typischen Wohngebäuden in Thessaloniki aus der Bauzeit der 1950er bis 1970er Jahren getestet.

Um die erforderlichen Daten zu erfassen, die zur Untersuchung der Anpassung an den Standort notwendig sind, erfolgte zunächst eine Grundlagenermittlung für das Untersuchungsgebiet durch Feldstudien, Literaturrecherchen, Experteninterviews

und Anwohnerbefragungen. Da sich das Thema natürliche Lüftung für die passive Klimatisierung der Innenräume im Sommer als besonders signifikant herausstellte, wurden Messungen in einem Windkanal durchgeführt, um detaillierte Kenntnisse über das Lüftungskonzept der Gebäude zu erlangen. Das dazu entwickelte Referenzgebäude für die traditionelle Bebauung diente in den weiteren Schritten ebenso als Ausgangslage für die Gebäudesimulationen. Die dadurch erfassten Konzepte wurden analysiert und ihre Auswirkungen und Wechselwirkungen für die passive Klimatisierung durch weitere Simulationen geprüft. Die Übertragbarkeit der Ergebnisse konnte mit der gleichen Methode beispielhaft an zwei Appartementblocks getestet und bestätigt werden.

Die gesamte Vorgehensweise wurde als Methode entwickelt, um die Konzepte der Anpassung an einen Standort zu erfassen und auf heutige Planungen übertragen zu können und bildet dadurch ein Handlungswerkzeug für Planerinnen und Architektinnen. Es ist zu berücksichtigen, dass bei einer Anwendung an Standorten mit extremen klimatischen Bedingungen, Modifikationen erforderlich sein können. Da die Vorgehensweise bisher nur an der für diese Arbeit beispielhaft ausgewählten Bauweise angewendet wurde, sollte weitere Forschung erfolgen, um die Übertragbarkeit auf andere Regionen und klimatische Bedingungen zu bestätigen.

Ein erster Schritt könnte sein, die Methode in der Ausbildung an Hochschulen in entsprechenden Fachrichtungen einzusetzen und unterschiedlichste Standorte und Bauweisen zu untersuchen. Studierende würden dadurch an die Vielfalt der Konzepte traditioneller Bebauung für eine passive Klimatisierung herangeführt, wodurch eine höhere Sensibilität für die gebaute Umgebung eines Ortes entwickelt werden kann.

# Learning from traditional building methods - ABSTRACT

Learning from traditional architecture offers access to a wealth of experience which is revealed through the study of traditional buildings. In order to build resource efficiently and climate adapted to a location, planners and architects could design energy efficient buildings based on this knowledge by an optimal adaptation to the site. These considerations lead to the initial research question of the thesis: What can we learn from traditional architecture and, most importantly, how can this knowledge be applied today?

As an exemplary investigation to answer this question traditional houses in the upper city of Thessaloniki, Greece were investigated with the aim to identify concepts of adaptation to the climatic conditions. The applicability of the results was tested using building simulation software, based upon two apartment blocks built between the 1950s and the 1970s as case studies.

To collect relevant data for the exemplary investigation of the traditional buildings field studies, literature reviews, expert interviews and resident surveys were carried out. Given that the natural ventilation turned out to be particularly significant to avoid overheating in summer, measurements in a wind tunnel were performed to gain more detailed knowledge about the traditional concepts for ventilation. The reference building developed for the measurements was also used to simulate indoor temperatures and the heating demand depending

on the season based on the collected data. The applicability of the traditional concepts to modern buildings could be proven by including passive measures to refurbishment plans and detecting the effect and interactions of the techniques using building simulations.

This approach was developed as a method that provides a tool for planners and architects and could be applied to other geographic locations and climatic conditions. This may require minor changes especially in regions with extreme climatic conditions. The method was only tested within the exemplary investigation of this thesis so further research should prove the applicability to other cases.

As it could also be used for teaching purposes at universities in relevant study programmes this could be a first step and would also introduce students to a variety of concepts that can be discovered by studying diverse traditional architecture. This method can be applied to help in understanding concepts of passive measures to meet the demands of indoor comfort and how to adapt these to modern buildings. Students will become aware of a site and learn how integrating the concepts being developed over a long period of time can be a challenge.

# INHALTSVERZEICHNIS

Abkürzungsverzeichnis .....	7	2.3.2 Materialuntersuchungen.....	40	4.1.2 Lüftung durch windinduzierte Druckdifferenzen.....	66
Symbolverzeichnis.....	8	2.4 Der Einfluss der Nutzerinnen auf die passive Klimatisierung .....	41	4.1.3 Zusammenspiel der temperatur- und windinduzierten Strömungen .....	67
Glossar .....	9	2.4.1 Nutzerbefragungen .....	41	4.2 Möglichkeiten zur Erfassung des windinduzierten Lüftungspotentials von Räumen.....	68
<b>1. Lernen von traditioneller Bauweise .....</b>	<b>13</b>	2.4.2 Fotodokumentation zum Öffnen und Schließen der Fenster.....	41	4.3 Rahmenbedingungen für die Messungen im Windkanal.....	70
1.1 Forschungsfeld .....	14	2.5 Das Klima im Untersuchungsgebiet.....	42	4.4 Modellbau für die Messungen im Windkanal .....	71
1.2 Forschungsfrage .....	15	2.5.1 Klimadatensätze, verfügbare Quellen .....	42	4.4.1 Gebäude im Untersuchungsgebiet.....	71
1.3 Methoden und Ziele .....	16	2.5.2 Temperaturen .....	43	4.4.2 Die umgebende Bebauung .....	73
1.4 Begriffsdefinition .....	18	2.5.3 Niederschläge und rel. Luftfeuchtigkeit .....	44	4.5 Versuchsaufbau im Windkanal und Messungen ..	75
1.5 Stand der Forschung .....	19	2.5.4 Windverhältnisse .....	44	4.5.1 Beschreibung des Versuchsaufbaus im Windkanal .....	75
1.5.1 Forschungslücke .....	19	2.5.5 Solare Einstrahlung.....	47	4.5.2 Modellierte Windrichtungen.....	76
1.5.2 Konzepte zur Energieeffizienz von Gebäuden .....	20	2.6 Komfortmodelle .....	48	4.5.3 Maßstab .....	76
1.5.3 Kritische Stimmen .....	21	2.7 Vergleichende Betrachtung lokaler Varianten in der Umgebung von Thessaloniki.....	50	4.5.4 Windgeschwindigkeit.....	76
<b>2. Die traditionellen Wohnhäuser in der Oberstadt von Thessaloniki.....</b>	<b>24</b>	2.7.1 Veria .....	50	4.5.5 Einfluss der Fassadenöffnungen auf die gemessenen Druckwerte.....	76
2.1 Die Entwicklung des Wohnhauses in der untersuchten Region.....	26	2.7.2 Arneia .....	52	4.5.6 Unsicherheiten .....	76
2.1.1 Das osmanische Haus - Verbreitungsgebiet .....	27	2.7.3 Vrastama .....	54	4.5.7 Einordnung der ermittelten $c_p$ Werte in die vorliegenden Tabellenwerte .....	77
2.1.2 Die Entwicklung des osmanischen Hauses.....	28	<b>3. Gebäudebestand in Thessaloniki und aktuelle Gesetzgebung.....</b>	<b>56</b>	4.6 Extremwertanalyse .....	80
2.2 Das Wohnhaus in der Oberstadt von Thessaloniki..	31	3.1 Der aktuelle Gebäudebestand .....	58	4.7 Zusammenfassung und Bewertung der Ergebnisse .....	83
2.2.1 Geschichte und Entwicklung Thessalonikis...	31	3.2 Die aktuelle Gesetzgebung.....	60	<b>5. Gebäudesimulationen zur Analyse von Konzepten der passiven Klimatisierung.....</b>	<b>84</b>
2.2.2 Von den 20er Jahren bis heute .....	33	3.2.1 KENAK - Kanonismos Energeiakis Apodotikotitas Ktiriwn .....	60	5.1 Natürliche Lüftung.....	87
2.2.3 Das Untersuchungsgebiet.....	35	3.3 Ziele bis 2020.....	62	5.1.1 Lüftungsöffnungen .....	88
2.2.4 Erdbeben als Einfluss auf die traditionelle Bauweise .....	38	<b>4. Natürliche Lüftung - Messungen im Windkanal .....</b>	<b>64</b>	5.1.2 Das Lüftungspotential der beispielhaft untersuchten Gebäude.....	89
2.3 Baumaterialien .....	39	4.1 Lüftung von Räumen.....	66	5.1.3 Windverhältnisse in Thessaloniki .....	90
2.3.1 Für die traditionelle Bebauung verwendete Baumaterialien.....	39	4.1.1 Lüftung durch Temperaturdifferenzen .....	66		

5.1.4	Untersuchte Varianten zum Abschätzen des Lüftungspotentials .....	90	5.4.1	Einfluss der Farbe der Oberfläche einer Fassade .....	132	6.2.4	Anwendung von Konzepten durch die Wahl von Baumaterialien .....	164
5.1.5	Ermittlung einer erforderlichen LWR für den sommerlichen Wärmeschutz.....	91	5.4.2	Einfluss der Temperaturleitfähigkeit von Baumaterialien .....	134	6.2.5	Ergebnisse .....	171
5.1.6	Berechnung des Lüftungspotentials auf Grundlage des BS 5925-1991.....	93	5.4.3	Vergleich des Einflusses unterschiedlicher Baumaterialien auf den sommerlichen Wärmeschutz.....	136	6.3	Anwendung der Konzepte zur passiven Klimatisierung.....	172
5.1.7	Berechnung des Lüftungspotentials unter Berücksichtigung der Ergebnisse aus den Windkanalmessungen.....	95	5.4.4	Beton als Baumaterial .....	137	6.3.1	Beispielgebäude A – Anwendung der Konzepte .....	172
5.1.8	Simulationen mit ENVI-met.....	96	5.4.5	Traditionelle Baumaterialien.....	138	6.3.2	Ergebnisse Beispielgebäude A.....	174
5.1.9	Analyse der Ergebnisse der Windkanalmessungen.....	97	5.4.6	Temperaturverläufe im Innenraum bei unterschiedlichen Materialien der Außenbauteile.....	140	6.3.3	Beispielgebäude B – Anwendung der Konzepte.....	175
5.1.10	Natürliche Lüftung - Ergebnisse.....	104	5.4.7	Materialien als Speichermasse .....	141	6.3.4	Ergebnisse Beispielgebäude B .....	176
5.2	Orientierung der Gebäude .....	106	5.4.8	Einfluss des Schließens der Fenster bei hohen Außentemperaturen auf die Innentemperaturen.....	143	6.3.5	Bewertung der Ergebnisse.....	177
5.2.1	Solararchitektur in der Antike .....	106	5.4.9	Baumaterialien - Ergebnisse .....	145	6.4	Vergleich mit anderen Sanierungsvorschlägen.	178
5.2.2	Solare Gewinne im Erdgeschoss des Referenzgebäudes im Winter.....	107	5.5	Zusammenfassung der Simulationsergebnisse	146	7. Zusammenfassung und Schlussfolgerungen .....	182	
5.2.3	Einfluss unterschiedlicher Verglasung und Baumaterialien .....	110	6. Anwendungsmöglichkeiten .....	148	7.1	Zusammenfassung der Ergebnisse .....	184	
5.2.4	Solare Gewinne im Obergeschoss des Referenzgebäudes im Winter.....	112	6.1	Allgemeine Merkmale der Beispielgebäude.....	151	7.1.1	Methode zum Erfassen der Konzepte passiver Klimatisierung einer traditionellen Bebauung.....	184
5.2.5	Vermeidung von Überhitzung durch solare Einträge im Sommer.....	114	6.1.1	Beispielgebäude A - Polykatoikia aus der Bauzeit zwischen 1955 und 1973 .....	153	7.1.2	Ergebnisse der beispielhaften Untersuchung einer traditionellen Bebauung .....	186
5.2.6	Orientierung der Gebäude - Ergebnisse ..	117	6.1.2	Beispielgebäude B - Polykatoikia aus der Bauzeit zwischen 1973 und 1980 .....	155	7.1.3	Ergebnisse der Prüfung der Übertragbarkeit .....	188
5.3	Verschattungselemente für Fenster und Fassaden .....	118	6.2	Untersuchung zur Übertragbarkeit von Konzepten zur passiven Klimatisierung .....	157	7.2	Schlussfolgerungen .....	189
5.3.1	Einfluss des Materials eines Verschattungselementes .....	119	6.2.1	Anwendung von Lüftungskonzepten .....	157	7.2.1	Bedeutung für die Wissenschaft .....	189
5.3.2	Einfluss des Materials - Ergebnisse .....	123	6.2.2	Anwendung von Konzepten zur Orientierung der Gebäude .....	160	7.2.2	Offene Fragen und weiterer Forschungsbedarf .....	189
5.3.3	Simulationen für Varianten der Verschattung .....	124	6.2.3	Anwendung von Konzepten zur Verschattung .....	162	7.2.3	Energieeffizienz von Gebäuden - Ausblick ..	191
5.3.4	Verschattungselemente - Ergebnisse ....	130				Literaturverzeichnis.....	192	
5.4	Baumaterialien für Wände und Dächer.....	131				Abbildungsverzeichnis .....	198	
						Formelverzeichnis .....	206	



## Abkürzungsverzeichnis

Abb.	Abbildung(en)	MDF	Mitteldichte Faserplatte
Anm.	Anmerkung	NEEAP	National Energy Efficiency Action Plan
ASHRAE	American Society of Heating and Air-Conditioning Engineers	NZEB	Nearly zero Energy Buildings
AW	Außenwand	n.v.	nicht veröffentlicht
BS	British Standard	o.J.	ohne Jahresangabe
CAD	Computer Aided Design	PMV	predicted mean vote
d. Verf.	der Verfasserin	PPD	predicted percentage of dissatisfied
DIN	Deutsches Institut für Normung	S.	Seite
EN	Europäische Norm	SSV	Sonnenschutzverglasung
EU	Europäische Union	STD	Standardabweichung
EV	Einfachverglasung	SVF	sky view factor
f.	und folgende Seite	UHI	urban heat island
ff.	und folgende Seiten	VDI	Verein Deutscher Ingenieure
HDD	heating degree days (Heizgradtage)	vgl.	vergleiche
IR	Infrarot	WD	Wärmedämmung
ISO	Internationale Organisation für Normung	WLG	Wärmeleitgruppe
IWEC	International Weather for Energy Calculation	WSV	Wärmeschutzverglasung
k.A.	kein Autor	WTG	Windtechnologische Gesellschaft
LWR	Luftwechselrate	z.B.	zum Beispiel

# Symbolverzeichnis

$A_w$	[m <sup>2</sup> ]	wirksame Öffnungsfläche	$m_{w,s}$	[g]	scheinbare Masse eines in	$w$	[m]	Gebäudetiefe
$a$	[a]	Jahr			Wasser getauchten	$Z$	[m]	Höhe
$c$	[J/kg*K]	spezifische			Probekörpers	$Z_{ref}$	[m]	Referenzhöhe
		Wärmekapazität	$n_{50}$	[1/h]	Luftvolumenstrom bei einer			
$c_d$	[-]	Durchflusskoeffizient			Druckdifferenz von 50Pa			
		für die Durchtrittsfläche	$p$	[Pa]	Druck			
$c_p$	[-]	dimensionsloser	$p_u$	[Pa]	statischer Druck	$\alpha$	[-]	Rauigkeitsklasse
		Wanddruckbeiwert	$p_{dyn}$	[Pa]	Staudruck der Anströmung	$\alpha_s$	[W/m <sup>2</sup> K]	solare Absorption
$\Delta c_p$	[-]	Druckdifferenz	$p_{stat, l}$	[Pa]	auf der Gebäudeoberfläche	$\alpha_c$	[W/m <sup>2</sup> K]	konvektiver Wärme-
$F_c$	[-]	Abminderungswert			gemessener Wanddruck			übergangskoeffizient
$g$	[-]	Gesamtenergie-	$S$	[-]	Skalierungsfaktor	$\lambda$	[W/mK]	Wärmeleitfähigkeit
		durchlassgrad	$T$	[°C]	Temperatur	$\varepsilon$	[-]	Emissionskoeffizient
$h$	[m]	Gebäudehöhe	$T_u$	[°C]	Außentemperatur			Infrarot
$h$	[h]	Stunde	$\Delta T$	[K]	Temperaturdifferenz	$\rho$	[kg/m <sup>3</sup> ]	Dichte
$\Delta H$	[m]	Höhendifferenz	$U$	[-]	dimensionslose			
$I$	[W/m <sup>2</sup> ]	solare Einstrahlung			Windgeschwindigkeit			
$K$	[K]	Kelvin	$U_{prandtl}$	[-]	Windgeschwindigkeit			
$l$	[m]	Gebäuelänge			Prandtl Rohr			
$m_w$	[m <sup>3</sup> /s]	Volumenstrom	$U_{ref}$	[-]	dimensionslose Referenz-			
		windinduziert			windgeschwindigkeit			
$m_{dry,s}$	[g]	Masse eines trockenen	$U_w$	[W/m <sup>2</sup> K]	U-Wert Fenster			
		Probekörpers	$V_b$	[g]	Volumen mit Poren			
$m_{sat,s}$	[g]	Masse eines gesättigten	$v_r$	[m/s]	Referenz-			
		Probekörpers			Windgeschwindigkeit			
			$v_f$	[m/s]	Windgeschwindigkeit			

# Glossar

## **Appartementhäuser**

Mehrgeschossige Gebäude mit Misch- oder reiner Wohnnutzung, im Zusammenhang dieser Arbeit auch als *>>Polykatoikia* bezeichnet

## **Gebäudesimulationen**

Eine thermische Gebäudesimulation ist ein dynamisches Berechnungsverfahren, welches anhand vorgegebener Parameter Lasten berechnen kann. Dazu wird der gesamte Energiehaushalt eines Gebäudes oder einzelner Räume unter Berücksichtigung des Klimas und weiteren äußeren Einflüssen erfasst.

## **Gesamtenergiedurchlassgrad**

Der g-Wert gibt die Energiemenge solarer Strahlung an, die ein transparentes Bauteil von außen nach innen durchdringt. Transmission und Wärmeabgabe werden addiert und geben in % an, welcher Anteil an Energie durch das Bauteil hindurch in den Innenraum gelangt.

## **hayat**

Eine Variante des osmanischen Hauses mit der zentralen Erschließung im Obergeschoss als offene Galerie = *hayat*. Dieser nicht vom Außenraum abgetrennte Raum wurde vor allem in der warmen Jahreszeit genutzt.

## **Heizgradtage**

Summe der Differenz zwischen einer mittleren angestrebten Raumtemperatur und der Außentemperatur über die Heiztage einer Heizperiode.

Die Ermittlung der Heizgradtage stellt ein Hilfsmittel zur Bestimmung der benötigten Energie für Heizwärme dar (vgl. *>>Kühlgradtage*)

## **Heizperiode**

Zeitraum, in dem ein Gebäude oder Raum aufgrund des jeweiligen Klimas geheizt werden muss, um die gewünschten Innenraumtemperaturen zu erreichen.

## **Heizwärmebedarf**

Energiemenge, die benötigt wird, um einen Raum in der *>>Heizperiode* auf eine definierte Temperatur zu heizen. Der H ist abhängig vom Klima, von den Außenbauteilen eines Gebäudes, internen Wärmequellen und dem Verhalten der *>>Nutzerinnen*.

## **iliakos**

Raumelement in Form einer überdachten Terrasse, welches bei traditionellen Wohnhäusern in Veria, Nordgriechenland vorkommt. Die Funktion ist nicht bekannt. Vermutlich ein Aufenthaltsraum, welcher durch seine Lage im Dachbereich ein angenehmes Klima verbunden mit einer schönen Aussicht bot.

## **klimaangepasste Bauweise**

Bauweise, die beispielsweise durch die Verwendung entsprechender Materialien, Konzepte zur Lüftung und Nutzung solarer Gewinne genau auf ein lokales Klima abgestimmt ist und dadurch einen möglichst geringen Energiebedarf zur Klimatisierung von Räumen ausweist.

## **Komfort**

Abwesenheit von unangenehmen Empfindungen, hier bezogen auf den thermischen Komfort als Zustand in einem Raum, bei dem sich die Mehrheit der Personen in Bezug auf definierte Parameter wie z.B. Temperatur, relative Luftfeuchtigkeit, Luftqualität und Luftbewegung wohl fühlt.

## **Komfortmodell**

Komfortmodelle legen Parameter (siehe *>>Komfort*) fest, um Zeiträume zu erfassen, in denen sich die Mehrheit der Personen wohl oder unwohl fühlt. Sie können je nach Modell noch weitere Rahmenbedingungen wie beispielsweise während des Aufenthaltes ausgeübte Tätigkeiten, Kleidung oder bei adaptiven Komfortmodellen, die Außentemperaturen beinhalten.

## **konak**

Ein Stadthaus als städtische Variante des osmanischen Hauses, welches sich ab dem 18. Jahrhundert im Gebiet der heutigen Türkei verbreitete. Es war als frei stehendes Haus am Straßenverlauf ausgerichtet und hatte einen eigenen, von einer Mauer umgebenen Garten.

## **Konzept**

Im Zusammenhang dieser Arbeit wird die Kombination von Ideen zur Anpassung von Bauwerken an die lokalen Bedingungen als Konzept bezeichnet. Dieses K. beinhaltet Kenntnisse, um die Maßnahmen, die an einem bestimmten Ort für eine

>>passive Klimatisierung notwendig sind, in die Praxis umzusetzen.

### **Kühlgradtage**

Summe der Differenz zwischen einer mittleren angestrebten Raumtemperatur und der Außentemperatur über die Periode, in der die Außentemperaturen entsprechend hoch sind. Die Ermittlung der Kühlgradtage stellt ein Hilfsmittel zur Bestimmung der benötigten Energie zum Kühlen von Innenräumen dar (vgl. >> *Heizgradtage*).

### **Luftwechselrate**

Die LWR beschreibt, wie häufig das Luftvolumen eines Raumes in einer Stunde (h) ausgetauscht wird.

### **Luftdichtheit**

Ist ein Maß für die Luftdurchlässigkeit der Fassade. Sie kann durch einen Differenzdrucktest gemessen werden, bei dem ein konstanter Druck erzeugt und die Undichtigkeit der Außenbauteile durch den Druckabfall gemessen wird.

### **natürliche Lüftung**

Wird auch als freie Lüftung bezeichnet und ist eine Null-Energie Methode zum Kühlen von Räumen. Weiter bewirkt sie den für Räume notwendigen Luftaustausch zur Vermeidung hoher Luftfeuchtigkeit, schlechter Gerüche und zu hoher CO<sub>2</sub> Konzentration der Raumluft. Natürliche Lüftung wird durch Wind und/oder Temperaturdifferenzen induziert.

### **Nutzerinnen**

Alle Personen, die die betrachteten Räume nutzen und daher Ansprüche an den >>*Komfort* in den Innenräumen stellen. Der besseren Lesbarkeit halber wurde in dieser Arbeit auf die gleichzeitige Verwendung weiblicher und männlicher Form verzichtet. Mit *Nutzerinnen* sind daher alle Menschen gemeint, die die Gebäude nutzen.

### **oda**

Die privaten Räume im osmanischen Haus. Die ursprüngliche Aufteilung war so gestaltet, dass diese Räume für Männer und Frauen voneinander getrennt lagen. Die Räume wurden über eine zentrale Diele (>>*sofa*) oder ein >>*hayat* erschlossen.

### **osmanisches Haus**

Ein Wohngebäude, welches sich mindestens seit dem 17. Jahrhundert, vermutlich als multiethnisches Produkt unterschiedlicher Bautraditionen, auf dem Balkan entwickelt hat. Die Dreiteilung des osmanischen Hauses in einen repräsentativen Bereich, Räume für Frauen und Räume für Männer, findet sich in der Grundrissaufteilung des ländlichen türkischen Wohnhauses.

### **passive Klimatisierung**

Maßnahmen zur Klimatisierung von Innenräumen wie beispielsweise natürliche Lüftung oder gezielte Verwendung von Baumaterialien, die im Gegensatz zu einer aktiven Klimatisierung keinen Energieverbrauch verursachen.

### **Pilotis**

Ein durch Le Corbusier eingeführter Begriff für eine offene und sichtbare Pfeilerkonstruktion im Erdgeschoss eines Gebäudes.

### **Planerinnen**

In dieser Arbeit alle Personen, die sich mit dem Planungsprozess im Bereich Bauen beschäftigen. Ebenso wie die Bezeichnung Architektinnen in dieser Arbeit in weiblicher Form verwendet (siehe dazu >>*Nutzerinnen*).

### **PMV**

Die *predicted mean vote* (= vorausgesagtes mittleres Votum) ist ein nach definierten äußeren Parametern, die das thermische Gleichgewicht eines Menschen beeinflussen, errechneter Wert. Er dient zur Berechnung des >>*PPD*.

### **Polykatoikia**

Vom griechischen *poly* = viel und *katoikia* = Wohnung. Bezeichnet ein in griechischen Städten typisches, mehrgeschossiges Appartementhaus mit Misch- oder reiner Wohnnutzung.

### **PPD**

Der *predicted percentage of dissatisfied* (= vorausgesagter Prozentsatz an Unzufriedenen) wird aus der >>*PPD* berechnet und gibt an, wie viele Menschen sich in einem Klima voraussichtlich wohl oder unwohl fühlen.

### **Referenzgebäude**

In dieser Arbeit ein Gebäude, welches in seinen Abmessungen, seiner Form, der Anzahl und Größe der Fassadenöffnungen, Konstruktionen, Materialien und weiteren Parametern einen Durchschnitt darstellt und stellvertretend für die Wohnhäuser im untersuchten Gebiet für die Messungen und Simulationen verwendet wurde.

### **ressourcensparende Bauweise**

Betrachtet den gesamten Lebenszyklus eines Bauwerks und zielt darauf ab, nur so viel Energie wie erforderlich durch den Bau des Gebäudes, die Nutzung und die Entsorgung zu verbrauchen.

### **satmas**

Gefache der Fachwerkkonstruktion von den Wänden des Obergeschosses bei der untersuchten lokalen Variante des *>>osmanischen Hauses*. Die mit Ziegelmauerwerk ausgemauerten Gefache wurden innen und außen mit einer Holzlattung als Putzträger versehen und einer Kalk-Lehm-Mischung verputzt. Die Außenhaut bekam zusätzlich eine dünne Kalkputzschicht als wasserabweisende Haut. Es existieren auch *satmas* ohne Mauerwerk sondern mit einem Luftraum zwischen den Holzlattungen.

### **sofa**

Der repräsentative zentrale Raum des osmanischen Hauses, durch einen Erker zur Straße hin in seiner Fläche vergrößert. Von hier aus wurden beiderseits die Wohnräume für Männer und für Frauen erschlossen.

### **solare Einstrahlung**

Sonneneinstrahlung, die auf ein Bauteil trifft und dadurch einen Energieeintrag bewirkt. In dieser Arbeit verwendet als Summe von direkter und diffuser Sonneneinstrahlung.

### **sommerlicher Wärmeschutz**

Soll die solaren Einträge begrenzen, um ein Überhitzen von Innenräumen zu verhindern. Basierend auf der Verschattung von Bauteilen, der natürlichen Lüftung und der Auswahl von Baumaterialien kann er die Notwendigkeit von Klimaanlage verringern oder vermeiden.

### **traditionelle Bauweise**

Wird über einen langen Zeitraum verwendet und von Generation zu Generation weitergegeben. Sie stellt eine Übersetzung der Tradition einer Gruppe, ihrer Bedürfnisse und Werte in etwas physisch Vorhandenes dar. Modifikationen entstehen als Anpassungen an veränderte Bedingungen.

### **Wärmedurchgangskoeffizient**

Wird als U-Wert bezeichnet und gibt in  $W/(m^2 \cdot K)$  an, welche Energiemenge pro  $m^2$  bei einer Temperaturdifferenz von 1 K durch ein Bauteil zur kalten Seite hin abfließt.

### **Übertragbarkeit**

Im Zusammenhang dieser Arbeit die Möglichkeit, ein traditionelles Konzept für eine passive Klimatisierung von Innenräumen auf andere Bauweisen anzuwenden.

### **Verschattungselemente**

Bauliche Elemente zur Verschattung transparenter Fassadenflächen als wichtiger Bestandteil für den *>>sommerlichen Wärmeschutz* und um Blendung zu vermeiden. V. können als Teil des Bauwerk in Form von Fassadenelementen oder direkt an einer Fensteröffnung innen oder außen fest installiert sein. Sie können ebenso als flexibles Element oder in Form von laubabwerfenden Pflanzen nur für den Nutzungszeitraum verwendet werden. Die Effektivität hängt bei bedienbaren Elementen von der Bedienung durch die Nutzerinnen ab.

### **Windkanal**

Eine Anlage welche ein Windprofil, das den natürlichen Strömungsverhältnissen an einem Ort entspricht, physikalisch modelliert. Unter Laborbedingungen können die durch Wind zu erwartenden Drücke auf ein Bauwerk gemessen werden. Im Gegensatz zu Messungen in der Natur ist dies über einen beliebigen Zeitraum möglich und reproduzierbar.



# 1 Lernen von traditioneller Bauweise

## 1.1 Forschungsfeld

Weltweit haben Menschen an unterschiedlichsten Standorten über lange Zeiträume hinweg Bauwerke errichtet und diese kontinuierlich an äußere Faktoren, wie dem Klima, der Topografie, verfügbaren Baumaterialien und weiteren lokal spezifischen Parametern angepasst. Daher sind diese Bauten im Regelfall aus den örtlich verfügbaren Ressourcen errichtet und dem regionalen Klima angepasst. Dies war zwingend notwendig, denn bis zum Einsetzen der Industrialisierung waren weder die Verfügbarkeit von Baumaterialien und Energie zum Heizen, noch die technischen Möglichkeiten zum Klimatisieren von Innenräumen, die uns heute selbstverständlich erscheinen, vorhanden.

Die Menschen waren daher gezwungen, durch eine dem Klima angepasste Bauweise aktive Maßnahmen zum Heizen gering zu halten. Das aktive Kühlen von Räumen war nur sehr eingeschränkt möglich, so dass der Schwerpunkt darauf lag, das Überhitzen zu vermeiden. Erst als die Möglichkeit bestand, Energie in größerem Umfang zum Heizen, Kühlen und Lüften einzusetzen, konnten Gebäude unabhängig vom Standort errichtet werden.

Technische Lösungen für eine künstliche Klimatisierung haben in vielen Regionen die althergebrachten Konzepte der passiven Klimatisierung in Vergessenheit geraten lassen. Im besten Fall sind sie noch bekannt, werden jedoch nicht mehr angewendet. Die Veränderungen, die der Verbrauch fossiler Brennstoffe hervorrufen, zwingen jedoch in Bezug auf

unseren Energiekonsum zum Umdenken. Derzeit verursachen Wohngebäude 40% des gesamten Energieverbrauchs in der europäischen Union (Europäische Union, 2014). Weltweit betrachtet werden es bis 2050 etwa 9 Milliarden Menschen sein, die Ansprüche an den Komfort in Wohnräumen stellen. Idealerweise sollte dieser Bedarf nicht durch einen anwachsenden Energieverbrauch, sondern in einer kulturell und umweltverträglichen sowie nachhaltigen Weise gedeckt werden (vgl. Asquith, 2006:4).

Bis zum Jahre 2020 hat sich die EU in dem auf 10 Jahre angelegten Wirtschaftsprogramm „Europa 2020“ zum Ziel gesetzt, im Vergleich zum Jahre 1990 die Treibhausgasemissionen um 20% zu senken, den Anteil an erneuerbaren Energien um 20% zu erhöhen und die Energieeffizienz um 20% zu steigern (Europäische Union, 2010). Die Umsetzung dieser Ziele soll in nationalen Entwicklungsplänen festgelegt werden. Dies spiegelt wieder, dass sich solche Ziele nicht nur auf internationaler Ebene verfolgen lassen, sondern auf nationaler und regionaler Basis aufgebaut werden müssen.

In Bezug auf Wohnbauten bedeutet es, dass die Konzepte zur passiven Klimatisierung, die an einem Ort schon lange erprobt und optimiert worden sind, bei der Umsetzung dieser Ziele helfen könnten. Hönger (2009:18) formuliert diesen Ansatz als Möglichkeit eine Antwort auf die Frage zu finden: Wie wollen wir leben? Und wie wollen wir es einrichten, dass dies nicht auf Kosten unserer Nachkommen geschieht?

## 1.2 Forschungsfrage

Die initiale Frage der vorliegenden Arbeit entstand aus der Überlegung, ob es möglich ist, Konzepte zur passiven Klimatisierung, die in traditionellen Bauweisen genutzt werden zu erfassen, und zu überprüfen, ob diese auch heute noch angewendet werden können. Dadurch soll ein Potential ausgenutzt werden, welches einen wichtigen Beitrag zur Entwicklung energieeffizienter Gebäude leisten kann. Es ergab sich die grundlegende Fragestellung:

Was kann man von traditioneller Bauweise in Bezug auf die passive Klimatisierung von Innenräumen an einem Standort lernen und wie kann man diese Erkenntnisse heute anwenden?

Um das zu beantworten mussten weitere Fragen gestellt und beantwortet werden:

- » Wie waren und sind die klimatischen, geographischen, wirtschaftlichen Bedingungen und weiteren Parametern, abhängig vom jeweiligen Fall an dem Standort?
- » Ist die traditionelle Bauweise an diese äußeren Bedingungen angepasst und wenn ja, an welche Faktoren?
- » Ist die traditionelle Bauweise als ökologisch, ökonomisch und sozial verträglich zu bewerten? In Bezug auf welche Faktoren?

- » Was sind geeignete Methoden, um Konzepte der Anpassung an den Standort untersuchen?
- » Wer soll von diesem Wissen profitieren und aus dem Studium der traditionellen Bauweise lernen?

Aus der Beantwortung ergaben sich wiederum neue Fragenstellungen:

- » Welche Konzepte der passiven Klimatisierung gibt es an dem Standort, und lassen sich diese auf heute übertragen?
- » Auf welche Gebäude lassen sie sich übertragen?
- » Sind sie geeignet, um bei Sanierungen angewendet zu werden, und wenn ja für welche Gebäudetypen?
- » Welchen Vorteil bietet es, die traditionellen Konzepte anzuwenden?

Im Rahmen dieser Arbeit wurde eine Methode entwickelt, die eine Möglichkeit darstellt, diese Fragen zu beantworten. Sie soll ein Werkzeug für Architektinnen und Planerinnen sein, um die für einen speziellen Ort schon vorhandenen Kenntnisse zum klimaangepassten Bauen in ihr eigenes Konzept einfließen lassen zu können.

Die Methode eignet sich ebenso für die Ausbildung von Studierenden relevanter Fachrichtungen, welche sich mit dem Planen und Bauen in unserer Umwelt befassen. Im Rahmen von Seminaren können Fallbeispiele bearbeitet werden, anhand derer die lokale Anpassung an die Gegebenheiten und die traditionellen Konzepte der passiven Klimatisierung kennengelernt und verglichen werden können. Dies kann das Studium nicht nur in Form von Fachwissen bereichern, sondern auch durch eine Sensibilisierung für das Vorhandene an einem Ort.

## 1.3 Methoden und Ziele

Im Rahmen dieser Arbeit wurde eine exemplarische Untersuchung durchgeführt. Dazu wurden als Beispielgebäude traditionelle Wohnhäuser in der Oberstadt von Thessaloniki in Nordgriechenland ausgewählt, anhand derer Konzepte passiver Klimatisierung aufgezeigt werden konnten. Der Standort erlaubte aufgrund seiner klimatischen Bedingungen eine Untersuchung sowohl in Bezug auf den sommerlichen Wärmeschutz, als auch zu den Maßnahmen zum Schutz gegen das Klima im Winter. Die Möglichkeiten, die Ergebnisse unter Berücksichtigung veränderter Bedingungen heutiger Zeit in moderne Planungen einfließen zu lassen, wurden anhand von Fallbeispielen untersucht.

In einer ersten Feldstudie konnte festgestellt werden, dass die Gebäude typische Merkmale einer Anpassung an das mediterrane Klima zeigen. Traditionelle Häuser in Regionen mit feucht-heißen Sommern und kalten Wintern haben häufig ein gut durchlüftetes oberes Stockwerk in leichter Bauweise und ein unteres Geschoss mit großer Masse, die sich in der Sonne erwärmen kann (vgl. Climate Consultant 5.4). Die traditionelle Bebauung weist diese grundlegenden Merkmale auf, so dass anzunehmen war, dass eine Anpassung an den Standort vorlag.

Im ersten Kapitel dieser Arbeit findet sich die Einführung in das Thema. In Abb. 002 wird zur Übersicht der weitere Aufbau der Arbeit grafisch dargestellt. Im zweiten Kapitel wird zunächst die

ARBEITSSCHRITT	KAPITEL	METHODE	ZIEL
AUSWAHL EINER BEISPIELREGION	2	Feldstudie	Prüfung: Ist eine traditionelle Bauweise vorhanden und vermutlich an die regionalen Bedingungen angepasst?
	2	Literaturrecherche	
GRUNDLAGEN-ERMITTLUNG	2	Feldstudien	Erfassen aller relevanten Daten für die weiteren Untersuchungen
	2	Literaturrecherche	
	2	Experteninterviews	
	2	Anwohnerbefragungen	
	2	Messungen im Windkanal	
	3	Erfassen des rechtlicher Rahmens	
ANALYSE GRUNDLAGENERMITTLUNG	4	Analyse der Daten aus der Grundlagenermittlung	Aussagen/Ergebnisse aus denen die Konzepte zur Klimatisierung abgeleitet werden können
	5	Auswertung Messergebnisse	
	5	Gebäude - Simulationen	
ABLEITEN VON KONZEPTEN	5	Evaluation der Analyseergebnisse	Erfassen der Konzepte und ihre Wechselwirkungen
ANALYSE ZUR ÜBERTRAGBARKEIT	6	Auswahl von Beispielgebäuden	Konzepte, welche sich übertragen und auch heute anwenden lassen
	6	Vergleich unterschiedlicher Maßnahmen (Simulationen)	
METHODE ALS LEITFADEN	7	Auswertung der Analyse zur Übertragbarkeit	Entwicklung eines Leitfadens zur Unterstützung von Planerinnen

Abb. 002. Aufbau und Struktur der Arbeit

Auswahl der Beispielregion beschrieben und das Erfassen aller notwendigen Informationen zu dem Standort. Ebenfalls im zweiten Kapitel finden sich die Ergebnisse der Grundlagenermittlung, welche mit einer Feldstudie startete, im Laufe derer Daten zu den vorhandenen Gebäuden und der Baustruktur zusammengetragen wurden. Durch weitere Aufenthalte vor Ort konnten die regionalen Gegebenheiten durch Gespräche mit Experten, Bibliotheksrecherchen und Befragungen der Anwohner zusammengestellt werden. Im gleichen Zeitraum erfolgte eine umfassende Literaturrecherche über die traditionelle Bauweise in Nordgriechenland und auf dem Balkan, zur Geschichte Thessalonikis, klimagerechtem und ressourcensparendem Bauen und dem Klima der Region. Zusätzlich erfolgte ein Vergleich zu lokalen Varianten der Bauweise.

Im dritten Kapitel befindet sich ein weiterer Teil der Grundlagenermittlung, welche in Recherchen zum aktuellen Stand der Gesetzgebung in Bezug auf die Umsetzung von Maßnahmen zur Gebäudeenergieeffizienz bestand. Zusätzlich wird ein Ausblick auf die Ziele bis 2020 für die Beispielregion dargestellt.

Da sich im Laufe der Bearbeitung herausstellte, dass das Thema natürliche Lüftung für den betrachteten Fall eine herausragende Bedeutung hat, wurden Versuche im Windkanal durchgeführt, welche Daten zum Potential der natürlichen windinduzierten Lüftung lieferten. Die Konzeption und Durchführung der Messungen wird in Kapitel 4 beschrieben.

Im nächsten Schritt, Kapitel 5, folgte die Analyse der gesammelten Daten und Softwaresimulationen zum Ableiten von Konzepten zur Klimatisierung der Gebäude. Diese Untersuchung wurde unterteilt in die Themen natürliche Lüftung, Baumaterialien, Verschattungselemente der transparenten Flächen und Orientierung der Gebäude.

Die Analyse zur Übertragbarkeit der Konzepte wird im 6. Kapitel beschrieben. Beispielhaft wurde die Anwendung für Sanierungen von nicht energieeffizienten Gebäuden unter Berücksichtigung der Wechselwirkungen verschiedener Maßnahmen durch weitere Simulationen erfasst.

Im letzten Kapitel wird die entwickelte Methode als Leitfaden für Architektinnen und Planerinnen dargestellt. Die wichtigsten Ergebnisse der beispielhaften Untersuchung werden zusammengefasst und bewertet und weiterer Forschungsbedarf aufgezeigt. Die Arbeit schließt mit einem Ausblick auf das Potential, welches sich aus dem Studium traditioneller Bauweisen erschließen kann.

Das Ziel ist keineswegs ein Kopieren des Alten. Dies ist durch die veränderten Ansprüche und Bedingungen in den meisten Fällen ohnehin nicht möglich. Beispielsweise haben traditionelle Kulturen wechselnde Nutzungen von Räumen im Tages- oder Jahresverlauf als Teil ihres Alltags entwickelt, und sich so an lokale Parameter adaptiert - eine Anpassung an einen Lebensraum, der untrennbar

mit dem sozialen und wirtschaftlichen Umfeld einer Gemeinschaft verbunden ist. Die Idee ist daher ein sensibles Anwenden der Konzepte, die übertragbar sind, ein Einfließen von Kenntnissen in eine moderne Planung. Traditionelle Bauweisen zu betrachten heißt, einen ganzen Katalog an Ideen und Lösungsmöglichkeiten vor sich aufzuschlagen, der Planer muss sich nur dessen bedienen (vgl. Frey 2010:64).

Da wir heute unsere Gebäude nicht mehr nach der „trial and error“ Methode optimieren müssen, und uns Planungshilfen wie z.B. Simulationsprogramme zur Verfügung stehen, können wir im Voraus planen und abschätzen, welche Maßnahmen voraussichtlich zu dem gewünschten Ergebnis führen. Lokale Gegebenheiten können wissenschaftlich untersucht und ausgewertet werden. Die Ergebnisse lassen sich über entsprechende Programme in Planungen integrieren oder diese sogar maßgeblich bestimmen (vgl. Hönger 2009:10ff).

Thematisch liegt diese Arbeit zwischen den Bereichen der Architektur und der Bauphysik. Sie hatte das Ziel eine Methode zu entwickeln, die für Planerinnen und Architektinnen leicht verständlich darstellt, wie ein Standort so analysiert werden kann, dass die Ergebnisse in die Planung und Umsetzung einfließen können.



## 1.4 Begriffsdefinition

Zu dem Themenbereich, in dem sich die Untersuchung bewegt besteht eine Begriffsvielfalt, die es erfordert, die Auswahl des für den Titel der Arbeit verwendeten Ausdrucks zu erläutern.

Es wurde der Begriff *traditionelle Bauweise* ausgewählt, welcher üblicherweise sowohl in Bezug auf verwendete Materialien als auch auf die Konstruktionen benutzt wird. *Traditionelle Bauweisen* werden über einen langen Zeitraum verwendet und von Generation zu Generation weitergegeben. Die Bauwerke werden nicht von speziell dafür ausgebildeten Fachleuten errichtet, sondern von einer Gruppe wie z.B. den Einwohnern eines Dorfes, und sind nicht mit dem Ziel einer Gestaltungsabsicht entworfen. Sie stellen eine Übersetzung der Tradition einer Gruppe, ihrer Bedürfnisse und Werte in etwas physisch Vorhandenes dar. Modifikationen entstehen als Anpassungen an veränderte Bedingungen. *Traditionelle Bauweise* beschreibt daher die Objekte, die untersucht wurden, am treffendsten.

Der Begriff *traditionelle Bauweise* kann assoziiert werden mit einer einfachen und schlichten *Architektur*. Doch ist dies nicht immer der Fall, denn auch in *traditioneller Bauweise* haben sich aufwändige und komplexe Bauten entwickelt (vgl. Noblem 2007:1; Rapoport, 1969:2). Schlichte Varianten dieser Bauwerke wurden häufig jedoch gar nicht als Architektur betrachtet. Diese stand im Gegensatz zu der Masse der Bevölkerung, die in

weniger aufwändigen traditionell gebauten Häusern lebte, nur einer kleinen Elite als Ausdruck von Macht und Status zur Verfügung (vgl. Behling, 1996:44). Den Begriff *traditionelle Architektur* zu benutzen ist daher in diesem Zusammenhang irreführend.

Im angelsächsischen Raum ist der Begriff *vernacular architecture* weit verbreitet. Auch dieser bezeichnet Bauten, die ohne einen Baumeister aus lokalen Materialien von der Gemeinschaft so errichtet werden, wie es die Älteren an die Jüngeren weitergeben. Paul Oliver diskutiert die Verwendung des Begriffs *vernacular architecture* in „Shelter and Society“ (1969), welcher schon seit 1858 verwendet worden sei. Er zeigt auf, dass der vom lateinischen *vernaculus* abstammende Begriff zwar treffend ist, diskutiert aber die Kombination mit *architecture* ebenfalls kontrovers (vgl. Oliver, 1969:10f). Wird *vernacular* ins Deutsche übersetzt werden häufig die Begriffe *traditionell* oder *einheimisch*, selten auch *vernakulär* verwendet (*vernaculus* (lat.) = einheimisch) (vgl. AISayyad, 2006:xvii).

Auch wenn aus dem englischen *vernacular* häufig mit *einheimisch* übersetzt wird, ist dieser Begriff nicht wirklich treffend, da er üblicherweise für die Lebewesen einer Region verwendet wird. Dies gilt ebenso für den gelegentlich gebrauchten Ausdruck *autochton*, welcher am Fundort vorkommende Tiere, Pflanzen und Gesteine bzw. Volksgruppen bezeichnet (Kraif: 2010). Die Übersetzung *vernakulär* wird in der deutschen Sprache sehr

selten verwendet (Ebd.: 2010) und ist daher in dieser Arbeit nicht eingesetzt worden.

## 1.5 Stand der Forschung

Informationen zu traditionellen Bauweisen der ganzen Welt sind in etlichen Werken zusammengestellt worden. Zu nennen ist in diesem Kontext die besonders umfangreiche, 1997 veröffentlichte „Encyclopedia of Vernacular Architecture of the World“ von Paul Oliver. In diesem Werk wird die Vielfalt der traditionellen Bauweisen und ihre Anpassungen an die Gegebenheiten ihrer Standorte besonders deutlich.

### 1.5.1 Forschungslücke

Leider zeigt der genannte Beitrag, wie auch so viele andere Forschungsergebnisse aus diesem Themenbereich keinen direkten Bezug zur heutigen Zeit auf. Vorschläge, wie die Konzepte der Anpassung heute zu nutzen wären, sind daher rar. Doch die Erkenntnisse, die von Menschen an einem Ort über lange Zeiträume hinweg gewonnen wurden, sind so wertvoll und enthalten so viele kreative Lösungen, dass ein großes Potential vergeudet wird, wenn keine Versuche unternommen werden um von diesem Wissen zu profitieren. In der Forschung fehlt jedoch die Brücke zwischen der Geschichtsforschung, welche die Zustände beschreibt und herleitet, und den Umsetzungsmöglichkeiten in unsere heutige Zeit (vgl. Asquith, 2006:4f). Ein Grund dafür mag darin liegen, dass das Ableiten von Konzepten durch die Erforschung der traditionellen Bauweise einer Region kein reines Kopieren ist (vgl. Oikonomou 2008: Kapitel 4), sondern eine Bewertung oder auch Anpassungen erfordert, um

herauszufinden, welche Konzepte auf heute übertragbar sind.

Dabei ist der Zusammenhang in vielen Fällen leicht zu finden. An der HafenCity Universität Hamburg wurden im Fach Architektur im Rahmen von Bachelor Thesis Arbeiten in unterschiedlichen Klimaregionen sowohl best-practice Beispiele als auch die jeweilige traditionelle Architektur untersucht. Die daraus gewonnenen Erkenntnisse flossen von Anfang an in den Entwurfsprozess ein. Dieses Vorgehen führte zu erfolgreichen und geschickten Konzepten für die Planung von Null-Kühlenergie-Gebäuden (Dietrich, 2012).

Auch Weber und Yannas (2014:2) bewerten das Potential, das im Studium traditioneller Bauweisen liegt, sehr hoch. Sie führen zwei wichtige Gründe dafür an, dass wir auch heute noch von traditioneller Bauweise lernen können. Wir hätten heute zwar umfangreichere Kenntnisse über bauphysikalische Zusammenhänge, eine größere Auswahl an verfügbaren Baumaterialien und die Möglichkeiten der Simulationssoftware, die ein gutes Verständnis für die Auswirkungen auf die Umwelt ermöglichen. Doch stellen traditionelle Gebäude ein großes Forschungsfeld dar, in dem die Anwendung passiver Maßnahmen nicht als technischer Zusatz, sondern als integraler Gebäudebestandteil untersucht werden könne. Gegenwartsarchitektur biete vor allem in Entwicklungsländern warmer Klimate diese Möglichkeit selten, da die künstliche

Klimatisierung als Allheilmittel willkürlich eingesetzt werde. Den zweiten Grund sehen sie darin, dass aus dem Studium der traditionellen Bauweise neue Ideen und Projekte entstünden. Es sei ein Sprungbrett und biete Raum für Innovationen und nicht für Imitationen.

Die Planung von Null- oder Plus-Energiegebäuden kann also durch das Studium der traditionellen Bauweise an einem Ort wirkungsvoll unterstützt werden. Und dies ist auch zwingen notwendig, denn es ist sicher, dass die fossilen Brennstoffe, die wir noch immer als größten Anteil an unserer Energieversorgung nutzen, endlich sind. Nicht sicher ist jedoch, ob wir tatsächlich in der Lage sein werden, bei gleichem Energiekonsum den Bedarf auf Dauer durch erneuerbare Energiequellen zu decken. Das Anwachsen der Erdbevölkerung und der proportional zur Wirtschaftsleistung steigende Energieverbrauch (vgl. Luebke, 2008:12) lassen das unwahrscheinlich erscheinen. Der Ansatz, den Energiebedarf von Gebäuden durch eine geschickte Planung gering zu halten, ist zwar simpel, doch leider zeigt die Praxis, dass eine Tendenz dazu besteht, ungünstige Planungen nachträglich mit technischen Errungenschaften zu „verarzten“ (vgl. Hönger, 2009:9).

So besteht die Forschungslücke also darin, dass es zwar zahlreiche Untersuchungen gibt, welche die Konzepte der passiven Klimatisierung von traditionellen Bauten erforscht haben, diese jedoch wenig in praktische Handlungsempfehlungen

umgesetzt werden (vgl. Vissilia, 2009:1150). Auf der anderen Seite beruhen die existierenden Leitfäden für unterschiedliche klimatische Regionen nicht unbedingt auf dem Wissen, was vielleicht für einen ganz speziellen Ort schon vorhanden war. Diese Lücke wird durch die in dieser Arbeit entwickelte Methode geschlossen. Sie stellt den Brückenschlag dar, der notwendig ist um die Ergebnisse des Studiums traditioneller Bauweise in unserer heutigen Zeit anwenden zu können.

Die zur Entwicklung herangezogene beispielhafte Untersuchung beschränkt sich auf Wohnhäuser, da diese weltweit etwa 90% des gebauten Raumes darstellen (Oliver, 2003:15) und einen großen Anteil des durch den Menschen verursachten Energieverbrauchs ausmachen.

### 1.5.2 Konzepte zur Energieeffizienz von Gebäuden

Die Ölkrise von 1973 führte der Welt vor Augen, dass Ressourcen endlich sind und markiert den Beginn für viele Maßnahmen, die alle dazu führen sollten, weniger Energie zu verbrauchen. Im Bausektor war das häufigste Vorgehen, die Gebäudehülle zu optimieren, um den Heizenergiebedarf zu senken. Die Maßnahmen, die nach diesem Ereignis ergriffen wurden, bauten jedoch in keiner Weise auf die Konzepte auf, die sich am jeweiligen Standort schon bewährt hatten.

Allard (1998:1f) führt dazu an, dass sich nach 1973 sehr schnell sehr viel getan habe. Bis dahin sei die Energie so billig gewesen, dass keine Rücksicht auf den Verbrauch durch Heizen und Kühlen gelegt wurde. Nun mussten schnell Lösungen her, um Gebäude sparsamer zu machen. Dämmung und Erhöhen der Luftdichtheit der Fassade seien zwar zunächst erfolgreich gewesen, um den Energiebedarf zu senken, produzierten aber auch Probleme mit dem Innenraumklima durch zu geringen Luftaustausch. Erst in den 1980er Jahren habe sich eine Sensibilität dafür entwickelt, dass das Gebäude in erster Linie den Komfort der Nutzer befriedigen sollte und zusätzlich auch energieeffizient sein müsse.

Auf althergebrachte Konzepte zur Senkung des Energieverbrauchs wurde nicht zurückgegriffen. Die Lösungsansätze waren üblicherweise technikorientiert und nicht auf lokale vorhandene Kenntnisse über traditionelle passive Maßnahmen gestützt.

#### ◇ Solararchitektur in Nordgriechenland in der Antike

Bezogen auf die Region, die für die beispielhafte Untersuchung ausgewählt wurde gibt es zahlreiche Belege über Erkenntnisse zum klimaangepassten Bauen. Eine Rückbesinnung in die Antike führt vor Augen, dass schon der Philosoph Sokrates wie folgt zitiert wird:

„(8) Und von Häusern meinte er, daß sie gleichzeitig schön und nützlich seien, und es schien mir so, als ob er damit einen Hinweis geben wollte, wie

*man Häuser bauen müsse. Er stellte dabei folgende Betrachtungen an: Wer ein Haus haben will, wie es sein soll, muß der es so einrichten, daß das Wohnen darin besonders angenehm und besonders zuträglich sein wird? Wenn man dem dann zustimmte: Ist es nun nicht angenehm, im Sommer ein kühles Haus zu haben, im Winter aber ein warmes? (9) Wenn er auch darin Zustimmung fand: Scheint nun nicht bei den gegen Süden liegenden Häusern im Winter die Sonne in die Hallen hinein, während sie im Sommer über uns selbst und die Dächer hin weggeht und Schatten spendet? Muß man also nicht, wenn dies derart in der rechten Weise geschehen soll, die Häuser auf der gegen Süden zu gelegenen Seite höher bauen, damit im Sommer die Sonne nicht gehindert wird, die nach Norden gelegene Seite dagegen niedriger, damit die kalten Winde nicht eindringen können? (10) So dürfe denn, um es kurz zu sagen, die Wohnung sicherlich die angenehmste und schönste sein, wo man zu allen Jahreszeiten selbst am angenehmsten untergebracht ist und sein Hab und Gut am sichersten unterstellen kann.“*

(Xenophon und Jaerisch, 1977: 203–205)

Die intensive Nutzung der Sonne zum Heizen durch eine Orientierung der Häuser zur Optimierung der solaren Gewinne, entstand im 4. Jahrhundert v. Chr. vermutlich vor allem durch Rohstoffverknappung (Brennholz). Dies hatte eingreifende Auswirkungen auf den Städtebau. Ganze Städte wurden so konzipiert, dass alle Gebäude zur Sonne hin

ausgerichtet stehen konnten. Die gesamte Planung zielte darauf ab, solare Gewinne im Winter zu maximieren und zugleich eine Überhitzung im Sommer zu vermeiden.

Konzepte zur passiven Klimatisierung von Gebäuden waren im Untersuchungsgebiet demnach schon lange bekannt. Die Anlage der Städte und Konzeption der Häuser ist gut erforscht und dokumentiert. Da die Lebensbedingungen, verfügbare Baumaterialien und äußere Faktoren in der Antike jedoch stark von den heutigen abweichen, sind die Möglichkeiten der Übertragbarkeit dieser Kenntnisse in unsere Zeit als gering einzustufen. Aus diesem Grund wurden für die exemplarische Untersuchung Gebäude aus jüngerer Zeit herangezogen, welche in der Oberstadt von Thessaloniki in der osmanischen Zeit bis zum Beginn des 20. Jahrhunderts gebaut wurden. Diese Wohnhäuser werden im 2. Kapitel detailliert beschrieben.

#### ◇ Weitere Beiträge zu energieeffizienter traditioneller Bauweise

Die so erfolgreiche Ausstellung „Architecture without Architects“ von Bernard Rudofsky im Jahre 1964 wanderte noch ein ganzes Jahrzehnt um die Welt; das gleichnamige Buch war ein großer Erfolg. Rudofsky zeigte traditionelle Bauweisen in einer Art, die den Menschen neue Blickweisen auf das eigene gebaute Umfeld eröffneten (vgl. Welzig, 2005). Er stellte dar, wie viel wir von der Architektur lernen können, die ohne Fachleute entstanden ist, denn die

nicht ausgebildeten „Baumeister“ hatten ein großes Talent, ihre Gebäude in die Umgebung einzupassen. Als Beispiel werden u.a. die Klosteranlagen auf dem Berg Athos genannt, die sich in die komplizierteste Landschaftsform einfügen.

Rudofsky führt weiter an, dass viele in den letzten Jahren erfundene Technologien (bezogen auf die 1960er Jahre, Anm. d. Verf.) wie Vorfertigung, Standardisierung von Baukomponenten, flexible und bewegliche Strukturen, auch Fußbodenheizung, Klimatisierung, Tageslichtkonzepte oder Aufzüge ein alter Hut seien. Insgesamt ist sein Blick auf die Architektur jedoch beschreibend und nicht direkt mit dem Heute verbunden. Er regt zum Nachdenken und zu kritischer Betrachtung an, konkrete Vorschläge zur Nutzung dieses Wissens aber fehlen.

Die Brücke zu der realen Anwendung fehlt auch in dem Beitrag von Chrisomallidou (2001:250), der bezogen auf den Standort Thessaloniki Handlungsempfehlungen für die Umsetzung von Energiesparmaßnahmen an Gebäuden entwickelt hat. Er stellt zwar dar, dass das Wissen existiere, um Probleme in Einklang mit der Natur zu lösen, zeigt dann aber in den konkreten Empfehlungen diese nicht auf. Ebenso Foster (1996:9), der überzeugend argumentiert, dass viele traditionelle Bauten zeigen, wie mit minimalen Mitteln ein maximaler Nutzen erreicht werden könne, dann aber keine Methode vorstellt, wie dies auch heute zu erreichen sei.

Bezogen auf das Untersuchungsgebiet dieser Arbeit finden sich zahlreiche Aussagen darüber, dass man von der traditionellen makedonischen Bauweise viel lernen kann (vgl. Andreadaki, 1989:193; Pelekanos, 1986:9). Oikonomou (2007, 2008, 2009, 2011) beschreibt ausführlich Konzepte der Anpassung an das lokale Klima von Gebäuden in Nordgriechenland und behandelt Themen wie Orientierung, Tageslicht und Materialien. Er zeigt jedoch ebenso keine Vorschläge zur konkreten Anwendung dieses Wissens auf.

#### 1.5.3 Kritische Stimmen

Trotz aller Lobreden auf die traditionellen Bauwerke gibt es viele Gründe, jeden einzelnen Fall kritisch zu betrachten. Eine lokale Bauweise kann auch daraus entstanden sein, dass es einfach keine anderen Möglichkeiten gab, als ebenso zu bauen. Vielleicht ist eine Konstruktion aufgrund einer geringen Auswahl an Baumaterialien entstanden, ist aber daher nicht zwingend nachhaltig (vgl. AlSayyad, 2006: xvii). Ob also Konzepte der Anpassung an einen Standort tatsächlich ressourcen- und energieeffizient sind und sich eignen könnten, um in der heutigen Zeit angewendet zu werden, muss jeweils geprüft werden.

Häufig wird jedoch unreflektiert das Traditionelle gleichgesetzt mit etwas Nachhaltigem. Roestvik (2011) diskutiert in seinem Aufsatz „The Vernacular, the Iconic and the Fake“ die Frage, ob „vernacular“

automatisch „sustainable“ sei, wie es häufig dargestellt werde, und kommt zu dem Schluss, dass dies nicht immer zutrifft.

Kuma (2011) führt dazu in „Natural Architecture“ an, auch traditionelle Baumaterialien seien nur so nachhaltig wie sie produziert werden: Holz beispielsweise nur dann, wenn der Wald nachhaltig bewirtschaftet werde. Dem hinzuzufügen wäre noch, dass ein nachhaltiger Umgang mit der Ressource Holz nicht nur die nachhaltige Bewirtschaftung, sondern auch eine entsprechende Verwendung beinhalten muss. Das Bauholz sollte so eingesetzt werden, dass es gesund bleibt, repariert werden kann, falls ein Schaden entsteht und es nach seiner aktuellen Nutzung noch weiterverwendet werden kann.

Eine umfassende kritische Betrachtung zu diesem Thema liefern AISayyad und Arboleda (2011) in „The Sustainable Indigenous Vernacular: Interrogating a Myth“. Diese stellen vier Nachhaltigkeitsprinzipien für traditionelle Bauweisen dar, welche als Ergebnis ihrer Recherchen schon seit Vitruv immer wieder genannt werden und untersuchen, ob diese tatsächlich so zeitlos sind, wie immer behauptet wird:

### 1. Nachhaltigkeitsprinzip:

Geeignetes Material und Bauplatz - einheimische Gebäude und Siedlungen nutzen in nachhaltiger Weise die lokal verfügbaren Baumaterialien

AISayyad und Arboleda legen dar, dies setze voraus, dass erstens tatsächlich ausreichend geeignete Materialien in erreichbarer Nähe vorhanden und zweitens diese auch dauerhaft verfügbar sind. Drittens müssen sie tatsächlich eine angepasste Bauweise ermöglichen.

Es kann aber beispielsweise sein, dass die Materialien nur ausreichend vorhanden waren, indem der Ort der Siedlung in bestimmten Abständen gewechselt und dem alten Platz eine Regeneration erlaubt wurde. Ist das nicht mehr der Fall, ist die Siedlungsweise möglicherweise nicht mehr nachhaltig in Bezug auf Bauplatz und Materialien.

Es muss also in jedem Fall genau geprüft werden, ob die Bauweise an dem Standort tatsächlich so gewünscht war, oder ob sich aus Zwängen heraus etwas entwickelt hat, was an andere Rahmenbedingungen nicht angepasst wurde.

Ein Zitat von Behling (1996:44) im Kapitel „Autochtones Bauen und Architektur, Eine Frage der Bauprinzipien“ macht deutlich, wie dieses Nachhaltigkeitsprinzip häufig sehr unkritisch dargestellt wird:

*„Einfache, aber geschickte Antworten auf die Herausforderungen - Hitze Kälte, Regen oder Wind - sind entstanden. Diese Lösungen wurden notgedrungen auf der Grundlage eines beschränkten Sortiments an - allesamt erneuerbaren -*

*Baumaterialien entwickelt, die an Ort und Stelle zur Verfügung standen.“*

### 2. Nachhaltigkeitsprinzip:

Klima - die Gebäude sind an das regionale Klima angepasst

Dazu führen AISayyad und Arboleda an, dass dies ggf. durch den Klimawandel nicht mehr der Fall sein könnte.

Weitere Argumente zu diesem Punkt werden nicht ausgeführt. Es ist jedoch in jedem Einzelfall zu prüfen, ob die Gebäude möglicherweise schon ursprünglich gar nicht an das Klima angepasst waren.

### 3. Nachhaltigkeitsprinzip:

Sozio-Ökonomische Vorteile - Anpassung an Bevölkerung, Ressourcen und Umwelt

Es wird argumentiert, dass es zwar ökonomisch vorteilhaft sei, wenn die Häuser aus häufig vor Ort verfügbaren und kostenlosen Materialien wie Lehm oder Stroh selbst gebaut werden. Gemeinsames Bauen stärke zudem die sozialen Bindungen. Ein Problem sei heute jedoch, dass viele Techniken sehr arbeitsintensiv sind und nur in der traditionellen Sozialstruktur funktionierten. Daher finden sich viele traditionell gebaute Gebäude heute nur noch in veränderten Nutzungen als Museum, Konferenzzentrum oder Hotel. Die Menschen, die diese



Bauweise ursprünglich genutzt haben, wohnen in Häusern, die sich schnell aus fertigen Materialien wie Blech, Brettern oder Betonteilen errichten lassen.

So mag das Nachhaltigkeitsprinzip zwar in der ursprünglichen Sozialstruktur funktioniert haben, doch veränderte Bedingungen können dazu geführt haben, dass die notwendigen Voraussetzungen heute nicht mehr gegeben sind.

#### 4. Nachhaltigkeitsprinzip:

Anpassungsfähigkeit - die Gebäude können leicht an geänderte Bedingungen angepasst werden

Dies wird von AISayyad und Arboleda sehr in Frage gestellt. Aus ihrer Sicht können die traditionellen Häuser nicht an die heutigen Bedürfnisse angepasst werden, wenn sich die Lebensbedingungen einer traditionellen Gemeinschaft stark verändern.

Hier werden jedoch nur die Gebäude als Ganzes betrachtet und die Möglichkeiten sie zu erweitern, zu verkleinern, anzupassen. Es wird jedoch nicht diskutiert, ob die Bau-Konzepte auf neue Gebäude übertragen werden können.

Diese Diskussion zeigt deutlich die Möglichkeiten und Grenzen für das Übertragen von Konzepten traditioneller Bauweise. Über das Studium der Gebäude lässt sich sehr viel lernen, es dürfen jedoch nicht alle Konzepte uneingeschränkt und

unreflektiert übernommen werden. Es ist immer kritisch zu hinterfragen, was sinnvoll angewendet werden kann, ob es aus dem Zusammenhang gerissen überhaupt noch funktioniert und ob Konstruktionen, Materialien oder Ausführungen verändert, angepasst oder modifiziert werden können.

Ein weiteres Beispiel für die Notwendigkeit der kritischen Auseinandersetzung liefert Hassan Fathy. Er führt an, dass die im Tropenbau verwendeten Claustra Elemente aus Beton oder Ziegel, die einer Glasfassade vorgestellt werden, zwar versuchen, die Funktion der ursprünglichen Bauweise mit Matten zu kopieren und ebenso gleichzeitig Belüftung und Verschattung zu gewährleisten. Das Ergebnis sei jedoch weniger wirkungsvoll, da sich die Elemente aufheizen und die Wärme an die Luft, die in das Gebäude fließt, weitergeben, sowie die Sonnenstrahlen ins Innere des Raumes reflektieren. Fathy stellte die Forderung auf: *„Alle traditionellen Lösungen sollten wissenschaftlich bewertet werden, bevor man sie aufgibt und ersetzt“*, denn die traditionelle Architektur basiere im Gegensatz zur modernen, akademischen Architektur auf wissenschaftlichen Theorien. *„Jetzt ist die Zeit gekommen, die Gräben zwischen den unterschiedlichen Architekturansätzen zu überbrücken“* (Fathy 1987:36).

## 2 Die traditionellen Wohnhäuser in der Oberstadt von Thessaloniki

Zur Beantwortung der Forschungsfrage und Bearbeitung der weiteren sich daraus ergebenden Aufgaben, wurden im Rahmen dieser Arbeit exemplarisch Wohngebäude in der Oberstadt von Thessaloniki in Nordgriechenland untersucht. Dazu mussten für den gewählten Ort die Konzepte zur Anpassung an die örtlichen Gegebenheiten herausgearbeitet und die Übertragbarkeit der Ergebnisse geprüft werden. Eine für diesen Zweck entwickelte Methode wird im Abschluss der Arbeit dargestellt. Sie ist so konzipiert, dass sie auch für andere Gebäudetypen und in anderen Regionen angewendet werden kann.

Die Wahl der Gebäude war für die Untersuchung von großer Bedeutung, da die abgeleiteten Konzepte darauf basieren, dass die Bauweise tatsächlich an die lokalen Gegebenheiten angepasst ist. Da es möglich sein kann, dass die Anpassung an das lokale Klima nicht gegeben ist - sollte beispielsweise die Baukonstruktion ein Import aus einer anderen Region sein - wurde die Entwicklung der Häuser in Thessaloniki zunächst in einem größeren Zusammenhang betrachtet.

Das folgende Kapitel beginnt daher mit einer allgemeinen Einführung zu dem als osmanisches Haus bezeichneten Wohngebäude. Es werden Zusammenhänge und Unterschiede zu anderen Häusern auf dem Balkan und im Nordwesten der Türkei aufgezeigt. Diese Recherchen dienen dem Einschätzen der Einflüsse auf die Bauweise durch andere Faktoren, als das Klima. Denn auch wenn die

klimatischen Gegebenheiten immer einen großen oder sehr großen Einfluss auf die Bauweise haben, nehmen ebenso Sozial- und Gesellschaftsstruktur, die wirtschaftliche Lage, das Vorhandensein von Ressourcen und Naturereignisse wie beispielsweise Erdbeben Einfluss auf die Bebauung (vgl. Babalis, 2003; Fathy, 1986:4; Behling, 1996:44; Schütze, Willkomm, 1989:4). Der anschließenden Darstellung der untersuchten Wohnhäuser, als lokale Variante des osmanischen Hauses in der Oberstadt Thessalonikis, geht eine kurze Beschreibung der Geschichte der Stadt voraus.

Im nächsten Abschnitt des Kapitels werden die Dokumentation und Analyse der verwendeten Baustoffe dargestellt. Diese sind bei einer klimaangepassten Bauweise ein wichtiger Faktor für die passive Klimatisierung. Des Weiteren wurde im Zusammenhang mit dem Thema Baumaterialien die lokale Verfügbarkeit der Ressourcen betrachtet.

Weitere Abschnitte behandeln den Einfluss der Nutzerinnen, das Klima im Untersuchungsgebiet, verwendete Klimadatensätze und Komfortmodelle. Das Ende des zweiten Kapitels bildet eine vergleichende Betrachtung Dreier Standorte außerhalb Thessalonikis, welche im weiteren Bereich der untersuchten Region liegen. Die dort vorhandenen traditionellen Wohngebäude wurden auf Unterschiede und Gemeinsamkeiten untersucht.



Abb. 003. Traditionelle Bebauung in der Oberstadt von Thessaloniki (Anastasiadis, o.J.: Abb. 24)



Abb. 004. Traditionelle Bebauung in der Oberstadt von Thessaloniki (eigene Aufnahme, 2010)

## 2.1 Die Entwicklung des Wohnhauses in der untersuchten Region

### 2.1.1 Das osmanische Haus - Verbreitungsgebiet

In Abbildung 005 wird das maximale Verbreitungsgebiet des osmanischen Hauses innerhalb des osmanischen Reiches dargestellt. Außerdem sind die Städte Veria und Arneia welche für die vergleichende Betrachtung herangezogen wurden, bezeichnet. Das ebenfalls einbezogene Dorf Vrastama befindet sich südlich von Arneia. Thessaloniki und die untersuchte Region waren ab dem 15. Jahrhundert bis zum Ende der Balkankriege im Jahre 1913 Teil des osmanischen Reiches.



Abb. 005. Verbreitungsgebiet des osmanischen Hauses innerhalb des osmanischen Reiches: dunkelgraue Fläche (nach: Cerasi, 1998:129)

### 2.1.2 Die Entwicklung des osmanischen Hauses

Die Herkunft eines als *osmanisches Haus* bezeichneten Wohngebäudes geht mindestens zurück in das 17. Jahrhundert. Es ist anzunehmen, dass es sich als multiethnisches Produkt unterschiedlicher Bautraditionen auf dem Balkan entwickelt hat (Cerasi, 2004:116). Vor dem 17. Jahrhundert bauten die Menschen ihre Häuser noch größtenteils selbst, ab dann entwickelten sich Gilden, in denen nicht akademisch ausgebildete Baumeister auf das Wissen der Alten und ihre eigene Erfahrung bauten (Oliver, 1997b:1484).

Der Balkan ist ein Schmelztiegel der Kulturen und lag im Laufe der Geschichte immer wieder im Zentrum unterschiedlicher politischer Interessen. Er wurde im 15. Jahrhundert nach und nach durch die Osmanen erobert. Schließlich war die gesamte Region ein Teil des osmanischen Reiches. Bis weit in das 17. Jahrhundert hinein war der osmanische Einfluss auf die Bauweise sehr stark. Erst ab Ende dieses Jahrhunderts, mit dem Nachlassen der Kraft des osmanischen Reiches, welches durch Auseinandersetzungen mit den europäischen Mächten geschwächt wurde, konnten sich lokale Komponenten wieder stärker durchsetzen. Daher sind ab dem 18. Jahrhundert ein- bis zweigeschossige Gebäude mit einer langen Fassade und offenen Balkonen belegt, die jeweils regionale Besonderheiten erkennen lassen. Diese Bauweise bestand bis weit

in das 19. Jahrhundert hinein. Mit dem Zerfall des osmanischen Reiches in Einzelstaaten wurde bis zu Beginn des 20. Jahrhunderts der westeuropäische Einfluss immer stärker. Dies brachte Veränderungen mit sich, die dazu führten, dass es mit dieser Bautradition zu Ende ging (vgl. Oliver, 1997b:1483ff; Cerasi et al., 2004:116ff).

#### ◇ Das osmanische Haus im Gebiet der heutigen Türkei

Die ursprüngliche Idee des osmanischen Hauses, findet sich in der Grundrissaufteilung des ländlichen türkischen Wohnhauses. Für Männer und Frauen bestanden getrennte Eingänge, getrennte Treppen und getrennte Räume. Die privaten Räume (*oda*) wurden über eine zentrale Diele (*sofa*) erschlossen. Dies führte zu Grundrissen, die eine klare Dreiteilung der Häuser zeigen. An einen repräsentativen Raum, grenzten auf einer Seite die Räume für Frauen und auf der anderen Seite die Räume für Männer an. Die Diele war im Grundriss entweder mittig, seltener auch seitlich angeordnet (Vogt-Göknil, 1965:140). Dadurch entstanden unterschiedliche Grundrisse, welche U-förmig, langgezogen oder kreuzförmig sein konnten (Ebd.:141). Varianten bei denen die zentrale Diele als offene Galerie (*hayat*) im Obergeschoss ausgeführt wurde, über die man zu den Wohnräumen gelangen konnte, werden als *Hayat-Haus* bezeichnet.

Die privaten Räume waren nicht, wie in Westeuropa üblich, bestimmten Funktionen zugeordnet, sondern

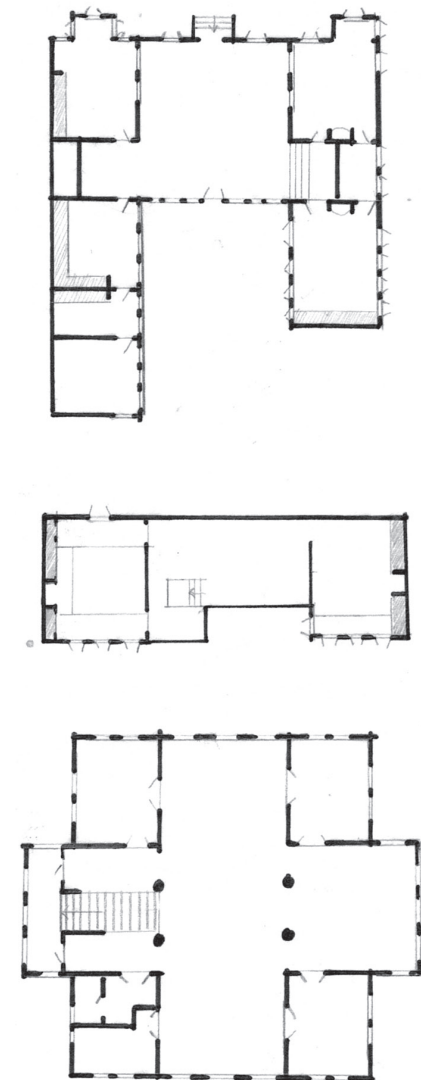


Abb. 006. Osmanisches Haus, beispielhafte Grundrisse. U-förmig (o.), langgezogen mit offenem hayat (m.) oder kreuzförmig (u.) (eigene Zeichnungen nach: Eldem, 1955: 110, 115, 111)



als Mehrzweckzimmer konzipiert, welche als Ess-, Wohn- oder Schlafraum genutzt wurden.

Diese Aufteilung der Räume, welche nicht durch die Nutzung, sondern die Sozialstruktur der Gesellschaft bestimmt wurde, wird mit der Herkunft der Menschen aus dem Nomadentum erklärt. Sie entsprach der Verteilung in einzelne Einheiten in die jeweiligen Zelte. Das wichtigste zentrale Zelt (im Wohnhaus: *sofa*) war ein Raum zur Zusammenkunft der Männer, weitere Zelte (im Wohnhaus private Räume: *oda*) befanden sich darum angeordnet und boten Raum für unterschiedliche Arbeiten, Entspannung und soziale Aktivitäten (Küçükerman, 1996:45ff).

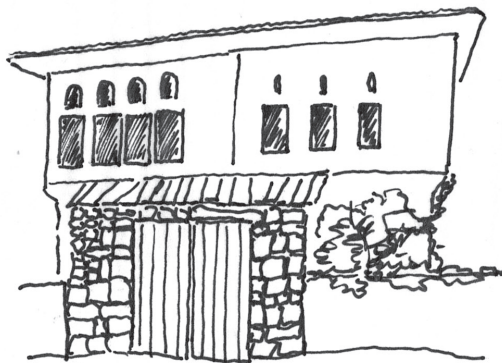


Abb. 007. Vertikale Teilung eines Gebäudes in Anatolien in eine Winterhälfte (rechts) mit kleinen Fenstern und eine Sommerhälfte (links) mit größeren Öffnungen (eigene Zeichnung nach: Küçükerman 1996:44)

Die Zeiträume für die Nutzung der Räume waren nach der Lage innerhalb des Gebäudes abgestimmt. Zonen, die im Winter gegen Kälte und Wind geschützt werden sollten, lagen im Erdgeschoss. Dort waren die Decken niedriger, die Räume schmalere und die Öffnungen nach außen kleiner. Die Sommerräume lagen im Obergeschoss. Sie waren so orientiert, dass sie gut durchlüftet wurden, die Baukonstruktion war leicht, die Decken hoch und die Öffnungen groß. Diese Aufteilung erfolgte grundsätzlich in ein Erdgeschoss für den Winter und ein, seltener zwei Obergeschosse für den Sommer. Nur in Einzelfällen sind Abweichungen bekannt (siehe Abb. 007).



Abb. 008. Verschiebbare Verschattungselemente im osmanischen Stil werden in Thessaloniki von Klappläden (re. im Bild) verdrängt (aus: Moutsopoulos, 1979:39)

◇ Das Stadthaus als Variante des osmanisches Hauses

Bis in das 18. Jahrhundert entwickelte sich im Gebiet der heutigen Türkei ein Stadthaus (*konak*), ein osmanisches Haus mit dem Einfluss des städtischen Raumes als lokale Gegebenheit. Es war als frei stehendes Haus am Straßenverlauf ausgerichtet und hatte einen eigenen, von einer Mauer umgebenen Garten. Das massiv aus Feldsteinen oder Ziegeln gemauerte Erdgeschoss, in dem sich die Wirtschaftsräume befanden, wurde üblicherweise durch eine mittig angeordnete Tür erschlossen. Es existierten als Variante auch *konak*, die auf dem ursprünglichen Prinzip des osmanischen Hauses beruhend, zwei getrennte Eingänge hatten.

Im Obergeschoss befand sich der repräsentative zentrale Raum (*sofa*), welcher durch einen Erker zur Straße hin in seiner Fläche vergrößert wurde. Um diesen Raum ordneten sich die weiteren Wohnräume an. Grundrissaufteilungen mit einer Galerie (*hayat*) zeigen, dass diese beim Stadthaus nicht mehr nach außen offen war, wie bei dem ländlichen Typ des türkischen Wohnhauses, sondern eine geschlossene Fassade mit Fensteröffnungen aufweist. Die Fassaden waren, wenn möglich, so gegliedert, dass bei einer gleichmäßigen Dreiteilung das mittlere Drittel als Erker in den Straßenraum ragt. Die Fenster im Obergeschoss waren üblicherweise einheitlich hochkant stehende Rechtecke mit einem Verhältnis von 1:2 bis 1:2,5. Wie in Abb. 008 zu sehen ist, wurden sie als Schiebefenster mit

einem oberen feststehenden Teil und nach oben verschiebbaren hölzernen Sichtschutzgittern ausgeführt (Moutsopoulos, 1979:39; Müller-Wiener, 1982:36ff; Vogt-Göknil, 1965:142f).

Der Innenraum des *sofa* war üblicherweise holzvertäfelt und hatte eine umlaufende Sitzbank. Im Bereich des Erkers ermöglichte dies den Frauen, die durch die gesellschaftlichen Regeln viel Zeit im Haus verbrachten, einen Ausblick in den Straßenraum. Das Obergeschoss wurde als holzbeplankte Fachwerkstruktur gebaut (Goodwin, 1971:435; Müller-Wiener, 1982:36–51).

Das Erdgeschoss eines *konak* passte sich an die gegebene Topografie an, die Grundrisse der Räume der oberen Geschosse waren jedoch immer rechtwinkelig. Dies brachte an der Fassade in manchen Fällen sehr interessante Erkerformen hervor (Küçükerman, 1996:50; Vogt-Göknil, 1965:143). Faktoren wie unterschiedliche Topografien oder beengte Platzverhältnisse im städtischen Raum führten zu unzähligen Varianten. Doch die Grundidee der Dreiteilung des osmanischen Hauses ist in unterschiedlichen Abwandlungen immer vorhanden.

◇ Die lokale Anpassung des osmanischen Hauses im Bereich des Untersuchungsgebietes  
Die lokale Ausprägung des osmanischen Hauses ist im Untersuchungsgebiet ab dem 17. Jahrhundert für den ländlichen Raum Nordgriechenlands belegt. Diese Gebäude standen in der Regel nach der

Himmelsrichtung und der Aussicht orientiert. Um das zu ermöglichen, wurden vor allem im ländlichen Raum die Straßenverläufe entsprechend angelegt. In Städten hingegen war dies aus der bestehenden Raumknappheit heraus nicht immer möglich.

Die Raumaufteilung folgte den Prinzipien des osmanischen Hauses. Im Erdgeschoss, welches immer eine Verbindung zum Garten hatte, fanden sich Funktionen wie Küche, Bad und Stallungen. Dieses Geschoss war abhängig vom Standort an die Topografie angepasst, so dass die Außenwände gegebenenfalls nicht parallel verliefen. Im Obergeschoss wurden jedoch immer, wie bei der Bauweise der *konak*, rechtwinklige Räume gebaut, welche sich um den zentralen Raum anordneten. Die Gebäude waren nicht unterkellert und hatten flach geneigte, mit Ziegeln gedeckte Dächer ohne Giebel und (Cerasi, 2004:199f).

Für das traditionelle Wohnhaus in Nordgriechenland werden als die drei grundlegende Elemente, die Räume des traditionellen türkischen Wohnhauses genannt. Erstens der abgeschlossene private Wohnraum, *oda*. Zweitens der *hayat*, eine nach außen offene Zone, welche die Räume eines Hauses verbindet und für unterschiedliche Aktivitäten genutzt werden kann. Er diente als verschatteter und gut belüfteter Raum im Sommer und als Pufferzone im Winter. Das dritte Element, *sofa* ist die Diele, der repräsentative Raum, welcher sowohl als Verkehrszone als auch als Aufenthaltsraum

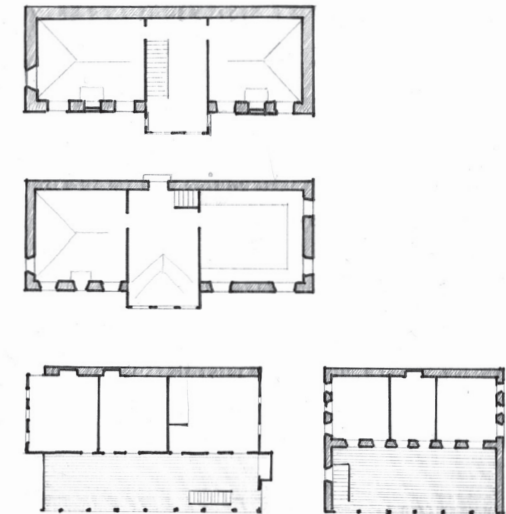


Abb. 009. Varianten der Raumaufteilung des Obergeschosses im symmetrischen Typ mit zentralem *sofa* (oben) und im *Hayathaus* (unten) (eigene Zeichnungen nach: Papaïannou, 2003:88 und 97)

dienen kann. Ist ein *hayat* vorhanden, übernimmt dieser die Funktion der Erschließung der privaten Räume. Aus diesen Elementen ergeben sich drei Haustypen. Im ländlichen Raum der Ebenen Nordgriechenlands findet sich der Typ mit einem *hayat*, in Thessaloniki und anderen Städten sowie Gebirgsregionen dominiert der symmetrische Typ mit einem zentralen *sofa*. Ein dritter Typ mit einem kreuzförmigen *sofa* ist seltener und wurde vor allem bei repräsentativen Gebäuden verwendet (Eldem, 1955:90ff; Megas, 1951:29f; Vogt-Göknil, 1965:140; Oikonomou, 2008: Kapitel 3.1). Das in dieser Untersuchung betrachtete Wohnhaus ist der Typus mit einem zentralen *sofa* (siehe Abb. 009).



◇ Weitere lokale Anpassungen des osmanischen Hauses

In der Stadt Bursa im Norden der Türkei befinden sich heute noch Gebäude, die eine weitere lokale Variante des osmanischen Hauses darstellen. Eine Besonderheit dieser Wohnhäuser war ein zum Garten hin orientierter *hayat*, welcher sich durch hölzerne (Schiebe)elemente schließen ließ. Dies erweiterte die Nutzung des Raumes, der üblicherweise nach außen hin offen war, über den Sommer hinaus in die kälteren Jahreszeiten (Oliver, 1997b:1470). Die Gebäude in Bursa wurden weniger abhängig von ökonomischen Bedingungen erbaut. Diese bestimmten zwar die Größe und Ausstattung der Häuser, nicht jedoch die Ausführung als typisches osmanisches Haus (Küçükerman, 1996: 204).

Lokale Varianten des osmanischen Hauses werden auch im Gebiet des heutigen Bulgariens beschrieben. Megas (1951:59f) führt es darauf zurück, dass die Menschen aus dieser Region immer wieder als Arbeiter nach Thrakien kamen, die dortige Bauweise mit nach Hause brachten und sie der eigenen sehr simplen vorzogen. So erklärt er, warum die Häuser in der Stadt Messimvria (heute: Nessebar) sich nicht von denen in Norden Griechenlands unterscheiden würden. Es handele sich um Gebäude mit einem massiven Erdgeschoss und einer leichten Bauweise im Obergeschoss. Die Erschließung des oberen Geschosses erfolge von außen, die Räume hätten abweichend von den vielen Ausprägungen des

osmanischen Hauses keine Erker (Ebd. 1951:64f). Es zeigen sich in diesem Fall zwar Merkmale der Konstruktion, Materialien, Kubatur und Größe welche typisch für das osmanische Haus sind. Die Erschließung und Aufteilung der Räume folgt jedoch nicht dessen Prinzipien. Die klassische Unterteilung in *sofa* und *oda* und die übliche Dreiteilung ist daher nicht vorhanden. Dies hatte in einer anderen Gesellschaft als der türkisch-osmanischen einen anderen Stellenwert und wurde offenbar nicht durch den Einfluss des osmanischen Reiches durchgesetzt.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass der Einfluss des osmanischen Reiches zur Verbreitung eines Bautypus, des osmanischen Hauses, in einem großen Gebiet geführt hat. Dieser wurde jedoch spätestens mit dem nachlassenden Einfluss des osmanischen Reiches zu vielen regionalen Ausprägungen einer Bauweise modifiziert. Eine Variante ist in der Oberstadt von Thessaloniki erhalten geblieben. Sie wurde für diese Untersuchung als Beispiel herangezogen, um Konzepte für die lokale Anpassung an die Gegebenheiten zu studieren.

## 2.2 Das Wohnhaus in der Oberstadt von Thessaloniki

Nachdem im vorigen Abschnitt das osmanische Haus in einem größeren Zusammenhang erläutert wurde, werden nun nach einem geschichtlichen Abriss der Entwicklung der Stadt Thessaloniki die Eingrenzung des Untersuchungsgebietes und die dort vorhandene Bebauung beschrieben.

Das Areal der exemplarischen Untersuchung, mit der Bebauung durch traditionelle Wohnhäuser in der Oberstadt Thessalonikis, liegt auf einem nach Süden hin zum Meer abfallenden Hang oberhalb der Innenstadt (siehe Abb. 010). Im Bereich der Oberstadt (dargestellt in Abb. 015) befinden sich noch etwa 100 Gebäude, die im 19. Jahrhundert im regional angepassten Stil des osmanischen Hauses erbaut wurden.

### 2.2.1 Geschichte und Entwicklung Thessalonikis

Thessaloniki schaut auf eine lange Geschichte zurück. Gegründet wurde die Stadt im Jahre 315 v. Chr. und benannt nach der Ehefrau des makedonischen Herrschers Kassandros, Thessalonike, einer Halbschwester Alexanders des Großen. Die Stadt lag günstig an der Handelsstraße zwischen Rom und Byzanz und entwickelte sich daher zu einem wichtigen Knotenpunkt (Rossiter, 1981:596; Papa-hadzis, 1963:3f).

In den Jahren 379-395 wurde eine Stadtmauer gebaut (Rossiter, 1981:609), deren Verlauf noch



Abb. 010. Blick über die Oberstadt Thessalonikis (zu erkennen an den roten Dachflächen) über die Innenstadt hinweg auf den Golf von Thermaikos, links im Bild sind Reste der Stadtmauer zu erkennen (eigene Aufnahme: 2013)

heute präsent ist. Die Stadtmauer begrenzt das Gebiet der Oberstadt, welches in dieser Arbeit betrachtet wird auf der östlichen, nördlichen und westlichen Seite (siehe Abb. 011).

Ab 1430 gehört Thessaloniki zum osmanischen Reich, erst in dieser Zeit beginnt die Bebauung der

Oberstadt. Bis dahin wurden vor allem die Flächen entlang des Hafens besiedelt. Die Bereiche nahe der Stadtmauer blieben in einer Größenordnung, die der damaligen Reichweite von Kanonenkugeln entsprach, aus Sicherheitsgründen und um Raum für die Verteidigung zu lassen, un bebaut (Anastasiadis, o.J.:9). Dies ist in Abb. 011 deutlich zu erkennen.



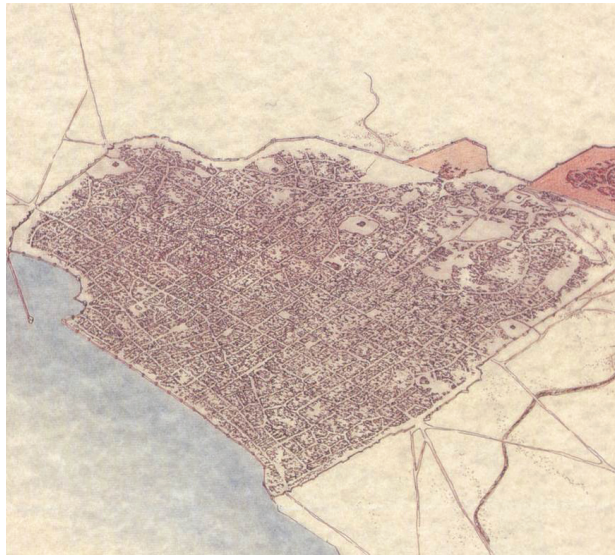


Abb. 011. Thessaloniki um 1430, die Bereiche nahe am Wasser sind sehr dicht bebaut, nach Norden hin und nahe der Stadtmauer ist die Bebauung aufgelockerter (aus: Anastasiadis 2012)

Im Jahre 1492 siedelten sich etwa 20.000 aus Spanien vertriebene Juden in Thessaloniki an (Rossiter, 1981:596 ff). Es entwickelte sich eine Stadt, in der sich drei etwa gleich stark vertretende Bevölkerungsgruppen den vorhandenen Raum aufteilten. Die jüdische Bevölkerung bewohnte den eng bebauten Stadtteil nahe des Hafens und des Marktes, die Griechen lebten im daran anschließenden östlichen unteren Teil der Stadt. Dieses Gebiet wird im weiteren als Unterstadt bezeichnet. Die wohlhabende türkische Bevölkerung errichtete ihre Wohnhäuser oberhalb der Unterstadt auf dem ansteigenden Gelände (Ano Poli = obere Stadt),

welche im folgenden als Oberstadt bezeichnet wird (siehe Abb. 012).

„Mitte des 17. Jahrhunderts war Thessaloniki eine dicht besiedelte Stadt. Die 48 Stadtviertel der die Stadt dominierenden Türken waren z.B. Yedi Kule,

Vardar, Kalamaria, Hortadj (St. Georg), Kasim Pasha (St. Demetrius) und St. Sophias. Die Viertel der Juden lagen vor allem im Hafengebiet. Ihr Viertel war eng bebaut, schmutzig und mit sehr engen Gassen.“ (Vacalopoulos, 1972:81, Übersetzung d. Verf. aus dem Englischen).

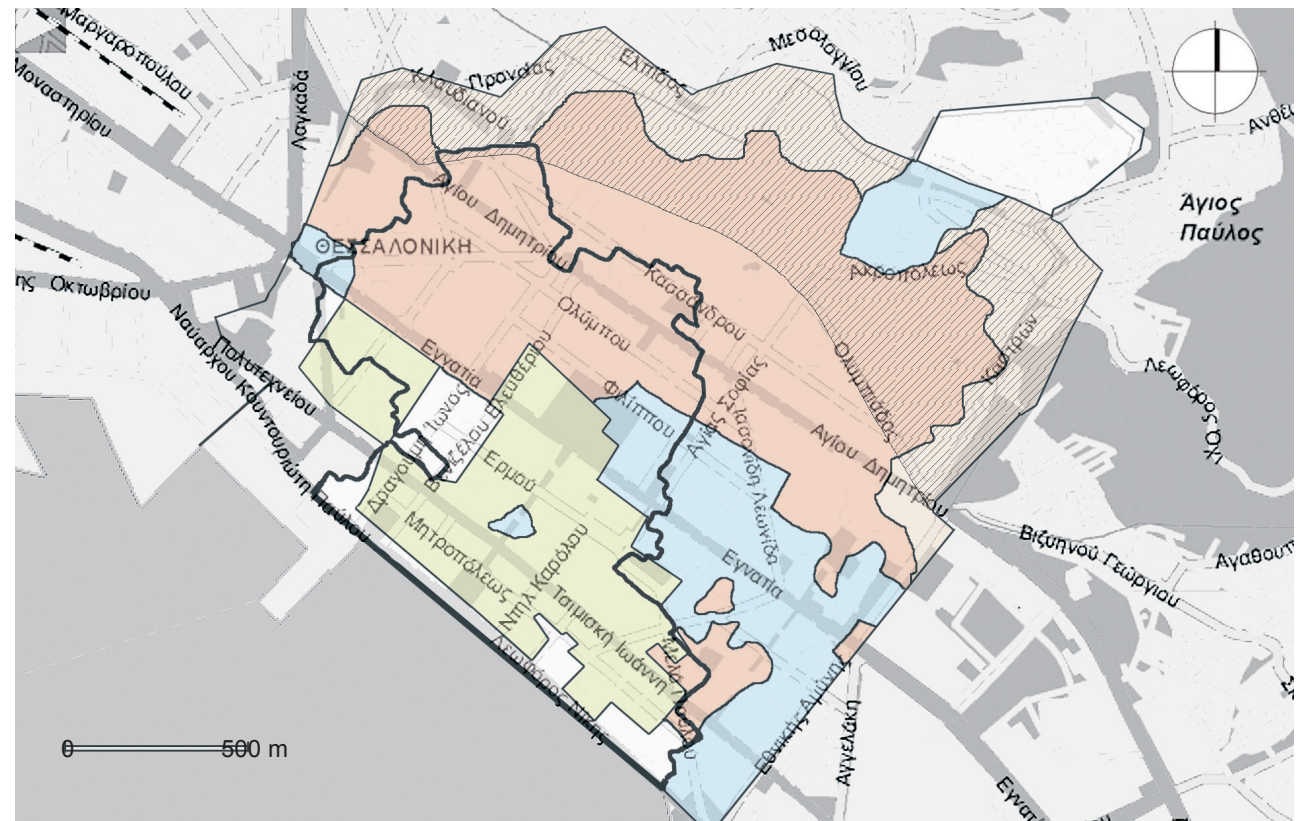


Abb. 012. Der Innenstadtbereich Anfang des 20. Jahrh., innerhalb der ehemaligen Stadtmauer, gelb die Wohngebiete der jüdischen Bevölkerung, blau die christliche und rot die muslimischen Viertel, spätere Verdichtung entlang der Stadtmauer hellrot, schraffiert das Untersuchungsgebiet, schwarz umrandet das Areal, welches durch den großen Brand 1917 zerstört wurde (eigene Darstellung nach: Anastasiadis, 2012 und Thessaloniki Municipality)

Die Häuser der türkischen Bevölkerung waren zur Ebene der Axios ausgerichtet, einem Fluss, welcher südwestlich von Thessaloniki in den Golf von Thermaikos mündet. Sie werden als luftige, mehrgeschossige Wohngebäude mit zwei oder drei Höfen (die, die Häuser von Mauern umgebenden Gärten, Anm. d. Verf.) beschrieben, so wie heute (dies bezieht sich auf ca. 1960, Anm. der Verf.) noch immer die türkischen Häuser in Thessaloniki seien (Vacalopoulos, 1972:81). *„Die Häuser waren mit roten Ziegeln gedeckt. Sie hatten Fenster und Erker (sahne), Nebengebäude (cardak) und Pavillons (kiosk). In hunderten von Villen (saray) gab es Weingärten oder Gärten - wirkliche Paradiese - mit murmelnden Springbrunnen (...).“* (Vacalopoulos 1972:82, Übersetzung d. Verf. aus dem Englischen).

Bis in das 18. Jahrhundert entwickelte sich Thessaloniki als eine dicht besiedelte Stadt. Die Häuser waren aus Stein gebaut, aber auch aus Holz und Ziegeln. Die meisten Häuser hatten zwei Geschosse, drei Stockwerke waren selten (Vacalopoulos, 1972:93).

Erst das 19. Jahrhundert, das Zeitalter der Industrialisierung, brachte starke Veränderungen mit sich. 1866 wurde die Stadtmauer entlang der Küste abgebrochen. Die Mauer war überflüssig geworden, weil die Gefahr von Angriffen durch Piraten nicht mehr existierte. Nach dem Abbruch der westlichen Mauer konnte sich das Stadtgebiet in diese Richtung erweitern. Das hatte auch zur Folge,

dass die Gebäude nicht mehr gegen den Wind vom Meer abgeschirmt waren, was den Komfort für die Bewohner im Sommer verbesserte. Allerdings wurden im Winter die kalten Nordwestwinde nicht mehr so gut abgehalten wie vorher. Die Einwohnerzahl stieg von etwa 40.000 zur Mitte des 19. Jahrhunderts auf etwa 120.000 im Jahre 1895 (Anastasiadis, o.J.:16).

Nach Ende des Griechisch-Türkischen-Krieges fand von 1922-1924 ein Bevölkerungsaustausch zwischen Türken und Griechen statt. Dadurch wuchs die Bevölkerung um etwa 90.000 Einwohner an. In Folge dessen wurde die ursprünglich lose Struktur der Oberstadt stark verdichtet. Bis dahin waren häufig einzelne Häuser von Gärten umgeben, nun wurden durch den Bevölkerungsdruck zwischen den Häusern Hütten und Buden gebaut (Anastasiadis, o.J.:15; Oliver, 1997b:1491).

### 2.2.2 Von den 20er Jahren bis heute

Nach dem großen Brand von 1917 wurde von 1925 bis 1935 das Stadtzentrum in Teilen neu geplant. Infolgedessen wurden zahlreiche Gebäude abgerissen und neu aufgebaut. Die Oberstadt hingegen behielt ihre alten Strukturen. Der Zweite Weltkrieg und der nachfolgende Bürgerkrieg von 1946 bis 1949 hatte eine Stagnation im Bauwesen zur Folge. Weitere einschneidende Veränderungen erlebte die Stadt daher erst wieder in den 1950er Jahren (vgl. Rossiter, 1981:598; Condaratos, 1999:41).

Die Grundlage für diese Veränderungen begann schon in den späten 1920 Jahren durch die Entwicklung eines neuen flexiblen Gebäudetypus, einem „Polykatoikia“ (polys = viele, katoikia = Wohnung) genanntes Appartementhaus mit mehreren Wohnungen und vielfältigen Nutzungen. Es entstand als griechische Umsetzung von Le Corbusiers „Domino-System“. Eine Polykatoikia besteht aus einem Betonskelett aus genormten Fertigteilen, dessen feste Bestandteile ein Treppenhaus und ein Aufzugsschacht sind. Dieser Prototyp in unzähligen Varianten prägt heute maßgeblich das Stadtbild griechischer Städte (Aesopos, 2004:14f, Aureli, 2012).

Die ersten Polykatoikia wurden ab 1929 aufgrund einer neuen Gesetzgebung erbaut, welche nach Geschossen differenzierte Eigentümer zuließ. Die Gebäude aus dieser Bauzeit, bis zur Stagnation durch den 2. Weltkrieg werden als „Bauhaus-Polykatoikias“ bezeichnet und waren zunächst exklusive Wohngebäude für die wohlhabende Schicht.

Im Jahre 1955 wurde eine erste allgemeine Bauverordnung verabschiedet, um den sich abzeichnenden Bau-Boom zu unterstützen. Die absolute Höhe der Gebäude wurde von der zulässigen Höhe der Fassade, welche 120% der Straßenbreite betragen durfte, abgekoppelt. Dies führte zum Bau von bis zu elfgeschossigen Gebäuden mit umfangreichen Staffelgeschossen, weitläufigen Veranden



und Dachterrassen. Außerdem schrieb die Verordnung ebenerdige Arkaden im Sockelgeschoss als Teil des Gebäudes und zur öffentlichen Nutzung zwingend vor. Erkervorbauten wurden verboten, ausschließlich Balkone waren als Fassadenvorsprünge erlaubt. Die so entstandenen Polykatoikia



Abb. 013. Kontrast zwischen Alt und Neu: Polykatoikia neben den Ausgrabungen des Forum Romanum in der Unterstadt von Thessaloniki (eigene Aufnahme, 2010)

mit ihren verschachtelten Balkonen, Arkaden und Staffelgeschossen prägen heute das Stadtbild griechischer Städte und gelten als Referenzgebäude für diesen spezifischen Bautypus. Eine neue Bauordnung von 1973 verursachte bezogen auf die Polykatoikias lediglich die Einführung der „Pilotis“, eines offenen Eingangsbereiches auf Straßenniveau.

Stärkere Veränderungen bewirkte die Verordnung von 1985, welche die ursprüngliche Idee vom Domino-System ablöste: Ein Gebäude sollte nun als „ideales Prisma“, über Straßenbreite und maximale Traufhöhe definiert, in den Stadtraum eingefügt werden. Außerdem wurden die Gestaltungsmöglichkeiten der Fassaden durch eine Art Loggia erweitert. (Aesopos, 2004:15-20).

Der Bau der Gebäude wurde in der Regel nach dem neuen „quid pro quo“ System finanziert. Dieses ermöglichte dem Eigentümer eines kleinen Gebäudes, das Grundstück an einen Bauunternehmer zu übertragen, welcher dieses z.B. mit Apartments bebaute und dann einige dieser an den Eigentümer als Gegenleistung zurückgab. Das motivierte die Stadt, die zulässige Höhe der Gebäude heraufzusetzen, um zu mehr Bauvolumen also Wirtschaftsleistung zu kommen (Condaratos, 1999:41f). So kam auch Thessalonikis Unterstadt zu einem Stadtbild mit bis zu elfgeschossigen Gebäuden. Grundstücke in der Oberstadt hingegen wurden aufgrund der Gesetzgebung, welche die Höhe der Gebäude an schmalen Straßen

begrenzt, mit Häusern von maximal 13,5 m Höhe bebaut (Tsikaloudaki, 2012).

Nar (2011) bezeichnet das quid pro quo System „Antiparochi“ (= part-exchange). Es habe vielen Menschen ermöglicht, für wenig Geld eine Wohnung zu kaufen, und den Unternehmern riesige Gewinne beschert. Das System löste das akute Wohnungsproblem in Griechenland und veränderte das Stadtbild vieler Städte. Die Regierung habe weder Geld noch Möglichkeiten gehabt, den Prozess zu steuern.

Ab Mitte der 1970er Jahre führte die starke Zunahme des Autoverkehrs zu Schwierigkeiten. Staus und Luftverschmutzung stellen die Städte vor Probleme. Seit 2006 wird in Thessaloniki eine Metrolinie gebaut. Derzeit besteht der öffentliche Nahverkehr jedoch ausschließlich aus Busverkehr (Doumas, 2011:96ff). Heute hat Thessaloniki knapp eine Million Einwohner, Griechenland insgesamt 10,82 Millionen (Hellenic Republic, Ministry of Statistics, 2012).

### 2.2.3 Das Untersuchungsgebiet

#### ◇ Eingrenzung des Untersuchungsgebietes

Durch den großen Brand von 1917 wurden weite Teile der Unterstadt fast vollständig zerstört, so dass traditionelle Bauweise, die sich über einen langen Zeitraum angepasst hat, dort nicht mehr vorhanden sein kann. Das Untersuchungsgebiet beschränkt sich daher auf die Oberstadt, in der noch etwa 100 Häuser erhalten sind, die im 19. Jahrhundert erbaut wurden. Sie sind trotz der wechselhaften Geschichte Thessalonikis, einer Stadt, die viele Brüche und Katastrophen verkraften musste, erhalten und werden bewohnt. Dies stellt ein Indiz dafür dar, dass sie auch unter veränderten Bedingungen und Einflüssen von außen weiterhin funktionieren.

#### ◇ Bebauung des Untersuchungsgebietes

Diese Wohnhäuser in traditioneller Bauweise stammen vor allem aus der zweiten Hälfte des 19. Jahrhunderts und stellen einen Typus des osmanischen Hauses mit dem Einfluss lokaler Komponenten dar, welcher sich in einem Zeitraum von etwa 200 Jahren entwickelt hat. Er wird auch „makedonische Bauweise“ oder als „ägäisch-makedonischer Typus“ bezeichnet (Cerasi, 2004:143; Anastasiadis, o.J.:16ff; Nar, 2011:76). Pelekanos (1986) beschreibt ihn als „Inland - Continental Type“ der traditionellen Architektur in Griechenland. In Papaiōannou (2003) wird ein Typus dargestellt, welcher dem Haus in der Oberstadt Thessalonikis entspricht (siehe Abb. 009, Seite 29)

und als „enclosed, wide-facade, two storey house of northern Greece“ bezeichnet wird (Übersetzung d. Verf.: in sich abgeschlossenes, zweigeschossiges Haus Nordgriechenlands mit breiter Fassade). Die Bauweise entwickelte sich zur selben Zeit, in der sich das vorher beschriebene Stadthaus (*konak*), zu dem viele Parallelen bestehen, im Gebiet der heutigen Türkei verbreitete.

Die für eine Familie konzipierten Wohngebäude weisen die für das osmanische Haus typische Dreiteilung des Grundrisses auf. Sie sind in ein massiv ausgeführtes Erdgeschoss aus Natursteinmauerwerk und ein oder zwei Obergeschosse in leichter Bauweise, als mit Ziegeln ausgemauertes Fachwerk, aufgeteilt. Häufig ist der mittlere Raum durch einen Erker zur Straße hin erweitert. Es existieren auch Varianten, mit zwei Erker an den beiden Eckzimmer des Obergeschosses.

Ursprünglich hatten die Häuser jeweils einen privaten Garten, was in Kombination mit der Möglichkeit einer effektiven natürlichen Lüftung eine Überhitzung in den Sommermonaten verminderte (vgl. Mazower, 2006:248). Doch haben die Beobachtungen vor Ort ergeben, dass es auch heute trotz der stark verdichteten Bebauung im Sommer in den Räumen der traditionellen Wohnhäuser, im Gegensatz zu den in jüngerer Vergangenheit errichteten Gebäude, nicht übermäßig heiß wird.

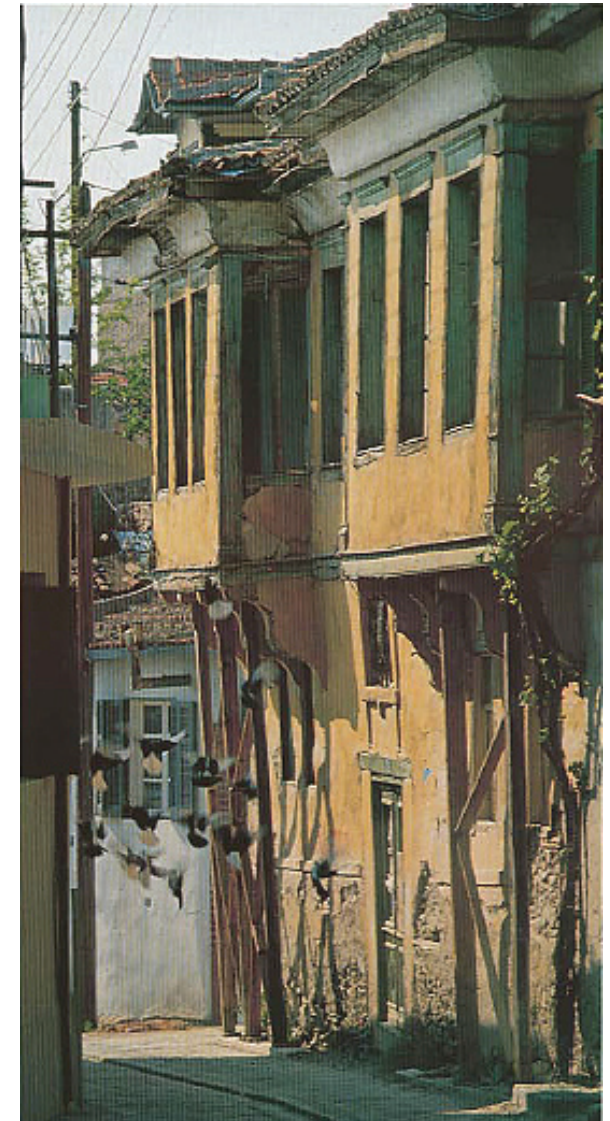


Abb. 014. Typische Bebauung in der Oberstadt  
(aus: Anastasiadis, o.J.:Abb. 43))





Abb. 015. Plan der Oberstadt von Thessaloniki, das Gebiet wird im Süden begrenzt durch die Straße Olympiades und an den anderen Seiten durch den Verlauf der historischen Stadtmauer (nach: Thessaloniki Municipality)



Da fest eingebaute Öfen unüblich waren, wurde im Winter mit Kohlenbecken oder offenen Kaminen geheizt. Die Räume im Erdgeschoss hatten ursprünglich die Funktion von Stallungen, Werkstätten und Lagerräumen, wurden aber auch als Winterküche genutzt (Anastasiadis, o.J.:23; Zygomas, 2011).

Der Fensterflächenanteil im Erdgeschoss ist wesentlich geringer als in den oberen Geschossen. Üblicherweise befanden sich in den dicken Natursteinwänden neben der Eingangstür nur wenige kleine Öffnungen. Die oberen Geschosse weisen insgesamt mehr und auch größere Fenster auf. Die Dächer sind in einem Winkel von ca. 25° relativ flach geneigt. Die Dachüberstände betragen 50 bis 60 cm. Die Dächer haben keine Gauben oder andere Öffnungen.



Abb. 016. Beispiele für die traditionelle Bebauung in der Oberstadt von Thessaloniki (eigene Aufnahmen, 2010, 2011 und 2013)



## 2.2.4 Erdbeben als Einfluss auf die traditionelle Bauweise

Der gesamte Mittelmeerraum ist ein tektonisch aktives Gebiet. Von Süden her schiebt sich die afrikanische unter die eurasische Platte. Dazwischen liegt im östlichen Bereich die anatolische Platte, so dass es dort zu besonders starken Spannungen kommen kann. In der betrachteten Region kommt es daher immer wieder zu Erdbeben.

Da diese Beben nicht als Ausnahmeereignisse stattfinden, sondern kleinere Ereignisse die Problematik stets präsent halten, hat sich die Bauweise an die Gegebenheiten angepasst. Abweichend von den üblichen Konstruktionen in Zentraleuropa werden die Knotenpunkte der Holzkonstruktion bei den traditionellen Häusern auf Zug gesichert. Durch vorgebohrte Löcher werden die Bauteile mit metallenen Nägeln oder Bolzen gesichert (vgl. Hatzitriton, n. v.: Kapitel 1). Diese Verbindungen der Holzbauteile führen, in Kombination mit der „schuhkartonähnlichen“ Form der Gebäude, zu einer gewissen Erbebensicherheit.

Massives Mauerwerk wird durch umlaufende Bewehrungen aus Holzbalken versehen (siehe Abb. 017). Diese Technik ist ebenfalls weit verbreitet und wird seit mindestens 5000 Jahren im östlichen Mittelmeerraum verwendet (Touliatos, 2001:107ff; Vintzileou, 2008:961; Tsakanika, 2010: Kapitel 7). Die oberen Geschosse der Gebäude werden als



Abb. 017. Durch umlaufende Bewehrung gegen Erdbebenschäden gesichertes Mauerwerk eines Wohnhauses in Vrastama, einem Dorf östlich von Thessaloniki (siehe Kapitel 2.7 Vergleichende Betrachtung, eigene Aufnahmen, 2013)

Fachwerk ausgebildet, dessen Gefache mit Ziegeln ausgemauert sind.

Diese Bauweise ist im Falle eines Erdbebens verhältnismäßig sicher, was sich darin zeigt, dass in der Region, welche immer wieder von Erdbeben erschüttert worden ist überhaupt noch solche Häuser existieren (Tsakanika, 2000: Kapitel 4; Vissilia, 2010: 298). Zuletzt wurde Thessaloniki im Jahre 1987 von einem Beben der Stärke 6,6 auf der Richterskala erschüttert, dessen Epizentrum nur 30 km von der Stadt entfernt lag. Dennoch stehen in der Oberstadt

noch traditionelle Wohnhäuser aus dem 19. Jahrhundert. Dies bestätigt die bisher beschriebene Bauweise, welche sich den regionalen Gegebenheiten angepasst hat. Laut Nar (2011:108) kollabierte bei diesem Erdbeben ein Appartementblock am Hippodrome Platz in der Unterstadt und an insgesamt 3170 Gebäuden entstanden schwere, irreparable Schäden.

## 2.3 Baumaterialien

In unserer globalisierten Welt müssen wir uns häufig zunächst mühsam darauf besinnen, welche Ressourcen an einem Standort lokal verfügbar sind. Viele Baumaterialien haben aufgrund langer Transportwege und aufwändiger Prozesse in der Herstellung eine hohe Energiebilanz. Über die Entsorgung der Materialien wird im Zweifelsfall erst gar nicht nachgedacht.

In den ländlichen Regionen Nordgriechenlands war es lange Zeit so, wie es für den größten Teil der traditionellen Bauweise gilt: man benutzte das lokal vorhandene Material. Für das Mauerwerk der Erdgeschosse wurde der in den Gebirgsregionen vorhandene Naturstein, z.B. Sandstein oder Granit verbaut. In den Ebenen wurde Lehm verwendet, wenn kein Naturstein verfügbar war. In den Städten dieser Region findet man daher sowohl Gebäude mit Natursteinmauerwerk als auch mit Zehmziegeln gemauerte. Bei allen Häusern wurden für die Konstruktion des oberen Geschosses und zur Bewehrung des Mauerwerks hölzerne Elemente verwendet (Oikonomou, 2008: Kapitel 3.3).

### 2.3.1 Für die traditionelle Bebauung verwendete Baumaterialien

#### ◇ Bauholz

Als Bauholz wurde vor allem Fichte, Eiche und Kastanie aus den umliegenden Wäldern verwendet (Nomikos, 2011). Die Rohdichte dieser Hölzer liegt um  $500 \text{ kg/m}^3$ .

#### ◇ Naturstein

Naturstein war direkt vor Ort verfügbar, denn der für das Natursteinmauerwerk verwendete unbehauene Grünschiefer (Nomikos, 2011; Khorazani, 2012) konnte direkt von dem Hang, auf dem die Oberstadt steht genommen werden. Durch eine Ausmessung von zwei exemplarischen Flächen wurde ein Mörtelanteil von 20 - 25% ermittelt. Da bei einer Anhäufung von Kugeln die größtmögliche Dichte 74% beträgt (bewiesen im Jahre 1831 durch Carl Friedrich Gauß) erscheint dieser Mörtelanteil realistisch.

#### ◇ Ziegel

Die Obergeschosse der Gebäude bestehen aus einer Holzständerkonstruktion, die mit Ziegelsteinen ausgemauert sind. Darauf wurden als Putzträger dünne Holzlatten befestigt. Die Dachflächen sind mit Ziegeln in hellroten Farbtönen gedeckt und eingemörtelt.

#### ◇ Mörtel und Putz

Der Kalk für den verwendeten Mörtel und Putz stammte aus einem Dorf namens Asvestochori (wörtlich übersetzt: Kalkdorf) in der Nähe Thessalonikis. Lehmgruben waren ebenfalls nahe der Stadt vorhanden (Nomikos, 2013). Der Mörtelanteil des Ziegelmauerwerks beträgt ca. 30-35 %. Die Mauern sind innen und außen mit einer Kalk-Lehm-Mischung verputzt. Die Außenhaut hat zusätzlich noch eine dünne Kalkputzschicht als wasserabweisende Haut. Diese Ausfachungen werden als *satmas* bezeichnet.



Abb. 018. Bauholz Naturstein und Ziegel bei der Sanierung eines traditionellen Wohnhauses in der Oberstadt von Thessaloniki (eigene Aufnahmen, 2013)

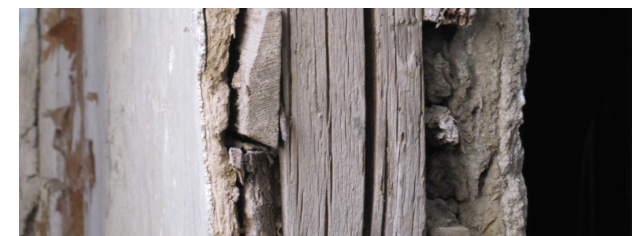


Abb. 019. Aufbau einer Wand im Obergeschoss eines Abbruchhauses in Thessaloniki (eigene Aufnahme, 2010)



### 2.3.2 Materialuntersuchungen

Um für die verwendeten Materialien, die in der weiteren Untersuchung bei den Gebäudesimulationen benötigten Wärmedurchgangskoeffizienten (U-Werte) der Konstruktionen genau berechnen zu können, wurden an einer Bauruine in Thessaloniki Materialproben vom Naturstein, Ziegel und Mörtel genommen und im Labor der HafenCity Universität Hamburg untersucht. Die Ergebnisse sind in Abb. 020 dargestellt.

◇ Bestimmung der Rohdichte des Natursteins nach DIN EN 772-4

Ergebnisse der Untersuchung einer Probe Grünschiefer:

Rohdichte = 2635 kg / m<sup>3</sup>

◇ Bestimmung der Rohdichte der Ziegel nach DIN EN 772-4

Ergebnisse der Untersuchung von zwei Ziegelproben:

Probe 1: Rohdichte = 1489 kg / m<sup>3</sup>

Probe 2: Rohdichte = 1503 kg / m<sup>3</sup>

◇ Materialbestimmung der Putzprobe

Putzproben der Außenwände wurden in einem Röntgendiffraktometer untersucht. Es konnten Minerale (Quarz, Kalk und Feldspat) sowie Ziegelbestandteile nachgewiesen werden. Es war mit

Bauteil	Material	Rohdichte	U-Wert der Konstruktion	
Mauerwerk Erdgeschoss	75 % Naturstein	Grünschiefer	2635 kg / m <sup>3</sup>	D = 70 cm -> 1,73 W/m <sup>2</sup> K
	25 % Mörtel/ Putz	Kalk-Lehm-Gemisch mit Zuschlägen	1926 kg/m <sup>3</sup>	D = 90 cm -> 1,38 W/m <sup>2</sup> K
Außenwand Obergeschoss				
Mauerwerk Obergeschoss(e)	70 % Ziegel	Gebrannter Ton	1500 kg / m <sup>3</sup>	2,47 W/m <sup>2</sup> K
	30 % Mörtel/ Putz	Kalk-Lehm-Gemisch mit Zuschlägen	1926 kg/m <sup>3</sup>	
Tragwerk Obergeschoss	Holz	Fichte / Eiche / Kastanie	500 kg/m <sup>3</sup>	
Zwischendecken	Holz	Fichte/Eiche/Kastanie	500 kg/m <sup>3</sup>	1,07 W/m <sup>2</sup> K
Dach	Holz	Fichte/Eiche/Kastanie	500 kg/m <sup>3</sup>	1,28 W/m <sup>2</sup> K
	Dachziegel	Gebrannter Ton	2000 kg / m <sup>3</sup>	

Abb. 020. Üblicherweise verwendete Baumaterialien und ihre Kennwerte, für die Simulationen verwendete U-Werte (Wärmeleitfähigkeit und spez. Wärmekapazität aus: DIN EN 12524, Tab. 13, und DIN 4108, Teil 4, Tab 1, Bauteilaufbauten und Berechnungen der U-Werte mit dem U-Wert Manager 3.3, siehe Anhang)

diesem Verfahren nicht 100%ig sicher darzustellen, ob es sich in der untersuchten Probe um Tonminerale handelt. Die Erscheinung der Substanz, das Vorhandensein von Stroh als Zuschlagstoff und die üblicherweise verwendeten Baumaterialien ließen aber darauf schließen, dass es sich um einen Lehmputz mit Kalkanteilen handelt, welcher als weiteren Zuschlagstoff Ziegelbruchstücke enthält.

◇ Dichtebestimmung der Putzprobe

Ergebnisse der Untersuchung vom Putz der Außenwände:

Rohdichte = 1926 kg/m<sup>3</sup>

Die Berechnungen und eine Dokumentation der Laboruntersuchungen finden sich im Anhang.

## 2.4 Der Einfluss der Nutzerinnen auf die passive Klimatisierung

### 2.4.1 Nutzerbefragungen

Am 07.05.2012 zwischen 17:00 und 20:00 Uhr wurde in der Oberstadt von Thessaloniki eine Nutzerbefragung durchgeführt. Von einem in Thessaloniki ansässigen griechischen Doktoranden als Dolmetscher wurden Personen, die sich zufällig zu dem Zeitpunkt vor ihrem Haus befanden, angesprochen, mit der Bitte einige Fragen zu beantworten. Das Ziel war, einen Eindruck darüber zu gewinnen, welche Kenntnisse die Bewohnerinnen über die Möglichkeiten haben, den Komfort in ihren Wohnräumen im Sommer durch ihr eigenes Handeln zu beeinflussen. Es wurden zehn Gespräche geführt, an denen insgesamt 16 Personen teilnahmen.

Es lässt sich zusammenfassen, dass nur in einem Gespräch, eine der Personen Kenntnisse über die Möglichkeiten der passiven Klimatisierung durch gezieltes Lüften der Räume und Verschatten der Öffnungen hat. Alle anderen Befragungen ergaben, dass die Bewohnerinnen keinerlei Interesse daran haben und nichts darüber wissen.

In acht Fällen waren die Bewohnerinnen zufrieden mit dem Komfort, auch wenn es an manchen Tagen sehr warm in den Räumen wird, bzw. im Winter sehr kalt. In zwei Fällen werden die Heizkosten aufgrund der finanziellen Lage der Bewohnerinnen niedrig gehalten, indem nur einzelne Räume beheizt werden. In einem Fall waren die Bewohner unzufrieden mit der baulichen Situation eines Neubaus.

Das Haus heize sich im Sommer zu stark auf. Kenntnisse, um dies zu verhindern waren nicht bekannt.



Abb. 021. Ein Neubau ohne außenliegende Verschattungselemente erhält direkte solare Einstrahlung durch die transparenten Flächen der Fassade, daneben ein traditionelles Wohnhaus mit Verschattungselementen in der Oberstadt von Thessaloniki (eigene Aufnahme, 2013)

### 2.4.2 Fotodokumentation zum Öffnen und Schließen der Fenster

Eine Fotodokumentation über das Öffnen und Schließen der Fenster und der Klappläden als Verschattungselemente konnte die durch die Gespräche gewonnenen Erkenntnisse bestätigen. An fünf aufeinander folgenden Tagen zu sieben verschiedenen Tageszeiten wurden die Fassaden der Häuser in der Straße Raktivan, eine in ihrer Bebauung für die Oberstadt typische Straße, fotografiert. Sie

verläuft im westlichen Teil der Oberstadt ansteigend in nördlicher Richtung. Die Temperaturen und die Windverhältnisse waren typisch für den Monat Mai. Die Ergebnisse sind daher nur für ein angenehmes Wetter im Mai als Stichprobe zu betrachten. Da sie die Aussagen der Personen aus den Gesprächen jedoch genau bestätigen, kann angenommen werden, dass sich auch an heißen Tagen keine besonders abweichende Situation darstellen würde.

Ergebnisse: Abends und früh morgens waren etwa 55% der Klappläden an den Häusern geschlossen. Tagsüber waren etwa 65 % geschlossen. Dabei machte es keinen Unterschied, ob die Fassade der Sonne ausgesetzt war, oder nicht.

Insgesamt waren nur etwa 5 % der Fenster komplett geöffnet, scheinbar unabhängig von der Tageszeit. Es war kein Zusammenhang zu erkennen zwischen der Fensteröffnung und dem Vorhandensein einer Klimaanlage (diese sind üblicherweise an der Fassade angebracht und daher in der Dokumentation sichtbar). Dies könnte bei einer erneuten Untersuchung an heißen Sommertagen anders ausfallen. Es ist ebenso kein Zusammenhang zu erkennen zwischen der Windgeschwindigkeit und der Anzahl der geöffneten Fenster. Als vergleichendes Beispiel wurden ebenfalls Gebäude in der Straße Theofilos erfasst. Auch hier war keinerlei Regelmäßigkeit in Bezug auf die Tageszeit oder den Sonnenstand festzustellen.

## 2.5 Das Klima im Untersuchungsgebiet

Obwohl das mediterrane Klima häufig als „ideales Klima“ für den Menschen bezeichnet wird, werden an die Gebäude in Nordgriechenland hohe Ansprüche gestellt. Das Klima Thessalonikis ist mediterran, mit einem geringen Einfluss durch das Kontinentalklima Osteuropas. Die Temperaturen liegen vor allem im Frühjahr und Herbst sehr häufig in einem für den Menschen komfortablen Bereich, doch im Winter kann es kalt werden und es treten vermehrt Niederschläge auf. Im Sommer hingegen liegen die Temperaturen häufig über der Komfortgrenze. Im Februar und im Juli sind gewöhnlich die extremsten Temperaturen zu erwarten.

Die Gebäude müssen den Menschen also im Winter vor Kälte, kalten Winden und Feuchtigkeit schützen, im Sommer dagegen sollen die Räume nicht überhitzen. Dazu sollte idealerweise immer regional ein geeigneter Kompromiss gefunden werden. Faktoren wie die Orientierung der Gebäude in Bezug auf Himmelsrichtung, Gelände und Windrichtungen sind mögliche „Stellschrauben“. Auch die Kubatur, das Verhältnis von Oberfläche zu Volumen, Dachformen, Anordnung der Fensterflächen und Öffnungen, Sonnenschutzvorrichtungen, Verteilung der Nutzungen im Gebäude und temporäre Schutzvorrichtungen (gegen Wind und Kälte im Winter aber auch Sonneneinstrahlung im Sommer) sind Möglichkeiten, den Energiebedarf gering zu halten, indem die solaren Gewinne im Winter hoch, im Sommer jedoch niedrig gehalten werden. Auch die umgebende Vegetation spielt vor allem für

den sommerlichen Wärmeschutz eine große Rolle (vgl. Givoni, 1998: 49; Hegger, 2010; Schütze, Willkomm 2000:16). Als schattenspendende Elemente werden im gesamten Mittelmeerraum Pergolaelemente eingesetzt, die mit Rankpflanzen bewachsen sind. Eine häufig verwendete Pflanze ist die laubabwerfende Weinrebe.

### 2.5.1 Klimadatenätze, verfügbare Quellen

Der Klimadatenatz für Thessaloniki, den das „US Department of Energy“ im IWEC-Format (International Weather for Energy Calculations Format from ASHRAE) zur Verfügung stellt, ist ein aus jeweils für die Jahreszeit repräsentativen gemessenen Daten aus den Jahren 1984, 1985, 1989, 1990, 1992, 1994, 1996 und 1997 zusammengestellter Datensatz. Er enthält Daten für Temperatur, relative Luftfeuchtigkeit, Luftdruck, solare Einstrahlung, Windrichtung und Windstärke, Bewölkungsgrad und Niederschläge. Die Nutzung dieses generierten Datensatzes hat den Vorteil, dass er das wahrscheinlich vorkommende Klima darstellt, und keine extremen und seltenen Wetterereignisse beinhaltet. Ebenso sind Messfehler (z.B. wenn ein Messgerät kurzzeitig ausgefallen ist) nicht im Datensatz vorhanden.

Der Deutsche Wetterdienst stellt Klimadaten zur Verfügung, deren Mittel- und Extremwerte sich überwiegend auf Messungen des Zeitraums 1961 bis 1990 beziehen. Dies ist der Zeitraum, den die

WMO (Weltorganisation für Meteorologie) zurzeit als „Normalperiode“ für Klimadaten vorgibt. Falls aus diesen 30 Jahren keine oder zu wenige Messwerte vorliegen, beziehen sich die Klimadaten auf eine andere, mindestens 20jährige Messreihe des 20. Jahrhunderts. Ein Vergleich mit dem IWEC Datensatz zeigte, dass die Daten beider Datensätze inhaltlich übereinstimmen.

Ein Vergleich der IWEC Wetterdaten mit dem Datensatz von Meteoronorm (ein Produkt der Firma Meteotest), der ebenfalls generierte Wetterdaten als repräsentativen Datensatz enthält, zeigte Fehler in den Winddaten auf. Diese erscheinen im Vergleich mit den anderen Datensätzen, Messwerten einer örtlichen Wetterstation und den Erfahrungen vor Ort nicht plausibel. Dieser Datensatz wurde daher nicht weiter verwendet.

Für die Untersuchungen im Rahmen dieser Arbeit wurde der IWEC Datensatz ausgewählt, da er in einem Format vorlag, welches mit den verwendeten Softwareprogrammen kompatibel ist. Dieser Datensatz wird auch in der von der TEE (Griechische Ingenieurskammer) herausgegebenen technischen Richtlinie T.O.T.E.E. 20701-3/2010 zu der Verwendung von Klimadaten beispielsweise bei der Erstellung von Gebäudeenergieausweisen vorgeschrieben.

## 2.5.2 Temperaturen

Die Außentemperatur beträgt in Thessaloniki im Jahresdurchschnitt 16,2 Grad Celsius. Die kältesten drei Monate sind Dezember, Januar und Februar (im Weiteren als Winter bezeichnet) mit einer mittleren Tagesdurchschnittstemperatur im Januar von 5,5°C. Die wärmsten Monate sind Juni, Juli und August (im Weiteren als Sommer bezeichnet) mit einer mittleren Tagesdurchschnittstemperatur von bis zu 27°C. Abb. 022 zeigt den jährlichen Temperaturverlauf, aufbereitet mit Climate Consultant 5.4. Dieses Programm stellt Klimadaten in übersichtlicher Weise dar, und kann zudem Komfortdiagramme erstellen, welche einen Komfortbereich auf Grundlage eines Komformodells in Bezug zu gewählten Parametern darstellen.

In Thessaloniki verteilen sich 2795 Kühlgradstunden, bezogen auf eine Referenztemperatur von 26°C, auf die drei Monate Juni, Juli und August. Die 1677 Heizgradstunden (Referenztemperatur 18°C) sind gleichmäßiger verteilt auf den Zeitraum von sieben Monaten, Oktober bis April (siehe Abb. 023). Kühlgradstunden werden in der Literatur üblicherweise mit CDH (cooling degree hours) und Heizgradstunden mit HDH (heating degree hours) bezeichnet.

Temperatur in °C

- absolutes Temp.maximum °
- mittleres Temp.maximum
- mittl Tagesmitteltemperatur
- mittleres Temp.minimum
- absolutes Temp.minimum °
- Komfortzone

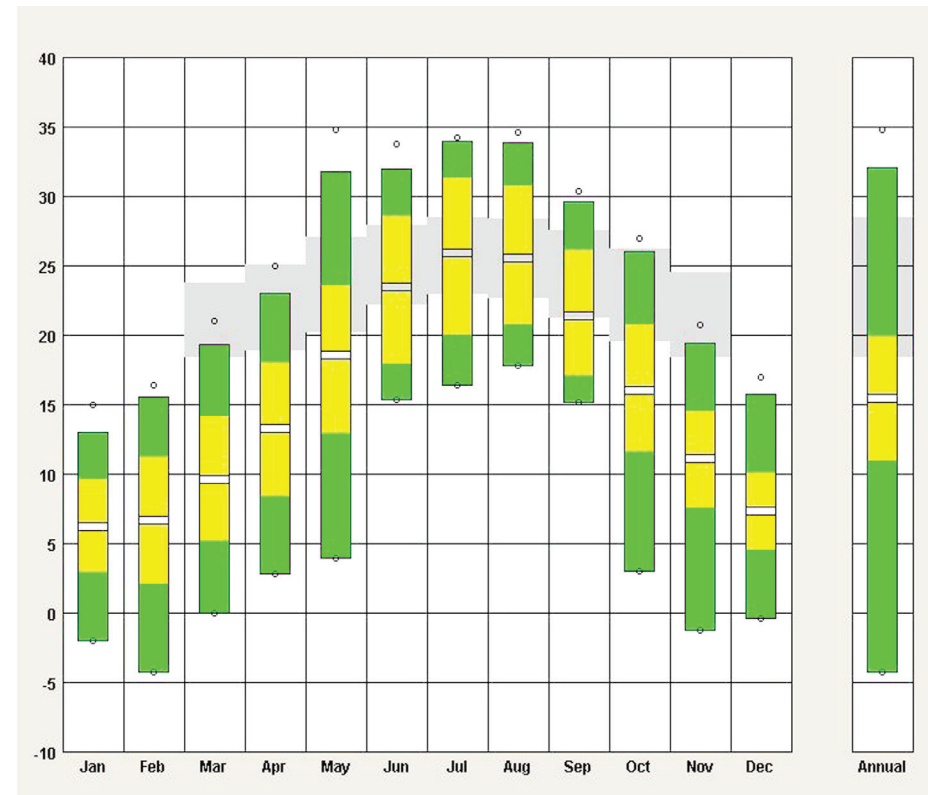


Abb. 022. Temperatur in Thessaloniki aus dem IWEK Klimadatensatz dargestellt mit Climate Consultant 5.4, grau hinterlegt der Komfortbereich nach dem adaptiven Komformodell aus dem ASHRAE Standard 55-2004

	Jan	Feb	März	April	Mai	Juni	Juli	Aug	Sept	Okt	Nov	Dez
CDH	-	-	-	-	-	526	1211	1058	-	-	-	-
HDH	394	314	254	111	-	-	-	-	-	53	207	344

Abb. 023. CDH (Kühlgradstunden) und HDH (Heizgradstunden) bezogen auf eine Referenztemperatur von 26° bzw. 18°C für Thessaloniki (IWEK Klimadaten)



### 2.5.3 Niederschläge und rel. Luftfeuchtigkeit

Die Niederschlagsmenge beträgt pro Jahr etwa 450 mm und verteilt sich auf alle 12 Monate. Im November und Dezember fallen die höchsten Niederschlagsmengen mit über 50 mm pro Monat an. Juli und August sind die trockensten Monate mit etwa 22 mm pro Monat (siehe Abb. 024). Nach einer Studie (Philandras et al., 2012) sind die Niederschlagsmengen und Starkregenereignisse für den Zeitraum von 1930 bis 2007 unverändert geblieben.

Die relative Luftfeuchtigkeit liegt im Winter bei etwa 75%. In den Sommermonaten sinkt sie auf durchschnittlich 52% ab.

### 2.5.4 Windverhältnisse

Im Laufe der Bearbeitung stellte sich heraus, dass das Thema natürliche Lüftung für die passive Klimatisierung eine besondere Rolle spielt. Aus diesem Grund war es für die weitere Untersuchung notwendig, eine umfassende Analyse von Windrichtung, Windgeschwindigkeiten und der jeweiligen Häufigkeit vorzunehmen. Da Thessaloniki direkt am Golf von Thermaikos liegt, ist der Wind durch die Nähe zum Wasser beeinflusst. Die durchschnittliche jährliche Windgeschwindigkeit liegt bei etwa 3 m/s und weist im Jahresverlauf eine eher geringe Schwankung im monatlichen Durchschnitt auf (vgl. Abb. 025).

	Jan	Feb	März	April	Mai	Juni	Juli	Aug	Sept	Okt	Nov	Dez
mittlere Monatssumme (mm)	39	40	46	36	44	31	22	21	27	40	57	53
Tage mit Niederschlag $\geq$ 1 mm	7	6	7	5	6	4	3	3	3	5	7	7
mittlere rel. Luftfeuchte (%)	75	71	72	68	65	58	52	52	61	67	78	78

Abb. 024. Niederschläge in Thessaloniki (nach: Deutscher Wetterdienst)

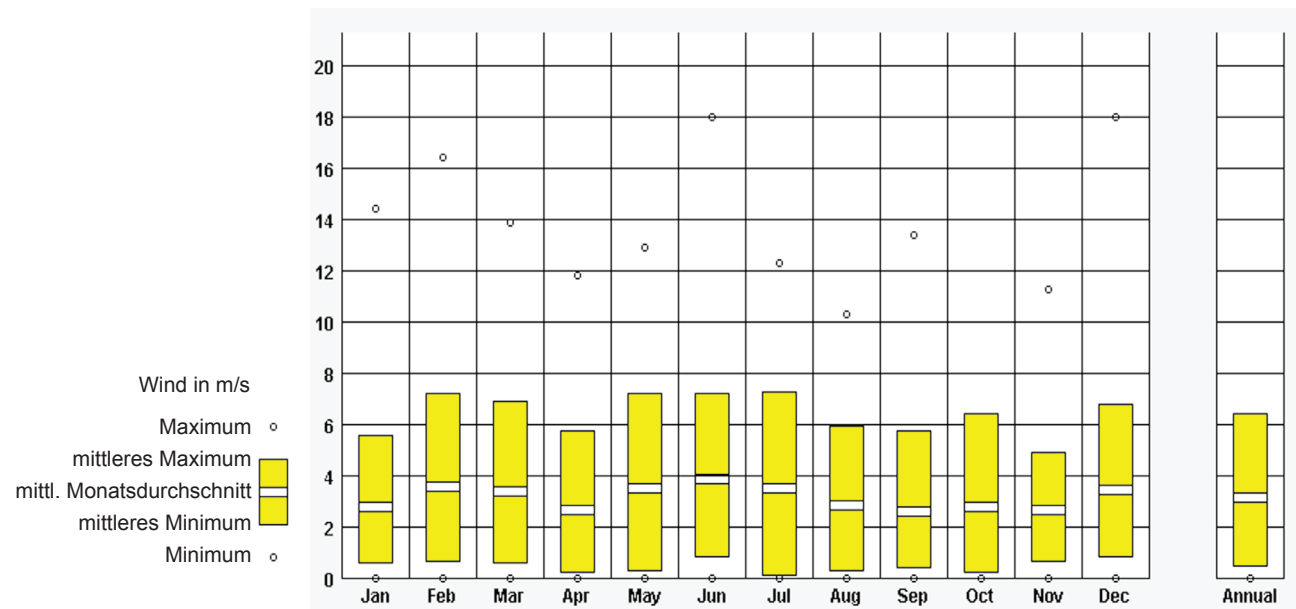


Abb. 025. Durchschnittliche Windgeschwindigkeit in m/s und Bandbreite pro Monat (IWEK Klimadaten, Darstellung mit Climate Consultant 5.4)

◇ Windverhältnisse im Sommer:

Analyse des IWEK Datensatzes

In Abb. 026 sind die Windgeschwindigkeiten im Sommer nach Häufigkeit ihres Auftretens dargestellt. Sie liegen in etwa 50% der Zeit zwischen 3 und 6 m/s. An heißen Tagen im Sommer liegt die Windgeschwindigkeit in einem Bereich von 2 bis 6 m/s. Dies wird in Abb. 027 für den Monat August deutlich .

In Abb. 028 ist der Verlauf für zehn Sommertage (im IWEK Datensatz: 01. bis 10. Juli) zu sehen. Es zeigt

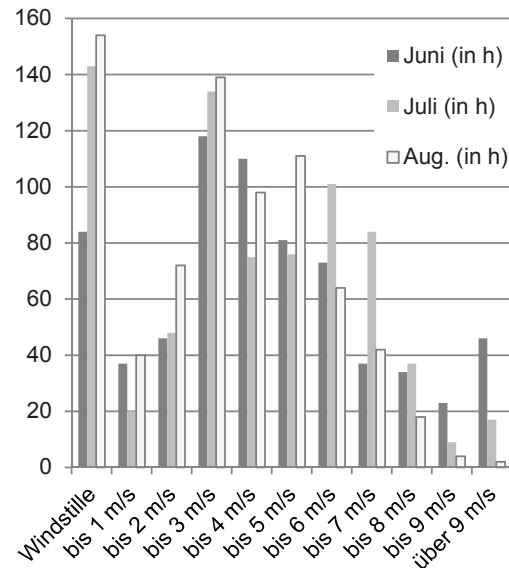


Abb. 026. Windgeschwindigkeiten für die Monate Juni, Juli und August nach Häufigkeit ihres Auftretens in h (IWEK Klimadaten)

sich, dass der Wind ein im Tagesverlauf wiederkehrendes Muster aufweist. Aus der Analyse des Datensatzes ergibt sich folgender typischer Tagesverlauf:

Tagsüber: die Windgeschwindigkeit nimmt zu, westliche bis nördliche Richtungen.

Abends: die Windgeschwindigkeit nimmt ab, auf südliche Richtung drehend.

Nachts: schwache Winde aus nördlichen oder östlichen Richtungen oder Windstille.

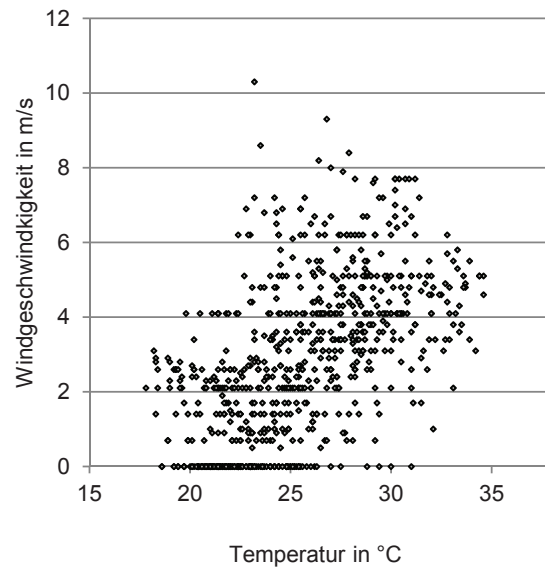


Abb. 027. Windgeschwindigkeit im Zusammenhang mit der Lufttemperatur im Monat August (IWEK Klimadaten)

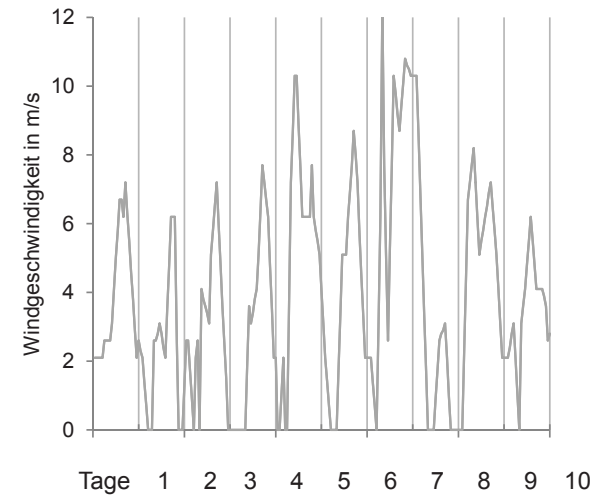


Abb. 028. Windprofil, Tagesverlauf (IWEK Klimadaten 01. bis 10. Juli)

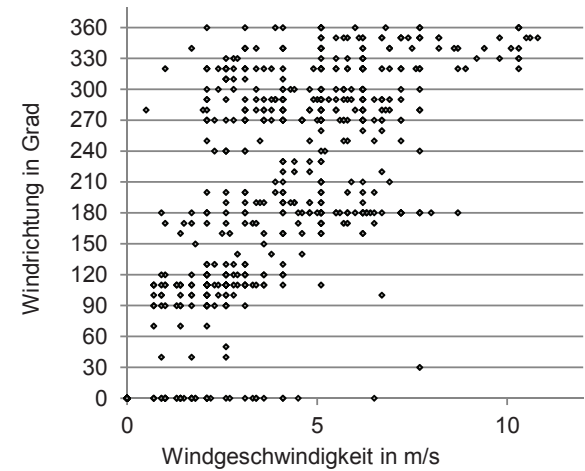


Abb. 029. Windgeschwindigkeit im Zusammenhang mit der Windrichtung im Monat August (IWEK Klimadaten)

Nordöstliche (vor allem etwa 30°) und südwestliche Winde (im Bereich um 230°) kommen nur sehr selten vor (siehe Abb. 029). Windstille herrscht vor allem in den Nachstunden ab Mitternacht bis früh morgens. Dieses Muster besteht das ganze Jahr über und ist auch während Hitzeperioden (welche als Zeiträume mit  $T_{\min} \geq 20 \text{ °C}$  und  $T_{\max} \geq 33 \text{ °C}$  an fünf aufeinander folgenden Tagen festgelegt werden) vorhanden. Störungen der Großwetterlage können zu kurzzeitigen Abweichungen führen.

◇ Winter - Analyse des IWEK Datensatzes

Diese Abweichungen treten im Winter häufig auf, wenn der Luftdruck über Osteuropa höher ist, als über der Ägäis (diese Wetterlage entspricht dem in Frankreich auftretenden Mistral). Durch die Unterschiede im Luftdruck strömt kalte Luft aus dem Vardar Tal in Mazedonien nach Süden und erreicht mit hohen Windgeschwindigkeiten das Axios Delta und Thessaloniki. Durch diese Wetterlage wird der gleichmäßig wiederkehrende Tagesverlauf gestört, wie es in Abb. 030 ab Tag acht zu sehen ist.

Die als Vardaris bezeichneten Winde kennzeichnen höhere Windgeschwindigkeiten aus nördlichen Richtungen bei Temperaturen zwischen 4 und 8°C (siehe Abb. 031 und 032). Fallen die Temperaturen unter den Gefrierpunkt, steigen die Windgeschwindigkeiten nicht über 3 m/s und kommen vorwiegend aus südöstlichen oder nordwestlichen Richtungen.

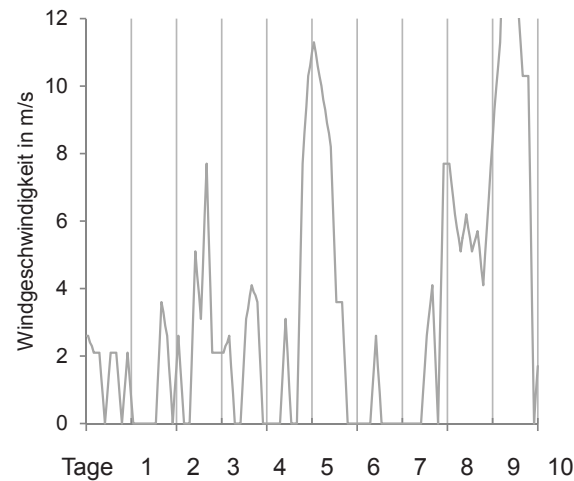


Abb. 030. Windprofil, Tagesverlauf über 10 Tage (12. bis 22. Februar im IWEK Klimadaten)

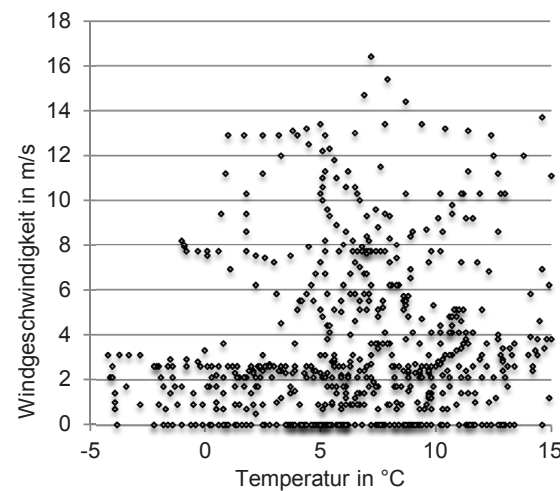


Abb. 031. Windgeschwindigkeit im Zusammenhang mit der Temperatur im Monat Februar (IWEK Klimadaten)

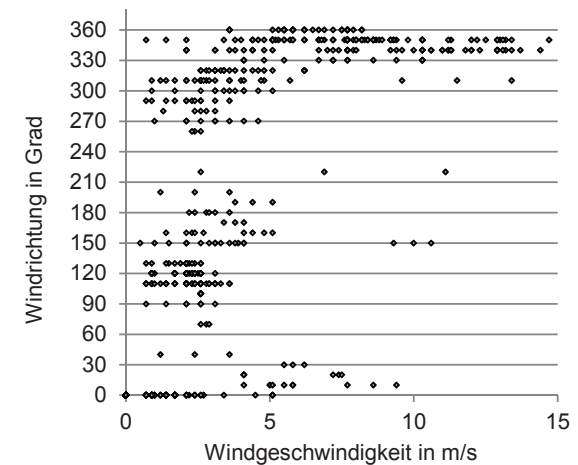


Abb. 032. Windgeschwindigkeit im Zusammenhang mit der Windrichtung im Monat Februar (IWEK Klimadaten)

## 2.5.5 Solare Einstrahlung

Der Winkel der direkten Sonneneinstrahlung und der Zeitraum von Sonnenaufgang bis Sonnenuntergang sind an jedem Ort der Erde für jeden Zeitpunkt exakt vorherzusagen. Der Sonnenstand bestimmt, wie stark die Intensität der direkten solaren Einstrahlung auf ein Bauteil ist. Die diffuse Strahlung ist abhängig von der Bewölkung und kann zwischen 5% an trockenen Tagen ohne Bewölkung bis zu 80% bei starker Bewölkung variieren. Sie ist daher direkt von der Wetterlage abhängig. Die dritte Komponente der solaren Einstrahlung, die reflektierende Strahlung, wird von der Umgebung des Gebäudes bestimmt (vgl. Givoni, 1998:54 bis 57).

In der Untersuchungsregion ist der Bewölkungsgrad in den Sommermonaten am niedrigsten und in den Wintermonaten am höchsten (siehe Abb. 033). Die Tageslänge beträgt am längsten Tag 15h und die Sonne steht um 12:00 Uhr Mittags in einem Winkel von 73°. Im Winter dagegen dauert der kürzeste Tag 9h 20 min mit einem maximalen Einfallswinkel der Sonne von 25°. Dem entsprechend verhält sich die solare Einstrahlung, welche im Juni bis zu 976 Wh/m<sup>2</sup> betragen kann, im Dezember hingegen bei maximal 429 Wh/m<sup>2</sup> liegt (siehe Abb. 034).

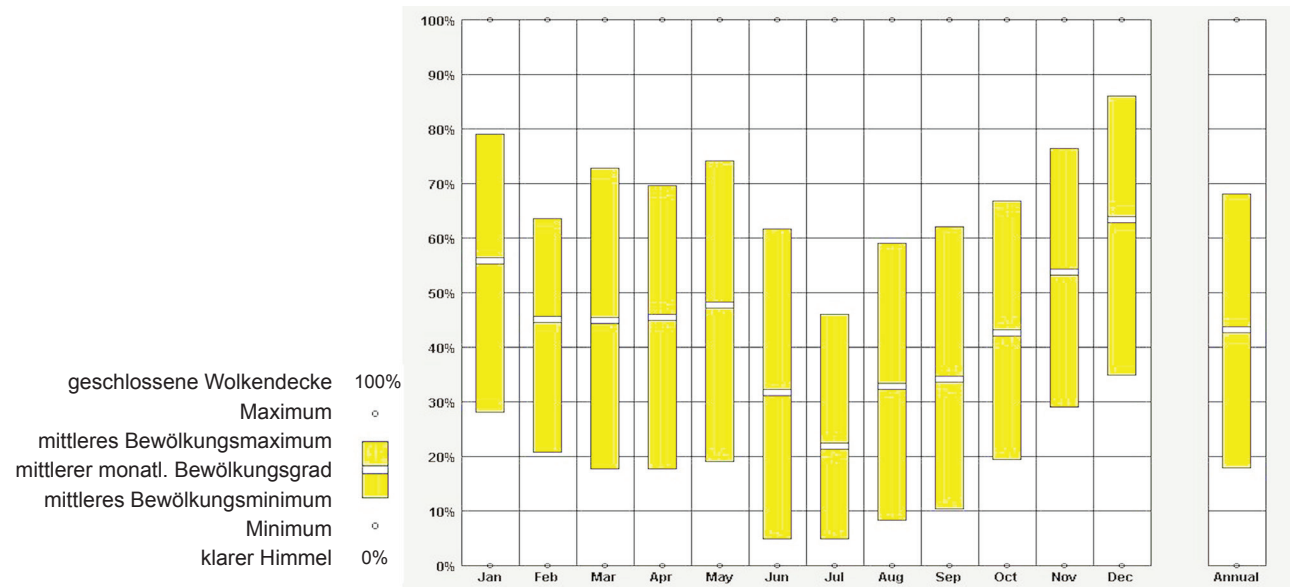


Abb. 033. Bewölkungsgrad in Thessaloniki von Januar bis Dezember (IWEK Klimadaten, Darstellung mit Climate Consultant 5.4)

		Jan	Feb	März	April	Mai	Juni	Juli	Aug	Sept	Okt	Nov	Dez
Horizontale Fläche													
Globalstrahlung	Monatsmittel	236	327	400	439	473	543	542	546	453	346	251	202
	maximal	501	648	816	902	951	976	962	910	834	711	518	429
	Σ Tagesmittel	1745	2895	3965	4893	6012	7098	7078	6243	4786	3187	1960	1485
Direkte Strahlung		280	421	308	310	342	424	473	488	409	348	280	218
Diffuse Strahlung		124	130	212	218	221	218	184	191	187	154	133	123
Vertikale Fläche nach Süden													
Direkte Strahlung		270	360	250	190	155	150	180	250	280	290	270	220

Abb. 034. Solare Einstrahlung im Monatsdurchschnitt in Wh/m<sup>2</sup> pro h und Summe der Globalstrahlung im Tagesmittel in Wh/m<sup>2</sup> (IWEK Klimadaten)

## 2.6 Komfortmodelle

Komfortmodelle können helfen, Zeiträume zu erfassen, in denen sich die Mehrheit der Personen in Bezug auf definierte Parameter wie z.B. Temperatur, relative Luftfeuchtigkeit und Luftbewegung wohl oder unwohl fühlt. Je nach Komfortmodell werden weitere Rahmenbedingungen wie beispielsweise während des Aufenthaltes ausgeübte Tätigkeiten, Kleidung (Stichwort „dresscode“) oder bei adaptiven Komfortmodellen, die Außentemperaturen hinzugezogen. In der DIN EN ISO 7730, welche parallel zur ASHRAE Norm 55 überarbeitet wurde, werden die dazu verwendeten Rahmenbedingungen definiert.

### ◇ PMV (predicted mean vote)

„Das menschliche Wärmeempfinden hängt im Wesentlichen vom thermischen Gleichgewicht (Wärmebilanz) des Körpers als Ganzem ab. Dieses Gleichgewicht wird durch körperliche Tätigkeit und Bekleidung sowie durch die Parameter des Umgebungsklimas, das sind Lufttemperatur, mittlere Strahlungstemperatur, Luftgeschwindigkeit und Luftfeuchte, beeinflusst. Sofern diese Faktoren geschätzt oder gemessen wurden, kann das Wärmeempfinden für den Körper als Ganzes vorausgesagt werden, indem das vorausgesagte mittlere Votum (predicted mean vote, PMV) berechnet wird“ (DIN EN ISO 7730:4).

### ◇ PPD (predicted percentage of dissatisfied)

„Der vorausgesagte Prozentsatz an Unzufriedenen (predicted percentage of dissatisfied, PPD) liefert Angaben zur thermischen Unbehaglichkeit oder

Unzufriedenheit, indem der Prozentsatz an Menschen vorausgesagt wird, die ein bestimmtes Umgebungsklima wahrscheinlich als zu warm oder zu kalt empfinden. Der PPD lässt sich aus dem PMV berechnen“ (Ebd.).

Diese Bewertung nach PMV und PPD wurde in den 1980er Jahren von Fanger entwickelt und ist ein heute weltweit verwendetes Modell (Fanger 1982:110ff und 128ff).

Das in der DIN EN 15251:2012 beschriebene Komfortmodell unterscheidet zusätzlich zwischen natürlich belüfteten und klimatisierten Gebäuden. Es sind den Klassenbezeichnungen A, B und C der DIN EN ISO 7730 entsprechende Komfortklassen festgelegt die sich auf die Erwartungen beziehen, die an ein Gebäude gestellt werden:

I hohes Maß an Erwartungen; empfohlen für Räume, in denen sich sehr empfindliche und anfällige Personen mit besonderen Bedürfnissen aufhalten (PPD < 6, -0,2 < PMV < +0,2)

II normales Maß an Erwartungen; empfohlen für neue und renovierte Gebäude (PPD < 10, -0,5 < PMV < +0,5)

III annehmbares, moderates Maß an Erwartungen; kann bei bestehenden Gebäuden angewendet werden (PPD < 15, -0,7 < PMV < +0,7)

IV Werte außerhalb der oben genannten Kategorien. Diese Kategorie sollte nur für einen begrenzten Teil des Jahres angewendet werden (PPD > 15, PMV < -0,7 oder -0,7 < PMV)

Es werden die folgenden Auslegungswerte für die operative Innenraumtemperatur empfohlen:

Wohngebäude	Kategorie	Operative Temperatur in °C	
		Mindestwert Heizperiode	Höchstwert Kühlperiode
Wohnräume	I	21,0	25,5
	II	20,0	26,0
	III	18,0	27,0
Andere Räume	I	18,0	-
	II	16,0	-
	III	14,0	-

Abb. 035. Nach DIN EN 15251:2012:25 empfohlene Auslegungswerte der Innenraumtemperatur

Die operative Temperatur ist die vom Menschen empfundene Temperatur als Mittelwert von Luft- und Strahlungstemperatur.

Eine Überschreitung in Form einer kurzzeitigen Abweichung der jeweils angestrebten Komfortzone von 3 bis 5% wird als akzeptabel angesehen (DIN EN 15251:2012:43).



Komfortbereiche können in Form eines psychometrischen Diagramms dargestellt werden. Abb. 036 zeigt ein solches Diagramm für Thessaloniki mit den Daten aus dem Klimadatensatz IWEK für das adaptive Komfortmodell ASHRAE Standard 55-2004. Es lässt sich ablesen, dass 19% eines Jahres die Temperaturen im Außenraum im definierten Komfortbereich liegen. Ein Gebäude muss daher bei diesen angesetzten Parametern an fast 300 Tagen im Jahr, bzw. über 7000 h/a die Anforderung erfüllen, ein im Gegensatz zum Außenraum komfortables Klima zu bieten.

Weitere Modelle wie die Bio-Climatic Charts von Olgyay, die Mahoney Tables oder das BBCC - Komfortmodell von Givoni (Givoni, 1998:23ff) wurden für die Untersuchungen nicht herangezogen, da sich keine zusätzlichen Erkenntnisse daraus ableiten lassen würden.

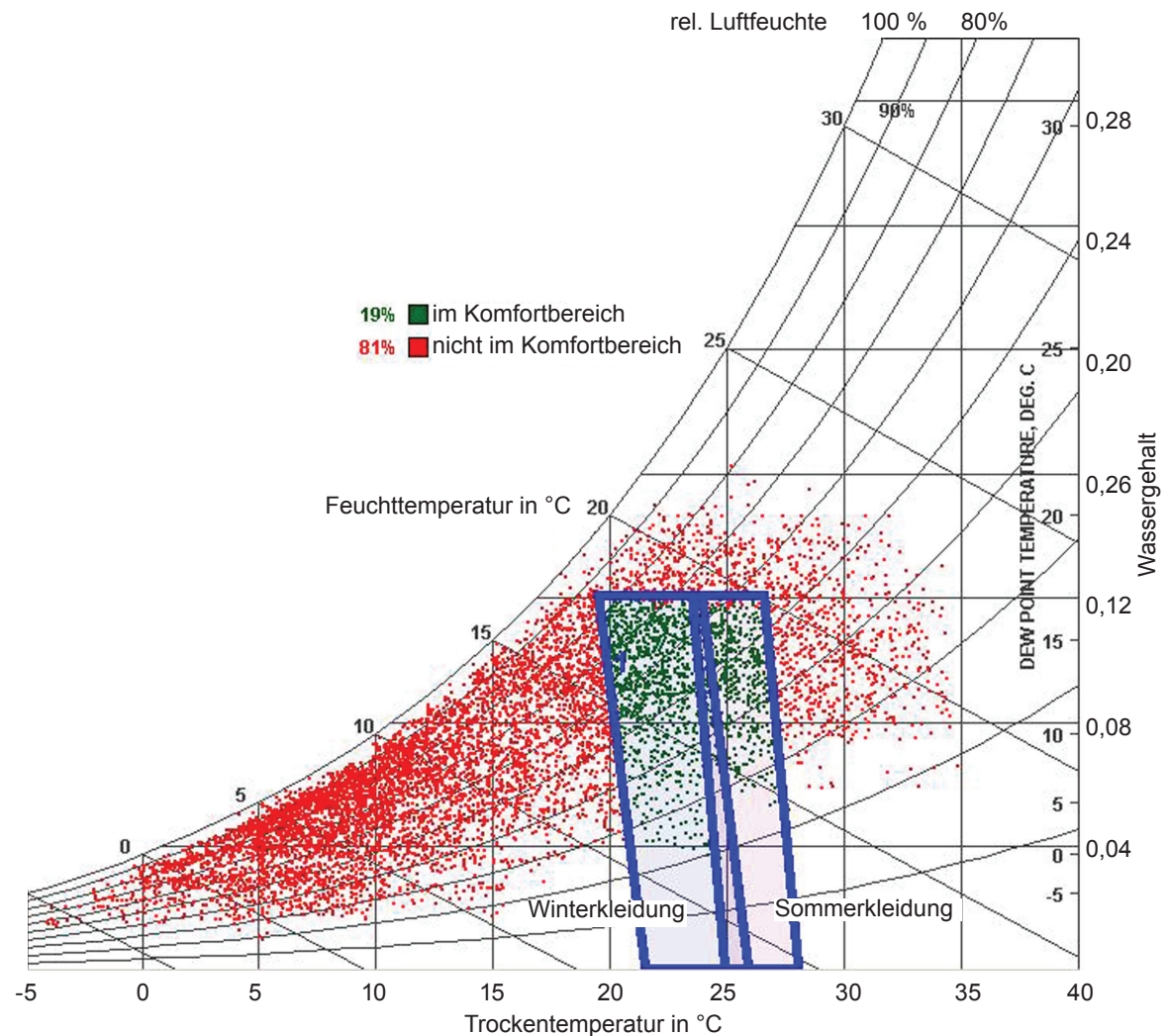


Abb. 036. Psychometrisches Diagramm nach ASHRAE Standard 55-2005 using PMV, Darstellung durch Climate Consultant 5.4 (IWEK Klimadaten)

## 2.7 Vergleichende Betrachtung lokaler Varianten in der Umgebung von Thessaloniki

In der Umgebung von Thessaloniki finden sich an vielen weiteren Orten Beispiele für die traditionelle Bauweise. Auf den ersten Blick wirken die Gebäude einander sehr ähnlich. Bei genauerer Betrachtung muss jedoch festgestellt werden, dass sie sich in etlichen Punkten unterscheiden. Im Folgenden wird als vergleichende Betrachtung die Wohnbebauung von drei Beispielen in der weiteren Umgebung von Thessaloniki skizziert, um die jeweilige lokale Anpassung zu erkennen und darzustellen, dass trotz aller Gemeinsamkeiten jede Region ihre eigene Ausprägung hat. Die drei Orte liegen wie Thessaloniki im Verbreitungsgebiet des osmanischen Hauses.

### 2.7.1 Veria

Die Stadt Veria ist seit der Antike bekannt und liegt in einem der ältesten Siedlungsgebiete Griechenlands, etwa 80 km westlich von Thessaloniki in der zentral-makedonischen Tiefebene am Rande des Vermio Gebirges. In Veria besteht in einem kleinen Teil der Stadt eine städtische Bebauung mit Wohnhäusern aus dem 19. Jahrhundert. Zunächst scheinen die Gebäude denen in Thessaloniki sehr ähnlich zu sein. Massive Erdgeschosse sind aus Naturstein gemauert, aus den Obergeschossen in leichter Holzbauweise ragen Erker in den Straßenraum (siehe Abb. 037). An gewundenen Straßen sind sie häufig dreieckig, damit die Räume im Obergeschoss einen rechteckigen Grundriss haben (vgl. Moutsopoulos, 1967:101).

Abweichend von den Häusern im Untersuchungsgebiet sieht man jedoch an den Fassaden in den ehemals griechischen und türkischen Vierteln Kaminzüge für den „kalas ondas“ (siehe Abb. 038). Dieser „warme Raum“ war der repräsentative Erker-Raum des Hauses (vgl. Kalogirou, 1990:35; Moutsopoulos, 1967:106). Bei den Häusern der jüdischen Bevölkerung waren keine eingebaute Feuerstellen vorhanden, denn diese heizten mit großen beweglichen Kohlenbecken (Moutsopoulos, 1967:98f).

Ein weiterer signifikanter Unterschied ist die Anordnung der Gebäude um interne halböffentliche Innenhöfe, die über einen oder mehrere Zuwege erreichbar sind. Aufgrund dieser Form der Erschließung sind die Erdgeschosse der Häuser zum öffentlichen Straßenraum hin geschlossen (siehe Abb. 039) zu den Innenhöfen jedoch geöffnet.

Einige Wohnhäuser in Veria hatten ein besonderes Raumelement, eine über eine Stiege zu erreichende



Abb. 037. Wohnbebauung in Veria, massives Erdgeschoss, Obergeschoss in leichter Bauweise, in den Straßenraum ragende Erker (eigene Aufnahme, 2013)



überdachte „Dachterrasse“, welche nur an diesem Standort belegt ist. Die Nutzung dieses als *iliakos* bezeichneten Raumes ist unbekannt. Es ist möglich, dass dieser als Aufenthaltsraum diente, welcher eine besondere Aussicht bot (Kalogirou, 1990) und angenehm luftig war.

In Veria zeigt sich die gleiche Technik zum erdbebensicheren Bauen wie in Thessaloniki. Als Baumaterial für die Holzbauteile wurde ebenfalls häufig Kastanienholz verwendet. Unterschiede zu den untersuchten Gebäuden in Thessaloniki bestehen jedoch darin, dass bei repräsentativen Wohnhäusern das mit horizontalen Balken bewehrte Mauerwerk auch in den Obergeschossen verwendet wurde. Nur schlichtere und günstiger gebaute Häuser wurden

ab dem Erdgeschoss mit ausgemauertem Fachwerk errichtet.

Die innere Organisation der Häuser weicht vor allem in der Erschließung stark von den Wohnhäusern in Thessaloniki ab. Moutsopoulos (1967) vermutet, dass sich diese und der Aufbau der Fassaden direkt aus dem makedonischen Bauernhaus entwickelt haben. Kalogirou (1990:24) dagegen nimmt an, das obere Geschoss sei nur eine Kopie des ebenerdigen Geschosses. Dieser Typus sei zurückzuführen auf den Prototypen aus Olynthos.

Dem wäre entgegenzusetzen, dass die oberen Geschosse der Häuser in Veria keine Kopien der Erdgeschosse sind und zweitens die Häuser in

Olynthos keinesfalls eingeschossig waren (vgl. Behling, 1996:86f, Butti, 1980:6f) sondern zweigeschossige Wohnhäuser mit einer Vorhalle und einem Innenhof auf einem quadratischem Grundstück.

Auch liegt Veria im Verbreitungsgebiet des osmanischen Hauses, so dass die vorgefundene Bauweise vermutlich eine lokale Variante dieses Bautypus ist. Ein Indiz für diese Annahme sind die an vielen dieser Häuser vorhandenen Fenster mit zwei vertikal gegeneinander verschiebbaren Flügeln, welche für das osmanische Haus typisch sind. Diese konnten ursprünglich durch innenliegende Holzläden verschlossen werden. Außenliegende Klappläden haben sich nicht verbreitet.

Die beschriebenen Unterschiede in der Bauweise, verglichen mit der traditionellen Bebauung in der Oberstadt von Thessaloniki, zeugen von einer regionalen Anpassung. Die Ergebnisse einer Untersuchung der Wohnhäuser von Veria mit dem Ziel Konzepte zur passiven Klimatisierung abzuleiten, könnten im Vergleich mit den Ergebnissen dieser Arbeit Hinweise dazu liefern, durch welche Parameter von außen diese Abweichungen voneinander entstanden sind. In Bezug auf eine klimaangepasste Bauweise wäre es zum Beispiel aufschlussreich zu untersuchen, welche Auswirkung die Organisation der Gebäude um einen halböffentlichen Innenhof auf die Belichtung und Belüftung der Räume hat.



Abb. 038. Kaminzug an der Fassade eines Wohnhauses in Veria, Fenster mit zwei vertikal verschiebbaren Flügeln (eigene Aufnahme, 2013)



Abb. 039. Wohnbebauung in Veria, dem Straßenverlauf folgend, im Erdgeschoss bewehrtes Natursteinmauerwerk ohne Fensteröffnungen (eigene Aufnahme, 2013)

## 2.7.2 Arneia

Arneia ist eine Kleinstadt, etwa 70 km östlich von Thessaloniki. Sie liegt auf etwa 600 m Höhe auf einem bergigen Gelände am Cholomondas-Massiv, welches bis zu 1165 m ansteigt. In Arneia sind zahlreiche Häuser aus dem 19. Jahrhundert erhalten. Im Oktober 2013 wurde bei einem Besuch der Stadt, mit einem vor Ort tätigen Bauingenieur, Asterios Karastergios, ein Gespräch geführt. Der Inhalt ist im Folgenden frei wiedergegeben (eine wörtliche Wiedergabe ist nicht möglich, da für das Gespräch ein Dolmetscher benötigt wurde).

*„In Arneia stehen die Häuser eng aneinandergebaut, um die Außenfläche zu verringern. Sie haben zwei bis drei Stockwerke. Das Erdgeschoss, und bei Gebäuden mit drei Stockwerken auch das 1. Obergeschoss, bestehen aus massivem Natursteinmauerwerk von bis zu einem Meter Dicke. Das oberste Geschoss ist als satmas ausgebildet. Die satmas sind jedoch nicht wie in Thessaloniki mit Ziegeln ausgemauert, sondern beidseitig mit Holzlatten verkleidet und mit Lehm verputzt. Dazwischen bleibt ein Luftraum.“*

*Die Erschließung erfolgt über innenliegende Treppen, welche meistens mittig im Gebäude liegen. Daraus ergeben sich in den Obergeschossen kreuzförmige und zum Teil komplizierte Grundrisse mit vier oder mehr Räumen rund um die Erschließung (siehe Abb. 040). Die Decke zwischen Erdgeschoss*

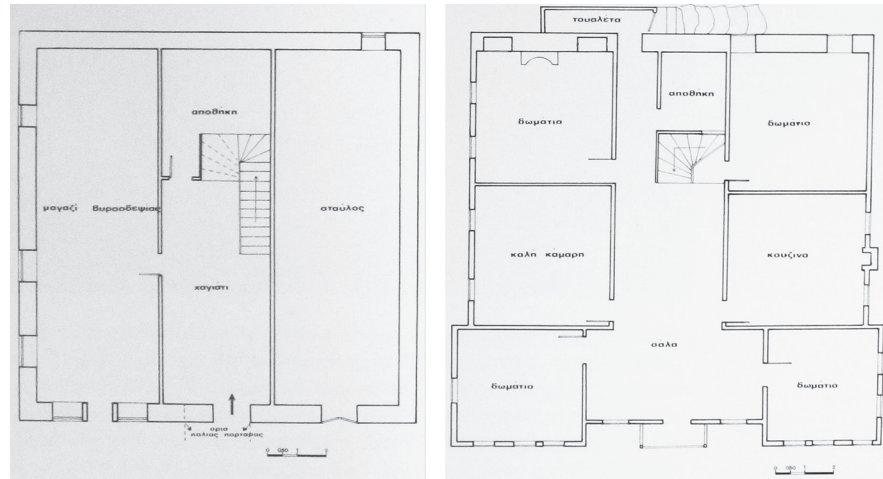


Abb. 040. Grundriss Erdgeschoss und Obergeschoss mit sechs Zimmern eines Wohnhauses in Arneia, Eckzimmer mit Erkern und Erweiterung des zentralen Raumes in den Straßenraum durch einen Balkon (aus: Arneia 1990:16)

*und Obergeschoss war die Trennung zwischen den Stallungen und dem Wohngeschoss. Dadurch heizten die Stallungen das darüberliegende Geschoss. Diese Decke war mit einer Lehm/Stroh-schüttung versehen.“*

Hier stellte sich die Frage, warum die Lehmschüttung eingebracht wurde. Dies war jedoch in dem Gespräch nicht zu klären.

*„Die anderen Decken wurden nicht gedämmt. Aus Schallschutzgründen wurde in manchen Fällen der Luftraum zwischen den Trennwänden der Häuser mit Ziegelschutt aufgefüllt.“*



Abb. 041. Als satmas ausgebildete Außenwand (aus: Arneia 1990)

*Häuser mit drei Geschossen hatten einen Wohnbereich für den Winter (das mittlere Geschoss) und einen für den Sommer (das obere Geschoss), in welchem sich immer die Küche befand. Alle Wohnräume hatten je einen Kamin. Die Fensteröffnungen in den oberen Stockwerken sind zahlreicher und wesentlich größer als im Erdgeschoss. Bei den unteren Geschossen finden sich zur besseren Belichtung durch die kleinen Fenster schräge Leibungen.*

*Arneia war über einen langen Zeitraum hinweg Angriffen durch Piraten ausgesetzt. Daher finden sich in den Wänden Schießscharten, welche auch als Belüftungsöffnungen genutzt wurden. Die Lüftung des Dachraumes erfolgte über Dachfenster.*



Die Dachräume waren untereinander verbunden, um bei Piratenangriffen auf diesem Wege zu fliehen.

Als Bauholz wurde Eiche und Kastanie genutzt. Die Bäume wurden im Herbst gefällt, danach ließ man den Baum zunächst mit Ästen und Blattwerk zum Austrocknen liegen. So habe das Holz eine sehr hohe Qualität und würde sich nicht verdrehen. Die Verschattung der Räume erfolgte ursprünglich nur durch den Dachüberstand und Balkone, Klappläden unterschiedlicher Art setzten sich erst seit 1900 durch.“

Diese Wohnhäuser in Arneia aus dem 19. Jahrhundert werden dem makedonischen Baustil zugeordnet, also der regionalen Ausprägung des osmanischen Hauses. Sie weisen etliche Unterschiede zu den Häusern in Thessaloniki aus der gleichen Bauzeit auf, wie beispielsweise die Balkone an den Straßenfassaden, eine andere Baukonstruktion der *satmas* und Kamine für die Wohnräume. Die Differenzen könnten vor allem in Unterschieden im Klima begründet liegen, da Arneia nicht wie Thessaloniki direkt am Meer sondern in einer bergigen Region liegt. Andererseits spielt die Geschichte des Ortes eine große Rolle, da sie durch die über Jahrhunderte währende Zeit mit einer Bedrohung durch Piratenübergriffe stark geprägt wurde.

Die Erker, wie sie bei den Häusern der türkischen Bevölkerung in der Oberstadt von Thessaloniki zu finden sind, und welche einen Ausblick in den

Straßenraum ermöglichen, sind bei den Häusern in Arneia nicht in dieser Form vorhanden. Die Ausbildung von Erkern und die Anordnung der Fenster diente der Erweiterung der Eckräume in den Obergeschossen der Häuser und war nicht darauf ausgelegt, den Einblick in den Straßenraum zu ermöglichen.

Konzepte zur passiven Klimatisierung, die sich aus den Gebäuden ableiten lassen, würden sich daher in Bezug auf die Belichtung und Belüftung der Räume von denen aus dieser Arbeit unterscheiden. Auch haben die Häuser in Arneia gegenüber den ursprünglich als freistehenden Gebäude konzipierten Wohnhäusern in Thessaloniki ein anderes Verhältnis von Oberfläche zu Volumen.



Abb. 042. Wohnhäuser in Arneia mit Erkern ohne seitliche Fenster zum Ausblick in den Straßenraum (eigene Aufnahmen, 2013)

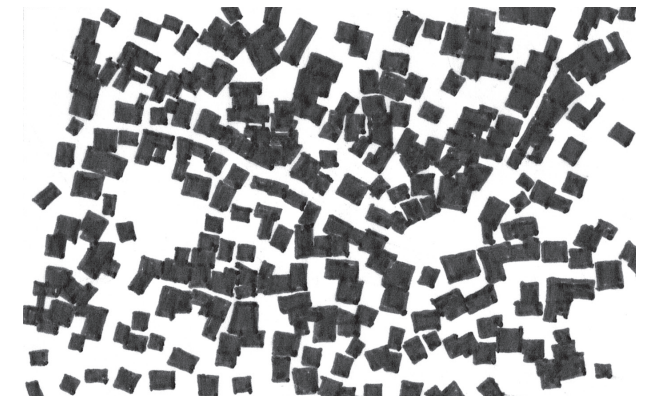


Abb. 043. Schwarzplan von Arneia, die Häuser stehen dicht aneinandergebaut (nach: Google Maps)



Abb. 044. Wohnhäuser in Arneia mit Balkonen zum Straßenraum (eigene Aufnahme, 2013)

### 2.7.3 Vrastama

Das Dorf Vrastama liegt etwa 20 km südlich von Arneia auf der südlichen Seite des Cholomondas-Massivs. Auch in diesem Ort haben Häuser aus dem 19. Jahrhundert die Zeit bis heute überdauert. Bei einem Besuch des Dorfes im Oktober 2013 wurden zwei Wohnhäuser besichtigt. Die Bewohner wurden befragt, und gaben nach ihrem Kenntnisstand Auskunft zu den Gebäuden.

Die freistehenden ländlich geprägten Wohnhäuser sind aus dem lokalen Naturstein gebaut und haben umlaufende Balken als Bewehrungen gegen Schäden durch Erdbeben, wie sie bei allen traditionellen Häusern der makedonischen Bauweise, die in dieser Arbeit untersucht wurden, zu finden sind.

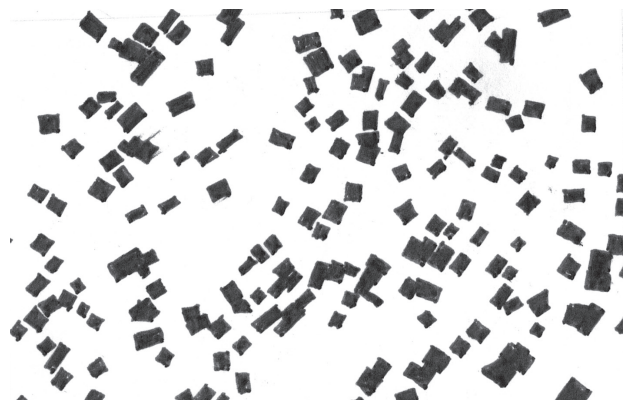


Abb. 045. Schwarzplan von Vrastama, freistehende Wohnhäuser einer ländlichen Dorfstruktur (nach: Google Maps)

#### Haus 1:

Das Mauerwerk im Erdgeschoss ist ca. 65 cm dick. Eine außenliegende Treppe im Vorhof des Hauses an der Südfassade bildet die Erschließung der Wohnräume über einen Balkon vor dem Obergeschoss. Das Erdgeschoss wurde ursprünglich als Stall, Werkstatt und Lagerraum genutzt, welches nur über kleine Fenster für die Arbeit in der Werkstatt oder am Webstuhl belichtet und belüftet werden konnte. Der Ausblick in die Straße vom Arbeitsplatz aus wird vom Eigentümer als besonders wichtig betont.

Die Außenwände des Obergeschosses bestehen ebenfalls aus Natursteinmauerwerk. Die Außenwand nach Süden, zur Terrasse hin sei jedoch aus



Abb. 046. Haus 1, nach Süden orientierter Balkon als Erschließung des Obergeschosses, laubabwerfende Rankpflanzen zur Verschattung des Vorplatzes (eigene Aufnahme, 2013)

Fachwerk und beidseitig verputzt. Sie sei nicht mit Ziegelmauerwerk ausgemauert. Es ist zu vermuten, dass die gleiche Konstruktion einer *satmas* vorliegt, wie in Arneia. Im Wohnraum befindet sich ein Kamin. Das Dach ist mit eingemörtelten Ziegeln gedeckt. Lüftungsöffnungen für den Dachraum bestehen nur über Dachfenster. Es ist keine Dämmung der obersten Decke bekannt.

Klappläden oder andere bewegliche Verschattungselemente sind nicht vorhanden. Das einzige bauliche Element, welches Schatten auf die Fassade wirft, ist ein Dachüberstand von etwa 60 cm. Die Besitzer geben an, dass die Wohnräume im Sommer ursprünglich kaum genutzt wurden, da die Einwohner des Dorfes mit den Tieren in die Berge zogen. Besondere Maßnahmen für den sommerlichen Wärmeschutz seien daher nicht notwendig gewesen.

#### Haus 2:

Das Natursteinmauerwerk im Erdgeschoss ist ebenfalls etwa 65 cm dick. Die eine Hälfte der Fläche wurde ursprünglich als Stall genutzt, die andere Hälfte als Lager und Werkstatt. Von dort aus führt eine Treppe in das Obergeschoss. Die Außenwände des Obergeschosses bestehen ebenfalls aus Natursteinmauerwerk mit geringerer Dicke. Nur eine Wand der Südfassade mit Balkon über der Eingangstür sei als *satmas* konstruiert.

In jedem Zimmer des Obergeschosses befindet sich ein Kamin. Die Züge wurden nach Aussage des Besitzers im Sommer zum Lüften benutzt. Es existieren keine Lüftungsöffnungen für den Dachraum und es gibt keine Zeugnisse über eine Dämmung des Daches.

Die Wohnhäuser in Vrastama unterscheiden sich stark von denen in Thessaloniki. Die Ursachen liegen zum einen darin, dass die Bauweise sehr ländlich geprägt ist und keine Entwicklung zu einem Stadthaus durchgemacht hat. Weitere Gründe für die Unterschiede liegen in der Nutzung der Gebäude, welche an die traditionelle Landwirtschaft angepasst war. Ein weiterer äußerer Faktor, der sich auf die Bebauung ausgewirkt hat ist die Tatsache, dass Vrastama noch viel stärker, als das hinter einer Bergkuppe liegende Arneia, Piratenüberfällen ausgesetzt war.

Bei der Ableitung von Konzepten müssten diese Faktoren besonders berücksichtigt werden und es wäre gründlich zu prüfen, ob und inwieweit die Anpassungskonzepte der Häuser in Vrastama in unsere heutige Zeit übertragbar sind.



*Abb. 047. Haus 2, massives Natursteinmauerwerk, durch Holzbalken bewehrt, Fenster ohne außenliegende Verschattungselemente (eigene Aufnahme, 2013)*

### **3** Gebäudebestand in Thessaloniki und aktuelle Gesetzgebung



Das heutige Thessaloniki ist eine lebendige Stadt, deren Charakter durch das Nebeneinander von Gebäuden aus über 2000 Jahren Baugeschichte geprägt ist. Die exemplarisch untersuchte traditionelle Bebauung in der Oberstadt stellt einen kleinen Anteil an dieser Vielfalt dar.

In diesem Kapitel wird zunächst ein kurzer Überblick über den gesamten Gebäudebestand der Stadt gegeben. Besonders prägend ist für Thessaloniki, wie für viele griechischen Städte, die Bebauung aus den 1950er bis 1970er Jahren.

Darauf folgend wird die aktuelle Gesetzgebung in Bezug auf die Energieeffizienz von Gebäuden erläutert, so dass bezogen auf die untersuchte Region die Umsetzung der Vorgaben durch die EU deutlich wird.

Im dritten und letzten Abschnitt des Kapitels wird die nationale Umsetzung der Ziele zur energetischen Sanierung des Gebäudebestands in Griechenland bis zum Jahre 2020 dargestellt.



Abb. 048. 2000 Jahre Baugeschichte: Blick vom Forum Romanum auf die Bebauung der Unterstadt (eigene Aufnahme 2010)

### 3.1 Der aktuelle Gebäudebestand

Wohngebäude machen aktuell etwa 75% des gesamten griechischen Bestands von etwa 4 Millionen Gebäuden aus (Dascalaki, 2010:1232) und verursachen etwa 25 % des gesamten Primärenergieverbrauchs (Balaras, 2007:1306). Trotz der südlichen Lage in Europa stellt bei Wohngebäuden der Energiebedarf zum Heizen den größten Anteil am Gesamtenergieverbrauch dar (siehe Abb. 049).

Im Jahre 1980 wurde in Griechenland die erste Verordnung zur Energieeinsparung TIR verabschiedet (Hellenic Building Thermal Insulation Regulation, OHJ 362/4-7-79). Bis dahin wurden Außenbauteile und Leitungen üblicherweise nicht mit einer Wärmedämmung versehen. Die Fenster aus dieser Bauzeit haben Einfachverglasungen (vgl. Balaras,

2007:1304). Diese Gebäude machen 76% des Gebäudebestands aus (siehe Abb. 050).

Die Umsetzung der Vorgaben der TIR verlief in den 1980er Jahren zunächst sehr schleppend. Wenn die Außenbauteile wärmegeklämmt wurden, bestand die Maßnahme üblicherweise darin, ein zweischaliges

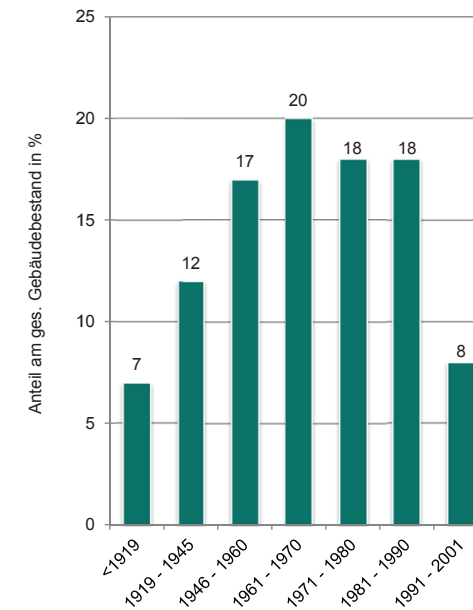
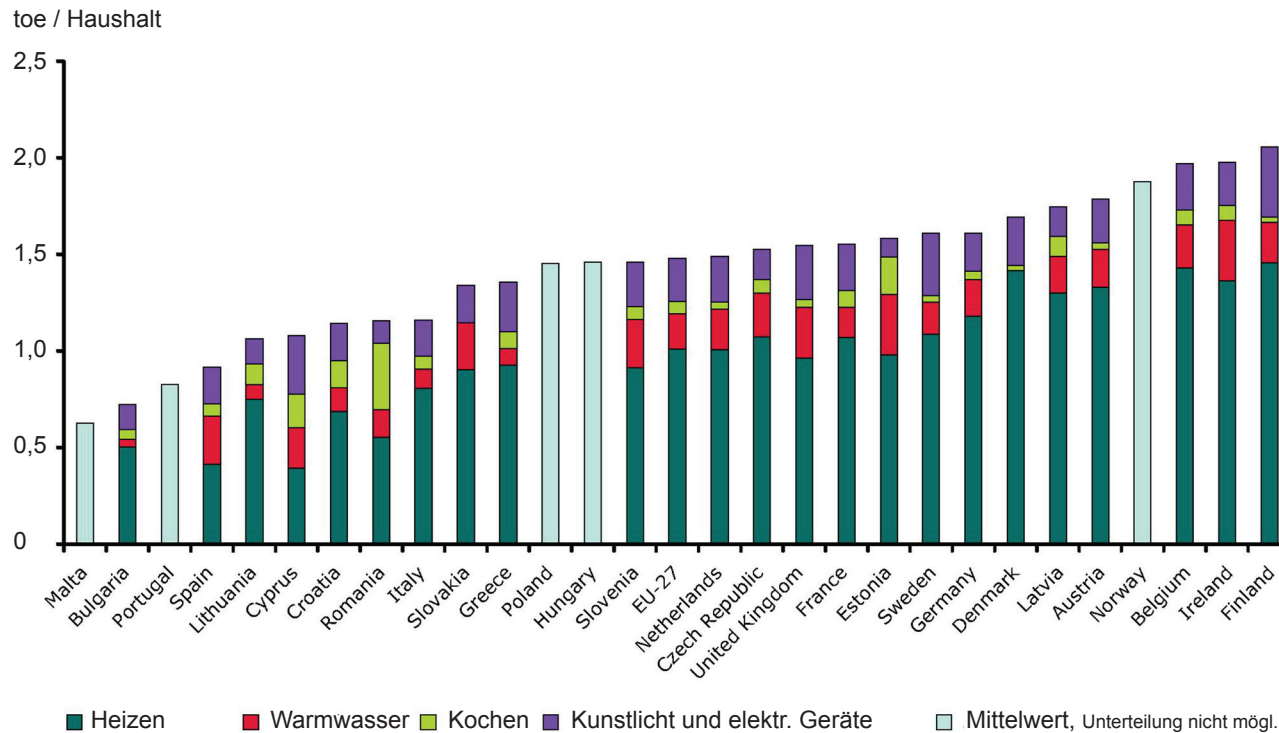


Abb. 049. Anteil Energieverbrauch in toe (Tonne of oil equivalent) pro Haushalt im Vergleich zu anderen Ländern in Europa (aus: EEA 2009)

Abb. 050. Gebäudebestand in Griechenland nach Bauzeit in % (nach Balaras, 2007:1304)

Mauerwerk in den Ausfachungen des Stahlbetonskelettbaus zu bauen und eine Dämmlage im Zwischenraum einzubringen. Die nicht gedämmten Betonbauteile bilden dadurch Wärmebrücken, die Luftdichtheit der Fassade ist häufig gering. Appartementhäuser der Bauzeit von 1981 bis 2000 haben daher einen ähnlichen Heizenergieverbrauch,

wie die bis 1980 errichteten Gebäude. Bei Appartementhäusern, welche nach dem Jahr 2000 gebaut wurden, kann davon ausgegangen werden, dass alle Außenbauteile wärmegeklämt sind. Der Heizwärmebedarf bei Gebäuden aus dieser Bauzeit liegt daher niedriger (Tabula, 2012; Balaras, 2007:1307).

Aktuell befinden sich an den meisten Gebäuden Klimageräte für einzelne Räume, welche nachträglich an der Fassade angebracht wurden. Nach Davaki (2011:15ff) ist ein häufiges Nutzerverhalten bei Wohngebäuden das Einschalten der Klimageräte für ca. drei Stunden am Nachmittag, wenn die Außentemperatur über 32°C steigt. Zu anderen Zeiten bleiben die Fenster geöffnet und die Geräte abgeschaltet.

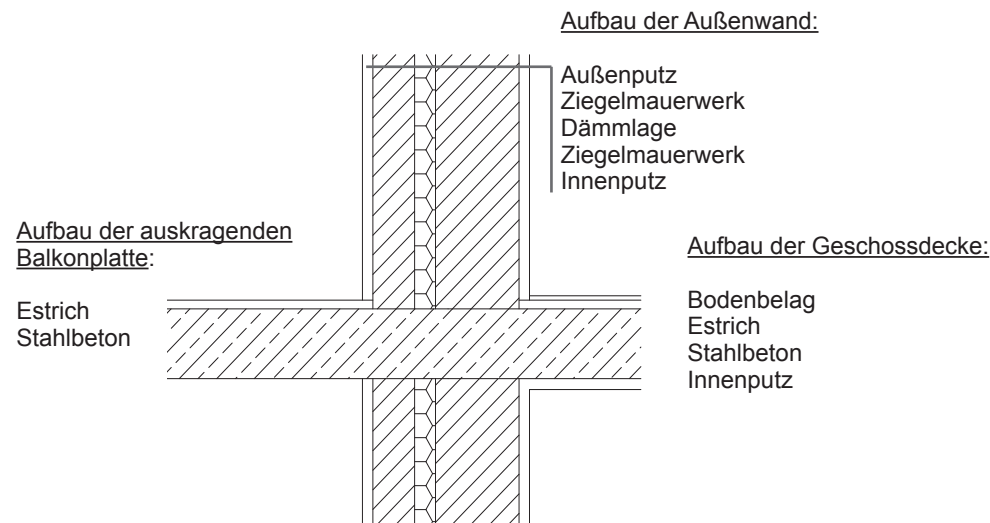


Abb. 051. schematische Darstellung des üblichen Wandaufbaus einer Polykatoikia, Baujahr nach 1980. Wärmedämmung im Zwischenraum des Mauerwerks in den Ausfachungen des Stahlbetonskeletts, die auskragende Balkonplatte bildet eine Wärmebrücke (eigene Skizze)

Abb. 052. Nachträglich an der Fassade installierte Geräte zur Klimatisierung einzelner Räume in der Unterstadt von Thessaloniki (eigene Aufnahme, 2013)



## 3.2 Die aktuelle Gesetzgebung

Im Jahre 1980 machte die Hellenic Building Thermal Insulation Regulation (HB TIR) (OHJ 362/4-7-79) wie in diesem Zeitraum auch in vielen anderen Ländern, ausgelöst durch die Ölkrise, den Start für eine Gesetzgebung, die den Energieverbrauch von Gebäuden senken sollte. Aktuell ist die KENAK von 2010 die gültige Verordnung.

### 3.2.1 KENAK - Kanonismos Energeiakis Apodotikotitas Ktiriwn

Der *Kanonismos Energeiakis Apodotikotitas Ktiriwn* (KENAK) ist eine Verordnung zum Energieverbrauch von Gebäuden und die Umsetzung der europäischen Richtlinie *Directive on Energy Performance of Buildings 2010/31/EU* in die nationale Gesetzgebung. Verabschiedet wurde die KENAK als Ministerbeschluss D6 / B / 5825 des Ministeriums für Umwelt, Energie und Klimawandel am 09. April 2010. Die technischen Richtlinien des TEE (*Technical Chamber of Greece*) wurden im Oktober 2010 verabschiedet und legen die Berechnungsverfahren fest.

In der KENAK sind obere Grenzen für die U-Werte sowohl für einzelne Bauteile (siehe Abb. 054), als auch als für den durchschnittlichen U-Wert für das ganze Gebäude erlassen (siehe Abb. 055). Dieser ist abhängig vom A/V Verhältnis. Große Glasflächen müssen daher entweder vermieden werden, oder einen wesentlich geringeren U-Wert aufweisen, als es die Mindestanforderung vorgibt.

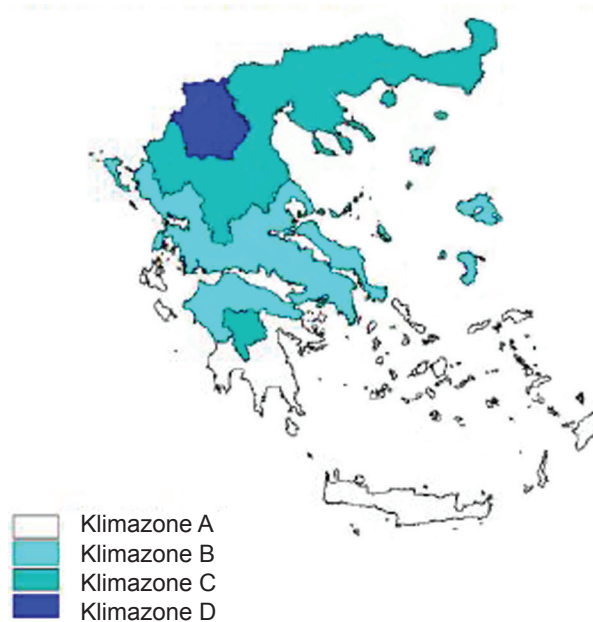


Abb. 053. Aufteilung in vier Klimazonen: Zone A (601–1100 HDD), Zone B (1101–1600 HDD), Zone C (1601–2200 HDD) und Zone D (2201–2620 HDD) (nach: KENAK:2010:5336 aus: Papagiannis, 2010:6)

Die Planung kompakter Baukörper wird durch die Vorgaben gefördert. Alle Grenzwerte für U-Werte der Konstruktionen sind jeweils für die vier in der KENAK definierten Klimaregionen angegeben, in die Griechenland basierend auf den Heizgradtagen (HDD) eingeteilt ist (siehe Abb. 053), Thessaloniki liegt in Zone C.

	Klimazone			
	A	B	C	D
Dächer und Böden gg. Außenluft	0,50	0,45	0,40	0,35
Wände gg. Außenluft	0,60	0,50	0,45	0,40
Böden mit Kontakt gg. Erdreich oder ungeheizte Räume	1,20	0,90	0,75	0,70
Wände mit Kontakt gg. Erdreich oder ungeheizte Räume	1,50	1,00	0,80	0,70
Transparente Öffnungen	3,2	3,0	2,8	2,6
Glasfassaden	2,20	2,00	1,8	1,8

Abb. 054. Obere Grenzen für die U-Werte unterschiedlicher Bauteile, in 4 Klimazonen unterteilt (nach: KENAK, 2010:5337)

A/V in 1/m	U <sub>max</sub> in W/m <sup>2</sup> K			
	A	B	C	D
≤ 0,2	1,26	1,14	1,05	0,96
0,3	1,20	1,09	1,00	0,92
0,4	1,15	1,03	0,95	0,87
0,5	1,09	0,98	0,90	0,83
0,6	1,03	0,93	0,86	0,78
0,7	0,98	0,88	0,81	0,73
0,8	0,92	0,83	0,76	0,69
0,9	0,86	0,78	0,71	0,64
≥ 1,0	0,81	0,73	0,66	0,60

Abb. 055. Obere Grenzen der U-Werte für das gesamte Gebäude in 4 Klimazonen unterteilt (KENAK, 2010:5337)

Weitere Auflagen werden für die technische Gebäudeausrüstung gemacht: Heizungsanlagen müssen einen Mindeststandard der Energieeffizienz erfüllen und über eine Regelung unter Einbeziehung des Außenklimas verfügen. Für Wärmepumpen ist ein Mindest-COP (coefficient of performance) definiert. Lüftungsanlagen mit einer Frischluft-Zulufrate über 60% müssen mindestens 50% Wärmerückgewinnung aufweisen. Zuleitungen für Wärme oder Kühlung müssen isoliert werden und bei Neubauten muss 60% des Warmwasserbedarfs aus erneuerbaren Energien gewonnen werden (KENAK, 2010; vgl. Dascalaki, 2012a:472).

Für eine Wohnnutzung ist der Mindestluftaustausch auf 0,75 m<sup>3</sup>/h/m<sup>2</sup> Raumfläche festgelegt. Es gibt keine Vorgaben für eine natürliche Belichtung bzw. Grenzwerte für den Energieverbrauch durch Kunstlicht. Anforderungen an Verschattungselemente werden nicht gestellt. Maßnahmen für den sommerlichen Wärmeschutz bestehen daher nur darin, die solaren Einträge durch höhere U-Werte der Außenbauteile zu beschränken.

Der maximale Primärenergiebedarf für Heizen, Kühlen und Warmwasser wird in der KENAK gedeckelt und ist unterschieden nach 12 Gebäudetypen und den vier Klimaregionen in Griechenland. Dieser Grenzwert ist festgelegt als 75% des Energieverbrauchs eines entsprechenden Referenzgebäudes des Gebäudebestands. Beim Primärenergiebedarf wird nicht nach unterschiedlicher

Energieproduktion unterschieden. Für Appartementshäuser in Klimazone C liegt der Grenzwert bei 140 kWh/m<sup>2</sup>a, für Einfamilienhäuser bei 160 kWh/m<sup>2</sup>a. Dies entspricht der in Abb. 056 dargestellten Energieeffizienzklasse B.

Für alle Neubauten, für Gebäude die umfassend renoviert werden und für alle Gebäude, die verkauft

oder neu vermietet werden, muss ein Energieausweis ausgefertigt werden und mindestens die Klasse B nachweisen. Die Klassifizierung erfolgt über den errechneten Primärenergiebedarf im Vergleich zum Referenzgebäude. Seit Ende 2010 werden neu gebaute oder umfassend renovierte Gebäude durch Inspektoren geprüft (Dascalaki, 2012b:7).

ΜΟΝΟΚΑΤΟΙΚΙΑ												
Μέγιστες και ελάχιστες τιμές ενεργειακής κατανάλωσης [(kWh/(m <sup>2</sup> ·έτος))]												
Κλιματική Ζώνη												
	Α		Β		Γ		Δ					
<b>A+</b>		EK <	60		EK <	60		EK <	65		EK <	75
<b>A</b>	60	≤ EK <	80	60	≤ EK <	80	65	≤ EK <	90	75	≤ EK <	100
<b>B+</b>	80	≤ EK <	110	80	≤ EK <	115	90	≤ EK <	125	100	≤ EK <	140
<b>B</b>	110	≤ EK <	140	115	≤ EK <	145	125	≤ EK <	160	140	≤ EK <	180
<b>Γ</b>	140	≤ EK <	155	145	≤ EK <	165	160	≤ EK <	180	180	≤ EK <	205
<b>Δ</b>	155	≤ EK <	175	165	≤ EK <	185	180	≤ EK <	205	205	≤ EK <	230
<b>E</b>	175	≤ EK <	215	185	≤ EK <	225	205	≤ EK <	250	230	≤ EK <	285
<b>Z</b>	215	≤ EK <	255	225	≤ EK <	265	250	≤ EK <	300	285	≤ EK <	335
<b>H</b>	255	≤ EK		265	≤ EK		300	≤ EK		335	≤ EK	

ΠΟΛΥΚΑΤΟΙΚΙΑ												
Μέγιστες και ελάχιστες τιμές ενεργειακής κατανάλωσης [(kWh/(m <sup>2</sup> ·έτος))]												
Κλιματική Ζώνη												
	Α		Β		Γ		Δ					
<b>A+</b>		EK <	55		EK <	60		EK <	65		EK <	70
<b>A</b>	55	≤ EK <	70	60	≤ EK <	75	65	≤ EK <	80	70	≤ EK <	90
<b>B+</b>	70	≤ EK <	95	75	≤ EK <	105	80	≤ EK <	110	90	≤ EK <	125
<b>B</b>	95	≤ EK <	120	105	≤ EK <	130	110	≤ EK <	140	125	≤ EK <	160
<b>Γ</b>	120	≤ EK <	135	130	≤ EK <	150	140	≤ EK <	160	160	≤ EK <	185
<b>Δ</b>	135	≤ EK <	155	150	≤ EK <	165	160	≤ EK <	180	185	≤ EK <	205
<b>E</b>	155	≤ EK <	185	165	≤ EK <	200	180	≤ EK <	220	205	≤ EK <	255
<b>Z</b>	185	≤ EK <	220	200	≤ EK <	240	220	≤ EK <	260	255	≤ EK <	300
<b>H</b>	220	≤ EK		240	≤ EK		260	≤ EK		300	≤ EK	

Abb. 056. Grenzwerte für den Primärenergiebedarf in kWh/m<sup>2</sup> a für die Effizienzklassen A bis G für Einfamilienhäuser (oben) und mehrstöckige Appartementshäuser, Klimaregionen A-D (KENAK, 2010:29)



### 3.3 Ziele bis 2020

Die EU und ihre Mitgliedstaaten haben sich innerhalb der fünf Kernziele des sogenannten 20-20-20 Programms auf bindende gemeinsame Ziele verständigt, die bis zum Jahr 2020 erreicht werden sollen. Dies bedeutet:

- » eine Verringerung der Treibhausgasemissionen um 20 % im Vergleich zum Jahr 1990
- » eine Erhöhung des Anteils erneuerbarer Energien auf 20 %, und
- » eine Steigerung der Energieeffizienz um 20 %

Alle Mitgliedsländer müssen die Umsetzung dieser Ziele auf nationaler Ebene durch einen NEEAP (National Energy Efficiency Action Plan) definieren. Im Februar 2013 wurde in Griechenland daher das Gesetz 4122 „Energieeffiziente Gebäude“ verabschiedet, welches in Bezug auf die Energieeffizienz von neuen Gebäuden und von Gebäuden, die umfassend renoviert werden die folgenden Ziele beinhaltet:

- » Neue öffentliche Gebäude sollen ab 2014 den gesamten Primärenergiebedarf durch erneuerbare Energien, Kraft-Wärme-Kopplung, Fernwärme oder hocheffiziente Wärmepumpen decken, für alle neuen Gebäude gilt dies ab 2019;

- » Durch das im April 2012 gestartete Programm „Building the Future“ soll es Eigentümern durch Partnerschaften zwischen dem öffentlichen und privaten Sektor ermöglicht werden, Maßnahmen zur Verbesserung der Energieeffizienz, wie beispielsweise den Austausch von Fenstern, Maßnahmen zur Wärmedämmung, Erneuerung von Heiz- und Kühlsystemen oder Solaranlagen zu günstigen Konditionen durchführen zu können. Bis Ende 2014 sollen durch dieses Programm 54.000 Gebäude saniert werden.
- » Alle Brennstellen in öffentlichen Gebäuden müssen bis 2016 mindestens die Effizienzklasse B haben.

(Hermelink, 2013:92ff; Hellenic Republic, Ministry of Finance, 2011:44f)

Im griechischen NEEAP werden Nahe-Nullenergiegebäude (Nearly zero Energy Buildings, NZEB) als Gebäude mit einer sehr hohen Energieeffizienz definiert. Ihr sehr geringer Energiebedarf muss größtenteils durch erneuerbare Energien gedeckt werden, welche eine Produktion am oder nahe dem Gebäude beinhalten muss. Ab 01.01.2021 müssen alle Neubauten NZEB sein. Für Regierungsgebäude gilt dies schon ab dem 01.01.2019. Die Definition des NZEB im NEEAP soll über einen Index, der den Primärenergiebedarf pro m<sup>2</sup> und Jahr unter Berücksichtigung der nationalen, regionalen und örtlichen Gegebenheiten festlegt, erfolgen.

Eine genauere Definition für NZEB ist zum aktuellen Zeitpunkt (April 2014) nicht verfügbar, die Umsetzungsstrategie basierend auf der aktuellen EPBD ist in Bearbeitung, und soll ab 2019 bindend sein.

Die gegenwärtige Situation und die Ziele, welche bis 2020 erreicht werden müssen, zeigen, dass passive Klimatisierung ein wichtiges aktuelles Thema ist. Die Kenntnisse zum klimaangepassten und ressourcensparenden Bauen, die an einem Standort gegebenenfalls schon lange vorhanden sind, sollten daher ausgenutzt und ihre Übertragbarkeit und Kombination mit modernen Konzepten geprüft werden.

In den folgenden Kapiteln wird die exemplarische Untersuchung einer solchen Bauweise anhand der traditionellen Wohnhäuser in der Altstadt Thessalonikis beschrieben. Konzepte der passiven Klimatisierung, die sich an dem Standort bewährt haben konnten anhand des Beispiels gefunden werden und ihre Übertragbarkeit auf moderne Bauten bewiesen.

Da es viele Einflussgrößen auf das Innenraumklima von Räumen gibt, die mit unterschiedlichen Methoden untersucht werden können, wird zur Übersicht in den Abb. 057 und 058 dargestellt, welche Einflussfaktoren auf das Klima in Räumen mit welcher Methode untersucht wurde.

Themenbereiche:	Natürliche Lüftung	Natürliche Lüftung Baumaterialien Verschattung am Gebäude	Lüftungspotential für natürliche Lüftung	Verschattung am Gebäude  Orientierung der Gebäude
	Methode			
Erfasste Einflussgrößen	Messungen im Windkanal	Gebäudesimulationen	Berechnungen	CAD Schattenstudien Gebäudesimulation
Baumaterialien	-	x	-	-
Größe und Lage der Öffnungen	x	x	x	x
Fensterflächenanteil	-	x	x	x
Verschattungselemente	-	x	x	x
Kubatur	x	x	x	x
Oberfläche Fassade	x	-	-	-
Erker	x	x	-	x
Dachneigung	x	-	-	x
Dachüberstand	x	x	-	x
Orientierung der Gebäude	x	x	x	x

Abb. 057. Einflussgrößen am Gebäude, die sich auf das Klima im Innenraum auswirken können, Reduktion auf untersuchte Faktoren und Methoden zur Untersuchung der jeweiligen Themen (x = mit der Methode untersucht / - = nicht untersucht)

Themenbereiche:	Natürliche Lüftung	Natürliche Lüftung	Mikroklima im städtischen Raum
	Methode		
Erfasste Einflussgrößen	Messungen im Windkanal	Gebäudesimulationen	Simulationen mit ENVImet
Straßenraum: Straßenverlauf und -breite	x	x	x
Stadtraum: Nachbarbebauung	x	x	x
Stadtraum: Vegetation	-	-	x
Oberflächen der umgebenden Flächen	-	-	x

Abb. 058. Einflussgrößen in der Umgebung des Gebäudes, die sich auf das Klima im Innenraum auswirken können, Reduktion auf untersuchte Faktoren und Instrumente zur Untersuchung der jeweiligen Themen (x = mit der Methode untersucht / - = nicht untersucht)

## 4 Natürliche Lüftung - Messungen im Windkanal

Im Laufe der Recherchen und im Rahmen von ersten Testläufen mit der verwendeten Simulationssoftware PRIMERO Komfort 1.1 stellte sich heraus, dass bei den untersuchten Gebäuden das Thema natürliche Lüftung von herausragender Bedeutung für den sommerlichen Wärmeschutz ist. Um zu erfassen, welches Potential für die natürliche Lüftung am untersuchten Ort besteht, welchen Einfluss die Kubatur der Gebäude und die Lage der Fensteröffnungen haben und ob Konzepte zur natürlichen Lüftung gezielt geplant und eingesetzt worden sind, wurden in einem Windkanal Experimente durchgeführt.

Dieses Kapitel beginnt mit einer Einleitung in das Thema natürliche Lüftung, welche sowohl durch Temperaturdifferenzen im Gebäude induziert sein kann, als auch durch Druckdifferenzen, die durch Wind erzeugt werden.

Für die Messungen musste ein Referenzgebäude entwickelt werden, welches stellvertretend für die traditionellen Wohnhäuser untersucht wurde und in seinen Abmessungen, seiner Form, der Anzahl und Größe der Fassadenöffnungen und weiteren Parametern einen Durchschnitt darstellt. Für die umgebende Bebauung mussten Varianten entwickelt und definiert werden. Die zahlreichen Faktoren, die in Bezug darauf festgelegt werden mussten, sind im nächsten Abschnitt dargestellt.

Anschließend wird die Durchführung der Messungen beschrieben, welche für unterschiedliche Versuchsaufbauten mit jeweils 12 modellierten Windrichtungen erfolgte. Außerdem werden in diesem Abschnitt Unsicherheiten und Grenzen der Messungen diskutiert.

In dem Experiment wurde der Druck an der Fassade des Referenzgebäudes gemessen. Daraus lässt sich ein dimensionsloser Druckbeiwert ableiten. Die Ergebnisse wurden mit aus der Literatur vorliegenden Tabellenwerten verglichen, und es konnte gezeigt werden, dass sie mit diesen Daten vergleichbar sind.

Eine Extremwertanalyse, welche durchgeführt wurde, um zu überprüfen, ob die Durchschnittswerte, die jeweils aus einem Messdurchlauf errechnet wurden repräsentativ sind, und für die Abschätzung eines Lüftungspotentials herangezogen werden können, wird im letzten Abschnitt des Kapitels dargestellt.

Die Messungen bezogen sich nur auf den Innenraum, obwohl im mediterranen Klima die Außenbereiche, wie Balkone, Loggien oder Innenhöfe einen hohen Stellenwert haben. Da das Thema der Arbeit jedoch die passive Klimatisierung von Innenräumen ist, wurde entschieden, die

Außenbereiche in dem Experiment nicht zu erfassen. Dennoch soll an dieser Stelle darauf hingewiesen werden, dass diese Räume im Freien, die verschattet und je nach Nutzung vom Wind abgeschirmt oder diesem zugewandt sind, Aufenthaltsräume von hoher Wichtigkeit sind.

Ebenfalls nicht einbezogen wurde die Hanglage der Oberstadt von Thessaloniki. Sie ist in diesem Fall bei den Messungen im Windkanal zu vernachlässigen, da die Neigung des Hanges so flach ist, dass die Strömungen parallel zur Oberfläche verlaufen.



## 4.1 Lüftung von Räumen

Die freie oder natürliche Lüftung von Räumen ist die einfachste Null-Energie-Methode zur passiven Klimatisierung bei hohen Außentemperaturen. Außerdem bewirkt sie den für Räume notwendigen Luftaustausch zur Vermeidung hoher Luftfeuchtigkeit, schlechter Gerüche und zu hoher CO<sub>2</sub> Konzentration der Raumluft (vgl. Ghiaus, 2007:20ff).

Die natürliche Lüftung erfolgt üblicherweise über die Fenster und Türen eines Gebäudes deren Größe, Form und Lage die bestimmenden Faktoren für die Effizienz der Lüftung sind. Weitere Methoden sind z.B. Lüftungsöffnungen oder -schlitze in der Fassade, Lüftungsschächte und luftdurchlässige Baumaterialien für die Wände eines Gebäudes.

Bei einer natürlichen Lüftung über Fenster und Türen sind die Kenntnisse der Nutzerinnen über die Auswirkungen einer natürlichen Lüftung und die Bereitschaft zum Öffnen und Schließen der Öffnungen für die Effizienz ausschlaggebend. Weiterhin ist die natürliche Lüftung von Randbedingungen, wie der umgebenden Bebauung und Vegetation, dem lokalen Wind, den Innen- und Außentemperaturen und der Nutzung der Räume abhängig.

Die freie Lüftung kann durch äußere Einflüsse wie Lärm oder Luftverschmutzung stark eingeschränkt sein. Innere Verbauungen, Verstellen der Lüftungsöffnungen (wie z.B. schwere Vorhänge, Zimmerpflanzen auf dem Fensterbrett) sind weitere variable Einflussgrößen, welche im Voraus nicht

eindeutig zu bestimmen sind. Daher ist die Planung einer natürlichen Lüftung von Räumen wesentlich schwieriger, als die einer mechanischen Lüftung.

Ein Luftstrom durch ein Gebäude entsteht immer als Folge von Druckdifferenzen welche durch Druckquellen induziert werden. Diese sind bei einer natürlichen Lüftung Wind und Temperaturdifferenzen. Eine Strömung entsteht, wenn diesen Druckquellen Bauwerksöffnungen oder Leckagen gegenüberstehen.

Ist der Wind die maßgebliche Druckquelle, ergibt sich ein hohes Lüftungspotential, wenn ein Raum durch seine Länge hindurch über zwei oder mehrere gegenüberliegende Lüftungsöffnungen gelüftet werden kann. Temperaturinduzierte Lüftung erfordert eine Höhendifferenz zwischen Zuluft- und Abluftöffnung. Besteht entweder keine Zuluft- oder keine Abluftöffnung kann die Luft trotz einer Druckquelle nicht durch den Raum strömen, so dass wenig bis kein Luftaustausch stattfindet (vgl. Dietze, 1987:16). Für die Strömung durch den Raum sind immer zwei Faktoren maßgeblich: die Druckdifferenz  $\Delta c_p$  (Definition von  $\Delta c_p$  siehe Seite 75) und die Größe und Lage der Öffnungsflächen.

### 4.1.1 Lüftung durch Temperaturdifferenzen

Ist die Temperatur innen wärmer als außen, strömt die Luft im unteren Bereich einer Lüftungsöffnung in den Raum und oben wieder hinaus, sofern sie nicht

durch andere Faktoren daran gehindert wird. Ist die Temperatur innen niedriger als außen, läuft die Strömung umgekehrt: im oberen Teil der Öffnungen in den Raum hinein und unten wieder hinaus. Die Strömungen sind sowohl abhängig von der Temperatur- als auch der Höhendifferenz (Abb. 059). Dies wird z.B. bei Lüftungsschächten gezielt genutzt.

$\Delta T$ in K	Aus $\Delta T$ entstehende Druckdifferenz in Pa bei		
	$\Delta H = 1$ m	$\Delta H = 3$ m	$\Delta H = 10$ m
1,0	0,04	0,12	0,40
4,0	0,16	0,49	1,64
10,0	0,42	1,25	4,18
20,0	0,87	2,60	8,66

Abb. 059. Größenordnung des durch Temperaturdifferenz entstehenden Druckes in Abhängigkeit von der Höhendifferenz (nach: BS 5925-1991, Table 7)

### 4.1.2 Lüftung durch windinduzierte Druckdifferenzen

In Abb. 060 werden die durch Wind induzierten Druckdifferenzen, die sich bei den jeweiligen Werten für  $\Delta c_p$  zwischen Zu- und Abluftöffnungen und verschiedenen Windgeschwindigkeiten ergeben, dargestellt. Der Vergleich der Werte zeigt, dass für die traditionelle Bebauung in Thessaloniki in den meisten Fällen der Luftaustausch durch Wind induziert stattfinden wird, da sowohl ein geringer Höhenunterschied als auch klimatisch bedingt im Sommer eher geringe Temperaturdifferenzen

zwischen innen und außen bestehen und daher kein großes Potential für eine temperaturinduzierte Lüftung vorhanden ist.

$v_{\text{Wind}}$ in m/s	Durch Wind entstehende Druckdifferenz in Pa bei		
	$\Delta c_p = 0,1$	$\Delta c_p = 0,3$	$\Delta c_p = 0,5$
1,0	0,06	0,18	0,30
4,0	0,16	2,83	4,72
7,0	2,89	8,67	14,45
10,0	5,90	17,70	29,50

Abb. 060. Größenordnung des durch Wind entstehenden Druckes in Abhängigkeit von dem Druckbeiwert  $c_p$  (nach: BS 5925-1991, Table 7)

#### 4.1.3 Zusammenspiel der temperatur- und windinduzierten Strömungen

Windinduzierte Lüftung kann von einer durch Temperaturdifferenz induzierten Strömung ergänzt werden, wenn Zu- und Abluftöffnungen für beide identisch sind. Im umgekehrten Fall können sie sich entgegenwirken, so dass sich die Strömungen nicht verstärken, sondern behindern (vgl. BS 5925-1991, dort werden die entstehenden Strömungen getrennt berechnet). Es ist wichtig, diesen Effekt zu berücksichtigen, wenn für einen Raum mit einem großen Luftvolumen ein Lüftungspotential sowohl durch große Temperatur- als auch Höhendifferenzen besteht. In diesem Fall kann der in Abb. 061 gezeigte Effekt, dass sich die Strömungen ergänzen oder aufheben, deutlich auftreten.

Die Messungen, die in Bezug auf die Gebäude in Thessaloniki im Windkanal durchgeführt wurden, untersuchen nicht das Lüftungspotential durch Temperaturdifferenzen, sondern den Druck, der durch den Wind auf die Fassade entsteht. Vor allem in den warmen Sommermonaten, in denen die natürliche Lüftung für den sommerlichen Wärmeschutz erforderlich ist, wird die Luftströmung durch den Raum vom Wind dominiert. Für eine effektive temperaturinduzierte Lüftung fallen die Temperaturdifferenzen zwischen innen und außen zu gering aus und das Potential für eine Lüftung über eine Höhendifferenz ist aus baulichen Gründen wegen der kleinen Öffnungen im Erdgeschoss eingeschränkt oder gar nicht vorhanden. Dazu kommt ein im Vergleich zu großen Räumen wie z.B. bei Industriehallen oder Vortragssälen sehr geringes Luftvolumen mit entsprechend geringem thermischen Auftrieb.

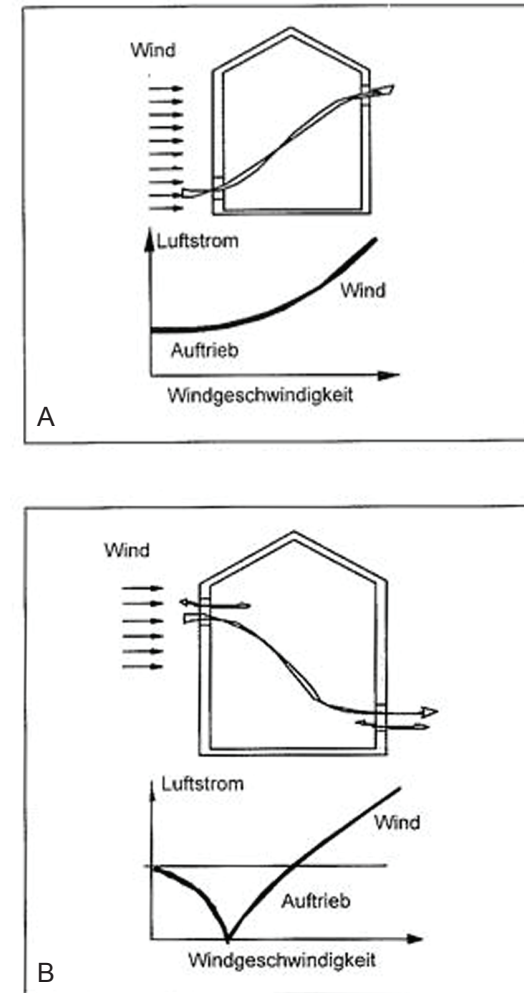


Abb. 061. Zusammenspiel von temperatur- und windinduzierter freier Lüftung, A: sich ergänzend und B: entgegenwirkend (aus: Aiulfi, 1997:14)

## 4.2 Möglichkeiten zur Erfassung des windinduzierten Lüftungspotentials von Räumen

In einem Windkanal ist es möglich, die turbulente Grenzschicht der unteren Atmosphäre mit großer Genauigkeit darzustellen und somit die Auswirkungen von Strömungen auf Bauwerke zu erfassen (Plate, 1995:7). Die Untersuchung von Bauwerken im Windkanal hat eine lange Tradition und wurde schon vom französischen Ingenieur Gustave Eiffel angewendet (vgl. Plate, 1982:573). Seit den 1950er Jahren sind Modellversuche im Windkanal eine häufig angewendete und wichtige Simulationsmethode. Inzwischen sind durch steigende Leistungen der Rechner auch Computersimulationen möglich, wobei zu beachten ist, welche Grenzen das jeweilige Modell hat und wo sich die Methoden ergänzen können (vgl. Oort, 1995:43).

Die Lüftung von Gebäuden kann mit folgenden Werkzeugen untersucht werden:

### 1. Rechnerisch mit Tabellenwerten

Das Lüftungspotential von Räumen kann durch Berechnungen, z.B. nach dem BS 5925 -1991 mit Werten aus Tabellen erfolgen, die durch Versuche im Windkanal ermittelt wurden. Im Rahmen dieser Arbeit wurden diese Berechnungen zum Vergleich mit den gemessenen Werten durchgeführt. Das Verfahren liefert Ergebnisse, die aufgrund des stark vereinfachten Modells keine detaillierten Erkenntnisse zu einem bestimmten Fall liefern können. Der Aufwand ist jedoch sehr gering und bietet die Möglichkeit, sehr schnell erste Aussagen treffen zu können. Deren Aussagekraft muss jedoch immer im

Zusammenhang mit den vielen Faktoren gesehen werden, die dem Modell aus dem die Tabellenwerte entwickelt wurden zugrunde lagen und Faktoren die gegebenenfalls nicht berücksichtigt wurden.

### 2. Messungen im Gebäude

Werden vor Ort, in dem Raum, der untersucht werden soll Messungen durchgeführt, muss kein Zustand simuliert werden. Es besteht jedoch ein großer Nachteil darin, dass dies sehr zeitaufwändig ist und die zu untersuchenden Gebäude sich ggf. nicht vor Ort befinden. Das ist vor allem ungünstig, weil Messungen immer störungsanfällig sind. Eine Messung liefert nur Daten für den jeweiligen Einzelfall, die Übertragbarkeit auf andere Fälle ist nicht zwingend gegeben. Wird sie über den Zeitraum eines Jahres durchgeführt, erhält man die Ergebnisse von genau diesem Jahr. Sollte das Wetter in diesem Jahr eher ungewöhnlich sein, sind die Ergebnisse nur eingeschränkt übertragbar.

### 3. Simulationen

a) Computersimulationen für Strömungsmodelle sind inzwischen durch gestiegene Rechnerleistungen für geschlossene Räume mit vertretbarem Aufwand möglich, und können, vor allem für einen einzelnen Raum, gute Ergebnisse liefern. Es ist jedoch zu beachten, dass für den Außenraum sehr stark vereinfachte Annahmen getroffen werden müssen, da ein großes Modellgebiet notwendig ist, um die Turbulenzen im Außenraum darstellen zu können. Diese Annahmen wirken sich stark auf die

Simulation aus, so dass es schon durch geringe Änderungen der Rahmenbedingungen zu veränderten Ergebnissen kommen kann. Die aktuell verfügbaren Softwareprogramme erfordern zur Bedienung Expertenwissen (vgl. Fiedler, 2010).

b) Eine im Windkanal durchgeführte physikalische Simulation stellt einen größeren Aufwand dar als eine Computersimulation. Es wird ein Labor mit entsprechender Ausstattung benötigt und Expertenwissen, um die Messungen durchführen können. Im Vergleich zu Messungen vor Ort ist der Zeitrahmen jedoch sehr gering. Es ist von großem Vorteil, dass es möglich ist, eine Grenzschicht zu simulieren, die den Gegebenheiten in der Natur entspricht und im Gegensatz zu Messungen in der Natur unter identischen Bedingungen wiederholt werden kann. Diese Simulationen sind bei vertretbarem Aufwand wesentlich weniger vereinfacht als Computersimulationen.

Für die Untersuchungen zur natürlichen Lüftung im Rahmen dieser Arbeit musste entschieden werden, welche Werkzeuge genutzt werden sollten und zur Verfügung standen. Dies waren zum einen die Berechnungen mit Tabellenwerten und zum anderen die Simulationen im Windkanal. Die Berechnung windinduzierter freier Lüftung über Tabellenwerte, welche die komplexen Wechselwirkungen stark verallgemeinern und die spezifischen lokalen Einflüsse, wie eine umgebende Bebauung nicht differenziert abbilden, wurden zum Vergleich der

im Windkanal ermittelten Werte verwendet. Um genauere Aussagen über das Potential für natürliche Lüftung machen zu können, wurden im Windkanal des Meteorologischen Instituts der Universität Hamburg Messungen durchgeführt. Durch das Experiment konnten die Auswirkungen der umgebenden Bebauung und der Einfluss der Erker der traditionellen Gebäude und deren Orientierung in Bezug auf das Lüftungspotential detaillierter erfasst werden.



## 4.3 Rahmenbedingungen für die Messungen im Windkanal

Die in dieser Untersuchung durchgeführten Messungen im Windkanal erfolgten mit typischen Strömungen im städtischen Raum und nicht auf Grundlage von Wetterdaten des zu untersuchenden Ortes aus der Natur. Die dazu erforderlichen Daten lagen für die Untersuchung nicht vor. Die notwendigen Naturmessungen, um diese Daten zu erhalten, hätten über einen sehr langen Zeitraum erfolgen müssen, um repräsentativ zu sein.

Daher wurden die Randbedingungen aus dem WTG-Merkblatt über Windkanalversuche in der Gebäudeaerodynamik, Tabelle 2, und aus der VDI 3783 Blatt 12 für eine Vorstadtbebauung verwendet. Für den untersuchten Fall der Gebäude in der Altstadt von Thessaloniki wurde eine vorhandene städtische Grenzschicht der Rauigkeitsklasse *rau* (Park, Vorstadt) Profilkategorie  $\alpha = 0,19$  angenommen (VDI: Park, Vorstadt  $\alpha = 0,18$  bis  $0,24$ ).

In der WTG Richtlinie für eine Vorstadt wird die Rauigkeit mit  $\alpha = 0,20$  bis  $0,24$  angegeben. Im BS 5925-1991 liegen die Werte für *Country with scattered windbreaks* bei  $\alpha = 0,20$  und *Urban* bei  $\alpha = 0,25$ .

Die Erfahrungen mit der Modellierung der städtischen Grenzschicht einer Vorstadtbebauung in dem verwendeten Windkanal zeigen jedoch, dass bei  $\alpha = 0,19$  die Bedingungen in sich korrekt für eine Vorstadtbebauung sind, welche wegen der eher geringen Höhe der Gebäude im Untersuchungsgebiet

angenommen wurde. Die Luftströmungen mit den typischen Turbulenzen, welche durch Hindernisse am Boden und durch Thermik entstehen, können bei der Rauigkeit von Profilkategorie  $\alpha = 0,19$  im Windkanal simuliert und in sich korrekt dargestellt werden.

## 4.4 Modellbau für die Messungen im Windkanal

Um den Versuchsaufbau festzulegen, wurden zunächst die Gebäude in der Altstadt von Thessaloniki analysiert und in verschiedene Typen unterschieden. Ein Referenzgebäude für die Messungen wurde ermittelt und ein Modell aus Aluminium hergestellt. Die umgebende Bebauung wurde aus MDF Platten gebaut. In einem zweiten Schritt wurde die Bebauung analysiert und daraufhin der Versuchsaufbau für die Gebäude festgelegt (siehe Anhang: Analyse der umgebenden Bebauung).

### 4.4.1 Gebäude im Untersuchungsgebiet

Um die Gebäude im Untersuchungsgebiet als Modell darzustellen, mussten repräsentative Maße für Breite, Tiefe, Höhe, Dachneigung und Dachüberstand entwickelt werden. In der Altstadt von Thessaloniki befinden sich heute etwa 50 Gebäude der traditionellen makedonischen Bauweise, welche unter Denkmalschutz stehen. Für 20 dieser Gebäude lagen für diese Arbeit Grundrisse und/oder Ansichten/Schnitte zur Verfügung. Daraus wurden die Maße für ein Referenzgebäude abgeleitet. Die Bebauung der Altstadt war ursprünglich sehr homogen, die Abmessungen der Gebäude haben daher keine sehr große Bandbreite. Um dies besser einschätzen zu können, wurden für alle Werte die Standardabweichungen (STD) mit angegeben.

Die Dachneigung der Walmdächer von 25 bis 30° und der Dachüberstand mit etwa 60 cm sind bei

allen Gebäuden nahezu gleich. Bei 15 der 20 Häuser zeigt sich die typische Dreiteilung des Grundrisses deutlich. Der Erker, der den mittleren repräsentativen Raum, in manchen Fällen auch das oder die Eckzimmer vergrößert, krägt um durchschnittlich 80 cm aus.

Die Erschließung des oberen Geschosses erfolgt bei elf der Gebäude über eine zentrale Treppe, davon bei acht Häusern im mittleren Raum. Die anderen Häuser haben eine Erschließung von außen. In diesen Fällen ist zu vermuten, dass es ursprünglich eine zentrale Erschließung gab, diese aber aufgrund der Wohnraumknappheit aufgegeben wurde, um das Haus in zwei Wohneinheiten zu teilen.

Zweigeschossige Gebäude mit einer mittleren Firsthöhe von 7,65 m (STD 0,56) dominieren. Die durchschnittliche Abmessung dieser Gebäude beträgt 7,5 m (STD 1,3) auf 11,5 m (STD 2,02).

Um die Lage der Sensoren am Referenzgebäude festzulegen, wurden die typische Fenstergröße, -anordnung und -anzahl ermittelt.

Aus diesen durchschnittlichen Maßen wurde das Referenzgebäude festgelegt (siehe Abb. 063). Es wurde als Aluminiummodell gebaut und mit Druckmesspunkten versehen, die in der Mitte der Fenster und der Tür liegen. Sie bestehen aus senkrecht in die Oberfläche eingelassenen Metallröhren, welche über Schläuche mit dem Sensor verbunden sind,

der sich im Modell befindet (siehe Abb. 062). Nur bei den seitlichen Erkerfenstern sind jeweils zwei Druckmesspunkte in der oberen und in der unteren Hälfte des Fensters angeordnet (Lage der Messpunkte: siehe Anhang). Um den Einfluss des Erkers auf die Druckverteilung an der Fassade untersuchen zu können, wurde ein zweites identisches Modell des Referenzgebäudes, jedoch ohne den Erker, gebaut.

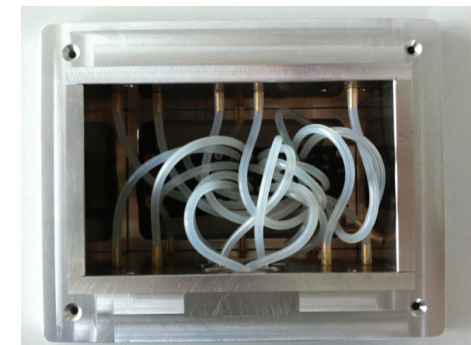
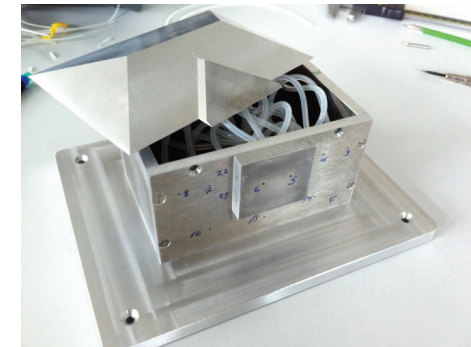
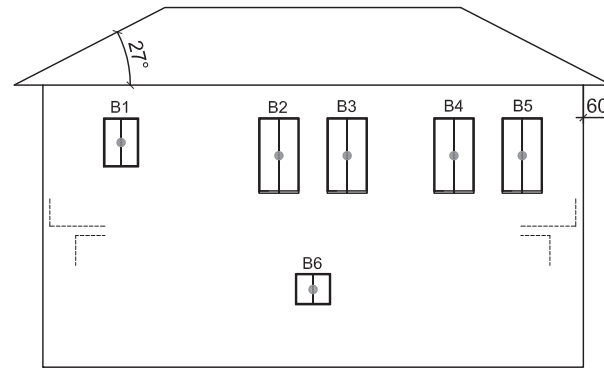


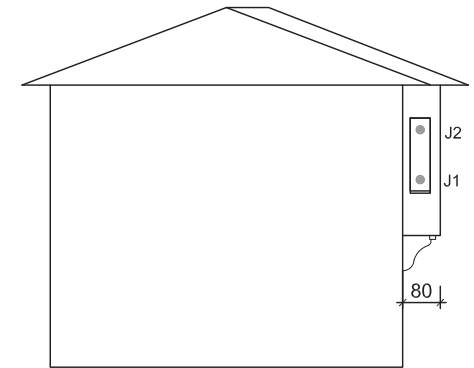
Abb. 062. Aluminiummodell des Referenzgebäudes mit Erker mit Druckmesspunkten (Foto: Thomas Giordano, 2012)



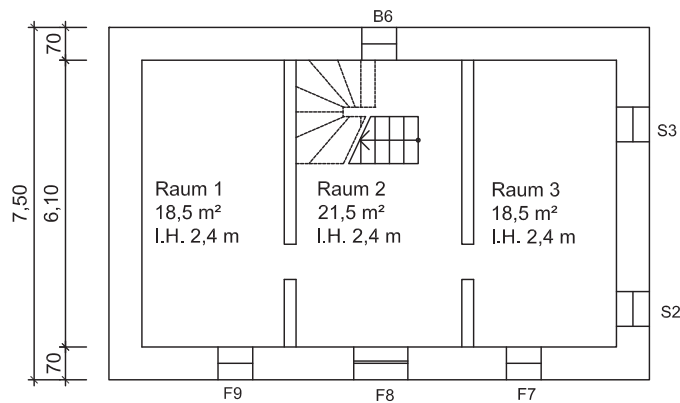
Straßenfassade



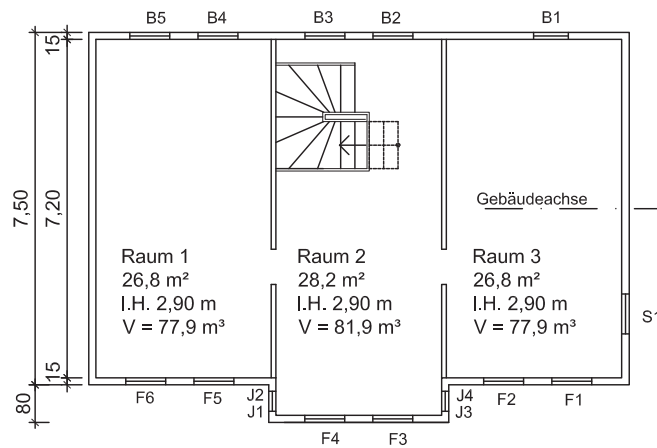
rückwärtige Fassade



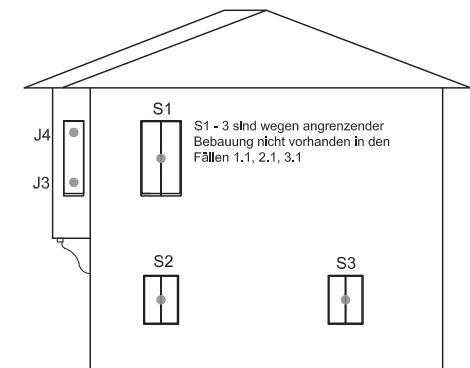
seitliche Fassade



Grundriss Erdgeschoss



Grundriss Obergeschoss



seitliche Fassade

Abb. 063. Referenzgebäude, Grundrisse und Ansichten, Druckmesspunkte (grauer Punkt) und Bezeichnung der Sensoren (entsprechend der Bezeichnung der Gebäudeöffnungen)

Für die umgebende Bebauung konnten aus den 20 Gebäuden als typische Varianten der traditionellen Bebauung folgende durchschnittliche Gebäudeabmessungen abgeleitet werden, welche die gleichen Merkmale in Bezug auf Dachform, Dachüberstand und Erker aufweisen:

*A: dreigeschossige Häuser*

13,20 m (STD 1,71) auf 7,50 m (STD 1,23)  
Höhe 10,20 m (STD 0,60)

*B: kleinere zweigeschossige Häuser mit Sockelgeschoss*

9,90 m (STD 1,42) auf 7,30 m (STD 1,19)  
Höhe 7,80 m (STD 0,55)

*C: Eingeschossige Nebengebäude mit einem Satteldach*

6,40 m (STD 1,44) auf 4,40 m (STD 1,01)  
Traufe 2,30 m als Mittel aus 15 Gebäuden

In dem Gebiet befinden sich auch neuere Gebäude, die in der Erscheinungsform an die traditionelle Bebauung angepasst sind, nicht aber aus der Bauzeit der untersuchten Gebäude stammen. Dachform und Dachüberstand sind wie bei A und B vorhanden. Aus 20 Gebäuden wurde Typ D ermittelt:

*D: drei Geschosse*

10,90 m (STD 1,42) x 8,80 m (STD 0,97)  
Höhe 10,20 m

Zur Untersuchung des Einflusses der Bebauung wurden auch Appartementshäuser für die Messungen im Windkanal gebaut, die in der zweiten Hälfte des 20. Jahrhunderts errichtet wurden und nicht an die vorhandene Bebauung angepasst sind. Die Gebäude sind wesentlich größer, haben flache Dächer und lange Balkone.

*E: Appartementblock Variante 1*

10,85 m (STD 1,39) auf 8,75 m (STD 1,73)  
Höhe 9,0 m, Flachdach (erfasst: 15 Gebäude)

*F: Appartementblock Variante 2*

16,5 m (STD 1,83) auf 12,35 m (STD 1,68)  
Höhe 9,0 m, Flachdach (erfasst: 20 Gebäude)

*G: Appartementblock Variante 3*

16,5 m (STD 1,83) auf 12,35 m (STD 1,68)  
Höhe 13,5 m, Flachdach (erfasst: 20 Gebäude)

*H: Appartementblock Variante 4*

23,8 m (STD 2,68) auf 15 m (STD 2,88)  
Höhe 13,5 m, Flachdach (erfasst: 20 Gebäude)

Die zwei Varianten der Höhen dieser Gebäude entstanden durch ein Gesetz von 1920 (Dimitris, 1977:47). Danach wurde die maximale Gebäudehöhe bei einer Straßenbreite von weniger als 10 m auf 9 m und bei einer Straßenbreite von 10 bis 15 m auf 13,5 m beschränkt. Aktuell ist die maximale Höhe beschränkt auf zwei Vollgeschosse, bzw. 7,5 m (Tsikaloudaki, 2012).

#### 4.4.2 Die umgebende Bebauung

Die Modelle wurden im Windkanal auf einer Drehscheibe platziert, die es ermöglicht, die Aufstellung zur Messung in jede Richtung zu drehen. Um die umgebende Bebauung darzustellen, wurden drei Kategorien ermittelt, die typische Situationen in der Altstadt abbilden.

- » dichte historische Bebauung ohne freie Plätze
- » weniger dichte historische Bebauung mit freien Plätzen
- » offenere Bebauung auch mit Gebäuden neuerer Bauzeit

Für diese drei Kategorien wurden jeweils drei repräsentative Areale in der Größe der Drehscheibe des Windkanals ausgewählt und Durchschnittswerte ermittelt für:

- » Straßenbreite
- » Abmessungen der Häuserblöcke
- » Abstände der Gebäude
- » Freie Flächen
- » Anzahl und Art der Gebäude

(Herleitung der Kategorien: siehe Anhang)

Um den Einfluss unterschiedlicher Bebauungen darzustellen, wurden die drei Kategorien in folgende Fälle aufgeschlüsselt:



Kategorie	Fall	Beschreibung
0	0.1	nur Referenzgebäude mit Erker ohne umgebende Bebauung
	0.1x	nur Referenzgebäude ohne Erker ohne umgebende Bebauung
1	1.1	dichte ursprünglich Bebauung ohne freie Plätze
	1.1x	wie 1.1, Referenzgebäude ohne Erker
2	2.1	wie 1.1 + Straße breiter und freier Platz
	2.2	wie 2.1 + ohne ein direkt angrenzendes Gebäude
	2.3	wie 2.2 + freier Platz vergrößert und Straße nicht mehr durchlaufend
	2.4	wie 2.3 + weniger dichte Bebauung
3	3.1	wie 2.1 + größere Gebäude in der umgebenden Bebauung
	3.1x	wie 3.1 + Referenzgebäude ohne Erker
	3.2	wie 2.2 + größere Gebäude in der umgebenden Bebauung
	3.3	wie 2.3 + größere Gebäude in der umgebenden Bebauung
	3.4	wie 2.4 + größere Gebäude in der umgebenden Bebauung

Abb. 064. Auflistung der im Windkanal untersuchten Fälle für die umgebende Bebauung des Referenzgebäudes (grafische Darstellung im Anhang)



Abb. 065. Modelle auf der Drehscheibe im Windkanal und Anlaufstrecke (Foto: Thomas Giordano, 2012)

## 4.5 Versuchsaufbau im Windkanal und Messungen

### 4.5.1 Beschreibung des Versuchsaufbaus im Windkanal

In einem Grenzschichtwindkanal können durch Wind induzierte Lastgrößen auf Bauwerke gemessen werden. Aus diesen Werten lassen sich dimensionslose Druckbeiwerte errechnen, mit denen das Lüftungspotential von Räumen abgeschätzt werden kann. Der für die Messungen verwendete Windkanal der Universität Hamburg, Institut für Meteorologie, ist 16 m lang und besteht aus einer Einlauf-Düse, der Anlauf- und Messstrecke sowie dem als Antrieb verwendeten Radialgebläse. Zur Erzeugung der physikalisch naturähnlichen Windgrenzschichten mit einem bestimmten geometrischen Maßstab sind am Beginn einer Anlaufstrecke Turbulenzgeneratoren angeordnet. Bodenrauigkeiten werden in dem verwendeten Windkanal durch LEGO Steine erzeugt, die auf den über die gesamte Bodenfläche verteilten LEGO Platten beliebig angeordnet werden können (Leitl; Schatzmann, 2005:5).

Für die Messungen stand das Referenzmodell auf der Mitte einer Drehscheibe von 1,10 m Durchmesser. Dies war die Fläche die zur Verfügung stand, um die Modelle für die umgebende Bebauung aufzustellen. Die an der Oberfläche des Referenzgebäudes gemessenen Werte wurden vom Sensor im Modell an einen Computer weiterleitet. Diese Wanddruck-Werte wurden zu dimensionslosen Wanddruckbeiwerten  $c_p$  umgerechnet.

Der Wanddruckbeiwert ist definiert als:

$$c_p = (p_{\text{stat}, i} - p_u) / p_{\text{dyn}} \quad (1)$$

mit:  $p_{\text{stat}, i}$  = auf der Gebäudeoberfläche gemessener Wanddruck;  $p_u$  = der dem barometrischen Luftdruck entsprechende statische Druck; und  $p_{\text{dyn}}$  = Staudruck der Anströmung gemessen in 8 m Höhe.

$$p_{\text{dyn}} = \rho / 2 u_8^2 \quad (2)$$

mit:  $\rho$  = den realen Verhältnissen entsprechende Luftdichte; und  $u_8$  Referenzwindgeschwindigkeit in 8 m Höhe (vgl. Leitl, Schatzmann 2005:11).

„Der Vorteil der dimensionslosen Darstellung der Versuchsergebnisse liegt in der leichten Übertrag-

barkeit der Modellergebnisse auf nahezu beliebige Windgeschwindigkeiten in der Natur“ (Leitl; Schatzmann, 2005:11).

Der Staudruck der Anströmung wurde in dem Versuch nicht auf einer Höhe von 8 m mit dem Laser-Doppler-Anemometer gemessen, da in dieser üblichen Referenzhöhe zu hohe Turbulenzen bestanden. Daher wurde das Prandtlrohr in einer Referenzhöhe von 20 m angebracht und die Messdaten mit dem Skalierungsfaktor  $s$  auf die Referenzhöhe von 8 m extrapoliert

$S = U_{\text{ref}} / U_{\text{prandtl}}$	$\alpha$	$Z_{\text{ref}}$ [m]	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]
0,76314	0,19	20	1,2041

Abb. 066. Einbezogene Größen zur Berechnung des dimensionslosen Druckbeiwerts  $c_p$

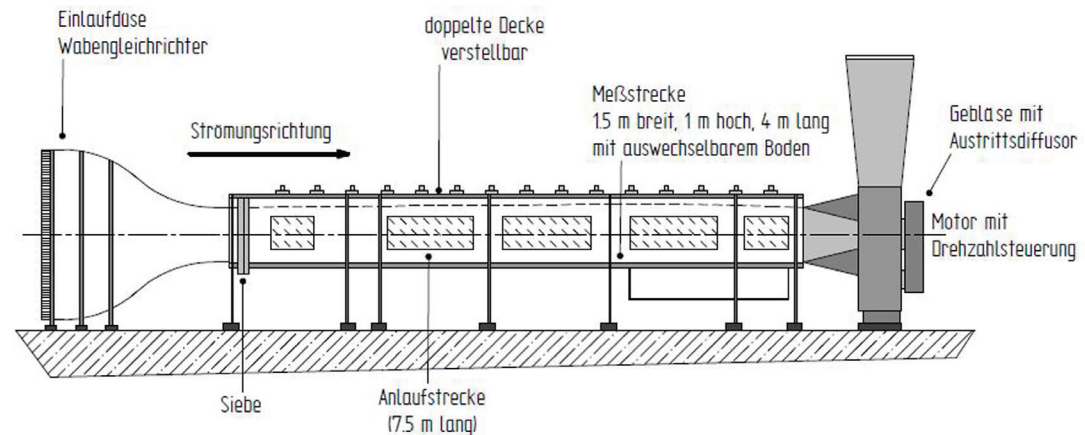


Abb. 067. Grenzschicht - Windkanal des meteorologischen Institutes der Universität Hamburg (aus: B. Leitl; Schatzmann, 2005)

#### 4.5.2 Modellierte Windrichtungen

Pro Fall wurden 12 Messungen durchgeführt. Beginnend bei 0° wurde die Drehscheibe im Windkanal in 30° Schritten bis 180° gedreht. Aus technischen Gründen wurde dann bei -30° beginnend in die andere Richtung bis -150° gedreht. Pro Richtung wurde 100 Sekunden lang gemessen, ein Messwert pro 10tel Sekunde wurde erfasst.

#### 4.5.3 Maßstab

Im verwendeten Windkanal können Grenzschichten bis zu einem Maßstab von 1:400 optimal modelliert werden. Bei diesem Maßstab sind die Verhältnisse in Bezug auf den Wind und die Turbulenzen optimal und der Natur am ähnlichsten. Die Gebäude wären bei diesen Messungen in 1:400 jedoch zu klein, es wäre nicht mehr möglich, die Sensoren in dem Modell einzubauen. Daher wurde in Kauf genommen, dass die Verhältnisse trotz größtmöglicher Turbulenzgeneratoren und hoher Rauigkeit des Geländes ruhiger sind, als sie natürlicherweise wären. Das führt dazu, dass die Extremwerte eher konservativ sind. Der gewählte Maßstab von 1:100 bedeutet, dass der geometrische Maßstab dem Zeitmaßstab entspricht. Eine Sekunde Messung im Windkanal entsprechen 100 Sekunden in der Natur.

#### 4.5.4 Windgeschwindigkeit

Die gemessenen Werte wurden umgerechnet auf eine Bezugswindgeschwindigkeit von 5 m/s in der Referenzhöhe von 20 m, also außerhalb des direkten Einflussbereiches der Gebäude (vgl. Abb. 066). Gemessen werden kann jeweils nur mit der Windgeschwindigkeit, die zu dem Zeitpunkt im Windkanal herrscht. Überträgt man Messergebnisse in die Natur, unter der Annahme, dass im Kanal und in der Natur die gleiche Windgeschwindigkeit von 5 m/s herrscht, ist der Zeitmaßstab gleich dem Modellmaßstab 1:100. Der gesamte Versuchsaufbau und -ablauf entspricht generell dem Vorgehen wie in der VDI 3783 Blatt 12 beschrieben.

#### 4.5.5 Einfluss der Fassadenöffnungen auf die gemessenen Druckwerte

In dem Experiment wurden Modelle untersucht, welche keine Öffnungen haben und daher in sich geschlossen sind. Die ermittelten Drücke an den Fassaden sind daher Maximalwerte, weil der Druck abnimmt, sobald eine Strömung durch den Raum erfolgen kann. Weitere Messungen könnten mit Modellen erfolgen, die durchströmt werden, um den Einfluss der Öffnungen auf die Druckdifferenzen zu erkennen. Dazu muss der Innenwiderstand der Räume korrekt abgebildet werden, welcher von den inneren Verbauungen abhängt, aber auch von unsicheren Faktoren wie dem Einfluss der

Nutzerinnen und Undichtigkeiten von Türen und Bauteilen. Man findet in der Literatur unterschiedliche Studien, die den Einfluss der Öffnungen auf den Wanddruck dokumentieren. Ernest (1991) listet drei Studien auf: Snyckers, 1970; Aynsley, 1988; und Vickery and Karakatsanis, 1987. Alle drei kommen zu dem Ergebnis, der Einfluss sei eher gering. Bei einer Porosität eines Körpers von bis zu 25 %, also einem Anteil von 25 % geöffneter Fläche an der Fassade, würden demnach die Druckdifferenzen um maximal 10% abnehmen. Die Messwerte der Untersuchung für diese Arbeit, welche an geschlossenen Körpern ermittelt wurden, werden daher als ausreichend repräsentativ eingestuft.

#### 4.5.6 Unsicherheiten

Messfehler können aufgrund Zweier Ursachen auftreten:

##### *1. Unsicherheiten beim Erfassen der Daten*

Die Unsicherheiten beim Erfassen der Daten konnten durch häufiges Kalibrieren der Sensoren minimiert werden.

##### *2. Änderungen der Randbedingungen*

Die Drehscheibe ist zu  $\pm 1^\circ$  genau einstellbar. Um diese Unsicherheit weiter zu reduzieren, müsste man größeren Aufwand betreiben und das Gebäude mit zwei beiderseits angebrachten Sensoren exakt ausrichten, sowie die Rauigkeit des Geländes

identisch aufbauen. Da eine solche Genauigkeit in diesem Versuch nicht notwendig war, wurde darauf verzichtet und in Kauf genommen, dass geringe Differenzen auftreten.

Trotz der beiden Unsicherheiten sind die Messungen auf 0,1 Pa reproduzierbar. Daraus lässt sich folgender Unsicherheitsfaktor errechnen:

$$p^* = p / \rho/2 v^2 \quad (3)$$

mit:  $p$  = gemessener Druck;  $\rho$  = Dichte der Luft bei 20°C; und  $v$  = Windgeschwindigkeit.

Die  $c_p$  Werte liegen in einem Vertrauensbereich von  $\pm 0,007$ .

Weitere Forschung könnte als Sensitivitätsstudie erfolgen, um die Fehler durch das Drehen der Drehscheibe einschätzen zu können und um den Effekt der Reynolds Zahl zu bewerten. Dieser dimensionslose Wert stellt das Verhältnis von Trägheits- zu Zähigkeitskräften dar. Für Modellversuche ausschlaggebend ist, dass das Turbulenzverhalten von geometrisch ähnlichen Körpern bei gleicher Reynolds Zahl auch bei Veränderung des Maßstabs gleich bleibt. Anders herum gesagt: stellt man ein Modell eines Körpers in einem verkleinerten Maßstab in einen Windkanal, kann man den auf den Körper einwirkenden gemessenen Druck in die Realität übertragen, wenn die Reynolds Zahl mit der des Originalkörpers übereinstimmt (vgl. Kuypers, 2012:199).

#### 4.5.7 Einordnung der ermittelten $c_p$ Werte in die vorliegenden Tabellenwerte

Aus den Messungen von Fall 0.1x (ohne Erker, ohne umgebende Bebauung) lassen sich durchschnittliche Druckbeiwerte errechnen. Diese wurden Tabellenwerten aus der Literatur gegenübergestellt (siehe Abb. 068). Der Vergleich diente dazu, festzustellen, ob die Tabellenwerte in einem ähnlichen Bereich liegen wie die im Versuch gemessenen Werte. Die Versuche sind nicht durchgeführt worden, um Tabellenwerte zu rekonstruieren.

In Abb. 067 wurden zunächst (weiß hinterlegt) die Tabellenwerte aus dem BS 5925-1991 aufgelistet. Diese Werte wurden von der EN ISO 13791:2012 „Wärmetechnisches Verhalten von Gebäuden: Sommerliche Raumtemperaturen bei Gebäuden ohne Anlagentechnik“ übernommen. Daher sind die Daten aus dieser Quelle nicht ebenfalls angegeben.

In die Systematik, welche die Druckbeiwerte nach dem Höhen- und Grundrissverhältnis, dem Winkel des Windes und den vier Oberflächen eines rechteckigen Baukörpers einordnet, sind die Ergebnisse aus den Windkanalmessungen eingefügt (grau hinterlegt). Für die Front- und die Rückseite (Oberflächen A und B) werden jeweils zwei Werte angegeben, da die Ergebnisse sich bei den entsprechenden Messungen 0° / 180° (A) bzw. 90° / - 90° (B) nicht entsprechen (eine grafische Darstellung dazu findet sich im Anhang).

Die Tabellenwerte aus Dietze (1987: Tabelle 6/2) werden unter den Messwerten (grün hinterlegt) angeführt. Sie werden angegeben als Beiwerte für frei stehende Bauwerke mit rechteckigem Querschnitt, flachem Dach und einer Höhe von bis zu 18 m.

Im letzten Teil der Tabelle werden die Werte der DIN EN 15242:2007, Tabelle A.3, für die Fassade und die Dachfläche angegeben. Sie werden nach Fassadenteilen und Abschirmung unterschieden. Die Werte werden für einen Windsektor von  $\pm 60^\circ$  zur Fassadenachse angegeben.

Beim Vergleich der Werte ist zu sehen, dass die Tabellenwerte für den Druckbeiwert  $c_p$  aus den drei vorliegenden Normen und Dietze (1987) in einem ähnlichen Bereich wie die Ergebnisse aus den Messungen liegen. Eine genaue Übereinstimmung war nicht zu erwarten, da von unterschiedlichen äußeren Faktoren (wie beispielsweise der Dachform) ausgegangen wurde. Außerdem sind alle Tabellenwerte Durchschnittswerte von Messungen, welche in Parametern wie z.B. Anzahl und Lage der Messpunkte nicht übereinstimmten. In dem unternommenen Versuch waren die Messpunkte auch gar nicht so angeordnet, dass dadurch allgemein gültige Druckbeiwerte abgeleitet werden sollten, sondern sie lagen an den Stellen, an denen sich Lüftungsöffnungen, also Fenster und Türen befinden. Daher sind die Ergebnisse der Messungen von 0° und 180° auch nicht identisch.



Höhenverhältnis h/w	Grundrissverhältnis des Gebäudes l/w	Winkel des Windes $\alpha$	$c_p$ Oberflächen				
			A	B	C	D	
(h/w) < 1/2	1 < (l/w) ≤ 3/2	0	0,7	-0,2	-0,5	-0,5	
		90	-0,5	-0,5	0,7	-0,2	
	3/2 < (l/w) < 4	0	0,7	-0,25	-0,6	-0,6	
		90	-0,5	-0,5	0,7	-0,1	
1 < (l/w) ≤ 3/2	0	0,7	-0,25	-0,6	-0,6		
	90	-0,6	-0,6	0,7	-0,25		
<b>Windkanalmessungen</b>							
	l/w = 3/2 mit Erker	0	0,85 (0,07) 0,92 (0,08)	-0,29 (0,04) -0,30 (0,04)	-0,59 (0,16)	-0,89 (0,03)	
		90	-0,45(0,21) -0,47 (0,22)	-0,38 (0,22) -0,34 (0,16)	0,81 (0,01)	-0,16 (0,02)	
	l/w = 3/2 ohne Erker	0	0,87 0,95	-0,27 -0,29	-0,61	-0,82	
		90	-0,42 -0,41	-0,41 -0,32	-0,15	0,77	
		Messpunkte:	9	6	3		
<b>Dietze (je 4 Messpunkte)</b>							
1/2 ≤ (h/w) < 3/2	l/w = 3/2	0	0,85			-0,84	
			0,98			-0,64	
			0,72	-	-	-0,86	
			0,96			-0,64	
		90		-0,96		0,96	-0,23
				-0,88		0,95	-0,23
				-0,92	-	0,93	-0,21
				-0,73		0,90	-0,23
	für frei stehende Bauwerke, h < 18m, quadratisch	0		0,8	-0,3	-0,4	-0,4
				Gebäudeecke	0,9 bis 0	-0,5	
für frei stehende Bauwerke, h < 18 m, rechteckig	0		1,0	-	-0,4	-0,4	
			90	-0,1 bis -0,6	-0,1 bis -0,6	0,9	-0,1
	3/2 < (l/w) < 4	0	0,7	-0,3	-0,7	-0,7	
		90	-0,5	-0,5	0,7	-0,1	
	1 < (l/w) ≤ 3/2	0	0,8	-0,25	-0,8	-0,8	
		90	-0,8	-0,8	0,8	-0,25	
3/2 ≤ (h/w) < 6	3/2 < (l/w) < 4	0	0,7	-0,4	-0,7	-0,7	
		90	-0,5	-0,5	0,8	-0,1	

Abb. 068. Fortsetzung der Tabelle siehe nächste Seite

**DIN EN 15242:2007**

			Fassade		Dach		
			Luv	Lee	< 10°	10° - 30°	> 30°
Abschirmung: offen	Unterer Fassadenteil	± 60° zur Fassadenachse	0,5	-0,7	-0,70	-0,60	-0,20
	Mittlerer Fassadenteil		0,65	-0,7	-0,70	-0,60	-0,20
	Oberer Fassadenteil		0,8	-0,7	-0,70	-0,60	-0,20

Abb. 068 Fortsetzung: Koeffizient  $c_p$  als Funktion des Winkels des Windes und der Proportionen des Gebäudes, Tabellenwerte aus: BSI BS 5925:1991 im Vergleich mit den Ergebnissen der Messungen im Windkanal, Dietze (1987) und der DIN EN 15242:2007

Außerdem muss bei Tabellenwerten aus der Literatur davon ausgegangen werden, dass diese, je nachdem für welche Berechnungen sie zur Verfügung gestellt werden, einen Sicherheitsaufschlag in die eine oder andere Richtung enthalten können. Als Beispiel: In einer Norm, deren Tabellenwerte zur Berechnung von Windlasten angegeben werden, wird ein angegebener Druckbeiwert einen Sicherheitsaufschlag nach oben enthalten.

## 4.6 Extremwertanalyse

Bei den bisher betrachteten Werten handelt es sich um Mittelwerte aus jeweils 1000 Messwerten, welche in jedem Durchlauf eines Falls gemessen wurden. Um zu überprüfen, ob diese Werte repräsentativ sind, wurde eine Extremwertanalyse durchgeführt. Dies wird auch im WTG - Merkblatt über Windkanalversuche in der Gebäudeaerodynamik (1994) empfohlen.

Ein Messzeitraum von 100 Sekunden bezieht sich bei einem Maßstab von 1:100 auf einen Zeitraum von 2,78 h. Es wird über diesen Zeitraum im Windkanal durch das Gebläse ein gleichmäßiger Druck erzeugt. In der Natur wird ein vollkommen gleichmäßiger Wind über eine solche Zeitspanne hinweg jedoch niemals auftreten. Daher wurden in der weiteren Betrachtung auch Teilausschnitte der Messungen von 6 Sekunden (dies entspricht 10 Minuten) betrachtet, die mit im Zeitrahmen einer typischen Lüftung von Innenräumen liegen.

Abb. 069 und 070 zeigen die Messergebnisse eines gesamten Messdurchlaufs über 100 Sekunden für Fall 0.1 bei einer Anströmung von  $-150^\circ$  für einen Messpunkt an der Vorderseite des Referenzgebäudes (Messpunkt 3) und einen an der Rückseite (Messpunkt 25). Während einer Messung wurde jede zehntel Sekunde ein Wert gemessen, jeder Punkt im Diagramm stellt ein Messergebnis dar. Die Trendlinie (schwarz) zeigt den einfachen gleitenden Mittelwert sechs aufeinander folgender Messergebnisse. Dies ist ein Zeitraum der bei einem Maßstab von 1:100 einer Minute entspricht.

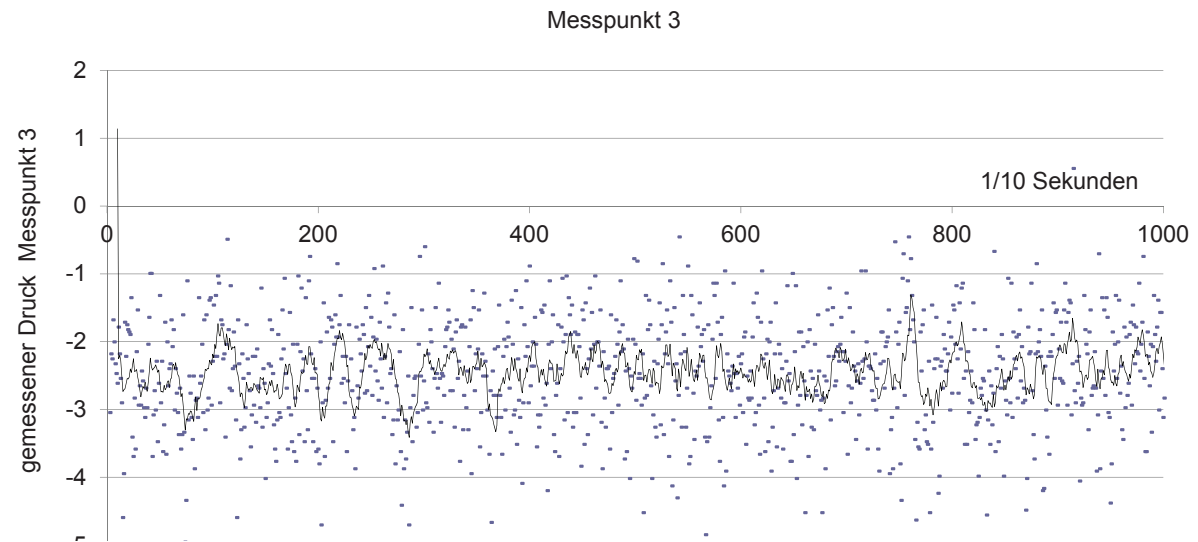


Abb. 069. Messergebnisse von Messpunkt 3 (an der Frontseite des Gebäudes) mit gleitendem Durchschnitt über den Messzeitraum von 100 Sekunden, Mittelwert -2,46, STD 0,83

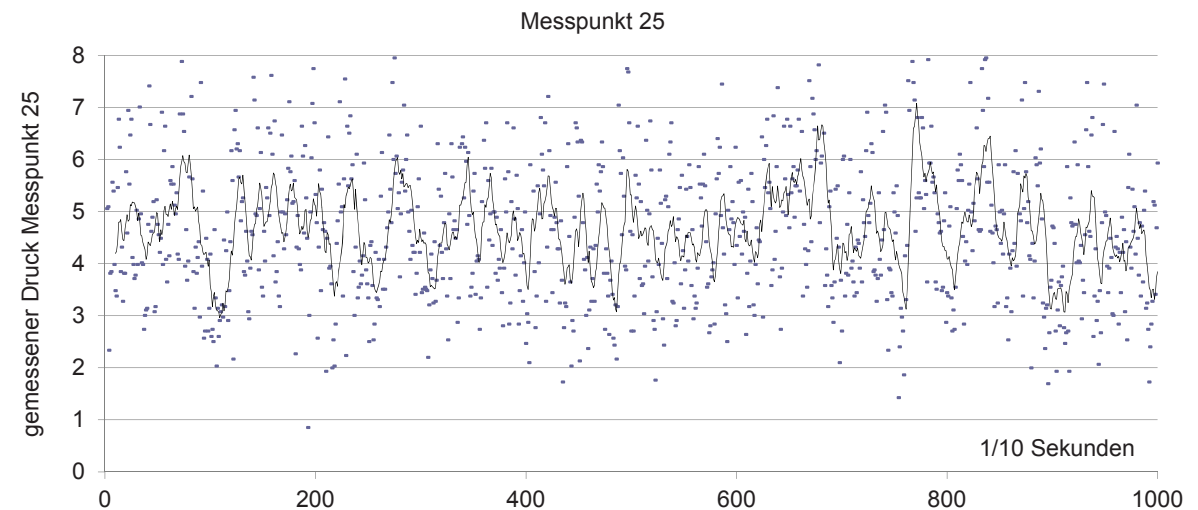


Abb. 070. Die Messergebnisse von Messpunkt 25, (an der Rückseite des Gebäudes) zeigen eine wesentlich höhere Streuung als an der Frontseite, Mittelwert 4,67, STD 1,40

Beim Vergleich der Messergebnisse fiel auf, dass die Messwerte an der vorderen Fassade (F1 bis F9) eine Streuung aufweisen, die wesentlich niedriger liegt als die an der Rückseite des Gebäudes (B1 bis B6) (siehe Abb. 071). Die Ursache könnte damit zusammenhängen, dass die Rückseite bei der hier untersuchten Windrichtung die Luv-Fassade ist, also dem Wind zugewandt. Die Messergebnisse der anderen Windrichtungen unterstützen diese Annahme.

Eine weitere Analyse der Messwerte ergab, dass die Werte normalverteilt sind (siehe Abb. 072 und 073) und daher der errechnete Durchschnittswert aus allen Messwerten als repräsentativ für die jeweilige Messung verwendet werden kann.

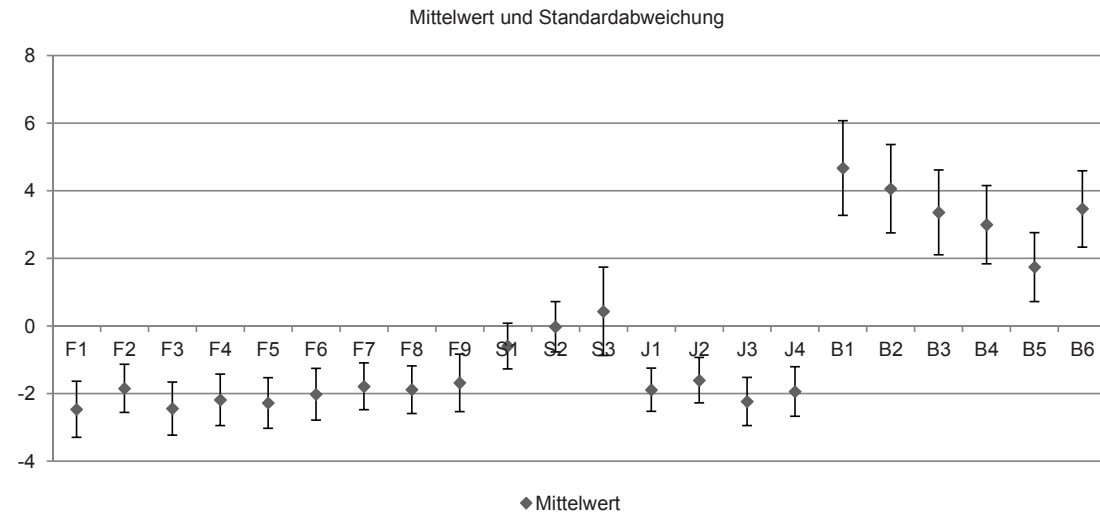


Abb. 071. Mittelwert und Standardabweichung für alle Sensoren für eine Messung bei einer Anströmung von  $-150^\circ$ , Fall 0.1

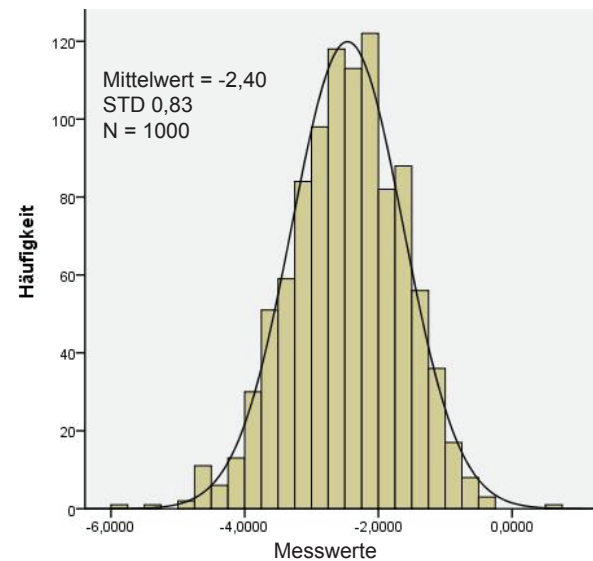


Abb. 072. Messergebnisse von Messpunkt 3 über den gesamten Messzeitraum, Darstellung der Ergebnisse normalverteilt

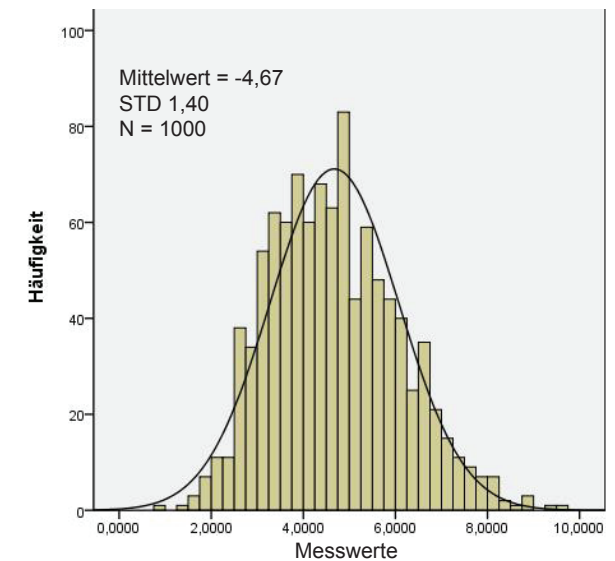


Abb. 073. Messergebnisse von Messpunkt 25, normalverteilt (wesentlich höhere Streuung)



Die Betrachtung von Zehn-Minuten-Ausschnitten der Messung zeigten, dass der in Abb. 074 dargestellte Verlauf für die untersuchte Messreihe typisch für ca. 70% der Ausschnitte ist. Auf beiden Seiten des Gebäudes zeigt sich eine periodische Schwankung im gemessenen Druck, die sich über den Lüftungszeitraum von zehn Minuten mehrmals wiederholt. Die Abbildung zeigt die Messwerte eines Ausschnitts der Messung von 48 bis 54 Sekunden für zwei Sensoren an der Front des Gebäudes (3 und 6), zwei Sensoren an den Erkerfenstern (21 und 24) und zwei Sensoren an der gegenüberliegenden Rückseite des Gebäudes (25 und 27). Der gleitende Durchschnitt wird für sechs aufeinander folgende Werte angegeben.

Abb. 075 zeigt den Verlauf für etwa 30 % der Ausschnitte. Die periodischen Schwankungen sind weniger ausgeprägt, es gibt Spitzen, die für einen kurzen Zeitraum von wenigen Minuten zu einer wesentlich höheren Druckdifferenz führen können als die durch Mittelwerte errechneten. Auf einen Lüftungszeitraum von zehn Minuten wird dies jedoch keine wesentlichen Auswirkungen haben, da sich die mittlere Druckdifferenz zwischen den beiden Fassaden auf den Zeitraum des Ausschnittes gesehen, nicht stark von der für den gesamten Zeitraum ermittelten mittleren Druckdifferenz unterscheidet.

Es konnte durch die Extremwertanalyse gezeigt werden, dass die Ergebnisse normalverteilt sind.

Außerdem wurde ermittelt, dass zwar Schwankungen innerhalb einer typischen Lüftungszeit von zehn Minuten auftreten, die Druckdifferenzen für diesen Zeitraum jedoch nicht von dem Gesamtergebnis abweichen.

Daher wurden die Mittelwerte aus den Messreihen als repräsentativ angesehen und verwendet, um Potentiale für die Lüftung abzuschätzen und zu vergleichen. Diese Werte werden jedoch nicht als exaktes Abbild der tatsächlich vorhandenen Situation gesehen.

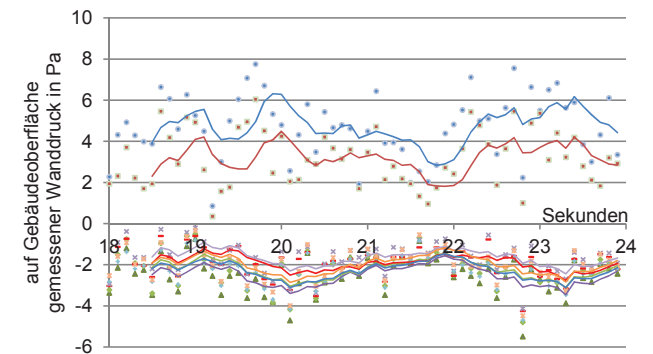


Abb. 074. Messergebnisse von Sensoren 3 und 6 an der Frontseite des Gebäudes, 21 und 24 an den Erkerfenstern (untere Kurven), und 25 und 27 (blau und rot) an der Rückseite Ausschnitt der Messung von 48-54 Sekunden, gleitender Durchschnitt von je 6 Werten

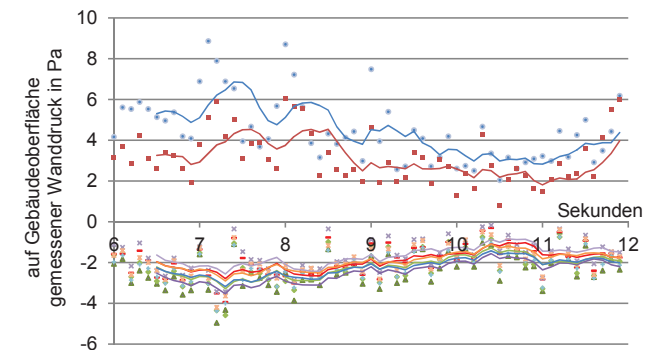


Abb. 075. Messergebnisse von Sensoren 3 und 6 an der Frontseite des Gebäudes, 21 und 24 an den Erkerfenstern (untere Kurven) und 25 und 27 (blau und rot) an der Rückseite, Ausschnitt der Messung von 06-12 Sekunden, gleitender Durchschnitt von je 6 Werten

## 4.7 Zusammenfassung und Bewertung der Ergebnisse

Die Ergebnisse der Messungen wurden im Folgenden dazu verwendet, das Lüftungspotential der traditionellen Wohnhäuser genauer abschätzen zu können. Dazu wurde für die im nächsten Kapitel beschriebenen Berechnungen und Simulationen ebenfalls das Referenzgebäude herangezogen.

Dabei musste berücksichtigt werden, dass es sich bei den Werten um Ergebnisse handelt, die aufgrund der Möglichkeiten, die eine solche Messung bietet, auf vielen Annahmen beruhen. Es wurden Modellgebäude für das Referenzgebäude und die umgebende Bebauung benutzt, die stark vereinfacht sind. Einflüsse der Umgebung im Detail, wie beispielsweise durch Hecken oder Bäume wurden nicht mit berücksichtigt. Die modellierte Grenzschicht ist zwar typisch für eine Vorstadtbebauung, stellte aber nicht exakt den Zustand am Beispielort dar. Die Struktur und Dichte der umgebenden Bebauung ist ein vereinfachtes Beispiel, welches der vorhandenen Struktur nur ähnelt. Die Modelle für die Messungen waren in sich geschlossen und berücksichtigten daher nicht den Druckabfall, der beim Öffnen von Fenstern entsteht.

Um den Versuch durchführen zu können, mussten für alle diese Faktoren Entscheidungen getroffen werden, die das Ergebnis beeinflussen. Im Folgenden wurden die Ergebnisse interpretiert und bewertet, auch dies lässt Spielräume zu, die zu unterschiedlichen Resultaten führen können.

Die aufgeführten Einschränkungen waren jedoch notwendig, um das Experiment durchführen zu können. Sie mindern nicht den Wert der Ergebnisse, müssen jedoch in die Analyse der Daten miteinbezogen werden. Trotz der Vereinfachung waren durch die ermittelten Werte genauere Aussagen zur freien Lüftung der Räume möglich, als durch eine Berechnungen mit Tabellenwerten. Denn diese sind sehr stark verallgemeinert und berücksichtigen unterschiedliche Gebäudegeometrien und den Einfluss der umgebenden Bebauung in noch viel geringerem Maße.

Zu beachten ist, dass die Messwerte aufgrund der Modellierung im Windkanal wie im Kapitel 4.5 Versuchsaufbau und Messungen beschrieben, konservativ einzuschätzen sind, da die Turbulenzen aufgrund des gewählten Maßstabs eher geringer ausfallen als in der Realität. Die aus den Messergebnissen errechneten Druckdifferenzen zwischen den Fassaden fallen somit tendenziell geringer aus als zu hoch, so dass das ermittelte Lüftungspotential in jedem Fall nicht zu hoch angesetzt ist, sondern einen Zustand darstellt, der mindestens auftreten sollte.

## **5** Gebäudesimulationen zur Analyse von Konzepten der passiven Klimatisierung

Im Unterschied zu den Menschen, die damals die Häuser in der Oberstadt von Thessaloniki planten und erbauten, können wir heute mit Hilfe von Computerprogrammen im Voraus simulieren, welchen Einfluss unterschiedliche Faktoren auf den Komfort in einem Gebäude haben. Dadurch ist es möglich, wie in den folgenden vier Abschnitten beschrieben, die Wirkung der *natürlichen Lüftung*, der *Orientierung der Gebäude*, der *Verschattungselemente* für die transparenten Flächen der Fassaden und der *Baumaterialien* auf die passive Klimatisierung zu untersuchen.

Für die Gebäudesimulationen wurde die Simulationssoftware PRIMERO Komfort 1.1 aus dem Programmpaket PRIMERO (PRIMärEneRgie-Optimierung) zur Optimierung von Gebäuden und einzelnen Räumen verwendet. Die Software ist so konzipiert, dass eine Gebäudeoptimierung hinsichtlich Nutzerkomfort und Energiebedarf in den entscheidenden frühen Planungsphasen möglich ist. Die Simulationen werden für das Gebäude und einzelne Räume unter Einbeziehung von Größe, Form, Art der Fenster, Verschattung, Bauweise, Lüftung, Nutzung, Regelung der technischen Systeme und etlichen weiteren Parametern ermöglicht.

PRIMERO Komfort simuliert die sommerlichen Raumtemperaturen basierend auf dem international anerkannten und validierten dynamischen Simulationsprogramm EnergyPlus. Die Bewertungen erfolgen wahlweise auf Grundlage des adaptiven

Komfortmodells der EN 15251, der niederländischen ISSO 74, sowie der DIN 4108-2.

Für die durchgeführten Simulationen wurde das für die Messungen im Windkanal ermittelte Referenzgebäude herangezogen (siehe Abb. 063, Seite 72). Für die Außenbauteile konnten die in den Laboruntersuchungen festgestellten Kennwerte der Baumaterialien verwendet und durch Tabellenwerte aus der Literatur ergänzt werden. Die für die Simulationen verwendeten Bauteilaufbauten sind im Anhang dokumentiert. Es wurden Rahmenbedingungen definiert, wie beispielsweise der verwendete Klimadatensatz, die Kubatur des Gebäudes und die Nutzung welche bei allen Untersuchungen konstant blieben (siehe Anhang III.I). Für andere Parameter wurden Varianten untersucht. Die Einstellungen für diese Simulationen werden als Rahmenbedingungen für die jeweilige Untersuchung angegeben.

#### ◇ *Natürliche Lüftung*

Im Ersten Abschnitt des Kapitels wird das Thema *natürliche Lüftung* behandelt. Für diese Untersuchung wurde nur das Obergeschoss des Referenzgebäudes betrachtet, da sich die Lüftungskonzepte für den sommerlichen Wärmeschutz bei den traditionellen Wohnhäusern auf das oder die obere(n) Geschoss(e) bezogen. Das Erdgeschoss war als Wintergeschoss nicht für den Sommer optimiert. Daher lassen sich keine Konzepte zur Klimatisierung im Sommer durch natürliche

Lüftung daraus ableiten. Es konnte unter Einbeziehung der Messergebnisse aus den Experimenten im Windkanal und einem Vergleich zwischen den gemessenen Varianten einer umgebenden Bebauung gezeigt werden, dass die traditionelle Bebauung ein hohes Potential zur natürlichen Lüftung aufweist.

#### ◇ *Orientierung*

Im nächsten Abschnitt wird die Untersuchung des Einflusses solarer Einträge je nach *Orientierung der Gebäude* und Ausrichtung und Größe der Fensterflächen beschrieben. In diesem Zusammenhang besteht eine Überschneidung mit dem Teilbereich *Baumaterialien*, da ermittelt wurde, welchen Einfluss unterschiedliche Verglasungen der Fenster bei einer Orientierung der transparenten Flächen nach Süden auf den Heizwärmebedarf haben.

#### ◇ *Verschattungselemente*

Zum Thema *Verschattungselemente* für transparente Flächen am Gebäude wurde ebenfalls nur das Obergeschoss betrachtet, da sich die Konzepte zum Schutz vor Überhitzung auf den sommerlichen Wärmeschutz beziehen. Berechnungen zu dem Verhalten unterschiedlicher Materialien für Verschattungselemente und Gebäudesimulationen für unterschiedliche Varianten der Verschattung konnten zeigen, dass die traditionell verwendeten Klapppläden mit Lamellen viele Vorteile gegenüber anderen Sonnenschutzvorrichtungen haben.



#### ◇ *Baumaterialien*

In Bezug auf die verwendeten *Baumaterialien* konnte festgestellt werden, dass die traditionell verwendeten Materialien dem sommerlichen Wärmeschutz dienen und Vorteile im Vergleich mit moderneren Baustoffen haben können. In Bezug auf den Heizwärmebedarf der Räume wurden die Baumaterialien nicht weiter untersucht, da für die kalte Jahreszeit keine Konzepte für die heutige Anwendung daraus hätten abgeleitet werden können. Wir stellen inzwischen andere Ansprüche an den Komfort und es wird nicht mehr hingegenommen dass man sich im Winter in zugigen Räumen mit kühlen Temperaturen aufhält, dass nur ein Raum im Gebäude geheizt ist und dass die Orte für bestimmte Nutzungen und Aktivitäten sich stark an den Jahresverlauf anpassen müssen. In dem untersuchten Fall waren diese Zustände unter anderem dem Stand der damaligen Bautechnik geschuldet. Die verwendeten Konstruktionen waren im Gegensatz zu heute nicht luftdicht ausführbar und es bestanden nicht die gegenwärtigen Möglichkeiten zur Wärmedämmung.

#### ◇ *Faktoren, die das Erscheinungsbild der untersuchten Gebäude beeinflussen*

Unterschiedliche Einflüsse haben das Erscheinungsbild der Gebäude, welche im Rahmen dieser Arbeit untersucht wurden, geprägt. Soziale Komponenten und die wirtschaftliche Situation zur Zeit der Erbauung hatten ebenso Auswirkungen, wie die Lage in einer durch seismografische Aktivität geprägten Region. Dennoch, und auch trotz des

milden mediterranen Klimas ist die Anpassung an die regionalen Wetterbedingungen von herausragender Bedeutung.

Das Klima in Thessaloniki ist im Außenraum ohne künstliche Einflüsse nach den Kriterien des ASHRAE Standard 55-2005 im Durchschnitt nur zu 19% im Jahr für den Menschen komfortabel (siehe Abb. 036 Psychometrisches Diagramm, Seite 49). Die übrige Zeit (dies sind etwa 300 Tage, bzw. über 7000 h in einem Jahr) müssen Innenräume einen vom Außenraum abweichenden Zustand aufweisen, wenn sie den dort definierten Komfortkriterien entsprechen sollen. In der Untersuchung wurden die Konzepte, um diesen Zustand mit passiven Mitteln zu erreichen, für einen speziellen Fall analysiert.

Im Allgemeinen beinhalten Konzepte zur passiven Klimatisierung die folgenden Aspekte:

- » Orientierung des Gebäudes, Grad der Überbauung, Gebäudeform, Grundrisskonzept

unter Berücksichtigung der umgebenden Bebauung, der Form des Baukörpers in Bezug auf die natürliche Belichtung und Belüftung, der Orientierung nach Himmelsrichtung und der Anordnung von Räumen/Nutzungszonen im Grundriss und als Außenbereiche.

- » Lage, Größe und Verschattung der Gebäudeöffnungen

unter Berücksichtigung der Exponiertheit der transparenten Flächen, Verschattung durch andere Gebäude oder Bepflanzung, der Größe, Orientierung und Verschattungsmöglichkeiten der Fenster (solare Einträge) und dem Anteil der Fensterflächen an der Fassade, den Möglichkeiten der natürlichen Lüftung.

- » Materialien und Oberflächen

unter Berücksichtigung der Wärmeübertragung der Baumaterialien durch Wärmeleitung und durch Konvektion, des Materials und seiner Speicherefähigkeit, der Farbe und der Beschaffenheit der Oberflächen der Fassaden.

- » Umgebung des Gebäudes

unter Berücksichtigung von Oberflächen, Schattenwurf umgebender Bebauung, Windbarrieren, Bewuchs, Möglichkeiten Verdunstungskälte auszunutzen.

## 5.1 Natürliche Lüftung

Die Lüftung von Innenräumen im Allgemeinen ist bereits in der Einleitung im vorangegangenen Kapitel beschrieben worden. In diesem Abschnitt wird das Erfassen des Lüftungspotentials für die Räume in den traditionellen Häusern im Untersuchungsgebiet dargestellt. Daraus konnte abgeleitet werden, inwieweit die natürliche Lüftung den Komfort in den Innenräumen verbessern und die Überhitzung vermindern kann, und somit für den untersuchten Fall eine wirksames Konzept für den sommerlichen Wärmeschutz ist.

Des Weiteren wurde ermittelt, ob die Gebäude nach den im Tages- und Jahresverlauf wechselnden Winden ausgerichtet sind. In der kalten Jahreszeit ist ein geringes Lüftungspotential günstig, vor allem da die Außenwände aufgrund ihrer Bauweise nicht luftdicht sind. In den warmen Monaten vermindert die freie Lüftung nicht nur die Überhitzung der Räume, sondern verbessert den Komfort für die Nutzerinnen, da ein ausreichender Luftwechsel eine zu hohe Luftfeuchtigkeit und  $\text{CO}_2$ -Konzentration der Luft, sowie unangenehme Gerüche verhindert.

Bei einem ruhenden Menschen in einer windstillen Umgebung von  $20^\circ\text{C}$  beträgt der Wärmeverlust durch Konvektion 33% und durch Verdunstung 19%. 46% erfolgen durch Abstrahlung und 2% Verlust entstehen durch die Atmung (Specht, 2005:3). Da sowohl die Konvektion als auch die Verdunstung durch Luftbewegung verstärkt werden können, kann mehr als die Hälfte des

Wärmeverlustes durch Lüftung gesteigert werden. Eine Kühlung der Oberfläche der Haut findet ab 0,2 m Luftbewegung pro Sekunde statt, mehr als 2,0 m/s kann lt. Oliver (1997a:460) vom Nutzer als störend empfunden werden. Dies bezieht sich vor allem auf kältere Temperaturen, denn bei sehr warmer Luft können auch wesentlich höhere Luftströmungen als angenehm empfunden werden (z.B. ein Ventilator am Arbeitsplatz).

Das Komfortmodell im ASHRAE Standard 55-2010 beinhaltet, dass eine Luftbewegung beim Nutzer nur bis maximal 1,2 m/s im Komfortbereich liegt. Der Komfortbereich ist abhängig von der Temperatur und der Möglichkeit für die Nutzerinnen, Einfluss zu nehmen. Ohne Einfluss nehmen zu können endet der Komfortbereich ab einer Temperatur von  $25,5^\circ\text{C}$  bereits bei 0,8 m/s. Hat die Nutzerin die Möglichkeit den Luftstrom zu regulieren, reicht die Komfortzone bei Temperaturen zwischen  $23^\circ\text{C}$  und  $30,5^\circ\text{C}$  bis 1,2 m/s. Das Modell beinhaltet das Tragen einer den Temperaturen angepassten Kleidung. Auch hier ist anzumerken, dass z.B. ein Ventilator wesentlich höhere Luftbewegungen hervorruft, welche üblicherweise jedoch als angenehm und erwünscht empfunden werden.

Eine andere Größe in Bezug auf den Luftstrom ist die Luftwechselrate (LWR). Recknagel (2007:Tafel 3.5.1-1) gibt Richtwerte für LWR je nach Nutzung der Räume an. Für Büroräume sind dies beispielsweise

drei bis sechs Luftwechsel pro Stunde. Die LWR stellt das Verhältnis der von außen zuströmenden Luft pro Stunde zum Raumvolumen dar. Sie eignet sich als Bezugswert, welcher so zu verstehen ist, dass im Idealfall bei einer LWR von 1/h das Luftvolumen eines Raumes innerhalb einer Stunde einmal komplett ausgetauscht wird. Im Normalfall wird dies jedoch bei einer natürlichen Lüftung nie der Fall sein, da der Luftaustausch nicht in jedem Bereich eines Raumes exakt gleich ist (vgl. Gerder, 2006:18). Es wäre daher zu stark verallgemeinert von einer LWR ausgehend, Aussagen zur Luftbewegung im Raum zu treffen.

Natürliche Lüftung kann ein kostengünstiges Nullenergiekonzept zur passiven Kühlung von Gebäuden sein. Ergebnisse von Untersuchungen zur passiven Kühlung bei Bürogebäuden in Europa nach Eicker (2009:79ff) haben gezeigt, dass Nachtlüftung effektiv zur passiven Kühlung eingesetzt werden kann, wenn sowohl eine hohe LWR als auch ein hoher Wärmeübergangskoeffizient der Oberflächen im Raum vorhanden sind. Als Problem bei der Nachtlüftung wurde die Bedienung durch die Nutzerinnen identifiziert. Werden die Lüftungsöffnungen zu früh geöffnet, können Wärmeeinträge von außen in den Abendstunden das Abkühlungspotential durch Nachtlüftung stark senken.

Nach Eicker funktioniert Nachtlüftung sehr zufriedenstellend im gemäßigten Klima Zentraleuropas (max. 200 h über  $25^\circ\text{C}$ ), ab 300 h über  $25^\circ\text{C}$  wird das Limit

von ausschließlich passiver Kühlung erreicht. Es wird für diese Klimata vorgeschlagen, die Nachtlüftung mechanisch zu regeln und durch Lüfter zu unterstützen. Diese Untersuchung bezieht sich ausschließlich auf Bürogebäude. Bei den in dieser Arbeit untersuchten Wohngebäuden konnte ein solches Limit auch bei etwa 1200 h über 25°C in Thessaloniki nicht bestätigt werden.

### 5.1.1 Lüftungsöffnungen

Das Potential der natürlichen Lüftung wird durch die Lage, Größe und Form der Lüftungsöffnungen bestimmt. Im städtischen Raum beeinflusst zusätzlich die umgebende Bebauung das Potential der windinduzierten Lüftung maßgeblich. Nach Givoni (1998:439) gibt es je nach vorherrschender Windrichtung günstige Straßenverläufe in einem Winkel von 30 bis 45° zur vorherrschenden Windrichtung, welche eine gute natürliche Lüftung zu gewährleisten kann.

Leider gibt es nicht in allen Regionen mit einer Notwendigkeit von intensiver natürlicher Lüftung eine vorherrschende Windrichtung im Sommer. Ein weiteres Problem kann sein, dass die Topografie oder andere Umstände einen derartigen Straßenverlauf nicht zulassen. Außerdem kann die Richtung des Straßenverlaufs anderen Kriterien wie z.B. der optimalen Ausrichtung nach Himmelsrichtung entgegenstehen und es können nie alle Straßen in der gleichen Richtung verlaufen (Ebd., 1998:441).

Die natürliche Lüftung kann über Fenster erfolgen, alternativ oder ergänzend können speziell für die Lüftung vorgesehene Öffnungen vorhanden sein (wie z.B. Lüftungsklappen in einer Außenwand, Windfänger oder durchlässige Materialien für Außenwände), welche auf das lokale Klima abgestimmt sind. Die Gebäude im Untersuchungsgebiet werden ausschließlich über ihre Fenster gelüftet. Fenster haben im Gegensatz zu speziellen Lüftungsvorrichtungen den Vorteil, viele Funktionen zu vereinen. Sie gewähren Einblick (Aufnahme sozialer Kontakte), Ausblick (Aufnahme sozialer Kontakte, Wahrnehmen des Wetters und der Vegetation), sie ermöglichen zu hören, was außerhalb des Gebäudes passiert. Fenster gewährleisten eine Belichtung des Innenraumes und sie sorgen für eine Belüftung der Räume (Vermeiden von feuchter, schlecht riechender Luft, höherer Komfort durch Unterstützung der Kühlung der Haut durch Verdunstungskälte, Vermeiden von Bauschäden durch Feuchtigkeit). Architektonisch gesehen sorgen Fenster für eine Gliederung der Fassade. Für die Nutzerinnen sind sie eine Möglichkeit der Einflussnahme auf das Gebäude: Fenster können geöffnet oder geschlossen werden, wenn es drinnen oder draußen zu laut, zu heiß, zu kalt oder zu hell ist (vgl. Ebd., 1998:53–54).

Konzepte zur natürlichen Lüftung eines Gebäudes durch die Fensteröffnung beinhalten die Anordnung der Öffnungen zur Ermöglichung von Querlüftung, ebenso wie die Nutzung der Lüftung über

eine Höhendifferenz. Durch geschickte Planungen können Kenntnisse über vorherrschende Windrichtungen ausgenutzt werden, so dass zu den Zeiten, in denen ein hoher Bedarf besteht, ein großes Potential für eine natürliche Lüftung existiert. Abhängig vom Klima können Fassadenöffnungen, die eine Nachtlüftung zur Kühlung zulassen, morgens geschlossen werden, sobald die Temperaturen steigen, so dass durch die des Nachts abgekühlten Bauteile die Temperatur im Innenraum niedriger bleibt als außen. Nachtlüftung erfordert einen geeigneten Einbruchschutz und kann ungeeignet sein, wenn zu viel Lärm von außen oder Luftverschmutzung besteht.

Die Steuerung der natürlichen Lüftung kann vom Nutzer vorgenommen werden, wenn die Lüftung über Fenster oder andere manuell zu bedienende Öffnungen erfolgt. Moderne Systeme zur natürlichen Lüftung setzen auch automatische Steuerungen oder Kombinationen aus beiden Varianten ein. Dies ist ein Themenbereich, in dem noch weiterer Forschungsbedarf besteht, um zu erfassen, wie das Potential der natürlichen Lüftung am besten genutzt und gleichzeitig eine hohe Nutzerzufriedenheit erreicht werden kann. Dies wurde im Rahmen dieser Arbeit jedoch nicht untersucht.

### 5.1.2 Das Lüftungspotential der beispielhaft untersuchten Gebäude

Die in der Arbeit betrachteten Gebäude in der Oberstadt von Thessaloniki haben üblicherweise Flügelfenster. Ursprünglich waren die Fenster des osmanischen Hauses Schiebefenster, bei denen der untere Flügel nach oben hinter den oberen Flügel geschoben wurde. Dies halbiert die Fläche, die prinzipiell für die freie Lüftung zur Verfügung stehen könnte. Die Schiebefenster sind nach und nach durch Flügelfenster ersetzt worden, welche die Öffnung der gesamten Fläche ermöglichen. Diese Fenster haben in ihrem aktuellen Zustand üblicherweise Klappläden mit Lamellen (Abb. 076), welche sich zu Anfang des 20. Jahrhunderts gegen die traditionell aus der osmanischen Zeit stammenden Schiebeelemente (Abb. 078) durchgesetzt haben.

Die Lamellen der Klappläden sind verstellbar, so dass auch bei geschlossenen Läden durch eine waagerechte Stellung ein großer Lüftungsquerschnitt erhalten bleibt. Die Lamellen haben eine Tiefe von ca. 8 cm und einen vertikalen Abstand von ca. 5 cm. Eine Lamelle ist ca. 10 mm dick (nach eigenen Messungen vor Ort, siehe Abb. 077). Bei den meisten Klappläden kann der untere Teil bei geschlossenem Laden geöffnet werden. Durch diese Bauweise ist es möglich, die Läden mit senkrecht gestellten Lamellen komplett zu schließen bis hin zu größtmöglicher Öffnung bei waagrecht gestellten Lamellen und geöffnetem unteren Rahmen.

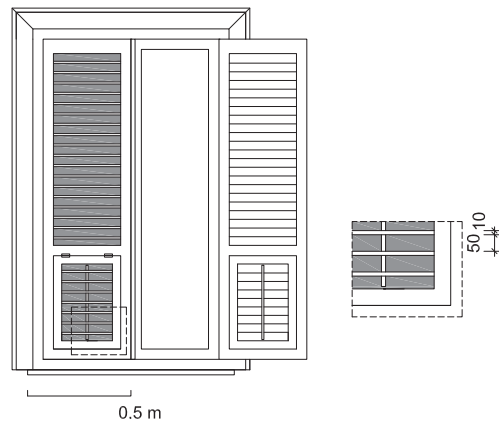


Abb. 076. Klappläden mit verstellbaren Lamellen, li. geöffnet, re. geschlossen und offenbarem unterem Rahmen



Abb. 077. Fenster mit typischen Klappläden in der Oberstadt von Thessaloniki (eigene Aufnahme, 2013)

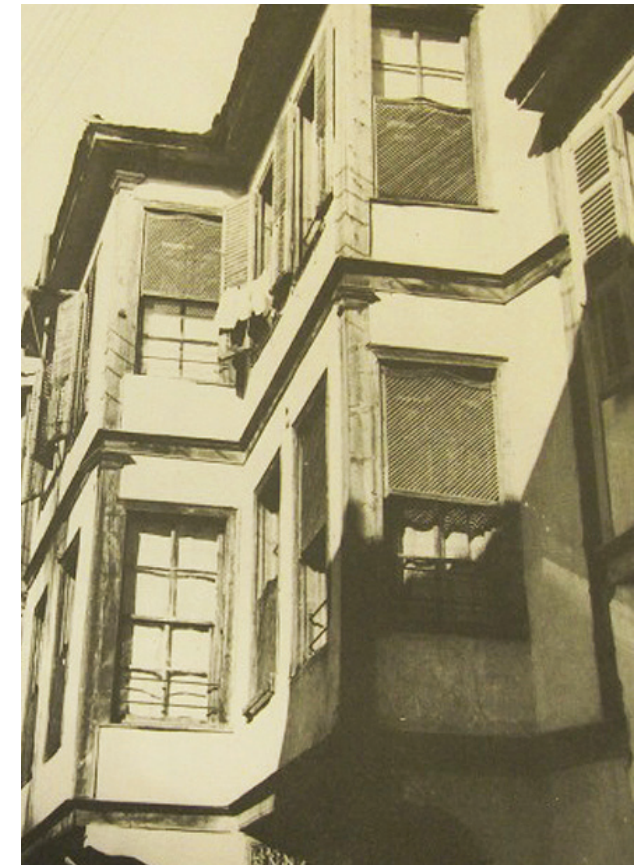


Abb. 078. Fenster mit verschiebbaren Verschattungselementen (aus: AnoPoli, Moutsopoulos, 1979:39)



### 5.1.3 Windverhältnisse in Thessaloniki

Um Aussagen darüber treffen zu können, wie das Lüftungspotential genutzt werden kann, wurde analysiert, wann und wie oft der Wind aus welcher Richtung kommt, welche Extremwerte auftreten, wie hoch die Schwankungen sind und wie die Beziehung zwischen Lufttemperatur, Windstärke und Windrichtung ist (siehe Kapitel 2.5.4 Windverhältnisse).

#### Zusammenfassung Sommer:

Die wärmsten Monate in Thessaloniki sind Juni, Juli und August. Typische Windgeschwindigkeiten im Sommer liegen auch an heißen Tagen um 3 m/s. Im Laufe des Tages verändert sich die Windrichtung in einem bestimmten Muster. Ein typischer Tagesverlauf in den Sommermonaten (Juni, Juli, August) verläuft wie im folgenden beschrieben:

Tagsüber weht der Wind aus westlichen Richtungen mit 3 bis 6 m/s, teils auch nordwestlich bis Nord. Nördliche Winde gehen mit höheren Windstärken einher. Zum Abend hin dreht der Wind auf südliche Richtungen bei etwas geringeren Windgeschwindigkeiten. Nachts herrschen leichte nördliche Winde oder schwache Winde aus östlichen Richtungen. Eher selten sind nordöstliche und südwestliche Winde. Windstille herrscht vor allem in den Nachtstunden ab Mitternacht bis früh morgens.

Dieses Muster ist auch während Hitzeperioden (welche als Zeiträume mit  $T_{\min.} \geq 20 \text{ °C}$  und

$T_{\max.} \geq 33 \text{ °C}$  an fünf aufeinander folgenden Tagen definiert werden) vorhanden. Störungen der Großwetterlage können zu kurzzeitigen Abweichungen führen.

#### Zusammenfassung Winter:

In den Monaten Dezember, Januar und Februar treten bei bestimmten Wetterlagen aus nördlichen und nordwestlichen Richtungen starke Winde und Stürme auf. Die Lufttemperaturen liegen dann üblicherweise zwischen 4 und 8°C. Fallen die Temperaturen unter den Gefrierpunkt überwiegen südöstliche oder nordwestliche Richtungen bei Windgeschwindigkeiten bis zu 3 m/s.

### 5.1.4 Untersuchte Varianten zum Abschätzen des Lüftungspotentials

Für die Abschätzung des Lüftungspotentials wurden zwei Situationen angenommen.

*Situation 1* (Abb. 079) Pro Raum sind je ein gegenüberliegendes Fenster und die Klappläden geöffnet (ein Zustand der abbildet, dass bei Anwesenheit der Raum gelüftet wird).

*Situation 2* (Abb. 080) Es sind alle Fenster geöffnet und alle Klappläden geschlossen. Die Lamellen sind alle horizontal gestellt (ein Zustand der eine Lüftung bei Abwesenheit oder eine Nachtlüftung abbildet).

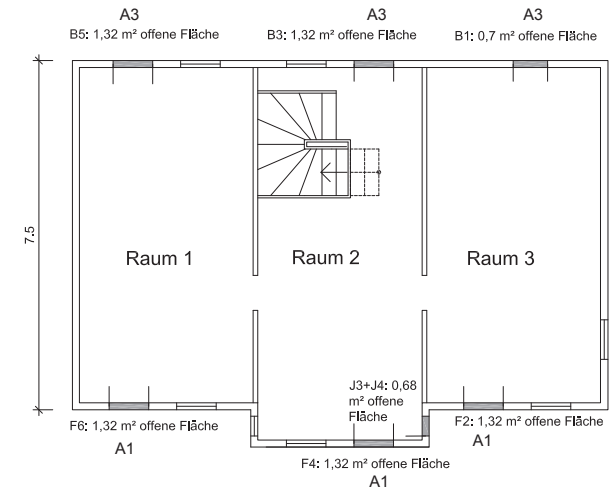


Abb. 079. Situation 1, Obergeschoss des Referenzgebäudes, je ein gegenüberliegendes Fenster pro Raum zur Lüftung geöffnet

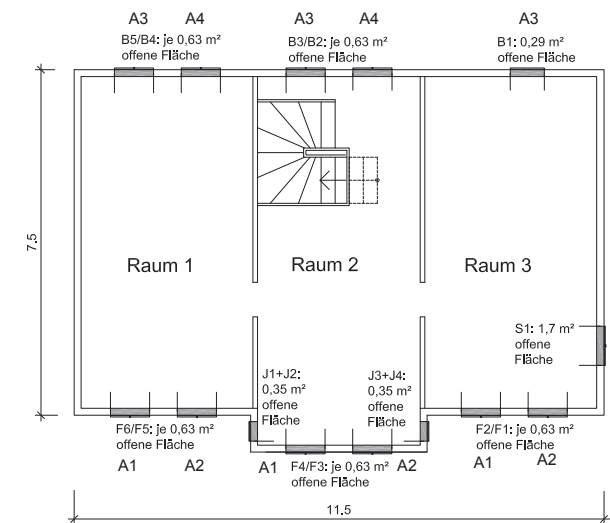


Abb. 080. Situation 2, Obergeschoss des Referenzgebäudes, alle Fenster geöffnet, alle Klappläden geschlossen

Bei der Bestimmung der LWR wurde davon ausgegangen, dass eine Querlüftung ohne innere Verbauung möglich ist, da dieser Faktor individuell von der Nutzung abhängig ist und daher kaum generalisiert werden kann. Zum anderen waren die Räume ursprünglich sehr spärlich möbliert, so dass diese Voraussetzung für die Bestimmung der Luftwechselrate auch den ursprünglichen Gegebenheiten entspricht.

### 5.1.5 Ermittlung einer erforderlichen LWR für den sommerlichen Wärmeschutz

Die verwendete Simulationssoftware PRIMERO Komfort ermöglicht die Berechnung der zu erwartenden Innenraumtemperaturen bei unterschiedlichen Lüftungskonzepten. Um einzuschätzen, bei welcher LWR der Innenraum ausreichend gelüftet wird, um eine Überhitzung zu vermeiden, wurden für das Obergeschoss des Referenzgebäudes unterschiedliche LWR verglichen (siehe Abb. 081).

#### Rahmenbedingungen für diese Simulation:

Orientierung der Straßenfassade nach Süden, keine Heizung, Verschattung: Klappläden zu, wenn die Sonne scheint

Das Ergebnis der Simulation zeigt, dass schon eine LWR von 3/h bei Außentemperaturen von über 33°C zu Innenraumtemperaturen führt, die unter der Außentemperatur liegen. Bei einer Erhöhung der LWR stellt man fest, dass die simulierten

Temperaturen im Innenraum bis zu einer LWR von 15/h abnehmen und dann auch schon ab einer Außentemperatur von 30°C innen niedriger bleiben als außen. Eine weitere Erhöhung des Luftwechsels bewirkt nur noch sehr geringe Unterschiede.

Die Bewertung der Ergebnisse nach den Komfortkriterien der DIN 15251:2007-08 werden in Abb. 083 als Prozentsatz zufriedener Nutzer dargestellt. Für die in der DIN aufgestellten Kriterien der Komfortklasse III (annehmbares, moderates Maß

an Erwartungen; wird bei bestehenden Gebäuden angewendet) werden schon ab einer LWR von 7/h etwa 95% der Nutzer mit dem Komfort zufrieden sein. Eine Steigerung auf 97% ist durch eine höhere LWR möglich.

Zum Vergleich wird die Anzahl zufriedener Nutzer auch für Komfortklasse II (normales Maß an Erwartungen; empfohlen für neue und renovierte Gebäude) dargestellt. Bei einer LWR von 15/h wird für diese Klassifizierung eine Anzahl Zufriedener von 94% erreicht.

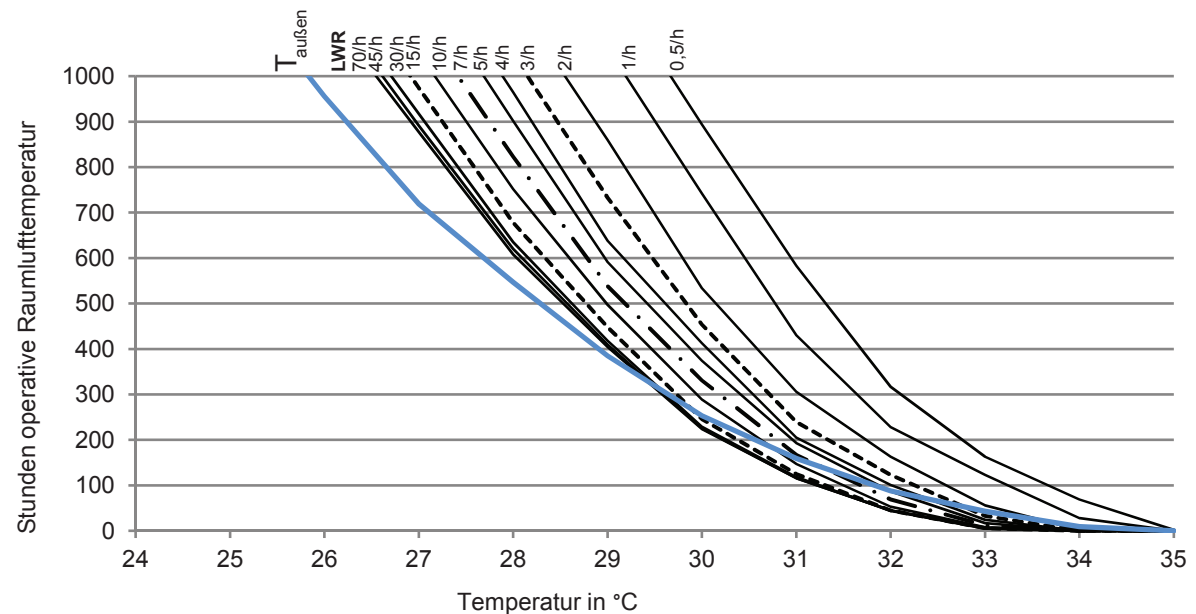


Abb. 081. Stunden der operativen Temperatur im Obergeschoss des Referenzgebäudes bei unterschiedlichen Luftwechselraten

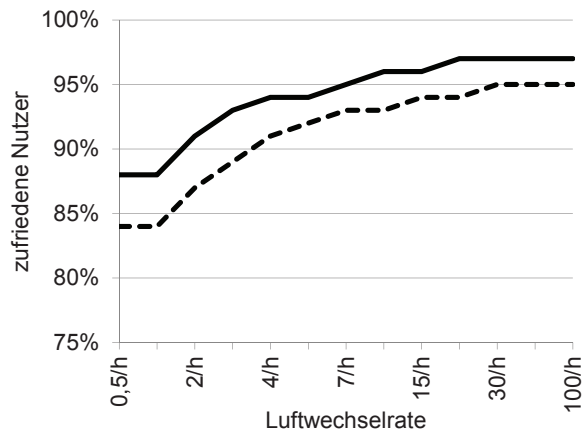


Abb. 082. Prozentsatz zufriedener Nutzer in Bezug auf die Luftwechselrate nach den Komfortkriterien der DIN 15251:2007-08 (durchgezogene Linie = Komfortklasse III, gestrichelt = Komfortklasse II)

Kurzzeitige Überschreitungen der Temperaturen von insgesamt maximal 5% der Nutzungszeit werden in der DIN 15251 als akzeptabel angegeben. Die Streuung der Werte (Innenraumtemperaturen: siehe Abb. 083) und der Temperaturverlauf über den Sommer (dargestellt in Abb. 084) lassen Rückschlüsse darauf zu, dass im untersuchen Fall die Überschreitung der Innenraumtemperaturen in einer üblichen Verteilung über den gesamten Sommer besteht, und nicht punktuell für einen einzelnen längeren Zeitraum auftritt.

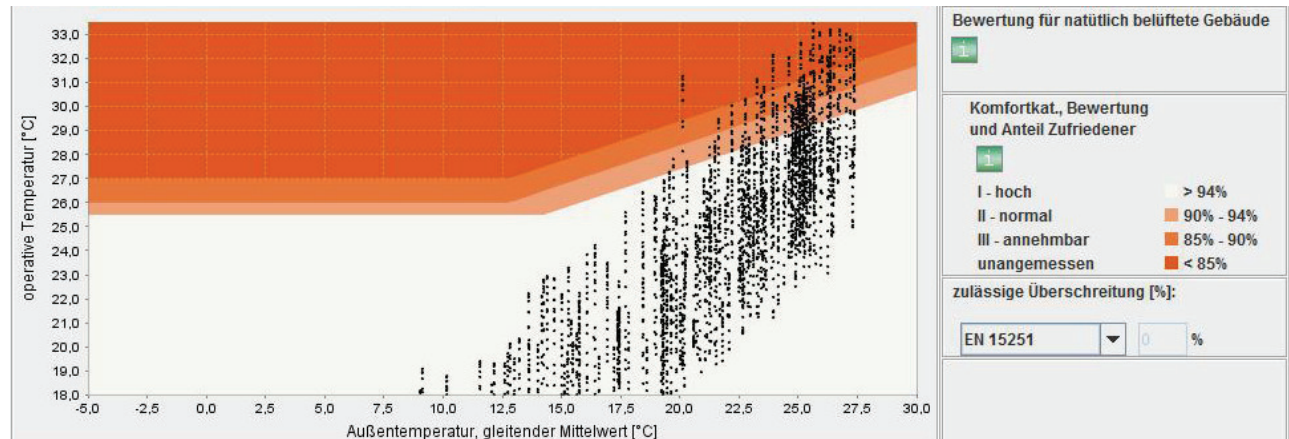


Abb. 083. Innenraumtemperaturen im Verhältnis zu den Außentemperaturen im Referenzgebäude, Ergebnis der Simulation bei einer LWR von 7/h

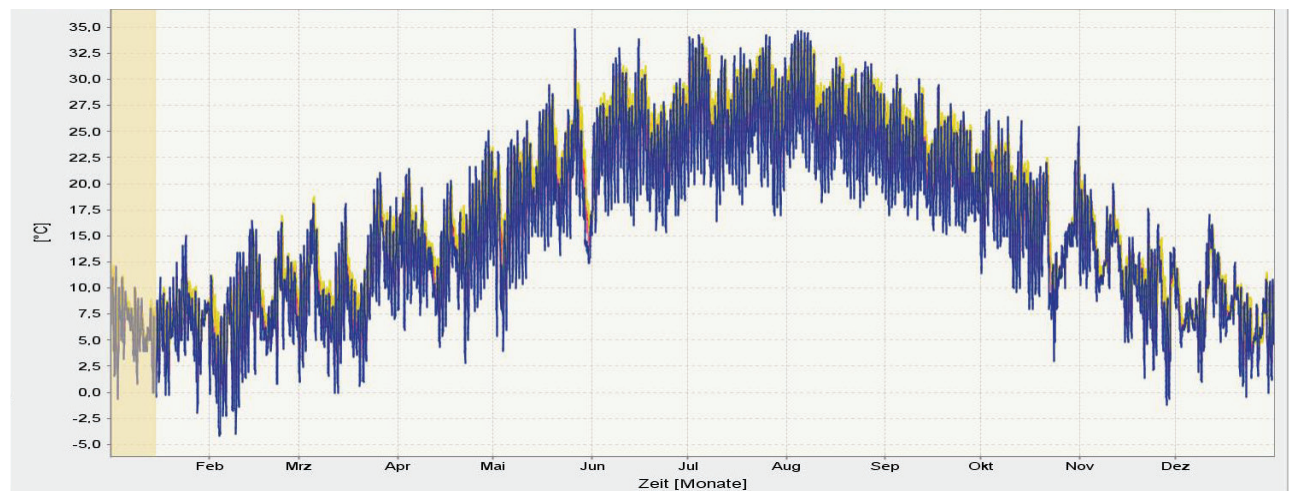


Abb. 084. Temperaturverlauf über ein Jahr (blaue Linie) des verwendeten Klimadatensatzes IWEK

### 5.1.6 Berechnung des Lüftungspotentials auf Grundlage des BS 5925-1991

Die Simulationen konnten also zeigen, dass eine LWR von 7/h für die Räume im Obergeschoss des Referenzgebäudes eine Überhitzung vermeiden kann. Zur rechnerischen Ermittlung der möglichen windinduzierten LWR für das Obergeschoss des Gebäudes wurde das Rechenverfahren aus dem BS 5925-1991, unter Berücksichtigung der Lage und Geometrie des Gebäudes und seiner Öffnungen sowie der Umgebung (Koeffizient K, Exponent a und Gebäudehöhe z) und dem  $c_p$  Wert als Tabellenwert, verwendet.

$$m_W = c_d * A_W * v_r * (\Delta c_p)^{0,5} \quad (4)$$

mit:  $m_W$  = Volumenstrom windinduziert;  $c_d$  = Durchflusskoeffizient für die Durchtrittsfläche (rechteckige Öffnung: 0,65);  $A_W$  = wirksame Fensterfläche,  $1/A_W^2 = 1/(A_1 + A_2)^2 + 1/(A_3 + A_4)^2$  dabei Flächen A1 bis A4 wie in Abb.079/080 dargestellt;  $v_r$  = Referenz-Windgeschwindigkeit; und  $c_p$  = durchschnittlicher Druck auf der Fassade.

$$v_r = K * z^a * v_f \quad (5)$$

mit: K = Koeffizient und a = Exponent zur Berücksichtigung der Umgebung auf die Windgeschwindigkeit (für Stadtzentrum K = 0,21 und a = 0,33); z = Gebäudehöhe; und  $v_f$  = Windgeschwindigkeit.

Für die Berechnungen nach diesem Verfahren muss in Kauf genommen werden, dass die Tiefe des Raumes nicht berücksichtigt wird. Erweitert wurde das Verfahren um die Wahrscheinlichkeit geöffneter Fenster nach Rijal und Humphreys (Rijal, 2008:23ff; Dietrich, 2010).

Der Algorithmus zur Berechnung der Wahrscheinlichkeit der Fensteröffnung nach Rijal und Humphreys lautet:

$$\text{Log} \{p/(1-p)\} = 0,171 T_g + 0,166 T_{ao-1} - 6,4 \quad (6)$$

mit: p = Wahrscheinlichkeit der Fensteröffnung;  
 $T_g$  = Innentemperatur; und  $T_{ao-1}$  = Außentemperatur.

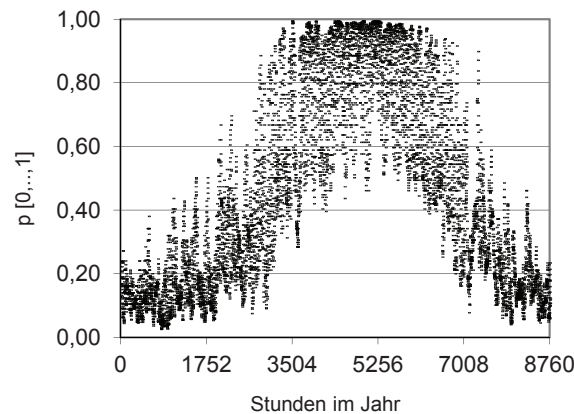


Abb. 085. Darstellung der Wahrscheinlichkeit geöffneter Fenster im Jahresverlauf für Situation 1, Raum 1, nach Rijal und Humphreys

In Abb. 086 ist die errechnete LWR für das Referenzgebäude für Raum 1, als LWR im Tagesmittel für ein Jahr unter Berücksichtigung der Temperaturen und Windverhältnisse der IWEK-Klimadaten für Thessaloniki dargestellt. Die Wahrscheinlichkeit geöffneter Fenster zeigt sich in einer geringeren LWR in den Wintermonaten, da aufgrund der niedrigeren Außentemperaturen die Fenster häufiger geschlossen sind (vgl. Abb. 085). Ohne den Einfluss dieser Komponente wäre die LWR in der kälteren Jahreshälfte nicht niedriger als in den warmen Monaten, da ein windinduzierte Lüftungspotential im gesamten Jahresverlauf vorhanden ist.

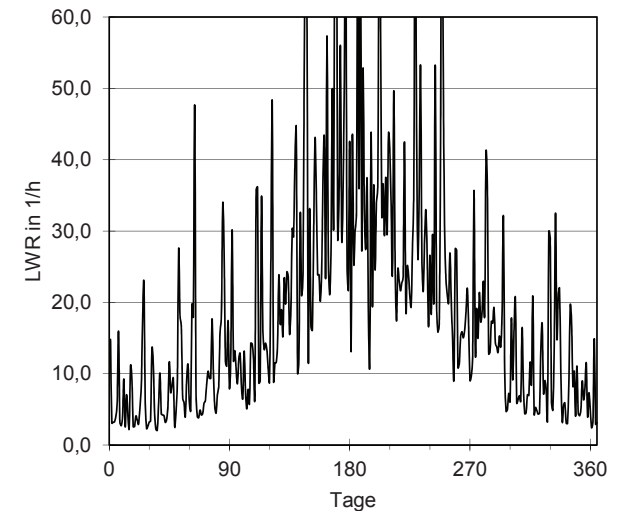


Abb. 086. Raum 1, Luftwechselrate im Jahresverlauf im Tagesmittel unter Berücksichtigung der Wahrscheinlichkeit geöffneter Fenster, Referenzgebäude, Situation 1, Straßenfassade nach Südosten



Eine detailliertere Betrachtung zeigt, dass die errechnete mögliche LWR von Mai bis September immer über 10/h liegt (siehe Abb. 087) und bei der angenommenen Ausrichtung der Straßenfassade nach Südosten ein hohes Lüftungspotential besteht.

Eine Orientierung nach Südwesten (Abb. 088) zeigt aufgrund der selten herrschenden Windrichtungen aus Südwesten oder Nordosten ein geringeres Lüftungspotential als die Orientierung nach Südosten.

Die Ergebnisse der Berechnung basieren auf den Tabellenwerten für den zu erwartenden Winddruck an der Fassade, welche nicht die speziellen lokalen Gegebenheiten berücksichtigen können. Sie müssen daher als eine Abschätzung interpretiert werden. Den Tabellenwerten liegen bestimmte Annahmen zugrunde, welche ggf., je nachdem für welchen Zweck sie bestimmt wurden, nach oben oder unten gerundet sein können (siehe Kapitel 4.5.7).

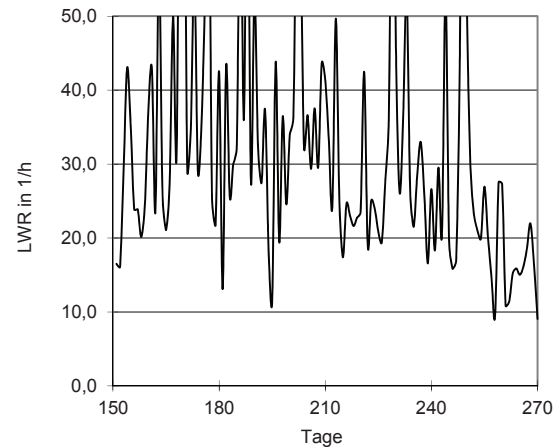


Abb. 087. Berechnete LWR von Mai bis September im Tagesmittel unter Berücksichtigung der Wahrscheinlichkeit geöffneter Fenster für Raum 1 im Referenzgebäude, Situation 1, Straßenfassade nach Südosten

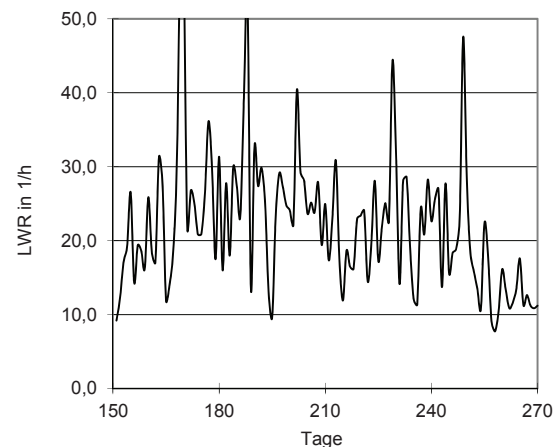


Abb. 088. Berechnete LWR von Mai bis September im Tagesmittel unter Berücksichtigung der Wahrscheinlichkeit geöffneter Fenster für Raum 1 im Referenzgebäude, Situation 1, Straßenfassade nach Südwesten

### 5.1.7 Berechnung des Lüftungspotentials unter Berücksichtigung der Ergebnisse aus den Windkanalmessungen

Eine andere Möglichkeit der Betrachtung des Lüftungspotentials ergab sich unter Einbeziehung der Ergebnisse aus der Untersuchung im Windkanal. Zunächst wurde berechnet, welche Druckdifferenz notwendig ist, um die erstrebte LWR von 7/h zu erreichen (vgl. Schelbach, 2013:623ff). Dazu wurde wie im Rechenweg 1 die Formel aus dem BS 5925-1991 verwendet:

$$m_W = c_d \cdot A_W \cdot v_r \cdot (\Delta c_p)^{0,5} \quad (4)$$

$$v_r = K \cdot z^a \cdot v_f \quad (5)$$

Die LWR wurde errechnet mit:

$$\text{LWR} = 3600 \cdot m_W / A_{\text{Raum}} \quad (7)$$

$\Delta c_p$	$v_f$ in m/s	$A_W$ in m <sup>2</sup>	Luftwechselrate in 1/h
0,1	5	0,93	18
0,1	2	0,93	7
0,05	5	0,93	12,5
0,05	2	0,93	5

Abb. 089. Berechnung der möglichen LWR bei Querlüftung in Raum 1 des Referenzgebäudes, Situation 1 (je ein gegenüberliegendes Fenster und Klappläden geöffnet) bei unterschiedlichen Druckdifferenzen und Windgeschwindigkeiten

$\Delta c_p$	$v_f$ in m/s	$A_W$ in m <sup>2</sup>	Luftwechselrate in 1/h
0,1	5	0,89	17
0,1	2	0,89	6,8
0,05	5	0,89	12
0,05	2	0,89	4,8

Abb. 090. Berechnung der möglichen LWR bei Querlüftung in Raum 1 des Referenzgebäudes, Situation 2 (alle Fenster geöffnet, alle Klappläden geschlossen) bei unterschiedlichen Druckdifferenzen und Windgeschwindigkeiten

Die Ergebnisse der Berechnungen zeigen, dass auch bei einer geringen Windgeschwindigkeit von 2 m/s und jeweils nur einem geöffneten Fenster auf jeder Seite des Raumes schon eine geringe Druckdifferenz von  $\Delta c_p = 0,1$  ausreicht, um durch Querlüftung einen zur Vermeidung von Überhitzung wirksamen Luftwechsel von 7/h zu ermöglichen (siehe Abb. 089).

$\Delta c_p$	$v_f$ in m/s	$A_W$ in m <sup>2</sup>	Luftwechselrate in 1/h
0,25	5	0,93	28
0,25	2	0,93	11
0,5	5	0,93	40
0,5	2	0,93	16

Abb. 091. Berechnung der LWR bei Querlüftung in Raum 1 des Referenzgebäudes, Situation 1, bei höheren Druckdifferenzen

Werden größere Druckdifferenzen zwischen den Lüftungsöffnungen angesetzt, ergibt die Berechnung entsprechen höhere LWR. Da die Simulationen

jedoch gezeigt haben, dass LWR ab 15/h keine weitere Absenkung der Innenraumtemperaturen verursachen, sind diese hohen LWR für den sommerlichen Wärmeschutz nicht erforderlich.

### 5.1.8 Simulationen mit ENVI-met

Zum Vergleich der auf Grundlage des BS 5925-1991 rechnerisch ermittelten Referenzwindgeschwindigkeit wurde eine Simulation mit ENVI-met durchgeführt. ENVI-met ist eine Software, die ein dreidimensionales Modell berechnet, um Aussagen zum Mikroklima im städtischen Raum zu machen. Die Auflösung der Simulation kann räumlich bis zu 0,5 m eingestellt werden.

Für einen im IWEK Klimadatensatz für Thessaloniki typischen Sommertag, den 23. Juni, wurde für 12:00 Uhr Mittags eine Berechnung für den in Fall 1.1 modellierten städtischen Raum durchgeführt und mit den Rechenergebnissen verglichen. Bei einer Windgeschwindigkeit von ca. 5 m/s, welche in dem verwendeten Datensatz von Energy Plus für den simulierten Zeitraum vorliegt, beträgt lt. Simulationsergebnis die Windgeschwindigkeit in der Straßenschlucht auf Höhe der Erkerfenster noch etwa 2 bis

3 m/s. Das entspricht der nach dem BS 5925-1991 für  $v_f = 5$  m/s rechnerisch ermittelten Referenzwindgeschwindigkeit  $v_r = 2,05$  m/s.

Abb. 092 zeigt ein Teilergebnis der ENVI-met Simulation, als Schnitt durch den simulierten städtischen Raum von Fall 1.1 mit einer Darstellung der simulierten Windgeschwindigkeiten.

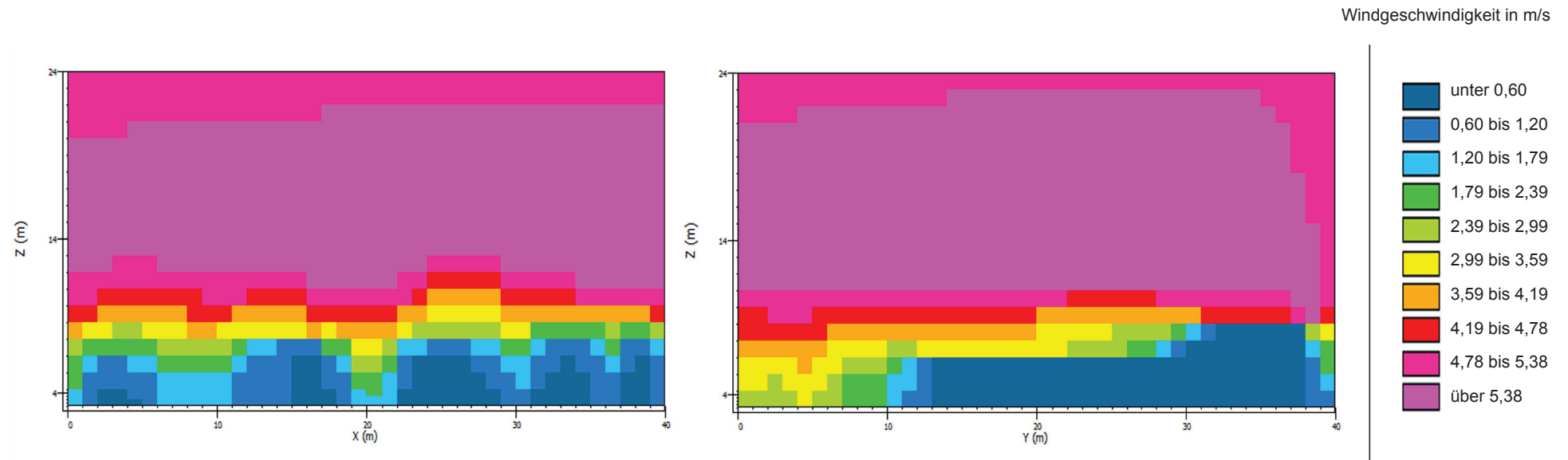


Abb. 092. Ergebnis einer Simulation mit ENVI-met, Windgeschwindigkeiten dargestellt im Längs- und Querschnitt für den simulierten städtischen Raum von Fall 1.1

### 5.1.9 Analyse der Ergebnisse der Windkanalmessungen

Vor den Messungen wurden, wie im vorigen Kapitel beschrieben, unterschiedliche Fälle einer umgebenden Bebauung um das Referenzgebäude ermittelt. In der folgenden Auswertung werden davon nur die vier Fälle 1.1 / 1.1x, Fall 2.2, Fall 3.1 / 3.1x und 3.2 beschrieben. Die Ergebnisse, die sich aus den Messungen ableiten lassen, sind aus diesen Fällen abzulesen. Weitere Messungen mit zusätzlichen Varianten und unter veränderten Rahmenbedingungen könnten noch weitergehende Ergebnisse ermöglichen. Dies ist im Rahmen und Umfang dieser Arbeit jedoch nicht erfolgt.

#### ◇ Fall 1.1 / 1.1x

Die Umgebung des Referenzgebäudes für Fall 1.1 ist die dichte, homogene umgebende Bebauung (siehe Abb. 093). Der Messdurchlauf für Fall 1.1 wurde insgesamt zwei Mal durchgeführt: Fall 1.1 mit dem Modell mit einem Erker und Fall 1.1x mit dem Modellgebäude ohne einen Erker.

Abb. 095 zeigt die maximalen im Windkanal gemessenen Druckdifferenzen zwischen den gegenüberliegenden Fassaden der Räume 1, 2 und 3 im Referenzgebäude. Innerhalb der engen, kleinteiligen Bebauung zeigt sich, dass immer für mindestens einen Raum  $\Delta c_p$  größer 0,1 ist. Dies bedeutet, dass auch bei schwachem Wind von 2 m/s die Druckdifferenzen für einen Luftwechsel von 7/h ausreichen (siehe Abb. 090).

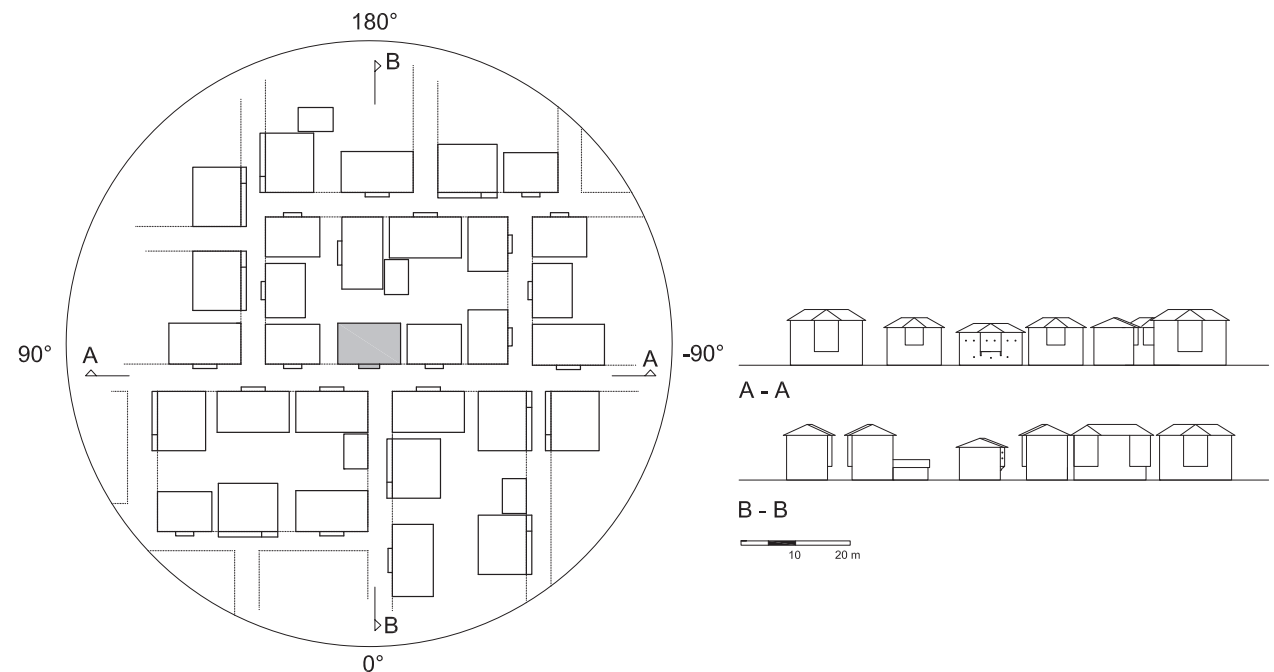


Abb. 093. Referenzgebäude und umgebende Bebauung für die Messung Fall 1.1, Aufsicht auf die Drehscheibe im Windkanal, Ansicht A-A und B-B



Aus den Messergebnissen lässt sich ablesen, welche Windrichtungen Druckdifferenzen und dadurch ein Lüftungspotential verursachen und in welcher Stärke sie vorliegen. In der engen kleinteiligen Bebauung erzeugen Windrichtungen parallel zur Straße höhere Druckdifferenzen, in diesem Fall vor allem für die Räume 1 und 2 für Windrichtungen von 120° bis 60°. Für den mittleren Raum ergeben sich bei einem Vergleich von Fall 1.1 und Fall 1.1x außer bei 150° und 180° Windrichtung bei dem Gebäude mit einem Erker die größeren Druckdifferenzen.

Deutlich zu sehen ist in Abb. 096, Raum 2, dass das Lüftungspotential für den Raum mit einem Erker höher ist. Damit konnte gezeigt werden, dass der Erker eine weitere Funktion besitzt, die über den Ausblick und

Windrichtung im Windkanal

Fall	Raum	-150°	-120°	-90°	-60°	-30°	0°	30°	60°	90°	120°	150°	180°
1.1	1	0,49	0,19	0,12	0,00	0,18	0,00	0,00	0,27	0,44	0,34	0,02	0,08
1.1	2	0,00	0,12	0,14	0,26	0,20	0,26	0,23	0,38	0,48	0,41	0,21	0,11
1.1	3	0,00	0,06	0,15	0,12	0,13	0,06	0,23	0,10	0,14	0,00	0,13	0,21
1.1x	1	0,26	0,35	0,26	0,19	0,19	0,03	0,00	0,28	0,56	0,29	0,19	0,19
1.1x	2	0,12	0,19	0,13	0,20	0,17	0,20	0,27	0,20	0,38	0,20	0,21	0,20
1.1x	3	0,17	0,13	0,12	0,24	0,16	0,06	0,30	0,11	0,19	0,12	0,22	0,33

Abb. 094. Im Windkanal gemessene maximale Druckdifferenzen zwischen zwei gegenüberliegenden Fenstern eines Raumes für Fall 1.1 (mit Erker) und Fall 1.1x (ohne Erker) in einer dichten und kleinteiligen umgebenden Bebauung

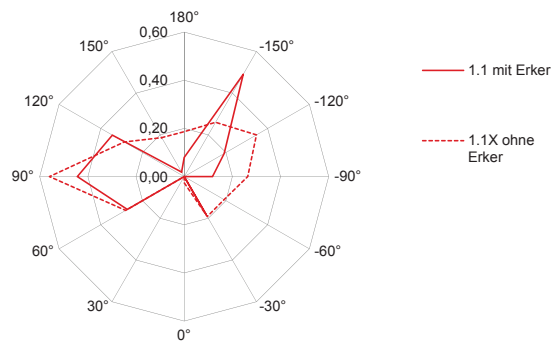


Abb. 095. Grafische Darstellung des Vergleichs zwischen Fall 1.1 (mit Erker) und Fall 1.1x (ohne Erker) der im Windkanal gemessenen maximalen Druckdifferenzen zwischen zwei gegenüberliegenden Fenstern eines Raumes für Raum 1

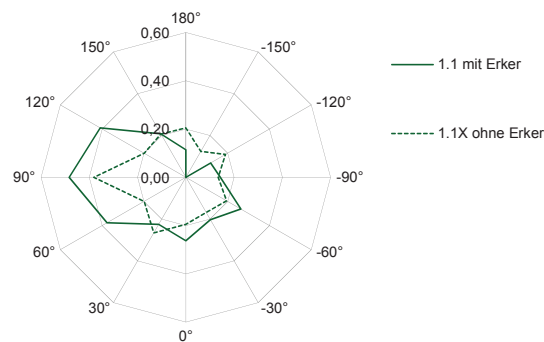


Abb. 096. Grafische Darstellung des Vergleichs zwischen Fall 1.1 (mit Erker) und Fall 1.1x (ohne Erker) der im Windkanal gemessenen maximalen Druckdifferenzen zwischen zwei gegenüberliegenden Fenstern eines Raumes für Raum 2

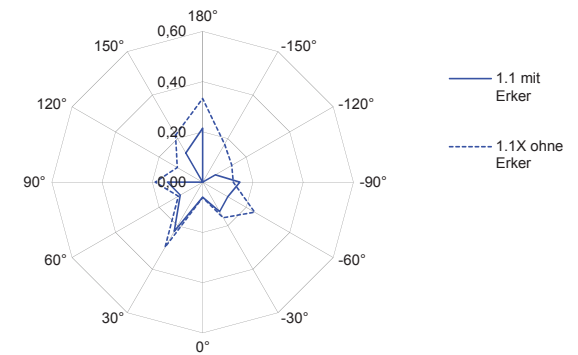


Abb. 097. Grafische Darstellung des Vergleichs zwischen Fall 1.1 (mit Erker) und Fall 1.1x (ohne Erker) der im Windkanal gemessenen maximalen Druckdifferenzen zwischen zwei gegenüberliegenden Fenstern eines Raumes für Raum 3

Im Gegensatz dazu sind bei Windrichtungen um 180° die Druckdifferenzen bei dem Gebäude mit einem Erker geringer als bei dem Vergleichsgebäude. Weitere Forschung könnte erfolgen, um zu bestimmen, ob es auf der Leeseite des Gebäudes Nachwirbel gibt (vgl. Abb. 098 und 099), die durch den Erker gestört werden und so zu einer

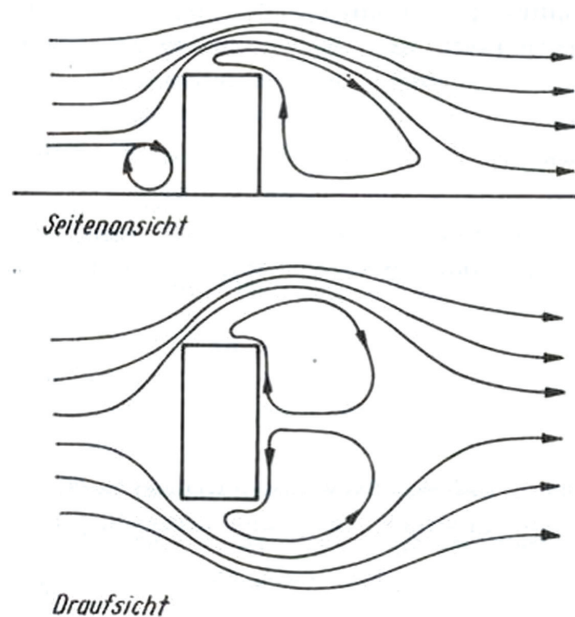


Abb. 098. Typische Strömungen um ein freistehendes rechteckiges Gebäude bei frontaler Anströmung (aus: Dietze, 1987:58)

geringeren Druckdifferenz führen. Nachwirbel hinter einem Objekt können durch bestimmte Kombinationen aus Strömungen und Hindernissen entstehen, und lassen sich im Windkanal durch Aufnahmen mit Hilfe von Rauch und Licht darstellen (Abb. 100). Es ist jedoch sehr wichtig zu beachten, dass diese Strömungen immer ein instabiles Gebilde sind,

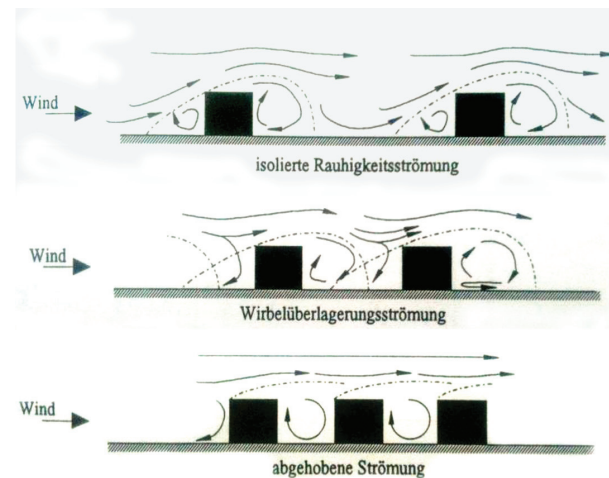


Abb. 099. Typische Strömungen um hintereinander stehende Bauwerke bei unterschiedlichen Abständen (aus: Plate, 1995:15)

welches sich stetig verändert. Die in den Abbildungen gezeigten Luftströmungen und Wirbel werden zwar durch Strömungen um Gebäude erzeugt, sie treten in der Natur jedoch nie so statisch auf, wie es solch eine Skizze suggeriert.

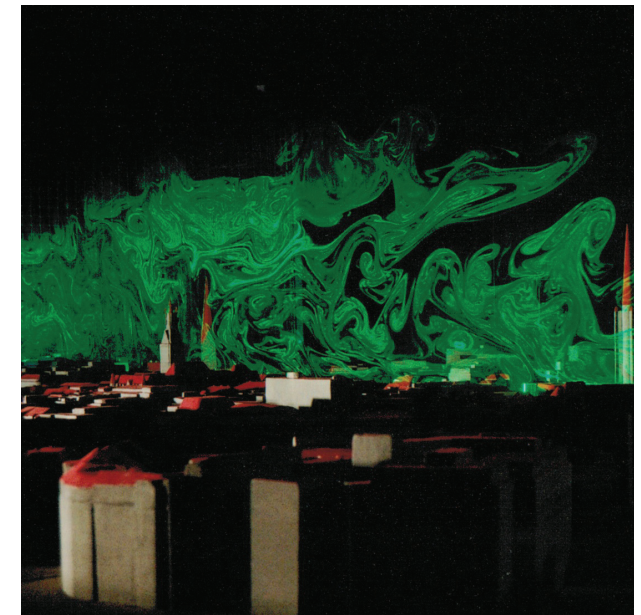


Abb. 100. Beispiel für die Darstellung von Strömungen im städtischen Raum im Windkanal (aus: KlimaCampus, 2011)

◇ Fall 2.2

Die umgebende Bebauung von Fall 2.2 unterscheidet sich von Fall 1.1 durch eine breitere Straße, eine weniger dichte Bebauung und einen freien Platz in der Nähe des Referenzgebäudes. Die weniger dichte Bebauung führt zwar für einige Windrichtungen zu sehr hohen Druckdifferenzen, aber auch zu wesentlich häufigeren Situationen ohne jegliches Lüftungspotential (insgesamt 25% der betrachteten Situationen, dargestellt in Abb. 103 grau hinterlegt).

Da die höheren Druckdifferenzen keinen Mehrwert zur Vermeidung von Überhitzung im Sommer haben, geht daraus kein Vorteil für die natürliche Lüftung hervor. Negativ wirken sich jedoch die Phasen aus, in denen keine Druckdifferenzen, also auch kein Lüftungspotential, bestehen.

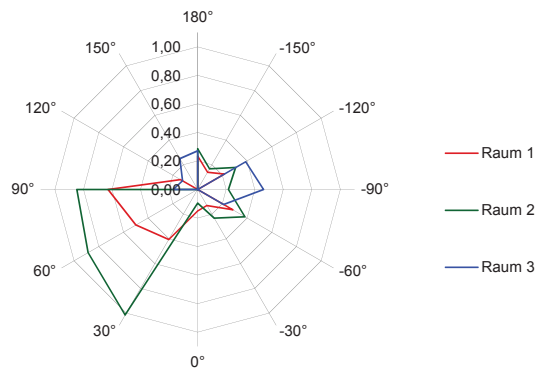


Abb. 101. Grafische Darstellung der im Windkanal gemessenen maximalen Druckdifferenzen zwischen zwei gegenüberliegenden Fenstern eines Raumes für die Räume 1, 2 und 3 im Fall 2.2

		Windrichtung im Windkanal											
Raum		-150°	-120°	-90°	-60°	-30°	0°	30°	60°	90°	120°	150°	180°
Fall 2.2	1	0,14	0,22	0,00	0,28	0,13	0,15	0,41	0,50	0,63	0,14	0,00	0,23
	2	0,17	0,31	0,22	0,38	0,23	0,10	1,02	0,89	0,85	0,00	0,00	0,29
	3	0,00	0,39	0,46	0,21	0,00	0,00	0,00	0,00	0,17	0,12	0,25	0,27

Abb. 102. Im Windkanal gemessene maximale Druckdifferenzen zwischen zwei Fenstern eines Raumes für Fall 2.2 in einer kleinteiligen, etwas weniger dichten umgebenden Bebauung

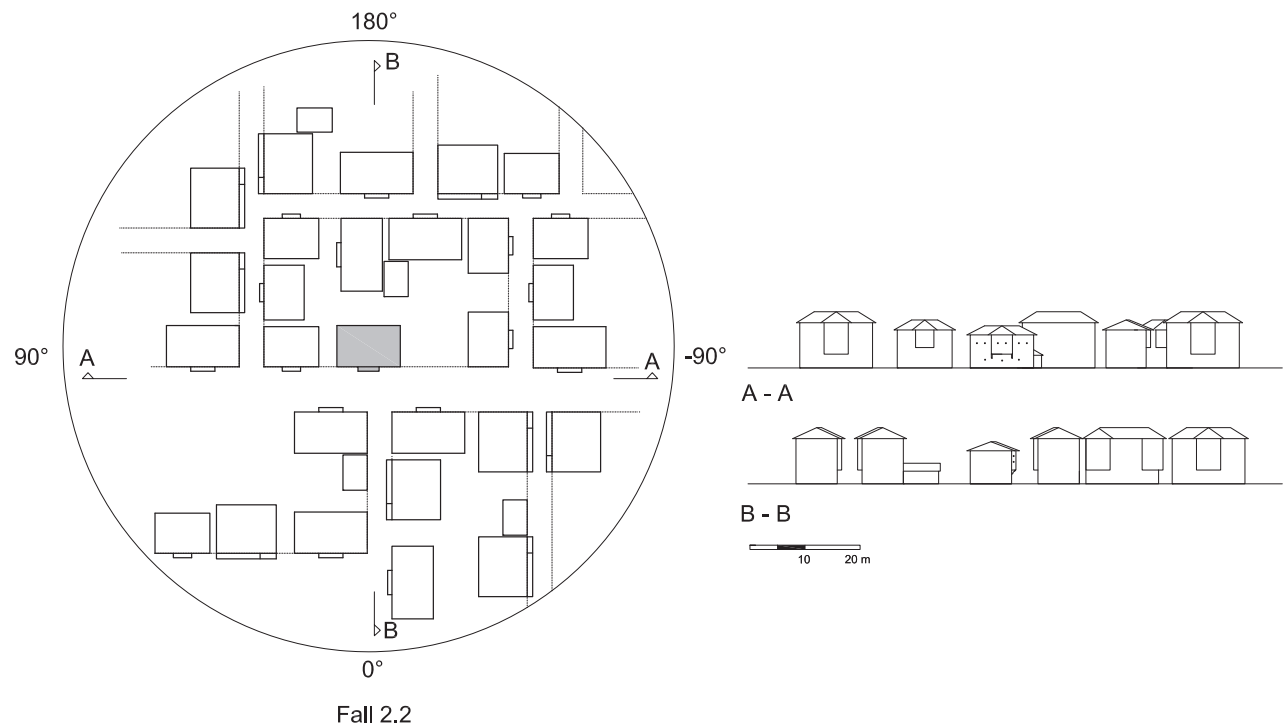


Abb. 103. Referenzgebäude und umgebende Bebauung für Fall 2.2, Aufsicht auf die Drehscheibe im Windkanal, Ansicht A-A und B-B

◇ Fall 3.1 / 3.1x

In Fall 3.1 unterscheidet sich die Umgebung des Referenzgebäudes stark von der ursprünglichen kleinteiligen, homogenen Bebauung. Die in Teilen der Oberstadt in den 1950er bis 1970er Jahren gebauten Appartementhäuser mit größerem Volumen und flachen Dächern, stehen zwischen den kleineren älteren Gebäuden. Die Auswirkungen auf die Durchlüftung der Räume sind groß. Für Fall 3.1 existieren viele Windrichtungen, bei denen kein Lüftungspotential besteht (insgesamt 30%, siehe Abb. 104, grau hinterlegt). Für Fall 3.1x sind es 33%, darunter auch Windrichtungen, bei denen für das gesamte Geschoss keine Druckdifferenzen bestehen. Gleichzeitig steigen jedoch die Druckdifferenzen nicht so stark an, so wie es für Fall 2.2 zu beobachten ist.

Für den mittleren Raum ist zu sehen, dass das Lüftungspotential von Fall 3.1 offenbar stark von dem Erker profitiert. Die gemessenen Werte sind wesentlich höher als im Vergleichsfall 3.1 x, ohne den Erker. Für die Räume 1 und 3 ist zu beobachten, dass sich die Windrichtung, die ein hohes Lüftungspotential darstellt, im Gegensatz zu Fall 1.1 verändert. Sie liegt nun in einem Bereich um 180°. Für ein Gebäude, welches ursprünglich für die homogene kleinteilige Bebauung konzipiert war, bedeutet dies, dass für Windrichtungen, die eigentlich zu einer hohen LWR führten, kein Lüftungspotential mehr vorhanden ist. Dagegen besteht ein erhöhtes Potential für die Windrichtungen, die ursprünglich nur zu geringen LWR führten.

Fall	Raum	Windrichtung im Windkanal											
		-150°	-120°	-90°	-60°	-30°	0°	30°	60°	90°	120°	150°	180°
3.1	1	0,18	0,21	0,10	0,00	0,00	0,25	0,07	0,30	0,00	0,00	0,29	0,26
	2	0,27	0,64	0,21	0,29	0,38	0,31	0,39	0,48	0,37	0,00	0,28	0,23
	3	0,14	0,56	0,00	0,00	0,00	0,27	0,00	0,00	0,17	0,00	0,33	0,21
3.1x	1	0,25	0,34	0,18	0,00	0,00	0,33	0,00	0,22	0,28	0,00	0,39	0,35
	2	0,22	0,33	0,27	0,00	0,00	0,40	0,00	0,24	0,00	0,00	0,39	0,22
	3	0,07	0,41	0,00	0,00	0,00	0,28	0,00	0,23	0,13	0,18	0,37	0,30

Abb. 104. Im Windkanal gemessene maximale Druckdifferenzen zwischen zwei gegenüberliegenden Fenstern eines Raumes für Fall 3.1 (mit Erker) und 3.1x (ohne Erker) in einer weniger dichten und heterogenen umgebenden Bebauung

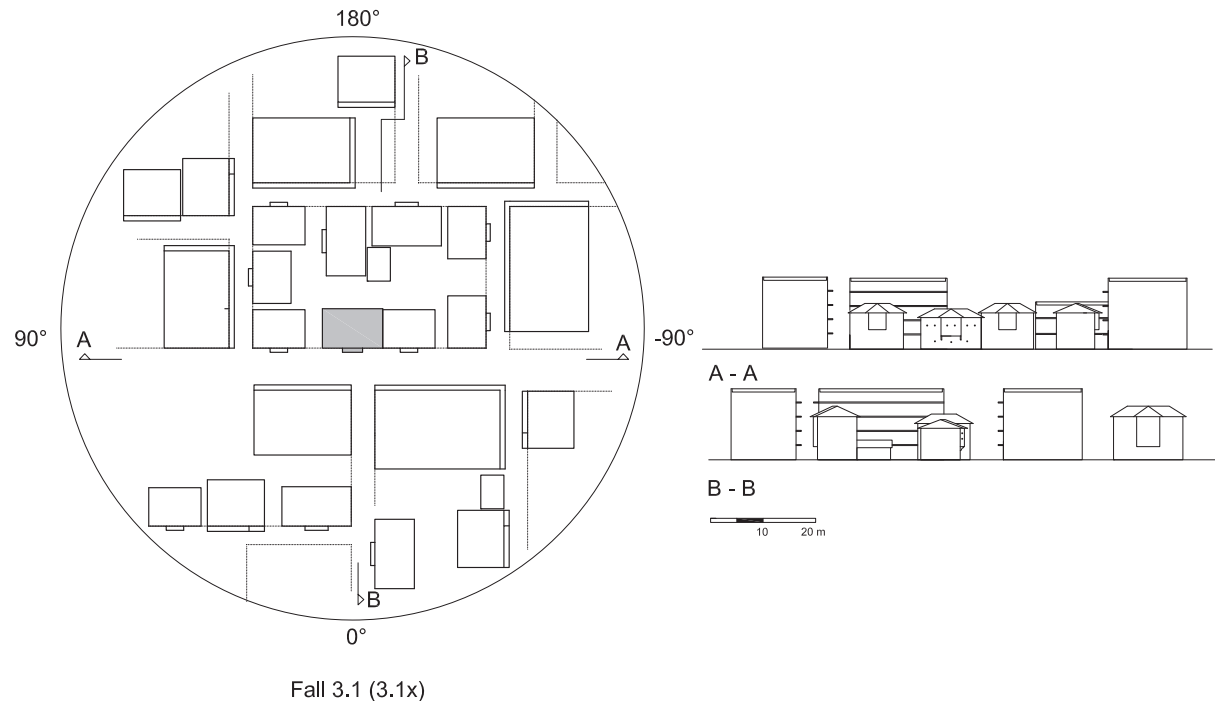


Abb. 105. Referenzgebäude und umgebende Bebauung für Messung 3.1, Aufsicht auf die Drehscheibe im Windkanal, Ansichten A-A und B-B



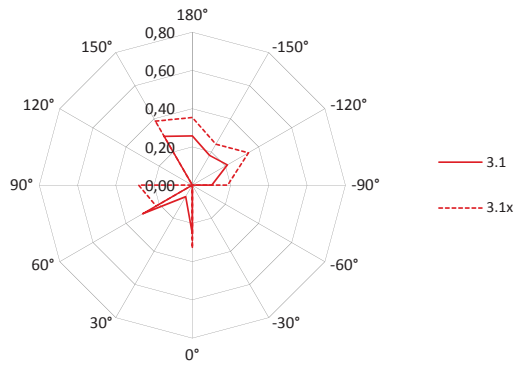


Abb. 106. Grafische Darstellung des Vergleichs zwischen Fall 3.1 (mit Erker) und Fall 3.1x (ohne Erker) der im Windkanal gemessenen maximalen Druckdifferenzen zwischen zwei gegenüberliegenden Fenstern eines Raumes für Raum 1

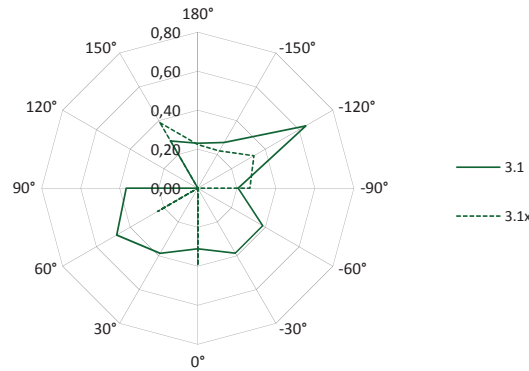


Abb. 107. Grafische Darstellung des Vergleichs zwischen Fall 3.1 (mit Erker) und Fall 3.1x (ohne Erker) der im Windkanal gemessenen maximalen Druckdifferenzen zwischen zwei gegenüberliegenden Fenstern eines Raumes für Raum 2

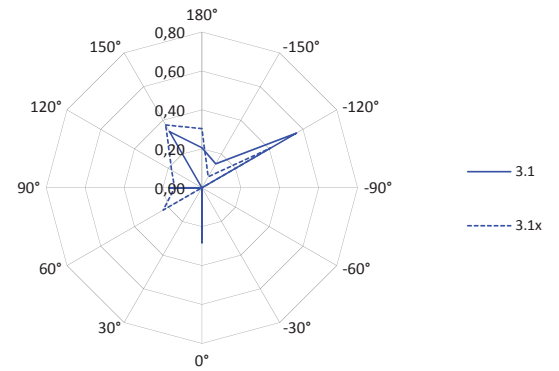


Abb. 108. Grafische Darstellung des Vergleichs zwischen Fall 3.1 (mit Erker) und Fall 3.1x (ohne Erker) der im Windkanal gemessenen maximalen Druckdifferenzen zwischen zwei gegenüberliegenden Fenstern eines Raumes für Raum 3

#### ◇ Fall 3.2

Die Messungen von Fall 3.2 unterscheiden sich von Fall 3.1 dadurch, dass das direkt an das Referenzgebäude angrenzende Gebäude nicht vorhanden ist. Dies führt jedoch nicht zu einem höheren Lüftungspotential, sondern verursacht weitere Fälle, in denen keine Druckdifferenzen bestehen, obwohl für Raum 3 sogar ein weiteres Fenster zur Lüftung zu Verfügung steht. In Fall 3.2 besteht daher in fast 50% der angenommenen Fälle kein Potential für eine natürliche Lüftung (siehe Abb. 109, grau hinterlegt).

Fall	Raum	Windrichtung im Windkanal											
		-150°	-120°	-90°	-60°	-30°	0°	30°	60°	90°	120°	150°	180°
3.2	1	0,00	0,25	0,14	0,00	0,00	0,24	0,26	0,44	0,00	0,00	0,00	0,00
	2	0,16	0,45	0,22	0,42	0,00	0,28	0,43	<b>0,63</b>	0,33	0,00	0,00	0,38
	3	0,20	0,00	0,00	0,00	0,00	0,25	0,00	0,27	0,11	0,00	0,00	0,32

Abb. 109. Im Windkanal gemessene maximale Druckdifferenzen zwischen zwei Fenstern eines Raumes für Fall 3.2 in einer weniger dichten, heterogenen umgebenden Bebauung

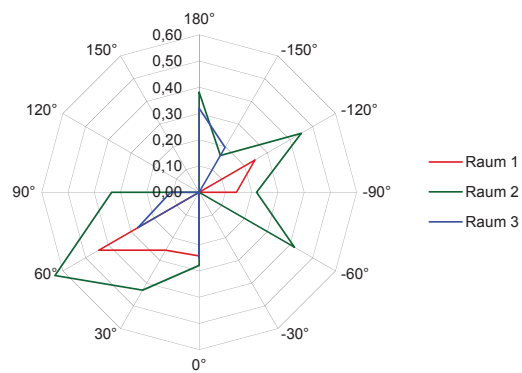


Abb. 111. Grafische Darstellung der im Windkanal gemessenen maximalen Druckdifferenzen zwischen zwei gegenüberliegenden Fenstern eines Raumes für die Räume 1, 2 und 3 im Fall 3.2

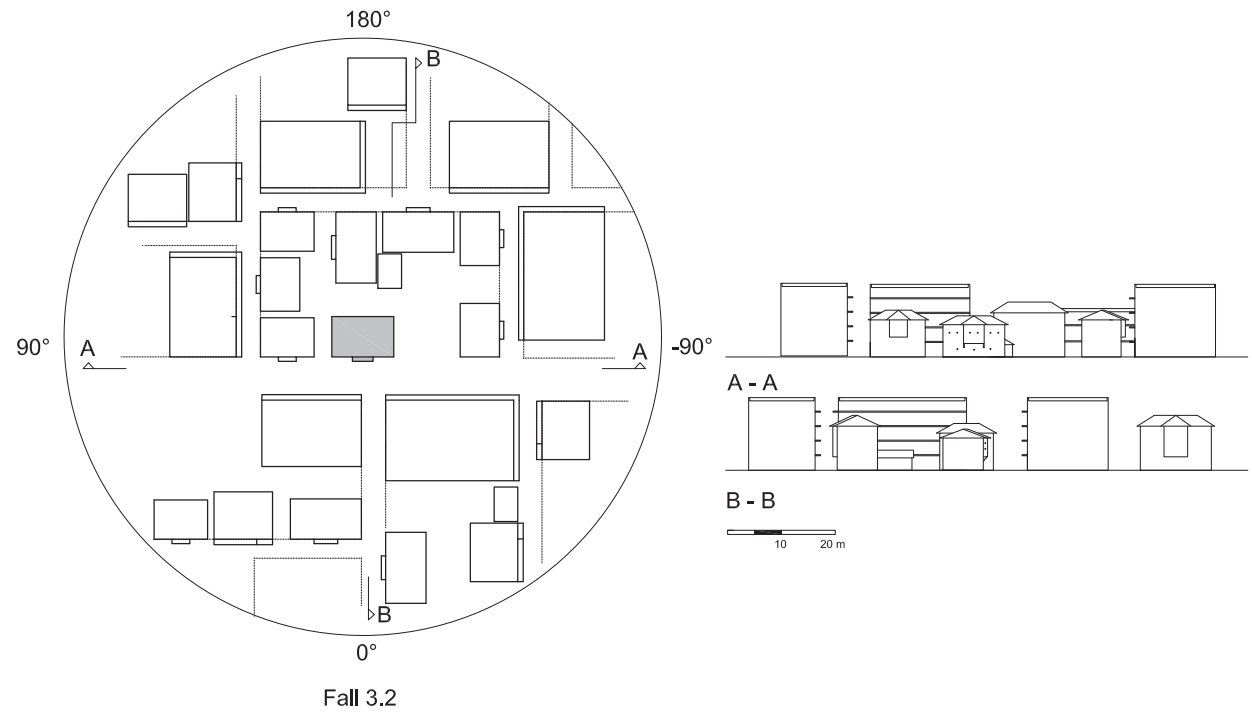


Abb. 110. Referenzgebäude und umgebende Bebauung für Messung 3.2, Aufsicht auf die Drehscheibe im Windkanal, Ansichten A-A und B-B

## 5.1.10 Natürliche Lüftung – Ergebnisse

### 1. Ergebnis: Gebäudesimulationen

Die Ergebnisse der Gebäudesimulationen mit unterschiedlichen LWR konnten zeigen, dass auf Grundlage der Kriterien der DIN 15251:2007-08 bei entsprechend hoher natürlicher Lüftung im Obergeschoss des Referenzgebäudes, ein hoher Anteil zufriedener Nutzerinnen erwartet werden kann. Da in der Norm eine Überschreitung der Temperaturen in 5% der Nutzungszeit als akzeptabel bewertet wird, ist nach diesen Kriterien die natürliche Lüftung der Räume für den sommerlichen Wärmeschutz ausreichend und die Nutzung einer Klimaanlage nicht notwendig.

### 2. Ergebnis: Vergleich von Ergebnissen aus der Berechnung mit Tabellenwerten im Gegensatz zur Berechnung mit gemessenen Werten

Sowohl die Berechnung des Lüftungspotentials nach den Tabellenwerten des BS 5925-1991 unter Berücksichtigung der Wahrscheinlichkeit geöffneter Fenster (Humphreys Algorithmus), als auch die Berechnung unter Einbeziehung der Messungen im Windkanal führten zu dem Ergebnis, dass die Räume des Referenzgebäudes durch Querlüftung ein hohes Lüftungspotential haben. Beide Vorgehensweisen zeigen eine vergleichbare Bandbreite von LWR bis zu 40/h. Die Ergebnisse der Berechnung nach dem BS 5925-1991 für eine Vorstadtbebauung liegen im gleichen Bereich, wie die Messergebnisse für die dichte homogene Bebauung.

Aus dem zweiten Verfahren konnten deutlich detailliertere Ergebnisse je nach betrachteter Umgebung, Windrichtung und je nach Raum im Gebäude abgeleitet werden. Diese Erkenntnisse waren hilfreich für die Ableitung von Konzepten für das untersuchte Beispiel. Sie lassen sich jedoch nicht auf andere Fälle übertragen. Die Berechnung nach Tabellenwerten lässt sich auf andere Fälle anwenden, die Ergebnisse sind jedoch sehr viel weniger detailliert. Die für Fall 3.2 dargestellten Verhältnisse, in denen für viele Windrichtungen gar keine Druckdifferenzen bestehen, werden in dem Rechenmodell in keiner Weise abgebildet. Ebenso die Ergebnisse darüber, welcher der drei betrachteten Räume bei einer bestimmten Windrichtung welches Lüftungspotential hat, kann durch die rein rechnerische Ermittlung nicht ermittelt werden.

### 3. Ergebnis: Einfluss der umgebenden Bebauung

Eine kleinteilige Bebauung etwa gleicher Höhe scheint insgesamt für das Lüftungspotential der Räume wesentlich günstiger zu sein als eine heterogene Bebauung, in der sich Bereiche mit größeren Windgeschwindigkeiten bilden, aber ebenso Bereiche mit sehr geringen Luftbewegungen. Da die hohen Druckdifferenzen nicht zu einem besseren sommerlichen Wärmeschutz führen - denn solch hohe LWR haben keinen Mehrwert für die passive Kühlung - verringern sie nur den Komfort für die Nutzerinnen durch unangenehme Zugerscheinungen innerhalb und auch außerhalb des Gebäudes. In der homogenen Bebauung scheinen

sich die Strömungen gleichmäßiger zu verteilen. Dieses Ergebnis lässt sich durch Berechnungen mit Tabellenwerten, die nur danach unterscheiden können, wie stark die durch die Bodenrauigkeiten hervorgerufenen Turbulenzen üblicherweise bei einer Vorstadt im Vergleich zur Innenstadt oder einem freien Feld ausfallen, nicht abbilden.

### 4. Ergebnis: Erker

Die Erker, die in den Straßenraum ragen, stellen für die Durchlüftung des mittleren Raumes einen Vorteil dar. Der Vergleich, der für die Fälle 1.1 und 3.1 im Windkanal gemessen wurde konnte zeigen, dass für den mittleren Raum durch den in den Straßenraum auskragenden Erker ein erhöhtes Lüftungspotential besteht. Vor allem bei Windrichtungen parallel zur Straße, in die der Erker ragt, liegt das Lüftungspotential deutlich höher als in dem Vergleichsgebäude ohne diesen Gebäudevorsprung.

### 5. Ergebnis: Orientierung des Gebäudes

Aus den Messungen konnte nicht nur abgeleitet werden, dass für eine natürliche Lüftung der Räume ausreichende Druckdifferenzen bestehen, sondern es konnten Rückschlüsse auf eine günstige Orientierung geschlossen werden. Da es innerhalb der dichten homogenen Bebauung (Fall 1.1) Windrichtungen gibt, die hohe bzw. niedrige Druckdifferenzen erzeugen, konnte eine besonders günstige Orientierung der Gebäude in Bezug auf die am Standort herrschenden Windbedingungen abgeleitet werden.

Das Lüftungspotential der Räume im Obergeschoss des Referenzgebäudes wird besonders gut ausgenutzt, wenn der im Sommer tagsüber häufige Wind aus westlichen Richtungen und der abends häufige aus südlichen Richtungen ausgenutzt wird. Die nächtlichen schwachen östlichen Winde können ebenfalls, jedoch geringer, zur Lüftung beitragen. In Abb. 112 ist eine optimale Ausrichtung des Referenzgebäudes zur Ausnutzung des Lüftungspotentials dargestellt.

Die genauere Betrachtung unter Berücksichtigung der Ergebnisse der Messungen im Windkanal zeigte zusätzlich, dass bei genau dieser Orientierung bei nördlichen Winden ein geringeres Lüftungspotential besteht. Dies wirkt sich auf den Heizenergiebedarf des Gebäudes positiv aus, da das Gebäude gegen nördliche Winde, welche im Winter stark und kalt sein können, abgeschirmt sein sollte.

Dieses Ergebnis beruht auf den Auswertungen des Experiments im Windkanal. Es berücksichtigt die umgebende Bebauung des Standortes und konnte durch eine Berechnung mit Tabellenwerten nicht ermittelt werden. Diese Berechnungen lieferten im Gegensatz zu den Messergebnissen Hinweise darauf, dass genau die in Abb. 113 dargestellte Orientierung des Gebäudes zu einer geringeren LWR führt (siehe Abschnitt 5.1.6). Ob die traditionelle Bebauung diese Orientierung tatsächlich ausnutzt, wird im folgenden Abschnitt *Orientierung der Gebäude* beschrieben.

Die Orientierung von Gebäuden nach vorherrschenden Windrichtungen ist für andere Orte in Nordgriechenland bereits beschrieben worden (Oikonomou 2009:6). In Florina sind fast alle Wohngebäude - einer Variante des osmanischen Hauses - so orientiert, dass die Öffnungen vor allem an den

Süd- und Ostfassaden liegen, und die Nordseite eine repräsentative Fassade zur Straße darstellt. Auch in Mt. Verno, in der gleichen Region, finden sich ähnliche Gebäude sehr stark nach Himmelsrichtung und vorherrschenden Winden ausgerichtet.



Abb. 112. Günstige Orientierung des Referenzgebäudes in der traditionellen Bebauung (Messung Fall 1.1) zur Ausnutzung des Windes für die natürliche Lüftung



## 5.2 Orientierung der Gebäude

Einen großen Einfluss auf die Temperaturen im Gebäude hat sowohl im Sommer als auch im Winter die Orientierung der Fassadenöffnungen nach der Himmelsrichtung. Im Sommer kann solare Einstrahlung zu einer Überhitzung der Räume führen, im Winter jedoch unterstützen solare Gewinne deren Erwärmung. In diesem Abschnitt wird zunächst der Einfluss der Orientierung der Gebäude auf den Heizwärmebedarf im Winter betrachtet. Dabei ergaben sich große Unterschiede zwischen dem Erdgeschoss und dem oberen Geschoss.

Die einfachste Möglichkeit, solare Gewinne im Winter gezielt auszunutzen, ist die gezielte Positionierung von massiven Bauteilen, welche ungehindert durch die Fassadenöffnungen von der Sonne beschienen werden können. Diese Bauteile heizen sich den Tag über auf und geben die gespeicherte Wärme im Laufe der Nacht an den Raum ab. Eine moderne Variante dieser Solar-speicherung ist die in den 1950er Jahren entwickelte Trombewand. Hinter einer einfachen Glasscheibe befindet sich eine dunkle, massive Speicherwand. Durch Lüftungsöffnungen am Boden und an der Decke kann die warme Luft aus dem Spalt zwischen Wand und Scheibe gezielt in den Raum geleitet werden. Diese Technik war in der Antike zwar noch nicht bekannt, doch die Menschen machten sich, wie bereits im ersten Kapitel dieser Arbeit erwähnt, den unterschiedlichen Sonnenstand je nach Jahreszeit sehr gezielt zu Nutzen.

### 5.2.1 Solararchitektur in der Antike

Ein Beispiel für die Solararchitektur in der griechischen Antike ist die Nordstadt von Olynthos, um 400 v. Chr. geplant und auf einem nach Süden abfallenden Hang erbaut. Sie war wie viele Städte aus der Periode eine Planstadt. Die Grundstücke waren quadratisch, hatten mit einer Kantenlänge von etwa 17 m geringe Unterschiede in ihrer Fläche und waren gleichwertig nach Süden orientiert, so dass jedes Haus von einer günstigen Ausrichtung zur

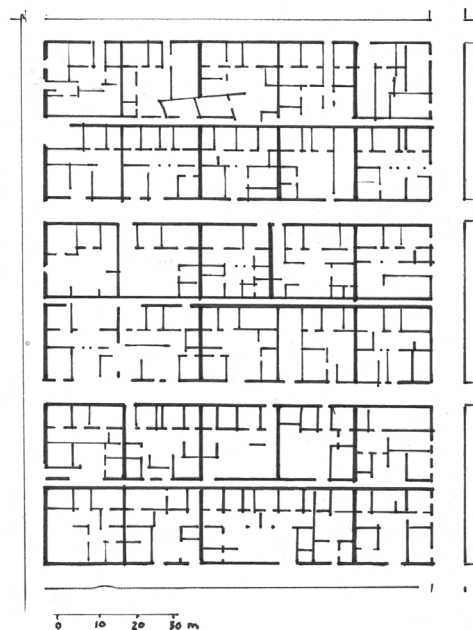


Abb. 113. Stadtplan der Nordstadt von Olynthos, genordet (eigene Zeichnung nach: Butti. 1980:6)

Sonne profitierte (Abb. 113). Ein weiteres Beispiel einer solchen Planstadt ist Priene. Auch hier waren die Grundstücke etwa gleich groß und die Gebäude aller Gesellschaftsschichten erstaunlich ähnlich. Es bestanden daher für alle die gleichen Rechte in Bezug auf solare Gewinne, Verschattung, Lüftung und Schutz vor kalten Winden im Winter (Behling et al. 1996:86–87).

Ein typisches Wohnhaus in Priene wird in Abb. 114 dargestellt. Es ist dem Aufbau der Häuser in Olynthos sehr ähnlich. Die nach Norden gelegene Fassade des meist zweigeschossigen Wohntrakts war geschlossen, um die kalten Winde im Winter abzuhalten, und hatte ca. 45 cm dicke Wände aus

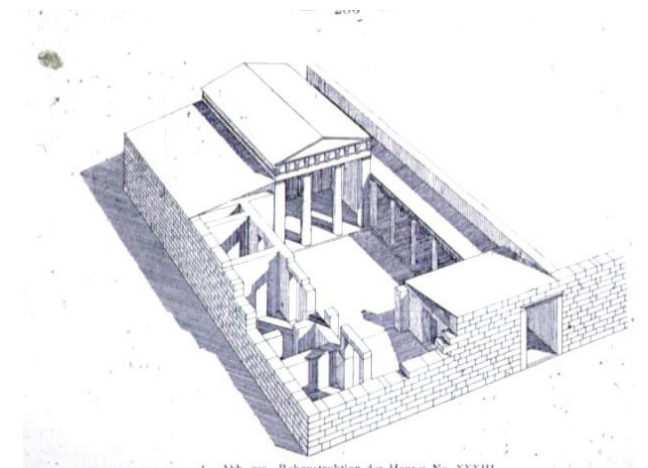


Abb. 114. Klassisches griechisches Haus, Rekonstruktion nach Ausgrabungen in Priene mit einem Innenhof und Säulenportikus (aus: Rumscheid. 1998, Abb. 130)

Lehmziegeln. Von einem offenen Säulenportikus der südlichen Fassade zum Innenhof hin, wurden die angrenzenden Räume erschlossen. Es gab keine Räume, die durch Glasflächen nach außen geschlossen waren, denn durchsichtige Scheiben konnten in der Antike noch nicht hergestellt werden. Die Ost- und Westseite des Innenhofes bildeten eingeschossige Seitenflügel, zur Straße hin befand sich eine eingeschossige Mauer mit einem Eingangsportal.

Im Winter schien die Sonne durch den Portikus in die Wohnräume und heizte den Boden und die massiven Wände auf. In den Ausgrabungen fanden sich Hinweise auf eine niedrige Mauer aus Lehmziegeln zwischen den Säulen, welche verhindert haben mag, dass kalte Luft von außen in das Haus strömte. Hatte ein Gebäude ein Obergeschoss, wurde dieses so gebaut, dass in beiden Stockwerken die Wintersonne in die Räume schien. Dies wurde erreicht, indem nur der nördliche Teil des Hauses ein oberes Stockwerk erhielt. Im Sommer boten der Portikus, weite Dachüberstände und die östlich und westlich angrenzenden Häuser Schatten (vgl. Butti, 1980:5ff; DETAIL, 2011).

Weitere Informationen zur klimaangepassten Bauweise in der Antike finden sich in Vitruvs „Zehn Bücher über Architektur“. Im sechsten Buch, 1. Kapitel wird die Anlage von Gebäuden, abhängig von den natürlichen Verhältnissen der Gegenden und dem Sonnenverlauf am jeweiligen Ort beschrieben. Im Norden sollten die Gebäude geschlossen

und nicht freistehend gebaut sein, jedoch der warmen Himmelsrichtung zugewendet. In südlichen Gegenden hingegen sollten sie offener gegen Norden und Nordost gerichtet werden (Vitruvius, 2009:279ff).

Im vierten Kapitel wird von Vitruv die Verteilung der Räume in einem Gebäude, abhängig von der Himmelsrichtung behandelt. Dabei bezieht er sich sowohl auf die solaren Einträge und die Belichtung der Räume, als auch die Ausrichtung nach Windrichtungen, welche im ersten Buch, sechstes Kapitel näher erläutert werden. Die Nutzung der Räume ändert sich je nach Jahreszeit.

Winter-Speisesäle und Badegemächer sollen zwecks guter Belichtung und für solare Gewinne am Abend nach West-Süd-West liegen. Schlafzimmer und Bibliotheken sollen nach Osten liegen, denn dort wird Licht am Morgen benötigt. Außerdem ist hier ein gutes Klima für Bücher (im Gegensatz zu Räumen nach Süden und Westen, weil lt. Vitruv aus dieser Richtung feuchte Winde kommen und Schimmel verursachen). Frühlings- und Herbstspeisezimmer sollen ebenfalls nach Osten liegen, denn diese Räume sind dann angenehm warm, wenn sie genutzt werden. Sommerspeisesäle, Gemaldesäle, Webereien und Werkstätten der Maler sollen nach Norden orientiert sein. So wird es im Inneren nicht schwül und bleibt angenehm kühl. Außerdem gibt es dadurch ein gleichbleibendes Licht zum Arbeiten (Vitruvius 2009:299ff).

Die Häuser im Untersuchungsgebiet weisen große Unterschiede zu diesen Prinzipien der Antike auf. Vor allem der Städtebau unterscheidet sich wesentlich von der Planstadt der griechischen Antike. Dennoch liegt ein Vergleich mit Olynthos nahe und sollte daher nicht übergangen werden, da diese Stadt nur etwa 60 km südöstlich von Thessaloniki am Golf von Thermaikos lag, also denselben klimatischen Bedingungen ausgesetzt war. Auch liegt die Oberstadt von Thessaloniki ebenfalls auf einem nach Süden abfallenden Hang. Die Bauweise des makedonischen Hauses ist zwar sehr unterschiedlich von der im antiken Olynthos, doch die Orientierung der Gebäude mit der geöffneten Fassade nach Süden wurde auch in Thessaloniki angewendet (siehe Abb. 114).

Die Häuser in Thessaloniki sind im Unterschied zu denen aus Olynthos jedoch im Erdgeschoss nach außen stark geschlossen und haben nur im Obergeschoss große Öffnungen, um die solare Einstrahlung im Winter zu nutzen. Diese Unterschiede haben vielfältige Ursachen, von denen eine die Verfügbarkeit von Fensterglas sein mag. In den Häusern der Antike können die solaren Gewinne in den Räumen im Winter höchstens eine Erhöhung der Temperaturen um wenige Grad Celsius bewirkt haben. Die Häuser in Thessaloniki hingegen haben im Erdgeschoss kleine, verglaste Öffnungen zur Belichtung der Räume. Im Obergeschoss ist der Fensterflächenanteil wesentlich größer und nach Himmelsrichtung orientiert. Die Fassaden sind vor

allem nach Süden hin geöffnet (siehe Abb. 115) und nutzen dadurch die Vorteile in Bezug auf den Sonnenstand aus. Diese Orientierung der Gebäude entspricht zusätzlich der optimalen Ausrichtung, die durch die Untersuchungen zur natürlichen Lüftung bestimmt wurde.

### 5.2.2 Solare Gewinne im Erdgeschoss des Referenzgebäudes im Winter

Computersimulationen ermöglichten eine genaue Betrachtung der Unterschiede der solaren Gewinne, die sich bei unterschiedlichem Anteil der Fensterflächen an der Fassade des betrachteten Referenzgebäudes ergaben. Dadurch konnten Erkenntnisse darüber gewonnen werden, ob die Bauweise der makedonischen Häuser von der Orientierung der Straßenfassade nach Süden profitiert und solare Gewinne zum Heizen der Räume ausnutzt.

Simuliert wurde zunächst der Raum im Erdgeschoss des Referenzgebäudes. Für die Außenwände wurde der übliche Aufbau mit 70 cm Natursteinmauerwerk und 2,5 cm Innenputz angenommen. Der Boden und die Decke bestehen aus Balkenlagen mit Dielen und einer unterseitigen Verkleidung der Decke.



Abb. 115. Historische Aufnahme der Oberstadt Thessalonikis um 1900, die Häuser sind in südliche Richtungen Süden orientiert (zum besseren Verständnis: die Fassade des Gebäudes im Vordergrund zeigt etwa nach SSW) (aus: Moutsopoulos, 1979)

Variante	Raum im Erdgeschoss, 58,49 m <sup>2</sup> Fläche, auf 20°C geheizt in traditioneller Bauweise, ( $n_{50}$ 10/h daraus resultierender Luftwechsel durch Infiltration 0,7/h), 4 Fenster nach Süden	Fensterflächenanteil Südfassade	kWh/a	kWh/m <sup>2</sup> a
A1	Fenster je 0,25 m <sup>2</sup> = 1 m <sup>2</sup> EV $U_w = 4,4 \text{ W/m}^2 \text{ K}$	3,6%	16066	277
A2	Fenster je 0,25 m <sup>2</sup> = 1 m <sup>2</sup> EV $U_w = 4,4 \text{ W/m}^2 \text{ K}$ , <u>Boden mit 5 cm Estrich</u>		16066	277
B1	Fenster je 1 m <sup>2</sup> = 4 m <sup>2</sup> EV $U_w = 4,4 \text{ W/m}^2 \text{ K}$	14,3 %	15679	270
C1	Fenster je 2 m <sup>2</sup> = 8 m <sup>2</sup> EV $U_w = 4,4 \text{ W/m}^2 \text{ K}$	42,9 %	15925	275

Abb. 116. Heizwärmebedarf für das Erdgeschoss des Referenzgebäudes für unterschiedliche Anteile an transparenter Fläche der Fassade mit Einfachverglasung

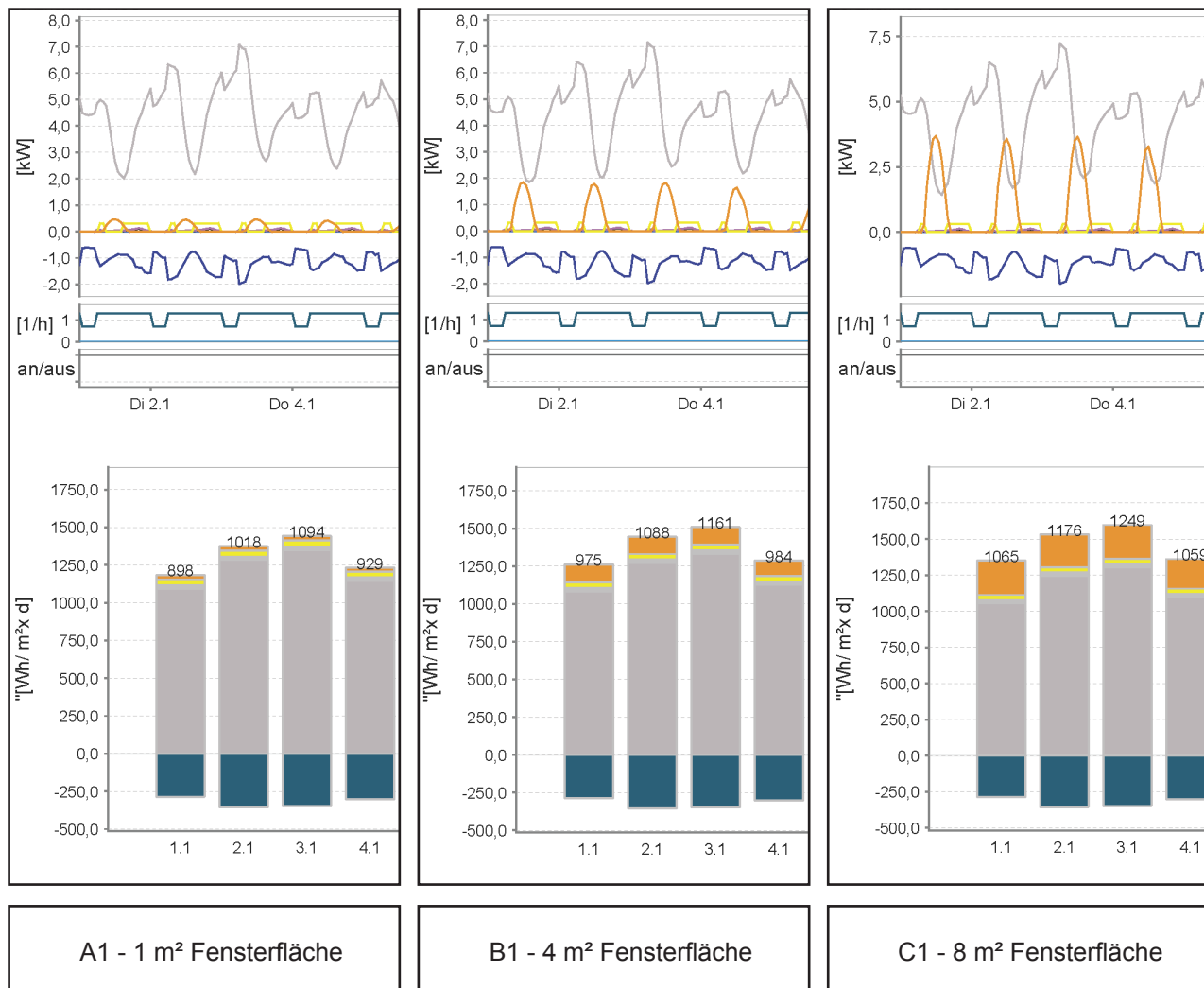


Abb. 117. Energiebilanz beim Vergleich unterschiedlicher Anteile transparenter Fläche an der Fassade, Referenzgebäude Erdgeschoss, Fenster mit Einfachverglasung  $U_w = 4,4 \text{ W/m}^2\text{K}$

Rahmenbedingungen der Simulationen:

Die untersuchte Fassade ist mit der Straßenseite nach Süden orientiert und hat keine Verschattungselemente der transparenten Flächen. Es ist keine umgebende Bebauung berücksichtigt. Der Raum hat  $58,5 \text{ m}^2$  Fläche auf  $20^\circ\text{C}$  geheizt, die Sonnenstrahlen fallen am kürzesten Tag im Jahr (9h 20 min) um 12:00 Uhr Mittags in einem Winkel von  $25^\circ$  ein.

Werden durch größere Fensterflächen höhere solare Gewinne ermöglicht, verändert sich der Heizwärmebedarf nicht signifikant. Die Verluste durch die dünnen Scheiben sind offenbar etwa proportional zu den solaren Gewinnen (Abb. 116, A1, B1, C1). Der Einsatz von Estrich auf dem Holzfußboden als Masse, die prinzipiell die solaren Gewinne speichert, zeigt für Variante A2 mit dem traditionell geringen Fensterflächenanteil an der Fassade des Erdgeschosses keinen Effekt.

In Abb. 117 ist in der Energiebilanz ersichtlich, dass die solaren Gewinne durch einen größeren Fensterflächenanteil zwar zunehmen, die zusätzlich benötigte Energie, um den Raum auf  $20^\circ\text{C}$  zu heizen, dennoch nicht sinkt. Die größere Fläche mit EV verursacht offenbar zu große Verluste, denn die Strahlung der Sonne gelangt zwar nahezu ungehindert in den Raum, die Wärmestrahlung aber auch wieder hinaus. Zur besseren Vergleichbarkeit der Ergebnisse wurde nicht berücksichtigt, ob eine umgebende Bebauung die Fassaden verschattet. Fallen die solaren Gewinne dadurch geringer aus, wird sich dies in Bezug auf den Heizwärmebedarf zugunsten der kleineren Fensterflächen auswirken.



### 5.2.3 Einfluss unterschiedlicher Verglasung und Baumaterialien

Wie verhält es sich mit dem Heizwärmebedarf, wenn die Einfachverglasungen (EV) in dem betrachteten Raum durch Wärmeschutzverglasung (WSV) oder Sonnenschutzverglasung (SSV) ersetzt werden? Dies ist hier zum Vergleich ebenfalls simuliert worden, obwohl es kein Konzept ist, welches aus der traditionellen Bauweise abgeleitet werden kann. Da jedoch das Ziel der Untersuchungen war, gefundene Konzepte auf ihre Übertragbarkeit in die heutige Zeit zu prüfen, wurde es in diesem Zusammenhang als unerlässlich erachtet, die Auswirkungen aktuell verwendeter Verglasungen auf die solaren Gewinne ebenfalls zu simulieren.

In Abb. 118 wird anhand von Variante B gezeigt, dass eine WSV auf den Heizwärmebedarf kaum Auswirkungen hat. Die Verglasung hat zwar bessere Dämmeigenschaften, diese Vorteile werden jedoch durch die geringeren solaren Gewinne der WSV kompensiert. Noch deutlicher ist dieser Effekt bei einer Sonnenschutzverglasung zu sehen.

In Variante D wurden bei gleicher Kubatur, jedoch mit gedämmter und luftdichter Hülle, unterschiedliche Verglasungen bei einem Fensterflächenanteil an der Südfassade von 42,9 % verglichen (Abb. 119). Auch für diese Variante hat die WSV auf den Heizwärmebedarf keine Auswirkungen, die besseren Dämmeigenschaften werden ebenfalls durch die geringeren

Variante	Raum im Erdgeschoss, 58,49 m <sup>2</sup> Fläche, auf 20°C geheizt in traditioneller Bauweise, (n <sub>50</sub> 10/h daraus resultierender Luftwechsel durch Infiltration 0,7/h), 4 Fenster nach Süden	Fensterflächenanteil	Heizwärmebedarf	
			kWh/a	kWh/m <sup>2</sup> a
B1	je 1 m <sup>2</sup> = 4 m <sup>2</sup> <u>EV</u> g = 0,85 U <sub>w</sub> = 4,4 W/m <sup>2</sup> K		15679	270
B2	je 1 m <sup>2</sup> = 4 m <sup>2</sup> mit 2-Scheiben <u>WSV</u> g = 0,6 U <sub>w</sub> = 1,2 W/m <sup>2</sup> K	14,3 %	15818	273
B3	je 1 m <sup>2</sup> = 4 m <sup>2</sup> mit 2-Scheiben <u>SSV</u> g = 0,4 U <sub>w</sub> = 1,2 W/m <sup>2</sup> K		15938	275

Abb. 118. Heizwärmebedarf für das Erdgeschoss des Referenzgebäudes, Variante B, je nach Verglasung

Variante	Raum im Erdgeschoss, 58,49 m <sup>2</sup> Fläche, auf 20°C geheizt mit gedämmter und luftdichter Hülle (n <sub>50</sub> 1/h daraus resultierender Luftwechsel durch Infiltration 0,07/h), 4 Fenster nach Süden	Fensterflächenanteil Südfassade	Heizwärmebedarf	
			kWh/a	kWh/m <sup>2</sup> a
D1	je 2 m <sup>2</sup> = 8 m <sup>2</sup> <u>EV</u> g = 0,85 U <sub>w</sub> = 4,4 W/m <sup>2</sup> K		5069	87
D2	je 2 m <sup>2</sup> = 8 m <sup>2</sup> <u>WSV</u> g = 0,6 U <sub>w</sub> = 1,2 W/m <sup>2</sup> K	42,9 %	5003	86
D3	je 2 m <sup>2</sup> = 8 m <sup>2</sup> <u>SSV</u> g = 0,4 U <sub>w</sub> = 1,2 W/m <sup>2</sup> K		5527	95

Abb. 119. Heizwärmebedarf für das Erdgeschoss des Referenzgebäudes, Variante D, je nach Verglasung

solaren Gewinne kompensiert. Eine SSV wirkt sich sogar negativ auf den Heizwärmebedarf aus, da die solaren Gewinne deutlich eingeschränkt werden. Bei einer EV (siehe Abb. 120) können durch die großen Fensterflächen im Vergleich zu den anderen Verglasungen hohe solare Gewinne erzielt werden.

Der Exkurs über die Verwendung unterschiedlicher Verglasung konnte zeigen, dass im Vergleich von EV, WSV und SSV der Raum mit einer EV erstaunlicherweise den geringsten Energieverbrauch aufweist.

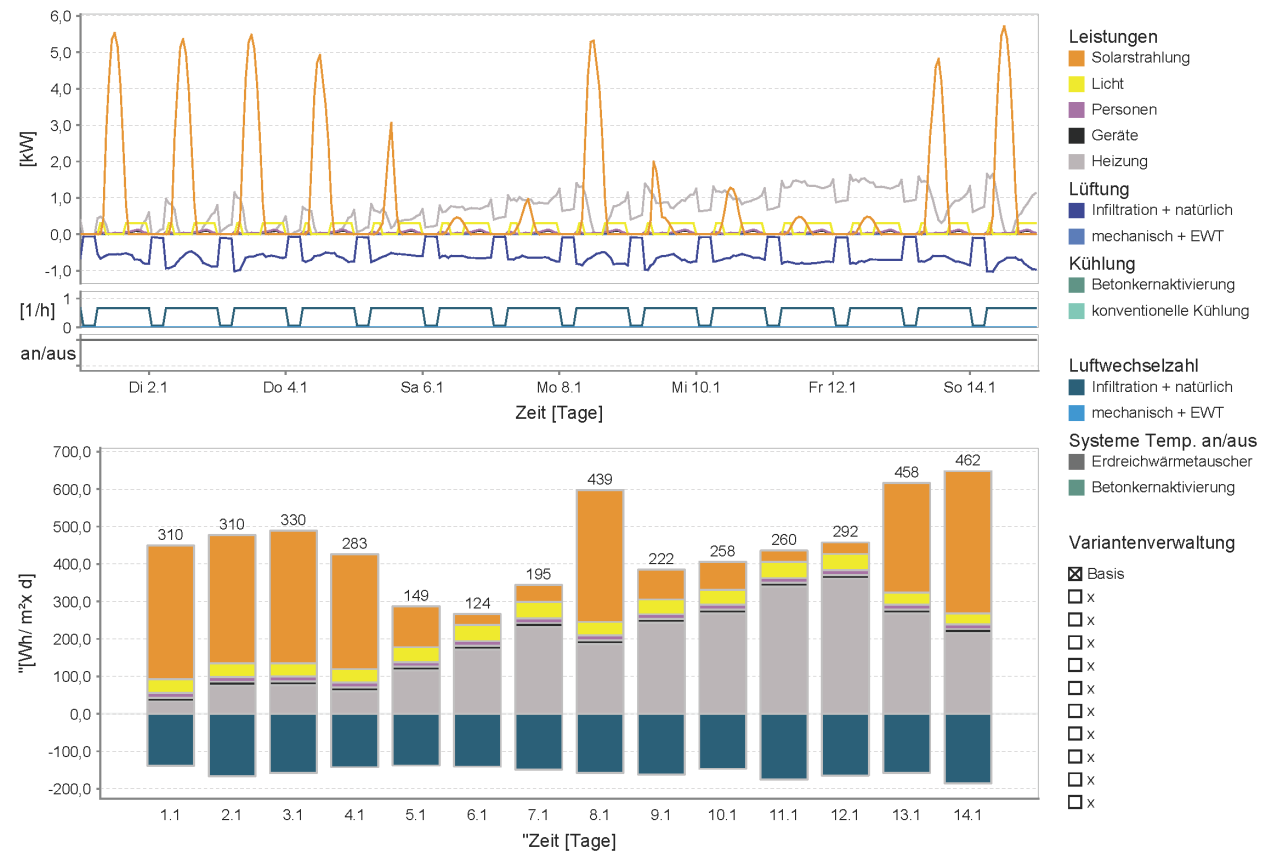


Abb. 120. Simulationsergebnis für die Energiebilanz für D1 - Erdgeschoss des gedämmten und luftdichten Referenzgebäudes im Januar, Fenster mit EV

## 5.2.4 Solare Gewinne im Obergeschoss des Referenzgebäudes im Winter

Der größere Anteil an transparenten Flächen in der Fassade des Obergeschosses führt zu starken Unterschieden in den solaren Einträgen, je nachdem in welche Richtung die Straßenfassade orientiert ist. Eine für das Innenraumklima günstige Orientierung und Größe der Öffnungsflächen hängen von der Nutzung der Gebäude und der verwendeten Bautechnik und Baumaterialien ab. Generelle Aussagen wie z.B. von Cofaigh (1996:111f), dass es einen günstigsten Winkel in Südeuropa für eine Öffnung der Fassade von 110° in südlicher Richtung gebe, sollten daher differenziert betrachtet werden.

Da es in dieser Arbeit das Ziel war, zu überprüfen, ob sich Konzepte aus der traditionellen Bauweise ableiten lassen, wurden Varianten unterschiedlicher Fenstergrößen in ihrem Einfluss auf die solaren Gewinne nicht weiter untersucht.

### Rahmenbedingungen der Simulationen:

Die Simulation wurde ohne den Einfluss einer Heizung berechnet. Eine Verschattung durch die Umgebung wie z.B. durch andere Gebäude oder Bewuchs wurde nicht berücksichtigt, da diese jeweils von den lokalen Gegebenheiten abhängen, und unter Einbeziehung dieser Parameter keine generellen Aussagen abgeleitet werden könnten. Am längsten Tag im Jahr (15 h) steigt die Sonne am Mittag bis auf 73°.

In den Abbildungen 121 und 122 ist dargestellt, wie sich die solaren Gewinne im Januar je nach Orientierung des Referenzgebäudes unterscheiden und wie sich dies auf die Innenraumtemperaturen auswirkt.

Bei einer Orientierung der Straßenfassade nach Süden sind die solaren Gewinne etwa doppelt so hoch wie bei einer Orientierung nach Osten oder Westen.

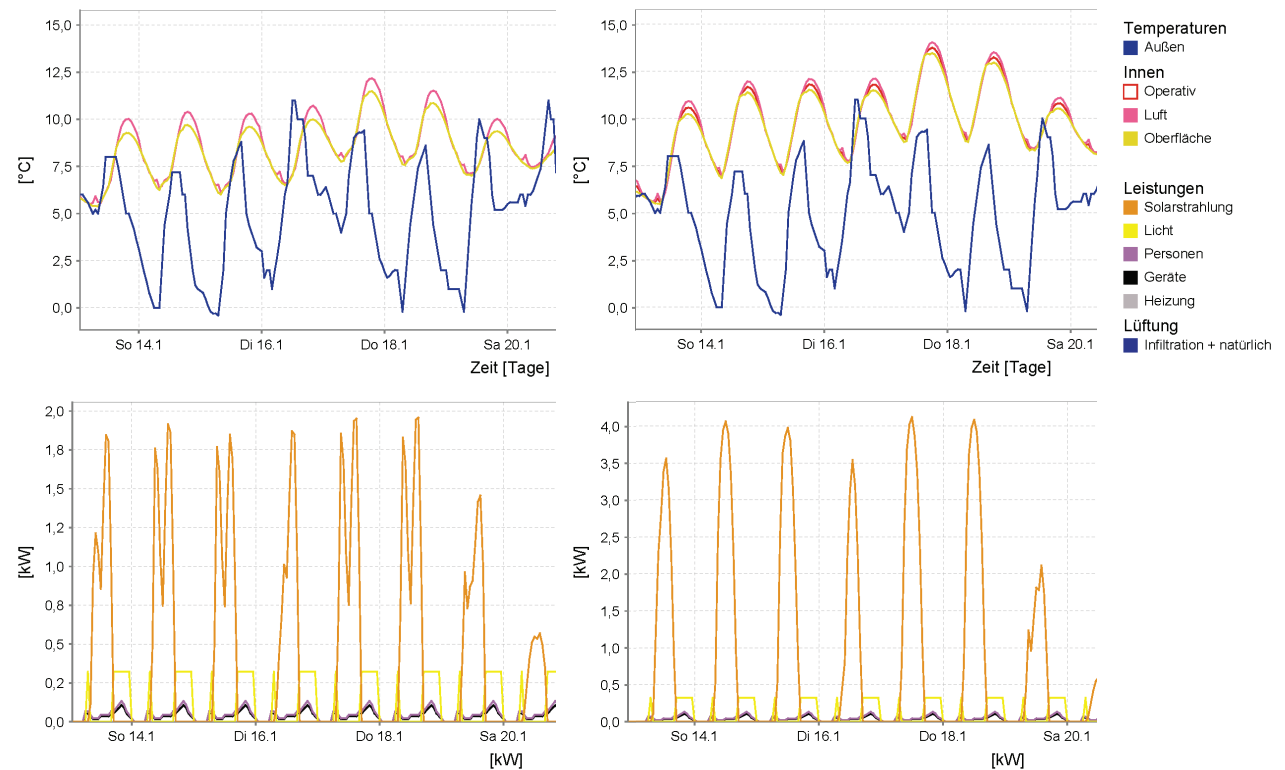


Abb. 121. Temperaturverlauf außen und innen und Darstellung der solaren Gewinne im Obergeschoss des Referenzgebäudes bei einer Orientierung in Nord - Süd Richtung (Straßenfassade nach Westen)

Abb. 122. Temperaturverlauf außen und innen und Darstellung der solaren Gewinne im Obergeschoss des Referenzgebäudes bei einer Orientierung in Ost - West Richtung (Straßenfassade nach Süden)

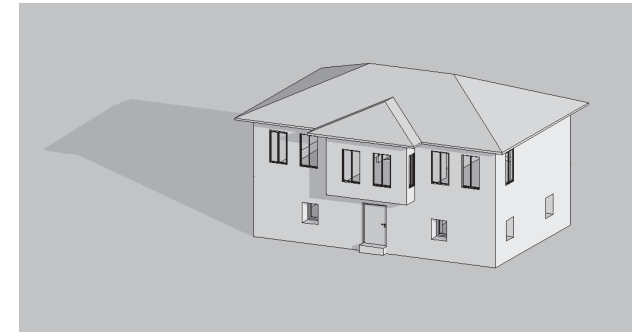
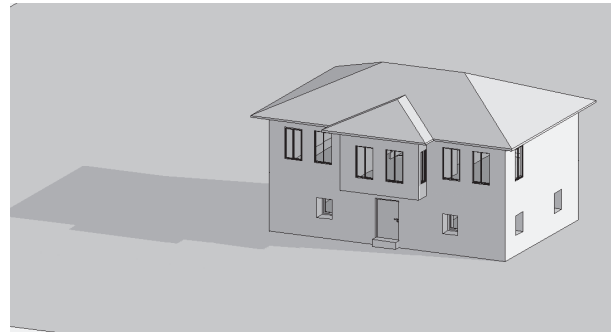
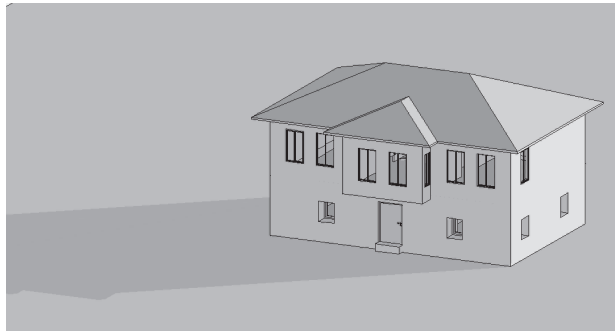


Abb. 123. Sonnenstudie: Schattenwurf auf die Straßenfassade am 14.01. um 10:00, 12:00 und um 15:00 Uhr; Gebäudeachse in Nord-Süd-Orientierung. Straßenfassade nach Westen, die Straßenfassade liegt bis zum Nachmittag im Schatten

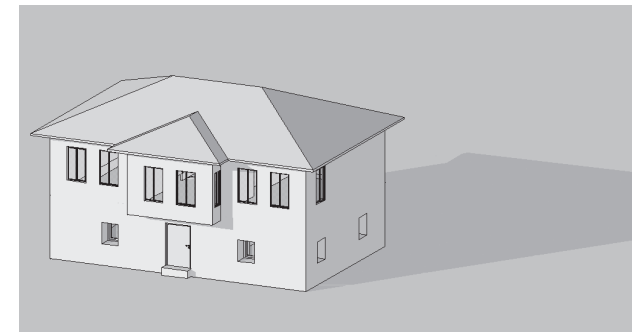
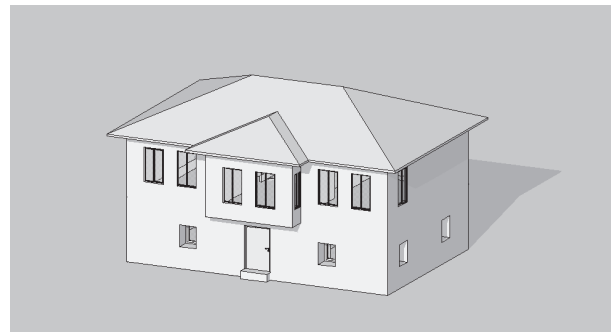
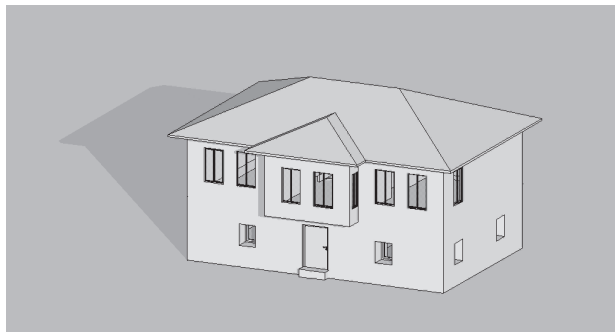


Abb. 124. Sonnenstudie: Schattenwurf auf die Straßenfassade am 14.01. um 10:00, 12:00 und um 15:00 Uhr; Gebäudeachse in Ost-West-Orientierung. Straßenfassade nach Süden, die Straßenfassade liegt während des betrachteten Zeitraums in der Sonne

Die Schattenstudie verdeutlicht die in den vorigen Abbildungen dargestellten Simulationsergebnisse. Abhängig von der Orientierung nach Himmelsrichtung, liegt die Straßenfassade mit dem gröſsten Fensterflächenanteil im Winter entweder einen großen Teil des Tages verschattet oder aber sehr exponiert. Entsprechend niedrig oder hoch sind die möglichen solaren Gewinne.



### 5.2.5 Vermeidung von Überhitzung durch solare Einträge im Sommer

Die solare Einstrahlung, die im Winter zur Reduzierung des Heizwärmebedarfs erwünscht ist, muss im Sommer abgeschirmt werden, um eine Überhitzung der Räume zu vermeiden. Um festzustellen, welche Orientierung dazu optimal ist, wurde das Gebäude in 30° Schritten gedreht, und für diese 12 Fälle die Innenraumtemperaturen mit PRIMERO Komfort simuliert (siehe Abb. 125).

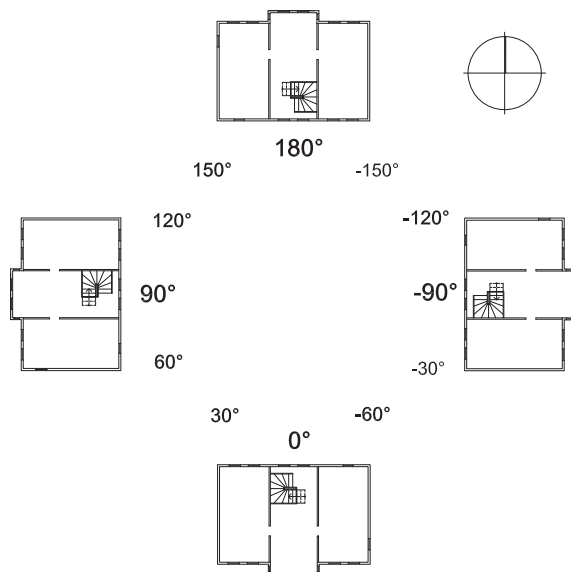


Abb. 125. Ausrichtungen des Referenzgebäudes für die Simulationen unterschiedlicher Orientierungen

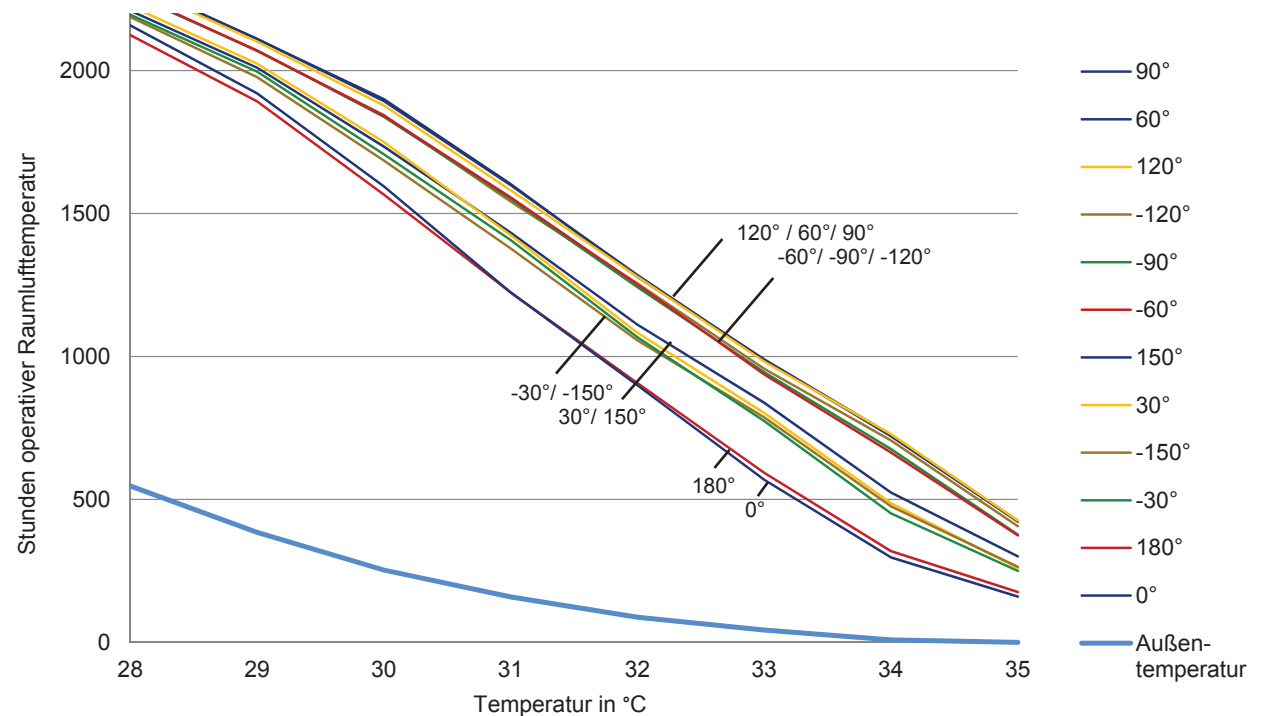
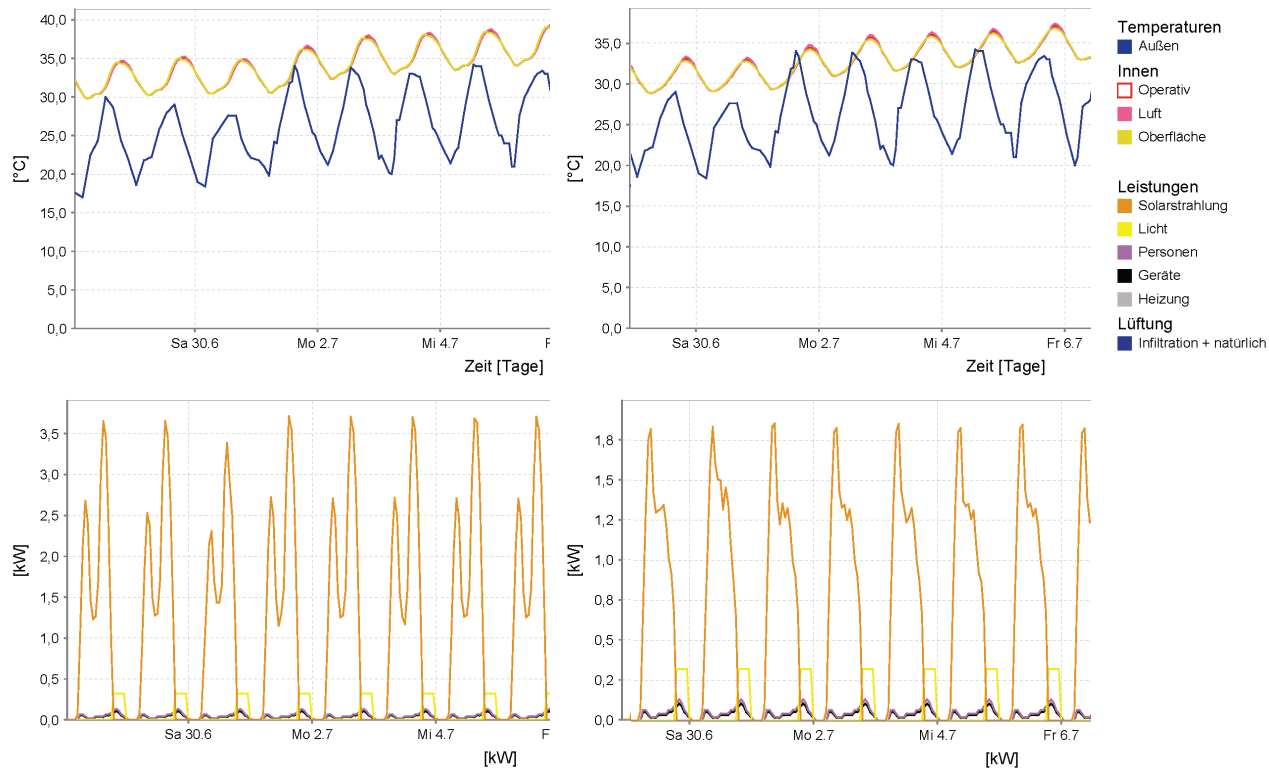


Abb. 126. Stunden pro Jahr der operativen Temperatur im Innenraum des Referenzgebäudes bei unterschiedlicher Orientierung des Gebäudes (0° bzw. 180° entsprechen einer Gebäudeachse in Ost-West Richtung, 90° bzw. -90° einer Nord-Süd Richtung)

**Rahmenbedingungen der Simulationen:** Die Berechnungen wurden ohne den Einfluss einer Heizung und ohne eine Verschattung der Fassaden durchgeführt um generelle Aussagen ableiten zu können.

In Abb. 126 werden die für einen Sommer im Innenraum des Obergeschosses des Referenzgebäudes zu erwartenden Temperaturen je nach

Ausrichtung gezeigt (0° entspricht der Ausrichtung der Straßenseite nach Süden). Die Abbildung zeigt, dass die Raumlufttemperaturen bei einer Ausrichtung von 0° oder 180° (Gebäudeachse in Ost-West Richtung) am niedrigsten ausfallen, während sie zunehmen, je weiter das Gebäude bis um 90° (Gebäudeachse in Nord-Süd Richtung) gedreht wird.



Die in Abb. 127 und 128 dargestellten Simulationsergebnisse zeigen deutlich, dass die höheren Raumlufttemperaturen durch die hohen solaren Einträge verursacht werden, die bei einer Orientierung des Referenzgebäudes in Nord-Süd Richtung auftreten. Die solaren Gewinne liegen verglichen mit einer Ost-West Orientierung etwa doppelt so hoch.

Abb. 127. Temperaturverlauf außen und innen und Darstellung der solaren Gewinne im Obergeschoss des Referenzgebäudes bei einer Orientierung in Nord - Süd Richtung (Straßenfassade nach Westen)

Abb. 128. Temperaturverlauf außen und innen und Darstellung der solaren Gewinne im Obergeschoss des Referenzgebäudes bei einer Orientierung in Ost - West Richtung (Straßenfassade nach Süden)

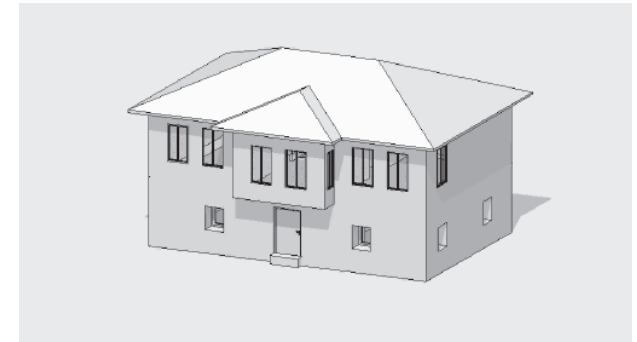
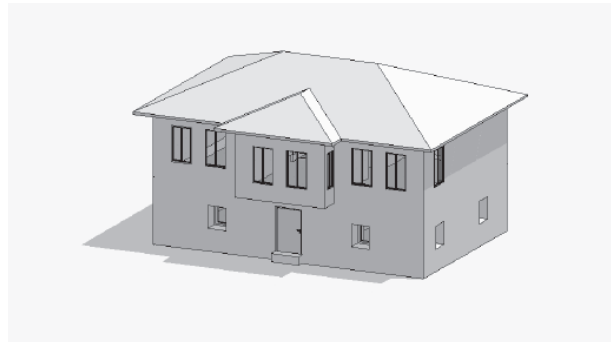
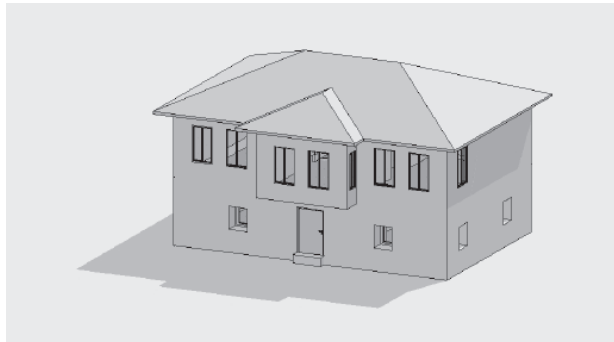


Abb. 130. Sonnenstudie: Schattenwurf auf die Straßenfassade am 30.06. um 10:00, 12:00 und um 15:00 Uhr, Gebäudeachse in Nord-Süd-Orientierung, Straßenfassade nach Westen, die Straßenfassade ist am Nachmittag gänzlich der Sonne exponiert

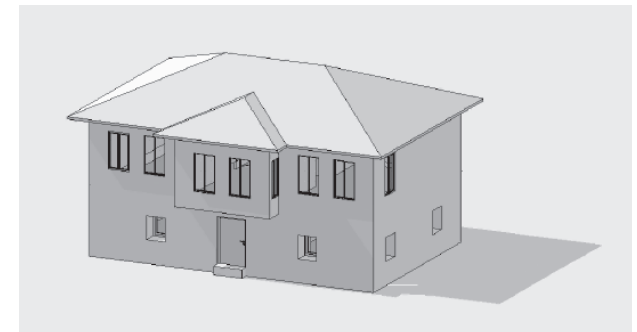
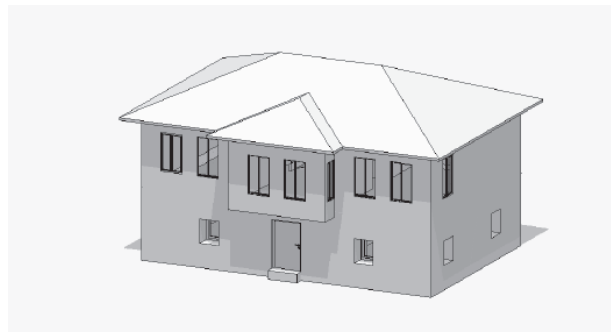
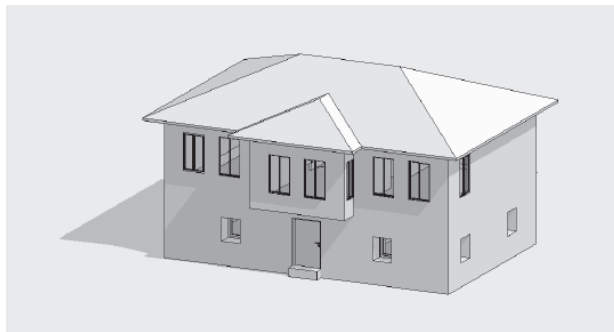


Abb. 129. Sonnenstudie: Schattenwurf auf die Straßenfassade am 30.06.. um 10:00, 12:00 und um 15:00 Uhr, Gebäudeachse in Ost-West-Orientierung, Straßenfassade nach Süden, die Straßenfassade ist den ganzen Tag über zu großen Teilen verschattet, das Obergeschoss liegt immer im Schatten, das Erdgeschoss wird durch den Erker zusätzlich verschattet

## 5.2.6 Orientierung – Ergebnisse

### 1. Ergebnis: Fensterflächen und Verglasung im Zusammenhang mit dem Heizwärmebedarf im Erdgeschoss des Referenzgebäudes

Anordnung, Größe und Anzahl der Öffnungen sowie die Orientierung der Gebäude sind die passive Klimatisierung betreffend an den Standort adaptiert. Ein höherer Fensterflächenanteil im Erdgeschoss bietet bei der verwendeten Bautechnik keinen Vorteil in Bezug auf die solaren Einträge, da sich die höheren Gewinne proportional zu den Verlusten von Raumwärme durch die größeren Öffnungen verhalten. Ein Exkurs zum Vergleich unterschiedlicher Verglasungen konnte zeigen, dass unerwarteterweise auch bei einem Gebäude mit gedämmten Außenbauteilen und hoher Luftdichtheit der Fassade eine Einfachverglasung für den betrachteten Fall in Bezug auf den Heizwärmebedarf die beste Option ist.

### 2. Ergebnis: Orientierung der Gebäudes in Bezug auf solare Gewinne im Obergeschoss im Winter

Die Gebäude in der Oberstadt sind so orientiert, dass die Fassaden mit hohem Fensterflächenanteil in eine südliche Richtung zeigen. Durch diese Ausrichtung können sie im Winter den niedrigeren Sonnenstand und die möglichen solaren Einträge maximal ausnutzen. Die Simulationsergebnisse zeigten, dass die solaren Gewinne für das Referenzgebäude bei einer Ost-West Orientierung am höchsten sind. Eine Schattenstudie konnte

diese Ergebnisse stützen. Bei einer Drehung des Gebäudes um 90° auf eine Nord-Süd Orientierung halbieren sich die Einträge.

### 3. Ergebnis: Orientierung der Gebäudes in Bezug auf solare Gewinne im Obergeschoss im Sommer

Die Gebäude in der Oberstadt sind auch für den Sommer günstig zur Himmelsrichtung hin angeordnet. Die Simulationsergebnisse zeigten, dass die Orientierung in Ost-West Richtung die Überhitzung der Räume im Obergeschoss im Sommer vermindert. Ist die Gebäudeachse um 90° gedreht in Nord-Süd- Richtung orientiert, liegen die solaren Einträge am höchsten. Sie betragen bei dieser Orientierung etwa das Doppelte im Vergleich zu der Ausrichtung des Gebäudes in Ost-West Richtung.



## 5.3 Verschattungselemente für Fenster und Fassaden

Um die Überhitzung von Räumen im Sommer zu vermeiden ist es notwendig, solare Einstrahlung vom Gebäude abzuhalten. Schattenspendende Elemente können *bauliche Vorrichtungen am Gebäude* sein, aber auch *umgebende Bebauung* und *Bepflanzung*. Bei den traditionellen Wohnhäusern in der Oberstadt von Thessaloniki lassen sich alle drei genannten Varianten zur Verschattung finden. Grundsätzlich ist festzustellen, dass die Verschattung der transparenten Flächen der Fassade umso ausschlaggebender für den sommerlichen Wärmeschutz wird, je besser die Wärmedämmung der Außenwände ist.

Für die Verschattung der Fenster haben sich manuell zu bedienende, außen angebrachte Klappläden aus Holz mit verstellbaren Lamellen durchgesetzt (siehe Abb. 076 und 077, Seite 89). Diese Form der Verschattungselemente erlaubt durch variable Einstellungen, die mit vielen Abstufungen von vollkommen geöffnet bis gänzlich geschlossen reichen, eine Manipulation des Raumklimas. Als nicht veränderbares bauliches Element trägt ein weiter Dachüberstand dazu bei, direkte solare Einstrahlung von der Fassade abzuhalten.

Die Gebäude der umgebenden Bebauung spenden Schatten, da die Straßen schmal sind und die Häuser dicht aneinander stehen. Dieser Einfluss ist jedoch eher gering einzustufen, da die Bebauung mit zwei bis drei Geschossen nicht so hoch ist, dass die unteren Bereiche der Fassaden dadurch dauerhaft verschattet werden. Der Sky View Faktor (SVF)

wird in diesem Zusammenhang daher nicht als Größe verwendet, obwohl er ein sinnvolles Mittel zur Erfassung der Strahlung in Bezug auf die Geometrie der Umgebung ist (Oke, 1981:245).

Die ursprüngliche Konzeption der Wohnhäuser sah vor, dass sich an die Gebäude Gärten anschlossen. Aus einem Reisebericht des Mustafa Ben Abdalla Hadji Kalfa aus dem 17. Jahrhundert lässt sich entnehmen, dass es *Hunderte von Villen mit Weingärten oder Gärten gab - wirkliche Paradiese - mit murmelnden Springbrunnen. Die Häuser hatten Erker, Nebengebäude und Pavillons* (vgl. Vacapoulos, 1972:82). Die Bäume dieser Gärten trugen zur Verschattung der Gebäude bei, des Weiteren erzeugten die Pflanzen und Wasserbecken Verdunstungskälte. Das entstehende Mikroklima wurde gezielt eingesetzt, um in den Pavillons im Garten an heißen Sommertagen ein angenehmes Klima zu schaffen. Die Gärten und Springbrunnen sind zu großen Teilen verschwunden. Vor allem durch die Wohnungsnot, hervorgerufen durch den Bevölkerungsaustausch in den 1920er Jahren wurde die Oberstadt stark verdichtet.

Im folgenden Abschnitt wird die Untersuchung mit der Simulationssoftware PRIMERO Komfort zum Einfluss unterschiedlicher Verschattungselemente dargelegt. Die Faktoren der Umgebung, wie Bebauung und Bepflanzung, wurden nicht in die Simulationen mit einbezogen, denn dies sind variable Größen in Abhängigkeit vom Standort

eines Gebäudes. Sie lassen sich vor allem bei Bestandgebäuden, aber auch bei Neubauten nicht direkt übertragen, da Faktoren wie die umgebende Bebauung und die Straßenbreite feste Größen sind. Der Einfluss von Bepflanzungen auf den sommerlichen Wärmeschutz wurde nicht weiter untersucht, da es zu diesem Thema bereits wissenschaftliche Untersuchungen und Ergebnisse gibt (vgl. Schmidt, 2008) und es nicht zu erwarten war, dass sich durch Analyse des gewählten Beispiels weitere Erkenntnisse gewinnen lassen.

Durch Gebäudesimulationen wurden die traditionellen Klappläden für das Obergeschoss des Referenzgebäudes mit anderen Verschattungsmöglichkeiten verglichen, um herauszufinden, ob diese Vorteile gegenüber anderen Elementen, wie den heute vielfach verwendeten Rollläden, Markisen oder Gardinen haben. Ein weiterer Vergleich erfolgte zu modernen innenliegenden metallbeschichteten Jalousien und der Situation ohne Verschattung. Ebenso die Bedienung der Verschattungselemente wurde in Varianten untersucht. Der Flächenanteil der Fenster an der Fassade wurde nicht variiert.

Die Simulationssoftware berücksichtigt nicht den Einfluss des Materials eines Verschattungselementes. Daher wurde dieser Einfluss für die Materialien Holz, Kunststoff und Metalle, welche üblicherweise für Rollläden und Klappläden verwendet werden, einzeln untersucht.

### 5.3.1 Einfluss des Materials eines Verschattungselementes

Verschattungselemente sind immer einer hohen solaren Einstrahlung ausgesetzt, da sie dazu eingesetzt werden, diese gezielt abzuhalten. Dadurch erhitzt sich das Material auf Temperaturen, die weitaus höher liegen als die umgebende Lufttemperatur. Die Wärmestrahlung, die von dem Material ausgeht, kann zum Teil von der Glasscheibe eines geschlossenen Fensters reflektiert werden. Der Anteil der Reflektion ist vom Reflexionsgrad der Verglasung abhängig (siehe dazu Abb. 131).

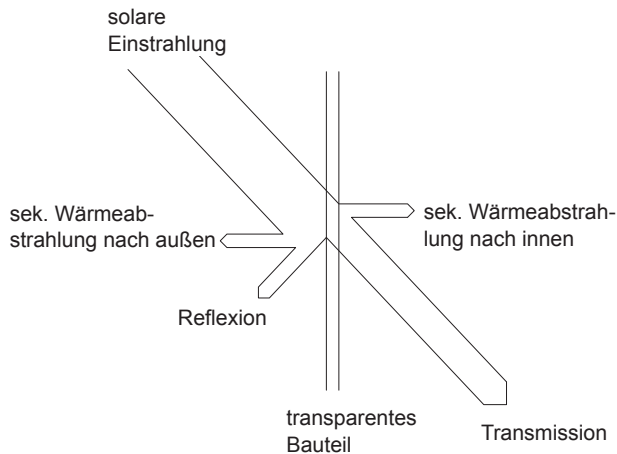


Abb. 131. Energieeintrag durch ein transparentes Bauteil, dieser ist abhängig vom Transmissions- und Reflexionsgrad des Materials

Wird das Fenster hinter einer außenliegenden Verschattung zur natürlichen Lüftung geöffnet, gelangt die gesamte Wärmestrahlung, die von dem Verschattungselement nach innen ausgeht in den Raum. Die Höhe dieser Strahlung hängt von dem Emissionsgrad und der Temperatur des Materials ab.

Für die Berechnung der Temperatur, die ein Material durch solare Einstrahlung erreicht, wurde angenommen, dass aufgrund der vertikalen Verschattung am Fenster eine fast ruhende Luftschicht vorliegt. Die angenommene Windgeschwindigkeit beträgt daher  $v = 0,3 \text{ m/s}$ .

Der konvektiver Wärmeübergangskoeffizient  $\alpha_c$  wurde mit

$$\alpha_c = 2,8 + 3 * v \quad (8)$$

berechnet (nach Duffie, Beckmann, 2000).

Die solare Einstrahlung auf eine vertikale nach Süden gerichtete Fläche beträgt in Thessaloniki bis zu  $450 \text{ W/m}^2$ . Auf eine horizontale Fläche, wie in diesem Beispiel eine horizontal gestellte Lamelle, kann in den Sommermonaten als Spitzenwert über  $800 \text{ W/m}^2$  einfallen.

Die Temperatur des Materials wurde daher sowohl für eine solare Einstrahlung von  $300 \text{ W/m}^2$  berechnet, welche schon im Laufe des Vormittags

erreicht werden kann, als auch im Vergleich die Auswirkung einer Einstrahlung von  $600 \text{ W/m}^2$ , welche über einen Zeitraum von mehreren Stunden möglich ist (nach: Klimadatensatz IWEK). Die Außentemperatur betrug für die Berechnungen  $25^\circ\text{C}$ .

Die Temperatur, die ein Material durch solare Einstrahlung bei einer vorgegebenen Lufttemperatur erreicht, wurde berechnet durch

$$T = T_u + (I * \alpha_s) / \alpha * (1 - e - (\alpha / (\rho * d * c)) * t) \quad (9)$$

mit:  $T$  = Temperatur des Bauteils;  $T_u$  = Außentemperatur;  $I$  = solare Einstrahlung; Exponent  $e$ ;  $\rho$  = Dichte des Materials;  $d$  = Dicke des Materials;  $c$  = spez. Wärmekapazität; und  $t$  = Zeit in h.

Dabei ist zu beachten, dass sich diese Gleichung auf eine unendlich ausgedehnte Platte bezieht.

$$\alpha_s = \epsilon_s * \epsilon \quad (10)$$

mit:  $\epsilon_s$  = Emission schwarzer Körper; und  $\epsilon$  = Emissionskoeffizient Infrarot.

$$\alpha = \alpha_c + \alpha_s \quad (11)$$

mit:  $\alpha_c$  = konvektiver Wärmeübergangskoeffizient; und  $\alpha_s$  nach Formel (10)

	Dichte in kg/m <sup>3</sup> ( <sup>1</sup> )	spez. Wärmekapazität in Ws/kg K( <sup>1</sup> )	Absorptionskoeffizient Solarstrahlung	Emissionskoeffizient Infrarot
Beton	2000	1000	0,55 <sup>(3)</sup> 0,60 <sup>(4)</sup>	0,96 <sup>(3)</sup> 0,88 <sup>(4)</sup>
Kunststoff, helle Farbe	1100	1500	0,35 Papier weiß = 0,36 <sup>(4)</sup> Zinkweiß = 0,22 <sup>(2)</sup>	0,91 0,90 <sup>(3)</sup> 0,92 <sup>(4)</sup> 0,92 <sup>(2)</sup>
Stahl, blank	7800	400	0,37 <sup>(4)</sup>	0,13 0,10 <sup>(3)</sup> 0,16 <sup>(4)</sup>
Stahl, matt	7800	400	0,50 <sup>(4)</sup>	0,21 <sup>(4)</sup>
Holz	700	2100	0,35 <sup>(4)</sup>	0,91 0,90 <sup>(3)</sup> 0,91 <sup>(4)</sup>
Holz, Anstrich Lack, schwarz	700	2100	0,97 <sup>(4)</sup>	0,97 <sup>(4)</sup>
Holz, Anstrich Lack weiß	700	2100	0,14 <sup>(4)</sup>	0,93 <sup>(4)</sup>
Aluminium, poliert	2700	800	0,15 0,10 – 0,40 <sup>(3,5)</sup> 0,09 <sup>(4)</sup> 0,20 <sup>(2)</sup>	0,05 0,03 <sup>(3,4)</sup> 0,08 <sup>(2)</sup> 0,02-0,04 <sup>(5)</sup>
Aluminium, oxidiert	2700	800	0,20 0,14 <sup>(4)</sup> 0,20-0,40 <sup>(3)</sup>	0,87 0,84 <sup>(4)</sup> 0,90 <sup>(3)</sup>

<sup>1</sup> DIN 4108-4:2013-02 Tab. 1 und DIN EN ISO 10456:2010-05 Tab. 3, <sup>2</sup> Baehr (1996:585), <sup>3</sup> Hauser (2003:15), <sup>4</sup> Marek (2012:248) <sup>5</sup> Fathy (1986:18)

Abb. 132. Liste der Baustoffe und ihrer Eigenschaften, bei mehreren Werten wurde für die Berechnung ein mittlerer Wert angenommen (in der Tabelle kursiv)

Für den Vergleich zwischen unterschiedlichen Materialien für Verschattungselemente wurden Metalle, Beton, Holz, Kunststoff und Baumwolle miteinander verglichen. Die verwendeten Kennwerte sind in Abb. 132 angegeben. Waren in der Literatur für Absorptions- und Emissionskoeffizienten

unterschiedlichen Angaben zu finden, wurde ein mittlerer Wert angenommen.

Zunächst erfolgte ein Vergleich zwischen den unterschiedlichen Materialien, welche häufig für Verschattungselemente an Fassaden verwendet

werden. Von den diesen heizt sich blanker Stahl besonders stark auf. Nach 6 h unter den angenommenen Bedingungen liegt die Temperatur etwa 20K (bei I = 300 W/m<sup>2</sup>) bzw. etwa 50K (bei I = 600 W/m<sup>2</sup>) höher, als die umgebende Lufttemperatur (siehe Abb. 133 und 134). Dieses Material hat daher für bauliche Elemente an der Fassade, die dem sommerlichen Wärmeschutz dienen sollen, ungünstige Eigenschaften. Fathy (1986:45) stellt in den 1980er Jahren in seinen Ausführungen über den Faktor Sonne in heißen Regionen dar, dass Metall als Material für Lamellen von Verschattungselementen vermieden werden sollte, da diese die Wärme in den Raum hinein abstrahlen und die in den Raum strömende Luft vorheizen.

Eine materialsichtige Betonoberfläche heizt sich ebenfalls stark und auch besonders schnell auf. Als horizontales oder vertikales Verschattungselement an einer Fassade eingesetzt kann dies bewirken, dass bei natürlicher Lüftung über Öffnungen in der Fassade, die Luft vorgeheizt in den Raum gelangt.

Poliertes Aluminium heizt sich durch die starke Reflexion der polierten Oberfläche langsamer auf, und nähert sich unter den gegebenen Bedingungen nach etwa 5 h der Temperatur von Holz oder Kunststoff mit einer hellen Oberfläche an. Die maximal erreichte Temperatur dieser Bauteile liegt wesentlich niedriger als die des betrachteten Stahls und Betons.

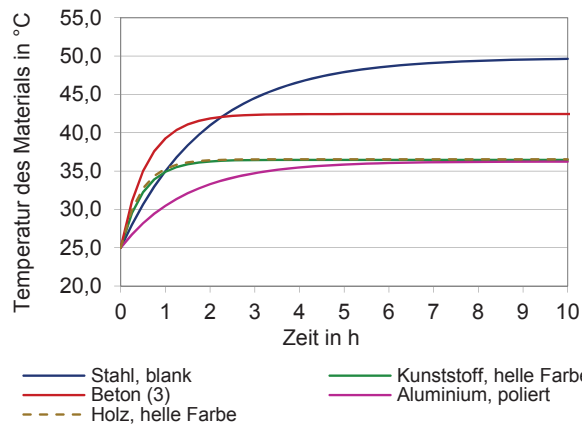


Abb. 133. Temperaturverlauf unterschiedlicher für Verschattungselemente verwendeter Materialien,  $D = 10 \text{ mm}$ , durch solare Einstrahlung von  $300 \text{ W/m}^2$  bei  $25 \text{ °C}$  Außentemperatur und fast ruhender Luft ( $v_{\text{Wind}} = 0,3 \text{ m/s}$ )

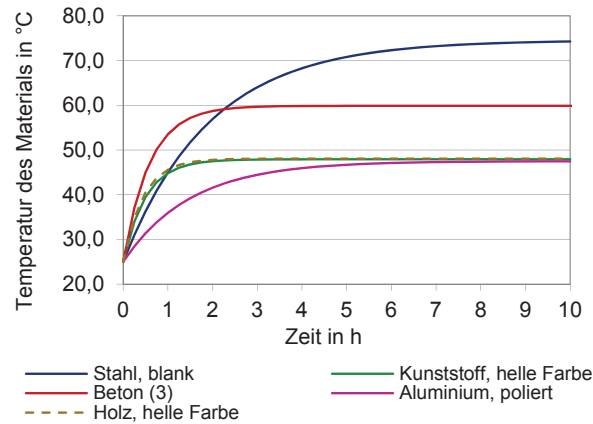


Abb. 134. Temperaturverlauf unterschiedlicher für Verschattungselemente verwendeter Materialien,  $D = 10 \text{ mm}$ , durch solare Einstrahlung von  $600 \text{ W/m}^2$  bei  $25 \text{ °C}$  Außentemperatur und fast ruhender Luft ( $v_{\text{Wind}} = 0,3 \text{ m/s}$ )

In Abb. 135 ist dargestellt, wie sich die Oberfläche bei Metallen auf den Temperaturverlauf auswirkt. Eine matte Stahloberfläche heizt sich durch solare Einstrahlung von  $600 \text{ W/m}^2$  bei  $25 \text{ °C}$  Außentemperatur auf  $85 \text{ °C}$  auf. Sie erhitzt sich also noch schneller und auch stärker als die blanken Stahloberfläche. Eine oxidierte Aluminiumoberfläche hingegen wird weniger heiß als die polierte Oberfläche. Es wird deutlich, dass sowohl die Geschwindigkeit der Temperaturzunahme, als auch die erreichten maximalen Temperaturen einerseits von den Materialeigenschaften, aber auch der Oberfläche abhängen.

Für das Material Holz ist in Abb. 136 dargestellt, wie sich die Temperaturen abhängig von der Farbe der Oberfläche entwickeln. Mit einem schwarzer Lackanstrich heizt es sich innerhalb von weniger als 2 h bis auf über  $85 \text{ °C}$  auf, hat das Material einen hellen Anstrich bleibt es hingegen unter  $50 \text{ °C}$ . Die reinweiße Oberfläche ist als Vergleich angegeben, sie bliebe an einer Fassade nicht über einen längeren Zeitraum mit diesen Eigenschaften bestehen.

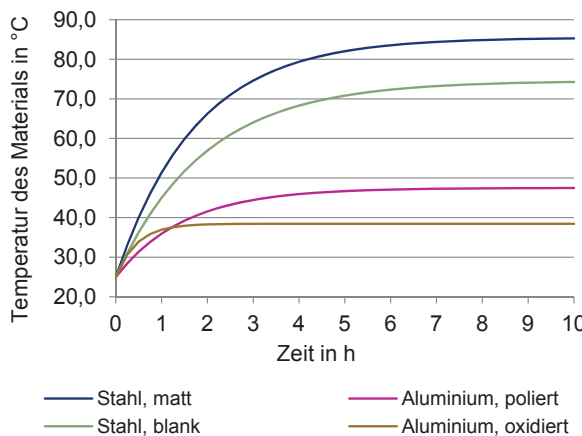


Abb. 135. Temperaturverlauf in Metall- Bauteilen,  $D = 10 \text{ mm}$ , durch solare Einstrahlung von  $600 \text{ W/m}^2$  bei  $25 \text{ °C}$  Außentemperatur und  $v_{\text{Wind}} = 0,3 \text{ m/s}$

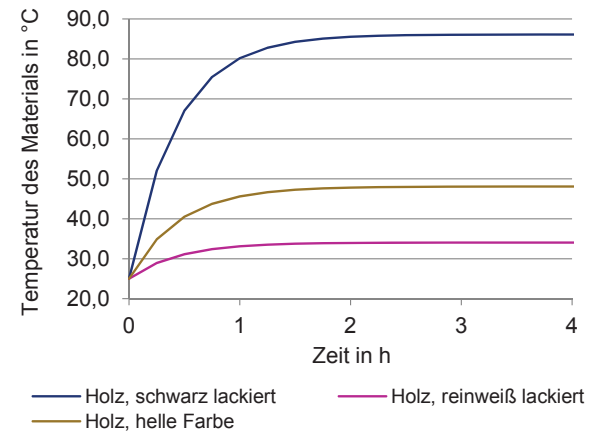


Abb. 136. Temperaturverlauf in Holz-Bauteilen  $D = 10 \text{ mm}$ , durch solare Einstrahlung von  $600 \text{ W/m}^2$  bei  $25 \text{ °C}$  Außentemperatur und  $v_{\text{Wind}} = 0,3 \text{ m/s}$



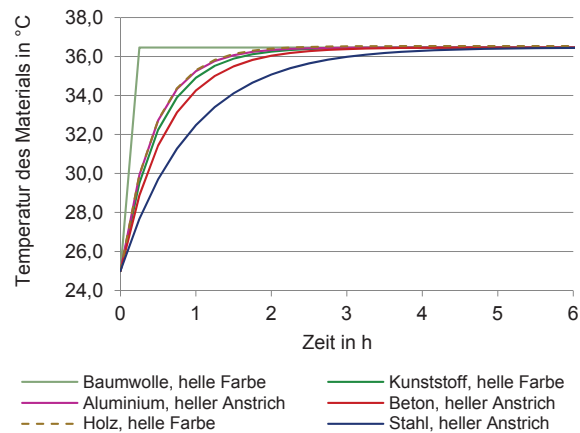


Abb. 137. Temperaturverlauf im Bauteil bei gleichen Absorptions- und Emissionskoeffizienten und 10 mm Bauteildicke durch solare Einstrahlung von 300 W/m<sup>2</sup> bei 25 °C

Haben alle Materialien die gleiche Farbe, also identische Absorptions- und Emissionskoeffizienten, heizen sie sich auf die gleiche maximale Temperatur auf (siehe Abb. 137), doch dies geschieht nicht in der gleichen Geschwindigkeit. Der Stoff einer Markise hat schon nach etwa einer Viertelstunde die Temperatur, welche der Stahl erst nach fünf Stunden erreicht. Dieses Material strahlt fast direkt Wärme ab, sobald es sich durch solare Strahlung erwärmt.

Balkone in Form auskragender Betonplatten dienen bei den Appartementshäusern der Nachkriegsbebauung auch der Verschattung der Fassade. Für die Berechnung des Temperaturverlaufs wurde im Unterschied zu den bisher betrachteten Verläufen

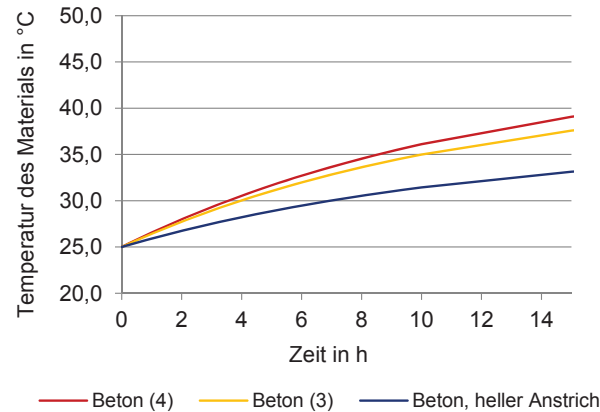


Abb. 138. Temperaturverlauf im Bauteil aus Beton, D = 20 cm, durch solare Einstrahlung von 300 W/m<sup>2</sup> bei 25 °C Außentemperatur und  $v_{Wind} = 0,3$  m/s

eine Windgeschwindigkeit von 3 m/s angesetzt, da die Bauteile sich nicht vor einer ruhenden Luftschicht befinden. Dadurch fällt die maximale Temperatur geringer aus als bei den vorigen Betrachtungen mit einer Windgeschwindigkeit von 0,3 m/s (im Vergleich dargestellt in Abb. 138 und 139). Dieser Faktor ist jedoch gegenüber dem Einfluss der höheren Dicke des Bauteils im Vergleich zu den Verschattungselementen der Fenster eher geringfügig. Ausschlaggebend für die Unterschiede ist die größere Dicke des Bauteils (siehe Abb. 140).

In den Abb. 138 bis 140 werden zum Vergleich die Ergebnisse für zwei unterschiedlicher Werte aus der Literatur für die Absorptions- und

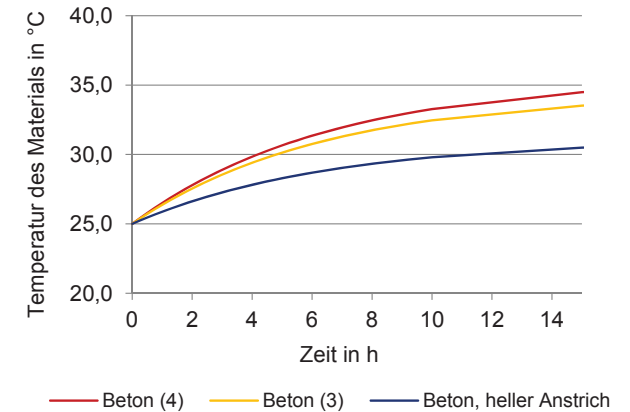


Abb. 139. Temperaturverlauf im Bauteil aus Beton, D = 20 cm, durch solare Einstrahlung von 300 W/m<sup>2</sup> bei 25 °C Außentemperatur und  $v_{Wind} = 3$  m/s

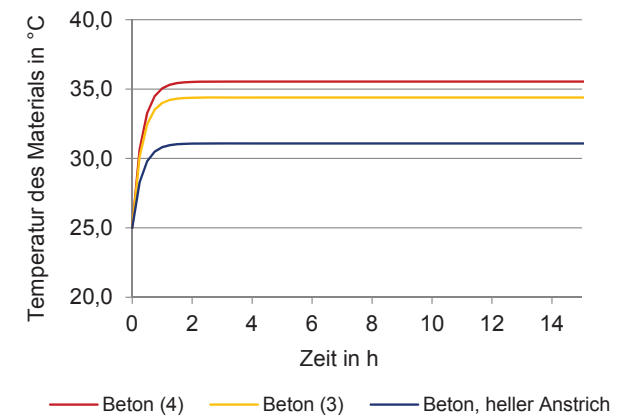


Abb. 140. Temperaturverlauf im Bauteil aus Beton, D = 10 mm, durch solare Einstrahlung von 300 W/m<sup>2</sup> bei 25 °C Außentemperatur und  $v_{Wind} = 3$  m/s

Emissionskoeffizienten gezeigt (siehe Abb. 132). Diese führen nur zu geringen Unterschieden in den Ergebnissen von etwa 1K. Die dritte Kurve zeigt den Einfluss der Farbe der Oberfläche auf. Hat die Oberfläche eine helle Farbe, erwärmt sich das Material langsamer und insgesamt auf eine geringere Temperatur.

Eine auskragende Platte aus Beton von 20 cm Dicke, wie sie an den Appartementshäusern üblich ist, wird sich im Tagesverlauf zwar aufheizen, durch die höhere Dicke geschieht dies jedoch wesentlich langsamer als bei einem Verschattungselement mit geringerer Dicke. Das Berechnungsverfahren geht allerdings davon aus, dass sich das Bauteil gleichmäßig erwärmt, die Platte wird in der Realität auf der sonnenbeschienenen Seite höhere, auf der Unterseite niedrigere Temperaturen aufweisen.

### 5.3.2 Einfluss des Materials - Ergebnisse

Die Untersuchung zum Einfluss des Materials auf die Temperatur des Materials eines Verschattungselements konnte zeigen, dass die Farbe der Oberfläche die ausschlaggebende Größe, bezogen auf die maximal erreichten Temperaturen des Materials ist. Die Materialeigenschaften dagegen bestimmen, wie schnell sich das Material aufheizt. Diese Faktoren sollten bei der Auswahl und Konzeption berücksichtigt werden.

Eine reinweiße Oberfläche heizt sich am geringsten auf. Da diese Farbe aber an einer Fassade je nach lokalen Gegebenheiten schnell verschmutzt, werden üblicherweise helle, aber keine rein weißen Farbtöne verwendet (für das Untersuchungsgebiet dargestellt in Abb. 141 und 142). Doch nicht immer entspricht das dem gestalterischen Konzept für eine Fassade. Beinhaltet dieses eine Materialsichtigkeit oder sollen Kontraste geschaffen werden, kann die Wahl des Materials für die Verschattungselemente wichtig sein, um das Aufheizen auf hohe Temperaturen zu vermeiden.

Blanker oder polierter Stahl sollte ebenso wie sehr dunkle Anstriche vermieden werden. Aluminium hingegen heizt sich, bedingt durch den hohen Emissionsgrad, vergleichsweise wenig auf.

Die Betonbauteile werden zwar durch die größere Bauteildicke und den Einfluss der Luftbewegung weniger warm, sie geben aber die gespeicherte Wärme über einen längeren Zeitraum wieder ab. Dieser Effekt sollte bei der Planung berücksichtigt werden. Bei geschickter Auswahl des Materials massiver Bauteile kann er gezielt eingesetzt werden, wenn die Phasenverschiebung so groß ist, dass die Wärmestrahlung erst in der Nacht abgegeben wird.



Abb. 141. In der traditionellen Bebauung der Oberstadt verwendete Klappläden mit beige Anstrich (eigene Aufnahme, 2013)



Abb. 142. In der traditionellen Bebauung der Oberstadt verwendete Klappläden mit weißem Anstrich (eigene Aufnahme, 2013)

### 5.3.3 Simulationen für Varianten der Verschattung

Für die Verschattungselemente der traditionellen Häuser wurden hölzerne Klappläden mit hellem Anstrich verwendet (siehe Abb. 141 und 142). Die Untersuchung zum Einfluss des Materials eines Verschattungselements auf seine Temperatur konnte zeigen, dass diese Materialwahl günstig ist, um ein starkes und schnelles Aufheizen des Materials zu verhindern. Im Folgenden wird der Einfluss unterschiedlicher Varianten der Verschattung auf die Innenraumtemperaturen, welcher durch Simulationen mit PRIMERO Komfort untersucht wurde, beschrieben. Der Vergleich wurde angestellt, um zu erkennen, ob die traditionell verwendeten Elemente Vorteile oder Nachteile gegenüber anderen, heute üblicherweise verwendeten, besitzen.

Dabei wurde der Abminderungswert ( $F_c$ -Wert) durch die Software für die jeweilige Verschattung in Kombination mit der Verglasung der Fenster jeder Simulation dynamisch berechnet. Es wurden unterschiedliche Varianten für die Bedienung der Verschattungselemente durch die Nutzerinnen und der jeweils möglichen natürlichen Lüftung angenommen. Ob ein Fenster geöffnet, gekippt oder geschlossen ist, konnte in der Simulation nur in Bezug auf die LWR erfasst werden, denn der Einfluss der Verschattung auf die Innenraumtemperaturen wird in der Software immer in Verbindung mit der jeweiligen

Verglasung berechnet. Daher mussten die Varianten mit einem geöffneten Fenster mit einer Einfachverglasung (EV) gerechnet werden, welche der Situation noch am ehesten entspricht, da Wärmestrahlung durch eine EV nur geringfügig abgehalten wird. Für die Varianten mit geschlossenem Fenster wurden EV, Wärmeschutzverglasung (WSV) und Sonnenschutzverglasung (SSV) miteinander verglichen. Diese Verglasungen waren zwar in den traditionellen Häusern nicht vorhanden, sie sind heute jedoch Standard, so dass der Einfluss dieser auf die Wahl der Verschattungselemente ebenfalls untersucht wurde.

Durch Gebäudesimulationen untersuchte Varianten:

#### 0. Kein Verschattungselement, Fenster geöffnet

Auch bei wenig Wind ist in der ursprünglichen homogenen Bebauung durch Querlüftung eine LWR von mindestens 7/h möglich (siehe Untersuchung der Lüftung). Die solare Einstrahlung kann bei dieser Variante ungehindert durch die Öffnungen in der Fassade in den Innenraum gelangen. Ebenso kann die Wärmestrahlung ungehindert wieder austreten.

#### 1. Klappläden mit Lamellen, Fenster ist geöffnet

Die Fenster sind alle geöffnet, die Klappläden alle geschlossen. Die LWR von 7/h wird durch Querlüftung ermöglicht. Die Einstellung der Lamellen der Klappläden wurde mit „cut off“ angenommen, also einer Lamellenstellung, die sämtliche direkt einfallende Solarstrahlung abhält. Da die vom Klappläden

ausgehende Wärmestrahlung in den Innenraum gelangen kann ist ein heller Anstrich der Oberfläche empfehlenswert. Simuliert wurden in Bezug auf die Bedienung zwei Varianten: 1a - die Läden werden geschlossen, wenn die Sonne scheint und 1b - die Läden werden geschlossen, wenn die Sonne auf die Fassade scheint

#### 2. Rollläden geschlossen, Fenster geschlossen

Bei geschlossenem Rollladen ist die natürliche Lüftung - je nachdem, wie weit dieser heruntergelassen ist - fast bis gänzlich unterbunden. Variante 2 stellt den wahrscheinlichen Fall dar, dass bei geschlossenem Rollladen auch das Fenster geschlossen ist, um die vom Material ausgehende Wärmestrahlung abzuhalten. Die Auswirkungen auf die Temperaturen im Innenraum, hängen von der Verglasung ab und davon, von welcher Farbe und Material der Rollladen ist.

#### 2a Rollläden geschlossen, Fenster geöffnet

Wird ein Rollladen zum Teil geschlossen, das Fenster aber geöffnet, beispielsweise um tagsüber zu lüften, oder am Abend kühlere Luft in den Raum zu lassen, gelangt die vom Rollladen nach innen ausgehende Wärmestrahlung in den Raum. Die Höhe dieser Strahlung hängt vom Emissionsgrad und der Temperatur des Materials ab. Da das Element sich abhängig von Material und Oberfläche extrem aufheizen kann, ist ein heller Anstrich der Oberfläche zu empfehlen.

Varianten mit unterschiedlich weit heruntergelassenen Rollläden sind nicht simuliert worden, da hier das Zusammenspiel zwischen solaren Gewinnen und internen Einträgen durch Kunstlicht von so vielen Parametern beeinflusst werden, dass ein Ergebnis für diese, manuell zu bedienenden Verschattungsvorrichtungen, wenig aussagekräftig wäre.

### 3. Metallbeschichtete Rollos innenliegend, Fenster gekippt

Werden zur Verschattung innenliegende Rollos genutzt, erlauben diese in Bezug auf die natürliche Lüftung lediglich, das Fenster in Kippstellung zu bringen. Ist das Fenster um 10° gekippt ergibt eine Berechnung der wirksamen Öffnungsfläche  $A_w$  nach Hall (2004:109ff) über die für den Luftwechsel wirksame Fläche eine mögliche LWR für diesen Fall von 3,5/h (Berechnung: siehe Anhang III.IV).

Bei dieser innenliegenden Verschattungsvorrichtung wird ein Teil der Strahlung abhängig vom Reflexionskoeffizienten des Glases reflektiert, ein weiterer Teil wird von dem Rollo reflektiert, der Rest wird abhängig vom Absorptionskoeffizienten des Rollos absorbiert und abgestrahlt. Diese Wärmestrahlung kann abhängig von der Verglasung nicht oder zum Teil wieder nach außen gelangen. Das Rollo sollte aufgrund der Metallbeschichtung einen großen Teil der Strahlung reflektieren, dennoch zeigten die Simulationsergebnisse, dass es im Innenraum bei Verwendung dieser Verschattungselemente sehr

warm wird. Weitere Forschung könnte erfolgen, um detailliert zu betrachten, wie diese Verschattung in Energy Plus simuliert wird und ob es Möglichkeiten gäbe, sie effektiver einzusetzen.

### 4. Markise geschlossen, Fenster geöffnet

Markisen ermöglichen eine Verschattung der Fläche auch bei geöffnetem Fenster. Für diese Variante wurde daher eine LWR von 7/h angenommen. Eine Markise reflektiert einen Teil der eintreffenden Solarstrahlung, ein weiterer Teil durchdringt das Material abhängig von seinen Eigenschaften. Der restliche Anteil wird absorbiert und als Wärmestrahlung wieder abgegeben. Da das Material einer Markise

eine vergleichsweise geringe Dichte hat, heizt sich der Stoff durch solare Einstrahlung extrem schnell auf (siehe Abb. 137). Die Simulation zeigt, dass ein großer Teil der Wärmestrahlung, die dadurch vom Material ausgeht, in den dahinter liegenden Raum gelangt.

### 5. Gardine geschlossen, Fenster geöffnet

Ist ein Fenster geöffnet und eine Gardine geschlossen ist eine LWR von 7/h möglich. Eine Gardine reflektiert einen Teil der Strahlung, ein weiterer Teil durchdringt das Material und gelangt abhängig vom Material als IR-Strahlung in den Raum. Der Rest wird absorbiert und als Wärmestrahlung in beide Richtungen, nach innen und außen, abgegeben.

Variante	Verschattungselement	Bedienung der Verschattung	LWR	Verglasung	
0	ohne	-	7/h	Fenster geöffnet	
1	1 a	Klappläden	geschlossen wenn die Sonne scheint	7/h	Fenster geöffnet
	1 b	Klappläden	geschlossen, wenn Sonne auf Fassade scheint	7/h	Fenster geöffnet
2 / 2a	Rollläden	geschlossen wenn die Sonne scheint	0,5/h	SSV / WSV Fenster geöffnet	
3	metallbeschichtetes Rollo	geschlossen, wenn die Sonne scheint	3,5/h	EV / SSV / WSV	
4	Markise	geschlossen, wenn die Sonne scheint	7/h	Fenster geöffnet WSV, SSV	
5	Gardine, weiß, 11% Transparenz	geschlossen, wenn die Sonne scheint	7/h	Fenster geöffnet WSV, SSV	

Abb. 143. Simulierte Varianten der Verschattungselemente und Bedienung, Referenzgebäude mit einer Ausrichtung der Straßenfassade nach Süden (Kennwerte für die Verglasungen: DIN EN 14501 Anhang A Tab A.1 bis A.8, Kennwerte für die Verschattungen: PRIMERO Komfort)

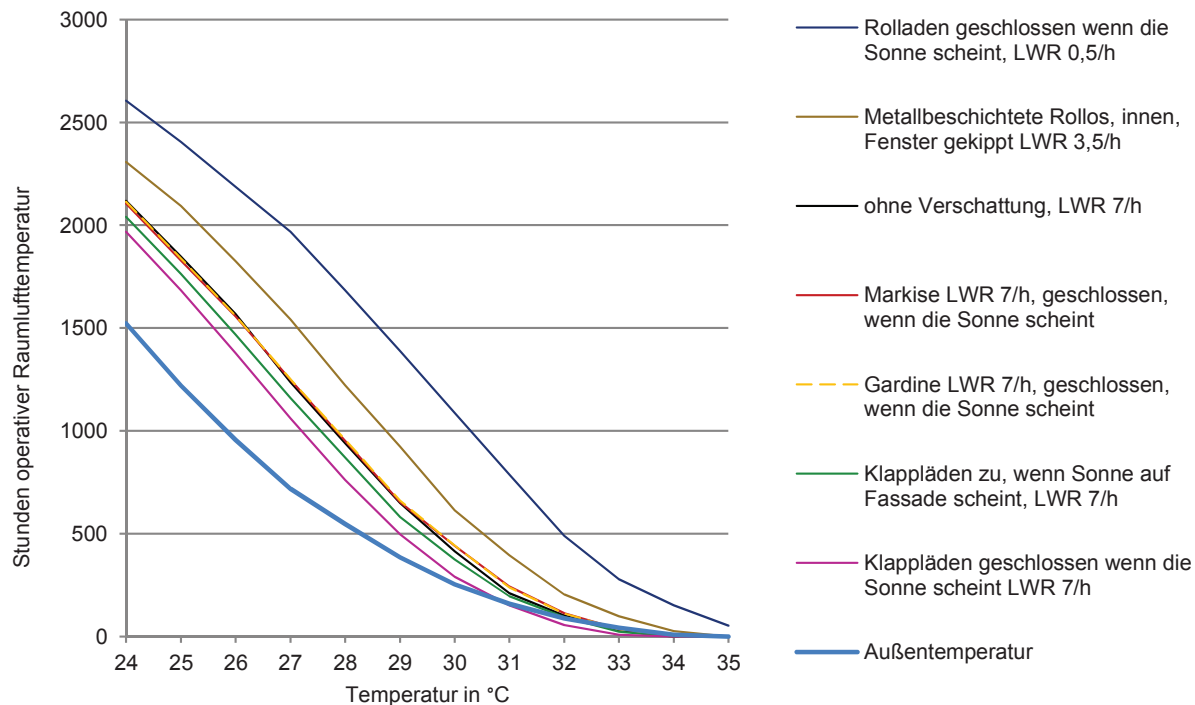


Abb. 144. Operative Raumlufttemperatur im Obergeschoss des Referenzgebäudes, Stunden pro Jahr, Vergleich unterschiedlicher Verschattung der Fenster mit Einfachverglasung

Die Ergebnisse der Simulationen zeigen, dass die Innenraumtemperaturen am geringsten ausfallen, wenn die Verschattungselemente Klappläden sind, welche immer geschlossen bleiben, wenn die Sonne scheint. Eine Ursache ist die durch die Lamellen der Klappläden mögliche LWR und der geringe Bedarf an Kunstlicht, so dass dieses den Raum nicht noch zusätzlich weiter aufheizt. Ein Vergleich mit unterschiedlicher Verglasung wurde für diese Variante

nicht berechnet, da bei einer SSV die Fenster geschlossen sein müssten und damit die durch die Lamellen mögliche Lüftung unterbinden würden. Bei geschlossenen Lamellen hingegen ist eine SSV ohne Auswirkungen, da die Solarstrahlung gänzlich abgehalten wird. Abb. 145 zeigt die Simulationsergebnisse für die Variante 1a. Es wird deutlich, dass auch bei dieser Verschattung die solaren Einträge gegenüber den internen Gewinnen dominieren. Am

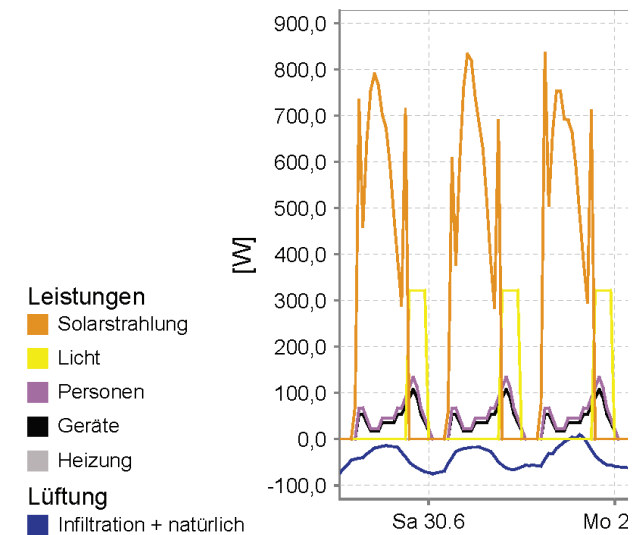


Abb. 145. Darstellung der Wärmeeinträge durch solare Einstrahlung und durch interne Gewinne (Licht, Personen, Geräte) bei einer Verschattung mit Klappläden, geschlossen wenn die Sonne scheint

höchsten liegen die simulierten Temperaturen im Innenraum, wenn die Rollläden immer geschlossen werden, wenn die Sonne scheint (siehe Abb. 144). Dies liegt zum Teil an der geringen LWR, die durch die geschlossenen Rollläden verursacht wird. Doch weitere Simulationen ergaben, dass die Rollläden auch ohne Einfluss der LWR (Abb. 146) von allen untersuchten Varianten die ungünstigste sind.



Das hat seine Ursache vor allem darin, dass die vom Rollladen ausgehende Wärmestrahlung durch die EV fast ungehindert in den Raum gelangt. Zusätzlich sind die internen Wärmegewinne durch Kunstlicht höher als bei den anderen Verschattungselementen, denn die Rollläden lassen kaum Tageslicht in den Raum. Dies ist aufgrund der vorher festgelegten Rahmenbedingungen für alle Simulationen jedoch nicht der maßgebliche Einfluss, denn die Beleuchtung wurde für alle simulierten Varianten mit nur  $3,6 \text{ W/m}^2$  angenommen. Die Simulation zeigt, dass die Wärmestrahlung, die von einem Rollladen nach innen ausgeht, durch eine Verglasung mit geringerem g-Wert reduziert werden kann (siehe Abb. 147).

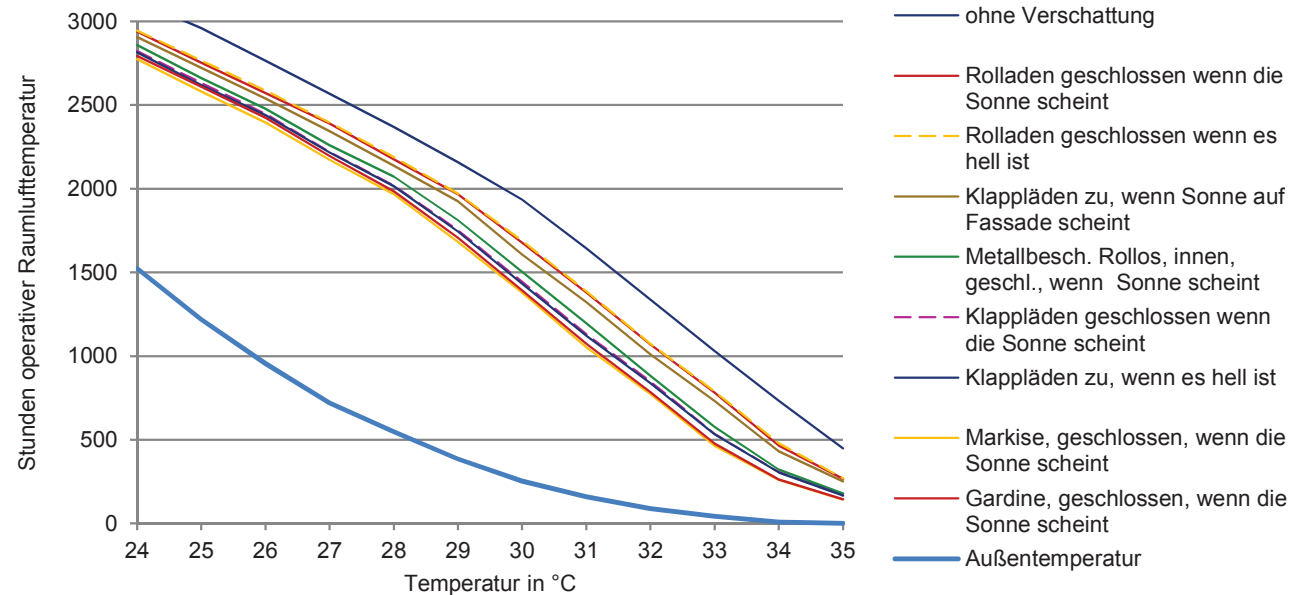


Abb. 146. Operative Raumlufttemperatur im Obergeschoss des Referenzgebäudes, Stunden pro Jahr, Vergleich unterschiedlicher Verschattung der Fenster mit Einfachverglasung ohne Einfluss der LWR

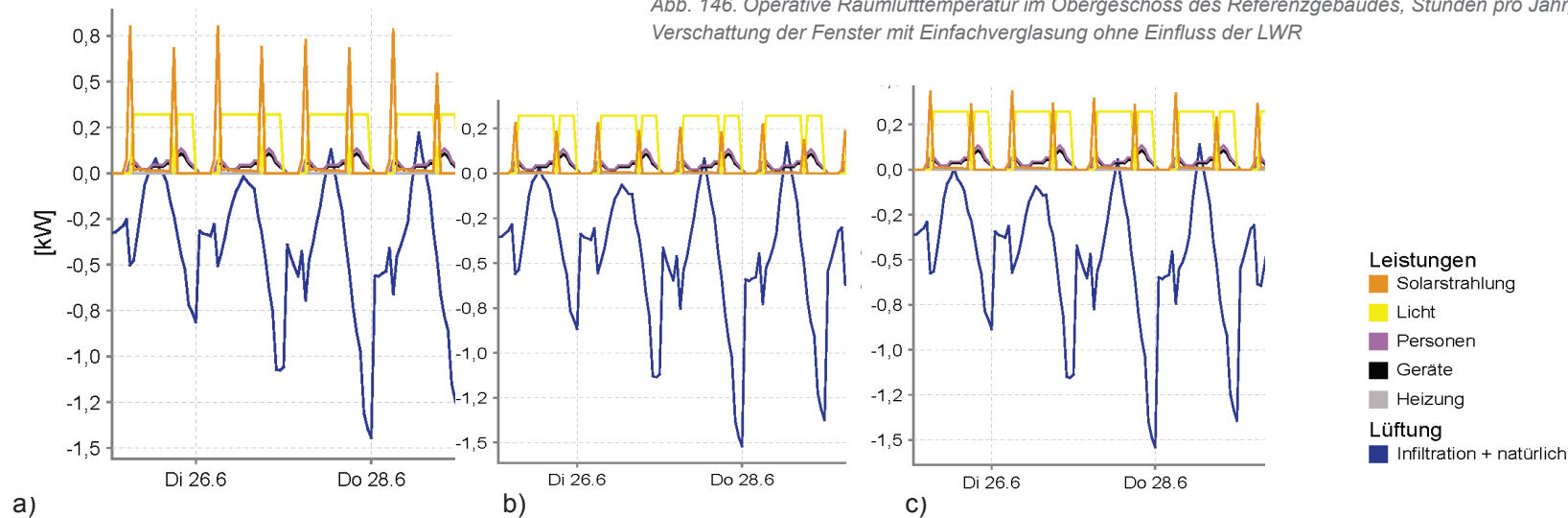


Abb. 147. Wärmeeinträge durch solare Einstrahlung und durch interne Gewinne bei einer Verschattung der Fenster mit außenliegenden Rollläden bei a) EV, b) SSV und c) WSV

Im Vergleich mit den Rollläden ist bei den innenliegenden metallbeschichteten Rollos der Effekt entgegengesetzt. Durch die EV dringt zunächst mehr Solarstrahlung in den Raum, als bei einer WSV oder SSV (siehe Abb. 149). Doch obwohl ein metallbeschichtetes Rollo einen großen Teil der einfallenden langwelligigen Strahlung reflektiert, erwärmt sich das Material. Ein niedriger g-Wert der Verglasung hindert die vom Rollo ausgehende Wärmestrahlung daran, den Raum zu verlassen, so dass die Innenraumtemperaturen bei diesen Varianten höher liegen als bei einer EV (siehe Abb. 148) Für beide Varianten der Verschattung ist in Bezug auf die Innenraumtemperaturen die SSV günstiger als die WSV, welche die Wärmestrahlung noch stärker als die SSV daran hindert, aus dem Raum heraus abgestrahlt zu werden.

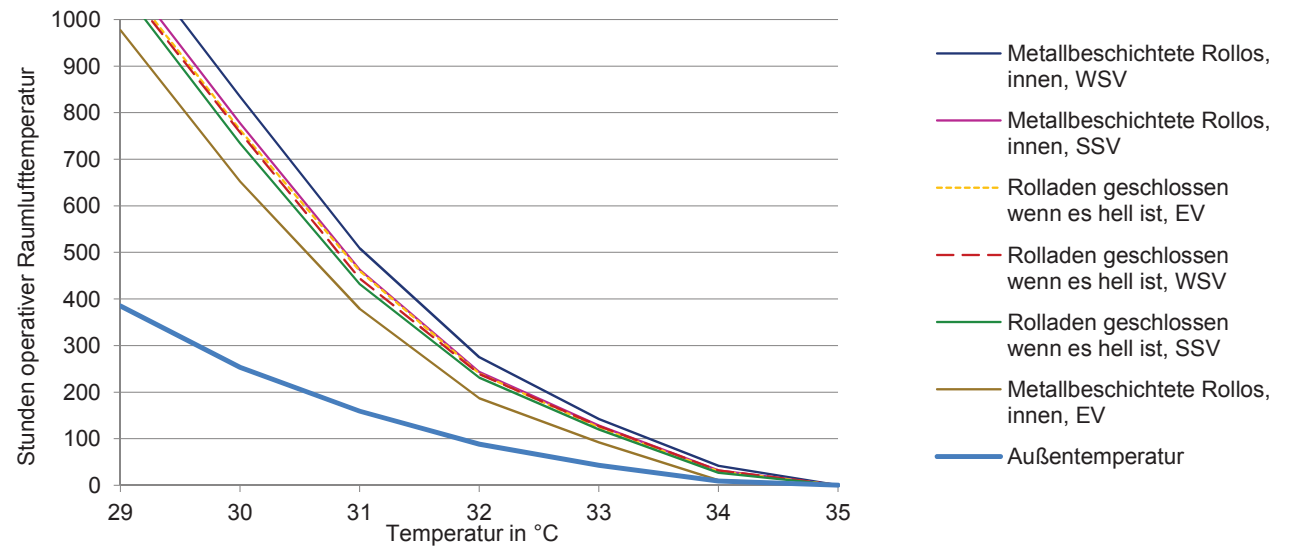


Abb. 148. Einfluss der Verglasung auf die Innenraumtemperaturen in Kombination mit innenliegender Verschattung durch metallbeschichtete Rollos und außenliegender Verschattung durch Rollläden

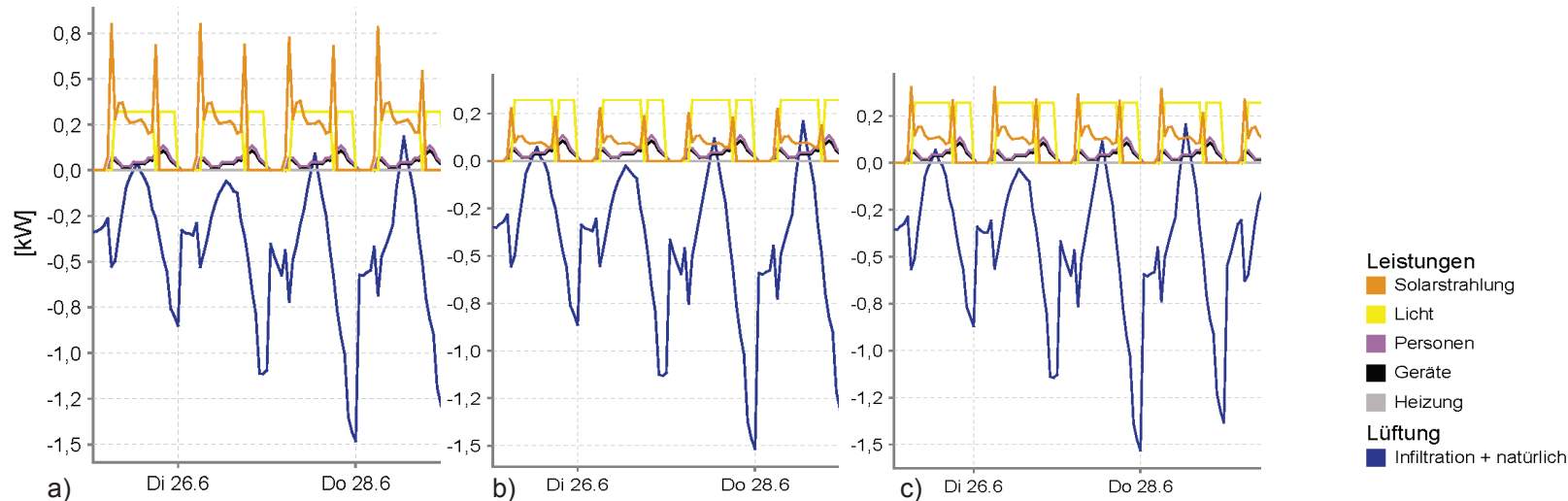


Abb. 149. Wärmeeinträge durch solare Einstrahlung und durch interne Gewinne bei einer Verschattung der Fenster mit innenliegenden metallbeschichteten Rollos bei a) EV, b) SSV und c) WSV

Das Simulationsergebnis für die Varianten 4) Gardinen und 5) Markisen war zunächst überraschend. Beide Verschattungselemente haben bei einer LWR von 7/h fast gleiche Auswirkungen auf die Innenraumtemperaturen, obwohl eine Markise die einfallende Solarstrahlung zum großen Teil von einem Fenster fernhalten kann.

Eine Berechnung der  $F_C$ -Werte für diese Varianten nach der DIN EN 13363 zeigte, dass die Werte für eine außenliegende Markise und eine innenliegende Gardine bei einer EV fast gleich sind ( $F_{C \text{ Markise} + EV} = 0,27$  und  $F_{C \text{ Gardine} + EV} = 0,31$ ). Offenbar dringt die Wärmestrahlung, die von der Markise ausgeht, zum großen Teil durch das Fenster mit einer EV. Ebenso kann die von der Gardine ausgehende Wärmestrahlung durch die EV wieder nach außen abgestrahlt werden.

Abb. 150 zeigt die Innenraumtemperaturen, die bei einer Verschattung mit Markisen oder Gardinen bei unterschiedlicher Verglasung ohne Einfluss der LWR berechnet wurden. Bei der Verschattung mit der Markise sind die Ergebnisse fast identisch, unabhängig davon ob eine WSV oder eine SSV angenommen wird. Der  $F_C$  - Wert beträgt in beiden Fällen 0,30. Bei der Gardine hingegen sind die Temperaturen mit einer WSV ( $F_{C \text{ Gardine}} = 0,53$ ) deutlich höher, da die Wärmestrahlung den Raum nicht mehr verlassen kann. Bei einer SSV ( $F_{C \text{ Gardine}} = 0,74$ ) liegen die Innenraumtemperaturen etwas niedriger.

Ausschlaggebend für die Unterschiede zwischen WSV und SSV ist in diesem Fall die Lage des Verschattungselementes. Für beide Varianten führt eine EV zu einem besseren sommerlichen Wärmeschutz.

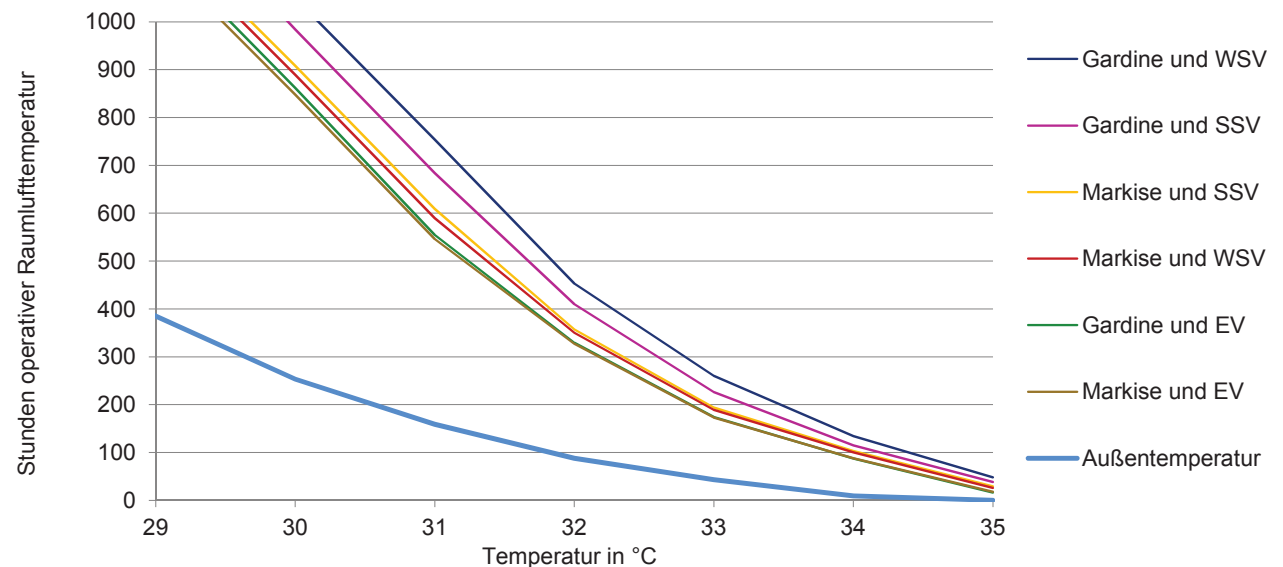


Abb. 150. Einfluss der Verglasung auf die Innenraumtemperaturen in Kombination mit einer Gardine als innenliegender Verschattung oder Markise als außenliegender Verschattung

### 5.3.4 Verschattungselemente - Ergebnisse

#### 1. Ergebnis: Materialien von Verschattungselementen

Die Untersuchung zum Einfluss des Materials auf die Temperaturen, die ein Verschattungselement durch solare Einstrahlung erlangt, konnten zeigen, dass die traditionell verwendeten hölzernen Elemente mit einem hellen Anstrich vorteilhaft sind. Um zu vermeiden, dass ein Baumaterial sich zu stark erhitzt und Wärmestrahlung in einen Raum hinein abgibt sollten zur Verschattung von Fenstern helle Oberflächen bevorzugt werden. Dies gilt im untersuchten Gebiet beispielsweise für die häufig verwendeten außenliegenden Rollläden.

Markisen als außenliegende Verschattungselemente haben den großen Nachteil, dass sich der Stoff durch solare Einstrahlung sehr schnell auf die maximal mögliche Temperatur erwärmt und dadurch Wärmestrahlung abgibt, die sowohl in den Innenraum gelangt, als auch den Aufenthalt unter dem Verschattungselement unangenehm machen kann.

#### 2. Ergebnis: Vergleich unterschiedlicher Verschattungselemente in ihren Auswirkungen auf die Innenraumtemperaturen

Die Simulationen konnten zeigen, dass die an den traditionellen Häusern verwendeten Klapppläden mit verstellbaren Lamellen für das beispielhaft untersuchte Obergeschoss des Referenzgebäudes zu

den niedrigsten Innenraumtemperaturen führen. Klapppläden haben zunächst den Vorteil, dass sie auch bei geschlossenen Läden zur Verschattung nicht die natürliche Lüftung unterbinden. Zudem bieten sie einen Einbruchschutz und stellen daher die Möglichkeit der Lüftung außerhalb der Nutzungszeiten und nachts sicher.

Rollläden dagegen verhindern die natürliche Lüftung und erzeugen zusätzliche interne Wärme-gewinne durch den hohen Bedarf an Kunstlicht. In Verbindung mit einer EV oder geöffneten Fenstern gelangt, abhängig vom Material und der Farbe der Rollläden, ein hoher Anteil an Wärmestrahlung in den Innenraum. Sie verursachen daher die höchsten Innenraumtemperaturen der getesteten Varianten. Die Temperaturen liegen über der ebenfalls simulierten Variante ohne eine Verschattung der Fenster.

Innenliegende metallbeschichtete Rollos erfordern das Schließen der Fenster, um die Verschattung nutzen zu können. Dadurch ist die natürliche Lüftung behindert, da maximal eine Kippstellung der Fenster möglich ist. Auch für diese Variante liegen die Temperaturen höher als ohne eine Verschattung.

Werden die Fenster durch Markisen oder Gardinen verschattet, liegen die Innenraumtemperaturen etwa so hoch, wie bei der Variante ohne Verschattung. Zwar wird direkte solare Einstrahlung ferngehalten, die Verschattungselemente heizen sich jedoch auf und geben Wärmestrahlung an den Raum ab.

#### 3. Ergebnis: Vergleich unterschiedlicher Verglasungen

Für die heute vielfach verwendeten Verschattungselemente wurde der Einfluss unterschiedlicher Verglasungen verglichen. Für die Rollläden konnte durch die Simulationen gezeigt werden, dass eine SSV das Aufheizen des Raumes bei geschlossenen Rollläden vermindert. Die Wärmestrahlung, die das Material abgibt, wird von dieser Verglasung stärker reflektiert. Aufgrund dessen zeigt sich bei den innenliegenden metallbeschichteten Rollos das Gegenteil. Der sommerliche Wärmeschutz ist mit einer EV erstaunlicherweise besser, als bei einer SSV, da die vom Rollo ausgehende Wärmestrahlung umso besser nach außen abgestrahlt werden kann, je höher der g-Wert der Verglasung ist. Die Auswirkungen sind für den untersuchten Fall zwar nicht signifikant, könnten jedoch bei anderen Fensterflächenanteilen deutlicher ausfallen.

Für die Varianten mit einer Markise und mit Gardinen liegen die Innenraumtemperaturen mit einer EV am niedrigsten. In Bezug auf die WSV und SSV zeigte sich der Einfluss der Lage des Verschattungselements. Mit der außenliegenden Markise ist kein Unterschied zwischen den Verglasungen zu erkennen. Wird die innenliegende Gardine zur Verschattung verwendet, liegen die Innenraumtemperaturen mit einer WSV höher als mit einer SSV, da sich die Gardine durch die einfallende Strahlung erwärmt und die Wärmestrahlung durch die WSV nicht wieder nach außen gelangt.

## 5.4 Baumaterialien für Wände und Dächer

Der letzte Abschnitt dieses Kapitels befasst sich mit dem Thema Baumaterialien. Vor allem die für die Außenbauteile verwendeten Materialien haben auf den Komfort im Innenraum einen großen Einfluss und müssen für eine angepasste und ressourcensparende Bauweise bewusst gewählt werden.

Zu diesem Thema wurde zunächst der Einfluss der Farbe der Fassaden betrachtet. Daraus ergab sich, dass die Auswirkungen auf die Temperaturen im Innenraum maßgeblich von der verwendeten Bautechnik abhängen und sich diese Maßnahme zur passiven Klimatisierung nicht 1:1 von den damaligen auf heute üblicherweise verwendete Baumaterialien übertragen lässt.

In einem nächsten Schritt wurde der Einfluss der Temperaturleitfähigkeit von Baumaterialien untersucht. Auch in diesem Zusammenhang zeigte sich, dass ein Kopieren der äußeren Gestalt der traditionellen Bauweise bei Verwendung anderer Materialien nicht unbedingt sinnvolle Ergebnisse hervorbringt.

Es folgt die Beschreibung der Untersuchung des Einflusses der Baumaterialien auf die sommerlichen Innenraumtemperaturen durch Gebäudesimulationen mit PRIMERO Komfort. Für einen Vergleich mit modernen Baumaterialien und den Auswirkungen von Wärmedämmung und/oder Bauteilen mit mehr Masse, wurden für das Obergeschoss des Referenzgebäudes Simulationen unter jeweils

gleichen Rahmenbedingungen für verschiedene Materialien durchgeführt. Der Auswirkung auf den Heizwärmebedarf wurde nur in Bezug auf den Einfluss der Speicherung solarer Gewinne durch massive Bauteile untersucht denn aus der damals verwendeten Bautechnik für die Außenbauteile konnten keine Konzepte für die Heizperiode abgeleitet werden, die sich auf heute übertragen lassen. Aus eben diesen Gründen erfolgte keine weitere Analyse des Erdgeschosses. Dieses wurde zwar im Winter verstärkt genutzt, doch wie bereits in der Einleitung zu diesem Kapitel erwähnt, hat sich die Bautechnik seit der Erbauung dieser Häuser weiterentwickelt und der Komfortanspruch verändert.

Schließlich wurde noch untersucht, ob die verwendeten Baumaterialien einen Einfluss darauf haben, bei welchen Außentemperaturen die Fenster für eine optimale natürliche Lüftung geöffnet und geschlossen werden sollten.

Ein wichtiges Thema im Zusammenhang mit der Verwendung von Baumaterialien ist der Effekt städtischer Wärmeinseln (UHI - Urban Heat Island Effect). Der UHI-Effekt beschreibt das Auftreten von Gebieten im städtischen Raum, die eine höhere Temperatur als in der Umgebung der Stadt aufweisen. Materialien, die sich erwärmen und die Wärme speichern sind dabei maßgebliche Größen. Der Effekt kann in Spitzen bei über 10 K Temperaturdifferenzen liegen (Matzarakis, 2001:53). Einer Überhitzung im Sommer kann eine entsprechende

Materialwahl entgegenwirken, z.B. die Entsiegelung versiegelter Flächen, offene Versickerung und Dachbegrünungen (vgl. Hegger, 2010). Der UHI-Effekt ist in Thessaloniki jedoch eher gering einzustufen (Giannaros, 2010:991). Er liegt mit 2 bis 4 K im Bereich europäischer Kleinstädte (Ministerium für Verkehr und Infrastruktur Baden-Württemberg, 2012:2.3) und nimmt bei zunehmender Windgeschwindigkeit ab (Fezer, 1995:57). Bei Windstärken ab 4 m/s tritt der UHI-Effekt nicht mehr auf (Ebd., 2012:103). Daher wurde das Phänomen in den Untersuchungen dieser Arbeit nicht weiter berücksichtigt.



#### 5.4.1 Einfluss der Farbe der Oberfläche einer Fassade

Ebenso wie das verwendete Baumaterial haben die Farbe und Beschaffenheit von den Oberflächen einer Fassade Einfluss auf die Temperaturen im Innenraum. Bei der verwendeten Simulationssoftware wird die Rauigkeit der Oberfläche als Konstante für den Wärmeübergangswiderstand bei der U-Wert Berechnung berücksichtigt. Der Einfluss durch unterschiedliche Luftströmung an der Oberfläche der Fassade ist jedoch je nach Rauigkeit unterschiedlich. Dies wird in der Simulation nicht erfasst. In der Regel kann davon ausgegangen werden, dass eine dunkle Oberfläche mit einer hohen Rauigkeit sich wesentlich stärker aufheizt, als eine glatte helle Oberfläche. Je geringer die Rauigkeit der Oberfläche, desto stärker wird der Windeinfluss als maßgeblicher Faktor für die Erwärmung der Fassade. Bei einer sehr hohen Rauigkeit hat üblicherweise die Farbe den stärkeren Einfluss. Im Rahmen dieser Arbeit wurde keine quantitative Analyse dieser Faktoren durchgeführt, da eine solche Untersuchung sich zu weit in andere Forschungsbereiche erstrecken würde.

Der Einfluss solarer Einstrahlung wird durch drei Faktoren bestimmt: der Absorption, der Reflexion und dem Emissionsvermögen eines Materials. Das Absorptionsvermögen ist proportional zum Emissionsvermögen. Daraus ergibt sich, dass

Oberflächen mit einem hohen Vermögen solare Strahlung aufzunehmen auch ein gutes Vermögen zur Abstrahlung haben. Das Emissionsvermögen wird in  $W/m^2K$  angegeben und gibt die spezifische Wärmestrahlung eines Körpers im Vergleich zu einem schwarzen Körper (Emissionsgrad 100%) an. Metalloberflächen haben generell ein geringes Emissionsvermögen, also auch einen kleineren Emissionsgrad, als z.B. eine Putzoberfläche.

Je größer die Absorption der solaren Einstrahlung durch das Material, desto höher ist der Wärmeinput, je stärker die Reflexion, desto geringer ist dieser. Helle Farben reflektieren stärker als dunkle Farben. Eine Studie durch Kolokotroni (1990:302) zeigte durch Gebäudesimulationen für die Räume eines Referenzgebäudes für die vier Klimazonen Griechenlands, dass die Innenraumtemperaturen im Sommer bis zu  $2\text{ }^{\circ}C$  abgesenkt werden können, wenn der Absorptionskoeffizient der Oberfläche von 0,9 auf 0,1 (reines weiß) reduziert wird. Leider wird nicht angegeben, auf welche Konstruktion der Außenwände sich dieser Wert bezieht und wie groß dieser Effekt bei höheren und realistischen Absorptionskoeffizienten ist.

Auf welche Temperatur sich die Oberfläche erwärmt hängt zudem von dem Winkel der Einstrahlung, also der Orientierung einer Fassade ab. Givoni (1998:74ff) stellt dar, dass diese maximale Temperatur unabhängig von der Lufttemperatur sei. Diese Aussage konnte durch die Untersuchungen

zum Einfluss der Farbe der Verschattungselemente widerlegt werden (siehe Abschnitt 5.3.1).

Ist die Oberfläche einer Fassade der Sonne ausgesetzt summieren sich die beiden Faktoren (Lufttemperatur und solare Einstrahlung), scheint die Sonne jedoch nicht, wird sich die Temperatur der Oberfläche an die Lufttemperatur angleichen.

Experimente und Berechnungen zum Einfluss der Farbe einer Fassade auf die Temperatur der Baumaterialien in Haifa, Israel konnten zeigen, dass die Oberflächentemperatur an der Innenseite einer weißen Dachfläche (Sandwichdecke aus Faserzement mit innenliegender 3 cm Polystyrol-dämmung) etwa  $1\text{ }^{\circ}C$  unter der Außentemperatur lag. Bei einer grauen Dachfläche lag die Oberflächentemperatur an der Innenseite hingegen bis  $4,5\text{ }^{\circ}C$  über der Außentemperatur. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen werden so interpretiert, dass geweißte Fassaden für nicht künstlich klimatisierte Gebäude in heißen Regionen wichtig seien. Für klimatisierte Gebäude und winterkalte Standorte sei hingegen eine gute Wärmedämmung notwendig (Ebd., 1998:74ff).

Bei diesen Betrachtungen wird der Einfluss der Baukonstruktion wenig berücksichtigt. Dieser mag jedoch für die Auswirkung der Farbe der Fassaden auf die Innenraumtemperaturen der entscheidende Faktor sein. Bei Flächen, welche auf der Außenseite mit einer Wärmedämmung versehen sind, nimmt

der Einfluss durch die Farbe der Oberfläche ab, je effizienter die Dämmung ist, da diese das Aufheizen der Konstruktion vermindert oder gänzlich verhindert.

Für die traditionellen Gebäude in Thessaloniki mit der leichten Bauweise im Obergeschoss, welches als Sommergeschoss genutzt wurde, ist die helle Farbe ein Faktor, der das Überhitzen der Räume vermindert. Für den Winter reduziert die helle Fassade jedoch die Ausnutzung der solaren Strahlung zum Heizen der Räume. Dies wurde in Kauf genommen, weil der Raum für die Nutzung im Sommer optimiert wurde. Daher ist es jedoch kein Konzept zum sommerlichen Wärmeschutz, welches sich auf moderne Gebäude übertragen lässt, wenn diese eine außen gedämmte Fassade besitzen und die Räume unabhängig von der Jahreszeit genutzt werden.



*Abb. 151. Neubauten in der Oberstadt von Thessaloniki, Kubatur an die traditionelle Bebauung angelehnt aber Nutzung anderer Baustoffe (eigene Aufnahmen, 2010 und 2012)*

## 5.4.2 Einfluss der Temperaturleitfähigkeit von Baumaterialien

Da abhängig von der Temperaturleitfähigkeit einer Konstruktion die solaren Einträge durch die Sonne auf die Fassade unterschiedlich schnell in den Innenraum geleitet werden, wurden die in der traditionellen Bauweise verwendeten Materialien mit den heute vorwiegend verwendeten Baumaterialien (siehe Abb. 151) verglichen. Die Temperaturleitfähigkeit wird in  $\text{m}^2/\text{s}$  angegeben und ist definiert als:

$$\alpha = \lambda / \rho * c \quad (12)$$

mit:  $\lambda$  = Wärmeleitfähigkeit;  $\rho$  = Dichte; und  $c$  = spezifische Wärmekapazität (Lutz, 2002:139).

In den Abbildungen 153 bis 156 werden für unterschiedliche Konstruktionen der Außenwand die jeweilige Temperaturamplitudendämpfung und die Phasenverschiebung gezeigt. Die Temperaturamplitudendämpfung zeigt an, wie stark die Temperatur zwischen der inneren und der äußeren Oberfläche des Bauteils schwankt. Die Phasenverschiebung ist als Zeitraum zwischen der maximalen Temperatur auf der äußeren Oberfläche und der inneren angegeben (Plag, U-Wert Rechner).

Der Baustoff Beton (wie bei den Gebäuden in Abb. 153 für Außenbauteile verwendet) hat durch seine physikalischen Eigenschaften eine hohe Temperaturleitfähigkeit. Dadurch beträgt die Phasen-

Baustoff <sup>(1)</sup>	Temperaturleitfähigkeit in $10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$	Temperaturamplituden- dämpfung <sup>(2)</sup>	Phasenverschiebung in h <sup>(2)</sup>
15 cm Beton, armiert $\rho = 2300 \text{ kg/m}^3$ , $\lambda = 2,3 \text{ W/mK}$ , $c = 1000 \text{ J/kg K}$	1,13	1,2	2,5 h
10 cm Ziegelmauerwerk (moderne Konstruktion) $\rho = 1800 \text{ kg/m}^3$ , $\lambda = 0,81 \text{ W/mK}$ , $c = 1000 \text{ J/kg K}$	0,45	1,2	2,8 h
10 cm Bauholz $\rho = 500 \text{ kg/m}^3$ , $\lambda = 0,13 \text{ W/mK}$ , $c = 1600 \text{ J/kg K}$	0,16	3,1	7,0 h
10 cm Ziegelmauerwerk (trad. Konstruktion) $\rho = 1600 \text{ kg/m}^3$ , $\lambda = 0,68 \text{ W/mK}$ , $c = 1000 \text{ J/kg K}$	0,43	1,2	3,0 h
Außenwand Referenzgebäude in traditioneller Bauweise <sup>(3)</sup>	-	1,7	4,8 h

<sup>1</sup> Kennwerte nach DIN 12524, Tab 13 und DIN 4108-4, Tab 1, <sup>2</sup> nach U-Wert.net, <sup>3</sup> Bauteilaufbauten siehe Anhang

Abb. 152. Kennwerte zur Berechnung der Temperaturleitfähigkeit unterschiedlicher Baumaterialien

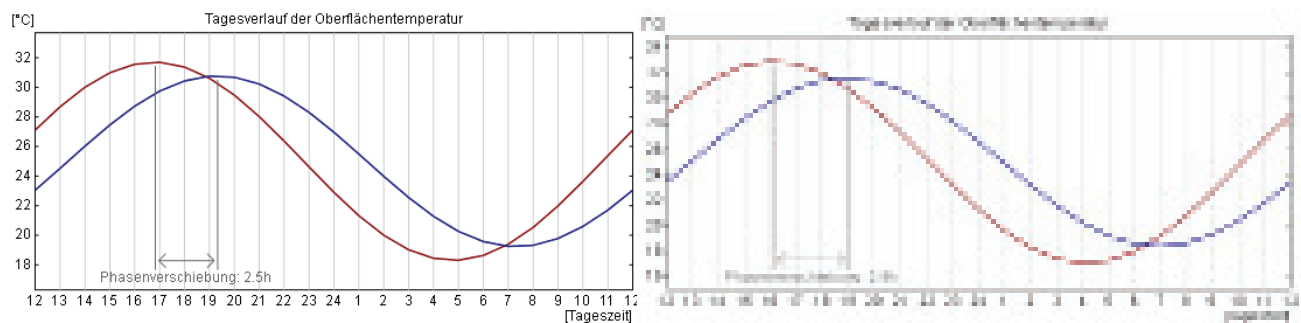


Abb. 153. Temperaturverlauf an der Oberfläche einer Beton-Außenwand (li.) und einer Wand aus Ziegelmauerwerk (re.) bei einem Tagesverlauf der Außentemperatur zwischen 20 und 30 °C (nach: U-Wert Rechner)

verschiebung nur 2,5 h. Dies kann durch eine höhere Wandstärke, in der Praxis aber wohl eher durch ein Dämmmaterial auf der Fassade ausgeglichen werden. Der Temperaturverlauf an der Oberfläche der Außenwände mit 10 mm Außendämmung zeigt, dass schon diese geringe Dämmstärke auf der Außenseite der Konstruktion die Unterschiede der Materialeigenschaften in Bezug auf die Phasenverschiebung minimiert. Für die traditionelle Konstruktion beträgt die Phasenverschiebung fast 5 h. Die geringere Temperaturleitfähigkeit des Ziegelmauerwerks und der Holzständer führt dazu, dass die Oberflächentemperatur innen ihren Höhepunkt erst erreicht, wenn die Außentemperatur am Abend schon deutlich abgesunken ist. Daher fällt die maximale Temperatur auf der Innenseite niedriger aus, als bei der Wand aus Beton. Die im folgenden Abschnitt dargestellten Simulationen konnten diese Ergebnisse bestätigen.

Ein einfaches Übertragen der äußeren Gestalt einer traditionellen Bauweise in unsere heutigen modernen Baumaterialien ist also nicht unbedingt sinnvoll. Werden andere Baumaterialien verwendet, muss analysiert werden, welche Auswirkungen das nach sich zieht. Bei der Bebauung in der Oberstadt von Thessaloniki ist dies bei Bau von Gebäuden in den letzten Jahrzehnten (Bsp. in Abb. 151), die sich zwar optisch einfügen aber mit anderen Materialien gebaut wurden, nicht unbedingt berücksichtigt worden.

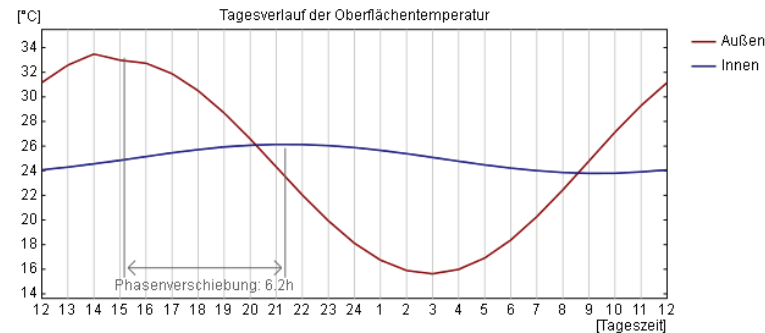


Abb. 154. Temperaturverlauf an der Oberfläche der Beton-Außenwand mit 10 mm Außendämmung, WLG 0,30, Tagesverlauf der Außentemperatur zwischen 20 und 30 °C (nach: U-Wert Rechner)

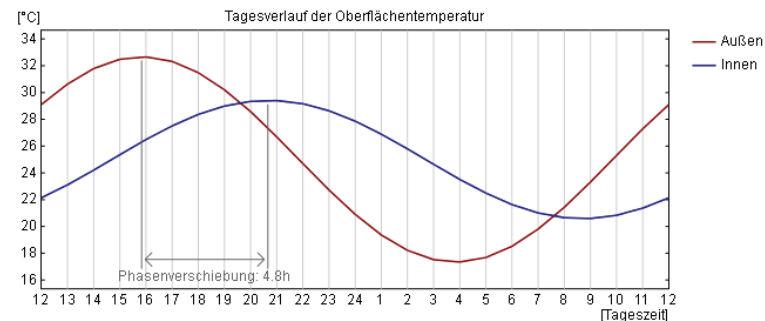


Abb. 155. Temperaturverlauf an der Oberfläche der Außenwand des Referenzgebäudes, Tagesverlauf der Außentemperatur zwischen 20 und 30 °C (nach: U-Wert Rechner)

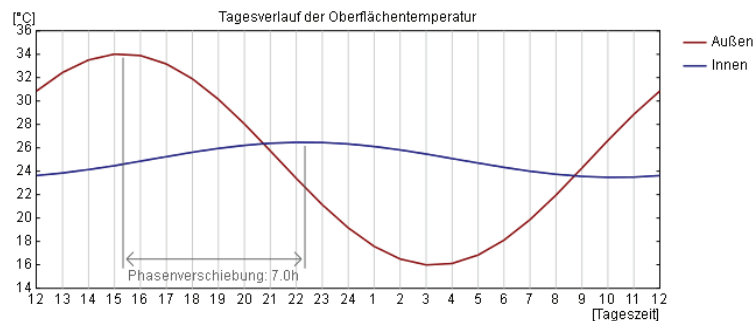


Abb. 156. Temperaturverlauf an der Oberfläche der Außenwand des Referenzgebäudes mit 10 mm Außendämmung, WLG 0,30, Tagesverlauf der Außentemperatur zwischen 20 und 30 °C (nach: U-Wert Rechner)

### 5.4.3 Vergleich des Einflusses

unterschiedlicher Baumaterialien auf den sommerlichen Wärmeschutz

Um für den Sommer den Einfluss der Baumaterialien auf die Temperaturen im Obergeschoss des Referenzgebäudes zu erfassen, wurden Varianten mit unterschiedlichen Materialien mit der Gebäudesimulationssoftware gerechnet (siehe Abb. 157). Für alle Varianten wurde dieselbe Regelung der Verschattung (Klappläden, zu wenn die Sonne scheint) angenommen. Die Luftwechselrate wurde für einen ungünstigen Fall von 3/h (Tag mit sehr wenig Wind und/oder ungeschicktes Nutzerverhalten) und zum Vergleich mit 7/h (realistischer Wert nach Analyse aus Kapitel 5.1.7) berechnet.

Abb. 158 zeigt die Stunden, für die lt. Simulationsergebnis bei einer LWR von 7/h bei unterschiedlichen Baumaterialien die jeweilige Temperatur im Innenraum des Obergeschosses herrscht. Zum Vergleich wurden diese Varianten auch für eine LWR von 3/h gerechnet. Die Kurven verlaufen in der grafischen Darstellung fast identisch parallel (Abb. im Anhang, III.VI). Die unterschiedlichen LWR haben in diesem Vergleich verschiedener Materialien keinen Einfluss auf das Ergebnis.

Variante	Baumaterialien	Decke	Außenwand
0	traditionell	ungedämmt	ungedämmt
1	traditionell	12 cm Dämmung auf der obersten Geschossdecke, 0,065 W/mK	ungedämmt
1a	traditionell	12 cm Dämmung auf der obersten Geschossdecke, 0,065 W/mK	Außendämmung, 8 cm, 0,03 W/mK
1b	traditionell	12 cm Dämmung auf der obersten Geschossdecke, 0,065 W/mK	Innendämmung, Kork 2 cm, 0,045 W/mK
1c	traditionell	12 cm Dämmung auf der obersten Geschossdecke, 0,065 W/mK	Innendämmung, 6 cm, 0,03 W/mK
2	Beton, Kubatur und Wandstärken wie 0	ungedämmt	ungedämmt
2a	Beton, Kubatur wie 0, Wände 30 cm	Beton und 12 cm Außendämmung, 0,065 W/mK	ungedämmt
2b	Beton, Kubatur und Wandstärken wie 0	Beton und 12 cm Außendämmung, 0,065 W/mK	Außendämmung, 8 cm, 0,03 W/mK
2c	Beton, Kubatur und Wandstärken wie 0	Beton und 12 cm Außendämmung, 0,065 W/mK	ungedämmt
2d	Beton, Kubatur und Wandstärken wie 0	Beton und 2 cm Innendämmung, W/mK	Außendämmung, 2 cm, 0,03 W/mK
3	Lehmziegel, 1200 kg/m <sup>3</sup> , Kubatur und Wandstärken wie 0	Lehmschüttung 12 cm, 500 kg/m <sup>3</sup>	ungedämmt
3a	Lehmziegel, 1200 kg/m <sup>3</sup> , Kubatur wie 0, Wandstärke 30 cm	Lehmschüttung 12 cm, 500 kg/m <sup>3</sup>	ungedämmt
4	wie 2 + massive Decken und Boden (20cm Stb)	12 cm Dämmung auf der obersten Geschossdecke, 0,065 W/mK	Außendämmung, 8 cm, 0,03 W/mK
5	wie 0 + massive Decken und Boden (20cm Stb)	ungedämmt	ungedämmt

Abb. 157. Untersuchte Varianten mit der Gebäudesimulationssoftware PRIMERO Komfort zum Erfassen des Einflusses der Baumaterialien auf den sommerlichen Wärmeschutz, Variante 0 entspricht dem Referenzgebäude



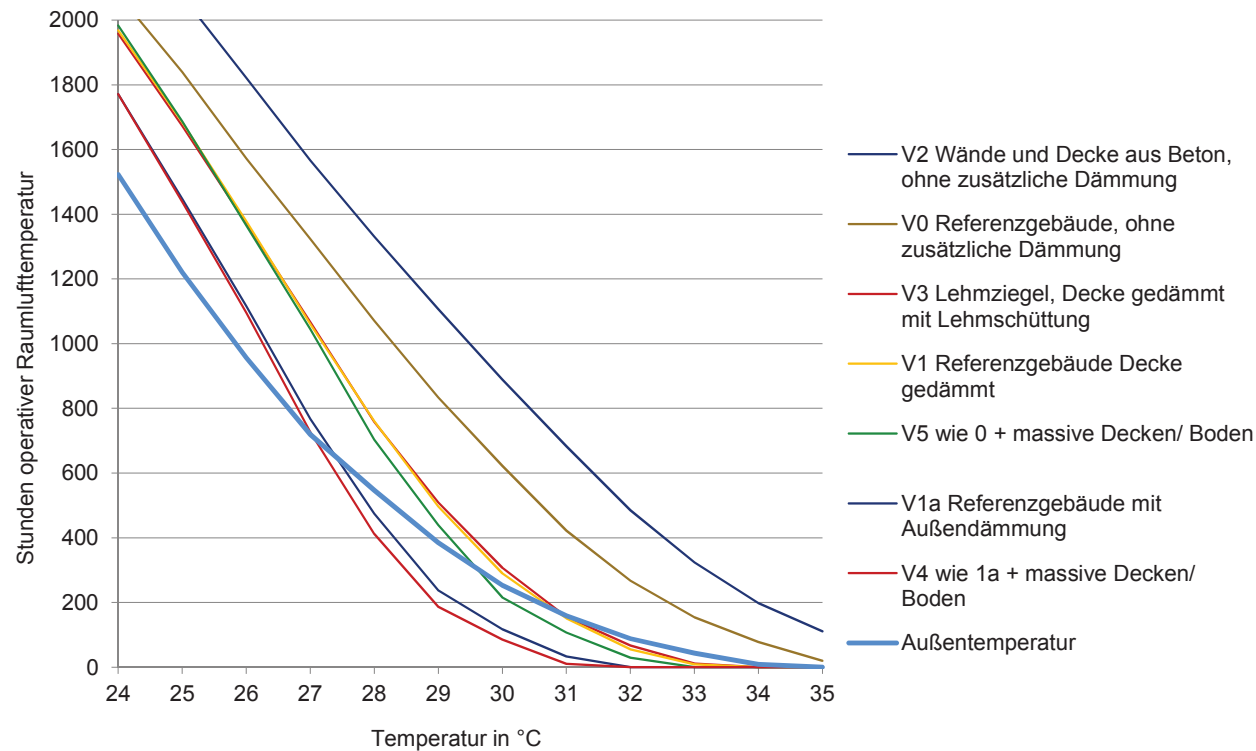


Abb. 158. Stundenzahl der operativen Raumlufttemperatur im Innenraum Obergeschoss des Referenzgebäudes pro Jahr, Vergleich unterschiedlicher Baumaterialien bei gleicher Kubatur, gleichen Verschattungselementen und einer LWR von 7/h

#### 5.4.4 Beton als Baumaterial

In der Darstellung von Abb. 158 fällt zunächst das Ergebnis für die Variante 2 auf. Die Innenraumtemperaturen fallen bei dem simulierten Gebäude aus ungedämmtem Beton deutlich höher aus als in dem ebenfalls ungedämmten Referenzgebäude. Ursache ist vor allem die hohe Temperaturleitfähigkeit des Betons, welche die Wärme von außen schnell in das Innere des Gebäudes leitet. Dieses Ergebnis ist besonders wichtig in Bezug auf die Übertragbarkeit der Konzepte zur passiven Klimatisierung auf bestehende Gebäude in Thessaloniki, da ein großer Teil des Gebäudebestands aus ungedämmten Betonkonstruktionen besteht. Maßnahmen, die sich aus den Untersuchungen zur Lüftung, Orientierung und der Verschattung ableiten lassen, sollten daher nicht an diesen Gebäuden angewendet werden, ohne den Einfluss der Baumaterialien zu berücksichtigen.

Um den Effekt genauer zu untersuchen wurden Simulationen für das Referenzgebäude aus Beton mit unterschiedlichen Dämmmaterialien durchgeführt (siehe Abb. 159). Ohne jegliche Dämmung wird es sehr warm in Innenraum, schon eine geringe Dämmstärke von 2 cm an den Außenwänden zeigt einen deutlichen Unterschied zu einer ungedämmten Konstruktion. Die Temperaturen im Innenraum liegen noch niedriger, wenn die Außenwandstärke auf 30 cm erhöht wird.

Bezieht man auch das Dach mit ein, führen von den getesteten Varianten eine Außendämmung an Decke und Außenwänden, bezogen auf die Innenraumtemperaturen im Sommer, zu den besten Ergebnissen für den Komfort.

Das Ergebnis ist in Bezug auf den angenommenen Fensterflächenanteil des Referenzgebäudes von 20% zu interpretieren, welcher ein wichtiger Einflussfaktor ist. Dieser ist in dieser Untersuchung nicht variiert worden, denn die untersuchten Beispielgebäude weisen alle einen ähnlichen Fensterflächenanteil auf. Eine Beschäftigung mit diesem Faktor hätte daher nicht weitergeführt, um Konzepte der passiven Klimatisierung dieser traditionellen Bebauung zu erkennen und auf ihre Übertragbarkeit zu prüfen.

#### 5.4.5 Traditionelle Baumaterialien

Das Referenzgebäude wurde zunächst ohne jegliche Dämmung simuliert (Variante 0), da die für diese Arbeit vorliegenden Zeugnisse über die traditionelle Bauweise keine Hinweise auf den Einsatz von Dämmmaterialien zeigten. Daher erstaunte bei der Simulation das Ergebnis mit einer gedämmten obersten Geschossdecke (Variante 1). Diese Maßnahme hat in Bezug auf den sommerlichen Wärmeeintrag eine große Wirkung, zusätzlich senkt sie im Winter den Heizwärmebedarf. Die Dämmung der Decke bewirkt, dass die Innenraumtemperaturen bei hohen Außentemperaturen von

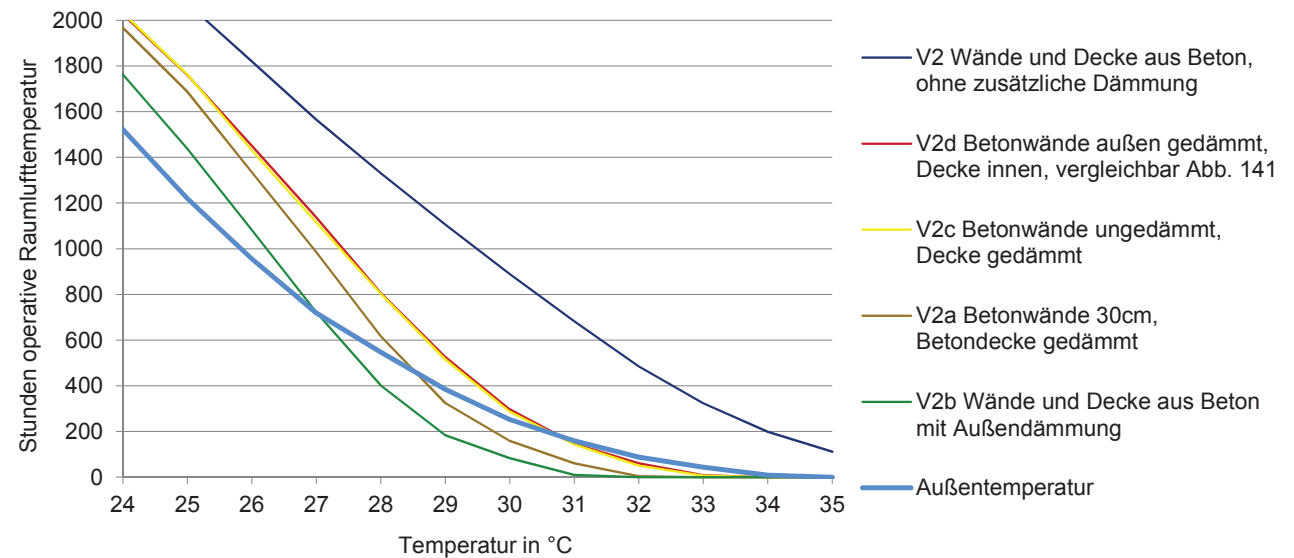


Abb. 159. Stunden pro Jahr, für die bei einer LWR von 7/h im Obergeschoss des Referenzgebäudes die jeweilige Temperatur im Innenraum herrscht, Vergleich unterschiedlicher Dämmmaterialien bei einer Betonkonstruktion

über 31,5°C (31 °C bei LWR 7/h) niedriger sind als außen (siehe Abb. 160). Bei weiteren Maßnahmen wie einer Innendämmung mit Kork sinkt dieser Wert auf 30°C (29,5°C bei einer LWR von 7/h). Wird das Referenzgebäude mit einer Außendämmung versehen und die Speichermasse im Inneren erhöht, unterschreitet die Innen- die Außentemperatur bereits bei 27,5°C (27°C bei einer LWR von 7/h).

Ein Vergleich unterschiedlicher Materialien zeigt, dass die verwendeten lokal verfügbaren Materialien gute Ergebnisse erzielen können, das Potential aber noch nicht ausgenutzt ist. Maßnahmen zur Dämmung der Außenflächen kann den sommerlichen Wärmeschutz stark verbessern.

Die in Abb. 161 dargestellten Innenraumtemperaturen verdeutlichen, dass ein erhöhter Anteil an Masse sich positiv auf die Temperaturen im Sommer auswirkt. Das Dämmen der obersten Geschossdecke mit dem im weiteren Umfeld der untersuchten Region ebenfalls verwendeten Baustoff Lehm senkt die Temperaturen bereits deutlich ab, eine Kombination mit einer erhöhten Wandstärke mit Lehmziegeln führt zu einer weiteren Reduzierung. Wird die oberste Geschossdecke des Referenzgebäudes als gedämmt angenommen (Variante 1) und bestehen diese Decke und der Boden des simulierten Raumes im Obergeschoss aus massiven Bauelementen, liegt bei der angenommenen LWR von 7/h die Temperatur im Sommer im Innenraum deutlich unter der Außentemperatur.

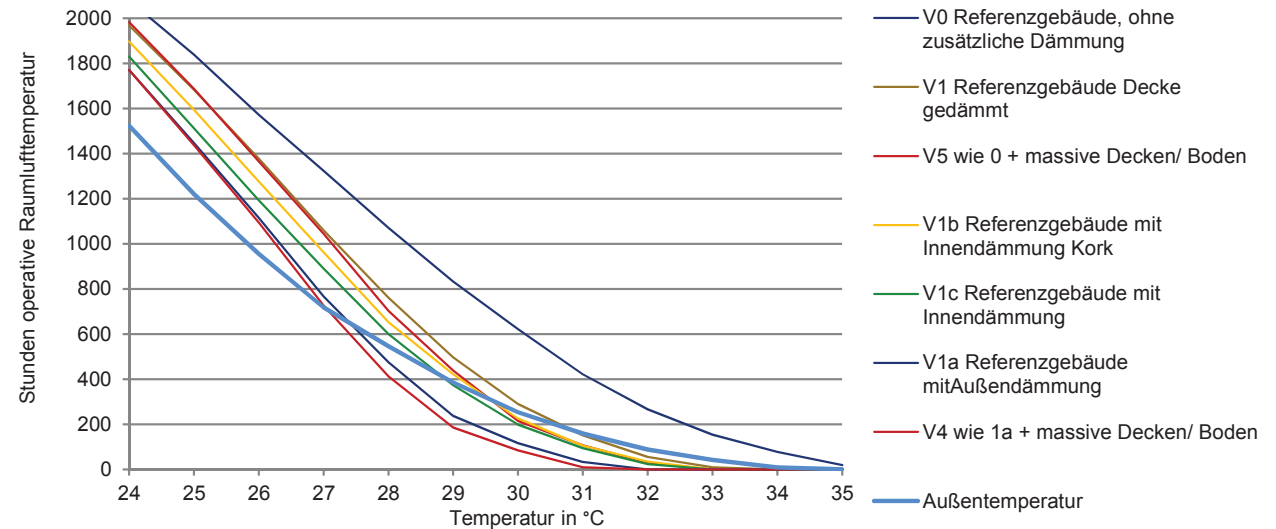


Abb. 160. Stunden pro Jahr, für die bei einer LWR von 7/h im Obergeschoss des Referenzgebäudes die jeweilige Temperatur im Innenraum herrscht, Vergleich unterschiedlicher Dämmmaterialien ausgehend von den Baumaterialien der Variante 0

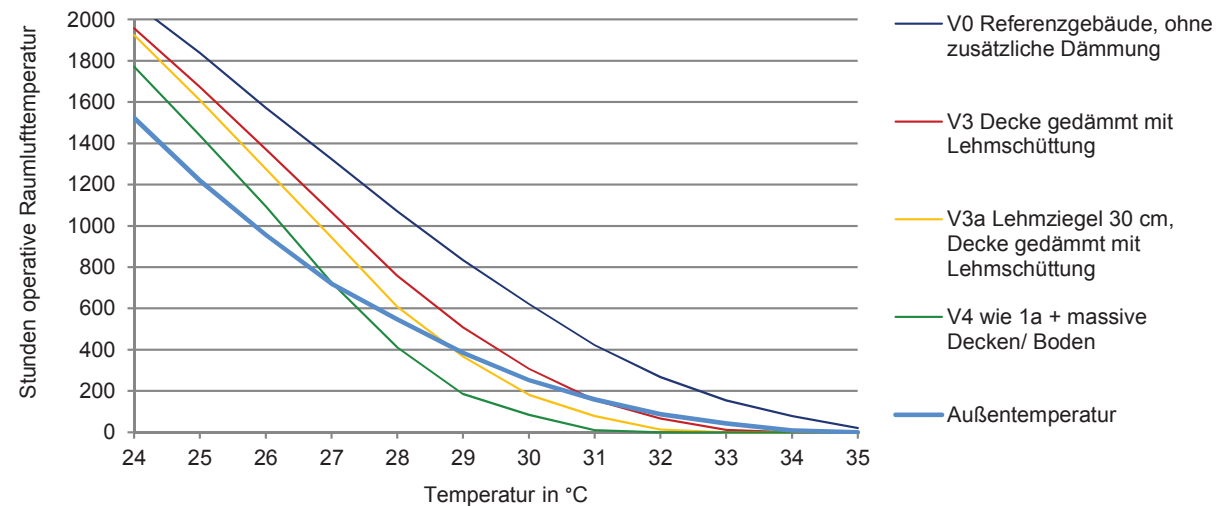


Abb. 161. Stunden pro Jahr, für die bei einer LWR von 7/h im Obergeschoss des Referenzgebäudes die jeweilige Temperatur im Innenraum herrscht, Einfluss der Masse als Speichermedium

### 5.4.6 Temperaturverläufe im Innenraum bei unterschiedlichen Materialien der Außenbauteile

In Abb. 1632 sind die Temperaturverläufe der Außentemperatur, der Lufttemperatur im Innenraum und der Temperatur der Bauteiloberflächen innen über drei Sommertage bei unterschiedlichen Baumaterialien zu sehen. In beiden Fällen (traditionelle Konstruktion und Betonkonstruktion) lässt sich der große Effekt der Dämmung der Decke deutlich im Temperaturverlauf ablesen. Werden zudem auch die Außenwände mit Wärmedämmung versehen, liegen die Oberflächentemperaturen des Materials auf der Innenseite am Mittag unter der Lufttemperatur im Raum. Für Variante 4 ist zu sehen, dass mehr Masse im Innenraum durch massive Bauteile einen noch trägeren Temperaturverlauf bewirkt. Weitere Forschung könnte noch detaillierter untersuchen, welche Ursachen die unterschiedlichen Temperaturverläufe der Oberflächen und der Lufttemperatur haben.

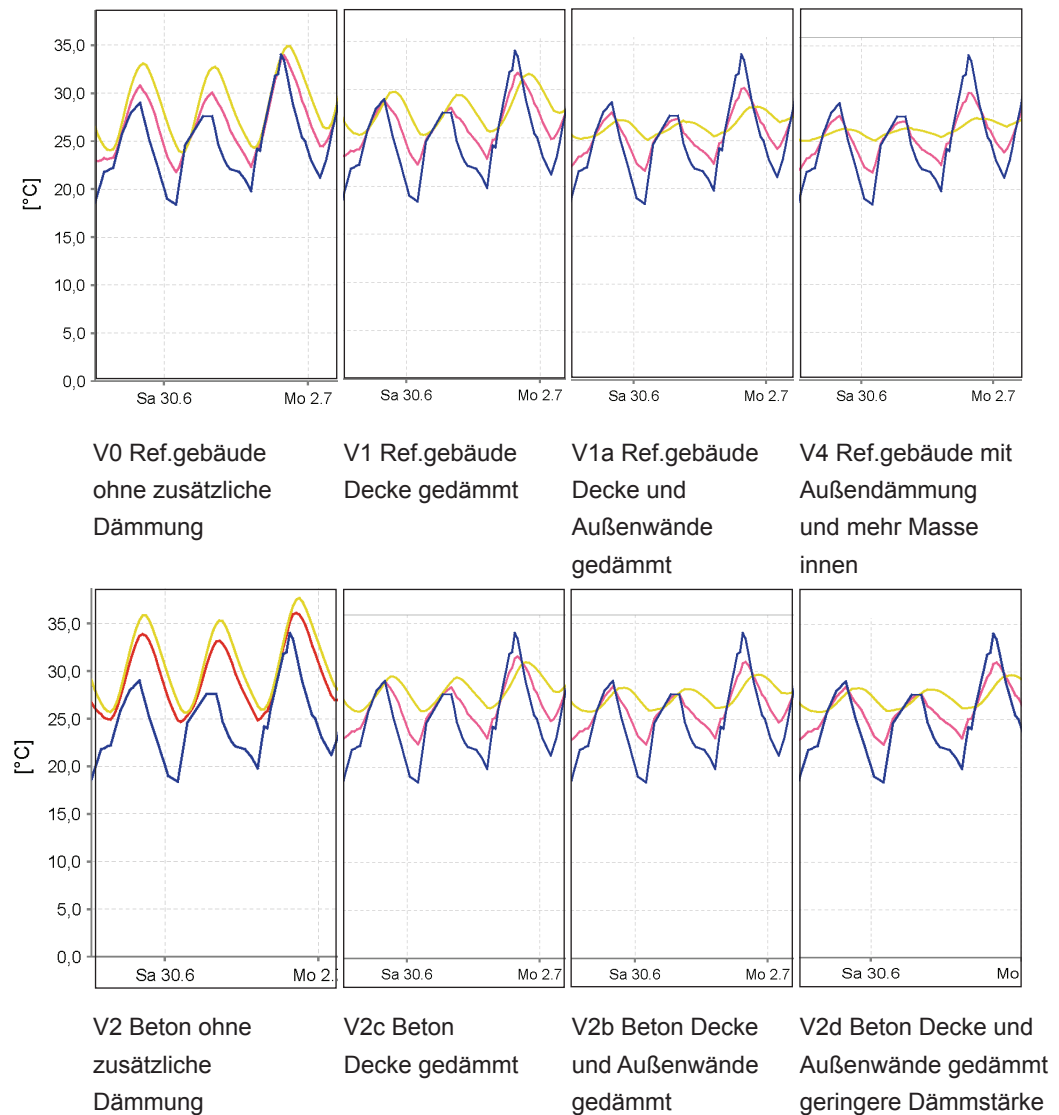


Abb. 162. Simulationsergebnisse bei Vergleich unterschiedlicher Baumaterialien: Temperaturverlauf der Außentemperatur (blau) Lufttemperatur innen (rot) und Oberflächentemperatur innen (gelb)

### 5.4.7 Materialien als Speichermasse

Die Bauweise der traditionellen Häuser in Thessaloniki nutzt nicht die Speichermasse massiver Bauteile aus. Im Obergeschoss sind zwar Fensterflächen vorhanden, die solare Gewinne ermöglichen, aber die leichte Konstruktion hat zu wenig Masse, um diese im Winter zu speichern und in der Nacht wieder abzugeben. Im unteren Geschoss ist durch das massive Mauerwerk mehr Masse vorhanden, es fehlen jedoch ausreichend Öffnungen, um größere solare Gewinne zu erzielen. An anderen Orten in Nordgriechenland finden sich jedoch Varianten des makedonischen Hauses mit massiven Wänden auch in den Obergeschossen (siehe Kapitel 2.7), so dass dieser Effekt dort vermutlich zum Tragen kommt. In der Antike wurde das Speichern von Solarenergie in massiven Bauteilen, wie bereits angeführt, gezielt ausgenutzt (siehe Abb. 114 , Kapitel 5.2).

Die Simulationsergebnisse haben jedoch gezeigt, dass sich massive Bauteile im Obergeschoss des Referenzgebäudes mit dem traditionell üblichen Fensterflächenanteil nutzen ließen. In Abb. 164 wird der Temperaturverlauf für das Referenzgebäude in traditioneller Bauweise im Obergeschoss über eine Woche im Januar dargestellt. Der Raum heizt sich durch solare Gewinne zwar schnell bis zu 5°C höher als die Außentemperatur auf, kühlt aber auch sehr rasch wieder aus. Die Schwankung zwischen Tag und Nacht betragen bis zu 10°C. Die Simulationsergebnisse für den gleichen Raum, jedoch mit

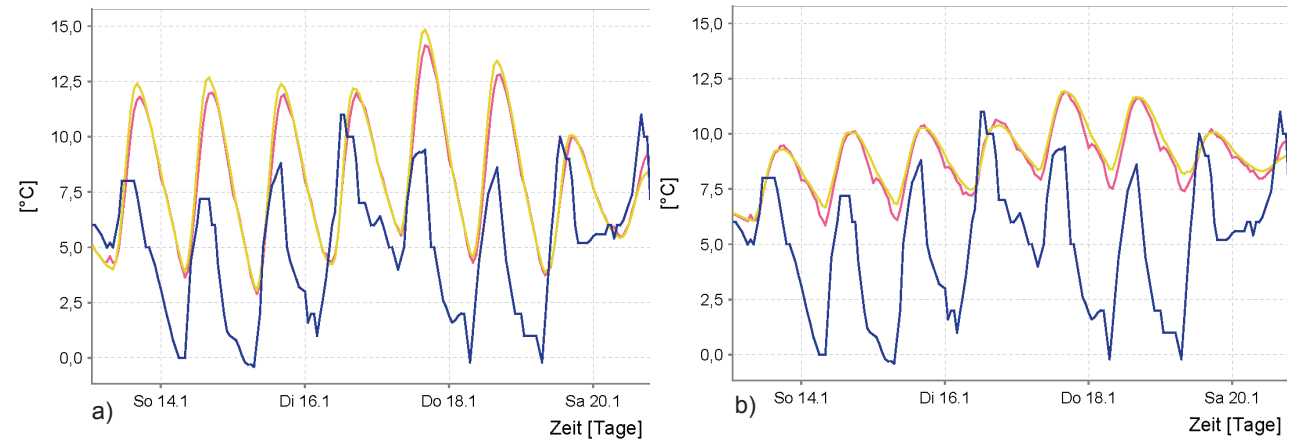


Abb. 163. Simulationsergebnisse für den Innenraum im Obergeschoss des Referenzgebäudes in traditioneller Bauweise a) als leichte Konstruktion und b) mit massivem Boden und massiver Decke, gelb = Oberflächentemperatur innen, rot = Lufttemperatur innen, blau = Außentemperatur

schweren Decken und Böden zeigen dagegen nur Schwankung bis zu 4°C. Der Einfluss auf den Heizwärmebedarf für diese beiden Varianten wird in Abb. 165 dargestellt. Es besteht also ein Potential in der Nutzung massiver Bauteile, welches bei der traditionellen Bauweise nicht ausgenutzt wurde.

Bei den Simulationen des Heizwärmebedarfs wurde beim Referenzgebäude von Fenstern mit Einfachverglasung mit einem U-Wert  $U_w = \text{ca. } 4,4 \text{ W/m}^2 \text{ K}$  ausgegangen. Das Potential der Klapppläden, welche diesen Wert auf ca.  $2,5 \text{ W/m}^2 \text{ K}$  senken

Baumaterial Boden des Obergeschosses:	Energiebedarf um den Raum eine Heizperiode auf 20 °C zu heizen	
Leichte traditionelle Konstruktion als Holzbalkendecke	20.463 kWh/a	230 kWh/m <sup>2</sup> a
Massivboden mit Estrich	18.376 kWh/a	206 kWh/m <sup>2</sup> a

Abb. 164. Auswirkungen von massiven Bauteilen auf den Heizwärmebedarf, Obergeschoss des Referenzgebäudes



können, wenn man von einer gewissen Dichtigkeit, also einer ruhenden Luftschicht zwischen Klappladen und Fenster ausgeht, wurde aus technischen Gründen nicht mit berücksichtigt. Sie ermöglichen die Nutzung der Sonnenstrahlen zum Erwärmen der Räume wenn sie tagsüber geöffnet sind, geschlossen verbessern sie in der Nacht die Dämmung der Fensterflächen.

Bei der Konzeption zur Nutzung massiver Bauteile zur Speicherung von Solarenergie ist es wichtig zu beachten, dass diese, wenn sie auch in den Sommermonaten einer Sonneneinstrahlung ausgesetzt sind, zum Überhitzen der Räume führen. Die Ergebnisse aus dem vorangegangenen Abschnitt zeigten, dass dies durch eine Verschattung der transparenten Flächen der Fassaden mit geeigneten Elementen möglich ist.

### 5.4.8 Einfluss des Schließens der Fenster bei hohen Außentemperaturen auf die Innentemperaturen

Um zu erkennen, ob ein Zusammenhang zwischen den Baumaterialien und dem Öffnen und Schließen der Fenster, abhängig von den Außentemperaturen besteht, wurden Simulationen für das Obergeschoss des Referenzgebäudes mit ungedämmter Fassade (Variante 0, Abb. 163) und gedämmten Außenbauteilen (Variante 1a, Abb. 164) durchgeführt.

Die Innenraumtemperaturen wurden für das Obergeschoss des Referenzgebäudes mit einer Verschattung durch geschlossene Klappläden simuliert. Bleiben die Fenster auch bei hohen Außentemperaturen geöffnet, so dass die natürliche Lüftung nicht unterbunden wird, liegen die Temperaturen im Innenraum am niedrigsten. Der Unterschied ist im Vergleich zu dem Schließen der Fenster bei Außentemperaturen von 30°C jedoch sehr gering. Werden die Fenster schon bei niedrigeren Außentemperaturen von 25°C oder 20°C geschlossen, liegen die Innenraumtemperaturen höher, denn die internen Wärmeeinträge und die durch die Außenbauteile des Raumes können nicht durch die natürliche Lüftung nach außen abgegeben werden.

Bei Variante 1a unter ansonsten gleichen Rahmenbedingungen fällt das Ergebnis geringfügig anders aus. Bleiben die Fenster auch bei Temperaturen von

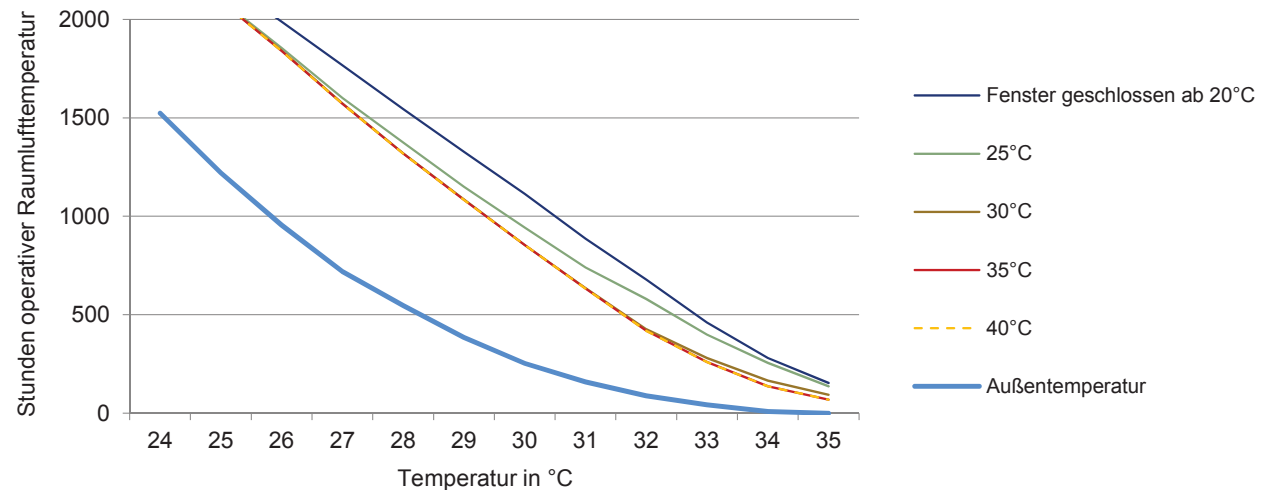


Abb. 165. Raumlufttemperatur im Obergeschoss des Referenzgebäudes mit ungedämmter Fassade bei unterschiedlichem Öffnen und Schließen der Fenster je nach Außentemperatur

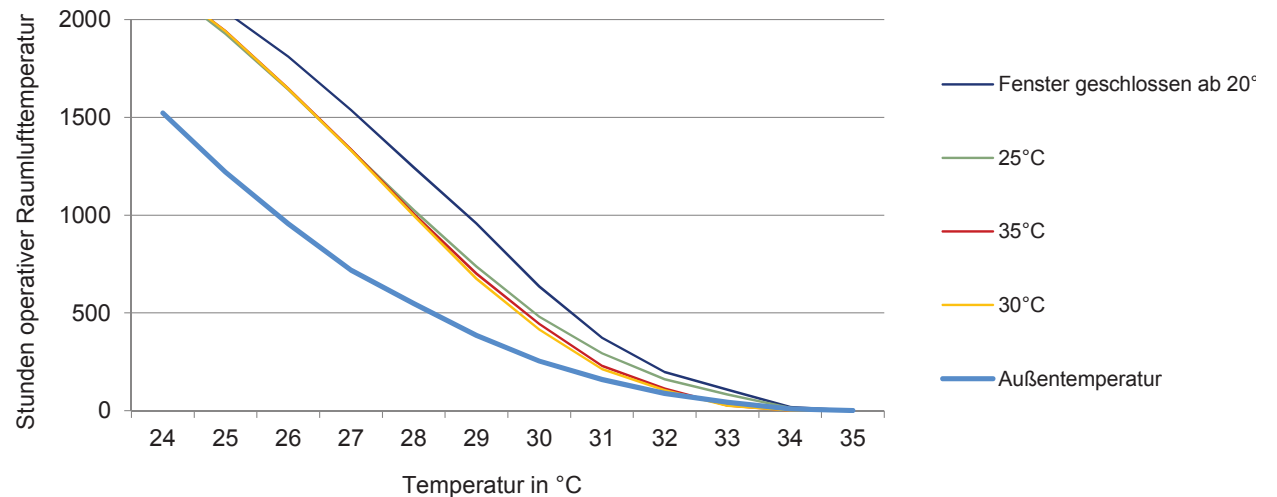


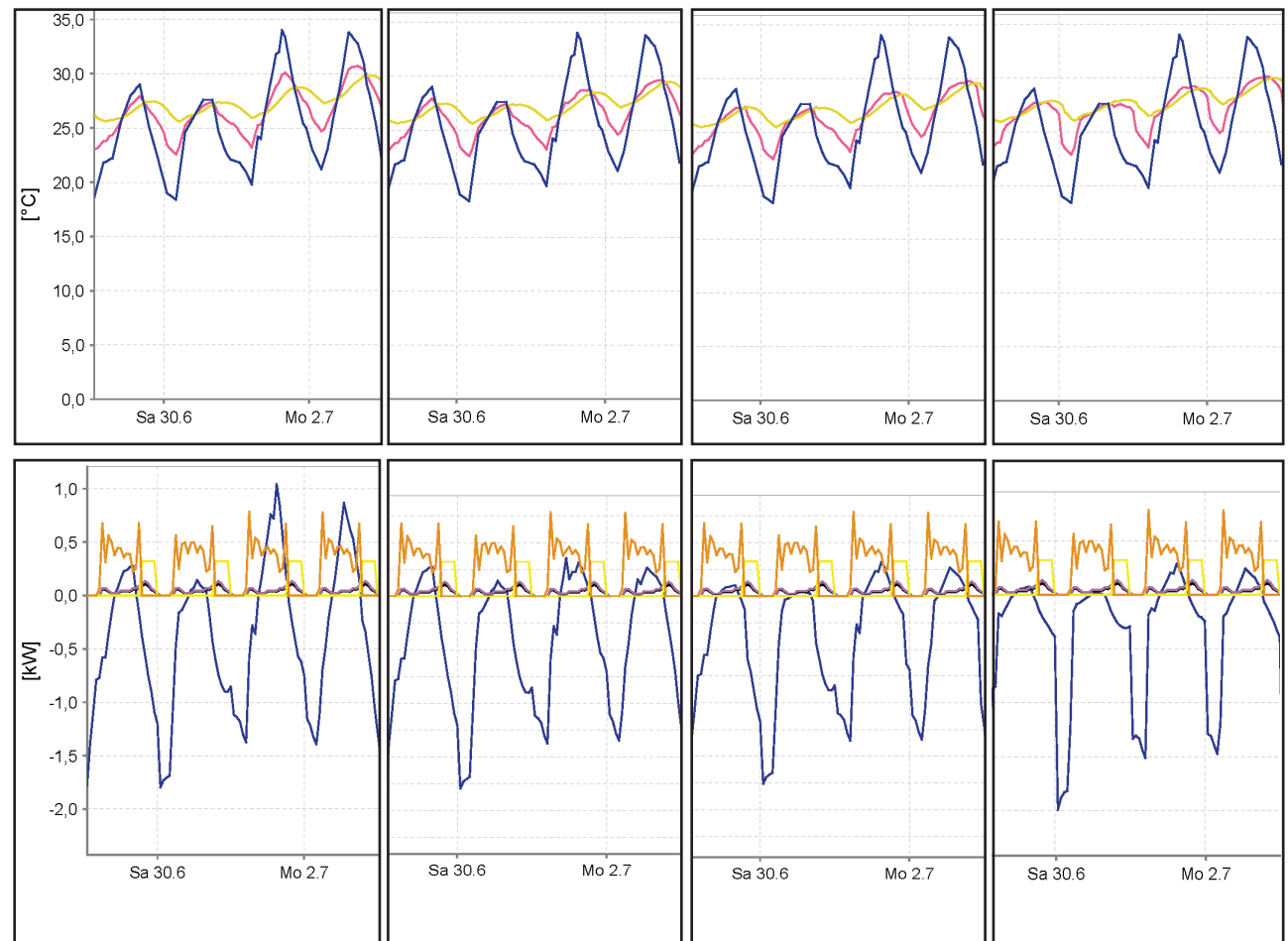
Abb. 166. Raumlufttemperatur im Obergeschoss des Referenzgebäudes mit gedämmten Außenbauteilen bei unterschiedlichem Öffnen und Schließen der Fenster je nach Außentemperatur

35 °C geöffnet, besteht ein Wärmeeintrag durch die warme Luft von außen und es wird im Raum wärmer, als wenn die Fenster bereits bei 30°C Außentemperatur geschlossen werden.

Abb. 167 verdeutlicht die Ergebnisse der Simulationen für das Referenzgebäude mit gedämmten Außenbauteilen durch den Verlauf der Oberflächen- und der Raumlufthtemperatur. Werden die Fenster bei hohen Außentemperaturen nicht geschlossen, steigt die Raumlufthtemperatur (pink) mit steigenden Außentemperaturen über die der Oberflächentemperatur (gelb). Werden die Fenster bei Außentemperaturen zwischen 25 und 30 °C geschlossen, verlaufen die Kurven etwa parallel. Werden die Fenster schon bei 20°C geschlossen, ist die Luftwechselrate in den Räumen so gering, dass die Temperaturen im Raum insgesamt wieder ansteigen.

Der Verlauf dieser Kurven ist bei dem Referenzgebäude mit ungedämmten Außenwänden fast identisch. Der Unterschied in den Ergebnisse besteht lediglich darin, dass die Fenster wegen der insgesamt höheren Innenraumtemperaturen auch bei hohen Außentemperaturen nicht geschlossen werden sollten.

Als Ergebnis dieser Untersuchung lässt sich zusammenfassen, dass das Öffnen und Schließen der Lüftungsöffnungen in Bezug auf die Außentemperaturen, abhängig von den Baumaterialien der Außenbauteile erfolgen muss.



Fenster werden  
geschlossen bei  
 $T_{\text{außen}} > 35^{\circ}\text{C}$

$T_{\text{außen}} > 30^{\circ}\text{C}$

$T_{\text{außen}} > 25^{\circ}\text{C}$

$T_{\text{außen}} > 20^{\circ}\text{C}$

Abb. 167. Temperaturverlauf im simulierten Raum des außen gedämmten Referenzgebäudes (V1a), Energieeinträge und -verluste durch Lüftung und solare Gewinne, oberes Diagramm: gelb = Oberflächentemperatur innen, pink = Lufttemperatur innen, blau = Außentemperatur; unteres Diagramm: orange = solare Einträge, gelb = Kunstlicht, schwarz = interne Gewinne, blau = natürliche Lüftung

## 5.4.9 Baumaterialien - Ergebnisse

### 1. Ergebnis: Farbe der Fassaden

In Bezug auf eine Übertragbarkeit der Ergebnisse auf heutiges Planen und Bauen ist die Farbe der Oberflächen ein Faktor, der in Bezug auf den sommerlichen Wärmeschutz als gering einzustufen ist. Durch die inzwischen übliche Wärmedämmung der Fassaden ist der Einfluss der Farbe nicht maßgeblich. Dies bezieht sich jedoch nur auf den Innenraum, für den Außenraum können die Reflexion der Oberflächen und die Emission von Wärmestrahlung große Auswirkungen auf den Komfort haben.

### 2. Ergebnis: Vergleich unterschiedlicher Baumaterialien

Die Vergleiche zwischen der traditionellen Konstruktion und dem Baustoff Beton führten zu dem Ergebnis, dass die Kubatur nicht 1:1 mit anderen Baustoffen übernommen werden sollte. Dies konnte durch die Gespräche mit Bewohnern solcher Häuser in der Oberstadt bestätigt werden, die über unzureichenden Komfort in Bezug auf den sommerlichen Wärmeschutz klagten. Es konnte gezeigt werden, dass der Einfluss des Materials auf die Temperaturen im Innenraum abnimmt, sobald die Fassaden an der Außenseite wärmegeklämt sind.

Es erstaunt, dass die traditionellen Häuser offenbar keine gedämmte oberste Geschossdecke hatten,

denn der Einfluss einer Wärmedämmung dieses Bauteils ist hoch. Beweise für eine Dämmung konnten jedoch trotz der Literaturrecherchen, Gesprächen mit Experten und Eigentümern sowie der Begehung einzelner Gebäude nicht gefunden werden. Daher muss davon ausgegangen werden, dass diese nicht existierte, obwohl es unwahrscheinlich erscheint, dass die Decke nie gedämmt wurde. Die Innenraumtemperaturen lassen sich durch diese einfach umzusetzende Maßnahme im Sommer reduzieren, auf den Heizwärmebedarf der Räume hat die Dämmung ebenso einen positiven Einfluss.

### 3. Ergebnis: Massive Bauteile zur Speicherung solarer Einträge

Bei den traditionellen Häusern in Thessaloniki wurden Materialien nicht gezielt eingesetzt, um die verfügbaren solaren Gewinne im Winter auszunutzen, obwohl mehr Speichermasse im Innenraum des Obergeschosses zu einem geringeren Heizwärmebedarf führen würde. Ebenso könnte mehr Masse im Inneren die Innenraumtemperaturen im Sommer senken.

### 4. Ergebnis: Öffnen und Schließen der Lüftungsöffnungen abhängig von der Außentemperatur

Ein für den sommerlichen Wärmeschutz effektives Lüftungskonzept muss abhängig von den Außenbauteilen erfolgen. Beim Referenzgebäude ohne Außendämmung der Fassade sollten die Fenster auch bei hohen Außentemperaturen nicht geschlossen werden. Sind Fassade und Dach des

Referenzgebäudes wärmegeklämt, sollten die Fenster geschlossen werden, wenn die Außentemperaturen über 30°C ansteigen, um ein Aufheizen der Räume zu verhindern.

Zusammenfassend zeigt sich aus den Untersuchungen zu den traditionell verwendeten Baumaterialien, dass es keine direkte Übertragbarkeit von den damals angewendeten Konzepten gibt. Zum einen konnte festgestellt werden, dass in Bezug auf die Luftdichtigkeit und Wärmedämmung der Fassaden und die Nutzung von Speichermasse ein Optimierungspotential besteht, zum anderen ist das Konzept der Nutzung der Räume, abhängig von den Jahreszeiten nur in speziellen Einzelfällen noch heute anwendbar. Ebenso hat die Farbe der Fassade bei einem Gebäude mit einer außenliegenden Wärmedämmung wenig Einfluss auf den sommerlichen Wärmeschutz und den Heizwärmebedarf im Winter.

## 5.5 Zusammenfassung der Simulationsergebnisse

Die in diesem Kapitel beschriebenen Untersuchungen ergaben, dass sich aus der traditionellen Bauweise in der Oberstadt von Thessaloniki Konzepte zur passiven Klimatisierung ableiten lassen. Da sich durch die Gebäudesimulationen herausstellte, dass ohne eine effektive natürliche Lüftung der sommerliche Wärmeschutz nicht gegeben ist, wurde dieser Faktor eingehend untersucht. Als Ergebnis wurde festgestellt, dass das Obergeschoss des Referenzgebäudes ein hohes Lüftungspotential hat, da die Öffnungen entsprechend orientiert sind und der Erker die Lüftung des angrenzenden Raumes verstärkt. Das Erdgeschoss wurde in Bezug auf die natürliche Lüftung nicht untersucht, da es als Wintergeschoss konzipiert war und sich keine Konzepte daraus hätten ableiten lassen können.

Die traditionell verwendeten hölzernen Klappläden mit einem hellen Anstrich lassen sich durch ihren Aufbau vielfältig modifizieren. Die Simulationen konnten nachweisen, dass sie dadurch bei entsprechender Bedienung wesentliche Vorteile gegenüber anderen, gegenwärtig häufig verwendeten Verschattungselementen, wie Rollläden oder Markisen besitzen. Sie ermöglichen gleichzeitig eine Verschattung und eine natürliche Lüftung auch außerhalb der Nutzungszeit, der Bedarf an Kunstlicht ist wegen der Lamellen gering und sie verbessern die Wärmedämmung der Fenster in der Heizperiode.

Die Orientierung der Gebäude mit der Fassade mit einem höheren Fensterflächenanteil nach Süden konnte sowohl für die Quantität solarer Gewinne im Winter, als auch für die Minimierung dieser im Sommer als günstig bewiesen werden. Der Vergleich unterschiedlicher Verglasungen zeigte, dass eine Einfachverglasung Vorteile gegenüber

Sonnenschutz- oder Wärmeschutzverglasungen haben kann.

Für den damaligen Stand der Technik war die leichte Baukonstruktion mit Materialien einer geringen Temperaturleitfähigkeit und dadurch einer großen Phasenverschiebung, sowie einer hellen

Variante	LWR	Orientierung	Verschattungselemente	Baumaterialien	Überschreitung nach DIN 15251		
					I	II	III
Ausgangslage Referenzgebäude	7/h	Straßenfassade nach Süden	Klappläden zu wenn die Sonne scheint	Traditionelle Materialien	17	13	10
geringe LWR	0,5/h	Straßenfassade nach Süden	Klappläden zu wenn die Sonne scheint	Traditionelle Materialien	25	19	15
Ungünstige Orientierung	7/h	Straßenfassade nach Westen	Klappläden zu wenn die Sonne scheint	Traditionelle Materialien	18	14	11
ohne Verschattungselemente	7/h	Straßenfassade nach Süden	ohne Verschattung	Traditionelle Materialien	19	15	13
oberste Geschossdecke gedämmt	7/h	Straßenfassade nach Süden	Klappläden zu wenn Sonne scheint	Traditionelle Materialien und Wärmedämmung Decke (U = 0,43 W/m <sup>2</sup> K)	11	6	4
Optimierte Außenbauteile	7/h	Straßenfassade nach Süden	Klappläden zu wenn Sonne scheint	Traditionelle Materialien mit Wärmedämmung Außenwände 5 cm (U = 0,66 W/(m <sup>2</sup> K)) und Dach (U = 0,43 W/(m <sup>2</sup> K))	6	2	1

Abb. 168. Bewertung des Komforts im Sommer im Obergeschoss des Referenzgebäudes nach DIN 15251, Varianten zur LWR, Orientierung, Verschattung und Baumaterialien und mit verbesserten Außenbauteilen



Fassadenfarbe ein sinnvolles Konzept für den sommerlichen Wärmeschutz. Die heutigen Möglichkeiten zu Wärmedämmung von Außenbauteilen zeigten jedoch, dass diese sowohl den Komfort im Sommer signifikant verbessern, als auch den Heizwärmebedarf im Winter verringern können. Da die Bauvorschriften inzwischen Grenzwerte für die U-Werte von Außenbauteilen haben, lassen sich diese Konzepte der traditionellen Bebauung nicht auf heute übertragen. Es erstaunte, dass keine Hinweise auf eine Dämmung der obersten Geschossdecken gefunden wurden, und dass keine massiven Bauteile als Speichermasse eingesetzt worden sind. Die Simulationen konnten zeigen, dass diese Maßnahmen ein deutliches Verbesserungspotential beinhalten.

Die Aufstellung in Abb. 168 zeigt, dass der sommerliche Wärmeschutz im Obergeschoss des Referenzgebäudes nach Bewertung durch die DIN 15251 für Komfortklasse III zufriedenstellend ist, wenn man von einer Wärmedämmung der obersten Geschossdecke ausgeht. Die Nutzung einer Klimaanlage ist für den Raum nach diesen Ergebnissen nicht erforderlich. Alle anderen getesteten Varianten zeigen, dass die Gebäude gut an die Bedingungen adaptiert sind und Veränderungen der LWR, der Orientierung oder Verschattung den sommerlichen Wärmeschutz verschlechtern.

Bezogen auf den Heizwärmebedarf ergaben die Untersuchungen, dass ein hoher Fensterflächen-

anteil nach Süden die solaren Gewinne optimiert und der Einsatz massiver Bauteile zur Speicherung solarer Gewinne möglich ist. In Bezug auf die Verwendung unterschiedlicher Verglasungen zeigt sich, dass eine EV Vorteile gegenüber Verglasungen mit niedrigerem U-Wert haben kann, da der geringere g-Wert die solaren Gewinne reduziert. Für den sommerlichen Wärmeschutz bedeutet ein geringer g-Wert, dass Wärmestrahlung bei geschlossenen Fenstern kaum noch aus dem Raum entweichen kann und die Vor- und Nachteile unterschiedlicher Verglasungen aus diesem Grund sorgfältig betrachtet werden müssen.

## 6 Anwendungsmöglichkeiten

In diesem Kapitel wird eine Untersuchung zur Übertragbarkeit der ermittelten Konzepte zur passiven Klimatisierung beschrieben. Es wurden exemplarisch zwei Appartementhäuser (Polykatoikia) in Thessaloniki aus dem Zeitraum von 1955 bis 1980 ausgewählt, um zu ermitteln, ob die Konzepte zur passiven Klimatisierung, die sich aus der traditionellen Bebauung der Oberstadt ableiten ließen, für energetische Sanierungen dieser Häuser angewendet werden können. Gebäude aus dieser Bauzeit machen über 50 % am gesamten Gebäudebestand in Griechenland aus (Theodoridou, 2011:50; Balaras, 2007:1304), haben einen hohen Heizenergiebedarf und einen nicht zufriedenstellenden sommerlichen Wärmeschutz (vgl. Kapitel 2.2.2 und Kapitel 3). Das mögliche Einsparpotential durch Maßnahmen, die den Energieverbrauch reduzieren und zudem den Komfort verbessern, ist daher hoch.

Die sich im Laufe der Industrialisierung entwickelte Möglichkeit, Gebäude relativ unabhängig vom Klima des Standortes zu errichten führte auch im Untersuchungsgebiet dazu, dass die lange angewendeten Kenntnisse über klimaangepasstes Bauen verloren gingen. Papadopoulos (2002:455ff) bezeichnet es als „glass-tower-syndrome“, welches die traditionellen Lösungen, die an das mediterrane Klima angepasst waren verdrängt haben und zu der aktuellen Situation führten, die man schon 1974 hätte voraussagen können.



Abb. 169. Bebauung in der Innenstadt von Thessaloniki , das Straßenbild wird dominiert durch bis zu elfgeschossige Appartementhäuser mit Balkonen (eigene Aufnahmen, 2013)

Das Aufschrecken durch die Ölkrise führte auch in Griechenland zu ersten Wärmeschutzverordnungen, die Erkenntnisse über eine Klimaveränderung bringen immer neue Energieeinsparverordnungen hervor, doch die traditionellen Wohngebäude in der Oberstadt Thessalonikis werden noch immer nicht als etwas gesehen, von dem man lernen könnte. Sie haben den Ruf alter, schlecht gedämmter Gebäude, die nach und nach sowieso abgerissen oder wenn überhaupt, als Schuppen genutzt werden (Papa-dopoulos, 2002:455).

Die ausgewählten Gebäude, an denen die Übertragbarkeit untersucht wurde, beinhalten daher in ihrer ursprünglichen Planung keine der traditionellen Konzepte zur Anpassung an den Standort. Zur exemplarischen Prüfung wurden zwei Beispielgebäude ausgewählt und die Auswirkungen von Sanierungsmaßnahmen auf die Innenraumtemperaturen im Sommer und den Heizwärmebedarf durch Simulationen mit PRIMERO Komfort überprüft.

Die Maßnahmen wurden zunächst einzeln betrachtet, um die Auswirkungen erkennen zu können. Erst in einer Schlussbetrachtung wurden unterschiedliche Kombinationen getestet. Dies ermöglichte ein Einschätzen der Wechselwirkungen der Maßnahmen untereinander. Zusätzlich erfolgte ein Vergleich zu den Minimalanforderungen der aktuellen Gesetzgebung KENAK.

Dieses Kapitel schließt mit einer Zusammenfassung der Ergebnisse und einer Darstellung der entwickelten Methode für eine solche Untersuchung.

Die Rahmenbedingungen für die Simulationen und die verwendeten Bauteilaufbauten sind im Anhang in Kapitel IV dokumentiert.



## 6.1 Allgemeine Merkmale der Beispielgebäude

In den Polykatoikia im Innenstadtbereich besteht im Regelfall eine Mischnutzung, welche am häufigsten aus kommerziellen Flächen im Erdgeschoss und einer Wohn- und/oder Büronutzung in den oberen Geschossen besteht. Beispielgebäude A stellt eine Mischnutzung dar, Beispielgebäude B hingegen steht für eine reine Wohnnutzung mit einem offenen Pilotisgeschoss, welche in den an die Innenstadt Thessalonikis angrenzenden Wohngebieten dominiert. Da die Bauverordnung von 1955 eine lichte Geschosshöhe von mindestens 2,70 m vorschrieb liegen die üblichen Geschosshöhen bei etwa 3,00 m.

Das Tragwerk der Gebäude besteht aus einem Stahlbetonskelett. Die nichttragenden Elemente der Außenwände wurden als zweischaliges Ziegelmauerwerk, innen und außen verputzt, ausgeführt. Erst ab 1980 wird aufgrund der TIR Wärmedämmung in dem Hohlraum zwischen den zwei Mauerwerksschichten in den Ausfachungen eingebracht. Die Tragstruktur aus Stahlbeton und die auskragenden Balkonplatten bilden durch diese Maßnahme extreme Wärmebrücken. Außerdem wirken sich die ungedämmten Betonaußenteile sowohl negativ auf den sommerlichen Wärmeschutz als auch den Heizwärmebedarf aus. Die Dächer wurden als ungedämmtes Flachdach ausgeführt, erst ab 1980 begann das Umkehrdach sich durchzusetzen.

Die Fensteröffnungen bestehen üblicherweise aus Holz-, Aluminium- oder Kunststoffrahmen und

haben eine Einfachverglasung. Als Verschattungselemente dominieren Rollläden und Markisen. Über den Fassadenöffnungen an den Staffelgeschossen befinden sich zum Teil fest installierte Vordächer oder Pergolaelemente.

Innenliegende Räume, wie Bäder oder Küchen haben häufig eine mechanische Entlüftung, alle anderen Räume sind natürlich belüftet (Theodoridou 2011:62ff). Auf die Möglichkeit der Querlüftung zur natürlichen Lüftung der Räume wurde bei der Grundrissgestaltung weniger geachtet. Zudem behindern die häufig verwendeten Rollläden die Lüftung über die Fensteröffnungen, andere Zu- und Abluftöffnungen existieren üblicherweise nicht.

Die Balkone der Polykatoikia erstrecken sich üblicherweise über einen Großteil der Fassadenbreite und sind etwa einen Meter tief. Sie werden häufig als Abstellflächen und zum Trocknen von Wäsche genutzt. Die Nutzung als zusätzliche Wohnfläche im Außenbereich, die das Klima des Landes im größten Teil des Jahres zulässt und die einen hohen Stellenwert besitzt, wird im Stadtgebiet durch Lärm und Luftverschmutzung eingeschränkt. Außerdem sind die Balkone zum Teil aufgrund ihrer Orientierung und Lage am Gebäude nicht ausreichend belüftet und hoher Sonneneinstrahlung ausgesetzt, so dass der Komfort auch dadurch stark eingeschränkt ist (Doumanis, 1984:20). Es konnten keine Versuche einer Ausrichtung in Ost-West Richtung erkannt werden. Die Gebäude sind am Straßenverlauf orientiert.

◇ Rahmenbedingungen für die Simulationen  
Für die Gebäudesimulationen mit PRIMERO Komfort wurden Baukonstruktionen mit den in Abb. 170 angegebenen U-Werten verwendet. Die Bauteilaufbauten wurden auf Grundlage des Referenzgebäudes des *Tabula webtool* (2012) angenommen. Die dort angegebenen Baumaterialien für Außenbauteile, Stahlbeton und Ziegelmauerwerk, machen in griechischen Städten den weitaus größten Teil der verbauten Materialien aus (siehe Abb. 171).

Bauteil	Material	gesamter Aufbau in cm	U-Wert der gesamten Konstruktion in kW/Km <sup>2</sup>
Außenwände	Ziegelmauerwerk, beidseitig verputzt	23	2,26
Außenwände, Tragstruktur	Stahlbeton, beidseitig verputzt	23	3,43
Innenwände	Ziegelmauerwerk, beidseitig verputzt	18 (schwer) 14,5 (leicht)	nicht relevant für die Simulation
Bodenplatte	Stahlbeton	20	3,12
Dach	Stahlbeton	19,5	2,99

Abb. 169. typische Bauteilaufbauten und U-Werte für die untersuchten Gebäude, Berechnung der Werte im Anhang



Verwendetes Baumaterial	in %
Beton	65,9
Ziegel	20,6
Stein	10,6
weitere	1,6
Stahl	0,7
Holz	0,6

Abb. 170. Im Stadtgebiet verwendete Baumaterialien des gesamten Gebäudebestands in Griechenland in % (nach: Hellenic Republic, Ministry of Finance, 2010)

Für die im Folgenden beschriebenen Simulationen wurde, entsprechend den in der KENAK vorgegebenen Werten für Berechnungen, angenommen, dass die Räume in der Heizperiode auf 20°C geheizt werden. Innenraumtemperaturen liegen ab 26°C außerhalb des Komfortbereichs und müssen bei Überschreitung dieser Temperatur gekühlt werden. Für die Heizung der simulierten Räume wurde eine Zentralheizung eingesetzt, da in der Klimazone von Thessaloniki etwa 2/3 der Mehrfamilienhäuser der Baujahre vor 1980 über diese verfügen (Tabula 2012).

Die durchschnittliche Anzahl der Bewohner eines Appartements in Thessaloniki beträgt als Ergebnis einer Befragung durch Theodoridou (2011) 3,04 Personen/100m<sup>2</sup>. Davon entfallen über 30 % auf Familien mit vier Personen. Dies weicht stark von dem für Berechnungen vorgegebenen Wert aus der KENAK 2010 von fünf Personen pro 100 m<sup>2</sup> Wohnfläche ab. In den Simulationen wurde daher eine mittlere Personenbelegung von 35 m<sup>2</sup>/ Person angenommen, da dieser Wert speziell für Thessaloniki ermittelt wurde.

### 6.1.1 Beispielgebäude A - Polykatoikia aus der Bauzeit zwischen 1955 und 1973

Das Beispielgebäude A stammt aus der Bauphase der Nachkriegszeit, seine Struktur beruht auf den Prinzipien des von Le Corbusier entwickelten Domino-Systems (siehe Abschnitt 2.2.2).

Das sechsgeschossige Gebäude befindet sich innerhalb einer geschlossenen Bebauung im Straßenverlauf (siehe Abb. 172 und 174). Das Erdgeschoss wird kommerziell genutzt, in den Geschossen zwei bis sechs sind je zwei Appartements. Die Fenster haben Holzrahmen mit einer Einfachverglasung. Der Fensterflächenanteil beträgt 24 %. Als Verschattungselemente befinden sich an den nach Süden orientierten Fenstern zur Straße hin Rollläden in einer dunklen Farbe. Unter den Balkonplatten der Etagen 1 bis 5 sind zusätzlich Markisen angebracht. Das 6. Geschoss ist ein Staffelgeschoss, dessen Fenster ebenfalls zusätzlich durch Markisen verschattet werden können.

Die nördlich orientierte Fassade ist einem Innenhof zugewandt, der Abstand zum etwa gleich hohen, gegenüberliegenden Gebäude beträgt etwa acht Meter. An den Fenstern der Nordfassade befinden sich keine zusätzlichen Verschattungselemente.

Für die Simulationen wurden drei Räume des Gebäudes ausgewählt, um die Übertragbarkeit der Konzepte, welche aus der traditionellen Bebauung

abgeleitet werden können, zu überprüfen (siehe Abb. 173). Raum A1 und A2 sind in Abmessungen, Nutzung und Lage innerhalb der jeweiligen Wohnung identisch. Sie befinden sich jedoch im ersten bzw. im obersten Geschoss des Gebäudes. Raum A2 wurde als besonders kritisch eingestuft, da er durch seine Lage unter der Dachfläche eine wesentlich höhere Oberfläche hat, als die Räume in den darunter liegenden Geschossen und dadurch äußeren Einflüssen stärker ausgesetzt ist. Durch den Vergleich der Simulationsergebnisse für diesen Raum mit denen von Raum A1 konnte dies bestätigt werden.

Raum A3 liegt ebenfalls unter der Dachfläche, ist jedoch nach Norden orientiert und lässt daher im Vergleich mit den anderen Räumen Rückschlüsse auf den Einfluss solarer Einträge in Bezug auf den Heizwärmebedarf und den sommerlichen Wärmeschutz zu.



Abb. 171. Lage Gebäude A, grau = Apartmentblocks (nach: Thessaloniki Municipality)

Raum	Nutzung	Fläche	Fensterfläche	Verschattung	Lage im Gebäude	
					Geschoss	Orientierung
A1	Schlafzimmer	14,9 m <sup>2</sup>	1,6 m <sup>2</sup>	Balkon + Rollläden	1.	Süden
A2	Schlafzimmer	14,9 m <sup>2</sup>	1,6 m <sup>2</sup>	Balkon + Rollläden	6.	Süden
A3	Küche	9,15 m <sup>2</sup>	3,2 m <sup>2</sup>	Balkon	6.	Norden

Abb. 172. Exemplarisch ausgesuchte Räume in Gebäude A für die Untersuchung der Übertragbarkeit von Konzepten zur passiven Klimatisierung, die aus der traditionellen Bebauung der Oberstadt abgeleitet wurden



Abb. 173. Lage Gebäude A, (nach: Hellenic Cadastre & Mapping Agency 2012)

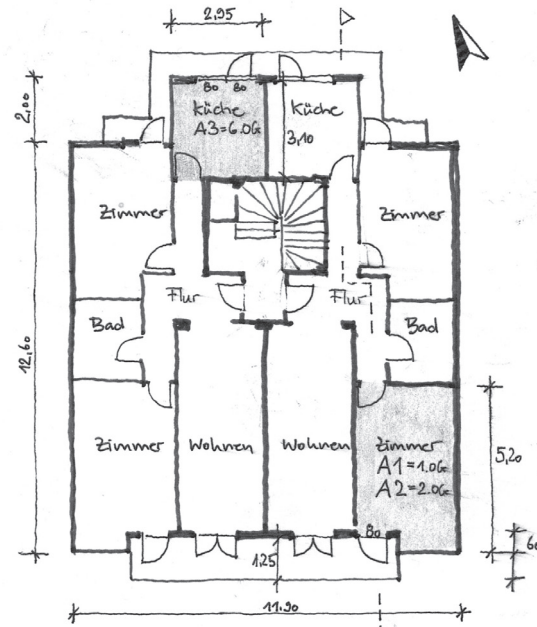


Abb. 174. Beispielgebäude A, Grundriss Geschosse 2-6, Lage der Räume A1, A2 und A3 (eigene Skizze)

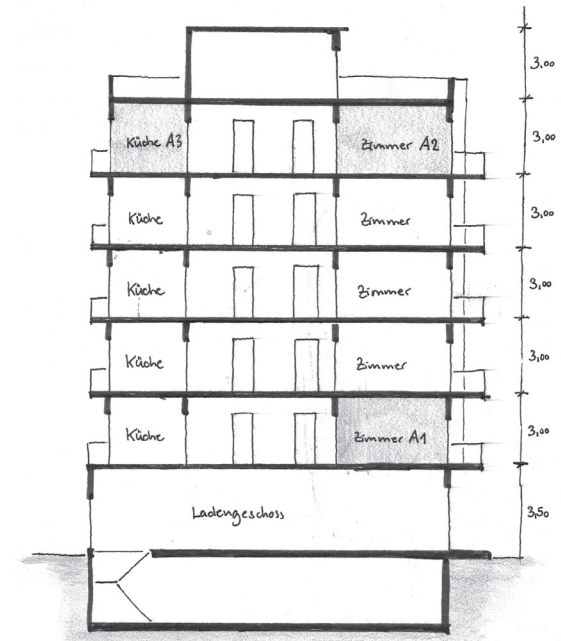


Abb. 175. Beispielgebäude A, Schnitt, Lage der Räume A1, A2 und A3 (eigene Skizze)

### 6.1.2 Beispielgebäude B - Polykatoikia aus der Bauzeit zwischen 1973 und 1980

Als Beispielgebäude B wurde eine Polykatoikia ausgewählt, welche nach der ersten Änderungen der Verordnung 1973, jedoch vor Einführung der TIR im Jahre 1980 errichtet wurde. Zentralheizungen sind bei diesen Gebäuden, im Gegensatz zu denen vor 1973 erbauten, Standard. Das Gebäude hat aufgrund der Verordnung von 1973 eine als Pilotis bezeichnete offene Pfeilerkonstruktion des Erdgeschosses. Diese Fläche wird als Eingangsbereich und zum Parken genutzt.

Das Gebäude ist ein freistehendes sechsgeschossiges Wohnhaus (siehe Abb. 178 und 181) mit jeweils drei oder vier Appartements im 1. bis 5. Stockwerk, einem Pilotisgeschoss und einem Staffelgeschoss. Die Fenster bestehen, wie für die Bauzeit üblich, aus Aluminiumrahmen mit Einfachverglasung. Der Fensterflächenanteil beträgt 22 %. Die Fenster haben keine fest eingebauten Verschattungselemente sondern innenliegende Gardinen. Die Fenster der Stockwerke eins bis fünf werden durch Markisen verschattet, welche unter den Balkonplatten angebracht sind. Nur die Nordwestfassade hat diese zusätzlichen Verschattungselemente nicht.

Das 6. Geschoss ist ein Staffelgeschoss mit festen Pergolaelementen an der Nordost- und der Südostfassade, welche nicht bepflanzt sind. Begrünt hätten diese Elemente vor allem an einer Südfassade einen

positiven Einfluss auf den sommerlichen Wärmeschutz. Warum sie nicht in dieser Himmelsrichtung angeordnet sind, und ob sie aus diesem Grund nicht als Rankgitter genutzt werden, ist nicht bekannt.

Für dieses Gebäude wurden ebenfalls Räume ausgewählt und exemplarisch mit der Simulationssoftware untersucht (siehe Abb. 177). Die Räume B1 und B2 liegen im ersten Geschoss des Gebäudes und haben daher einen Boden gegen Außenluft. Der nach Norden orientierte Raum B1 erhält wenig Solarstrahlung, ist jedoch über zwei Außenwände den kalten Winden im Winter ausgesetzt. Raum B2 hat nur ein einziges Fenster und aufgrund des Wohnungsgrundrisses keine Möglichkeit zur Querlüftung. Für den nach Süden orientierten Raum besteht also ein geringes Potential zur natürlichen Lüftung. Aus diesen Gründen wurden die Räume für das Geschoss als besonders kritisch beurteilt.

Die Räume B3 und B4 befinden sich im Staffelgeschoss und haben daher eine Decke gegen Außenluft. B3 ist ein nach Süden orientiertes Schlafzimmer und wurde als besonders kritisch in Bezug auf den sommerlichen Wärmeschutz beurteilt. Der Raum ist in die gleiche Richtung orientiert wie B2, so dass der Einfluss der Lage im Gebäude miteinander verglichen werden kann.

Raum B4 ist eine Küche, nach Osten orientiert, ohne Möglichkeit einer Querlüftung und ohne außenliegende Verschattungselemente. Dieser Raum wurde daher ebenfalls als problematisch in Bezug auf den sommerlichen Wärmeschutz eingestuft. Außerdem war zu erwarten, dass der Heizwärmebedarf sehr hoch ist, denn das kleine Fenster ermöglicht nur geringe solare Gewinne und das Verhältnis von Oberfläche zu Volumen ist durch die Lage in der Ecke des obersten Geschosses hoch.

Raum	Nutzung	Fläche	Fensterfläche	Verschattung	Lage im Gebäude	
					Geschoss	Orientierung
B1	Wohn-, Esszimmer	35,42 m <sup>2</sup>	8,0 m <sup>2</sup>	Balkon + Markise	1	Norden
B2	Esszimmer	14,05 m <sup>2</sup>	1,6 m <sup>2</sup>	Balkon + Markise	1	Süden
B3	Schlafzimmer	15,12 m <sup>2</sup>	3,2 m <sup>2</sup>	nicht begründete Pergola	6	Süden
B4	Küche	10,26 m <sup>2</sup>	0,35 m <sup>2</sup>	-	6	Osten

Abb. 176. Exemplarisch ausgesuchte Räume in Gebäude B für die Untersuchung der Übertragbarkeit von Konzepten zur passiven Klimatisierung, die aus der traditionellen Bebauung der Oberstadt abgeleitet wurden



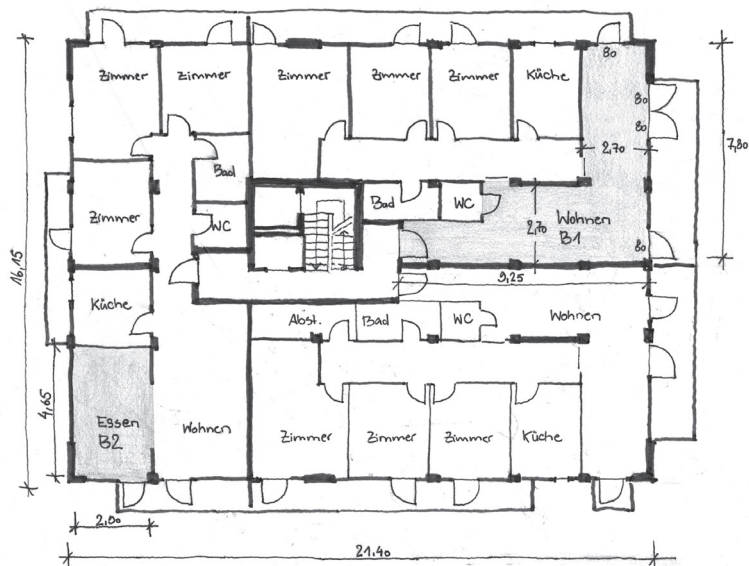


Abb. 177. Beispielgebäude B, Grundriss 1. Geschoss  
Lage der Räume B1 und B2

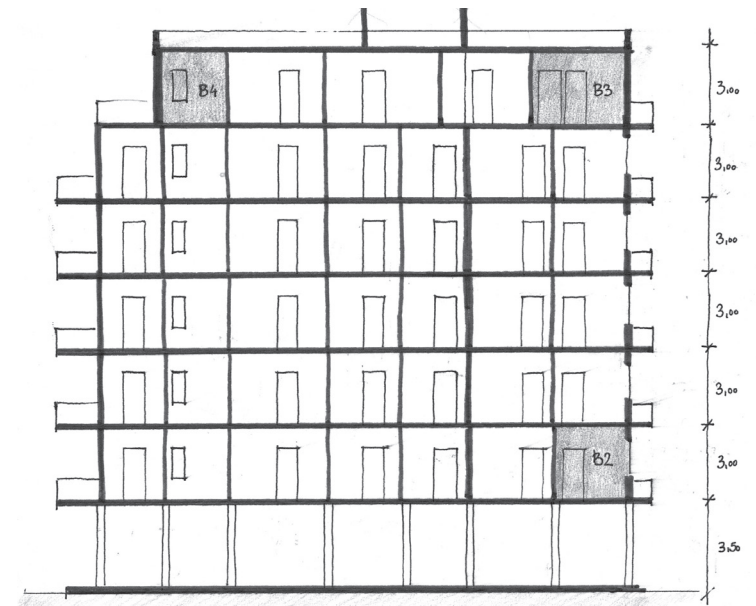


Abb. 179. Beispielgebäude B, Schnitt, Lage der Räume B2, B3 und B4

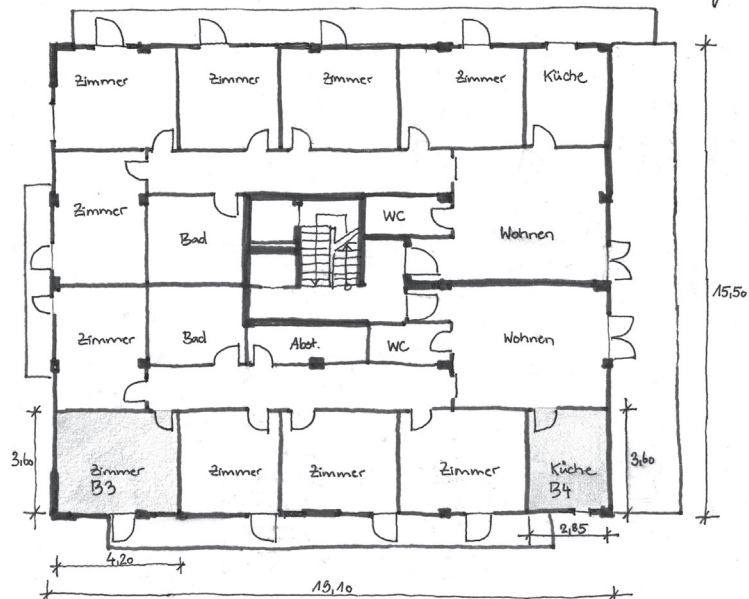


Abb. 178. Beispielgebäude B, Grundriss 6. Geschoss  
Lage der Räume B3 und B4

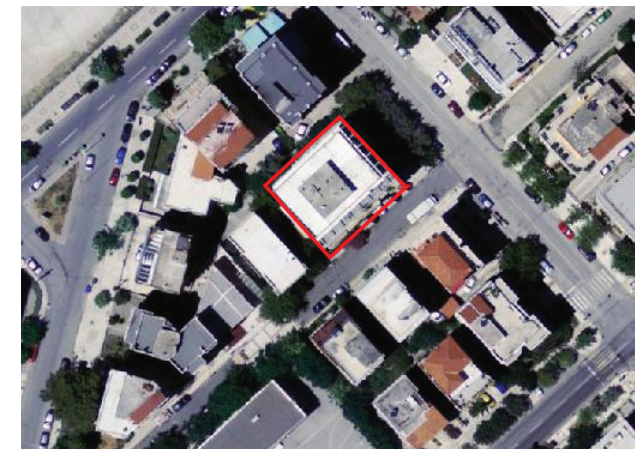


Abb. 180. Lage Gebäude B, (nach: Hellenic Cadastre & Mapping Agency 2012)



## 6.2 Untersuchung zur Übertragbarkeit von Konzepten zur passiven Klimatisierung

Die Untersuchung zur Übertragbarkeit von Konzepten zur passiven Klimatisierung, die aus der Untersuchung der traditionellen Bebauung abgeleitet werden konnten, erfolgte ebenfalls in einzelnen Schritten. Zunächst wurde die Anwendung von Konzepten zur natürlichen Lüftung der Räume getestet. Anschließend wurden die Orientierung der Räume, die Verschattungselemente und schließlich die verwendeten Baumaterialien betrachtet.

### 6.2.1 Anwendung von Lüftungskonzepten

Zunächst wurde geprüft, inwieweit sich die Luftwechselrate bei den betrachteten Beispielgebäuden positiv auf die Innenraumtemperaturen im Sommer auswirkt. Das Erhöhen der Luftwechselrate kann in den Bestandsgebäuden je nach Ausgangslage durch unterschiedliche Maßnahmen, ggf. in Kombination erreicht werden.



Abb. 181. Dachlandschaft in Thessaloniki mit Dachlüftern (eigene Aufnahme, 2013)

#### Veränderung des Grundrisses zur Ermöglichung der Querlüftung

Dies ist eine Maßnahme, welche das Lüftungspotential stark erhöhen kann, sie ist jedoch aufwendig und gegebenenfalls aufgrund der vorhandenen Situation (Erschließung, Kubatur des Gebäudes, Statik etc.) nicht durchführbar.

#### Ermöglichen der Nachtlüftung

Klappläden mit Lamellen und/oder zusätzliche Lüftungsöffnungen bieten durch den Einbruchschutz die Möglichkeit zur Nachtlüftung und zum Lüftung bei Abwesenheit.

#### Zusätzliche Lüftungsöffnungen

Ein zusätzliches Fenster kann die Querlüftung in einem Raum oder durch angrenzende Räume ermöglichen. Lüftungsöffnungen über Türen und in der Fassade können ebenfalls die natürliche Lüftung verbessern.

#### Ertüchtigen von Dachlüftern

Die für die Lüftung von innenliegenden Räumen häufig verwendeten Dachlüfter können ertüchtigt werden, um eine Querlüftung zwischen einer Fassadenöffnung und dem Dachlüfter zu ermöglichen, wenn dies nicht über zwei Fassaden möglich ist.

Die natürliche windinduzierte Lüftung über die Fenster ist am jeweiligen Standort von der umgebenden Bebauung abhängig. Im Beispiel A befindet

sich die eine Fassade des Gebäudes in einer Straßenschlucht, die andere Fassade zu einem geschlossenen Innenhof hin. Untersuchungen zum Lüftungspotential in vergleichbarem städtischen Umfeld in Athen haben gezeigt, dass die aufgrund von gemessenen Windstärken errechneten LWR bei einer Querlüftung für den in der Studie getesteten Raum immer in einem Bereich mindestens 10/h betragen. Sie können aber auch weit über 60/h liegen (Geros, 2005:251).

Beispielgebäude B ist ein freistehendes Appartementhaus, welches an zwei Seiten an gerade verlaufende Straßenabschnitte angrenzt. Auch für diesen Fall ist anzunehmen, dass durch Querlüftung eine hohe LWR erreicht werden kann.

◇ Beispielgebäude A

Für alle drei Räume A1, A2 und A3 stellt sich durch die Simulationen dar, dass der Einfluss auf den sommerlichen Wärmeschutz beim Vergleich der LWR 1/h und 3/h am höchsten ausfällt. Höhere LWR wirken sich zwar positiv auf die Temperaturen aus, haben aber nicht mehr den gleichen signifikanten Einfluss.

Für alle drei Räume besteht aufgrund der Grundrissgestaltung nur eine sehr eingeschränkte Möglichkeit zur Querlüftung. Der enge Flur verläuft verwinkelt und der Abstand zwischen den Fassaden ist mit über 12 m so groß, dass das Potential einer Querlüftung als sehr gering eingestuft werden muss. In den Räumen selbst ist die Lüftung über nur ein

Fenster möglich. Eine Erhöhung der LWR könnte für die Räume A1 und A2 darin bestehen, die ggf. vorhandenen Dachlüfter des angrenzenden Bades zu ertüchtigen und dadurch eine Querlüftung zu ermöglichen. Raum A3 hat zwei Außenwände, so dass eine Querlüftung durch ein zusätzliches Fenster an dieser Fassade realisiert werden könnte.

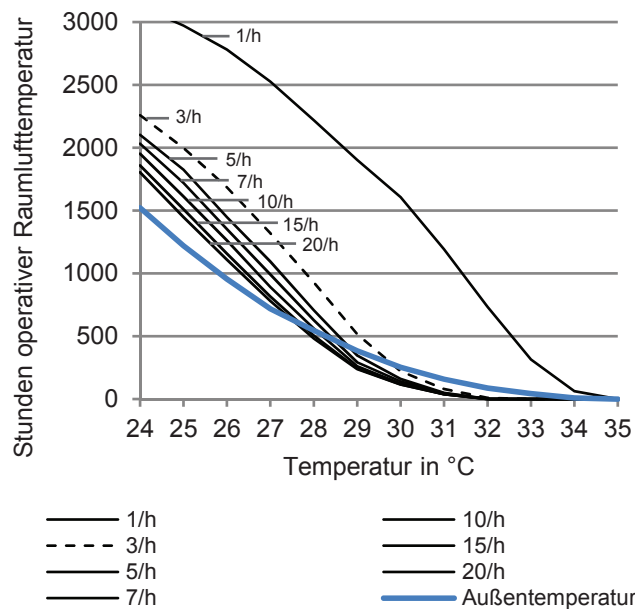


Abb. 182. Raum A1, Einfluss der Luftwechselrate auf die Temperaturen im Raum im Sommer

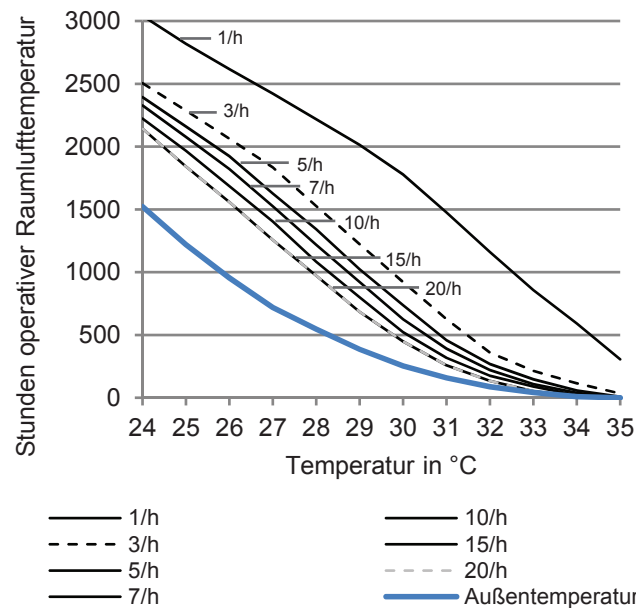


Abb. 183. Raum A2, Einfluss der Luftwechselrate auf die Temperaturen im Raum im Sommer

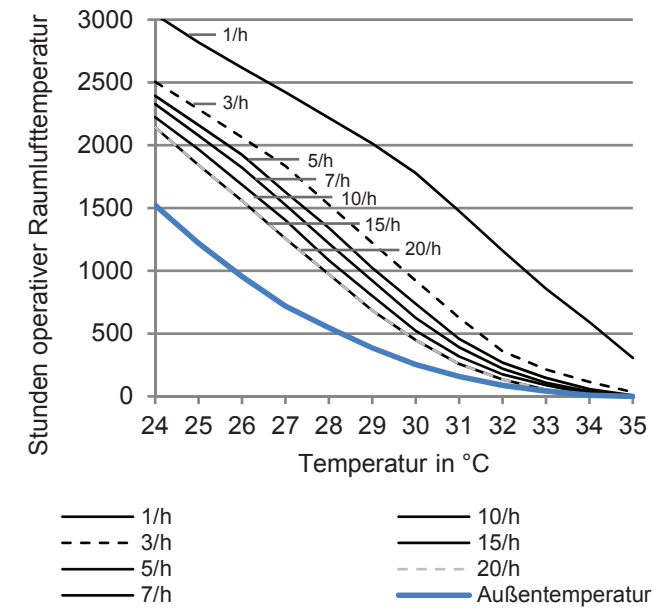


Abb. 184. Raum A3, Einfluss der Luftwechselrate auf die Temperaturen im Raum im Sommer

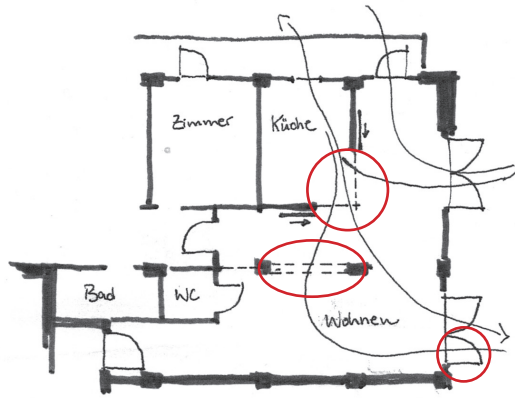
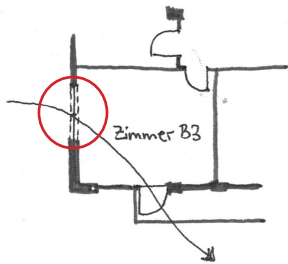


Abb. 185. Grundriss Raum B1 mit erhöhtem Lüftungspotential durch höhere Durchlässigkeit im Raum und zusätzlichen Fensterflügel



Beispielgebäude B, Zimmer B3

Abb. 186. Grundriss Raum B3 mit erhöhtem Lüftungspotential durch zusätzlichen Fensterflügel

◇ Beispielgebäude B

Für Raum B1 stellt es sich ebenso dar, dass eine Erhöhung der LWR von 1/h auf 3/h einen signifikanten Unterschied macht. Durch den Grundriss der Wohnung besteht für diesen Raum kaum Potential zur Querlüftung. Lösungen für dieses Problem könnten Deckenventilatoren sein oder eine Umgestaltung des Grundrisses (siehe Abb. 186). Die gezeigten Vorschläge für die Ergänzung von Fassadenöffnungen sind lediglich Skizzen, die verdeutlichen sollen, in welcher Form eine Verbesserung der natürlichen Lüftung möglich sein kann. Es muss zur erfolgreichen Konzeption solcher Maßnahmen für jeden Einzelfall überprüft werden, welches Potential in Bezug auf die äußeren Parameter für eine natürliche Lüftung bestehen.

Auch für Raum B3 im 6. Geschoss zeigen die Simulationsergebnisse, dass der Unterschied zwischen einer LWR von 1/h und 3/h die größte Wirkung ausmacht. Eine Erhöhung der LWR wäre für diesen Raum durch ein zusätzliches Fenster möglich (siehe Abb. 187). Die Temperaturen in dem Raum fallen insgesamt sehr hoch aus, denn es entsteht aufgrund der Lage der zwei Außenwände nach Süden und der ungedämmten Dachfläche ein großer Wärmeeintrag durch solare Einstrahlung. Daher führt im Gegensatz zu Raum B1 eine Erhöhung der LWR auf 45/h zu einer weiteren Reduzierung der Innenraumtemperaturen.

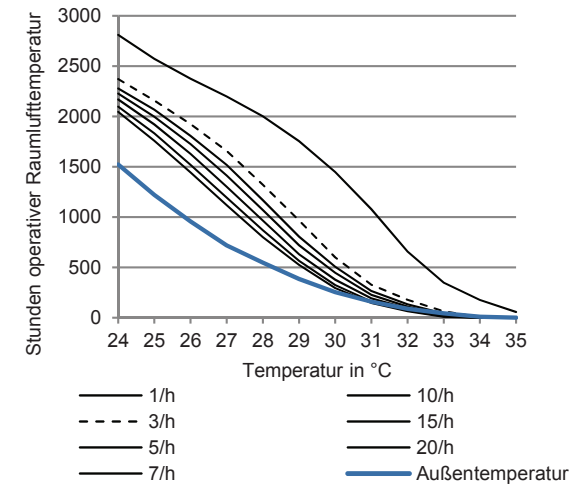


Abb. 187. Raum B1, Einfluss der Luftwechselrate auf die Temperaturen im Raum im Sommer

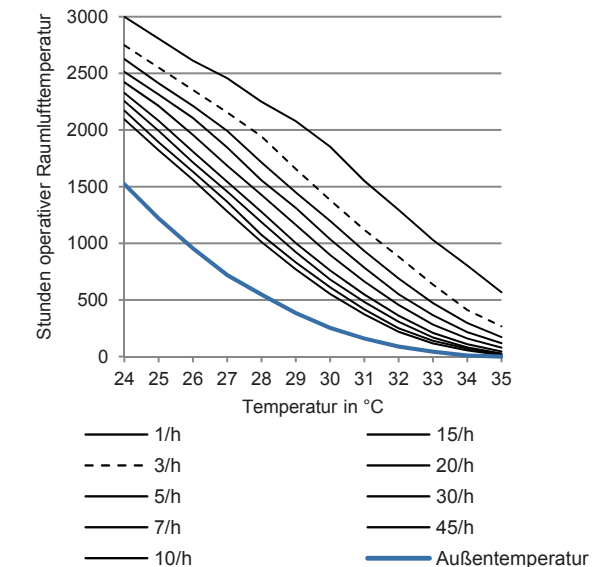


Abb. 188. Raum B3, Einfluss der Luftwechselrate auf die Temperaturen im Raum im Sommer

## 6.2.2 Anwendung von Konzepten zur Orientierung der Gebäude

Solare Wärmeeinträge durch die Sonne können im Winter den Heizwärmebedarf signifikant verringern. Gleichzeitig muss darauf geachtet werden, dass diese im Sommer vermieden werden. Bei der traditionellen Bauweise in der Oberstadt von Thessaloniki wurde dies durch die Orientierung der Gebäude in Ost-West Richtung, mit der geöffneten Fassade nach Süden und einem Dachüberstand zur Verschattung im Sommer erreicht. Die Fassaden nach Osten und Westen weisen einen geringen Öffnungsflächenanteil auf. Es ist bei Sanierungen von Bestandsgebäuden zwar nicht möglich die Orientierung des Gebäudes zu verändern, doch kann beispielsweise die Größe der Fensterflächen verändert werden.

### ◇ Beispielgebäude A

Am Beispiel des Raumes A2, einem Schlafzimmer im 6. Geschoss des Beispielgebäudes A, lässt sich durch die Gebäudesimulationen folgendes feststellen: Wird die Fensterfläche des nach Süden gerichteten Raumes verdoppelt, sinkt der Heizwärmebedarf für den Raum durch die erhöhten solaren Gewinne. Dies gilt jedoch nur, wenn die Fenster einfachverglast sind. Mit einer WSV ( $g = 0,6$ ,  $U_w = 1,2 \text{ W/m}^2\text{K}$ ) wird der Heizwärmebedarf nur geringfügig beeinflusst, da die solaren Gewinne wesentlich niedriger ausfallen (Abb. 190). Dieses überraschende Ergebnis widerspricht den

üblicherweise herausgegebenen Empfehlungen, die für energetische Sanierungen generell den Austausch von Einfachverglasungen empfehlen. Die Literaturrecherchen zu dieser Arbeit fanden Hinweise darauf nur in einer einzigen Arbeit (Theodoridou, 2011:68), in der angemerkt wird, dass eine Isolierverglasung bei Polykatoikia nicht unbedingt einen signifikanten Einfluss auf den Heizenergiebedarf habe.

Für den betrachteten Raum steigen die sommerlichen Raumtemperaturen nicht signifikant an, wenn ein wirksamer Schutz vor solaren Einträgen in den Raum besteht. Es wurde eine Verschattung mit traditionellen Klappläden angenommen. Zwischen einer Einfachverglasung und einer Wärmeschutzverglasung besteht in Bezug auf den sommerlichen Wärmeschutz für den gewählten Fall kein Unterschied.

Die günstige Orientierung größerer Fensterflächen nach Süden ließe sich bei einer Sanierung in dem betrachteten Fallbeispiel verwirklichen, denn die gemauerten Außenwände des Raumes sind Ausfachungen des Betonskeletts und nicht tragend.

	Heizwärmebedarf	
	in kWh/a	in kWh/m <sup>2</sup> a
Fensterfläche 1,6 m <sup>2</sup> mit EV / WSV	2011 / 1994	135 / 134
Fensterfläche 3,2 m <sup>2</sup> mit EV / WSV	1811 / 1772	122 / 119

Abb. 189. Heizwärmebedarf Raum A2, Schlafzimmers im 6. OG bei unterschiedlicher Fenstergröße und unterschiedlicher Verglasung.

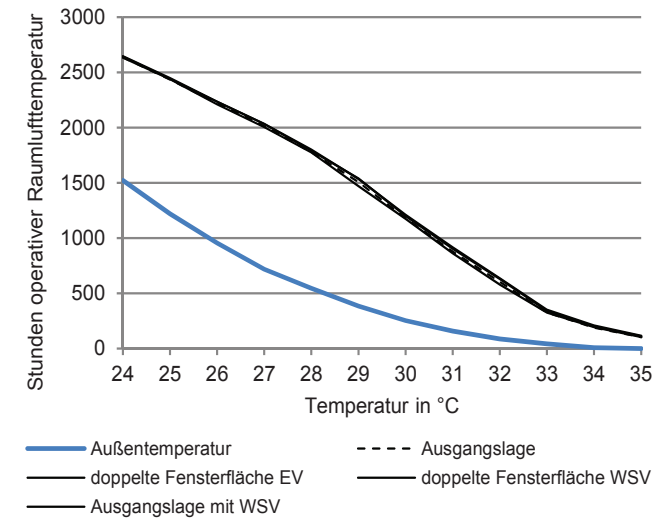


Abb. 190. Raum A2, Einfluss von Fenstergröße und Verglasung auf die Innenraumtemperaturen im Sommer

Zum Vergleich wurden für Raum A3, nach Norden orientiert, ebenfalls die Auswirkungen einer WSV und einer Vergrößerung der Fensterfläche simuliert. Für diesen Raum führt eine zusätzliche Fensterfläche von 2 m<sup>2</sup> nach Nordwesten orientiert, vor allem in der Kombination mit einer WSV zu einer Reduktion des Heizwärmebedarfs (siehe Abb. 192).

	Heizwärmebedarf	
	in kWh/a	in kWh/m <sup>2</sup> a
Fensterfläche 3,2 m <sup>2</sup> mit EV / WSV	3260 / 3063	356 / 335
Fensterfläche 5,2 m <sup>2</sup> mit EV / WSV	3174 / 2892	347 / 316

Abb. 191. Raum A3, Heizwärmebedarf bei unterschiedlicher Fenstergröße und unterschiedlicher Verglasung.

Auf den sommerlichen Wärmeschutz hat die zusätzliche Fensterfläche keine Auswirkungen, wenn sie durch Klappläden verschattet werden.

#### ◇ Beispielgebäude B

Für das Beispielgebäude B wurde Raum B4 - eine Küche im obersten Geschoss - mit einem kleinen nach Süden orientierten Fenster von 0,35 m<sup>2</sup>, betrachtet. Es wurde wie im vorigen Beispiel eine Verschattung mit Klappläden angenommen. Im Sommer verändern sich die Temperaturen im Innenraum bei gleicher LWR nur geringfügig, wenn die Fensterfläche um etwa 1 m<sup>2</sup> ergänzt wird (siehe Abb. 193). Überraschenderweise sind die Temperaturen am niedrigsten, wenn das Fenster größer ist und eine EV hat. Dies könnte daran liegen, dass der Raum nachts schneller wieder abkühlt. Wird ein größeres Lüftungspotential durch die größere Öffnung angenommen (LWR 3/h statt 1,5/h), liegen die Temperaturen im Raum trotz der größeren Fensterflächen niedriger als bei der Ausgangssituation (siehe Abb. 194). Zwischen einer EV und einer WSV bestehen keine deutlichen Unterschiede.

Der Heizwärmebedarf für den Raum sinkt durch höhere solare Gewinne aufgrund größerer Fensterflächen. Durch eine WSV wird er jedoch nur geringfügig beeinflusst (siehe Abb. 195). Die geringeren solaren Gewinne durch eine WSV konkurrieren mit den besseren Wärmedämmeigenschaften. In dem betrachteten Fall ist diese Bilanz fast ausgeglichen.

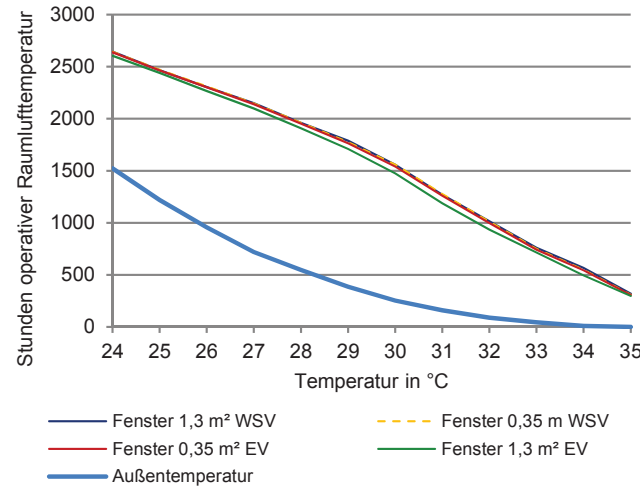


Abb. 192. Raum B4, Einfluss von Fenstergröße und Verglasung auf die Innenraumtemperaturen, LWR 1,5/h

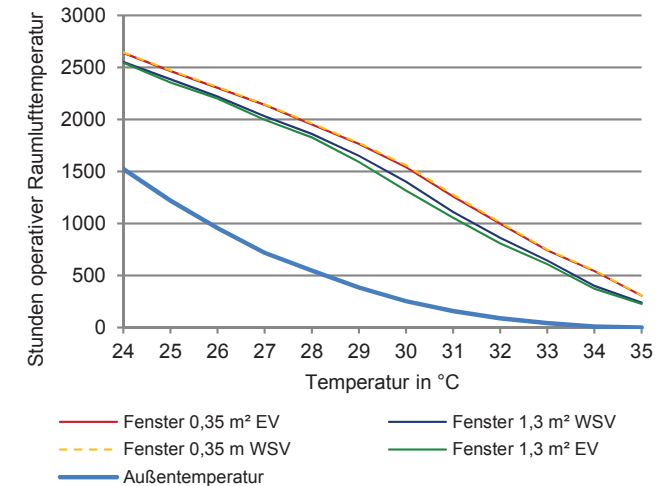


Abb. 193. Raum B4, Einfluss von Fenstergröße und Verglasung auf die Innenraumtemperaturen, LWR 1,5/h (Fenster 0,35 m<sup>2</sup>) und 3/h (Fenster 1,3m<sup>2</sup>)

	Heizwärmebedarf	
	in kWh/a	in kWh/m <sup>2</sup> a
Fensterfläche 0,35 m <sup>2</sup> mit EV / WSV	1915 / 1901	186 / 185
Fensterfläche 1,3 m <sup>2</sup> mit EV / WSV	1727 / 1654	168 / 161

Abb. 194. Raum B4, Heizwärmebedarf bei unterschiedlicher Fenstergröße und im Vergleich von EV und WSV



### 6.2.3 Anwendung von Konzepten zur Verschattung

Die Untersuchungen zu den Verschattungselementen zeigte, dass im Klima von Thessaloniki die traditionell verwendeten Klapppläden günstige Eigenschaften vereinen. Daher wurde getestet, ob diese auch bei den beispielhaft untersuchten Gebäuden sinnvoll genutzt werden können. Für die Simulationen wurde eine Bedienung der Verschattungselemente, welche die Überhitzung des Innenraums vermeidet angenommen. In der Praxis setzt das voraus, dass die Nutzerinnen die entsprechenden Kenntnisse dazu besitzen und auch umsetzen. Ebenso müssen sie während der Heizperiode korrekt bedient werden, um solare Gewinne erzielen zu können aber auch als zusätzliche Wärmedämmung für die Fenster im Winter zu fungieren.

#### ◇ Beispielgebäude A

Für Raum A1 werden in Abb. 196 die Auswirkungen unterschiedlicher Verschattungselemente auf den sommerlichen Wärmeschutz, ausgehend von der ungedämmten Fassade des Beispielgebäudes A dargestellt. Zum Vergleich wurden die Innenraumtemperaturen auch für den Fall simuliert, dass an der Fassade eine außenliegende Wärmedämmung vorhanden ist (Abb. 197). Die Temperaturen liegen zwar insgesamt niedriger, die Verschattungselemente haben jedoch vergleichbare Auswirkungen.

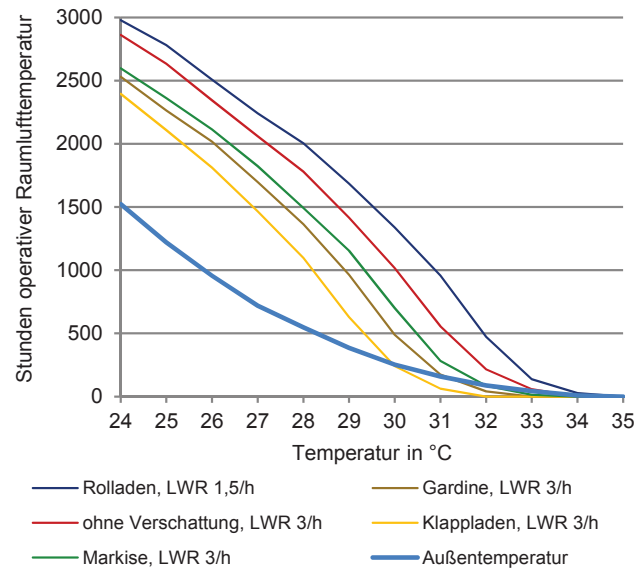


Abb. 195. Raum A1, Auswirkung unterschiedlicher Verschattungselemente auf die Raumlufttemperatur

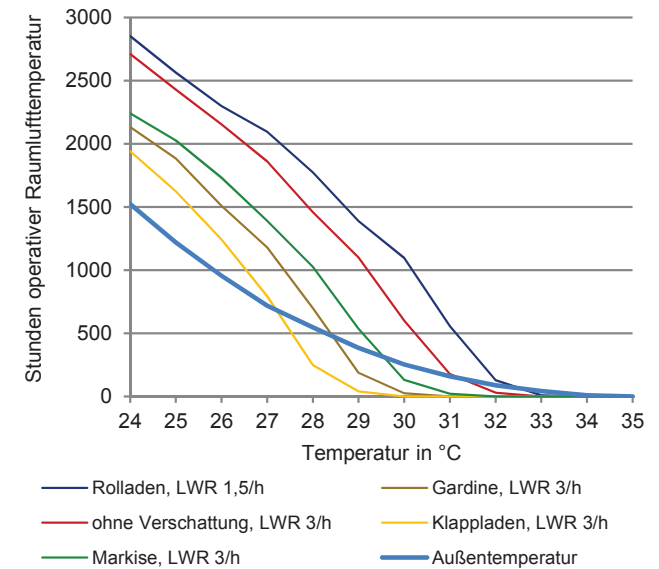


Abb. 196. Raum A1, Auswirkung unterschiedlicher Verschattungselemente auf die Raumlufttemperatur, Außenwände gedämmt, 10 cm Wärmedämmung, WLG 045

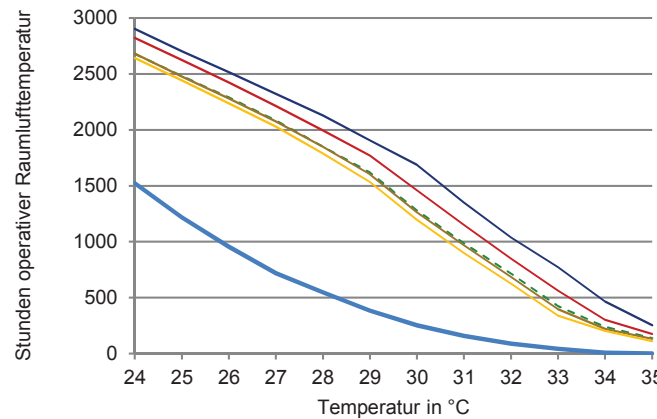


Abb. 197. Raum A2, Auswirkung unterschiedlicher Verschattungselemente auf die Raumlufttemperatur

Für Raum A2, welcher ebenfalls nach Süden orientiert ist, sich jedoch direkt unter der ungedämmten Dachfläche befindet, zeigen die Simulationen vergleichbare Ergebnisse. Eine Verschattung der transparenten Flächen mit Klappläden führt zu den niedrigsten Innenraumtemperaturen im Sommer (Abb. 198).

#### ◇ Beispielgebäude B

Im Beispielgebäude B wurde Raum B3 im 6. Geschoss, nach Süden orientiert, betrachtet. Die Ergebnisse fallen anders aus als bei der Untersuchung von Raum A1. Die Abb. 199 und 200 verdeutlichen, dass Sanierungsmaßnahmen nie voneinander getrennt betrachtet werden dürfen, weil die Kombinationen unterschiedlicher Veränderungen am Gebäude neue Ergebnisse hervorbringen können. Im ersten Fall ist die Dachfläche über dem betrachteten Raum nicht wärmegeklämt. Die Simulationsergebnisse zeigen, dass eine Gardine als Verschattungselement zu den geringsten Innenraumtemperaturen führt. Ist jedoch das Dach des Gebäudes geklämt, hat dies auf den sommerlichen Wärmeschutz des darunter liegenden Raumes große Auswirkungen. Für diesen Fall wären als Verschattungselemente Klappläden zu empfehlen.

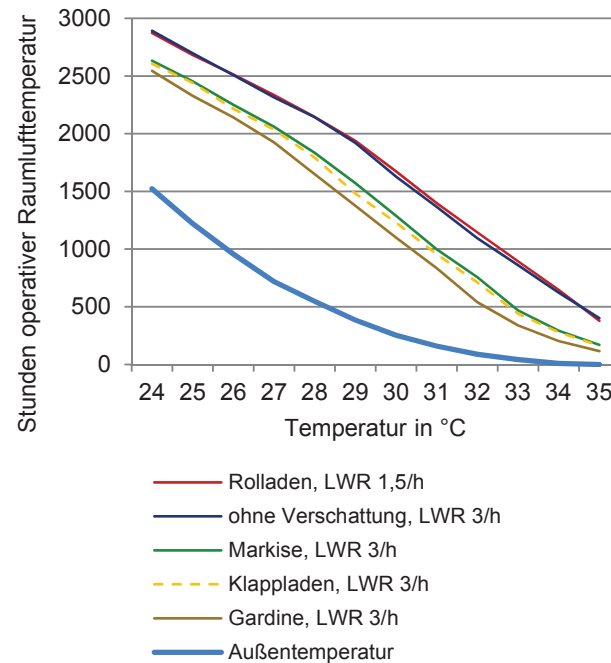


Abb. 198. Raum B3, Auswirkung unterschiedlicher Verschattungselemente auf die Raumlufttemperatur

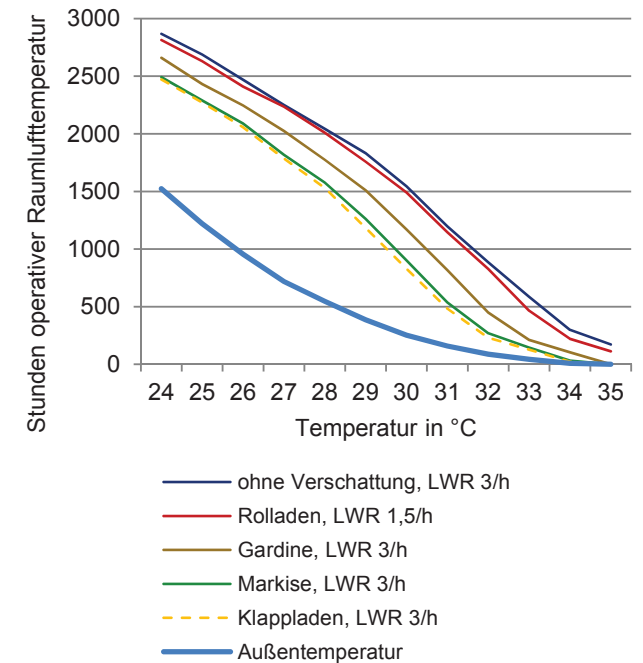


Abb. 199. Raum B3, Auswirkung unterschiedlicher Verschattungselemente auf die Raumlufttemperatur mit geklämter Dachfläche

#### 6.2.4 Anwendung von Konzepten durch die Wahl von Baumaterialien

Aus den Untersuchungen zu den bei der traditionellen Bauweise verwendeten Baumaterialien ging hervor, dass Außenbauteile aus ungedämmtem Beton oder Ziegelmauerwerk für das regionale Klima ungeeignete Eigenschaften besitzen (siehe 5.4.2). Nicht gedämmte Fassaden und Dächer heizen sich im Sommer durch solare Einstrahlung auf und geben die Wärme aufgrund der hohen Temperaturleitfähigkeit schnell an den Innenraum ab. Im Winter ist es das Gegenteil, die Heizwärme wird nach außen geleitet und der Heizwärmebedarf ist hoch.

Außerdem konnte festgestellt werden, dass die traditionellen Häuser aus lokal verfügbaren Materialien erbaut wurden. Diese Materialien, wie Holz, Naturstein, Ziegel, Kalk verursachten keinen hohen Energieverbrauch durch lange Transportwege und sind verhältnismäßig unproblematisch in der Entsorgung. Dieses Konzept lässt sich heute noch immer anwenden, wenn bei der Auswahl der Baumaterialien auf die lokal verfügbaren Ressourcen zurückgegriffen wird (das dies möglich ist wird beispielsweise in der Lehmarchitektur des Architekten Martin Rauch deutlich) und die gesamte Energiebilanz, einschließlich der Entsorgung eines Materials schon in der Planung berücksichtigt wird.

Da in dieser Arbeit eine Untersuchung zur Übertragbarkeit traditioneller Konzepte durchgeführt wurde,

liegt der Schwerpunkt jedoch nicht auf diesem Faktor, er soll lediglich genannt werden. Die Materialwahl ist vom jeweiligen Bauprojekt abhängig und muss im Zusammenhang mit den vielen Randbedingungen einer Planung entschieden werden, da nicht jedes Material für jeden Zweck eingesetzt werden kann. Im Vergleich der Energiebilanzen verschiedener Dämmmaterialien wird deutlich, dass im kumulierten Energieaufwand große Unterschiede bestehen. Für eine nachträgliche Dämmung einer Fassade, wie sie in dem folgenden Beispiel untersucht wurde, kann die bewusste Auswahl der für eine Außendämmung unter Putz aus den zur Verfügung stehenden Materialien (eine Auswahl wird in Abb. 201 gezeigt) die Energiebilanz positiv beeinflussen.

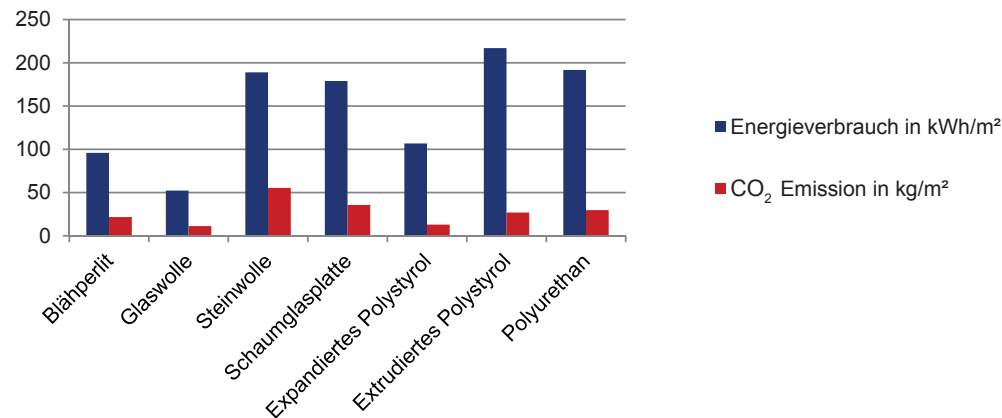


Abb. 200. Kumulierter Energieaufwand (Herstellung, Nutzung und Beseitigung) und CO<sub>2</sub>-Emission unterschiedlicher Dämmmaterialien für eine Außendämmung unter Putz,  $U = 0,15 \text{ W/m}^2\text{K}$  (nach: VDI ZRE, 2014)

◇ Beispielgebäude A

Um den Einfluss des Materials der Außenbauteile auf den sommerlichen Wärmeschutz zu untersuchen, wurden zunächst für Raum A1 Simulationen durchgeführt. Diese zeigten, dass sich eine Wärmedämmung der Fassade positiv auf die Innenraumtemperaturen im Sommer auswirkt. Für den untersuchten Raum ist jedoch bereits bei einer Dämmstärke von 2,5 cm (WLG 045) das Maximum erreicht, höhere Dämmstärken bewirken keine weitere Senkung der Temperaturen (Abb. 202).

Bezogen auf den Heizwärmebedarf führt die Dämmung der Fassade mit 2,5 cm Dämmstärke (WLG 045) zu einer starken Absenkung des Heizwärmebedarfs. Bis 5 cm Dämmstärke sinkt der Heizwärmebedarf signifikant. Höhere Dämmstärken haben einen geringeren Einfluss (siehe Abb. 203).

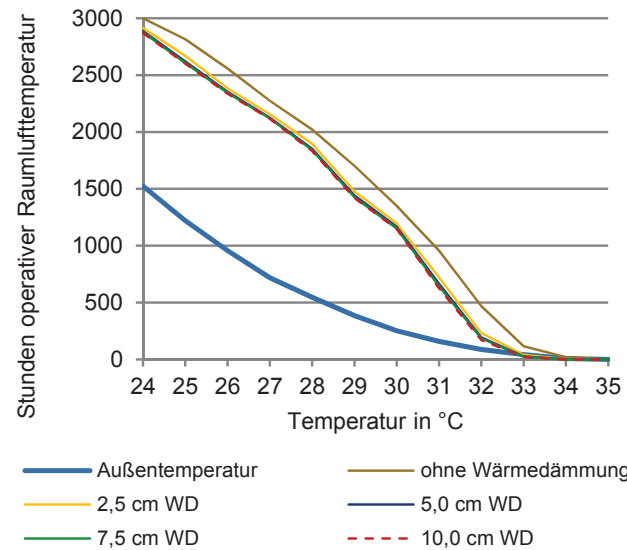


Abb. 201. Raum A1, Einfluss unterschiedlicher Dämmstärken einer Außendämmung (WLG 045) auf die Innenraumtemperaturen

Dämmstärke	Heizwärmebedarf		U-Wert
	in kWh/a	in kWh/m <sup>2</sup> a	Außenwand W / (m <sup>2</sup> K)
-	516	35	2,50
2,5 cm	374	25	1,04
5,0 cm	319	21	0,66
7,5 cm	291	20	0,48
10,0 cm	267	18	0,38

Abb. 202. Raum A1, Heizwärmebedarf bei unterschiedlichen Dämmstärken einer Außendämmung (WLG 045)

Die Auswirkung auf den sommerlichen Wärmeschutz und den Heizwärmebedarf wurde zum Vergleich ebenfalls für Raum A2 im obersten Geschoss des Gebäudes simuliert. Die Dämmung der Dachfläche hat starke Auswirkung auf den sommerlichen Wärmeschutz, wohingegen die zusätzliche Dämmung der Fassade einen geringeren Einfluss hat und ab einer Dämmstärke von 2,5 cm keine weitere Senkung der Innenraumtemperaturen mehr erfolgt (siehe Abb. 204). Eine Dämmung der Fassade ohne auch das Dach zu dämmen ist nach

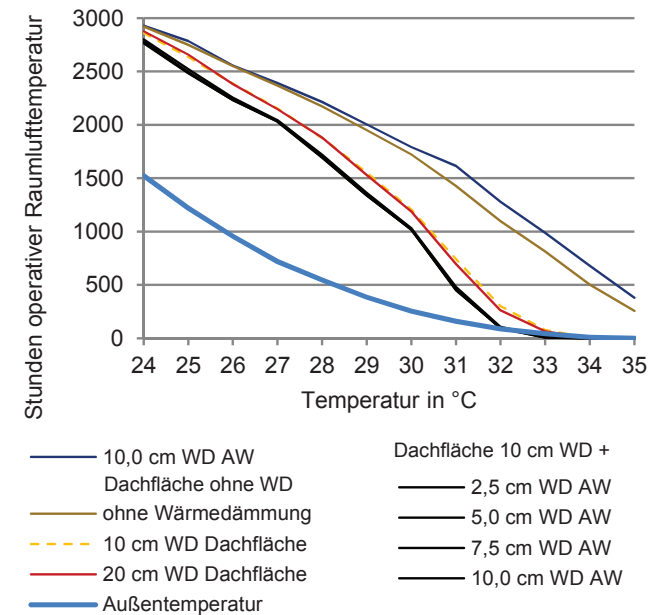


Abb. 203. Raum A2, Einfluss unterschiedlicher Varianten einer Dämmung der Fassade auf die Innenraumtemperaturen bei einer LWR von 1,5/h

den Simulationsergebnissen nicht sinnvoll, da die Innenraumtemperaturen durch diese Maßnahme stark ansteigen. Die Wärmeeinträge, die durch die ungedämmte Dachfläche anfallen, können aufgrund der gedämmten Außenwände schlechter wieder abgestrahlt werden.

Mit einer erhöhten LWR auf 3/h ergeben die Simulationen prinzipiell das gleiche Ergebnis, die Temperaturen liegen jedoch wesentlich niedriger (siehe Abb. 205). Eine verbesserte natürliche Lüftung könnte für den Raum durch einen Austausch der Rollläden

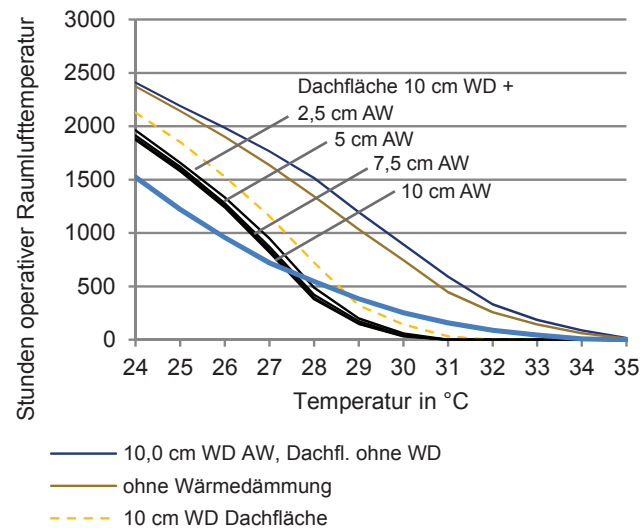


Abb. 204. Raum A2, Einfluss unterschiedlicher Varianten zur Dämmung der Fassade auf die Innenraumtemperaturen bei einer LWR von 3/h

als Verschattungselemente gegen Klappläden mit Lamellen und die Ertüchtigung des Dachlüfters des Bades zur Querlüftung ermöglicht werden.

Die Auswirkungen auf den Heizwärmebedarf durch eine Dämmung der Dachfläche sind hoch, verglichen dazu ist das Einsparpotential bei einer zusätzlichen Dämmung der Außenwände eher gering. Mehr als 5 cm Wärmedämmung bewirken zwar eine weitere Senkung des Heizwärmebedarfs, sie fällt jedoch mit zunehmender Dämmstärke immer geringer aus. Eine Dämmung der Fassade, ohne auch den U-Wert der Dachfläche zu verbessern ist, vergleichbar den Ergebnissen zum sommerlichen Wärmeschutz, nicht sinnvoll.

Wärmedämmung	Heizwärmebedarf		U-Wert in W / (m <sup>2</sup> K)	
	kWh/a	kWh/m <sup>2</sup> a	Dach	Wand
-	1798	121	-	-
Dachfläche 10 cm	836	56	0,31	2,50
Dachfläche 20 cm	667	45	0,16	2,50
+ 2,5 cm Dämmung der Außenwand	516	35	0,16	1,04
+ 5 cm Dämmung der Außenwand	460	31	0,16	0,66
+ 7,5 cm Dämmung der Außenwand	428	29	0,16	0,48
+ 10 cm Dämmung der Außenwand	406	27	0,16	0,38
10 cm Dämmung Außenwand, Dachfläche ohne Dämmung	1560	105	2,98	0,38

Abb. 205. Heizwärmebedarf für Raum A2 bei unterschiedlichen Dämmstärken einer Außendämmung (WLG 045)



◇ Beispielgebäude B

Im Beispielgebäude B wurde zunächst Raum B1 untersucht, um Kenntnisse darüber zu gewinnen, wie sich unterschiedliche Dämmmaßnahmen auswirken. Insgesamt ist die Dämmung der Fassade in diesem Beispiel anders zu bewerten als bei Beispielgebäude A. Dies hat für Raum B1 seine Ursache darin, dass dieser in der Ecke des Gebäudes liegt und daher drei Seiten, zwei Wände und der Boden, Außenbauteile sind.

Für den sommerlichen Wärmeschutz stellen sich die Ergebnisse abhängig von der LWR unterschiedlich dar. Bei einer geringen LWR von 1,5 /h hat eine gedämmte Fassade negative Auswirkungen auf den sommerlichen Wärmeschutz (siehe Abb. 207). Ist die LWR zu niedrig, kann die Wärme, die trotz der Wärmedämmung in den Raum gelangt nicht mehr abgeführt werden, weil die Wände nachts nicht nach außen auskühlen können. Dies ist in den Simulationsergebnissen in Abb. 212 am Temperaturverlauf der Bauteiloberflächen zu sehen.

Eine Wärmedämmung der Außenbauteile muss daher mit einem Konzept zur natürlichen Lüftung kombiniert werden. Sobald die LWR auf 3/h angehoben wird, hat das Dämmen positive Auswirkungen auf die Innenraumtemperaturen. Diese sind nun bei hohen Außentemperaturen von über 30°C, ohne Energie zum Kühlen einzusetzen, niedriger als außen (siehe Abb. 208).

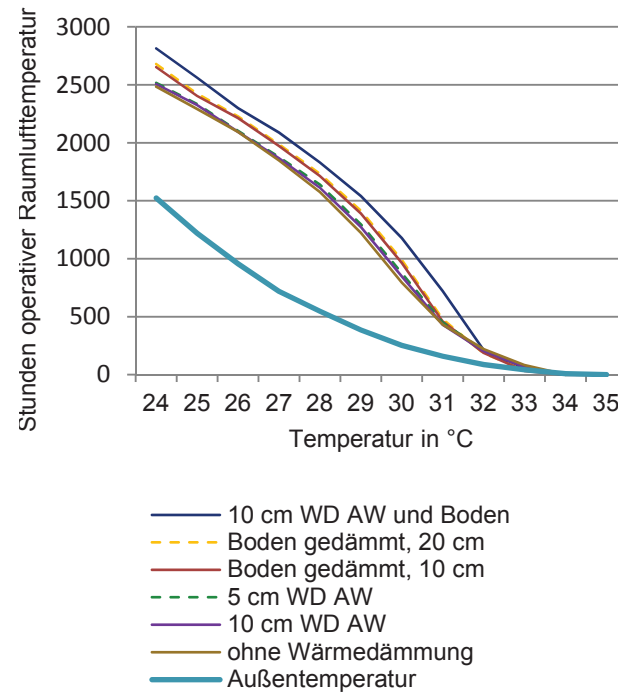


Abb. 206. Raum B1, Einfluss unterschiedlicher Dämmstärken einer Außendämmung auf die Innenraumtemperaturen bei einer LWR von 1,5/h

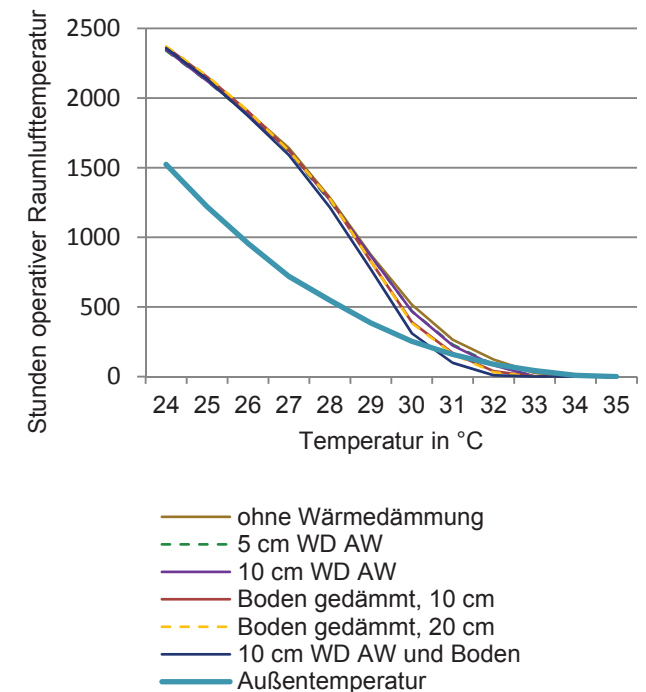


Abb. 207. Raum B1, Einfluss unterschiedlicher Dämmstärken einer Außendämmung auf die Innenraumtemperaturen bei einer LWR von 3/h

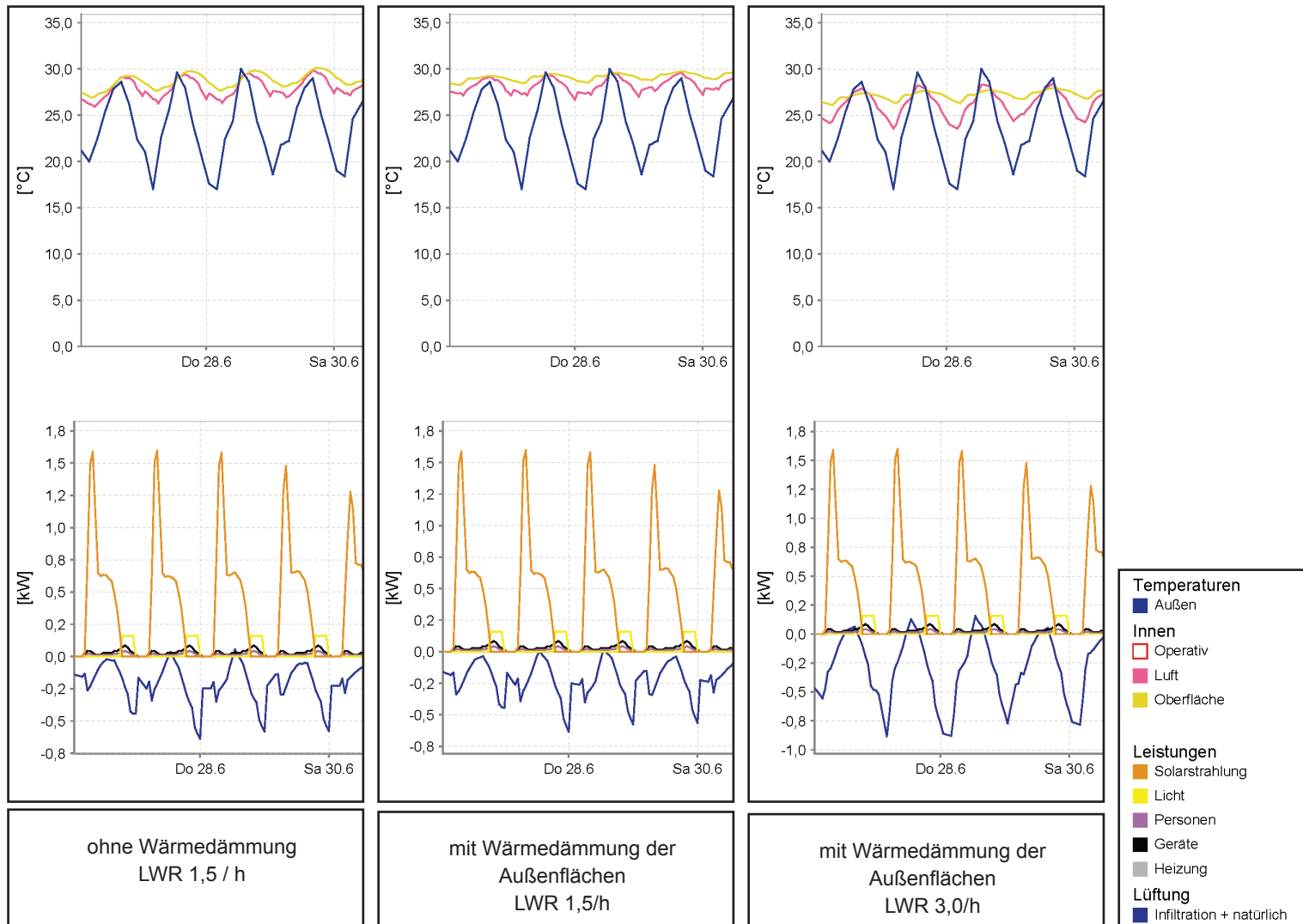


Abb. 208. Raum B1, Vergleich des Temperaturverlaufs bei unterschiedlichen Konzepten zur Wärmedämmung und Lüftung

	Heizwärmebedarf		U-Wert in W/(m <sup>2</sup> ·K)	
	in kWh/a	in kWh/m <sup>2</sup> a	Boden	Außenwand
Außenwand und Boden ohne Wärmedämmung	5758	162	3,12	2,50
Außenwand ohne Wärmedämmung und Boden mit 10 cm Wärmedämmung	3844	108	0,39	2,50
Außenwand ohne Wärmedämmung und Boden mit 20 cm Wärmedämmung	3662	103	0,21	2,50
Außenwand mit 5 cm Wärmedämmung Boden ohne Wärmedämmung	4698	132	3,12	0,66
Außenwand mit 10 cm Wärmedämmung Boden ohne Wärmedämmung	3249	92	3,12	0,38
beide Flächen mit 10 cm Wärmedämmung	2529	71	0,39	0,38

Abb. 209. Raum B1, Heizwärmebedarf bei unterschiedlichen Varianten der Wärmedämmung (WLG 045)

	Heizwärmebedarf		U-Wert in W/(m <sup>2</sup> ·K)	
	in kWh/a	in kWh/m <sup>2</sup> a	Dachfläche	Außenwand
Außenwand und Dachfläche ohne Wärmedämmung	5066	335	2,99	2,50
Dachfläche mit 10 cm Wärmedämmung	3763	249	0,31	2,50
Dachfläche mit 20 cm Wärmedämmung	2945	195	0,16	2,50
Außenwand mit 5 cm Wärmedämmung Dachfläche ohne Wärmedämmung	4022	266	2,99	0,66
Außenwand mit 10 cm Wärmedämmung Dachfläche ohne Wärmedämmung	3879	257	2,99	0,38
beide Flächen mit 10 cm Wärmedämmung	1480	98	0,31	0,38
Außenwand mit 10 cm Wärmedämmung Dachfläche mit 20 cm Wärmedämmung	1305	86	0,16	0,38

Abb. 210. Raum B3, Heizwärmebedarf bei unterschiedlichen Varianten der Wärmedämmung (WLG 045)

Bezogen auf den Heizwärmebedarf zeigen die Simulationsergebnisse für Raum B1, dass sich dieser durch Dämmmaßnahmen stark reduzieren lässt. Eine Wärmedämmung der Außenbauteile von 10 cm (WLG 045) führt für diesen Raum zu einem deutlich verminderten Energiebedarf.

Zum Vergleich wurden für Raum B3 die in Abb. 214 aufgelisteten Varianten getestet, um den Einfluss einer Wärmedämmung der Fassaden und der Dachflächen auf den sommerlichen Wärmeschutz und den Heizwärmebedarf zu ermitteln. Die Simulationsergebnisse zeigen ebenso wie für Raum B1 eine starke Reduktion des Heizwärmebedarfs durch das Dämmen der Außenbauteile. Die getestete Variante mit einer Wärmedämmung von 10 cm auf allen Außenbauteilen führt zu einer Reduktion auf etwa 30%.

Um den sommerlichen Wärmeschutz des Raumes zu verbessern, ist es wichtig, dass alle Außenflächen gedämmt werden. Werden nur für einzelne Flächen die U-Werte verbessert, können die Wärmeeinträge, die durch die ungedämmten Flächen in den Raum gelangen schlechter wieder abgeführt werden. Dies resultiert in höheren Temperaturen im Innenraum im Vergleich zu der ungedämmten Ausgangssituation (siehe Abb. 212).

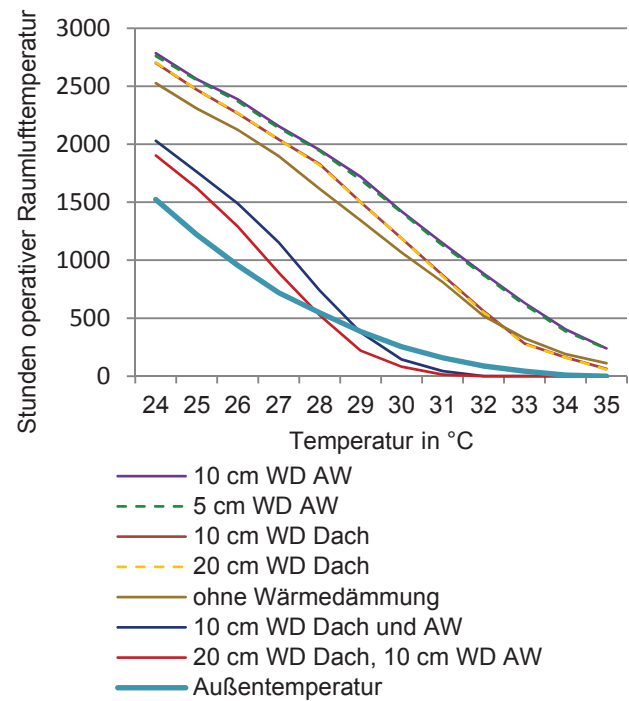


Abb. 211. Raum B3, Einfluss unterschiedlicher Dämmstärken einer Außendämmung bei einer LWR von 3/h

### 6.2.5 Ergebnisse

Die Gebäudesimulationen mit PRIMERO Komfort konnten zeigen, dass es möglich ist, Konzepte zur passiven Klimatisierung, die aus dem Studium der traditionellen Wohnhäuser in der Oberstadt von Thessaloniki abgeleitet werden konnten, auf energetische Sanierungen von Appartementhäusern aus den 1950er bis 1970er Jahren anzuwenden.

Ein besonders interessantes Ergebnis war in diesem Zusammenhang, dass durch die Simulationen gezeigt werden konnte, dass die Maßnahmen nicht getrennt voneinander betrachtet werden dürfen. Wird beispielsweise eine Fassade mit einer Wärmedämmung versehen, kann es sein, dass sich der Komfort in den Räumen im Sommer verschlechtert, wenn nicht ebenfalls ein verändertes Konzept zur Lüftung der Räume besteht.

Im folgenden Abschnitt werden für die untersuchten Beispielräume in den Gebäuden A und B Konzepte zur Optimierung vorgestellt, die unter Berücksichtigung der Wechselwirkungen zwischen den Maßnahmen die Auswirkungen auf den Heizwärmebedarf und den sommerlichen Wärmeschutz berücksichtigen. Für alle Räume wurden diese Werte auch für die Umsetzung der Minimalanforderungen der aktuell geltenden Gesetzgebung (KENAK) berechnet.



## 6.3 Anwendung der Konzepte zur passiven Klimatisierung

Werden die oben beschriebenen Konzepte zur passiven Klimatisierung bei einer energetischen Sanierung angewendet, können durch eine sinnvolle Kombination der Maßnahmen der Heizwärmebedarf reduziert und die Komfort in den Räumen im Sommer wesentlich verbessert werden.

Die Effizienz der Konzepte ist vom Nutzerverhalten abhängig. Vor allem für den sommerlichen Wärmeschutz zeigen die Erfahrungen, dass die notwendige starke Einflussnahme durch die Nutzerinnen häufig nicht gegeben ist. Der Bedarf, die Räume im Sommer zu kühlen könnte stark reduziert oder gänzlich unnötig werden, doch nur, wenn den Nutzerinnen bewusst ist, wann und warum sie die Fenster und Verschattungselemente öffnen und schließen müssen, um die Möglichkeiten optimal auszunutzen. Ist dies nicht gegeben, kann das Ergebnis nicht zufriedenstellend ausfallen, denn die passiven Konzepte funktionieren immer nur so gut, wie sie auch angewendet werden.

Weitere Forschung sollte erfolgen, um die Umsetzung der passiven Konzepte bezogen auf das Verhalten und den Einfluss der Nutzerinnen zu untersuchen. Dabei sollte auch erfasst werden, ob die Bewohner Klimaanlage nicht nur installieren, weil es im Raum zu warm ist, sondern auch als Statussymbol. Dies ist wiederum ein Faktor, der auch von der wirtschaftlichen Lage abhängt und sich aufgrund der Wirtschaftskrise aktuell verändert haben könnte.

Die Erfahrungen aus dem Projekt „Pefki Solar Village“ in Athen, welches seit den späten 1980er Jahren bewohnt ist haben gezeigt, dass eine starke Bindung der Bewohnerinnen an die Gebäude unerlässlich ist. Passive Systeme, die nur bei einer korrekten Bedienung durch die Nutzerinnen funktionieren, konnten ihre volle Leistung nicht erbringen, da ihnen kein Vertrauen entgegengebracht wurde. Trotz der vorangegangenen Schulungen wurden beispielsweise die Lüftungsöffnungen der Trombe Wände fast immer geschlossen gehalten und massive Bauteile, die zur Speicherung solarer Einstrahlung dienen sollten, mit Möbeln verstellt (Croxford, 2006).

Eine Ergänzung der Maßnahmen durch Kombinationen mit weiteren passiven Konzepten bedarf ebenfalls weiterer Forschung. Im Rahmen dieser Arbeit wurden nur die Möglichkeiten überprüft, die Ergebnisse aus der Untersuchung der traditionellen Wohngebäude in der Oberstadt Thessalonikis auf Sanierungen der Polykatoikia zu übertragen.

### 6.3.1 Beispielgebäude A – Anwendung der Konzepte

Für alle drei bisher betrachteten Räume A1, A2 und A3 wurden Simulationen durchgeführt, um die Übertragbarkeit der Konzepte zu überprüfen und herauszufinden, wo das Limit der passiven Maßnahmen liegt. Ausgangslage war bei allen drei Räumen eine LWR von 1,5/h und eine Infiltration  $n_{50}$  von

10/h. Die nach Süden orientierten Räume A1 und A2 haben als Verschattungselemente außenliegende Rollläden, der nach Norden orientierte Raum A3 hat innenliegende Gardinen. Als Ausgangslage wurde angenommen, dass die Verschattungselemente geschlossen sind, wenn die Sonne scheint.

Variante	
0	Ausgangslage
1	wie 0 mit Klapppläden zur Verschattung
2	wie 1 + LWR 3/h und $n_{50}$ 3/h
3	wie 2 + Fensterfläche verdoppelt
4	wie 3 + Außenbauteile mit 5 cm Wärmedämmung
4a (nur A1)	wie 4 mit WSV
4b (nur A1)	wie 4 mit SSV
5 (nur A2/A3)	wie 4 + Außenwände mit 5 cm, Dachfläche mit 20 cm Wärmedämmung
5a	wie 5 mit WSV
5b	wie 5 mit SSV
6 (nur für A3)	wie 2 + nur Dach mit 20 cm Wärmedämmung
7 (nur für A3)	wie 6 + Außenwände mit 10 cm, Dach mit 20 cm Wärmedämmung
8 (nur für A3)	wie 6 + Außenbauteile mit 10 cm Wärmedämmung
9	Mindestanforderungen der KENAK

Abb. 212. Für die Räume in Gebäude A getestete Varianten für Maßnahmen zur passiven Klimatisierung

Es wurden die in Abb. 213 aufgelisteten Varianten simuliert, und der jeweilige Heizwärmebedarf sowie die Überschreitung der Komfortklasse III nach DIN 15251 erfasst.

Eine Erhöhung der LWR im Sommer auf mindestens 3/h könnte in den Räumen über die in Abschnitt 6.2.1 beschriebenen Maßnahmen erreicht werden. Die Infiltration kann im Rahmen einer Dämmung der Fassade durch das Versiegeln von Spalten und Rissen und durch eine Überarbeitung oder den Austausch der Fenster auf  $n_{50} = 3/h$  verringert werden.

Der Einbau von Klappläden als Verschattungselemente mit verstellbaren Lamellen in einer hellen Farbe wurde in den Simulationen nur in Bezug auf den sommerlichen Wärmeschutz erfasst. Der Heizwärmebedarf ließe sich noch zusätzlich verringern, wenn die Klappläden im Winter nachts geschlossen werden. Es werden hierfür jedoch keine Werte angegeben, da sich dies in der Simulationssoftware nicht berücksichtigen lässt.

Die Wärmedämmung der Fassade wurde aufgrund der Ergebnisse (siehe 6.2.4) mit 5 cm Wärmedämmung der WLG 045 angenommen. Zum Vergleich wurde der Einfluss einer Wärmedämmung mit 10 cm WLG 045 berechnet. Die Dämmung der Dachfläche betrug in den Simulationen mit 20 cm (siehe Abb. 214).

Um die Minimalanforderungen der aktuell geltenden

Bauteil	Material	Bauteilaufbau gesamt in cm und Dämmstärke	U-Wert in W/m <sup>2</sup> K
Außenwand	Ziegelmauerwerk in Stahlbetonrahmen	23,0 + 5 cm Dämmung	0,66
Außenwand	Ziegelmauerwerk in Stahlbetonrahmen	23,0 + 10 cm Dämmung	0,38
Dach	Stahlbeton	19,5 + 20 cm Dämmung	0,16

Abb. 213. Bauteilaufbauten für die simulierten Maßnahmen zur Verbesserung von Energieeffizienz und Komfort in Beispielgebäude A

Vorschriften in einen Zusammenhang mit den getesteten Maßnahmen zur passiven Klimatisierung zu setzen, wurden die Temperaturen und der Heizwärmebedarf zum Vergleich für den Fall berechnet, dass der Raum so ausgeführt wäre, wie es den Anforderungen der KENAK entspricht (siehe Abb. 215).

Werden die oben beschriebenen Konzepte bei einer geplanten Sanierung angewendet, kann durch eine sinnvolle Kombination der Maßnahmen der

Heizwärmebedarf reduziert und die Situation in den Räumen im Sommer wesentlich verbessert werden. Ein Anhaltspunkt ist die 5% Linie in der grafischen Darstellung (Abb. 216 bis 219) unterhalb derer der sommerliche Wärmeschutz nach den Kriterien der DIN 15251 (hier angegeben für Kategorie III) ausreichend ist.

Als Ergebnis werden der Energieverbrauch, also auch die Heizenergiekosten sinken und der Komfort im Innenraum steigen. Der Bedarf, die Räume im Sommer zu kühlen könnte stark reduziert oder gänzlich unnötig werden. Dafür ist jedoch eine starke Einflussnahme durch die Nutzerinnen erforderlich.

U-Werte der Außenbauteile	
Dach/Boden gegen Außenluft	0,4 W/m <sup>2</sup> K
Außenwände gegen Außenluft	0,45 W/m <sup>2</sup> K
LWR	mindestens 0,5/h
Kunstlicht	-
Verschattungselemente	-

Abb. 214. Mindestanforderungen an mehrgeschossige Wohngebäude (KENAK, 2010)

### 6.3.2 Ergebnisse Beispielgebäude A

Für die nach Süden orientierten Räume ist die Ausgangslage durch alle vorgeschlagenen Maßnahmen zu verbessern. Für den nach Norden gerichteten Raum ist eine Verschattung mit Klappläden nicht zu empfehlen.

Für Raum A1 im 1. Geschoss führen eine Erhöhung der LWR auf 3/h und eine Verschattung mit Klappläden (A1\_2) zu akzeptablen Innenraumtemperaturen im Sommer und einer Reduzierung des Heizwärmebedarfs. Für Raum A2 müssen diese Maßnahmen mit einer Dämmung der Dachfläche kombiniert werden, um ähnliche Ergebnisse zu erzielen (A1\_4). Für Raum A3 führen die

Maßnahmen zu einer erhöhten LWR erst in Kombination mit einer Wärmedämmung der Außenbauteile zu einer deutlichen Verbesserung des sommerlichen Wärmeschutzes und einer Reduzierung des Heizwärmebedarfs (A3\_5). Am besten stellt sich die Variante mit erhöhter LWR, aber ohne Vergrößerung der Fensterfläche und einer Wärmedämmung an Fassade und Dachfläche dar (A3\_7).

Für alle drei Räume wurde der Einfluss unterschiedlicher Verglasung der Fensterflächen betrachtet. Es stellte sich heraus, dass in keinem Fall der Austausch der EV gegen eine WSV einen signifikanten Einfluss auf den Heizwärmebedarf hat. Für Raum A1 fällt der Vergleich sogar deutlich negativ für die

WSV aus (A1\_4a). Eine SSV hat kaum Auswirkungen auf eine Senkung der Innenraumtemperaturen, führt jedoch zu einem höheren Heizwärmebedarf. Ein Austausch der Verglasung ist in den untersuchten Fällen daher nicht zu empfehlen.

Ebenfalls simuliert wurden die Räume unter der Annahme, dass sie nach den Mindeststandards der KENAK saniert würden. Für alle drei Fälle wird deutlich, dass sich die Umsetzung der Bestimmungen zwar positiv auf den Heizwärmebedarf auswirken, Maßnahmen zur Verbesserung des sommerlichen Wärmeschutzes jedoch nicht ausreichend berücksichtigt werden.

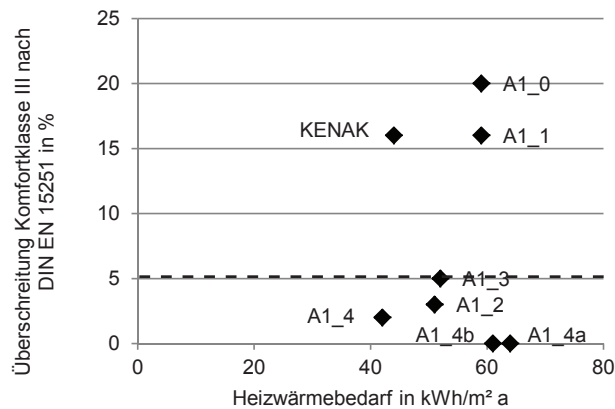


Abb. 215. Raum A1, Auswirkung unterschiedlicher Konzepte zur passiven Klimatisierung auf den sommerlichen Wärmeschutz und den Heizwärmebedarf

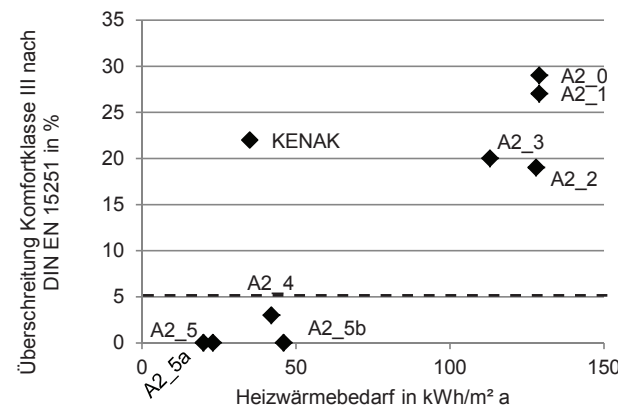


Abb. 216. Raum A2, Auswirkung unterschiedlicher Konzepte zur passiven Klimatisierung auf den sommerlichen Wärmeschutz und den Heizwärmebedarf

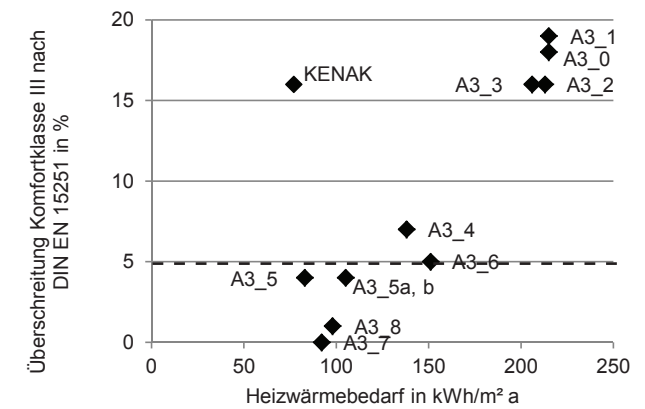


Abb. 217. Raum A3, Auswirkung unterschiedlicher Konzepte zur passiven Klimatisierung auf den sommerlichen Wärmeschutz und den Heizwärmebedarf

### 6.3.3 Beispielgebäude B – Anwendung der Konzepte

Für alle vier betrachteten Räume im Beispielgebäude B wurden ebenfalls Simulationen durchgeführt, um die Übertragbarkeit der Konzepte zu testen. Ausgangslage war für alle Räume eine Verschattung durch Gardinen, eine LWR von 1,5/h und eine Infiltration von  $n_{50} = 10/h$ .

Für die in Abb. 220 aufgelisteten Varianten wurden der jeweilige Heizwärmebedarf sowie die Überschreitung der Komfortklasse III nach DIN 15251 simuliert. Die Klappläden wurden wie bei Beispielgebäude A berücksichtigt. Die Wärmedämmung der Fassade wurde aufgrund der Ergebnisse (siehe 6.2.4) mit 10 cm Wärmedämmung der WLG 045 angenommen. Für die Dämmung des Daches wurden zwei Varianten der Dämmstärke verglichen (siehe Abb. 219).

Variante	
0	Ausgangslage
1	wie 0 + alle Außenbauteile mit 10 cm Wärmedämmung
2	wie 1 + Klappläden an allen Fenstern
3	wie 2 + LWR 3/h und $n_{50}$ 3/h
3a	wie 3 mit WSV
3b	wie 3 mit SSV
4	wie 3 + Fensterfläche verdoppelt (bei B4 vervierfacht)
5	wie 4 + LWR 4,5/h
6	wie 5 + Wände mit 10 cm Dachfläche mit 20 cm Wärmedämmung
7	wie 0 + LWR 3/h und Klappläden an allen Fenstern
8	wie 3 + LWR 7/h $n_{50}$ 3/h
9	wie 0 + LWR 7/h, $n_{50}$ 3/h
10	Mindestanforderungen KENAK

Abb. 219. Für die Räume in Gebäude B getestete Varianten für Maßnahmen zur passiven Klimatisierung

### 6.3.4 Ergebnisse Beispielgebäude B

Die Simulationsergebnisse zeigen für die Ausgangslage aller Räume einen sehr hohen Heizwärmebedarf und einen unzureichenden sommerlichen Wärmeschutz (siehe Abb. 221 bis 224). Der simulierte Heizwärmebedarf erscheint für ein Gebäude in dieser Klimazone sehr hoch, und wurde daher mit anderen Werten verglichen. Das Referenzgebäude aus der Tabula Software für eine Polykatoikia, Baujahr vor 1980 hat einen Heizwärmebedarf von 187 kWh/m<sup>2</sup>, so dass die Ergebnisse als realistisch eingeschätzt wurden.

Für Raum B1 bewirkt eine Wärmedämmung der Fassade eine Halbierung des Heizwärmebedarfs und eine Senkung der Überschreitung von Komfortzone III auf 1% (B1\_1). Eine Erhöhung der LWR kann diesen Wert auf 0% senken. Der Einsatz einer WSV (B1\_3a) hat einen positiven, jedoch nicht signifikanten Einfluss auf den Heizwärmebedarf des nach Norden orientierten Raumes.

Für Raum B2 sind die Auswirkungen der Dämmung der Fassade ebenfalls signifikant (B2\_1). Dies ist bedingt durch den hohen Anteil von Außenbauteilen im Verhältnis zur Raumfläche. Eine Vergrößerung der Fensterflächen, Klappläden zur Verschattung und die Erhöhung der LWR führen für diesen Raum zu einem Heizwärmebedarf, der nur noch ¼ des ursprünglichen beträgt und eine Überschreitung von Komfortzone III von nur 1% (B2\_5).

Bauteil	Material	Bauteilaufbau ges. in cm und Dämmstärke	U-Wert in W/m <sup>2</sup> K
Außenwände gesamt	Ziegelmauerwerk in Stahlbetonrahmen	23,0 + 10 cm Dämmung	0,38
Dach	Stahlbeton	19,5 + 10 cm Dämmung	0,39
Dach	Stahlbeton	19,5 + 20 cm Dämmung	0,16
Boden über Pilotisgeschoss	Stahlbeton	22,0 + 10 cm Dämmung	0,39

Abb. 218. Bauteilaufbauten für die simulierten Maßnahmen zur Verbesserung der Energieeffizienz und des Komforts, Beispielgebäude B

Sowohl eine SSV als auch eine WSV könnte den sommerlichen Wärmeschutz noch geringfügig verbessern, würden jedoch zu einer Erhöhung des Heizwärmebedarfs führen (B2\_3a,b).

Die Räume B3 und B4 haben in der Ausgangslage ebenfalls einen hohen Heizwärmebedarf und, bedingt durch ihre Lage im Dachgeschoss des Gebäudes, sehr hohe Innenraumtemperaturen im Sommer. Die Komfortzone III wird um bis zu 30% überschritten (B4\_0). Für beide Räume zeigte sich, dass die Temperaturen durch eine Verbesserung der natürlichen Lüftung gesenkt werden könnten (B3\_7 und 9, B4\_7 und 9), doch diese Maßnahme allein führt nicht zu einem zufriedenstellenden Ergebnis und beeinflusst nicht den hohen Heizwärmebedarf.

Für Raum B3 können diese Werte jedoch in Kombination mit einer Wärmedämmung der Fassadenflächen auf 52 kWh/m<sup>2</sup>a und 5% gesenkt werden (B3\_3). Der Einsatz einer WSV senkt den Heizwärmebedarf auf 48 kWh/m<sup>2</sup>a und hat geringfügige positive Auswirkungen auf den sommerlichen Wärmeschutz (B3\_3a). Eine SSV verbessert den sommerlichen Wärmeschutz, führt aber zu einem etwas höheren Heizwärmebedarf (B3\_3b). Da eine Vergrößerung der Fensterflächen (B3\_4) zwar positive Auswirkungen auf den Heizwärmebedarf hat und auch das Potential der Lüftung verbessert (B3\_5), die solaren Gewinne jedoch trotz Verschattungselementen den Raum aufheizen zeigt sich wiederum, dass im Einzelfall abgewägt werden

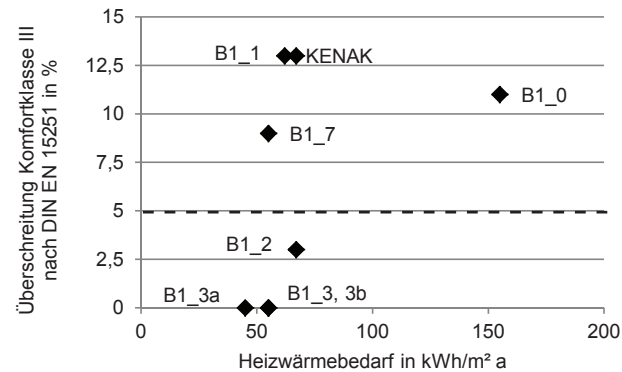


Abb. 220. Raum B1, Auswirkung unterschiedlicher Konzepte zur passiven Klimatisierung auf den sommerlichen Wärmeschutz und den Heizwärmebedarf

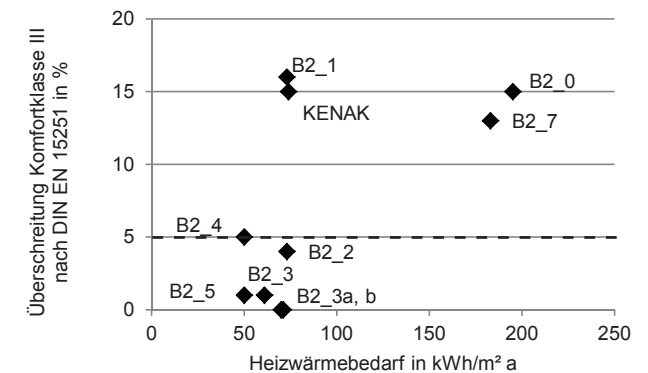


Abb. 221. Raum B2, Auswirkung unterschiedlicher Konzepte zur passiven Klimatisierung auf den sommerlichen Wärmeschutz und den Heizwärmebedarf

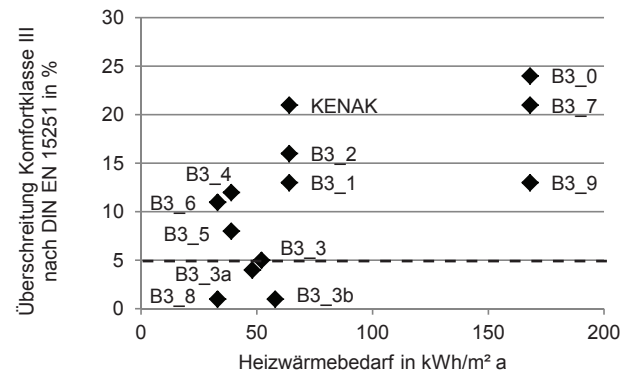


Abb. 222. Raum B3, Auswirkung unterschiedlicher Konzepte zur passiven Klimatisierung auf den sommerlichen Wärmeschutz und den Heizwärmebedarf

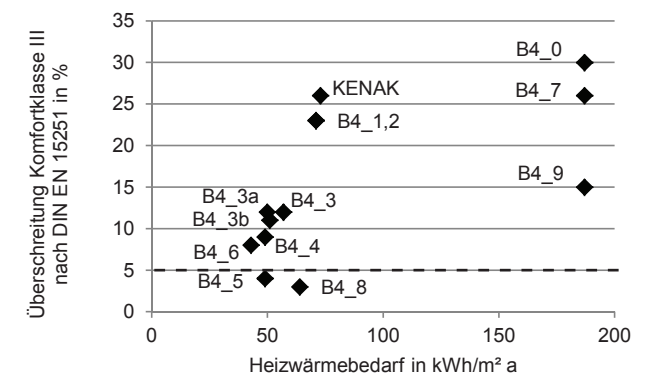


Abb. 223. Raum B4, Auswirkung unterschiedlicher Konzepte zur passiven Klimatisierung auf den sommerlichen Wärmeschutz und den Heizwärmebedarf



muss, was eine sinnvolle Maßnahme ist. In diesem Fall könnte ausschlaggebend sein, dass ein zusätzliches Fenster ungünstig für den sommerlichen Wärmeschutz nach Süd-Westen ausgerichtet wäre.

Für Raum B4 hingegen wäre eine vergrößerte Fensterfläche nach Südosten vorteilhaft. Zusammen mit einer Dämmung der Fassade, Verschattungen durch Klapppläden und einer Erhöhung der Lüftung (B4\_5) würde der Heizwärmebedarf auf 49 kWh/m<sup>2</sup>a sinken und im Sommer die Komfortklasse III der DIN 15251 um nur 4% überschritten.

Auch für Beispielgebäude B wurden die Innenraumtemperaturen und der Heizwärmebedarf der Räume unter der Annahme, dass sie nach den Mindeststandards der KENAK saniert würden, simuliert. Vergleichbar mit Beispielgebäude A zeigt sich für alle vier Fälle ebenso deutlich, dass der Heizwärmebedarf sinkt, Maßnahmen zur Verbesserung des sommerlichen Wärmeschutzes jedoch nicht ausreichend berücksichtigt werden.

### 6.3.5 Bewertung der Ergebnisse

Durch die Untersuchungen konnte festgestellt werden, dass es möglich ist, allein durch passive Maßnahmen für alle getesteten Räume die Anforderungen der Komfortklasse III der DIN 15251 zu erfüllen. Ebenso ist es möglich, den Heizwärmebedarf auf etwa ein Viertel des ursprünglichen Bedarfs zu senken. Die ausschlaggebenden Maßnahmen

sind in allen Fällen die Wärmedämmung der Außenflächen in Kombination mit einer höheren Luftdichtigkeit der Fassade. Diese müssen kombiniert werden mit einem Konzept zur natürlichen Lüftung und einer Verschattung der Fassadenöffnungen.

Es konnten keine herausragenden Vorteile einer SSV oder einer WSV im Vergleich mit einer EV festgestellt werden. Die Auswirkungen dieser Maßnahme, welche häufig generell empfohlen wird (vgl. Balaras, 2007; Santamouris, 2001) sollte daher immer im Einzelfall präzise auf ihre Auswirkungen, sowohl auf den Heizwärmebedarf als auch den sommerlichen Wärmeschutz, untersucht werden .

Die geltende Verordnung KENAK stellt Anforderungen an die U-Werte der Außenbauteile die effektiv sind, um den Heizwärmebedarf zu senken. Das Fehlen von Regeln zur Verschattung von Fassadenöffnungen und zur natürlichen Lüftung führt jedoch dazu, dass die Maßnahmen den sommerlichen Wärmeschutz nicht verbessern, sondern in Einzelfällen sogar verschlechtern können. Das Potential der passiven Maßnahmen wird nicht ausgenutzt, statt dessen werden technische Maßnahmen ergriffen, die unter Energieeinsatz die Räume an heißen Tagen kühlen.

## 6.4 Vergleich mit anderen Sanierungsvorschlägen

Die folgende Auflistung stellt die Empfehlungen zum klimaangepassten Bauen für das Untersuchungsgebiet aus drei unterschiedlichen Quellen dar. Eine weitere Spalte kommentiert diese Vorschläge auf Grundlage der Ergebnisse dieser Arbeit. Die Reihenfolge der Maßnahmen ist nach Balaras (2007) vorgenommen, welcher den Effekt auf die Reduzierung des Energieverbrauchs des griechischen Wohngebäudebestands bewertet hat. Die

Auflistung beginnt mit den Maßnahmen, welche die größten Auswirkungen auf die Energieeffizienz von Gebäuden haben, nach unten sinkt der Einfluss.

Es werden von Balaras keine Maßnahmen zur Verbesserung der natürlichen Lüftung vorgeschlagen. Mögliche negative Auswirkungen von neuen Verschattungen auf diese werden nicht diskutiert. Der Austausch der Verglasungen wird als besonders

wichtig eingestuft. Das konnte im Rahmen dieser Untersuchung nicht bestätigt werden.

In den anderen zwei Quellen finden sich noch weitere Empfehlungen, die in einer zweiten Auflistung, sortiert nach den Themen natürliche Lüftung, Orientierung der Gebäude, Verschattungselemente, Baumaterialien und Raumkonzept dargestellt und bewertet werden (Abb. 226).

Sanierungsmaßnahmen zur Reduzierung des Energieverbrauchs des griechischen Wohngebäudebestands, Balaras (2007)	Climate Consultant 5.4, Vorschläge für eine angepasste Bauweise in dem Klima von Thessaloniki	Design Guidelines aus Santamouris (2001) „Energy and Climate in the Urban Built Environment“	Kommentar
Wärmedämmung der Fassaden und des Daches  Versiegeln von Fugen	interne Wärmegewinne ausnutzen, Gebäude luftdicht ausführen und dämmen, um den Heizenergiebedarf gering zu halten	Gebäude wärmedämmen und nicht den kalten Winden im Winter aussetzen, Nordfassade und Dachfläche immer dämmen	<u>Sinnvolle Maßnahme</u> Erhöhung der Luftdichtheit und Dämmen von Fassadenflächen können sich positiv auf den sommerlichen Wärmeschutz und den Heizwärmebedarf auswirken. Welche Maßnahme wirklich sinnvoll ist und wie Maßnahmen zusammenwirken, muss für den Einzelfall jeweils genau betrachtet werden (siehe 5.4).
Isolierverglasung nachrüsten	Verglasung mit geringen U-Werten, um solare Einträge im Sommer zu minimieren und im Winter Heizenergie zu sparen	Verglasung mit geringem U-Wert und hohem g-Wert nutzen, um solare Gewinne zu optimieren und Wärmeverluste zu verringern	<u>Ggf. keine sinnvolle Maßnahme</u> Diese Maßnahme ist kostenintensiv und hat ggf. sehr geringe/keine/negative Auswirkungen (siehe 5.2 und 5.3).
Energiesparlampen nutzen	-	Tageslichtkonzept aufstellen um Energieverbrauch für Kunstlicht zu minimieren	<u>Erst ein sinnvolles Tageslichtkonzept aufstellen</u> , dann den Bedarf an Kunstlicht mit sparsamen Leuchtmitteln decken. Verschattungselemente mit Lamellen (wie die traditionellen Klappläden) führen, verglichen mit den häufig verwendeten Rollläden, zu einem geringeren Bedarf an Kunstlicht (siehe 5.3).

Abb. 224 - Fortsetzung auf Seite 180

Ersetzen alter Klimaanlage	Wenn Klimaanlage, dann energieeffizient	Nutzer zu energiesparendem Verhalten anleiten.	<u>Erst prüfen, ob Klimaanlage vermieden werden könnten</u> Die Notwendigkeit von Klimaanlage für Wohnräume können durch geschickte Planung/Sanierung vermieden werden
Außenliegende Sonnenschutzvorrichtungen nachrüsten	Verschattungselemente nutzen, natürliche Lüftung und passive solare Gewinne	Verschattung im Winter vermeiden, unterschiedliche Verschattungselemente nutzen	<u>Sinnvolle Maßnahme</u> Die traditionell verwendeten Klappläden als variable Verschattungselemente ermöglichen das Verschatten parallel zu einer natürlichen Lüftung, im Winter ermöglichen sie solare Gewinne am Tag und zusätzlichen Wärmeschutz bei Nacht.
Deckenventilatoren nutzen	Deckenventilatoren können das Empfinden der Raumtemperatur bis zu 5 °C senken	Deckenventilatoren nutzen	<u>Sinnvolle Maßnahme</u> Deckenventilatoren sollten bei den Räumen der Polykatoikia eingesetzt werden, vor allem bei Räumen mit einem geringen Potential für natürliche Lüftung

Abb. 224. (Fortsetzung von Seite 180) Auflistung von Empfehlungen zum klimaangepassten Bauen, Climate Consultant 5.4, Santamouris (2001: 247ff) und Balaras (2007:1308), technische Maßnahmen wie z.B. das Austauschen veralteter Heizungsanlagen oder Solaranlagen wurden in dieser Aufstellung nicht mit erfasst.

Climate Consultant-Vorschläge für eine angepasste Bauweise in dem Klima von Thessaloniki	Design Guidelines aus Santamouris „Energy and Climate in the Urban Built Environment“	Kommentar
Natürliche Lüftung		
Querlüftung ermöglichen	Querlüftung ermöglichen, ggf. z.B. durch Dachlüfter, Nachtlüftung ermöglichen	Die traditionellen Gebäude haben ein hohes Potential für Querlüftung (siehe 5.1).
natürliche Lüftung kann Klimaanlage vermeiden, wenn die Öffnungen verschattet sind und nach der Windrichtung ausgerichtet	Appartements in Mehrfamilienhäusern so anordnen, dass alle eine Südfassade haben und so dass Querlüftung möglich ist.	Eine funktionierende natürliche Lüftung kann Klimaanlage überflüssig machen (siehe Ergebnis Kapitel 5).
bei geringen Windstärken: vertikale Lüftung nutzen	-	Die Windstärken in Thessaloniki sind ausreichend für eine windinduzierte natürliche Lüftung (siehe 2.5.4).
-	Windfänger zur Lüftung einsetzen mit zwei Öffnungen, eine nach Luv als Zuluftöffnung, eine nach Lee als Abluftöffnung Solarkamine einbauen um die natürliche Lüftung zu verbessern	Windfänger und Solarkamine sind in der traditionellen Bebauung nicht vorhanden. Weitere Forschung könnte erfolgen um herauszufinden, warum diese Techniken nicht angewendet wurden, obwohl sie zu der Bauzeit in anderen Teilen des osmanischen Reiches bekannt waren.

Abb. 225 - Fortsetzung auf Seite 181

-	belüftete Wände und Dächer bauen	Bei den traditionellen Häusern besteht eine stehende Luftschicht unter der Dachfläche (siehe 2.2.3).
-	mechanische Lüftungsanlagen mit vorgekühlter Luft durch Rohre unter der Erde	-
Wind zur natürlichen Lüftung durch bauliche Elemente oder Bepflanzung lenken	Bepflanzung als Verschattungselemente und zur Windführung nutzen.	Den Wind gezielt zu lenken bedarf an Standorten mit wechselnden Windrichtungen und umgebender Bebauung einer umfangreichen Analyse und Konzeptentwicklung.
Orientierung der Gebäude		
-	Gebäude in Ost-West Richtung orientieren und horizontale Verschattungselemente nutzen. Eine möglichst bis zu 50% verglaste Fassade sollte nach Süden orientiert sein, dies in Kombination mit guter Wärmedämmung, Luftdichtheit und Verglasung mit geringem U-Wert.	Eine Ost-West Orientierung hat sowohl auf den sommerlichen Wärmeschutz positive Auswirkungen, als auch auf die Optimierung solarer Gewinne und wird in der traditionellen Bauweise angewendet. Die Fassade des Referenzgebäudes (Obergeschoss) hat nach Süden einen höheren Fensterflächenanteil. (siehe 5.2) Bei den Polykatoikia in Thessaloniki wurde dies weniger oder gar nicht berücksichtigt, die Orientierung folgt generell dem Straßenverlauf.
Glasflächen nach Westen vermeiden	Wenn sich Öffnungen nach Nord, West oder Ost nicht vermeiden lassen: dann nur kleine Öffnungen und ein gut gedämmtes Gebäude, weil nur geringe solare Gewinne möglich sind.	Dies wurde bei den traditionellen Häusern berücksichtigt, bei den Wohnungen der Polykatoikia jedoch nicht.
Verschattungselemente		
flache Dachneigung mit weitem Dachüberstand	-	bei den traditionellen Häusern der Oberstadt vorhanden (siehe 2.2.3), nicht jedoch bei den Polykatiokia (siehe 2.2.2)
Baumaterialien		
traditionelle Gebäude nutzen leichte Konstruktionen, Flachgründungen, Räume, die sich nach außen öffnen lassen und verschattete Außenbereiche	Die Gebäude sollten direkten Kontakt zum Boden haben um von der Wärmekapazität des Bodens zu profitieren.	Diese Konzepte sind bei den traditionellen Häusern der Oberstadt vorhanden. Bei den Polykatiokia finden sie sich ebenfalls, es fehlen jedoch die leichten Konstruktionen.
in trocken-heißen Regionen können Kellerräume im Sommer genutzt werden – dort bleibt es relativ kühl	Masse als Wärmespeicher nutzen, dies funktioniert nur, wenn alle weiteren Parameter wie Orientierung, natürliche Lüftung, Wärmedämmung der Fassaden etc. entsprechend beachtet werden	Dieses Konzept wird bei den traditionellen Häusern für das Erdgeschoss angewendet (siehe 2.2.3). Für die Sanierung von Bestandsgebäuden ist die Übertragbarkeit sehr eingeschränkt. Das Abheben der Bodenplatte bei den Gebäuden mit einem Pilotgeschoss ist dann problematisch, wenn die Konstruktion nicht gedämmt ist.

Abb. 225 - Fortsetzung auf Seite 182

-	Oberflächen mit hohem Reflexionsgrad nutzen um Wärmegewinne gering zu halten	Dies wird bei der traditionellen Bauweise angewendet, bei Neubauten/Sanierungen hat es geringe Auswirkungen, wenn die Fassaden wärmedämmend sind (siehe 5.4.1).
-	passive Systeme zum Heizen nutzen, wie z.B. Trombe Wände.	Trombe Wände wurden bei den traditionellen Gebäuden nicht eingesetzt.
Raumkonzept		
sonnige, windgeschützte Außenräume können den Wohnbereich in der kühlen Jahreszeit vergrößern	-	Bei den traditionellen Häusern war dies zu früheren Zeiten der Garten, bei den Polykatoikia sind es die Balkonflächen.
eine mit Fliegennetzen geschützte Veranda bietet einen kühlen Außenraum ohne Insekten	-	Häuser in Nordgriechenland mit einer <i>hagiati</i> bieten diesen geschützten Außenraum (siehe 2.1).
-	Grundrisse/Nutzungen: Wohnzimmer/Küche nach Süden, Schlafzimmer/Bad mittig, Abstellräume nach Norden	Die Anordnung der Räume nach diesem Konzept ist für Sanierungen kaum anwendbar.

Abb. 225. (Fortsetzung von S. 180f) Auflistung von weiteren Empfehlungen zum klimaangepassten Bauen aus *Climate Consultant 5.4* und *Santamouris (2001: 247ff)* mit Kommentaren auf Grundlage der Ergebnisse dieser Arbeit



## 7 Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

In diesem Schlusskapitel werden die wichtigsten Ergebnisse der Arbeit zusammengefasst. Zunächst wird die Methode beschrieben, die im Laufe der Bearbeitung entwickelt wurde. Sie stellt eine Möglichkeit für Planerinnen und Architektinnen dar, Konzepte einer traditionellen Bauweise zur passiven Klimatisierung an einem Standort zu erfassen und die Übertragbarkeit auf ein Bauvorhaben zu prüfen.

Im nächsten Abschnitt werden die wichtigsten Ergebnisse der beispielhaften Untersuchung dargelegt. Zunächst konnte festgestellt werden, dass die Vorbedingungen der initialen Fragestellung erfüllt werden, da die Bauweise als klimaangepasst und als ökologisch, ökonomisch und sozial verträglich eingeschätzt wurde. Aus den Messungen im Windkanal, Berechnungen und Gebäudesimulationen wurden Erkenntnisse über die passive Klimatisierung der traditionellen Wohnhäuser in der Oberstadt von Thessaloniki gewonnen. Anhand der zwei beispielhaft ausgewählten Gebäude in Thessaloniki aus jüngerer Bauzeit wurde zudem die Übertragbarkeit der Konzepte an diesen Beispielen untersucht. Das Ergebnis zeigte, dass es möglich ist, durch Anwenden von traditionellen Konzepten zur passiven Klimatisierung die Energieeffizienz von Gebäuden durch diese lange erprobten Maßnahmen zu optimieren.

Für das Untersuchungsgebiet konnte daher die Forschungsfrage „Was kann man von traditioneller Bauweise in Bezug auf die passive Klimatisierung

von Innenräumen an einem Standort lernen und wie kann man diese Erkenntnisse heute anwenden?“ beantwortet werden.

Im zweiten Teil dieses Kapitels werden die Schlussfolgerungen, die aus den Erkenntnissen gezogen werden konnten diskutiert, und Überlegungen zur Bedeutung für die Wissenschaft angestellt. Anschließend werden die offenen Fragen und weiterer Forschungsbedarf zusammengefasst. Das Kapitel schließt mit einem Ausblick auf das Potential, welches sich aus dem Studium traditioneller Bauweisen erschließen kann.

## 7.1 Zusammenfassung der Ergebnisse

### 7.1.1 Methode zum Erfassen der Konzepte passiver Klimatisierung einer traditionellen Bebauung

Im Rahmen dieser Arbeit wurde eine Methode entwickelt, die Planerinnen und Architektinnen dabei unterstützen kann, Konzepte zur passiven Klimatisierung aus traditioneller Bebauung abzuleiten. Wie in Abb. 232 in Arbeitsschritten dargestellt, ist die Methode in die fünf aufeinander aufbauenden Schritte A bis E gegliedert.

Schritt A beinhaltet, dass zunächst durch Feldstudien und / oder Literaturrecherchen geprüft werden muss, ob an dem Standort, an dem diese Konzepte ggf. eingesetzt werden sollen, eine traditionelle Bauweise vorhanden ist oder war und ob verwertbare Zeugnisse darüber vorliegen. Bevor zu dem nächsten Schritt übergegangen werden kann, muss geprüft werden, ob diese Bauweise an das lokale Klima angepasst erbaut wurde und ob sie vermutlich Konzepte für eine passive Klimatisierung beinhaltet. Werden die Fragen positiv beantwortet, kann zu Schritt B übergegangen werden.

In Schritt A sollte bereits bedacht werden, dass sich die Rahmenbedingungen an dem Standort seit der Erbauung dieser Gebäude wesentlich verändert haben können. Es kann zudem erforderlich sein, das Untersuchungsgebiet einzugrenzen und Fallbeispiele auszuwählen. Abhängig vom jeweiligen Fall kann die Bewertung der Bauweise durch

weitere Methoden unterstützt werden. Es existieren Werkzeuge zur Bewertung der Nachhaltigkeit von Gebäuden, die auch eine Untersuchung im Bestand zulassen, wie beispielsweise CASBEE oder das SB tool (Muramaki, 2008; Larsson, 2012). Liegt ein solches Bewertungstool für den Standort vor, sollte vor dem Einsatz der Aufwand gegen den Nutzen abgewägt werden.

Die Grundlagenermittlung, Schritt B, kann durch Feldstudien, Literaturrecherchen, Experteninterviews, Anwohnerbefragungen, Messungen und je nach Gegebenheiten zusätzlichen Methoden erfolgen. Sie hat zum Ziel, die relevanten Daten für weitere Untersuchungen zu erfassen und geht einher mit der Fragestellung, ob diese traditionelle Bebauung überhaupt geeignet ist, um Konzepte abzuleiten. Können diese Fragen wiederum mit ja beantwortet werden geht es weiter mit Schritt C.

In Schritt C erfolgt die Analyse der in der Grundlagenermittlung erfassten Daten. Dies kann durch die Auswertung von Recherche- und Messergebnissen, sowie durch Gebäudesimulationen erfolgen. Stellt sich heraus, dass es Konzepte zur passiven Klimatisierung gibt, kann der nächste Schritt beginnen.

Das Ableiten von Konzepten, Schritt D, erfolgt durch eine Evaluation der Analyseergebnisse aus Schritt C, mit dem Ziel, auch die Wechselwirkungen zu erfassen. Abhängig von der jeweiligen Untersuchung

sollten Kombinationen mit weiteren Maßnahmen zur passiven Klimatisierung untersucht werden.

Der letzte Schritt (E) stellt die Analyse zur Übertragbarkeit der ermittelten Konzepte dar. Diese ist abhängig von dem Projekt, an dem die Maßnahmen angewendet werden sollen. Ebenso ist die Kombination mit weiteren Maßnahmen vom Einzelfall abhängig. Im Falle eines Neubaus sollten diese Untersuchungen zu Beginn des Planungsprozesses durchgeführt werden, um die Konzepte von Anfang an in die frühen Planungsphasen mit einzubinden. Handelt es sich um eine Sanierung, An- oder Umbauten bestehender Gebäude ist es ebenfalls notwendig, diese Untersuchungen in einem frühen Stadium durchzuführen.

Diese Methode ist auf Grundlage der in dieser Arbeit beispielhaft untersuchten Bebauung entwickelt worden. Daher ist sie bisher nur an diesem Beispiel angewendet worden. Es ist davon auszugehen, dass sie sich auf andere Fälle übertragen lässt. Möglicherweise müssen in extremen Klimaten jedoch zusätzliche Parameter berücksichtigt werden.

ARBEITSSCHRITT	METHODEN	ZIEL	FRAGESTELLUNG	ENTSCHEIDUNG
<b>A</b> KENNENLERNEN DES STANDORTES	Feldstudie	Prüfung:	<b>A.1</b> Ist eine traditionelle Bauweise vorhanden?	wenn JA weiter zu A.2
	Literaturrecherche		<b>A.2</b> Ist die Bauweise vermutlich an das Klima angepasst?	wenn JA weiter zu A.3
	Bewertungs - Tools		<b>A.3</b> Ist es vermutlich eine Bauweise mit Konzepten zur passiven Klimatisierung?	wenn JA weiter zu B
<b>B</b> GRUNDLAGEN-ERMITTLUNG	Feldstudien (ggf. Bauaufnahme)	Erfassen aller relevanten Daten wie Materialkennwerte, Klimadaten, rechtliche Grundlagen, Geschichte des Standortes und je nach Fall weitere Daten	<b>B.1</b> Ist die Bauweise vermutlich an das Klima angepasst?	wenn JA weiter zu B.2
	Literaturrecherche		<b>B.2</b> Ist es vermutlich eine Bauweise mit Konzepten zur passiven Klimatisierung?	wenn JA weiter zu C
	Experteninterviews			
	Anwohnerbefragungen			
Messungen (vor Ort / im Labor)				
<b>C</b> ANALYSE DER GRUNDLAGENERMITTLUNG	Analyse der Daten aus der Grundlagenermittlung (z.B. durch Auswertung von Messergebnissen und Gebäudesimulationen)	Aussagen / Ergebnisse aus denen Konzepte zur Klimatisierung abgeleitet werden können	Liegen Ergebnisse vor, aus denen voraussichtlich Konzepte zur passiven Klimatisierung abgeleitet werden können?	wenn JA weiter zu D
<b>D</b> ABLEITEN VON KONZEPTEN	Evaluation der Analyseergebnisse	Erfassen der Konzepte und ihre Wechselwirkungen	Sind Konzepte zur passiven Klimatisierung vorhanden?	wenn JA weiter zu E
<b>E</b> ANALYSE ZUR ÜBERTRAGBARKEIT	Gebäudesimulationen	<b>Neubau</b> = Überprüfen, welche Konzepte von Anfang an in die Planung einbezogen werden können und ggf. Kombinationen mit anderen Maßnahmen	<b>ERGEBNIS</b> höhere Energieeffizienz - weniger Energieverbrauch lokal angepasste Bauweise höherer Komfort für die Nutzerinnen	
	ggf. Bauaufnahme	<b>Umbau / Sanierung</b> = Überprüfen, welche Konzepte in eine Sanierung einbezogen werden können und ggf. Kombinationen mit anderen Maßnahmen		
	Recherchen zum Erfassen der rechtlichen Rahmenbedingungen	Vergleich unterschiedlicher Maßnahmen und ihre Wechselwirkungen		

Abb. 226. Entwickelte Methode zum Ableiten von Konzepten zur passiven Klimatisierung und die Anwendung für energetische Sanierungen und zum Bau klimaangepasster und energieeffizienter Gebäude

### 7.1.2 Ergebnisse der beispielhaften Untersuchung einer traditionellen Bebauung

Die Bebauung der Oberstadt von Thessaloniki wurde zunächst in ihrem Zusammenhang erfasst, um zu prüfen, ob sie lokal adaptiert ist oder einen Import aus anderen Regionen des osmanischen Reiches darstellt. Da sich herausstellte, dass die Wohnhäuser eine lokal angepasste Variante des osmanischen Hauses darstellen, wurden die Untersuchungen zum Erfassen der Konzepte passiver Klimatisierung fortgesetzt.

Anhand dieser konnten für den gewählten Standort Erkenntnisse über die Maßnahmen, welche zur passiven Klimatisierung der traditionellen Bebauung eingesetzt wurden, gewonnen werden. Das für diesen Fall durchgeführte Experiment im Windkanal verifizierte die durch die Gebäudesimulationen gewonnenen Ergebnisse zur natürlichen Lüftung und ermöglichte eine detailliertere Betrachtung dieses Einflussfaktors. Dadurch konnte ermittelt werden, dass die in den Straßenraum ragenden Erker nicht nur dem visuellen Komfort dienen, indem sie den Ausblick in den Straßenraum ermöglichen, sondern auch den thermischen Komfort durch eine erhöhte natürliche Lüftung verbessern. Ein weiteres Ergebnis der Untersuchung war die Erkenntnis, dass die Wohnhäuser in der Oberstadt Thessalonikis für eine natürliche Lüftung günstig zu den häufigen Windrichtungen im Sommer orientiert sind.

Es ist jedoch zu beachten, dass die Ergebnisse des Experiments im Zusammenhang mit dem ermittelten Referenzgebäude und einer vereinfachten umgebenden Bebauung zu interpretieren sind. Messungen im Windkanal wurden als hilfreich erachtet, um die natürliche Lüftung zu untersuchen, die Ergebnisse stehen aber immer im Zusammenhang mit den gewählten Parametern für die Rahmenbedingungen. Untersuchungen dieser Art sind aufwendig und zeitintensiv. Innerhalb der vorliegenden Arbeit war es zwar möglich, diese Messungen durchzuführen. In den meisten Fällen einer Anwendung der entwickelten Methode für eine konkrete Planung, in welcher die natürliche Lüftung einen wichtigen Faktor der passiven Klimatisierung darstellt, wird dies jedoch nicht im Rahmen der Möglichkeiten liegen.

Die Vorteile einer Orientierung von Fassadenöffnungen nach Süden, also einer Gebäudeachse in Ost-West Richtung, wird in der Literatur im Zusammenhang mit solaren Gewinnen in der kälteren Jahreszeit und der Vermeidung der Überhitzung von Räumen im Sommer häufig genannt. Für den untersuchten Fall ergab eine quantitative Analyse durch Gebäudesimulationen, dass für das Referenzgebäude die solaren Einträge im Sommer bei dieser Orientierung im Vergleich zu einer Nord-Süd Orientierung nur etwa halb so hoch sind. Auf den Winter bezogen betragen die solaren Gewinne dagegen bei einer Ost-West Orientierung des Gebäudes das Doppelte im Vergleich zu einer Drehung um 90°.

Die Untersuchungen unterschiedlicher Verschattungselemente für die transparenten Flächen der Fassaden ergaben, dass die traditionell verwendeten Klappläden vielfältige Vorteile gegenüber anderen Elementen bieten. Hölzerne Klappläden mit einem hellen Anstrich heizen sich durch solare Einstrahlung nicht übermäßig stark auf. Im Gegensatz zu den häufig verwendeten Rollläden haben sie zahlreiche Varianten für Feineinstellungen, die zwischen gänzlich geöffnet und vollkommen geschlossen liegen. Sie ermöglichen eine Lüftung der Räume außerhalb der Nutzungszeit und auch nachts. Zusätzlich kann bei einer Verschattung mit Klappläden der visuelle Komfort, im Gegensatz zu anderen Varianten wie Rollläden, Gardinen oder Rollos, sehr hoch sein wenn beispielsweise durch waagrecht gestellte Lamellen die solare Strahlung abgehalten wird, ein Bezug nach außen jedoch trotzdem gegeben ist.

Im Zusammenhang mit der Untersuchung unterschiedlicher Verschattungselemente wurde auch der Einfluss der jeweiligen Verglasung betrachtet. Dieser stellt zwar kein Konzept dar, welches aus der traditionellen Bebauung übernommen werden kann. Da das Zusammenwirken von Verschattung und Verglasung jedoch ein wichtiger Faktor ist, und der Einsatz von Einfachverglasungen in der untersuchten Region aktuell nicht empfohlen wird, sollte der Einfluss nicht außer acht gelassen werden. Es erstaunte bei den Ergebnissen, dass eine Einfachverglasung in den untersuchten Varianten



mit innenliegenden Rollos oder Gardinen und außen angebrachten Markisen günstiger für den sommerlichen Wärmeschutz ist, als eine Sonnenschutzverglasung. Bei den innenliegenden Verschattungselementen scheint die Ursache darin zu liegen, dass die von dem, trotz der SSV erwärmten, Material ausgehende Wärmestrahlung nicht wieder nach außen abgestrahlt werden kann.

Interessanterweise ergab sich in Bezug auf den Heizwärmebedarf im Winter das gleiche Ergebnis: die Simulationen zeigten, dass für das Referenzgebäude eine EV keinen Nachteil gegenüber einer Wärmeschutzverglasung darstellt. Der positive Einfluss der besseren Wärmedämmeigenschaften der WSV auf den Heizwärmebedarf scheint durch die geringeren solaren Gewinne wieder aufgehoben zu werden.

Die Untersuchung der verwendeten Baumaterialien ergab, dass diese zur Bauzeit lokal verfügbar waren. Die Gebäude bestehen aus Materialien, die sich unkompliziert wiederverwenden oder entsorgen lassen. In dieser Hinsicht stellte die Bauweise einen nachhaltigen Umgang mit Materialien sicher. Weitere Untersuchungen zum sommerlichen Wärmeschutz und dem Heizwärmebedarf ergaben zum Teil erstaunliche Ergebnisse. Das Obergeschoss der traditionellen Wohnhäuser wurde zwar als Sommergeschoss konzipiert und profitiert in Bezug auf die Innenraumtemperaturen von seiner leichten Bauweise, da das Material die Eigenschaft

besitzt sich zwar schnell zu erwärmen, aber auch ebenso rasch wieder abzukühlen. Dennoch könnte eine Dämmung der obersten Geschosdecke die Temperaturen signifikant senken. Durch Bauaufnahmen, Literaturrecherchen, Experteninterviews und Befragung von Eigentümern konnte jedoch kein Hinweis darauf gefunden werden, dass eine solche Dämmung existiert hat.

Des Weiteren wurde bei der Bauweise nicht das Potential ausgenutzt, dass massive Bauteile im Inneren der Gebäude auf den Heizwärmebedarf haben. Massive Materialien im Obergeschoss könnten im Winter solare Gewinne speichern und an den Innenraum wieder abgeben. Da das Obergeschoss für den Sommer konzipiert wurde, hat man diesen Effekt offenbar vernachlässigt. Das Erdgeschoss der Gebäude hat üblicherweise kleine Fensteröffnungen, so dass eher geringe solare Einträge in den Innenraum erfolgen und daher der Einfluss der Speichermasse auf den Heizwärmebedarf sehr gering ist. Auf den sommerlichen Wärmeschutz in den Räumen des oberen Geschosses hätten massive Bauteile einen positiven Einfluss, da sie die Wärmeeinträge tagsüber speichern können und nachts wieder abgeben.

Die Ergebnisse in den Themenbereichen natürliche Lüftung, Orientierung von Gebäuden und Fassadenöffnungen sowie Verschattungselemente transparenter Fläche zeigten, dass es Konzepte zur passiven Klimatisierung gibt, die sich

gegebenenfalls auch heute anwenden lassen. Für die Baumaterialien stellt es sich in dem untersuchten Fall anders dar. Zum einen ist die Konzeption eines Winter- und eines Sommergeschosses sehr speziell und daher die Übertragbarkeit gering, zum anderen sind die verwendeten Baumaterialien dem Stand der damaligen Bautechnik geschuldet. Die Simulationen und der Vergleich von Varianten des Referenzgebäudes zeigten, dass der Einsatz von Wärmedämmung an den Fassadenflächen einen wesentlichen Einfluss auf den sommerlichen Wärmeschutz und den Heizwärmebedarf hat.

### 7.1.3 Ergebnisse der Prüfung der Übertragbarkeit

Die Übertragbarkeit der Konzepte zur passiven Klimatisierung wurde beispielhaft für zwei Gebäude überprüft. Diese wurden aufgrund der Ergebnisse einer Analyse des Gebäudebestands in der untersuchten Region ausgewählt. Es handelt sich um zwei Appartementshäuser in einer Stahlbetonskelettbauweise. Eines steht für die Bauzeit von 1955 bis 1973, das andere für den Zeitraum zwischen 1973 und 1980. Sie stammen daher aus einem Zeitraum, in dem die traditionellen Bautechniken der beispielhaft untersuchten Wohnhäuser nicht mehr angewendet wurden, sind aber auch vor der ersten Verordnung zur Energieeinsparung errichtet worden. Gebäude aus dieser Bauzeit stellen über 50 % des gesamten Gebäudebestands in Thessaloniki dar (Theodoridou, 2011:50).

Die oben beschriebenen Ergebnisse zu den erkannten Konzepten einer passiven Klimatisierung der traditionellen Bebauung wurden in zahlreichen Varianten für beide Beispielgebäude getestet, um auch die Wechselwirkungen zwischen den Maßnahmen zu erfassen.

Zunächst wurden die Möglichkeiten der Übertragbarkeit einzeln für die untersuchten Bereiche natürliche Lüftung, Orientierung der Gebäude, Verschattung transparenter Fassadenflächen und Baumaterialien untersucht. Es stellte sich heraus,

dass es in den Beispielgebäuden Räume gibt, die ein geringes Lüftungspotential besitzen und eine natürliche Lüftung den sommerlichen Wärmeschutz maßgeblich verbessern würde.

Die Orientierung der Gebäude lässt sich zwar nachträglich nicht mehr verändern, es besteht jedoch die Möglichkeit Fensterflächen gezielt anders zu positionieren. Durch die Bauweise als Stahlbetonskelettbau mit Ausfachungen, deren Wände nicht tragend sind, könnte das Potential, das für diese Maßnahme erkannt wurde, ausgeschöpft werden.

Die Betrachtung unterschiedlicher Verschattungselemente zeigte, dass die Klappläden, deren positive Merkmale für die traditionelle Bebauung festgestellt wurden, auch bei den Appartementshäusern der Nachkriegszeit sinnvoll einzusetzen sind.

Im letzten Schritt wurde der Einfluss der Wärmedämmung untersucht, da dieser in der Betrachtung der traditionellen Bebauung als einflussreich erkannt worden war. Die Gebäudesimulationen zeigten, dass bei den ungedämmten Gebäuden aus Beton und Ziegelmauerwerk das Wärmedämmen der Außenflächen einen signifikanten Faktor für den sommerlichen Wärmeschutz und den Heizwärmebedarf darstellt.

In einem Vergleich von Kombinationen der Maßnahmen konnte schließlich festgestellt werden, dass die Übertragbarkeit der Konzepte zur passiven

Klimatisierung aus der traditionellen Bebauung für die Sanierung von Appartementshäusern der Nachkriegszeit gegeben ist. Sie muss jedoch sinnvoll mit heute möglichen Maßnahmen zu Wärmedämmung und Luftdichtheit der Fassaden kombiniert werden. In den Vergleich wurden auch die aktuell geltenden Vorschriften einbezogen. Es stellte sich heraus, dass die Grenzwerte für die U-Werte der Außenbauteile in der KENAK zu einem verringerten Heizwärmebedarf führen, Maßnahmen die dem sommerlichen Wärmeschutz dienen jedoch nicht ausreichend berücksichtigt worden sind.

In der Untersuchung zur Übertragbarkeit wurde bewusst die Sanierung von Bestandsgebäuden überprüft. Eine Anwendung der Konzepte für Neubauten ist ebenso möglich, doch da die Maßnahmen, die aus der traditionellen Bebauung abgeleitet werden konnten ohne Schwierigkeiten in die Planung für einen Neubau einbezogen werden können, ohne geltende Vorschriften zu verletzen, wurde diese Variante nicht weiter untersucht.

## 7.2 Schlussfolgerungen

Die in der Einleitung beschriebene Problematik einer Bauweise, die nicht an das regionale Klima angepasst ist, besteht in den dadurch erforderlichen technischen Lösungen und den aktiven Einsatz von Energie, um den Innenraum zu klimatisieren. Bis in das Zeitalter der Industrialisierung waren die technischen Möglichkeiten und die Verfügbarkeit von Energie zum Heizen und Kühlen nicht in der Form, wie wir sie heute kennen vorhanden. Die Menschen stellten jedoch auch zu der damaligen Zeit Ansprüche an der Komfort von Innenräumen und mussten Konzepte finden, die mit geringem oder ohne den Einsatz von Energie an die lokalen Bedingungen angepasst funktionierten. Diese Überlegungen führten zu der initialen Fragestellung für diese Arbeit.

- » Wie kann man diese Konzepte erfassen und ihre Übertragbarkeit auf unsere heutige Zeit überprüfen?

Eine beispielhafte Untersuchung anhand der traditionellen Bebauung der Oberstadt Thessalonikis konnte zeigen, dass für die ausgewählten Wohnhäuser Konzepte zur passiven Klimatisierung bestehen. Die Prüfung der Übertragbarkeit ergab, dass diese erfolgreich auf eine gänzlich andere Bebauung angewendet werden können.

Die Forschungslücke, die darin besteht, dass zwar zahlreiche Untersuchungen zu den Konzepten der passiven Klimatisierung bestehen, die

Übertragbarkeit auf die heutige Zeit jedoch in der Regel nicht weiter erforscht wird, konnte anhand des Fallbeispiels geschlossen werden. Die entwickelte Methode stellt eine Möglichkeit dar, das Vorgehen auch auf andere Fälle anzuwenden und beginnend mit einer kritischen Betrachtung der an einem Ort vorhandenen traditionellen Bebauung die Konzepte zu erfassen und die Übertragbarkeit zu prüfen.

Die Methode könnte ebenso zu Lehrzwecken eingesetzt werden, um Studierenden entsprechender Fachrichtungen, die sich mit dem Planen und Bauen befassen, einerseits die große Vielfalt an energieeffizienten Konzepten zur Klimatisierung zu vermitteln, die in dem Studium traditioneller Bauweisen erkannt werden kann. Andererseits kann die Anwendung solcher Lösungen innerhalb einer Bauplanung geübt und mit Alternativen verglichen werden.

### 7.2.1 Bedeutung für die Wissenschaft

Wohngebäude verursachen etwa 40% des gesamten Energieverbrauchs in der europäischen Union (Europäische Union, 2014). Dies ist ein so großer Anteil, dass das darin enthaltende Einsparpotential zwingend genutzt werden muss, um die dringend notwendige Reduktion des Energieverbrauchs zu erreichen.

Die Ergebnisse dieser Arbeit zeigen, dass es für die untersuchte Beispielregion möglich ist, durch

Anwendung von Konzepten zur passiven Klimatisierung den Energieverbrauch von Wohngebäuden drastisch zu senken. Daher könnten diese Konzepte einen Beitrag dabei leisten, die Verringerung der Treibhausgasemissionen um 20 % im Vergleich zum Jahr 1990 und eine Steigerung der Energieeffizienz um 20 %, welche in allen EU-Mitgliedsländern in nationalen Plänen definiert werden müssen, zu erreichen.

### 7.2.2 Offene Fragen und weiterer Forschungsbedarf

In dieser Arbeit werden wiederholt Hinweise auf offene Fragen und weiteren Forschungsbedarf im jeweiligen Zusammenhang erwähnt, welche hier nochmals zusammengefasst werden sollen.

#### ◇ Messungen im Windkanal

Die Messungen im Windkanal der Universität Hamburg lieferten wertvolle Ergebnisse in Bezug auf die natürliche Lüftung der traditionellen Wohnhäuser in der Oberstadt von Thessaloniki. Weitere Forschung könnte in diesem Zusammenhang als Sensitivitätsstudie erfolgen, um die Fehler durch das Drehen der Drehscheibe einschätzen zu können und um den Effekt der Reynolds Zahl zu bewerten.

Eine weitere Frage, die im Rahmen dieser Messungen nicht abschließend beantwortet werden konnte bezieht sich auf die Vermutung, dass es auf der Leeseite des Referenzgebäudes bei einer

entsprechenden Windrichtung Nachwirbel gibt. Offenbar werden diese durch den Erker gestört und führen zu einer geringeren Druckdifferenz zwischen den gegenüberliegenden Seiten des Raumes. Im untersuchten Fall hat dies positive Auswirkungen auf den Heizwärmebedarf der Räume im Winter, da geringere Druckdifferenzen zwischen den Fassaden zu einer niedrigeren Infiltrationsrate führen. Diese ist aufgrund der verwendeten Bautechnik sehr hoch, so dass die Möglichkeit besteht, dass dieser Effekt beim Bau der Gebäude gezielt eingesetzt wurde.

In dem Experiment wurden Modelle untersucht, welche keine Öffnungen haben und daher in sich geschlossen sind. Die ermittelten Drücke an den Fassaden sind daher Maximalwerte, weil der Druck abnimmt, sobald eine Strömung durch den Raum erfolgen kann. Weitere Messungen könnten mit Modellen erfolgen, die durchströmt werden, um den Einfluss der Öffnungen auf die Druckdifferenzen zu erkennen. Dazu muss der Innenwiderstand der Räume korrekt abgebildet werden. Eine Schwierigkeit besteht in diesem Zusammenhang darin, dass dieser nicht nur von den inneren Verbauungen abhängt, sondern auch von unsicheren Faktoren wie dem Einfluss der Nutzerinnen und Undichtigkeiten von Türen und Bauteilen.

#### ◇ Gebäudesimulationen

Bei der Untersuchung der Verschattungselemente vor den transparenten Flächen einer Fassade, wurden die Wechselwirkungen zwischen den

Elementen und der Verglasung in unterschiedlichen Varianten simuliert. Aus den Simulationen ließen sich erste Ergebnisse ableiten, dennoch könnten sich durch weitere Forschung zusätzliche Resultate ergeben. Dazu müsste detailliert betrachtet werden, wie diese Verschattungen in Energy Plus simuliert werden, um die Möglichkeiten, die Wechselwirkungen effektiver einzusetzen, zu erfassen.

Die Simulationen lieferten Ergebnisse zu unterschiedlichen Temperaturverläufen der Oberflächen und Lufttemperatur je nach Verwendung von Baumaterialien. Weitere Forschung könnte untersuchen, welche Ursachen diese Verläufe im Detail haben. Daraus ließen sich, je nach Ergebnis, Baumaterialien noch gezielter einsetzen.

Die Beschaffenheit der Oberflächen einer Fassade hat einen Einfluss auf die Temperaturen im Innenraum. Bei der verwendeten Simulationssoftware wird die Rauigkeit der Oberfläche jedoch nur als Konstante für den Wärmeübergangswiderstand bei der U-Wert Berechnung berücksichtigt. Eine quantitative Analyse dieser Faktoren wurde im Rahmen dieser Arbeit nicht durchgeführt, da eine solche Untersuchung sich zu weit in andere Forschungsbereiche erstrecken würde.

Ein weiteres Themenfeld, welches im jeweiligen Zusammenhang zwar genannt, jedoch nicht weiter untersucht wurde, ist der Einfluss der Nutzerinnen. In Bezug auf die Lüftung ist dies ein Bereich, in dem

noch weiterer Forschungsbedarf besteht, um zu erfassen, wie das Potential der natürlichen Lüftung am besten genutzt und gleichzeitig eine hohe Nutzerzufriedenheit erreicht werden kann. Dies gilt ebenso für die Bedienung von Verschattungselementen. Die passive Klimatisierung über diese Stell-schrauben funktioniert immer nur so gut, wie sie bedient werden. Daher ist dieser Faktor von großer Wichtigkeit. Neben der korrekten Bedienung kommen in diesem Zusammenhang noch weitere Faktoren zur Geltung, wie beispielsweise die Nutzung von Klimaanlage als Statussymbol. Es wäre in diesem Zusammenhang möglich zu erforschen, ob und wie sich die Verwendung von künstlicher Klimatisierung mit der Wirtschaftskrise in der untersuchten Region verändert hat. Die Nutzerbefragungen, die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführt wurden, gaben erste Hinweise auf einen Zusammenhang.

### 7.2.3 Energieeffizienz von Gebäuden - Ausblick

Bis zum Jahre 2050 werden es weltweit etwa 9 Milliarden Menschen sein, die Wohnraum benötigen. Idealerweise sollte dieser Bedarf in einer kulturell und umweltverträglichen sowie nachhaltigen Weise gedeckt werden (Asquith, 2006:4). Die Konzepte der passiven Klimatisierung von Innenräumen, die an unterschiedlichsten Standorten über lange Zeit entwickelt und ausgereift sind, können dazu einen wertvollen Beitrag leisten.

Da wir heute die technischen Möglichkeiten besitzen, die Wirkung von Maßnahmen im Voraus abschätzen zu können, sollte das Anwenden passiver Konzepte zur Klimatisierung und die möglichen Kombinationen mit modernen Methoden bei Bauvorhaben die Regel sein. Die beispielhafte Untersuchung hat gezeigt, dass dies in der Theorie möglich ist. Es ist wünschenswert, dass sich dieses Vorgehen in der Praxis immer weiter durchsetzt und Ergebnisse auf diesem Wege validiert werden können. Die Vielfalt von Lösungen zur passiven Klimatisierung, die in dem Studium traditioneller Bauweise gefunden werden kann, sollte dazu die Grundlage bieten.



# Literaturverzeichnis

- Aesopos, Yannis (2004): Die „Polykatoikia“ als Modul der modernen Stadt. In: *Bauwelt, Bd. 29*. Berlin: Bauverlag, S. 14–29.
- Aiulfi, Dario (1997): Lüftung von grossen Räumen: Handbuch für Planer. Bundesamt für Energie BFE, Schweiz. Dübendorf: Clima-Suisse.
- Allard, F. (Hg.) (1998): *Natural Ventilation in Buildings: A Design Handbook*. London: James & James.
- AlSaiyyad, Nezar (2006): Foreword. In: *L. Asquith und Vellinga M. (Hg.): Vernacular Architecture in the 21st Century*. London: Routledge, S. xvii–xviii.
- AlSaiyyad, Nezar; Arboleda, Gabriel (2011): The Sustainable Indigenous Vernacular: Interrogating a Myth. In: *Sang Lee (Hg.): Aesthetics of sustainable architecture*. Rotterdam: 010 Publishers, S. 134–151.
- American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers: ASHRAE Standard 55-2010: Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy. Atlanta, USA.
- Anastasiadis, Agis (o.J.): Thessaloniki. Old Town. Athen: Melissa Publishing House.
- Anastasiadis, Agis (2012): Präsentation als Lehrmaterial an der Aristotle Universität Thessaloniki.
- Andreadaki, Eleni; Nomikos, Michael (1988): Regional Architecture of Makedonia: The Case of Vernacular Settlements as an Example of Passive Low Energy Design. In: *proceedings of the conference PLEA 1988: Energy and Buildings for Temperate Climates: A Mediterranean Regional Approach*, S. 193–198.
- Asquith, L.; Vellinga, M. (Hg.) (2006): *Vernacular Architecture in the 21st Century*. London: Routledge.
- Aureli, Pier Vittorio; Giudici, Maria S.; Issaias, Platon (2012): From Dom-ino to Polykatoikia. In: *Domus, Bd. 962*.
- Babalıs, D. (2003): *Bioclimatic Design & Urban Regeneration*. Firenze: Edizioni Polistampa.
- Baehr, Hans Dieter; Stephan, Karl (1996): *Wärme- und Stoffübertragung*. Berlin [u.a.]: Springer.
- Balaras, Constantinos A. et al. (2007): European residential buildings and empirical assessment of the Hellenic building stock, energy consumption, emissions and potential energy savings. In: *Building and Environment 42 (3)*, S. 1298–1314.
- Behling, Sophia; Behling, Stefan (1996): *Sol power. Die Evolution der solaren Architektur*. München, New York: Prestel.
- Bing, Judith; J. Brooke Harrington (1998): A Study of Words and Building: The Cardaks of Former Yugoslavia. In: *Environmental Design: Journal of the Islamic Environmental Design Research Centre 1-2*. Rome: Dell’oca Editore. S. 174-200.
- Bourdieu, Pierre (1999): Sozialer Sinn: Kritik der theoretischen Vernunft. Das kabülische Haus, Aufsatz. Frankfurt am Main: Suhrkamp.
- British Standards Institution: BS 5925-1991 Code of practice for ventilation principles and designing for natural ventilation.
- Bruse, Michael: ENVI-met 3. Mainz: ENVI-met.com. Online verfügbar unter <http://www.envi-met.com/>.
- Butti, Ken; Perlin, John (1980): *A golden thread. 2500 years of solar architecture and technology*. Palo Alto, New York: Cheshire Books; Van Nostrand Reinhold.
- Cerasi, Maurice (1998): The Formation of Ottoman House Types: A Comparative Study in Interaction with Neighboring Cultures. In *Muqarnas XV: An Annual on the Visual Culture of the Islamic World*. Gülrü Necipoglu (ed.) Leiden: E.J. Brill, S. 116-156.
- Cerasi, Maurice; Bugatti, Emiliano; D’Agostino, Sabrina (2004): *The Istanbul Divanyolu. A case study in Ottoman urbanity and architecture*. Würzburg: Ergon Verlag.
- Chrisomallidou, N. (2001): Guidelines for integrating energy conservation techniques in urban buildings. In: *Santamouris, M. und Asimakopoulos, D. N. (Hg.): Energy and climate in the urban built environment*. London: James & James, S. 247–309.
- Climate Consultant 5.4. UCLA Department of Architecture and Urban Design. Online verfügbar unter <http://www.aud.ucla.edu/energy-design-tools>. Zuletzt geprüft am 20.05.2014.
- Cofaigh, Eoin O.; Olley, John A.; Lewis, J. Owen (1996): *The climatic dwelling. An introduction to climate-responsive residential architecture*. London: James & James.
- Condaratos, Savas (Hg.) (1999): Greece. on the occasion of the Exhibition „20th Century Architecture, Greece“, Deutsches Architekturmuseum, Frankfurt Main.
- Croxford, Ben; Kalogridis, Achilles (2006): Lessons Learned from the Pefki Solar Village in Athens, Nearly 20 Years on. In: *Campbell-Howe, R., (ed.) Solar 2006: renewable energy, key to climate recovery*. National Solar Conference Proceedings, Denver, USA: American Solar Energy Society.
- Dascalaki, Elena G et al. (2010): Data collection and analysis of the building stock and its energy performance - An example for Hellenic buildings. In: *Energy and Buildings 42 (8)*, S. 1231–1237.
- Dascalaki, Elena et al. (2012a): Energy performance of buildings-EPBD in Greece. In: *Energy Policy 45*, S. 469–477.
- Dascalaki, Elena; et al. (2012b): Typology Approach for Building Stock Energy Assessment (TABULA). National Scientific Report. Athen. Greece.
- Davaki, Maria (2011): Analysis of energy use in typical

Greek residential buildings and proposed retrofit strategies. Atlanta, Ga: Georgia Institute of Technology.

DETAIL (2011): Von Sonnenstädten und Sonnenbädern. Online verfügbar unter: <http://www.detail.de/architektur/news/von-sonnenstaedten-und-sonnenbaedern-008642.html>. zuletzt geprüft am 27.05.2014.

Deutscher Wetterdienst (Hg.): Weltklima. Klimadaten aus aller Welt. Online verfügbar unter: [http://www.dwd.de/bvbw/appmanager/bvbw/dwdwwwDesktop?\\_nfpb=true&\\_pageLabel=\\_dwdwww\\_klima\\_umwelt\\_klimadaten\\_deutschland&T82002gsbDocumentPath=Navigation%2FOeffentlichkeit%2FKlima\\_\\_Umwelt%2FKlimadaten%2FKlDaten\\_\\_kostenfrei%2FKlDiagramme\\_\\_download\\_\\_node.html%3F\\_\\_nnn%3Dtrue](http://www.dwd.de/bvbw/appmanager/bvbw/dwdwwwDesktop?_nfpb=true&_pageLabel=_dwdwww_klima_umwelt_klimadaten_deutschland&T82002gsbDocumentPath=Navigation%2FOeffentlichkeit%2FKlima__Umwelt%2FKlimadaten%2FKlDaten__kostenfrei%2FKlDiagramme__download__node.html%3F__nnn%3Dtrue). zuletzt geprüft am 05.05.2014.

Dietrich, U.; Calderon S. (2012): Zero-Cooling-Energy-Buildings in Hot Climates: Experiences and Results from a University Teaching Course. In: *Brebbia, C.A. (Hg.): Eco-Architecture IV*, Wessex Institute of Technology, UK.

Dietrich, Udo (2010): Excel tool zur Berechnung der natürlichen Lüftung. Auf Grundlage des BS 5925-1991 und dem Algorithmus nach Rijal, Humphreys zur Wahrscheinlichkeit der Fensteröffnung.

Dietze, Lothar (1987): Freie Lüftung von Industriegebäuden. Berlin: Verl. für Bauwesen.

Dimitris, Angelidis (1977): Poleodomiki Dierevnisi stin Anopoli Thessalonikis. Sira Spoudastikon Ergasion (in griechischer Sprache). Thessaloniki.

Deutsches Institut für Normung (1996): DIN EN 12524. Baustoffe und -produkte. Wärmeschutztechnische Eigenschaften: tabellierte Bemessungswerte. Berlin: Beuth Verlag.

Deutsches Institut für Normung (1998): DIN EN 772-4. Bestimmung der Dichte und der Rohdichte sowie der Gesamtporosität und der offenen Porosität von Mauersteinen aus Naturstein. Berlin: Beuth Verlag.

Deutsches Institut für Normung (2006): DIN EN 14501:2006-02. Abschlüsse - Thermischer und visueller Komfort - Leistungsanforderungen und Klassifizierung. Berlin: Beuth Verlag.

Deutsches Institut für Normung (2007): DIN EN 13363-1:2003+A1:2007 Sonnenschutzeinrichtungen in Kombination mit Verglasungen - Berechnung der Solarstrahlung und des Lichttransmissionsgrades. Berlin: Beuth Verlag.

Deutsches Institut für Normung (2007): DIN EN 15242:2007. Lüftung von Gebäuden – Berechnungsverfahren zur Bestimmung der Luftvolumenströme in Gebäuden einschließlich Infiltration. Berlin: Beuth Verlag.

Deutsches Institut für Normung (2007): DIN EN 7730:2007-06. 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. Berlin: Beuth Verlag.

Deutsches Institut für Normung (2012): DIN EN 15251:2012-12. Eingangsparameter für das Raumklima zur Auslegung und Bewertung der Energieeffizienz von Gebäuden - Raumluftqualität, Temperatur, Licht und Akustik; Deutsche Fassung EN 15251:2007. Berlin: Beuth Verlag.

Deutsches Institut für Normung (2012): DIN EN ISO 13791. Wärmetechnisches Verhalten von Gebäuden - Sommerliche Raumtemperaturen bei Gebäuden ohne Anlagentechnik. Allgemeine Kriterien und Validierungsverfahren. Berlin: Beuth Verlag.

Deutsches Institut für Normung (2013): DIN 4108-4. Wärmeschutz und Energieeinsparung in Gebäuden. Teil 4: Wärme- und feuchteschutztechnische Kennwerte. Berlin: Beuth Verlag.

Doumanis, Orestis (1984): Post-War Architecture in Greece, 1945-1983. Athen: Architecture in Greece Press.

Duffie, John A.; Beckmann, William A. (2000): TRNSYS Reference Manual. A Transient System Simulation Program. Vol I. Madison, USA.

Eicker, Ursula (2009): Low energy cooling for sustainable buildings. Chichester, West Sussex, U.K: Wiley.

Eldem, Sedat H. (1955): Türk Evi Plan Tipleri, Istanbul Teknik Üniversitesi (in türkischer Sprache), Istanbul: Pulhan Matbaasi

Ernest, D.; Bauman, Fred; Arens, Edward A. (1991): The prediction of indoor air motion for occupant cooling in naturally ventilated buildings. In: *ASHRAE Transactions, Vol. 97, Pt. 1*, S. 14 ff.

Europäische Union (2010): Europa 2020 - Europa 2020 im Überblick -. Hg. v. Europäische Kommission. Online verfügbar unter: [http://ec.europa.eu/europe2020/europe-2020-in-a-nutshell/index\\_de.htm](http://ec.europa.eu/europe2020/europe-2020-in-a-nutshell/index_de.htm), zuletzt geprüft am 05.05.2014.

Europäische Union (2014): Gesamtenergieeffizienz von Gebäuden. Online verfügbar unter: [http://europa.eu/legislation\\_summaries/internal\\_market/single\\_market\\_for\\_goods/construction/en0021\\_de.htm](http://europa.eu/legislation_summaries/internal_market/single_market_for_goods/construction/en0021_de.htm), zuletzt geprüft am 05.05.2014.

European Environment Agency (EEA) (2009): Energy consumption by end use per dwelling. Copenhagen, Denmark. Online verfügbar unter: <http://www.eea.europa.eu/data-and-maps/figures/households-energy-consumption-by-end-uses-5>, zuletzt geprüft am 27.03.2014.

Evliya, Çelebi; Dankoff, Robert (2010): An Ottoman traveler. Selections from the Book of travels of Evliya Çelebi. London: Eland.

Fanger, P.O. (1982): Thermal Comfort. 2. Aufl.. Malabar, Florida: Robert E. Krieger.

Fathy, Hassan; Shearer, Walter; Sulṭān, 'Abd al-Raḥmān (1986): Natural energy and vernacular architecture. Principles and examples with reference to hot arid climates. Chicago: Published for the United Nations University by the University of Chicago Press.

Fathy, Hassan (1987): Natürliche Energie und Vernakuläre Architektur, aus: Fathy: Natural energy and vernacular architecture. Principles and examples with reference to hot arid climates. Übersetzung. In: *Arch+ 02/1987*, S. 34 – 49, Aachen: Arch+ Verlag.

Fezer, Fritz (1995): Das Klima der Städte. 54 Tabellen. Gotha: Perthes.

Fiedler, Eckehard (2010): Natürliche Lüftung großer Gebäude; Die Auslegung unter Berücksichtigung von Weteroneinflüssen. In: *tab, das Fachmagazin der TGA Branche 07-08/2010*, S. 42-48.

Floros, C. (2009): Greek traditional bioclimatic architecture. Selection of building materials and techniques with ecological criteria. In: *Technical Chamber of Greece - 1st Greek - Chinese Forum on the environment, Dec. 3-4*. S. 1-6.

Foster, Norman (1996): Vorwort. In: *Behling, Sophia und Stefan; Sol Power, Die Evolution der solaren Architektur*. München, New York: Prestel.

Frey, Pierre; Bouchain, Patrick (2010): Learning from vernacular. Arles: Actes Sud.

Gerder, Frauke (2006): Bestimmung des durchschnittlichen, windinduzierten Luftwechsels in einem Atrium am Beispiel des Energie Forums Berlin. Dissertation, Technische Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig.

Geros, V. et al. (2005): On the cooling potential of night ventilation techniques in the urban environment. In: *Energy and Buildings 37 (3)*, S. 243–257.

Ghiaus, Cristian; Allard, Francis (2007): Natural ventilation in the urban environment. Assessment and design. Reprint. London: Earthscan.

Giannaros, T. M.; Melas, D.; Kontogianni, P. (2010): An Observational Study of the Urban Heat Island in the Greater Thessaloniki Area. In: *Hellenic Physical Society with the Cooperation of the Physics Departments of Greek Universities (Hg.): Proceedings of the 7th International Conference of the Balkan Physical Union*. Alexandroupolis, S. 991–996.

Giannaros, Theodore M.; Melas, Dimitrios (2012): Study of the urban heat island in a coastal Mediterranean City: The case study of Thessaloniki, Greece. In: *Atmospheric Research (118)*, S. 103–120.

Givoni, Baruch (1998): Climate Considerations in Buildings and Urban Design. USA: ITP.

Goodwin, Godfrey (1971): A history of Ottoman architecture. London: Thames & Hudson.

HafenCity Universität Hamburg (2013): PRIMERO Komfort 1.1. Online verfügbar unter [www.primerosoftware.de](http://www.primerosoftware.de). zuletzt geprüft am 03.06.2014.

Hagn, B.; Roetzel A. (2007): U-Wert Manager: HafenCity Universität Hamburg.

Hall, Monika (2004): Untersuchungen zum thermisch induzierten Luftwechsellpotential von Kippfenstern. In: *Bauphysik, Bd. 3*, S. 109–115.

Hatzitrifon, Nikolaos (nicht veröffentlicht): Calculation of the response of historical framed walls in South Balkan. Ministry of Culture /EMM- C. Makedonia.

Hauser, Gerd (2003): Bauphysikalische Grundlagen Wärmelehre. Vorlesungsskript Bauphysik I. Hg. v. Universität Gesamthochschule Kassel.

Hegger, Manfred (2010): Material zur Vorlesung Mikroklima und Gebäudeumfeld. Pflichtfach Klimagerechtes Bauen SoSe 2010. TU Darmstadt.

Hellenic Cadastre & Mapping Agency S.A. (2012), Online verfügbar unter: <http://gis.ktimanet.gr/wms/controlpoints/searchpoint.aspx>. zuletzt geprüft am 03.06.2014.

Hellenic Republic, Ministry of Finance (2010): Hellenic Statistical Authority, Legal construction activity (2001-2010). Online verfügbar unter: <http://www.statistics.gr/portal/page/portal/ESYE>. zuletzt geprüft am 03.06.2014.

Hellenic Republic, Ministerium für Umwelt, Energie und Klimawandel (2010): KENAK Kanonismos energeiakis apodotikotitas ktiriwn. D6 / B / 5825, (in griechischer Sprache).

Hellenic Republic, Ministry of Finance (2011): Hellenic National Reform Programme 2011-2014. Athens. Online verfügbar unter: [http://ec.europa.eu/europe2020/pdf/nrp/nrp\\_greece\\_en.pdf](http://ec.europa.eu/europe2020/pdf/nrp/nrp_greece_en.pdf), zuletzt geprüft am 14.04.2014.

Hellenic Republic, Ministry of Statistics (2012): Bericht zur Volkszählung 2011 (in griechischer Sprache), Online verfügbar unter: [http://www.statistics.gr/portal/page/portal/ESYE/BUCKET/General/A1602\\_SAM01\\_DT\\_DC\\_00\\_2011\\_02\\_F\\_GR.pdf](http://www.statistics.gr/portal/page/portal/ESYE/BUCKET/General/A1602_SAM01_DT_DC_00_2011_02_F_GR.pdf), zuletzt geprüft am 12.05.2014.

Hellenic Republic, Ministerium für Umwelt, Energie und Klimawandel (2013): Gesetz Nr. 4122 - Energieeffiziente Gebäude, (in griechischer Sprache).

Hermelink, Andreas et al. (2013): Towards nearly zero - energy buildings. Definition of common principles under the EPBD. Hg. v. Politecnico di Milano, University of Wuppertal. Köln. Online verfügbar unter: [http://ec.europa.eu/energy/efficiency/buildings/doc/nzeb\\_full\\_report.pdf](http://ec.europa.eu/energy/efficiency/buildings/doc/nzeb_full_report.pdf), zuletzt geprüft am 14.04.2014.

Herzog, Thomas (2008): In: *Hegger, Manfred et al. ; Energie Atlas. Nachhaltige Architektur*, Basel: Birkhäuser.

- Hönger, Christian (2009): Das Klima als Entwurfsmotor. Climate as a design factor: with partial translation into English. Luzern: Quart (Laboratorium, 1).
- Muramaki, Shuzo; Ikaga, Toshiharu (2008): Evaluating Environmental performance of Vernacular Architecture through CASBEE (Comprehensive Assessment System for Built Environment Efficiency). Japan: IBEC. Online verfügbar unter: <http://www.ibec.or.jp/CASBEE/english/download.htm>. zuletzt geprüft am 10.06.2014.
- Kapou Geoinformatics PLC. Online verfügbar unter: <http://kapou.gr/> zuletzt geprüft am 03.06.2014.
- k. A. (1990): Arnaia. Athen: Melissa Publishing House (Greek Traditional Architecture).
- Kalogirou, Nikos (1990): Veroia. Athen: Melissa Publishing House (Greek Traditional Architecture).
- Kassner, C. (1910): Die meteorologischen Grundlagen des Städtebaus. In: *J. und Genzmer F. Brix (Hg.): Städtebauliche Vorträge aus dem Seminar für Städtebau an der Königlichen Technischen Hochschule zu Berlin*, III. Berlin.
- Khorasani, Reza (2012): Gespräch über die Baustoffproben von einer Bauruine in Thessaloniki, Bestimmung des Natursteins durch Inaugenscheinnahme an der HafenCity Universität Hamburg.
- Klima Campus (2011): Experimente zur Ausbreitung von gasförmigen Stoffen, Meteorologisches Institut, BBK Pilotprojekt Hamburg.
- Kolokotroni, M.; Young, A. N. (1990): Guidelines for Bioclimatic Housing Design in Greece. In: *Building and Environment*, 1990/25, No. 4. S. 297-307.
- Kraif, Ursula (2010): Duden - Das Fremdwörterbuch. 10. aktualisierte Auflage. Mannheim: Dudenverlag
- Küçükerman, Önder (1996): Kendi mekâninin arayışı içinde Türk evi. (Turkish house in search of spatial identity, in türkischer Sprache). 5. Aufl. Istanbul: Türkiye Turing ve Otomobil Kurumu.
- Kuma, Kengo (2011): The Concept and Aesthetics of Sustainable Building in Japan. In: *Sang Lee (Hg.): Aesthetics of sustainable architecture*. Rotterdam: 010 Publishers, S. 179–185.
- Kuypers, Friedhelm (2012): Physik für Ingenieure und Naturwissenschaftler. Band 1. Weinheim: Wiley-VCH.
- Larsson, Nils (2012): User Guide to the SBTool assessment framework, iiSBE. Online verfügbar unter: <http://www.iisbe.org/system/files/SBTool%202012%20user%20guide%2026Oct12.pdf>. zuletzt geprüft am 10.06.2014.
- Leitl, Bernd; Schatzmann, Michael (2005): Bestimmung von Windlasten an der Antarktisstation Neumayer III. unveröffentlichter Abschlussbericht. Meteorologisches Institut der Universität Hamburg, Technische Meteorologie.
- Luebckemann, Chris (2008): Globaler Wandel. In: *Hegger, Manfred et al.; Energie Atlas. Nachhaltige Architektur*, Basel: Birkhäuser.
- Lutz, P.; Freymuth, H.; Fischer, H. M. (2002): Lehrbuch der Bauphysik. 5. Aufl. Stuttgart: Teubner.
- Marek, Rudi; Nietsche, Klaus (2012): Praxis der Wärmeübertragung. 3. Aufl. München: Carl Hanser Verlag.
- Matzarakis, A. (2001): Die thermische Komponente des Stadtklimas. Habilitationsschrift. In: *Berichte des Meteorologischen Institutes der Universität Freiburg*.
- Mazower, Marc (2006): Salonica City of Ghosts. Christians, Muslims and Jews 1430 - 1950. New York: Vintage Books.
- Megas, George A. (1951): The Greek House. Its evolution and its Relation to the Houses of the other Balkan Peoples. Athens: Series of Publications of the Ministry of Reconstruction (37).
- Meteonorm, Produkt der Firma Meteotest in Bern, Schweiz, Online verfügbar unter: [www.meteonorm.com](http://www.meteonorm.com), zuletzt geprüft am 23.06.2014.
- Ministerium für Verkehr und Infrastruktur Baden-Württemberg (2012): Städtebauliche Klimafibel. 2. überarbeitete Version. Unter Mitarbeit von Ulrich Reuter und Rainer Kapp. Stuttgart.
- Moustopoulos, N.C (1979): Ano Poli. (in griechischer Sprache). Athens: Melissa Publishing House.
- Moutsopoulos, Nikolaos K. (1967): Hē laikē architektonikē tēs Beroias. The Popular Architecture of Verria. Athen: Ekdotis Techniou Epimelētēriou tēs Hellados.
- Müller-Wiener, W.; Cramer J. (Hg.) (1982): Istanbul - Zeyrek. Studien zur Erhaltung eines traditionellen Wohngebietes. Deutsches Orient-Institut. Hamburg: Verbund Stiftung Deutsches Übersee-Institut.
- Nar, León A.; Yerolymbos, Yiorgis (2011): Thessaloniki 1912-2012. The future of the past : a different narration history. Athen: Kapon Editions.
- Noble, Allen G. (2007): Traditional buildings. A global survey of structural forms and cultural functions. London, New York: I.B. Tauris.
- Nomikos, Michael (erhalten: 2010): Präsentationsfolien zu einem Vortrag über die Sanierung eines historischen Gebäudes in der Altstadt von Thessaloniki.
- Nomikos, Michael (27.11.2011): Altbauinstandsetzung in der Altstadt von Thessaloniki. Interview durch Sonja Schelbach. Thessaloniki. handschriftliche Notizen.
- Nomikos, Michael (30.09.2013): Veränderungen im Wohnungsbau im 20. Jahrhundert. Interview durch Sonja



Schelbach. Thessaloniki. handschriftliche Notizen.

Oikonomou, Aineias (2007): Comparative investigation of the architectural structure and the environmental performance of 19th century traditional buildings in Florina. Unpublished Ph.D.dissertation.

Oikonomou, Aineias (2008): Bioclimatic elements and design principles of the traditional architecture in northern Greece. In: *Proceedings of the conference PLEA 2008 - 25th Conference on Passive and Low Energy Architecture*, Dublin.

Oikonomou, Aineias; Bougiatioti, Flora (2009): Learning from the Past: Environmental aspects of the traditional settlements of Mt Verno, Greece. In: *Proceedings of the conference PLEA 2009 - 26th Conference on Passive and Low Energy Architecture*, Quebec.

Oikonomou, Aineias; Bougiatioti, Flora (2011): Architectural structure and environmental performance of the traditional buildings in Florina, NW Greece. In: *Building and Environment* (46), S. 669–689.

Oke, T.,R. (1981): Canyon geometry and the nocturnal urban heat island: Comparison of scale model and field observations. In: *Journal of Climatology*, Vol. 1, S. 237–254.

Oliver, Paul (1969): *Shelter and Society*, London: Barrie & Jenkins.

Oliver, Paul (Hg.) (1997a): *Encyclopedia of Vernacular Architecture*, Vol 1. Theories and Principles. 3 Bände. Cambridge: Cambridge University Press.

Oliver, Paul (Hg.) (1997b): *Encyclopedia of Vernacular Architecture*, Vol 2. Cultures and Habitats. 3 Bände. Cambridge: Cambridge University Press.

Oliver, Paul (2003): *Dwellings. The vernacular house World Wide*. London, New York: Phaidon.

Oort, H. van Stork B. (1995): Vergleich von CFD-Berechnungen und Windkanalmessungen der Umströmung

einfacher geometrischer Körper. In: *Erich J. Plate (Hg.): Windprobleme in dichtbesiedelten Gebieten*. Aachen: WTG (WTG-Berichte, 3), S. 43–61.

Papadopoulos, A. M. (2002): Feasibility of Energy Saving Renovation Measures in Urban Buildings. The Impact of Energy Prices and the Acceptable Payback Time Criterion. In: *Energy and Buildings* (34), S. 455–466.

Papagiannis, Grigoris (2010): Universities and Students for Energy Efficiency (USE Efficiency). 1st Level Audit Report, Thessaloniki: AUTH.

Papahadzis, N. D. (1963): *Denkmäler von Thessaloniki*. Thessaloniki: Molho.

Papaiōannou, Kōnstantinos Spyridōnos (2003): To Hellēniko paradosiako spiti (The Greek traditional House). In griechischer Sprache. Athēna: Panepistēmiakes Ekdosis E.M.P.

Pelekanos, N.; Tombazis, A.; Yannas, S. (1986): Vernacular Architecture in Greece. A Survey from the Bioclimatic Point of View. In: *Passive and Low Energy Architecture in Housing (Hg.). Proceedings of the fifth International PLEA Conference*. Budapest.

Philandras, C. M.; Nastos P. T.; Paliatsos A. G.; Repapis C. C. (2012): Study of the rain intensity in Athens and Thessaloniki, Greece. In: *Advances in Geosciences (AD-GEO)* 23, S. 37–45.

Philippidis, D. (Hg.) (1983): *Traditionelle Griechische Architektur*. Erster Band, Ost-Ägäis, Sporaden, Ionische Inseln. 4 Bände. Athen: Melissa Publishing House.

Plag, Ralf: U-Wert Rechner: u-wert.net UG. Online verfügbar unter: <http://www.u-wert.net/berechnung/u-wert-rechner/>, zuletzt geprüft am 07.04.2014.

Plate, Erich J. (Hg.) (1982): *Engineering meteorology. Fundamentals of meteorology and their application to pro-*

blems in environmental and civil engineering. Amsterdam, New York: Elsevier Scientific Pub. Co.

Plate, Erich J. (Hg.) (1995): *Windprobleme in dichtbesiedelten Gebieten*. Aachen: WTG-Berichte. Nr. 3, Seiten 7 - 26, Windtechnologische Gesellschaft e. V., Aachen.

Rapoport, Amos (1991): *House form and culture*. Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall (Foundations of cultural geography series).

Recknagel, Hermann; Sprenger, Eberhard; Schramek, Ernst-Rudolf (2007): *Taschenbuch für Heizung und Klimatechnik*. Einschließlich Warmwasser- und Kältetechnik. 73. Aufl. München: Oldenbourg-Industrieverl.

Rijal, H. B.; Humphreys, M. A. et al. (2008): Development of an adaptive window-opening algorithm to predict the thermal comfort, energy use and overheating in buildings. In: *Journal of Building Performance Simulation*, Vol. 1, No. 1, S. 17-20.

Roestvik, Harald N. (2011): The Vernacular, the Iconic and the Fake. In: *Sang Lee (Hg.): Aesthetics of sustainable architecture*. Rotterdam: 010 Publishers, S. 168–178.

Rositer, Stuart (1981): *Reiseführer Griechenland*. London: C.H. Beck München.

Rumscheid, F. (1998): *Priene. Führer durch das Pompeji Kleinasiens*. Istanbul 1998.

Santamouris, M.; Asimakopoulos, D. N. (Hg.) (2001): *Energy and climate in the urban built environment*. London: James X James.

Schelbach, Sonja; Dietrich, Udo (2012): Learning from traditional Architecture. In: *Brebbia, C.A. (Ed.): Eco-Architecture IV*, Wessex Institute of Technology, UK.

Schelbach, Sonja; Dietrich Udo (2013): Architecture proven to be successfully climate responsive? Learning from



traditional architecture by looking at strategies for resource efficient and climate responsive constructions. In: *L. Braganca (Hg.): Portugal SB 13. Contribution of Sustainable Building to meet 20-20-20 targets*. Guimarães, Portugal.

Schmidt, Marco (2008): Gebäudebegrünung und Verdunstung. In: *Garten + Landschaft, Bd. 1*, S. 15–18.

Schütze, Thorsten; Willkomm, Wolfgang (2000): Klimagerechtes Bauen in Europa. Planungsinstrumente für klimagerechte, energiesparende Gebäudekonzepte in verschiedenen europäischen Klimazonen. Forschungsvorhaben der Fachhochschule Hamburg, Abschlussbericht.

Snyder, William H. (1981): Guideline for fluid modeling of atmospheric diffusion. Research Triangle Park, N.C.: Environmental Sciences Research Laboratory, Office of Research and Development, U.S. Environmental Protection Agency.

Specht, E. (2005): Der Mensch als wärmetechnisches System. Mess- und Regelungsmechanismus der Betriebstemperatur. Institut für Strömungstechnik und Wärmedynamik. Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg. Online verfügbar unter [http://www.uni-magdeburg.de/isut/TV/Download/Der\\_Mensch\\_als\\_waermetechnisches\\_System.pdf](http://www.uni-magdeburg.de/isut/TV/Download/Der_Mensch_als_waermetechnisches_System.pdf) zuletzt geprüft am 20.05.2014.

Tabula Webtool (2012): Tabula. Typology Approach for Building Stock Energy Assessment. Darmstadt: Institut für Wohnen und Umwelt. Online verfügbar unter: <http://webtool.building-typology.eu/webtool/tabula.html>, zuletzt geprüft am 20.05.2014

Technical Chamber of Greece (2010): T.O.T.E.E. 20701-3/2010, Technische Richtlinie über die Nutzung von Klimadaten für Berechnungen nach der KENAK (in griechischer Sprache).

The Weather Channel, Online verfügbar unter: <http://www.wunderground.com/>. Atlanta, USA. Zuletzt geprüft am 09.05.2012.

Theodoridou, I. (2012): Re-Polis\ retrofitting Polykatoikia. The case of Mediterranean urban housing typology. Dis-

sertation. Technische Universität Darmstadt. Thessaloniki Municipality, Geoportol Topography Department. Online verfügbar unter: <http://gis.thessaloniki.gr/> zuletzt geprüft am 18.02.2014.

Touliatos, P. (2001): The box framed entity and function of the structures: The importance of wood's role. In: *Restoration of Historic Buildings in Seismic Areas, Proceedings of International Seminar*, Lesvos Island, Greece, S. 98–114.

Tsakanika, E. (2000): The Application of Eurocode 5 and 8 in Modern and Historical Timber Structures. In: *Proceedings COST Action E 5, "Timber frame building systems. Seismic behavior of timber buildings. Timber construction in the new millennium*. Venice, Italy.

Tsakanika, Eleftheria; Mouzakis, Harris (2010): A Post-Byzantine Mansion in Athens. The Restoration Project of the Timber Structural Elements. In: *Proceedings of the World Conference on Timber Engineering*. Italy.

Tsikloudaki, Katerina (29.11.2010): Bauvorschriften in der Altstadt von Thessaloniki. Interview durch Sonja Schelbach. Thessaloniki.

Vacalopoulos, Apostolos E. (1972): A history of Thessaloniki. Thessaloniki: Institute for Balkan studies.

Verein Deutscher Ingenieure, Zentrum Ressourceneffizienz (VDI ZRE): Energieverbrauch & CO<sub>2</sub>-Emission. Online verfügbar unter: <http://www.ressource-deutschland.de/branchen/bauen/effizienz-in-der-daemmung/energieverbrauch-co2-emission/>, zuletzt geprüft am 11.04.2014.

Verein Deutscher Ingenieure (2000): VDI-Richtlinie: VDI 3783 Blatt 12 Umweltmeteorologie - Physikalische Modellierung von Strömungs- und Ausbreitungsvorgängen in der atmosphärischen Grenzschicht - Windkanalanwendungen. Düsseldorf: VDI-Verlag.

Vintzileou, E. (2008): Effect of Timber Ties on the Behavior of Historic Masonry. In: *Journal of Structural Engineering* 134(6), S. 961–972.

Vissilia, Anna-Maria (2009): Evaluation of a sustainable Greek vernacular settlement and its landscape: Architec-

tural typology and building physics. In: *Building and Environment* 44 (6), S. 1095–1106.

Vissilia, Anna-Maria; Villi, Maria (2010): Adobe and Timber Ties as Main Construction Materials for an Historic Greek Dwelling. In: *International Journal of Architectural Heritage* 4, S. 295–319.

Vitruvius (2009): Zehn Bücher über Architektur. Hg. v. Franz von Reber. Wiesbaden: Marixverl.

Vogt-Göknil, Ulya (1965): Osmanische Bauten: die Architektur der Türkei. Unter Mitarbeit von Jürgen Joedicke. München: Bruckmann.

Weber, Willi; Yannas, Simos (2014): Lessons from Vernacular Architecture. Oxon: Routledge.

Welzig, M. (2005): Bernard Rudofsky. Symposium zum 100. Geburtstag. In: *Bauwelt, Bd. 19*. Berlin: Bauverlag, S. 3.

Windtechnologische Gesellschaft WTG e.V. (1995): WTG-Merkblatt über Windkanalversuche in der Gebäudeaerodynamik. In: *Erich J. Plate (Hg.): Windprobleme in dichtbesiedelten Gebieten*. Aachen: WTG (WTG-Berichte, 3), S. 241–285.

Xenophon; Jaerisch, Peter (1977): Erinnerungen an Sokrates. Griechisch-deutsch. Studienausg. München: Heimeran Verlag.

Zygomalas, Dimitris (08.03.2011): Historische Gebäude in der Altstadt von Thessaloniki. Telefonat mit Sonja Schelbach. Thessaloniki - Hamburg.

# Abbildungsverzeichnis

Abb. 001. Wohnhaus in der Oberstadt von Thessaloniki (eigene Aufnahme 2013).....	2	Abb. 013. Kontrast zwischen Alt und Neu: Polykatoikia neben den Ausgrabungen des Forum Romanum in der Unterstadt von Thessaloniki (eigene Aufnahme, 2010).....	34	Abb. 023. CDH (Kühlgradstunden) und HDH (Heizgradstunden) bezogen auf eine Referenztemperatur von 26° bzw. 18°C für Thessaloniki (IWEK Klimadaten).....	43
Abb. 002. Aufbau und Struktur der Arbeit.....	16	Abb. 014. Typische Bebauung in der Oberstadt (aus: Anastasiadis, o.J.: Abb. 43).....	35	Abb. 024. Niederschläge in Thessaloniki (nach: Deutscher Wetterdienst).....	44
Abb. 003. Traditionelle Bebauung in der Oberstadt von Thessaloniki (Anastasiadis, o.J.: Abb. 24).....	25	Abb. 015. Plan der Oberstadt von Thessaloniki, das Gebiet wird im Süden begrenzt durch die Straße Olympiades und an den anderen Seiten durch den Verlauf der historischen Stadtmauer (nach: Thessaloniki Municipality).....	36	Abb. 025. Durchschnittliche Windgeschwindigkeit in m/s und Bandbreite pro Monat (IWEK Klimadaten, Darstellung mit Climate Consultant 5.4).....	44
Abb. 004. Traditionelle Bebauung in der Oberstadt von Thessaloniki (eigene Aufnahme, 2010).....	25	Abb. 016. Beispiele für die traditionelle Bebauung in der Oberstadt von Thessaloniki (eigene Aufnahmen, 2010, 2011 und 2013) ..	37	Abb. 026. Windgeschwindigkeiten für die Monate Juni, Juli und August nach Häufigkeit ihres Auftretens in h (IWEK Klimadaten).....	45
Abb. 005. Verbreitungsgebiet des osmanischen Hauses innerhalb des osmanischen Reiches: dunkelgraue Fläche (nach: Cerasi, 1998:129).....	26	Abb. 017. Durch umlaufende Bewehrung gegen Erdbebenschäden gesichertes Mauerwerk eines Wohnhauses in Vrastama, einem Dorf östlich von Thessaloniki (siehe Kapitel 2.7 Vergleichen- de Betrachtung, eigene Aufnahmen, 2013).....	38	Abb. 027. Windgeschwindigkeit im Zusammenhang mit der Lufttemperatur im Monat August (IWEK Klimadaten) ...	45
Abb. 006. Osmanisches Haus, beispielhafte Grundrisse. U-förmig (o.), langgezogen mit offenem hayat (m.) oder kreuzförmig (u.) (eigene Zeichnungen nach: Eldem, 1955: 110, 115, 111).....	27	Abb. 018. Bauholz Naturstein und Ziegel bei der Sanierung eines traditionellen Wohnhauses in der Oberstadt von Thessaloniki (eigene Aufnahmen, 2013).....	39	Abb. 028. Windprofil, Tagesverlauf (IWEK Klimadaten 01. bis 10. Juli).....	45
Abb. 007. Vertikale Teilung eines Gebäudes in Anatolien in eine Winterhälfte (rechts) mit kleinen Fenstern und eine Sommerhälfte (links) mit größeren Öffnungen (eigene Zeichnung nach: Küçükerman 1996:44).....	28	Abb. 019. Aufbau einer Wand im Obergeschoss eines Abbruchhauses in Thessaloniki (eigene Aufnahme, 2010).....	39	Abb. 029. Windgeschwindigkeit im Zusammenhang mit der Windrichtung im Monat August (IWEK Klimadaten).....	45
Abb. 009. Varianten der Raumaufteilung des Obergeschosses im symmetrischen Typ mit zentralem sofa (oben) und im Hayathaus (unten) (eigene Zeichnungen nach: Papaïōannou, 2003:88 und 97).....	29	Abb. 020. Üblicherweise verwendete Baumaterialien und ihre Kennwerte, für die Simulationen verwendete U-Werte (Wärmeleitfähigkeit und spez. Wärmekapazität aus: DIN EN 12524, Tab. 13, und DIN 4108, Teil 4, Tab 1, Bauteilaufbauten und Berechnungen der U-Werte mit dem U-Wert Manager 3.3, siehe Anhang).....	40	Abb. 030. Windprofil, Tagesverlauf über 10 Tage (12. bis 22. Februar im IWEK Klimadaten).....	46
Abb. 010. Blick über die Oberstadt Thessalonikis (zu erkennen an den roten Dachflächen) über die Innenstadt hinweg auf den Golf von Thermaikos, links im Bild sind Reste der Stadtmauer zu erkennen (eigene Aufnahme: 2013).....	31	Abb. 021. Ein Neubau ohne außenliegende Verschattungselemente erhält direkte solare Einstrahlung durch die transparenten Flächen der Fassade, daneben ein traditionelles Wohnhaus mit Verschattungselementen in der Oberstadt von Thessaloniki (eigene Aufnahme, 2013).....	41	Abb. 031. Windgeschwindigkeit im Zusammenhang mit der Temperatur im Monat Februar (IWEK Klimadaten).....	46
Abb. 011. Thessaloniki um 1430, die Bereiche nahe am Wasser sind sehr dicht bebaut, nach Norden hin und nahe der Stadtmauer ist die Bebauung aufgelockerter (aus: Anastasiadis 2012) ...	32	Abb. 022. Temperatur in Thessaloniki aus dem IWEK Klimadatenatz dargestellt mit Climate Consultant 5.4, grau hinterlegt der Komfortbereich nach dem adaptiven Komfortmodell aus dem ASHRAE Standard 55-2004.....	43	Abb. 032. Windgeschwindigkeit im Zusammenhang mit der Windrichtung im Monat Februar (IWEK Klimadaten) ...	46
Abb. 012. Der Innenstadtbereich Anfang des 20. Jahrh., innerhalb der ehemaligen Stadtmauer, gelb die Wohngebiete der jüdischen Bevölkerung, blau die christliche und rot die muslimischen Viertel, spätere Verdichtung entlang der Stadtmauer hellrot, schraffiert das Untersuchungsgebiet, schwarz umrandet das Areal, welches durch den großen Brand 1917 zerstört wurde (eigene Darstellung nach: Anastasiadis, 2012 und Thessaloniki Municipality).....	32			Abb. 033. Bewölkungsgrad in Thessaloniki von Januar bis Dezember (IWEK Klimadaten, Darstellung mit Climate Consultant 5.4).....	47
				Abb. 034. Solare Einstrahlung im Monatsdurchschnitt in Wh/m <sup>2</sup> pro h und Summe der Globalstrahlung im Tagesmittel in Wh/m <sup>2</sup> (IWEK Klimadaten).....	47
				Abb. 035. Nach DIN EN 15251:2012:25 empfohlene Auslegungswerte der Innenraumtemperatur.....	48
				Abb. 036. Psychometrisches Diagramm nach ASHRAE Standard 55-2005 using PMV, Darstellung durch Climate Consultant 5.4 (IWEK Klimadaten).....	49

Abb. 037. Wohnbebauung in Veria, massives Erdgeschoss, Obergeschoss in leichter Bauweise, in den Straßenraum ragende Erker (eigene Aufnahme, 2013) .....	51	Abb. 049. Anteil Energieverbrauch in toe (Tonne of oil equivalent) pro Haushalt im Vergleich zu anderen Ländern in Europa (aus: EEA 2009) .....	58	Abb. 059. Größenordnung des durch Temperaturdifferenz entstehenden Druckes in Abhängigkeit von der Höhendifferenz (nach: BS 5925-1991, Table 7).....	66
Abb. 038. Kaminzug an der Fassade eines Wohnhauses in Veria, Fenster mit zwei vertikal verschiebbaren Flügeln (eigene Aufnahme, 2013) .....	51	Abb. 050. Gebäudebestand in Griechenland nach Bauzeit in % (nach Balaras, 2007:1304) .....	58	Abb. 060. Größenordnung des durch Wind entstehenden Druckes in Abhängigkeit von dem Druckbeiwert $c_p$ (nach: BS 5925-1991, Table 7).....	67
Abb. 039. Wohnbebauung in Veria, dem Straßenverlauf folgend, im Erdgeschoss bewehrtes Natursteinmauerwerk ohne Fensteröffnungen (eigene Aufnahme, 2013) .....	51	Abb. 051. schematische Darstellung des üblichen Wandaufbaus einer Polykatoikia, Baujahr nach 1980. Wärmedämmung im Zwischenraum des Mauerwerks in den Ausfachungen des Stahlbetonskeletts, die auskragende Balkonplatte bildet eine Wärmebrücke (eigene Skizze) .....	59	Abb. 061. Zusammenspiel von temperatur- und windinduzierter freier Lüftung, A: sich ergänzend und B: entgegenwirkend (aus: Aiulfi, 1997:14).....	67
Abb. 040. Grundriss Erdgeschoss und Obergeschoss mit sechs Zimmern eines Wohnhauses in Arneia, Eckzimmer mit Erkern und Erweiterung des zentralen Raumes in den Straßenraum durch einen Balkon (aus: Arneia 1990:16) .....	52	Abb. 052. Nachträglich an der Fassade installierte Geräte zur Klimatisierung einzelner Räume in der Unterstadt von Thessaloniki (eigene Aufnahme, 2013) .....	59	Abb. 062. Aluminiummodell des Referenzgebäudes mit Erker mit Druckmesspunkten (Foto: Thomas Giordano, 2012).....	71
Abb. 041. Als satmas ausgebildete Außenwand (aus: Arneia 1990) .....	52	Abb. 053. Aufteilung in vier Klimazonen: Zone A (601–1100 HDD), Zone B (1101–1600 HDD), Zone C (1601–2200 HDD) und Zone D (2201–2620 HDD) (nach: KENAK:2010:5336 aus: Papagiannis, 2010:6).....	60	Abb. 063. Referenzgebäude, Grundrisse und Ansichten, Druckmesspunkte (grauer Punkt) und Bezeichnung der Sensoren (entsprechend der Bezeichnung der Gebäudeöffnungen) .....	72
Abb. 042. Wohnhäuser in Arneia mit Erkern ohne seitliche Fenster zum Ausblick in den Straßenraum (eigene Aufnahmen, 2013) .....	53	Abb. 054. Obere Grenzen für die U-Werte unterschiedlicher Bauteile, in 4 Klimazonen unterteilt (nach: KENAK, 2010:5337) .....	60	Abb. 064. Aufüstung der im Windkanal untersuchten Fälle für die umgebende Bebauung des Referenzgebäudes (grafische Darstellung im Anhang) .....	74
Abb. 043. Schwarzplan von Arneia, die Häuser stehen dicht aneinandergebaut (nach: Google Maps) .....	53	Abb. 055. Obere Grenzen der U-Werte für das gesamte Gebäude in 4 Klimazonen unterteilt (KENAK, 2010:5337).....	60	Abb. 065. Modelle auf der Drehscheibe im Windkanal und Anlaufstrecke (Foto: Thomas Giordano, 2012).....	74
Abb. 044. Wohnhäuser in Arneia mit Balkonen zum Straßenraum (eigene Aufnahme, 2013) .....	53	Abb. 056. Grenzwerte für den Primärenergiebedarf in kWh/m <sup>2</sup> a für die Effizienzklassen A bis G für Einfamilienhäuser (oben) und mehrstöckige Appartementhäuser, Klimaregionen A-D (KENAK, 2010:29) .....	61	Abb. 067. Grenzschicht - Windkanal des meteorologischen Institutes der Universität Hamburg (aus: B. Leitl; Schatzmann, 2005) .....	75
Abb. 045. Schwarzplan von Vrastama, freistehende Wohnhäuser einer ländlichen Dorfstruktur (nach: Google Maps) .....	54	Abb. 057. Einflussgrößen am Gebäude, die sich auf das Klima im Innenraum auswirken können, Reduktion auf untersuchte Faktoren und Methoden zur Untersuchung der jeweiligen Themen (x = mit der Methode untersucht / - = nicht untersucht).....	63	Abb. 066. Einbezogene Größen zur Berechnung des dimensionslosen Druckbeiwerts $c_p$ .....	75
Abb. 046. Haus 1, nach Süden orientierter Balkon als Erschließung des Obergeschosses, laubabwerfende Rankpflanzen zur Verschattung des Vorplatzes (eigene Aufnahme, 2013) .....	54	Abb. 058. Einflussgrößen in der Umgebung des Gebäudes, die sich auf das Klima im Innenraum auswirken können, Reduktion auf untersuchte Faktoren und Instrumente zur Untersuchung der jeweiligen Themen (x = mit der Methode untersucht / - = nicht untersucht).....	63	Abb. 068. Fortsetzung der Tabelle siehe nächste Seite .....	78
Abb. 047. Haus 2, massives Natursteinmauerwerk, durch Holzbalken bewehrt, Fenster ohne außenliegende Verschattungselemente (eigene Aufnahme, 2013) .....	55			Abb. 069. Messergebnisse von Messpunkt 3 (an der Frontseite des Gebäudes) mit gleitendem Durchschnitt über den Messzeitraum von 100 Sekunden, Mittelwert -2,46, STD 0,83 .....	80
Abb. 048. 2000 Jahre Baugeschichte: Blick vom Forum Romanum auf die Bebauung der Unterstadt (eigene Aufnahme 2010) .....	57			Abb. 070. Die Messergebnisse von Messpunkt 25, (an der Rückseite des Gebäudes) zeigen eine wesentlich höhere Streuung als an der Frontseite, Mittelwert 4,67, STD 1,40 .....	80
				Abb. 071. Mittelwert und Standardabweichung für alle Sensoren für eine Messung bei einer Anströmung von -150°, Fall 0.1.....	81

Abb. 072. Messergebnisse von Messpunkt 3 über den gesamten Messzeitraum, Darstellung der Ergebnisse normalverteilt .....	81	Abb. 084. Temperaturverlauf über ein Jahr (blaue Linie) des verwendeten Klimadatensatzes IWEC .....	92	Abb. 095. Grafische Darstellung des Vergleichs zwischen Fall 1.1 (mit Erker) und Fall 1.1x (ohne Erker) der im Windkanal gemessenen maximalen Druckdifferenzen zwischen zwei gegenüberliegenden Fenstern eines Raumes für Raum 1 .....	98
Abb. 073. Messergebnisse von Messpunkt 25, normalverteilt (wesentlich höhere Streuung) .....	81	Abb. 085. Darstellung der Wahrscheinlichkeit geöffneter Fenster im Jahresverlauf für Situation 1, Raum 1, nach Rijal und Humphreys .....	93	Abb. 094. Im Windkanal gemessene maximale Druckdifferenzen zwischen zwei gegenüberliegenden Fenstern eines Raumes für Fall 1.1 (mit Erker) und Fall 1.1x (ohne Erker) in einer dichten und kleinteiligen umgebenden Bebauung .....	98
Abb. 074. Messergebnisse von Sensoren 3 und 6 an der Frontseite des Gebäudes, 21 und 24 an den Erkerfenstern (untere Kurven), und 25 und 27 (blau und rot) an der Rückseite Ausschnitt der Messung von 48-54 Sekunden, gleitender Durchschnitt von je 6 Werten .....	82	Abb. 086. Raum 1, Luftwechselrate im Jahresverlauf im Tagesmittel unter Berücksichtigung der Wahrscheinlichkeit geöffneter Fenster, Referenzgebäude, Situation 1, Straßenfassade nach Südosten .....	93	Abb. 096. Grafische Darstellung des Vergleichs zwischen Fall 1.1 (mit Erker) und Fall 1.1x (ohne Erker) der im Windkanal gemessenen maximalen Druckdifferenzen zwischen zwei gegenüberliegenden Fenstern eines Raumes für Raum 2 .....	98
Abb. 075. Messergebnisse von Sensoren 3 und 6 an der Frontseite des Gebäudes, 21 und 24 an den Erkerfenstern (untere Kurven) und 25 und 27 (blau und rot) an der Rückseite, Ausschnitt der Messung von 06-12 Sekunden, gleitender Durchschnitt von je 6 Werten .....	82	Abb. 087. Berechnete LWR von Mai bis September im Tagesmittel unter Berücksichtigung der Wahrscheinlichkeit geöffneter Fenster für Raum 1 im Referenzgebäude, Situation 1, Straßenfassade nach Südosten .....	94	Abb. 097. Grafische Darstellung des Vergleichs zwischen Fall 1.1 (mit Erker) und Fall 1.1x (ohne Erker) der im Windkanal gemessenen maximalen Druckdifferenzen zwischen zwei gegenüberliegenden Fenstern eines Raumes für Raum 3 .....	98
Abb. 076. Klappläden mit verstellbaren Lamellen, li. geöffnet, re. geschlossen und offenbarem unteren Rahmen .....	89	Abb. 088. Berechnete LWR von Mai bis September im Tagesmittel unter Berücksichtigung der Wahrscheinlichkeit geöffneter Fenster für Raum 1 im Referenzgebäude, Situation 1, Straßenfassade nach Südwesten .....	94	Abb. 098. Typische Strömungen um ein freistehendes rechteckiges Gebäude bei frontaler Anströmung (aus: Dietze, 1987:58) .....	99
Abb. 077. Fenster mit typischen Klappläden in der Oberstadt von Thessaloniki (eigene Aufnahme, 2013) .....	89	Abb. 089. Berechnung der möglichen LWR bei Querlüftung in Raum 1 des Referenzgebäudes, <u>Situation 1</u> (je ein gegenüberliegendes Fenster und Klappläden geöffnet) bei unterschiedlichen Druckdifferenzen und Windgeschwindigkeiten .....	95	Abb. 099. Typische Strömungen um hintereinander stehende Bauwerke bei unterschiedlichen Abständen (aus: Plate, 1995:15) .....	99
Abb. 078. Fenster mit verschiebbaren Verschattungselementen (aus: AnoPolj, Moutsopoulos, 1979:39) .....	89	Abb. 090. Berechnung der möglichen LWR bei Querlüftung in Raum 1 des Referenzgebäudes, <u>Situation 2</u> (alle Fenster geöffnet, alle Klappläden geschlossen) bei unterschiedlichen Druckdifferenzen und Windgeschwindigkeiten .....	95	Abb. 100. Beispiel für die Darstellung von Strömungen im städtischen Raum im Windkanal (aus: KlimaCampus, 2011) .....	99
Abb. 079. Situation 1, Obergeschoss des Referenzgebäudes, je ein gegenüberliegendes Fenster pro Raum zur Lüftung geöffnet .....	90	Abb. 091. Berechnung der LWR bei Querlüftung in Raum 1 des Referenzgebäudes, Situation 1, bei höheren Druckdifferenzen .....	95	Abb. 101. Grafische Darstellung der im Windkanal gemessenen maximalen Druckdifferenzen zwischen zwei gegenüberliegenden Fenstern eines Raumes für die Räume 1, 2 und 3 im Fall 2.2 .....	100
Abb. 080. Situation 2, Obergeschoss des Referenzgebäudes, alle Fenster geöffnet, alle Klappläden geschlossen .....	90	Abb. 092. Ergebnis einer Simulation mit ENVI-met, Windgeschwindigkeiten dargestellt im Längs- und Querschnitt für den simulierten städtischen Raum von Fall 1.1 .....	96	Abb. 102. Im Windkanal gemessene maximale Druckdifferenzen zwischen zwei Fenstern eines Raumes für Fall 2.2 in einer kleinteiligen, etwas weniger dichten umgebenden Bebauung .....	100
Abb. 081. Stunden der operativen Temperatur im Obergeschoss des Referenzgebäudes bei unterschiedlichen Luftwechselraten .....	91	Abb. 093. Referenzgebäude und umgebende Bebauung für die Messung Fall 1.1, Aufsicht auf die Drehscheibe im Windkanal, Ansicht A-A und B-B .....	97	Abb. 103. Referenzgebäude und umgebende Bebauung für Fall 2.2, Aufsicht auf die Drehscheibe im Windkanal, Ansicht A-A und B-B .....	100
Abb. 082. Prozentsatz zufriedener Nutzer in Bezug auf die Luftwechselrate nach den Komfortkriterien der DIN 15251:2007-08 (durchgezogene Linie = Komfortklasse III, gestrichelt = Komfortklasse II) .....	92				
Abb. 083. Innenraumtemperaturen im Verhältnis zu den Außen-temperaturen im Referenzgebäude, Ergebnis der Simulation bei einer LWR von 7/h .....	92				



Abb. 104. Im Windkanal gemessene maximale Druckdifferenzen zwischen zwei gegenüberliegenden Fenstern eines Raumes für Fall 3.1 (mit Erker) und 3.1x (ohne Erker) in einer weniger dichten und heterogenen umgebenden Bebauung.....	101	Abb. 114. Klassisches griechisches Haus, Rekonstruktion nach Ausgrabungen in Priene mit einem Innenhof und Säulenportikus (aus: Rumscheid. 1998, Abb. 130).....	106	<u>in Ost-West-Orientierung, Straßenfassade nach Süden</u> , die Straßenfassade liegt während des betrachteten Zeitraums in der Sonne .....	113
Abb. 105. Referenzgebäude und umgebende Bebauung für Messung 3.1, Aufsicht auf die Drehscheibe im Windkanal, Ansichten A-A und B-B.....	101	Abb. 115. Historische Aufnahme der Oberstadt Thessalonikis um 1900, die Häuser sind in südliche Richtungen Süden orientiert (zum besseren Verständnis: die Fassade des Gebäudes im Vordergrund zeigt etwa nach SSW ) (aus: Moutsopoulos, 1979).....	108	Abb. 125. Ausrichtungen des Referenzgebäudes für die Simulationen unterschiedlicher Orientierungen.....	114
Abb. 106. Grafische Darstellung des Vergleichs zwischen Fall 3.1 (mit Erker) und Fall 3.1x (ohne Erker) der im Windkanal gemessenen maximalen Druckdifferenzen zwischen zwei gegenüberliegenden Fenstern eines Raumes für Raum 1.....	102	Abb. 116. Heizwärmebedarf für das Erdgeschoss des Referenzgebäudes für unterschiedliche Anteile an transparenter Fläche der Fassade mit Einfachverglasung .....	108	Abb. 126. Stunden pro Jahr der operativen Temperatur im Innenraum des Referenzgebäudes bei unterschiedlicher Orientierung des Gebäudes (0° bzw. 180° entsprechen einer Gebäudeachse in Ost-West Richtung, 90° bzw. -90° einer Nord-Süd Richtung).....	114
Abb. 107. Grafische Darstellung des Vergleichs zwischen Fall 3.1 (mit Erker) und Fall 3.1x (ohne Erker) der im Windkanal gemessenen maximalen Druckdifferenzen zwischen zwei gegenüberliegenden Fenstern eines Raumes für Raum 2.....	102	Abb. 117. Energiebilanz beim Vergleich unterschiedlicher Anteile transparenter Fläche an der Fassade, Referenzgebäude Erdgeschoss, Fenster mit Einfachverglasung $U_w = 4,4 \text{ W/m}^2\text{K}$ .....	109	Abb. 127. Temperaturverlauf außen und innen und Darstellung der solaren Gewinne im Obergeschoss des Referenzgebäudes bei einer <u>Orientierung in Nord - Süd Richtung</u> (Straßenfassade nach Westen) .....	115
Abb. 109. Im Windkanal gemessene maximale Druckdifferenzen zwischen zwei Fenstern eines Raumes für Fall 3.2 in einer weniger dichten, heterogenen umgebenden Bebauung .....	102	Abb. 118. Heizwärmebedarf für das Erdgeschoss des Referenzgebäudes, Variante B, je nach Verglasung .....	110	Abb. 128. Temperaturverlauf außen und innen und Darstellung der solaren Gewinne im Obergeschoss des Referenzgebäudes bei einer <u>Orientierung in Ost - West Richtung</u> (Straßenfassade nach Süden) .....	115
Abb. 108. Grafische Darstellung des Vergleichs zwischen Fall 3.1 (mit Erker) und Fall 3.1x (ohne Erker) der im Windkanal gemessenen maximalen Druckdifferenzen zwischen zwei gegenüberliegenden Fenstern eines Raumes für Raum 3.....	102	Abb. 119. Heizwärmebedarf für das Erdgeschoss des Referenzgebäudes, Variante D, je nach Verglasung .....	110	Abb. 130. Sonnenstudie: Schattenwurf auf die Straßenfassade am 30.06. um 10:00, 12:00 und um 15:00 Uhr, <u>Gebäudeachse in Nord-Süd-Orientierung, Straßenfassade nach Westen</u> , die Straßenfassade ist am Nachmittag gänzlich der Sonne exponiert.....	116
Abb. 111. Grafische Darstellung der im Windkanal gemessenen maximalen Druckdifferenzen zwischen zwei gegenüberliegenden Fenstern eines Raumes für die Räume 1, 2 und 3 im Fall 3.2.....	103	Abb. 120. Simulationsergebnis für die Energiebilanz für D1 - Erdgeschoss des gedämmten und luftdichten Referenzgebäudes im Januar, Fenster mit EV .....	111	Abb. 129. Sonnenstudie: Schattenwurf auf die Straßenfassade am 30.06. um 10:00, 12:00 und um 15:00 Uhr, <u>Gebäudeachse in Ost-West-Orientierung, Straßenfassade nach Süden</u> , die Straßenfassade ist den ganzen Tag über zu großen Teilen verschattet, das Obergeschoss liegt immer im Schatten, das Erdgeschoss wird durch den Erker zusätzlich verschattet .....	116
Abb. 110. Referenzgebäude und umgebende Bebauung für Messung 3.2, Aufsicht auf die Drehscheibe im Windkanal, Ansichten A-A und B-B.....	103	Abb. 121. Temperaturverlauf außen und innen und Darstellung der solaren Gewinne im Obergeschoss des Referenzgebäudes bei einer <u>Orientierung in Nord - Süd Richtung</u> (Straßenfassade nach Westen) .....	112	Abb. 131. Energieeintrag durch ein transparentes Bauteil, dieser ist abhängig vom Transmissions- und Reflexionsgrad des Materials.....	119
Abb. 112. Günstige Orientierung des Referenzgebäudes in der traditionellen Bebauung (Messung Fall 1.1) zur Ausnutzung des Windes für die natürliche Lüftung.....	105	Abb. 122. Temperaturverlauf außen und innen und Darstellung der solaren Gewinne im Obergeschoss des Referenzgebäudes bei einer <u>Orientierung in Ost - West Richtung</u> (Straßenfassade nach Süden) .....	112	Abb. 132. Liste der Baustoffe und ihrer Eigenschaften, bei mehreren Werten wurde für die Berechnung ein mittlerer Wert angenommen (in der Tabelle kursiv) .....	120
Abb. 113. Stadtplan der Nordstadt von Olynthos, genordet (eigene Zeichnung nach: Butti. 1980:6).....	106	Abb. 123. Sonnenstudie: Schattenwurf auf die Straßenfassade am 14.01. um 10:00, 12:00 und um 15:00 Uhr, <u>Gebäudeachse in Nord-Süd-Orientierung, Straßenfassade nach Westen</u> , die Straßenfassade liegt bis zum Nachmittag im Schatten.....	113		
		Abb. 124. Sonnenstudie: Schattenwurf auf die Straßenfassade am 14.01. um 10:00, 12:00 und um 15:00 Uhr, <u>Gebäudeachse</u>			



Abb. 133. Temperaturverlauf unterschiedlicher für Verschattungselemente verwendeter Materialien, $D = 10$ mm, durch solare Einstrahlung von $300 \text{ W/m}^2$ bei $25^\circ\text{C}$ Außentemperatur und fast ruhender Luft ( $v_{\text{Wind}} = 0,3 \text{ m/s}$ ) .....	121	DIN EN 14501 Anhang A Tab A.1 bis A.8, Kennwerte für die Verschattungen: PRIMERO Komfort).....	125	einem Tagesverlauf der Außentemperatur zwischen $20$ und $30^\circ\text{C}$ (nach: U-Wert Rechner) .....	134
Abb. 135. Temperaturverlauf in Metall- Bauteilen, $D = 10$ mm, durch solare Einstrahlung von $600 \text{ W/m}^2$ bei $25^\circ\text{C}$ Außentemperatur und $v_{\text{Wind}} = 0,3 \text{ m/s}$ .....	121	Abb. 144. Operative Raumlufttemperatur im Obergeschoss des Referenzgebäudes, Stunden pro Jahr, Vergleich unterschiedlicher Verschattung der Fenster mit Einfachverglasung.....	126	Abb. 154. Temperaturverlauf an der Oberfläche der Beton-Außenwand mit $10$ mm Außendämmung, $\text{WLG } 0,30$ , Tagesverlauf der Außentemperatur zwischen $20$ und $30^\circ\text{C}$ (nach: U-Wert Rechner).....	135
Abb. 134. Temperaturverlauf unterschiedlicher für Verschattungselemente verwendeter Materialien, $D = 10$ mm, durch solare Einstrahlung von $600 \text{ W/m}^2$ bei $25^\circ\text{C}$ Außentemperatur und fast ruhender Luft ( $v_{\text{Wind}} = 0,3 \text{ m/s}$ ) .....	121	Abb. 145. Darstellung der Wärmeeinträge durch solare Einstrahlung und durch interne Gewinne (Licht, Personen, Geräte) bei einer Verschattung mit Klappläden, geschlossen wenn die Sonne scheint.....	126	Abb. 155. Temperaturverlauf an der Oberfläche der Außenwand des Referenzgebäudes, Tagesverlauf der Außentemperatur zwischen $20$ und $30^\circ\text{C}$ (nach: U-Wert Rechner).....	135
Abb. 136. Temperaturverlauf in Holz-Bauteilen $D = 10$ mm, durch solare Einstrahlung von $600 \text{ W/m}^2$ bei $25^\circ\text{C}$ Außentemperatur und $v_{\text{Wind}} = 0,3 \text{ m/s}$ .....	121	Abb. 147. Wärmeeinträge durch solare Einstrahlung und durch interne Gewinne bei einer Verschattung der Fenster mit außenliegenden Rollläden bei a) EV, b) SSV und c) WSV.....	127	Abb. 156. Temperaturverlauf an der Oberfläche der Außenwand des Referenzgebäudes mit $10$ mm Außendämmung, $\text{WLG } 0,30$ , Tagesverlauf der Außentemperatur zwischen $20$ und $30^\circ\text{C}$ (nach: U-Wert Rechner) .....	135
Abb. 137. Temperaturverlauf im Bauteil bei gleichen Absorptions- und Emissionskoeffizienten und $10$ mm Bauteildicke durch solare Einstrahlung von $300 \text{ W/m}^2$ bei $25^\circ\text{C}$ .....	122	Abb. 146. Operative Raumlufttemperatur im Obergeschoss des Referenzgebäudes, Stunden pro Jahr, Vergleich unterschiedlicher Verschattung der Fenster mit Einfachverglasung ohne Einfluss der LWR.....	127	Abb. 157. Untersuchte Varianten mit der Gebäudesimulationssoftware PRIMERO Komfort zum Erfassen des Einflusses der Baumaterialien auf den sommerlichen Wärmeschutz, Variante 0 entspricht dem Referenzgebäude .....	136
Abb. 138. Temperaturverlauf im Bauteil aus Beton, $D = 20$ cm, durch solare Einstrahlung von $300 \text{ W/m}^2$ bei $25^\circ\text{C}$ Außentemperatur und $v_{\text{Wind}} = 0,3 \text{ m/s}$ .....	122	Abb. 149. Wärmeeinträge durch solare Einstrahlung und durch interne Gewinne bei einer Verschattung der Fenster mit innenliegenden metallbeschichteten Rollos bei a) EV, b) SSV und c) WSV .....	128	Abb. 158. Stundenzahl der operativen Raumlufttemperatur im Innenraum Obergeschoss des Referenzgebäudes pro Jahr, Vergleich unterschiedlicher Baumaterialien bei gleicher Kubatur, gleichen Verschattungselementen und einer LWR von $7/\text{h}$ .....	137
Abb. 139. Temperaturverlauf im Bauteil aus Beton, $D = 20$ cm, durch solare Einstrahlung von $300 \text{ W/m}^2$ bei $25^\circ\text{C}$ Außentemperatur und $v_{\text{Wind}} = 3 \text{ m/s}$ .....	122	Abb. 148. Einfluss der Verglasung auf die Innenraumtemperaturen in Kombination mit innenliegender Verschattung durch metallbeschichtete Rollos und außenliegender Verschattung durch Rollläden .....	128	Abb. 159. Stunden pro Jahr, für die bei einer LWR von $7/\text{h}$ im Obergeschoss des Referenzgebäudes die jeweilige Temperatur im Innenraum herrscht, Vergleich unterschiedlicher Dämmmaterialien bei einer Betonkonstruktion .....	138
Abb. 140. Temperaturverlauf im Bauteil aus Beton, $D = 10$ mm, durch solare Einstrahlung von $300 \text{ W/m}^2$ bei $25^\circ\text{C}$ Außentemperatur und $v_{\text{Wind}} = 3 \text{ m/s}$ .....	122	Abb. 150. Einfluss der Verglasung auf die Innenraumtemperaturen in Kombination mit einer Gardine als innenliegender Verschattung oder Markise als außenliegender Verschattung .....	129	Abb. 160. Stunden pro Jahr, für die bei einer LWR von $7/\text{h}$ im Obergeschoss des Referenzgebäudes die jeweilige Temperatur im Innenraum herrscht, Vergleich unterschiedlicher Dämmmaterialien ausgehend von den Baumaterialien der Variante 0.....	139
Abb. 141. In der traditionellen Bebauung der Oberstadt verwendete Klappläden mit beige Anstrich (eigene Aufnahme, 2013) .....	123	Abb. 151. Neubauten in der Oberstadt von Thessaloniki, Kubatur an die traditionelle Bebauung angelehnt aber Nutzung anderer Baustoffe (eigene Aufnahmen, 2010 und 2012).....	133	Abb. 161. Stunden pro Jahr, für die bei einer LWR von $7/\text{h}$ im Obergeschoss des Referenzgebäudes die jeweilige Temperatur im Innenraum herrscht, Einfluss der Masse als Speichermedium.....	139
Abb. 142. In der traditionellen Bebauung der Oberstadt verwendete Klappläden mit weißem Anstrich (eigene Aufnahme, 2013) .....	123	Abb. 152. Kennwerte zur Berechnung der Temperaturleitfähigkeit unterschiedlicher Baumaterialien .....	134	Abb. 162. Simulationsergebnisse bei Vergleich unterschiedlicher Baumaterialien: Temperaturverlauf der Außentemperatur (blau)	
Abb. 143. Simulierte Varianten der Verschattungselemente und Bedienung, Referenzgebäude mit einer Ausrichtung der Straßenfassade nach Süden (Kennwerte für die Verglasungen:		Abb. 153. Temperaturverlauf an der Oberfläche einer Beton-Außenwand (li.) und einer Wand aus Ziegelmauerwerk (re.) bei			

Lufttemperatur innen (rot) und Oberflächentemperatur innen (gelb) .....	140	Abb. 172.Exemplarisch ausgesuchte Räume in Gebäude A für die Untersuchung der Übertragbarkeit von Konzepten zur passiven Klimatisierung, die aus der traditionellen Bebauung der Oberstadt abgeleitet wurden .....	153	Abb. 185.Grundriss Raum B1 mit erhöhtem Lüftungspotential durch höhere Durchlässigkeit im Raum und zusätzlichen Fensterflügel.....	159
Abb. 163.Simulationsergebnisse für den Innenraum im Obergeschoss des Referenzgebäudes in traditioneller Bauweise a) als leichte Konstruktion und b) mit massivem Boden und massiver Decke, gelb = Oberflächentemperatur innen, rot = Lufttemperatur innen, blau = Außentemperatur .....	141	Abb. 171.Lage Gebäude A, grau = Apartmentblocks (nach: Thessaloniki Municipality).....	153	Abb. 186.Grundriss Raum B3 mit erhöhtem Lüftungspotential durch zusätzlichen Fensterflügel.....	159
Abb. 164.Auswirkungen von massiven Bauteilen auf den Heizwärmebedarf, Obergeschoss des Referenzgebäudes .....	141	Abb. 173.Lage Gebäude A, (nach: Hellenic Republic, Ministerium für Umwelt, Energie und Klimawandel, 2007-2009) .....	154	Abb. 187.Raum B1, Einfluss der Luftwechselrate auf die Temperaturen im Raum im Sommer .....	159
Abb. 165.Raumlufttemperatur im Obergeschoss des Referenzgebäudes mit ungedämmter Fassade bei unterschiedlichem Öffnen und Schließen der Fenster je nach Außentemperatur. ....	143	Abb. 174.Beispielgebäude A, Grundriss Geschosse 2-6, Lage der Räume A1, A2 und A3 (eigene Skizze) .....	154	Abb. 188.Raum B3, Einfluss der Luftwechselrate auf die Temperaturen im Raum im Sommer .....	159
Abb. 166.Raumlufttemperatur im Obergeschoss des Referenzgebäudes mit gedämmten Außenbauteilen bei unterschiedlichem Öffnen und Schließen der Fenster je nach Außentemperatur .....	143	Abb. 175.Beispielgebäude A, Schnitt, Lage der Räume A1, A2 und A3 (eigene Skizze).....	154	Abb. 189.Heizwärmebedarf Raum A2, Schlafzimmers im 6. OG bei unterschiedlicher Fenstergröße und unterschiedlicher Verglasung.....	160
Abb. 167.Temperaturverlauf im simulierten Raum des außen gedämmten Referenzgebäudes (V1a), Energieeinträge und -verluste durch Lüftung und solare Gewinne, oberes Diagramm: gelb = Oberflächentemperatur innen, pink = Lufttemperatur innen, blau = Außentemperatur; unteres Diagramm: orange = solare Einträge, gelb = Kunstlicht, schwarz = interne Gewinne, blau = natürliche Lüftung.....	144	Abb. 176.Exemplarisch ausgesuchte Räume in Gebäude B für die Untersuchung der Übertragbarkeit von Konzepten zur passiven Klimatisierung, die aus der traditionellen Bebauung der Oberstadt abgeleitet wurden .....	155	Abb. 190.Raum A2, Einfluss von Fenstergöße und Verglasung auf die Innenraumtemperaturen im Sommer.....	160
Abb. 168.Bewertung des Komforts im Sommer im Obergeschoss des Referenzgebäudes nach DIN 15251,Varianten zur LWR, Orientierung, Verschattung und Baumaterialien und mit verbesserten Außenbauteilen .....	146	Abb. 177.Beispielgebäude B, Grundriss 1. Geschoss Lage der Räume B1 und B2.....	156	Abb. 191.Raum A3, Heizwärmebedarf bei unterschiedlicher Fenstergröße und unterschiedlicher Verglasung.....	160
Abb. 169.Bebauung in der Innenstadt von Thessaloniki , das Straßenbild wird dominiert durch bis zu elfgeschossige Appartementshäuser mit Balkonen (eigene Aufnahmen, 2013) .....	149	Abb. 178.Beispielgebäude B, Grundriss 6. Geschoss Lage der Räume B3 und B4 .....	156	Abb. 192.Raum B4, Einfluss von Fenstergöße und Verglasung auf die Innenraumtemperaturen, LWR 1,5/h .....	161
Abb. 169.typische Bauteilaufbauten und U-Werte für die untersuchten Gebäude, Berechnung der Werte im Anhang.....	151	Abb. 179.Beispielgebäude B, Schnitt, Lage der Räume B2, B3 und B4 .....	156	Abb. 194.Raum B4, Heizwärmebedarf bei unterschiedlicher Fenstergröße und im Vergleich von EV und WSV .....	161
Abb. 170.Im Stadtgebiet verwendete Baumaterialien des gesamten Gebäudebestands in Griechenland in % (nach: Hellenic Republic, Ministry of Finance, 2010) .....	152	Abb. 180.Lage Gebäude B, (nach: Hellenic Republic, Ministerium für Umwelt, Energie und Klimawandel, 2007-2009) .....	156	Abb. 193.Raum B4, Einfluss von Fenstergöße und Verglasung auf die Innenraumtemperaturen, LWR 1,5/h (Fenster 0,35 m <sup>2</sup> ) und 3/h (Fenster 1,3m <sup>2</sup> ).....	161
		Abb. 181.Dachlandschaft in Thessaloniki mit Dachlüftern (eigene Aufnahme, 2013) .....	157	Abb. 195.Raum A1, Auswirkung unterschiedlicher Verschattungselemente auf die Raumlufttemperatur .....	162
		Abb. 182.Raum A1, Einfluss der Luftwechselrate auf die Temperaturen im Raum im Sommer .....	158	Abb. 197.Raum A2, Auswirkung unterschiedlicher Verschattungselemente auf die Raumlufttemperatur .....	162
		Abb. 183.Raum A2, Einfluss der Luftwechselrate auf die Temperaturen im Raum im Sommer .....	158	Abb. 196.Raum A1, Auswirkung unterschiedlicher Verschattungselemente auf die Raumlufttemperatur, <u>Außenwände gedämmt, 10 cm Wärmedämmung, WLG 045</u> .....	162
		Abb. 184.Raum A3, Einfluss der Luftwechselrate auf die Temperaturen im Raum im Sommer .....	158	Abb. 198.Raum B3, Auswirkung unterschiedlicher Verschattungselemente auf die Raumlufttemperatur .....	163

Abb. 199. Raum B3, Auswirkung unterschiedlicher Verschattungselemente auf die Raumlufttemperatur <u>mit gedämmter Dachfläche</u> .....	163	Abb. 212. Für die Räume in Gebäude A getestete Varianten für Maßnahmen zur passiven Klimatisierung.....	172	Santamouris (2001: 247ff) und Balaras (2007:1308), technische Maßnahmen wie z.B. das Austauschen veralteter Heizungsanlagen oder Solaranlagen wurden in dieser Aufstellung nicht mit erfasst.....	179
Abb. 200. Kumulierter Energieaufwand (Herstellung, Nutzung und Beseitigung) und CO <sub>2</sub> - Emission unterschiedlicher Dämmmaterialien für eine Außendämmung unter Putz, U = 0,15 W/m <sup>2</sup> K (nach: VDI ZRE, 2014) .....	164	Abb. 213. Bauteilaufbauten für die simulierten Maßnahmen zur Verbesserung von Energieeffizienz und Komfort in Beispielgebäude A .....	173	Abb. 225. (Fortsetzung von S. 180f) Auflistung von weiteren Empfehlungen zum klimaangepassten Bauen aus Climate Consultant 5.4 und Santamouris (2001: 247ff) mit Kommentaren auf Grundlage der Ergebnisse dieser Arbeit .....	181
Abb. 201. Raum A1, Einfluss unterschiedlicher Dämmstärken einer Außendämmung (WLG 045) auf die Innenraumtemperaturen.....	165	Abb. 214. Mindestanforderungen an mehrgeschossige Wohngebäude (KENAK, 2010).....	173	Abb. 226. Entwickelte Methode zum Ableiten von Konzepten zur passiven Klimatisierung und die Anwendung für energetische Sanierungen und zum Bau klimaangepasster und energieeffizienter Gebäude.....	185
Abb. 202. Raum A1, Heizwärmebedarf bei unterschiedlichen Dämmstärken einer Außendämmung (WLG 045).....	165	Abb. 215. Raum A1, Auswirkung unterschiedlicher Konzepte zur passiven Klimatisierung auf den sommerlichen Wärmeschutz und den Heizwärmebedarf .....	174		
Abb. 203. Raum A2, Einfluss unterschiedlicher Varianten einer Dämmung der Fassade auf die Innenraumtemperaturen bei einer LWR von 1,5/h.....	165	Abb. 216. Raum A2, Auswirkung unterschiedlicher Konzepte zur passiven Klimatisierung auf den sommerlichen Wärmeschutz und den Heizwärmebedarf .....	174		
Abb. 204. Raum A2, Einfluss unterschiedlicher Varianten zur Dämmung der Fassade auf die Innenraumtemperaturen bei einer LWR von 3/h.....	166	Abb. 217. Raum A3, Auswirkung unterschiedlicher Konzepte zur passiven Klimatisierung auf den sommerlichen Wärmeschutz und den Heizwärmebedarf .....	174		
Abb. 205. Heizwärmebedarf für Raum A2 bei unterschiedlichen Dämmstärken einer Außendämmung (WLG 045).....	166	Abb. 218. Bauteilaufbauten für die simulierten Maßnahmen zur Verbesserung der Energieeffizienz und des Komforts, Beispielgebäude B.....	175		
Abb. 206. Raum B1, Einfluss unterschiedlicher Dämmstärken einer Außendämmung auf die Innenraumtemperaturen bei einer LWR von 1,5/h.....	167	Abb. 219. Für die Räume in Gebäude B getestete Varianten für Maßnahmen zur passiven Klimatisierung.....	175		
Abb. 207. Raum B1, Einfluss unterschiedlicher Dämmstärken einer Außendämmung auf die Innenraumtemperaturen bei einer LWR von 3/h.....	167	Abb. 220. Raum B1, Auswirkung unterschiedlicher Konzepte zur passiven Klimatisierung auf den sommerlichen Wärmeschutz und den Heizwärmebedarf .....	176		
Abb. 208. Raum B1, Vergleich des Temperaturverlaufs bei unterschiedlichen Konzepten zur Wärmedämmung und Lüftung....	168	Abb. 222. Raum B3, Auswirkung unterschiedlicher Konzepte zur passiven Klimatisierung auf den sommerlichen Wärmeschutz und den Heizwärmebedarf .....	176		
Abb. 209. Raum B1, Heizwärmebedarf bei unterschiedlichen Varianten der Wärmedämmung (WLG 045).....	169	Abb. 221. Raum B2, Auswirkung unterschiedlicher Konzepte zur passiven Klimatisierung auf den sommerlichen Wärmeschutz und den Heizwärmebedarf .....	176		
Abb. 210. Raum B3, Heizwärmebedarf bei unterschiedlichen Varianten der Wärmedämmung (WLG 045).....	169	Abb. 223. Raum B4, Auswirkung unterschiedlicher Konzepte zur passiven Klimatisierung auf den sommerlichen Wärmeschutz und den Heizwärmebedarf .....	176		
Abb. 211. Raum B3, Einfluss unterschiedlicher Dämmstärken einer Außendämmung bei einer LWR von 3/h.....	170	Abb. 224. (Fortsetzung von Seite 180) Auflistung von Empfehlungen zum klimaangepassten Bauen, Climate Consultant 5.4,			

Abb. 227. Messung der scheinbaren Masse des in Wasser getauchten Probekörpers (Ziegel)..... III	Abb. 245. Feron / Zakynton.....X	Abb. 263. Stunden operativer Raumlufttemperatur im Innenraum des Referenzgebäudes, Obergeschoss, pro Jahr, Vergleich unterschiedlicher Baumaterialien bei gleicher Kubatur, gleichen Verschattungselementen und einer LWR von 3/h ..... XXXVIII
Abb. 228. Putzproben zur Untersuchung im Röntgendiffraktometer..... III	Abb. 246. Ermittlung der drei Kategorien einer umgebenden Bebauung für die Messungen im Windkanal, Abstände zwischen den Gebäuden..... XI	Abb. 264. Nutzungsprofil Wohnraum.....XXXIX
Abb. 229. Atterberg Zylinder, Untersuchung einer Putzprobe.... IV	Abb. 247. Ermittlung der drei Kategorien einer umgebenden Bebauung für die Messungen im Windkanal, Anzahl unterschiedlicher Gebäudetypen ..... XII	Abb. 265. Nutzungsprofil Küche.....XXXIX
Abb. 231. Auszählung der Fotodokumentation zum Öffnen und Schließen der Fenster und Verschattungselemente - Raktivan . V	Abb. 248. umgebende Bebauung Fall 1.1 ..... XIII	Abb. 266. Nutzungsprofil Schlafzimmer .....XL
Abb. 230. Auszählung der Fotodokumentation zum Öffnen und Schließen der Fenster und Verschattungselemente - Theofilos. V	Abb. 249. umgebende Bebauung Fall 2.1 ..... XIII	
Abb. 232. Windverhältnisse in Thessaloniki im Tagesverlauf, März bis Mai, Tagsüber (7:00 - 15:00 Uhr), Abends (18:00-23:00 Uhr) und Nachts (3:00 bis 6:00 Uhr) IWEC Datensatz..... VI	Abb. 250. umgebende Bebauung Fall 2.2.....XIV	
Abb. 233. Windverhältnisse in Thessaloniki im Tagesverlauf, Juni-August, Tagsüber (7:00 - 15:00 Uhr), Abends (18:00-23:00 Uhr) und Nachts (3:00 bis 6:00 Uhr) IWEC Datensatz..... VI	Abb. 251. umgebende Bebauung Fall 2.3.....XIV	
Abb. 234. Windverhältnisse in Thessaloniki im Tagesverlauf, Sept-Nov, Tagsüber (7:00 - 15:00 Uhr), Abends (18:00-23:00 Uhr) und Nachts (3:00 bis 6:00 Uhr) IWEC Datensatz..... VII	Abb. 253. umgebende Bebauung Fall 2.4.....XV	
Abb. 235. Windverhältnisse in Thessaloniki im Tagesverlauf, Dez-Feb, Tagsüber (7:00 - 15:00 Uhr), Abends (18:00-23:00 Uhr) und Nachts (3:00 bis 6:00 Uhr) IWEC Datensatz..... VII	Abb. 252. umgebende Bebauung Fall 3.1 .....XV	
Abb. 236. Lage und Bezeichnung der Drucksensoren ..... VIII	Abb. 255. umgebende Bebauung Fall 3.2 .....XVI	
Abb. 237. Alexandras Papadopoulou / Isminis..... IX	Abb. 254. umgebende Bebauung Fall 3.3.....XVI	
Abb. 238. Potidaias / Chideftou ..... IX	Abb. 256. umgebende Bebauung Fall 3.4..... XVII	
Abb. 239. Moreos / Amfitryonos .....IX	Abb. 257. Durchschnittlicher Druck an der Fassade, Ergebnisse aus den Messungen ohne umgebende Bebauung ..... XVIII	
Abb. 240. Pileos / Dimitriou Poliorkito .....X	Abb. 258. Nutzungsprofil - Wohnraum .....XIX	
Abb. 241. Vlatadon / Ypsilantou .....X	Abb. 259. Außenbauteile des Referenzgebäudes..... XX	
Abb. 242. Nikomachou / Areos.....X	Abb. 260. Referenzgebäude, Verschattungen in der Fensterebene .....XXI	
Abb. 243. Athinas / Irodou .....X	Abb. 261. Druckdifferenzen zwischen den gegenüberliegenden Druckmesspunkten am Referenzgebäude für alle gemessenen Windrichtungen, Fall 1.1 (Referenzgebäude mit Erker) und 1.1x (ohne Erker) .....XXXIII	
Abb. 244. Moreos / Akropoleos .....X	Abb. 262. Druckdifferenzen zwischen den gegenüberliegenden Druckmesspunkten am Referenzgebäude für alle gemessenen Windrichtungen, Fall 3.1 (Referenzgebäude mit Erker) und 3.1x (ohne Erker) ..... XXXV	

# Formelverzeichnis

	Seite
$c_p = (p_{\text{stat, i}} - p_u) / p_{\text{dyn}}$	(1) 75
$p_{\text{dyn}} = (\rho / 2 u_8)^2$	(2) 75
$p^* = p / \rho / 2 v^2$	(3) 77
$m_w = c_d * A_w * v_r * (\Delta c_p)^{0,5}$	(4) 93
$v_r = K * z^a * v_f$	(5) 93
$\text{Log} \{p/(1-p)\} = 0,171 T_g + 0,166 T_{\text{ao-i}} - 6,4$	(6) 93
$\text{LWR} = 3600 * m_w / A_{\text{Raum}}$	(7) 95
$\alpha_c = 2,8 + 3 * v$	(8) 119
$T = T_u + (l * \alpha_s) / \alpha * (1 - e - (\alpha / (\rho * d * c)) * t)$	(9) 119
$\alpha_s = \epsilon_s * \epsilon$	(10) 119
$\alpha = \alpha_c + \alpha_s$	(11) 119
$\alpha = \lambda / \rho * c$	(12) 135
$m_{\text{dry,s}} * \rho_w 1000 / m_{\text{sat,s}} - m_{\text{w,s}}$	(13) III



# EIDESSTÄTTLICHE ERKLÄRUNG

Ich erkläre hiermit an Eides Statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbständig sowie ohne unzulässige Hilfe Dritter und ohne Benutzung anderer als der angegebenen Hilfsmittel angefertigt habe. Die aus anderen Quellen direkt oder indirekt übernommenen Daten und Konzepte sind unter Angabe der Quelle gekennzeichnet.

Bei der Auswahl und Auswertung folgenden Materials haben mir die nachstehend aufgeführten Personen in der jeweils beschriebenen Weise entgeltlich/unentgeltlich geholfen:

1. Thomas Giordano, Student aus den USA, als unentgeltlicher Praktikant in Hamburg an der HafenCity Universität beschäftigt vom 04.06. bis 10.08.2012. Er führte in diesem Zeitraum die Messungen im Winkanal durch.
2. Nadine Wicknig, Jens Eidenberg, Mitarbeiter des Baustoffprüflabors der HafenCity Universität unterstützten die Untersuchung der Baumaterialien
3. Clemens Braun, Student der HafenCity Universität, hat im Juni und Juli 2014 als studentische Hilfskraft excel Grafiken mit Simulationsergebnissen formatiert.

Weitere Personen waren an der inhaltlich materiellen Erstellung der vorliegenden Arbeit nicht beteiligt. Insbesondere habe ich hierfür nicht die entgeltliche Hilfe von Vermittlungs bzw. Beratungsdiensten (Promotionsberater oder anderer Personen) in Anspruch

genommen. Niemand hat von mir unmittelbar oder mittelbar geldwerte Leistungen für Arbeiten erhalten, die im Zusammenhang mit dem Inhalt der vorgelegten Dissertation stehen.

Die Arbeit wurde bisher weder im In noch im Ausland in gleicher oder ähnlicher Form einer anderen Prüfungsbehörde vorgelegt.

Ich versichere an Eides Statt, dass ich nach bestem Wissen die reine Wahrheit gesagt und nichts verschwiegen habe.

Vor Aufnahme der obigen Versicherung an Eides Statt wurde ich über die Bedeutung der eidesstattlichen Versicherung und die strafrechtlichen Folgen einer unrichtigen oder unvollständigen eidesstattlichen Versicherung belehrt.

.....  
(Ort, Datum) (Unterschrift)

Unterschrift des die Versicherung an Eides Statt aufnehmenden Beamten:

.....  
(Ort, Datum) (Unterschrift)

Anhang

# INHALTSVERZEICHNIS ANHANG

I.	Anhang zu Kapitel 2	III
I.I	Laboruntersuchungen.....	III
I.II	Nutzerbefragung.....	IV
I.III	Auszählung der Fenster.....	V
I.IV	Analyse der Windverhältnisse in Thessaloniki.....	VI
II.	Anhang zu Kapitel 4	VIII
II.I	Druckmesspunkte am Referenzgebäude .....	VIII
II.II	Ermittlung der drei Kategorien .....	IX
II.III	Analyse der umgebenden Bebauung .....	XI
II.IV	Varianten für die umgebende Bebauung .....	XIII
II.V	Einordnung der im Versuch ermittelten $c_p$ Werte in die vorliegenden Tabellenwerte ....	XVIII
III.	Anhang zu Kapitel 5	XIX
III.I	Rahmenbedingungen der Simulationen .....	XIX
III.II	Für die Simulationen verwendete Bauteilaufbauten und U-Werte .....	XXII
III.III	Ergebnisse der Messungen im Windkanal Vergleich Referenzgebäude mit und ohne Erker .....	XXXIII
III.IV	Berechnung LWR nach BS 5925-1991....	XXXVII
III.V	Berechnung der LWR bei einem gekippten Fenster .....	XXXVII
III.VI	Grafiken aus Kapitel 5.4 .....	XXXVIII
IV.	Anhang zu Kapitel 6	XXXIX
IV.I	Rahmenbedingungen der Simulationen ...	XXXIX
IV.II	Für die Simulationen verwendete Bauteilaufbauten und U-Werte .....	XLI

# I. Anhang zu Kapitel 2

## I.I Laboruntersuchungen

◇ Bestimmung der Rohdichte der Ziegel nach DIN EN 772-4



Abb. 227. Messung der scheinbaren Masse des in Wasser getauchten Probekörpers (Ziegel)

$$\text{Rohdichte} = m_{\text{dry,s}} \cdot \rho_w \cdot 1000 / (m_{\text{sat,s}} - m_{\text{w,s}}) \quad (13)$$

mit:  $m_{\text{dry,s}}$  Masse des trockenen Probekörpers in Gramm;  $m_{\text{sat,s}}$  Masse des gesättigten Probekörpers in Gramm;  $m_{\text{w,s}}$  scheinbare Masse des in Wasser getauchten Probekörpers in Gramm;  $V_b$  Volumen mit Poren in  $\text{mm}^3$ ; und  $\rho_w$  Dichte des Wassers in  $\text{kg}/\text{m}^3$

Probe 1:

$$m_{\text{dry,s}} = 396,6 \text{ g}$$
$$m_{\text{sat,s}} = 477,1 \text{ g}$$

$$V_b = 196,051 \text{ g}$$
$$m_{\text{w,s}} = 211,2 \text{ g}$$
$$\rho_w = 0,998 \text{ g / ml}$$

$$396,6 \text{ g} \cdot 0,998 \text{ g / ml} \cdot 1000 / 477,1 \text{ g} - 211,2 \text{ g} =$$
$$\underline{1489 \text{ kg / m}^3}$$

Probe 2:

$$m_{\text{dry,s}} = 354,3 \text{ g}$$
$$m_{\text{sat,s}} = 421,4 \text{ g}$$
$$V_b = 168,126 \text{ g}$$
$$m_{\text{w,s}} = 186,1 \text{ g}$$
$$\rho_w = 0,998 \text{ g / ml}$$

$$354,3 \text{ g} \cdot 0,998 \text{ g / ml} \cdot 1000 / 421,4 \text{ g} - 186,1 \text{ g} =$$
$$\underline{1503 \text{ kg / m}^3}$$

◇ Bestimmung der Rohdichte des Natursteins nach DIN EN 772-4

Eine Probe Grünschiefer, entnommen einer Ruine am 08.05.2012, wurde im Baustoffprüflabor der HafenCity Universität untersucht.

Probe:

$$m_{\text{dry,s}} = 200,9 \text{ g}$$
$$m_{\text{sat,s}} = 205,0 \text{ g}$$
$$V_b = 50,142 \text{ g}$$
$$m_{\text{w,s}} = 128,9 \text{ g}$$
$$\rho_w = 0,998 \text{ g / ml}$$

$$200,9 \text{ g} \cdot 0,998 \text{ g / ml} \cdot 1000 / 205,0 \text{ g} - 128,9 \text{ g} =$$
$$\underline{2635 \text{ kg / m}^3}$$

◇ Materialbestimmung der Putzprobe

Proben vom Putz der Außenwände, entnommen einer Bauruine am 08.05.2012, wurden im Baustoffprüflabor der HafenCity Universität am 28.06.2012 untersucht. Dokumentation der Untersuchung im Röntgendiffraktometer:

Ein kleiner Teil der Probe wurde leicht zerkleinert. Drei Proben wurden für das Röntgendiffraktometer vorbereitet:

Probe 1: unveränderte Probe

Probe 2: einzelne rote Steinstückchen aus der vorhandenen Probe

Probe 3: ein kleines weißes Stück aus der vorhandenen Probe



Abb. 228. Putzproben zur Untersuchung im Röntgendiffraktometer

Ergebnisse:

Die Untersuchung im Röntgendiffraktometer kann folgende Bestandteile nachweisen:

1: Quarz, Kalk und weitere Minerale wie z.B. Feldspat, 2: Ziegel, 3: Kalkstücke

Weitere Untersuchung im Baustoffprüflabor der HafenCity Universität am 04.07.2012:

Zwei Proben werden von der Menge entnommen und in das Untersuchungsgefäß gefüllt.

Probe 1: Atterberg Zylinder, 37,33 g, wird auf 100 ml mit aquadest aufgefüllt und kräftig geschüttelt. Danach setzen sich unten die festen Teile ab. Nach



Abb. 229. Atterberg Zylinder, Untersuchung einer Putzprobe

Abdekantieren des Wassers, Trocknen im Trockenschrank bei 60 °C.

Probe 2: wird in ein Weithalsglas gegeben

Probe 2.1 (zum Vergleich): das Material wird vorher grob zerkleinert, danach gleiches Vorgehen wie 2. Nach Abdekantieren des Wassers, Trocknen im Trockenschrank bei 60 °C

Anteile aus dem abdekantierten Wasser wurden zusätzlich mit dem Röntgendiffraktometer untersucht. Es ist mit diesem Verfahren nicht 100%ig sicher darzustellen, ob es sich in der Putzprobe um Tonminerale handelt. Die Ergebnisse der Untersuchungen, die Erscheinung der Substanz, das Vorhandensein von Stroh als Zuschlagsstoff und die üblicherweise verwendeten Baumaterialien lassen aber darauf schließen, dass es sich bei dem Putz um einen Lehmputz mit Kalkanteilen handelt, welcher als weiteren Zuschlagstoff Ziegelbruchstücke enthält.

◇ Dichtebestimmung der Putzprobe  
Putzprobe entnommen am 08.05.2012  
Untersuchung am 09.08.12

$$\begin{aligned} m_{\text{dry,s}} &= 163,85 \text{ g} \\ V_b &= 85,05 \text{ mm}^3 \\ m_{\text{w,s}} &= 78,80 \text{ g} \\ \text{Rohdichte} &= 163,85 \text{ g} / 85,05 \text{ mm}^3 \\ &= 1,926 \text{ g/mm}^3 \\ &= \underline{1926 \text{ kg/m}^3} \end{aligned}$$

## I.II Nutzerbefragung

Fragen an Bewohnerinnen von Häusern in der Oberstadt von Thessaloniki am 07.05.2012 zwischen 17:00 und 20:00,

- A How long have you been living here?
- B Do you have air-conditioning?
- C Do you use your rooms differently in winter or in summer?
- E When do you open or close your windows?
- F Are you satisfied with the thermal comfort of your house?

Übersetzung ins deutsche:

- A Wie lange wohnen Sie schon hier?
- B Haben Sie eine Klimaanlage?
- C Unterscheidet sich die Nutzung der Räume im Sommer und Winter?
- E Wann öffnen und schließen Sie Ihre Fenster?
- F Sind Sie zufrieden mit dem thermischen Komfort in Ihren Räumen?

Insgesamt wurden 10 Gespräche mit Männern und Frauen unterschiedlicher Altersklassen zwischen Mitte 20 und Mitte 70 geführt.



### I.III Auszählung der Fenster

Fotodokumentation der Gebäude in der Straße Raktivan, Thessaloniki ab der Straße Olympiados (südliche Grenze der Oberstadt) bis zum nördlichen Ende (etwa 200 m) vom 05.05. bis 09.05.2012. Bei

der Auszählung wurden jeweils ca. 150 Fenster erfasst. Eine der Aufnahmen erfolgte spät abends, hier sind wegen der schlechten Lichtverhältnisse nur 109 Fenster erfasst worden.

		Fensterzählung, Raktivan, Thessaloniki, Mai 2012																											
		Sa 05.05.12 um 15:30				So 06.05.12 um 11:00				So 06.05.12 um 18:30				Mo 07.05.12 um 06:00				Mo 07.05.12 um 21:30				Di 08.05.12 um 10:30				Mi 09.05.12 um 07:30 Uhr			
		Wetter				Wetter				Wetter				Wetter				Wetter				Wetter							
		28°C, 30% rel. L., WNW 3,1				24°C, 34 %, NW, 4,6 m/s				28°C, 25 %, SW 3,1 m/s				13°C, 67 %, O 2,1 m/s				27°C, 32 %, S 4,1 m/s				23°C, 50 %, W 2,1 m/s				17°C, 72 %, O 2,1 m/s			
		Summe	davon mit AC	davon mit Sonne	davon mit beidem	Summe	davon mit AC	davon mit Sonne	davon mit beidem	Summe	davon mit AC	davon mit Sonne	davon mit beidem	Summe	davon mit AC	davon mit Sonne	davon mit beidem	Summe	davon mit AC	davon mit Sonne	davon mit beidem	Summe	davon mit AC	davon mit Sonne	davon mit beidem	Summe	davon mit AC	davon mit Sonne	davon mit beidem
Summe Läden zu		151	22	55	3	144	9	58	4	169	24	35	5	153	7	0	0	109	23	0	0	170	25	53	0	153	25	5	0
in %		87	10	36	2	84	2	37	2	107	12	24	3	105	3	0	0	72	17	0	0	96	13	37	0	93	14	5	0
Summe Läden auf Fenster zu		57,6	45,5	41,4	2,3	58	2,4	64	2,4	63	11	69	2,8	69	2,9	0	0	66	74	0	0	56	52	70	0	61	15	100	0
in %		58	10	18	1	50	4	15	1	50	10	10	2	44	3	0	0	31	5	0	0	69	11	15	0	54	10	0	0
Summe Läden auf Fenster auf		38,4	45,5	31	1,7	35	8	26	2	30	20	29	4	29	6,8	0	0	28	22	0	0	41	44	28	0	35	19	0	0
in %		6	2	1	0	10	3	6	1	12	2	1	0	4	1	0	0	6	1	0	0	5	1	1	0	6	1	0	0
		3,97	9,09	16,7	0	6,9	30	10	10	7,1	17	2,9	0	2,6	25	0	0	5,5	4,3	0	0	2,9	4	1,9	0	3,9	17	0	0

Abb. 231. Auszählung der Fotodokumentation zum Öffnen und Schließen der Fenster und Verschattungselemente - Raktivan

		Fensterzählung, Theofilou Thessaloniki, Mai 2012					
		Di 08. Mai 11:00			Mi 09. Mai 08:00		
		Wetter			Wetter		
		26°C, 39 %, WNW 3,6 m/s			28°C, 28%, W 3,6 m/s		
		18°C, 68 %, OSO 2,6 m/s					
Klappläden zu	Klappläden auf Fenster zu	Klappläden auf Fenster auf	Klappläden zu	Klappläden auf Fenster zu	Klappläden auf Fenster auf	Klappläden zu	Klappläden auf Fenster zu
21	39	2	30	39	1	51	30
1	4	0	3	10	0	4	4
							0 Summe
							0 davon mit Sonne auf dem Fenster

Abb. 230. Auszählung der Fotodokumentation zum Öffnen und Schließen der Fenster und Verschattungselemente - Theofilos

Die Fenster mit Klappläden wurden ausgezählt und nach folgenden Kriterien eingeordnet:

- Klappläden geschlossen
  - Fenster geschlossen / Klappläden geöffnet
  - Fenster geöffnet
  - Sonne scheint auf das Fenster
  - Der Raum hat eine Klimaanlage
- Als vergleichendes Beispiel wurden Gebäude in der Straße Theofilos zu folgenden Zeiten fotografiert. (Klimadaten nach: The Weather Channel, 2012)

## I.IV Analyse der Windverhältnisse in Thessaloniki

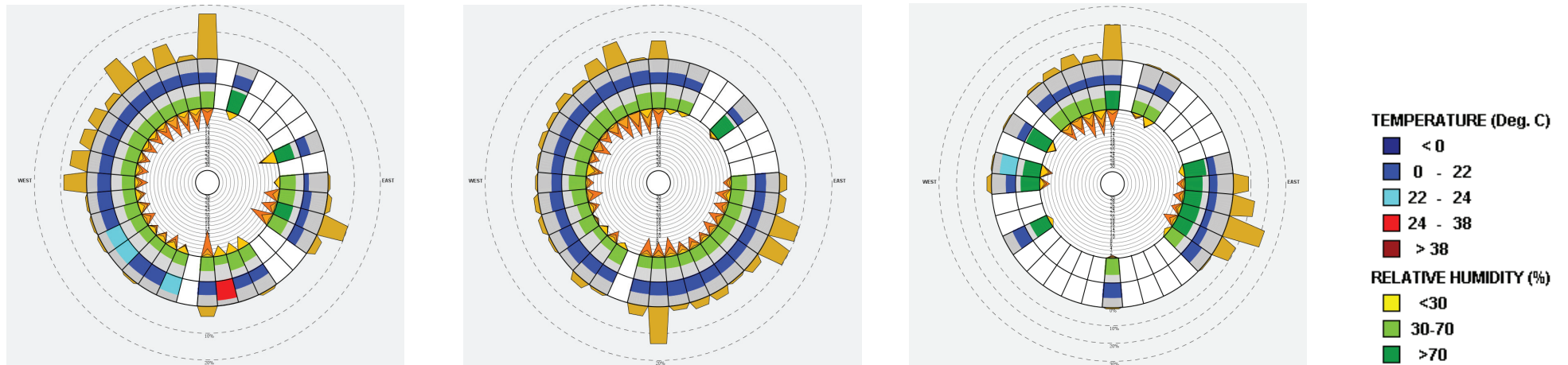


Abb. 232. Windverhältnisse in Thessaloniki im Tagesverlauf, März bis Mai, Tagsüber (7:00 - 15:00 Uhr), Abends (18:00-23:00 Uhr) und Nachts (3:00 bis 6:00 Uhr) IWEK Datensatz

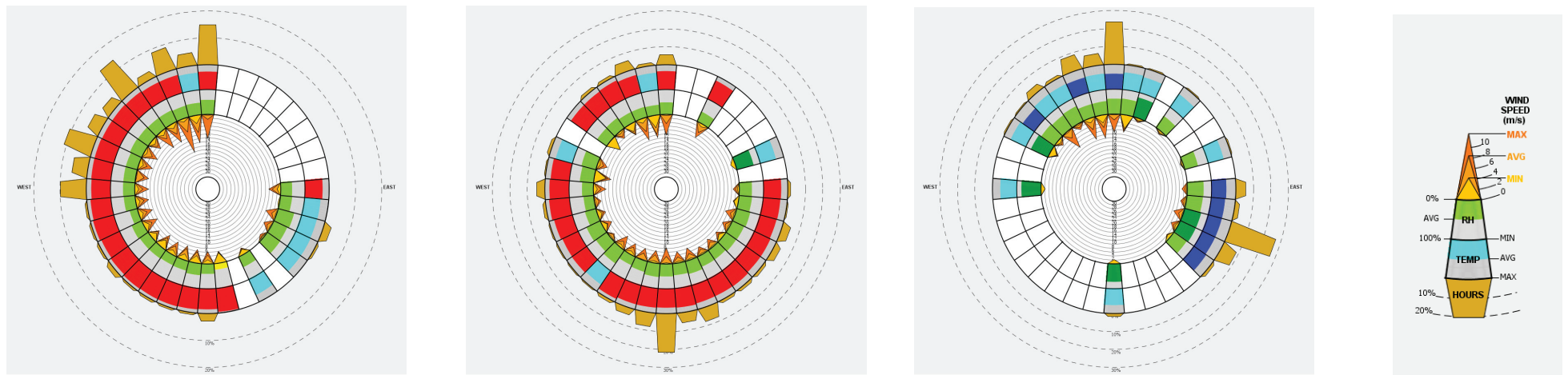


Abb. 233. Windverhältnisse in Thessaloniki im Tagesverlauf, Juni-August, Tagsüber (7:00 - 15:00 Uhr), Abends (18:00-23:00 Uhr) und Nachts (3:00 bis 6:00 Uhr) IWEK Datensatz

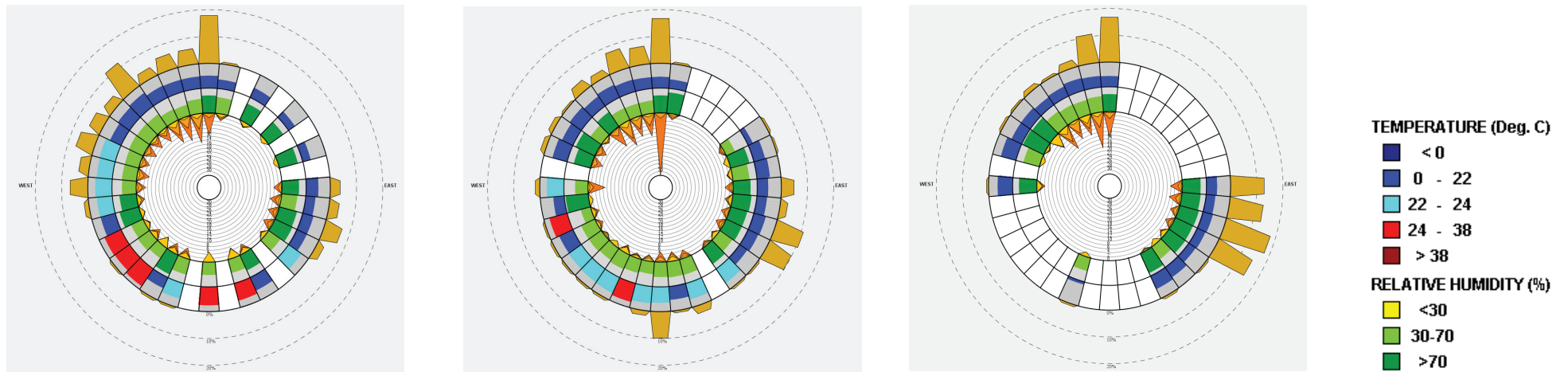


Abb. 234. Windverhältnisse in Thessaloniki im Tagesverlauf, Sept-Nov, Tagsüber (7:00 - 15:00 Uhr), Abends (18:00-23:00 Uhr) und Nachts (3:00 bis 6:00 Uhr) IWECC Datensatz

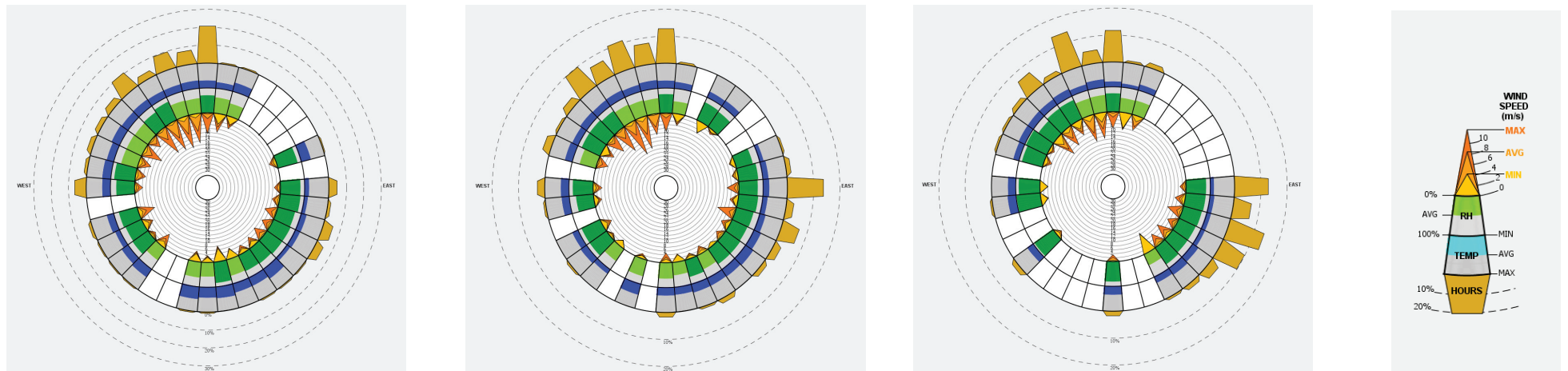


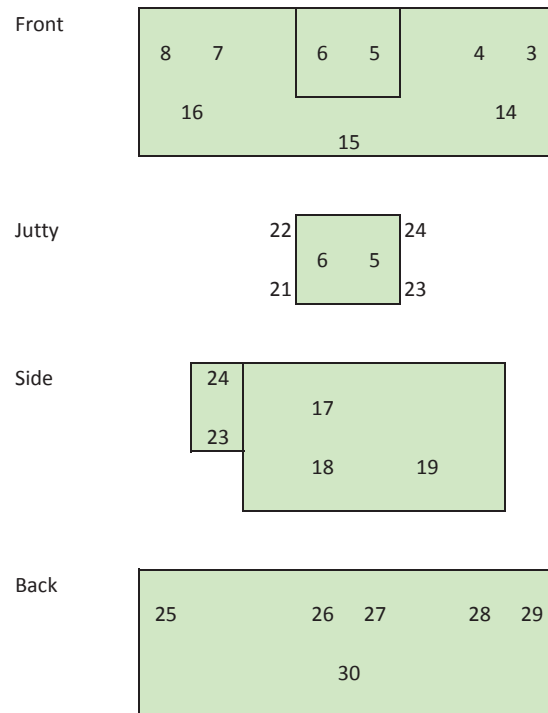
Abb. 235. Windverhältnisse in Thessaloniki im Tagesverlauf, Dez-Feb, Tagsüber (7:00 - 15:00 Uhr), Abends (18:00-23:00 Uhr) und Nachts (3:00 bis 6:00 Uhr) IWECC Datensatz

## II. Anhang zu Kapitel 4

### II.1 Druckmesspunkte am Referenzgebäude

Lage der Druckmesspunkte am Referenzgebäude bei den Messungen im Windkanal. Dargestellt ist das Referenzgebäude mit Erker. Beim Vergleichsgebäude ohne Erker sind die Messpunkte 21 bis 24 nicht vorhanden.

#### Scanner Map (By Tap )



#### Scanner Map (By Name)

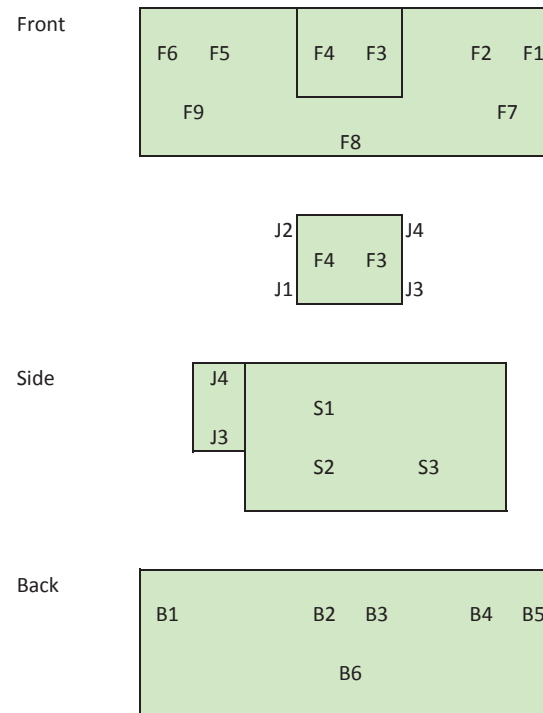


Abb. 236. Lage und Bezeichnung der Drucksensoren



## II.II Ermittlung der drei Kategorien

Für die Festlegung der drei Kategorien einer umgebenden Bebauung wurde eine Analyse der Oberstadt vorgenommen. Erfasst wurden für beispielhaft ausgewählte Areale die Breite der Straßen, die Anzahl der Gebäude insgesamt, die Anzahl der jeweiligen Gebäudetypen, die Größe der Plätze. Die Varianten in Straßenbreite, Dichte, Gebäudetypen, Plätze, Lage des Untersuchungsgebäudes an der Straße oder im Block wurden in 3 Kategorien einer umgebenden Bebauung mit Untergruppen als Varianten dargestellt.

◇ Darstellung der Areale in der Oberstadt



Abb. 238. Alexandras Papadopoulou / Isminis



Abb. 239. Potidaias / Chideftou



Abb. 237. Moreos / Amfitryonos





Abb. 240. Pileos / Dimitriou Poliorkitou

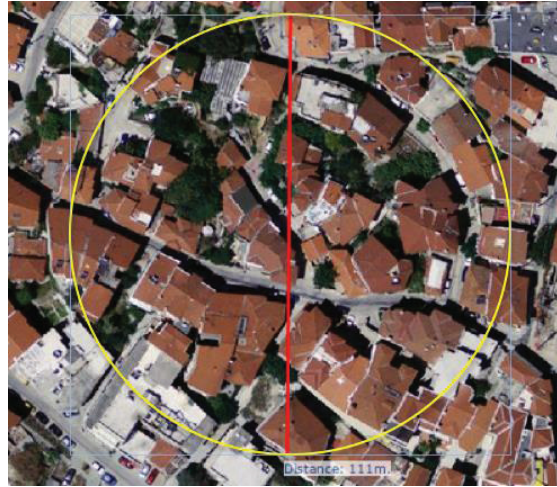


Abb. 241. Nikomachou / Areos



Abb. 242. Moreos / Akropoleos



Abb. 243. Vlatadon / Ypsilantou



Abb. 244. Athinas / Irodotou



Abb. 245. Feron / Zakynton

## II.III Analyse der umgebenden Bebauung

Type 1	Example	Coordinates		Elevation [m]	Crossroads	Block Dimensions [m]		Block Area [m <sup>2</sup> ]
		N	E			Long Side	Short Side	
1.A	40°38'37" 22°56'45"	70	Alexandras Papadopoulou	31,0	23,0	713,0		
				74,2	23,0	1706,6		
				88,5	48,5	4292,3		
1.B	40°38'28" 22°57'27"	129	Potidaias	32,2	31,4	1011,1		
			Chaideftou	92,7	13,9	1288,5		
				105,6	33,8	3569,3		
1.C	40°38'18" 22°57'20"	68	Moreos	35,0	29,0	1015,0		
			Amfitryonos	45,8	27,3	1250,3		
				57,3	31,0	1776,3		
<b>Average</b>				62,5	29,0	1846,9		

Type 1	Building Spacing [m]					Empty Lot Dimensions		Empty Lot Area [m <sup>2</sup> ]
	Adjacent		Opposite			Long Side	Short Side	
Type 1	2,4	3,0	3,2	5,6	3,0	11,1	7,0	77,7
	2,3	4,0	4,0	4,0	4,2	14,2	11,0	156,2
	2,4	4,0	5,0	5,6	6,0	17,7	14,3	253,1
	2,0	2,4	3,2	4,2	3,2	5,8	3,6	20,9
	2,0	2,4	3,2	4,0	5,4	13,6	7,2	97,9
	2,0	2,2	4,5	4,6	8,6	13,0	11,7	152,1
	2,0	2,4	3,2	3,6	4,6	8,6	5,0	43,0
	2,4	3,2	3,6	4,6	5,2	7,1	6,4	45,4
	2,3	2,4	3,8	3,8	6,6	12,2	9,2	112,2
	<b>Average</b>		3,3		5,2	11,5	8,4	106,5

Type 2	Example	Coordinates		Elevation [m]	Crossroads	Block Dimensions [m]		Block Area [m <sup>2</sup> ]
		N	E			Long Side	Short Side	
2.A	40°38'34" 22°56'55"	85	Pileos	21,8	9,2	200,56		
			Dimitriou Poliorkitou	56,8	35,9	1019,6		
				52,8	51,4	2713,9		
2.B	40°38'33" 22°57'01"	96	Nikomachou	26,5	16,6	439,9		
			Areos	35,5	17,1	607,1		
				58,9	33,1	1949,6		
2.C	40°38'24" 22°57'18"	92	Moreos	14,1	36,2	510,4		
			Akropoleos	22,4	52,7	1180,5		
				65,3	47,1	3075,6		
<b>Average</b>				39,3	33,3	1299,7		

Type 2	Building Spacing [m]					Empty Lot Dimensions		Empty Lot Area [m <sup>2</sup> ]
	Adjacent		Opposite			Long Side	Short Side	
Type 2	2,0	3,2	4,2	4,6	4,2	17,9	8,5	152,2
	2,6	3,2	4,6	6,8	5,4	18,7	23,1	216,0
	2,0	3,0	5,0	6,5	9,0	20,0	15,1	302,0
	2,0	2,4	3,0	5,2	5,2	8,9	11,4	101,5
	3,2	3,6	4,0	4,6	8,2	13,5	10,8	145,8
	2,0	3,8	4,0	5,5	9,4	17,5	11,4	199,5
	2,0	2,4	5,0	5,2	4,6	16,6	12,8	212,5
	2,0	3,2	5,2	6,5	10,2	21,4	10,1	216,1
	2,4	3,0	5,0	7,0	18,0	50,4	42,3	2131,9
	<b>Average</b>		3,9		8,2	16,8	12,9	193,2

Type 3	Example	Coordinates		Elevation [m]	Crossroads	Block Dimensions [m]		Block Area [m <sup>2</sup> ]
		N	E			Long Side	Short Side	
3.A	40°38'23" 22°57'13"	80	Theofrastou	28,3	20,8	588,6		
			Kalliopis	38,3	23,4	896,2		
				76,0	15,1	1147,6		
3.B	40°38'16" 22°57'17"	63	Athinas	29,1	20,5	596,6		
			Irodotou	33,3	19,9	662,7		
				76,6	30,5	2336,3		
3.C	40°38'41" 22°57'00"	103	Feron	22,8	11,3	257,6		
			Zakynthou	44,8	36,8	1648,6		
				50,9	44,8	2280,3		
<b>Average</b>				44,5	24,8	1157,2		

Type 3	Building Spacing [m]					Empty Lot Dimensions		Empty Lot Area [m <sup>2</sup> ]
	Adjacent		Opposite			Long Side	Short Side	
Type 3	2,0	2,0	2,4	3,2	6,0	13,4	7,1	95,1
	2,4	3,2	3,8	5,2	6,7	13,6	9,2	125,1
	3,0	3,2	4,0	6,0	7,8	21,6	16,2	175,0
	2,4	3,0	3,8	5,2	2,2	12,0	5,6	67,2
	2,0	3,2	3,8	5,2	3,8	18,5	12,2	225,7
	2,0	3,2	3,2	5,2	8,2	16,3	14,9	242,9
	2,2	2,4	3,2	3,8	4,6	16,1	9,2	148,1
	2,8	3,2	4,6	6,1	9,4	13,0	10,0	130,0
	2,2	3,2	3,8	5,0	10,6	22,2	13,0	288,6
	<b>Average</b>		3,5		6,6	16,3	10,8	166,4

Abb. 246. Ermittlung der drei Kategorien einer umgebenden Bebauung für die Messungen im Windkanal, Abstände zwischen den Gebäuden

Type 1	Sheds	Small Old Buildings	Large Old Buildings	Largest Sloped	Small Flat Buildings	Medium Flat Short	Medium Flat Tall	Large Flat Buildings	Total Buildings	Blocks	% Packed	% Spread	Buildings Per Block
	7	27	4	4	3	0	0	0	45	7	0,6	0,4	6,4
	3	43	1	2	6	4	0	0	59	6	0,8	0,2	9,8
	4	40	3	3	2	3	0	0	55	7	0,7	0,3	7,9
4,7	36,7	2,7	3,0	3,7	2,3	0,0	0,0	53,0	6,7	0,7	0,3	8,0	

Type 2	Sheds	Small Old Buildings	Large Old Buildings	Largest Sloped	Small Flat Buildings	Medium Flat Short	Medium Flat Tall	Large Flat Buildings	Total Buildings	Blocks	% Packed	% Spread	Buildings Per Block
	3	30	1	3	2	0	0	0	39	7	0,6	0,4	5,6
	2	36	2	2	1	1	0	1	45	9	0,4	0,6	5,0
	2	28	2	2	4	1	0	0	39	6	0,3	0,7	6,5
2,3	31,3	1,7	2,3	2,3	0,7	0,0	0,3	41,0	7,3	0,4	0,6	5,7	

Type 3	Sheds	Small Old Buildings	Large Old Buildings	Largest Sloped	Small Flat Buildings	Medium Flat Short	Medium Flat Tall	Large Flat Buildings	Total Buildings	Blocks	% Packed	% Spread	Buildings Per Block
	2	20	5	3	5	3	1	2	41	6	0,8	0,2	6,8
	3	31	1	2	8	3	2	1	51	6	0,8	0,2	8,5
	11	23	1	1	11	2	2	0	51	7	0,6	0,4	7,3
5,3	24,7	2,3	2,0	8,0	2,7	1,7	1,0	47,7	6,3	0,7	0,3	7,5	

Abb. 247. Ermittlung der drei Kategorien einer umgebenden Bebauung für die Messungen im Windkanal, Anzahl unterschiedlicher Gebäudetypen

II.IV Varianten für die umgebende  
Bebauung

Die Abbildungen zeigen alle Varianten der umge-  
benden Bebauung, die für die Messungen im Wind-  
kanal auf der Drehscheibe aufgestellt wurden.

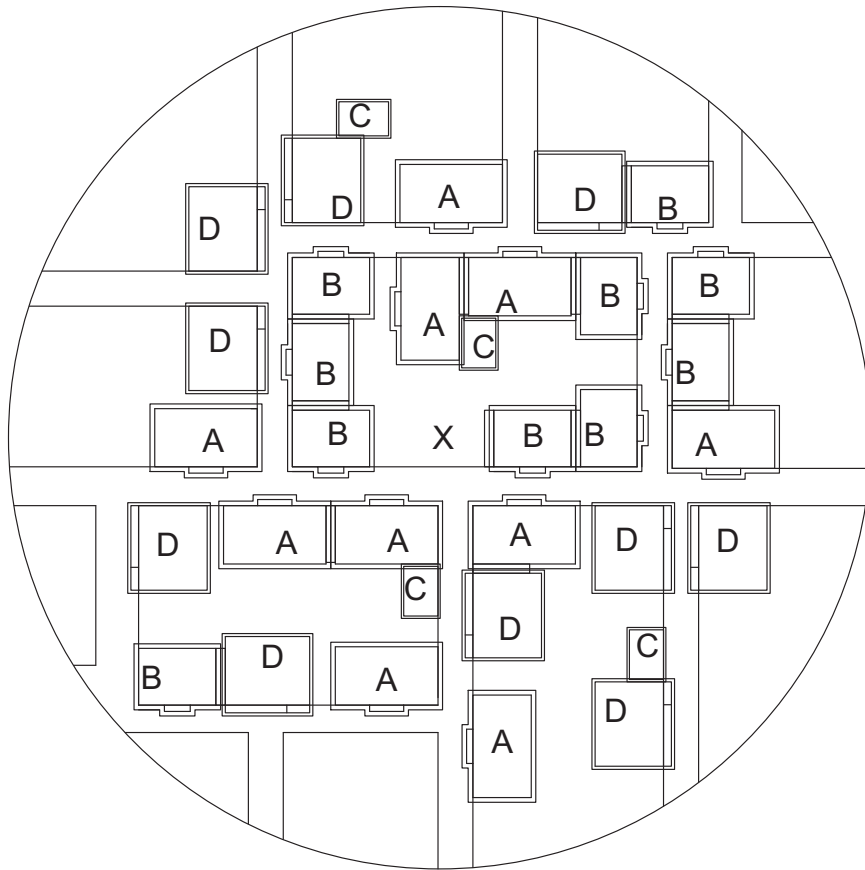


Abb. 248. umgebende Bebauung Fall 1.1

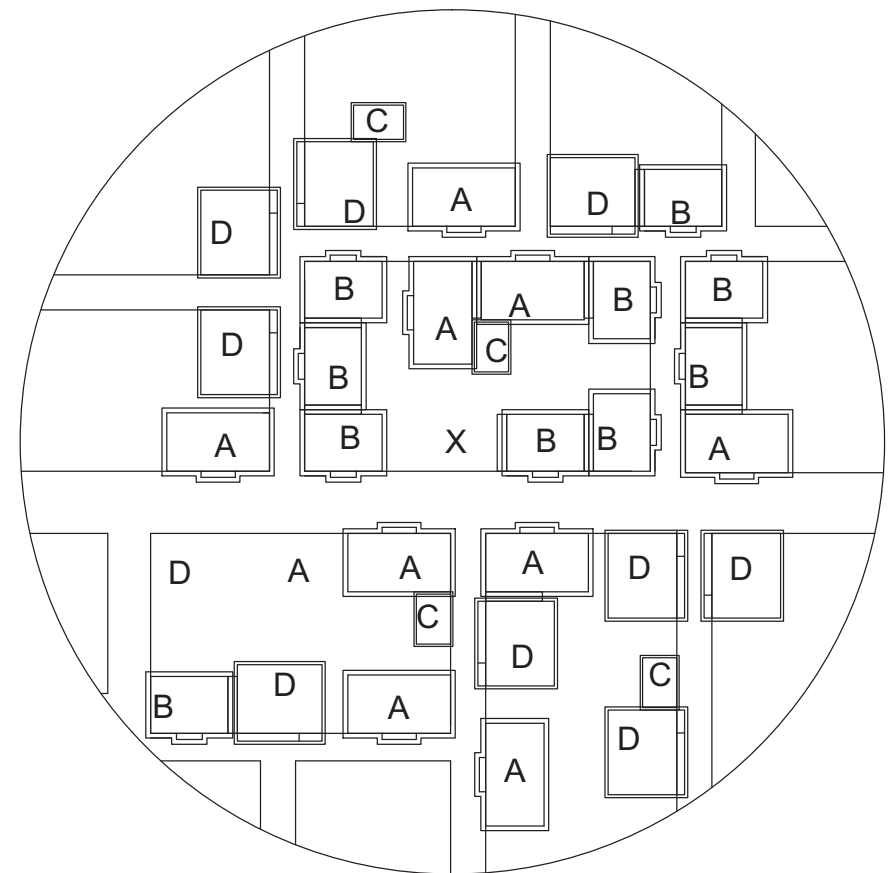


Abb. 249. umgebende Bebauung Fall 2.1

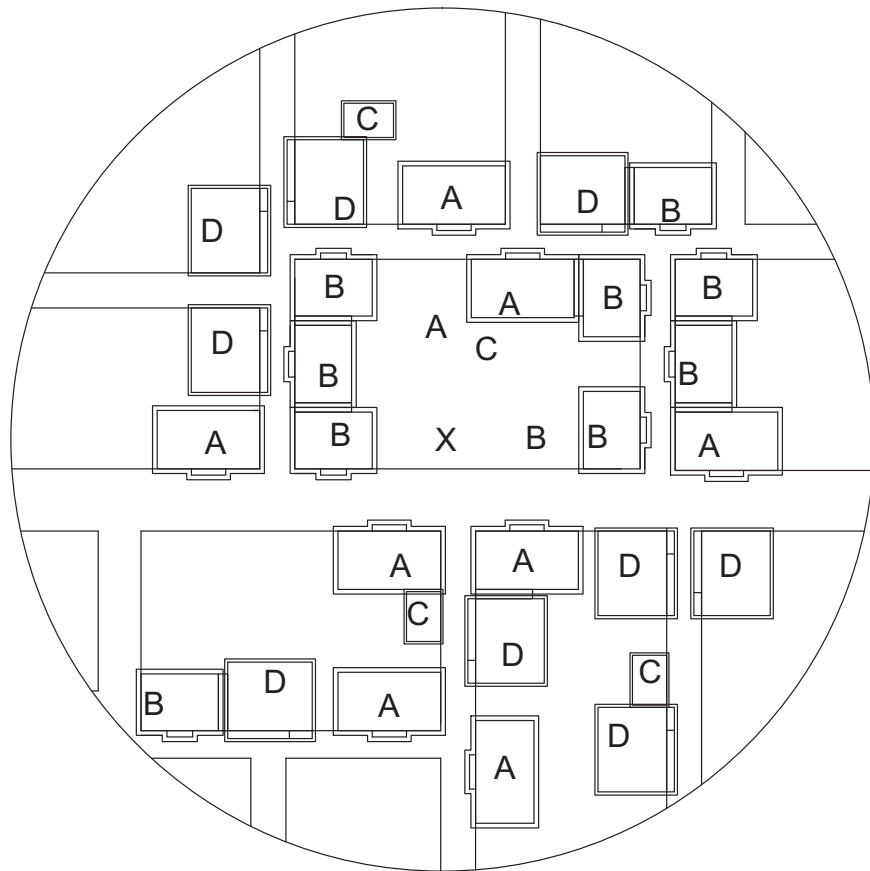


Abb. 250. umgebende Bebauung Fall 2.2

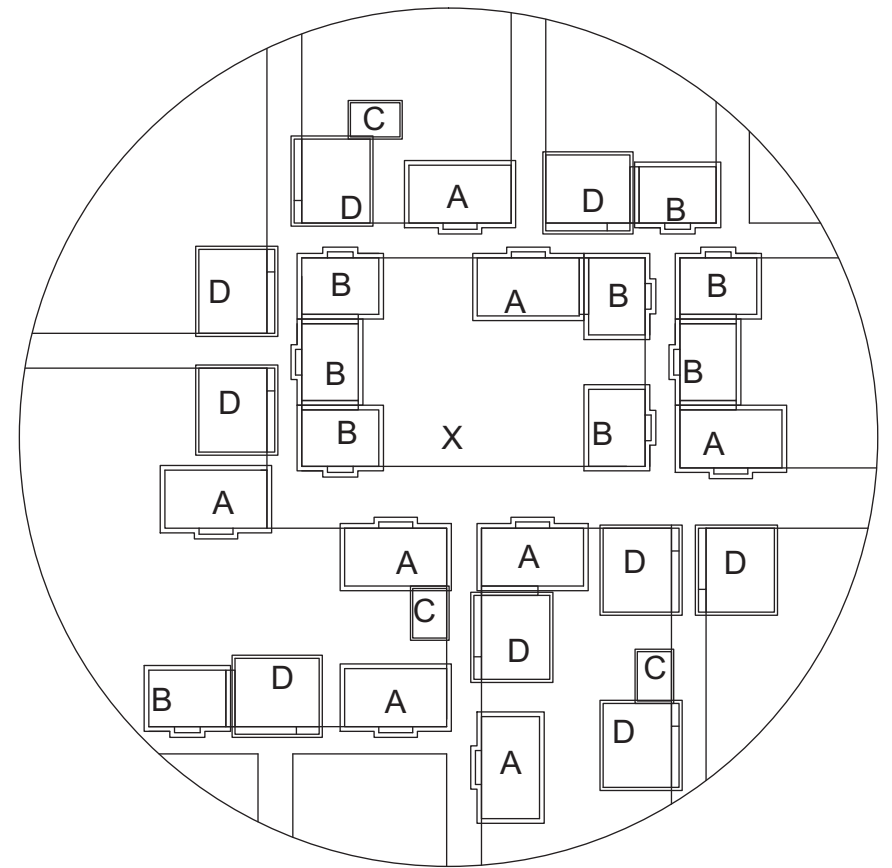


Abb. 251. umgebende Bebauung Fall 2.3



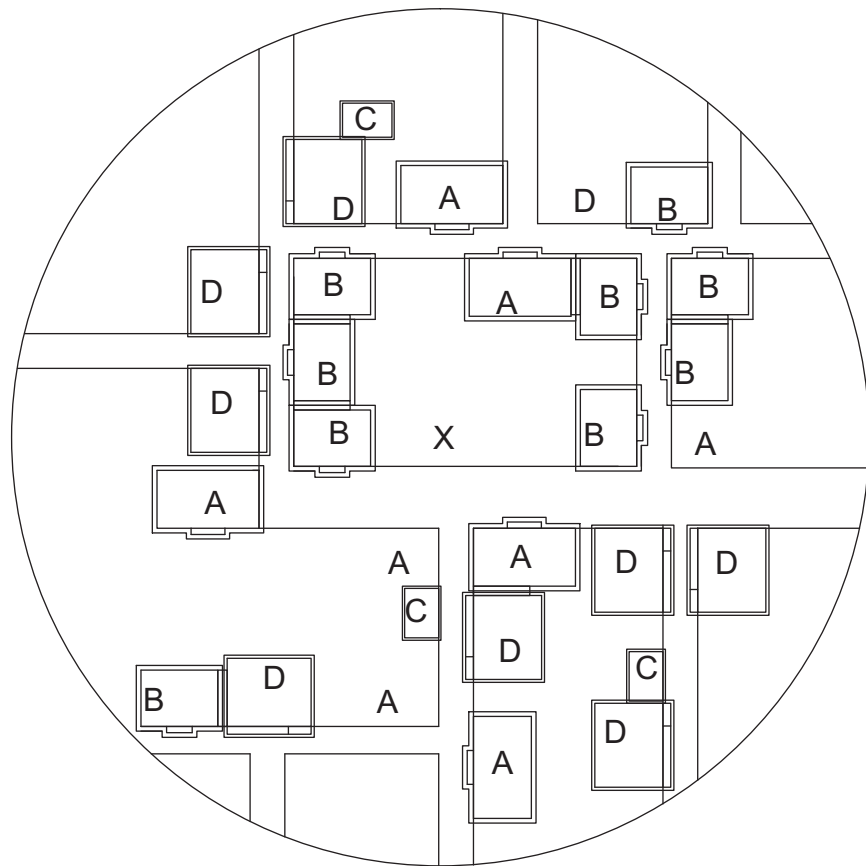


Abb. 253. umgebende Bebauung Fall 2.4

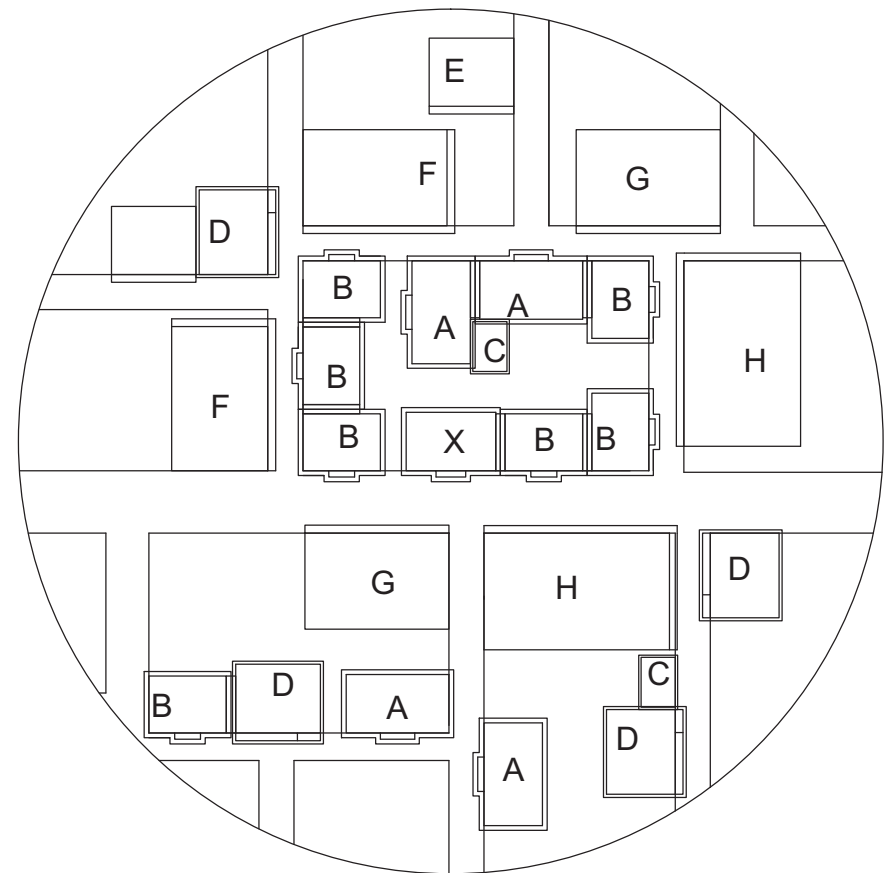


Abb. 252. umgebende Bebauung Fall 3.1

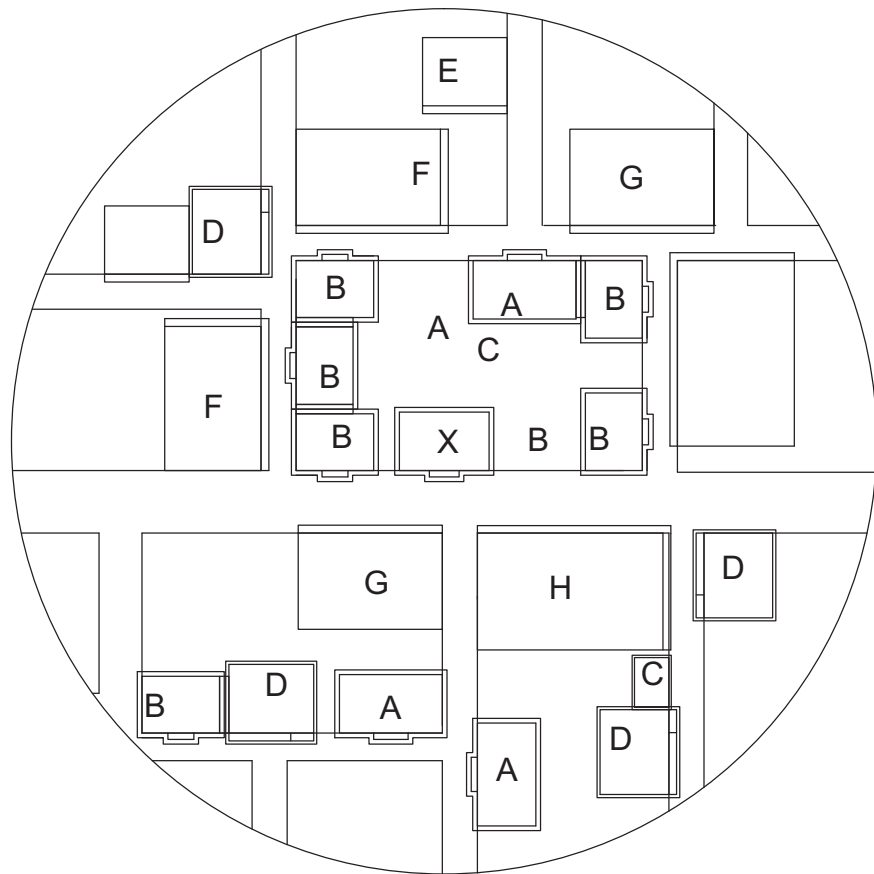


Abb. 255. umgebende Bebauung Fall 3.2

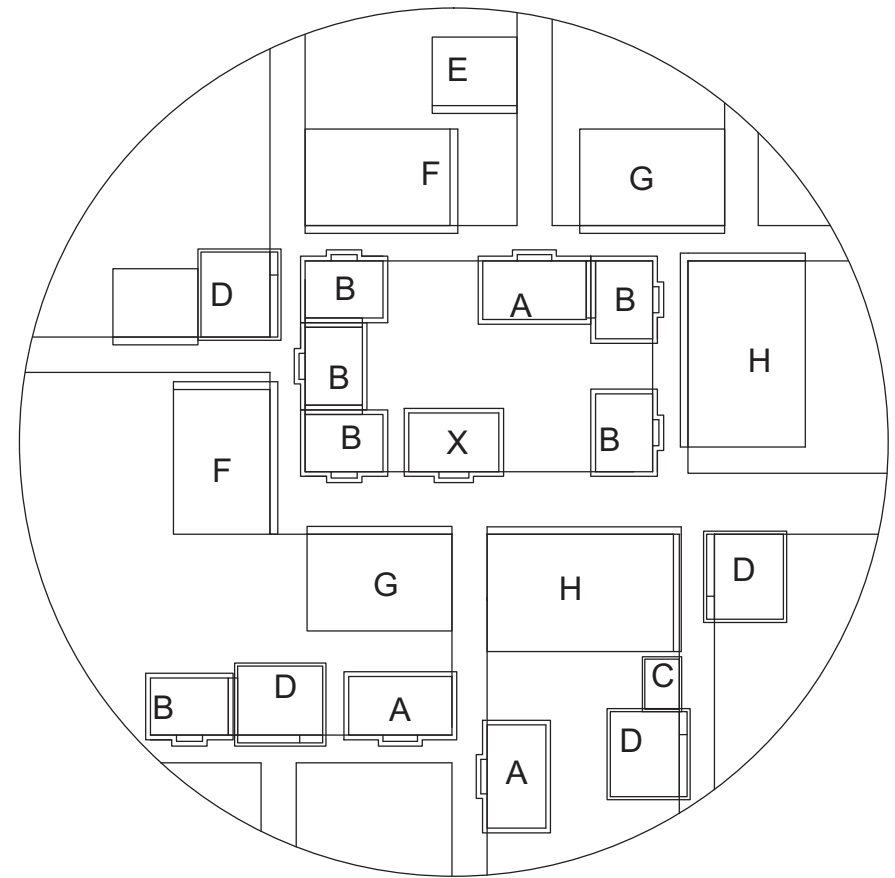


Abb. 254. umgebende Bebauung Fall 3.3

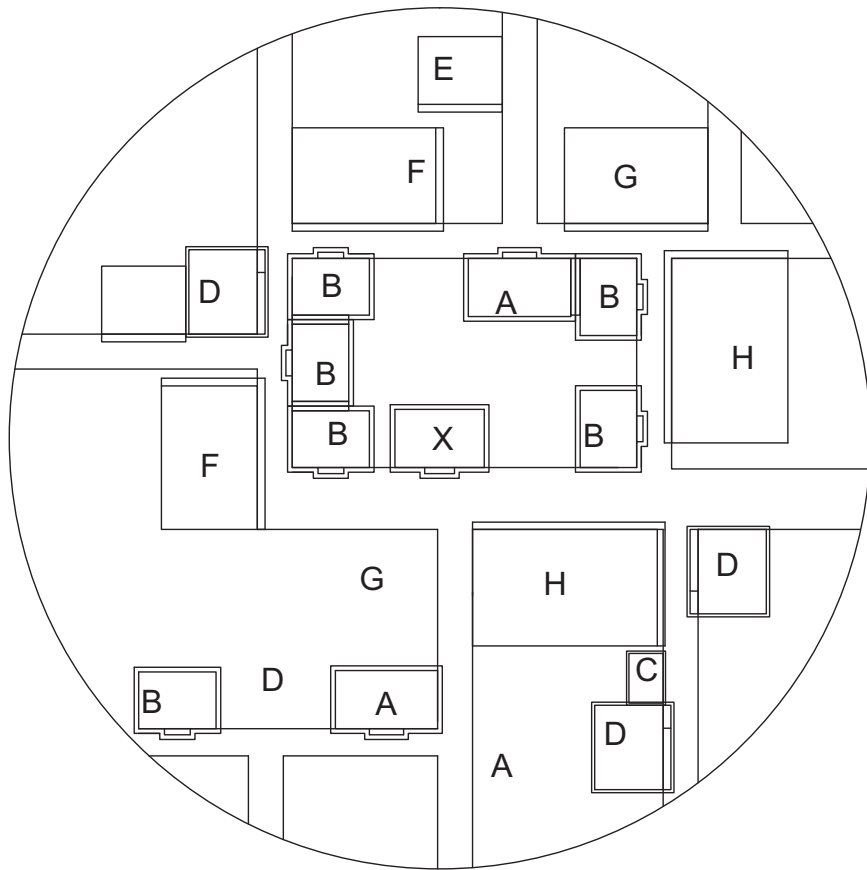


Abb. 256. umgebende Bebauung Fall 3.4

II.V Einordnung der im Versuch ermittelten  $c_p$  Werte in die vorliegenden Tabellenwerte

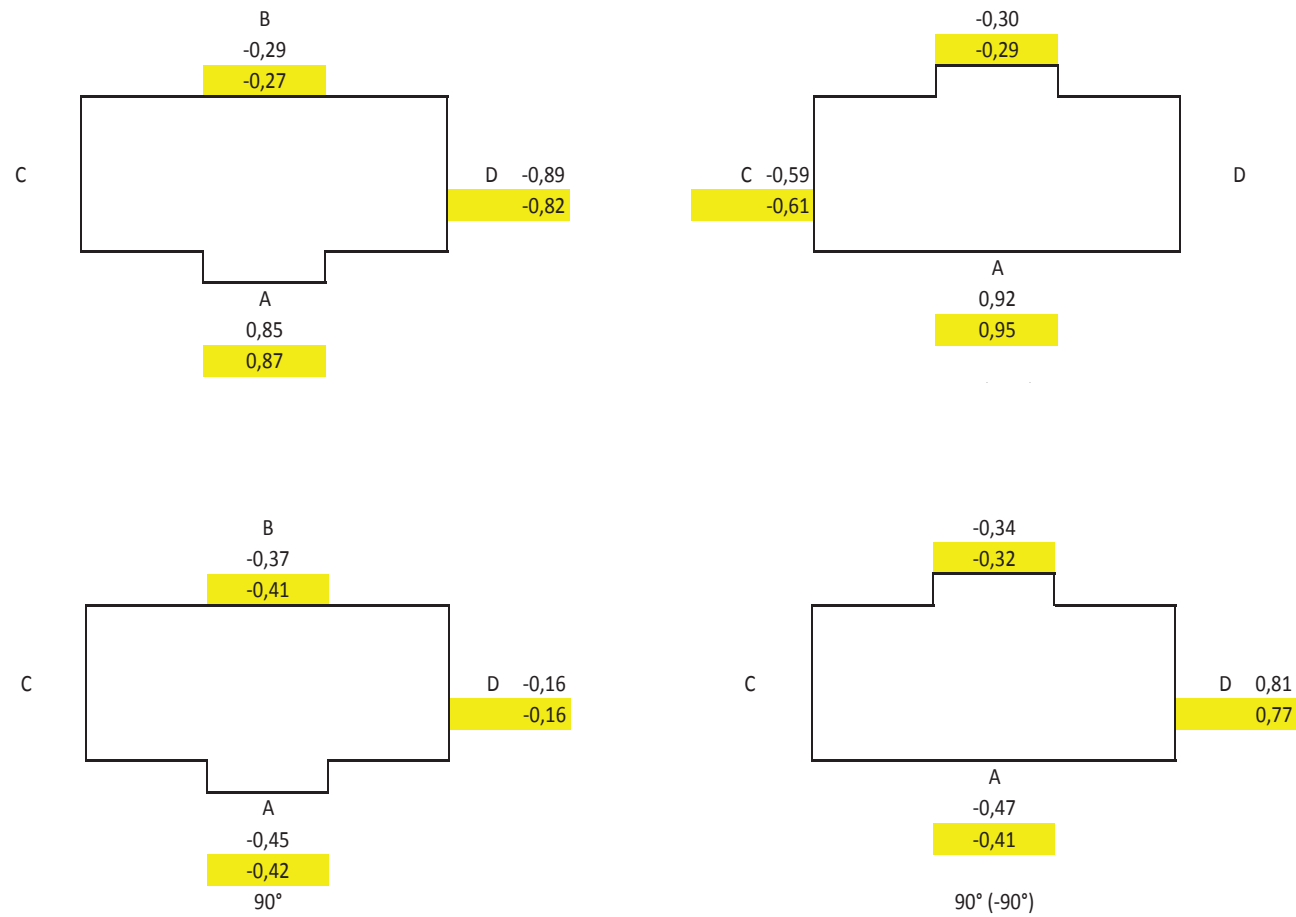


Abb. 257. Durchschnittlicher Druck an der Fassade, Ergebnisse aus den Messungen ohne umgebende Bebauung

### III. Anhang zu Kapitel 5

#### III.1 Rahmenbedingungen der Simulationen

◇ Eingabedokumentation für das Referenzgebäude

Klimadaten: IWEK Datensatz für Thessaloniki

Betrachteter Raum im Erdgeschoss:

Volumen 210,45 m<sup>3</sup>

Fläche 86,25 m<sup>2</sup>

Koordinaten des Referenzpunktes für Kunstlicht

x = 1.15

y = 0.1

z = 1.16

Betrachteter Raum im Obergeschoss:

Volumen 259.03 m<sup>3</sup>

Fläche 89.32 m<sup>2</sup>

Koordinaten des Referenzpunktes für Kunstlicht

x = 5.0

y = 0.0

z = 3.8

Kunstlicht:

Beleuchtungsstärke 150 [lx]

Regelung E Referenzpunkt < E nenn, ein/aus

Hauptnutzung Wohnen (Wohnraum)

Personenbelegung hoch (28.0 m<sup>2</sup>/Person)

Elektrische Geräte gering (2.0 W/m<sup>2</sup>)

Beleuchtung gering (3.6 W/m<sup>2</sup>)

Außenwandfläche des Obergeschosses: 95,8 m<sup>2</sup>

Fensterfläche: 18,47 m<sup>2</sup>,

Anteil an der Fassade: 19,3 %

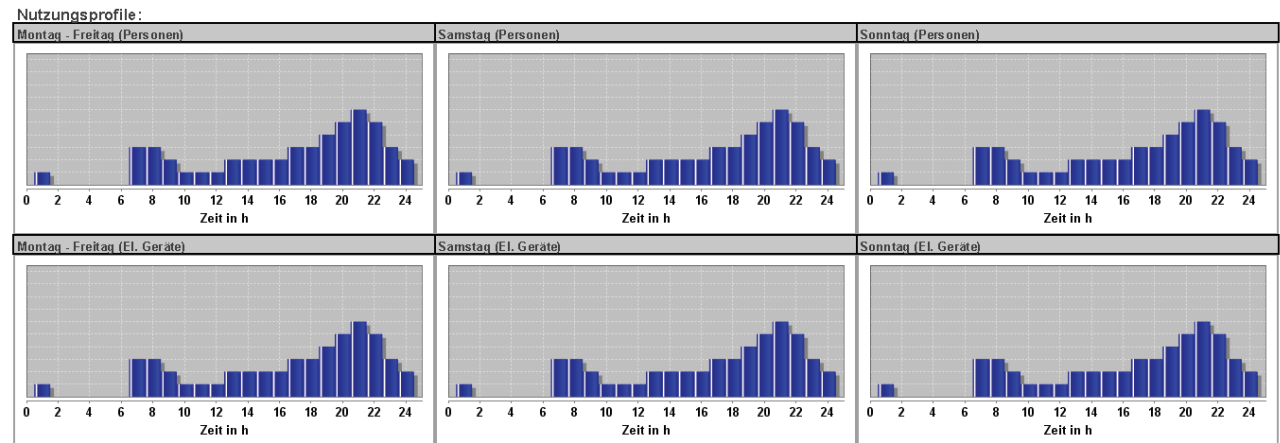


Abb. 258. Nutzungsprofil - Wohnraum



Beschreibung/Lage:			Konstruktion:			Fenster:							
Außenbauteil	Element im Außenbauteil	Bauteiltyp	Netto Fläche [m²]	Orientierung	Neigung gg. Horizont	Konstruktionstyp	U-Wert [W/m²K]	g-Wert	t-vis	Bedruckungsgrad [%]	Rahmenanteil [%]	U-WertGlas [W/m²K]	U-WertRahmen [W/m²K]
Volumenkörper1 Wand1		Außenwand	8.4	Süd	90.0	U-Wert-Manager	2.47						
	F1	Fenster	2.71	Süd	90.0	FE	4.4	0.86	0.9	0.0	35.0	5.8	<1.6
Volumenkörper1 Wand2		Außenwand	1.64	West	90.0	U-Wert-Manager	2.47						
	F2	Fenster	0.68	West	90.0	FE	4.4	0.86	0.9	0.0	35.0	5.8	<1.6
Volumenkörper1 Wand3		Außenwand	8.43	Süd	90.0	U-Wert-Manager	2.47						
	F3	Fenster	2.71	Süd	90.0	FE	4.4	0.86	0.9	0.0	35.0	5.8	<1.6
Volumenkörper1 Wand4		Außenwand	1.64	Ost	90.0	U-Wert-Manager	2.47						
	F4	Fenster	0.68	Ost	90.0	FE	4.4	0.86	0.9	0.0	35.0	5.8	<1.6
Volumenkörper1 Wand5		Außenwand	8.4	Süd	90.0	U-Wert-Manager	2.47						
	F5	Fenster	2.71	Süd	90.0	FE	4.4	0.86	0.9	0.0	35.0	5.8	<1.6
Volumenkörper1 Wand6		Außenwand	19.04	Ost	90.0	U-Wert-Manager	2.47						
	F6	Fenster	2.71	Ost	90.0	FE	4.4	0.86	0.9	0.0	35.0	5.8	<1.6
Volumenkörper1 Wand7		Außenwand	27.08	Nord	90.0	U-Wert-Manager	2.47						
	F7	Fenster	0.85	Nord	90.0	FE	4.4	0.86	0.9	0.0	35.0	5.8	<1.6
	F8	Fenster	2.71	Nord	90.0	FE	4.4	0.86	0.9	0.0	35.0	5.8	<1.6
	F9	Fenster	2.71	Nord	90.0	FE	4.4	0.86	0.9	0.0	35.0	5.8	<1.6
Volumenkörper1 Wand8		Außenwand	21.75	West	90.0	U-Wert-Manager	2.47						
Volumenkörper1 Decke		Decke gegen unbeheizten (Dach-)Raum	89.32	Oben	0.0	U-Wert-Manager	1.42						

Abb. 259. Außenbauteile des Referenzgebäudes

**Beschreibung/Lage:**
**Verschattung in der Fensterebene:**

Außenbauteil	Element im Außenbauteil	Bauteiltyp	Netto Fläche [m²]	Orientierung	Neigung gg. Horizont	Lage	Konstruktion 1	Konstruktion 2	Position Lamellen	Faktor Fc	g-Wert verschattet	Regelung
Volumenkörper1 Wand1		Außenwand	8.4	Süd	90.0							
	F1	Fenster	2.71	Süd	90.0	außen, hinterlüftet	Jalousie - Raffstore	weiß	cut off	0.36	-	zu, wenn Sonne überhaupt scheint
Volumenkörper1 Wand2		Außenwand	1.64	West	90.0							
	F2	Fenster	0.68	West	90.0	außen, hinterlüftet	Jalousie - Raffstore	weiß	cut off	0.36	-	zu, wenn Sonne überhaupt scheint
Volumenkörper1 Wand3		Außenwand	8.43	Süd	90.0							
	F3	Fenster	2.71	Süd	90.0	außen, hinterlüftet	Jalousie - Raffstore	weiß	cut off	0.36	-	zu, wenn Sonne überhaupt scheint
Volumenkörper1 Wand4		Außenwand	1.64	Ost	90.0							
	F4	Fenster	0.68	Ost	90.0	außen, hinterlüftet	Jalousie - Raffstore	weiß	cut off	0.36	-	zu, wenn Sonne überhaupt scheint
Volumenkörper1 Wand5		Außenwand	8.4	Süd	90.0							
	F5	Fenster	2.71	Süd	90.0	außen, nicht hinterlüftet	Jalousie - Raffstore	weiß	cut off	0.36	-	zu, wenn Sonne überhaupt scheint
Volumenkörper1 Wand6		Außenwand	19.04	Ost	90.0							
	F6	Fenster	2.71	Ost	90.0	außen, hinterlüftet	Jalousie - Raffstore	weiß	cut off	0.36	-	zu, wenn Sonne überhaupt scheint
Volumenkörper1 Wand7		Außenwand	27.08	Nord	90.0							
	F7	Fenster	0.85	Nord	90.0	außen, hinterlüftet	Jalousie - Raffstore	weiß	cut off	0.36	-	zu, wenn Sonne überhaupt scheint
	F8	Fenster	2.71	Nord	90.0	außen, hinterlüftet	Jalousie - Raffstore	weiß	cut off	0.36	-	zu, wenn Sonne überhaupt scheint
	F9	Fenster	2.71	Nord	90.0	außen, hinterlüftet	Jalousie - Raffstore	weiß	cut off	0.36	-	zu, wenn Sonne überhaupt scheint

Abb. 260. Referenzgebäude, Verschattungen in der Fensterebene

III.II Für die Simulationen verwendete  
Bauteilaufbauten und U-Werte

Konstruktion: **Aussenwand OG\_Referenz**

U-Wert: **2.465 W/m<sup>2</sup>K**

Bauteilgruppe: **Wand gegen Luft**

Cwirk, Heizperiode: **46.4 Wh/Km<sup>2</sup>**

Bauteiltyp: **Außenwand**

Cwirk, Nacht: **14.8 Wh/Km<sup>2</sup>**

Hinterlüftung: **nein**

Schichtaufbau von außen nach innen:

Nr.	Name	Dicke [cm]	ruhende Luftschicht	zus. ges. Schicht/Flächenanteil in %	Materialbezeichnung	Wärmeleitfähigkeit [W/mK]	Dichte [kg/m <sup>3</sup> ]	spez. Wärmekapazität [Ws/kgK]
1	Schicht 1	0.50	-	-	Putzmörtel aus Kalk, Kalkzement, hydraulischem Kalk	1.000	1800	1000
2	Schicht 2	2.50	-	-	Kalklehmputz	1.050	1926	1000
3	Schicht 3	10.00	-	ja	-	-	-	-
3a	-	-	-	70.00 %	Korrigiert ZiegelMW	0.836	1627	1000
3b	-	-	-	30.00 %	Konstruktionsholz, 500 kg/m <sup>3</sup>	0.130	500	1600
4	Schicht 4	2.50	-	-	Putzmörtel aus Kalk, Kalkzement, hydraulischem Kalk	1.000	1800	1000
Summe:		15.500						

Konstruktion: **Aussenwand Beton\_4**

U-Wert: **3.636 W/m<sup>2</sup>K**

Bauteilgruppe: **Wand gegen Luft**

Cwirk, Heizperiode: **54.7 Wh/Km<sup>2</sup>**

Bauteiltyp: **Außenwand**

Cwirk, Nacht: **15.8 Wh/Km<sup>2</sup>**

Hinterlüftung: **nein**

Schichtaufbau von außen nach innen:

Nr.	Name	Dicke [cm]	ruhende Luftschicht	zus. ges. Schicht/Flächenanteil in %	Materialbezeichnung	Wärmeleitfähigkeit [W/mK]	Dichte [kg/m <sup>3</sup> ]	spez. Wärmekapazität [Ws/kgK]
1	Schicht 1	1.50	-	-	Putzmörtel aus Kalk, Kalkzement, hydraulischem Kalk	1.000	1800	1000
2	Schicht 2	12.00	-	-	Leicht-und Stahlleichtbeton, 2000 kg/m <sup>3</sup>	1.600	2000	1000
3	Schicht 3	1.50	-	-	Putzmörtel aus Kalk, Kalkzement, hydraulischem Kalk	1.000	1800	1000
Summe:		15.000						

Konstruktion: **5b\_AussenwandBeton und Daemmung**

U-Wert: **1.076 W/m<sup>2</sup>K**

Bauteilgruppe: **Wand gegen Luft**

Cwirk, Heizperiode: **54.7 Wh/Km<sup>2</sup>**

Bauteiltyp: **Außenwand**

Cwirk, Nacht: **15.8 Wh/Km<sup>2</sup>**

Hinterlüftung: **nein**

Schichtaufbau von außen nach innen:

Nr.	Name	Dicke [cm]	ruhende Luftschicht	zus. ges. Schicht/Flächenanteil in %	Materialbezeichnung	Wärmeleitfähigkeit [W/mK]	Dichte [kg/m <sup>3</sup> ]	spez. Wärmekapazität [Ws/kgK]
1	Schicht 1	1.50	-	-	Putzmörtel aus Kalk, Kalkzement, hydraulischem Kalk	1.000	1800	1000
2	Schicht 2	2.00	-	-	PS-Extruderschaum, außerh.d.Bauwerkabdichtung	0.030	30	1450
3	Schicht 3	10.00	-	-	Leicht-und Stahlleichtbeton, 2000 kg/m <sup>3</sup>	1.600	2000	1000
4	Schicht 4	1.50	-	-	Putzmörtel aus Kalk, Kalkzement, hydraulischem Kalk	1.000	1800	1000
Summe:		15.000						

Konstruktion: **Aussenwand Beton\_4a**

U-Wert: **2.581 W/m<sup>2</sup>K**

Bauteilgruppe: **Wand gegen Luft**

Cwirk, Heizperiode: **54.7 Wh/Km<sup>2</sup>**

Bauteiltyp: **Außenwand**

Cwirk, Nacht: **15.8 Wh/Km<sup>2</sup>**

Hinterlüftung: **nein**

Schichtaufbau von außen nach innen:

Nr.	Name	Dicke [cm]	ruhende Luftschicht	zus. ges. Schicht/Flächenanteil in %	Materialbezeichnung	Wärmeleitfähigkeit [W/mK]	Dichte [kg/m <sup>3</sup> ]	spez. Wärmekapazität [Ws/kgK]
1	Schicht 1	1.50	-	-	Putzmörtel aus Kalk, Kalkzement, hydraulischem Kalk	1.000	1800	1000
2	Schicht 2	30.00	-	-	Leicht-und Stahlleichtbeton, 2000 kg/m <sup>3</sup>	1.600	2000	1000
3	Schicht 3	1.50	-	-	Putzmörtel aus Kalk, Kalkzement, hydraulischem Kalk	1.000	1800	1000
Summe:		33.000						

Konstruktion: **AussenwandBeton und Daemmung\_5**

U-Wert: **0.341 W/m<sup>2</sup>K**

Bauteilgruppe: **Wand gegen Luft**

Cwirk, Heizperiode: **54.7 Wh/Km<sup>2</sup>**

Bauteiltyp: **Außenwand**

Cwirk, Nacht: **15.8 Wh/Km<sup>2</sup>**

Hinterlüftung: **nein**

Schichtaufbau von außen nach innen:

Nr.	Name	Dicke [cm]	ruhende Luftschicht	zus. ges. Schicht/Flächenanteil in %	Materialbezeichnung	Wärmeleitfähigkeit [W/mK]	Dichte [kg/m <sup>3</sup> ]	spez. Wärmekapazität [Ws/kgK]
1	Schicht 1	1.50	-	-	Putzmörtel aus Kalk, Kalkzement, hydraulischem Kalk	1.000	1800	1000
2	Schicht 2	8.00	-	-	PS-Extruderschaum, außerh.d.Bauwerkabdichtung	0.030	30	1450
3	Schicht 3	10.00	-	-	Leicht-und Stahlleichtbeton, 2000 kg/m <sup>3</sup>	1.600	2000	1000
4	Schicht 4	1.50	-	-	Putzmörtel aus Kalk, Kalkzement, hydraulischem Kalk	1.000	1800	1000
Summe:		21.000						



Konstruktion: **Aussenwand OG mit Kork**

U-Wert: **1.149 W/m<sup>2</sup>K**

Bauteilgruppe: **Wand gegen Luft**

Cwirk, Heizperiode: **0.0 Wh/Km<sup>2</sup>**

Bauteiltyp: **Außenwand**

Cwirk, Nacht: **0.0 Wh/Km<sup>2</sup>**

Hinterlüftung: **nein**

Schichtaufbau von außen nach innen:

Nr.	Name	Dicke [cm]	ruhende Luftschicht	zus. ges. Schicht/Flächenanteil in %	Materialbezeichnung	Wärmeleitfähigkeit [W/mK]	Dichte [kg/m <sup>3</sup> ]	spez. Wärmekapazität [Ws/kgK]
1	Schicht 1	0.50	-	-	Putzmörtel aus Kalk, Kalkzement, hydraulischem Kalk	1.000	1800	1000
2	Schicht 2	2.50	-	-	Kalklehmputz	1.050	1926	1000
3	Schicht 3	10.00	-	ja	-	-	-	-
3a	-	-	-	70.00 %	Korrigiert ZiegelMW	0.836	1627	1000
3b	-	-	-	30.00 %	Konstruktionsholz, 500 kg/m <sup>3</sup>	0.130	500	1600
4	Schicht 4	2.50	-	-	Putzmörtel aus Kalk, Kalkzement, hydraulischem Kalk	1.000	1800	1000
5	Schicht 5	2.00	-	-	Korkplatten, WLG 045	0.045	80	1400
Summe:		17.500						

Konstruktion: **Aussenwand OG Lehmziegel**

U-Wert: **2.291 W/m<sup>2</sup>K**

Bauteilgruppe: **Wand gegen Luft**

Cwirk, Heizperiode: **37.5 Wh/Km<sup>2</sup>**

Bauteiltyp: **Außenwand**

Cwirk, Nacht: **14.2 Wh/Km<sup>2</sup>**

Hinterlüftung: **nein**

Schichtaufbau von außen nach innen:

Nr.	Name	Dicke [cm]	ruhende Luftschicht	zus. ges. Schicht/Flächenanteil in %	Materialbezeichnung	Wärmeleitfähigkeit [W/mK]	Dichte [kg/m <sup>3</sup> ]	spez. Wärmekapazität [Ws/kgK]
1	Schicht 1	0.50	-	-	Putzmörtel aus Kalk, Kalkzement, hydraulischem Kalk	1.000	1800	1000
2	Schicht 2	2.50	-	-	Kalklehmputz	1.050	1926	1000
3	Schicht 3	10.00	-	-	Lehm, 1200 kg/m <sup>3</sup>	0.470	1200	1000
4	Schicht 4	2.50	-	-	Putzmörtel aus Kalk, Kalkzement, hydraulischem Kalk	1.000	1800	1000
Summe:		15.500						

Konstruktion: **Aussenwand OGLEhm\_30 cm**

U-Wert: **1.160 W/m<sup>2</sup>K**

Bauteilgruppe: **Wand gegen Luft**

Cwirk, Heizperiode: **37.5 Wh/Km<sup>2</sup>**

Bauteiltyp: **Außenwand**

Cwirk, Nacht: **14.2 Wh/Km<sup>2</sup>**

Hinterlüftung: **nein**

Schichtaufbau von außen nach innen:

Nr.	Name	Dicke [cm]	ruhende Luftschicht	zus. ges. Schicht/Flächenanteil in %	Materialbezeichnung	Wärmeleitfähigkeit [W/mK]	Dichte [kg/m <sup>3</sup> ]	spez. Wärmekapazität [Ws/kgK]
1	Schicht 1	0.50	-	-	Putzmörtel aus Kalk, Kalkzement, hydraulischem Kalk	1.000	1800	1000
2	Schicht 2	2.50	-	-	Kalklehmputz	1.050	1926	1000
3	Schicht 3	30.00	-	-	Lehm, 1200 kg/m <sup>3</sup>	0.470	1200	1000
4	Schicht 4	2.50	-	-	Putzmörtel aus Kalk, Kalkzement, hydraulischem Kalk	1.000	1800	1000
Summe:		35.500						

Konstruktion: **Aussenwand OG mit 6cm Innendaemmung**

U-Wert: **0.463 W/m<sup>2</sup>K**

Bauteilgruppe: **Wand gegen Luft**

Cwirk, Heizperiode: **0.0 Wh/Km<sup>2</sup>**

Bauteiltyp: **Außenwand**

Cwirk, Nacht: **0.0 Wh/Km<sup>2</sup>**

Hinterlüftung: **nein**

Schichtaufbau von außen nach innen:

Nr.	Name	Dicke [cm]	ruhende Luftschicht	zus. ges. Schicht/Flächenanteil in %	Materialbezeichnung	Wärmeleitfähigkeit [W/mK]	Dichte [kg/m <sup>3</sup> ]	spez. Wärmekapazität [Ws/kgK]
1	Schicht 1	0.50	-	-	Putzmörtel aus Kalk, Kalkzement, hydraulischem Kalk	1.000	1800	1000
2	Schicht 2	2.50	-	-	Kalklehmputz	1.050	1926	1000
3	Schicht 3	10.00	-	ja	-	-	-	-
3a	-	-	-	70.00 %	Korrigiert ZiegelMW	0.836	1627	1000
3b	-	-	-	30.00 %	Konstruktionsholz, 500 kg/m <sup>3</sup>	0.130	500	1600
4	Schicht 4	2.50	-	-	Putzmörtel aus Kalk, Kalkzement, hydraulischem Kalk	1.000	1800	1000
5	Schicht 5	6.00	-	-	mineral. u. pflanzl. Faserdämmstoffe, WLG 035	0.035	8	1030
Summe:		21.500						

Konstruktion: **Aussenwand OGZiegel20 cm**

U-Wert: **1.756 W/m<sup>2</sup>K**

Bauteilgruppe: **Wand gegen Luft**

Cwirk, Heizperiode: **46.4 Wh/Km<sup>2</sup>**

Bauteiltyp: **Außenwand**

Cwirk, Nacht: **14.8 Wh/Km<sup>2</sup>**

Hinterlüftung: **nein**

Schichtaufbau von außen nach innen:

Nr.	Name	Dicke [cm]	ruhende Luftschicht	zus. ges. Schicht/Flächenanteil in %	Materialbezeichnung	Wärmeleitfähigkeit [W/mK]	Dichte [kg/m <sup>3</sup> ]	spez. Wärmekapazität [Ws/kgK]
1	Schicht 1	0.50	-	-	Putzmörtel aus Kalk, Kalkzement, hydraulischem Kalk	1.000	1800	1000
2	Schicht 2	2.50	-	-	Kalklehmputz	1.050	1926	1000
3	Schicht 3	20.00	-	ja	-	-	-	-
3a	-	-	-	70.00 %	Korrigiert ZiegelMW	0.836	1627	1000
3b	-	-	-	30.00 %	Konstruktionsholz, 500 kg/m <sup>3</sup>	0.130	500	1600
4	Schicht 4	2.50	-	-	Putzmörtel aus Kalk, Kalkzement, hydraulischem Kalk	1.000	1800	1000
Summe:		25.500						

Konstruktion: **Aussenwand OG 8 cm Aussendaemmung\_2**

U-Wert: **0.322 W/m<sup>2</sup>K**

Bauteilgruppe: **Wand gegen Luft**

Cwirk, Heizperiode: **46.4 Wh/Km<sup>2</sup>**

Bauteiltyp: **Außenwand**

Cwirk, Nacht: **14.8 Wh/Km<sup>2</sup>**

Hinterlüftung: **nein**

Schichtaufbau von außen nach innen:

Nr.	Name	Dicke [cm]	ruhende Luftschicht	zus. ges. Schicht/Flächenanteil in %	Materialbezeichnung	Wärmeleitfähigkeit [W/mK]	Dichte [kg/m <sup>3</sup> ]	spez. Wärmekapazität [Ws/kgK]
1	Schicht 1	1.50	-	-	Putzmörtel aus Kalk, Kalkzement, hydraulischem Kalk	1.000	1800	1000
2	Schicht 2	8.00	-	-	PS-Extruderschaum, außerh.d.Bauwerkabdichtung	0.030	30	1450
3	Schicht 3	10.00	-	ja	-	-	-	-
3a	-	-	-	70.00 %	Korrigiert ZiegelMW	0.836	1627	1000
3b	-	-	-	30.00 %	Konstruktionsholz, 500 kg/m <sup>3</sup>	0.130	500	1600
4	Schicht 4	2.50	-	-	Putzmörtel aus Kalk, Kalkzement, hydraulischem Kalk	1.000	1800	1000
Summe:		22.000						

Konstruktion: **Decke zum Dachraum\_0**

U-Wert: **1.280 W/m<sup>2</sup>K**

Bauteilgruppe: **Dach/Decke gegen Luft**

Cwirk, Heizperiode: **11.1 Wh/Km<sup>2</sup>**

Bauteiltyp: **geneigtes Dach**

Cwirk, Nacht: **5.6 Wh/Km<sup>2</sup>**

Hinterlüftung: **ja**

Schichtaufbau von außen nach innen:

Nr.	Name	Dicke [cm]	ruhende Luftschicht	zus. ges. Schicht/Flächenanteil in %	Materialbezeichnung	Wärmeleitfähigkeit [W/mK]	Dichte [kg/m <sup>3</sup> ]	spez. Wärmekapazität [Ws/kgK]
1	Schicht 1	2.50	-	-	Vollziegel, Hochlochziegel, Füllziegel, 1600 kg/m <sup>3</sup>	0.680	1600	1000
2	Schicht 2	2.50	-	-	Konstruktionsholz, 500 kg/m <sup>3</sup>	0.130	500	1600
3	Schicht 3	50.00	ja	-	-	-	-	-
4	Schicht 4	2.50	-	-	Konstruktionsholz, 500 kg/m <sup>3</sup>	0.130	500	1600
Summe:		57.500						

Konstruktion: **Decke zum Dachraum gedämmt\_1**

U-Wert: **0.426 W/m<sup>2</sup>K**

Bauteilgruppe: **Dach/Decke gegen Luft**

Cwirk, Heizperiode: **5.6 Wh/Km<sup>2</sup>**

Bauteiltyp: **geneigtes Dach**

Cwirk, Nacht: **6.3 Wh/Km<sup>2</sup>**

Hinterlüftung: **nein**

Schichtaufbau von außen nach innen:

Nr.	Name	Dicke [cm]	ruhende Luftschicht	zus. ges. Schicht/Flächenanteil in %	Materialbezeichnung	Wärmeleitfähigkeit [W/mK]	Dichte [kg/m <sup>3</sup> ]	spez. Wärmekapazität [Ws/kgK]
1	Schicht 1	2.50	-	-	Vollziegel, Hochlochziegel, Füllziegel, 1600 kg/m <sup>3</sup>	0.680	1600	1000
2	Schicht 2	2.50	-	-	Konstruktionsholz, 500 kg/m <sup>3</sup>	0.130	500	1600
3	Schicht 3	40.00	ja	-	-	-	-	-
4	Schicht 4	2.50	-	ja	-	-	-	-
4a	-	-	-	85.00 %	Holzwohle- Leichtbauplatten, d > 25mm, WLK 065	0.065	360	1470
4b	-	-	-	15.00 %	Konstruktionsholz, 500 kg/m <sup>3</sup>	0.130	500	1600
5	Schicht 5	2.50	-	-	Konstruktionsholz, 500 kg/m <sup>3</sup>	0.130	500	1600
Summe:		50.000						

Konstruktion: **Decke zum Dachraum Beton\_4**

U-Wert: **3.350 W/m<sup>2</sup>K**

Bauteilgruppe: **Dach/Decke gegen Luft**

Cwirk, Heizperiode: **54.7 Wh/Km<sup>2</sup>**

Bauteiltyp: **geneigtes Dach**

Cwirk, Nacht: **15.8 Wh/Km<sup>2</sup>**

Hinterlüftung: **nein**

Schichtaufbau von außen nach innen:

Nr.	Name	Dicke [cm]	ruhende Luftschicht	zus. ges. Schicht/Flächenanteil in %	Materialbezeichnung	Wärmeleitfähigkeit [W/mK]	Dichte [kg/m <sup>3</sup> ]	spez. Wärmekapazität [Ws/kgK]
1	Schicht 1	1.50	-	-	Vollklinker, Hochlochklinker, Keramikklinker, 1800 kg/m <sup>3</sup>	0.810	1800	1000
2	Schicht 2	20.00	-	-	Leicht-und Stahlleichtbeton, 2000 kg/m <sup>3</sup>	1.600	2000	1000
3	Schicht 3	1.50	-	-	Putzmörtel aus Kalk, Kalkzement, hydraulischem Kalk	1.000	1800	1000
Summe:		23.000						

Konstruktion: **5b\_Decke zum Dachraum Beton gedaeamt**

U-Wert: **1.143 W/m<sup>2</sup>K**

Bauteilgruppe: **Dach/Decke gegen Luft**

Cwirk, Heizperiode: **0.0 Wh/Km<sup>2</sup>**

Bauteiltyp: **geneigtes Dach**

Cwirk, Nacht: **0.0 Wh/Km<sup>2</sup>**

Hinterlüftung: **nein**

Schichtaufbau von außen nach innen:

Nr.	Name	Dicke [cm]	ruhende Luftschicht	zus. ges. Schicht/Flächenanteil in %	Materialbezeichnung	Wärmeleitfähigkeit [W/mK]	Dichte [kg/m <sup>3</sup> ]	spez. Wärmekapazität [Ws/kgK]
1	Schicht 1	1.50	-	-	Vollklinker, Hochlochklinker, Keramikklinker, 1800 kg/m <sup>3</sup>	0.810	1800	1000
2	Schicht 2	2.00	-	-	Dünnbettmauermörtel	1.000	1600	1000
3	Schicht 3	20.00	-	-	Leicht-und Stahlleichtbeton, 2000 kg/m <sup>3</sup>	1.600	2000	1000
4	Schicht 4	2.00	-	-	PS-Extruderschaum, WLG 035	0.035	25	1450
Summe:		25.500						



Konstruktion: **Decke zum Dachraum Beton gedaeamt\_5**

U-Wert: **0.438 W/m²K**

Bauteilgruppe: **Dach/Decke gegen Luft**

Cwirk, Heizperiode: **55.6 Wh/Km²**

Bauteiltyp: **geneigtes Dach**

Cwirk, Nacht: **16.7 Wh/Km²**

Hinterlüftung: **nein**

Schichtaufbau von außen nach innen:

Nr.	Name	Dicke [cm]	ruhende Luftschicht	zus. ges. Schicht/Flächenanteil in %	Materialbezeichnung	Wärmeleitfähigkeit [W/mK]	Dichte [kg/m³]	spez. Wärmekapazität [Ws/kgK]
1	Schicht 1	1.50	-	-	Vollklinker, Hochlochklinker, Keramikklinker, 1800 kg/m³	0.810	1800	1000
2	Schicht 2	5.00	-	-	Polyurethan (PUR)-Hartschaum, WLG 025	0.025	30	1400
3	Schicht 3	20.00	-	-	Leicht-und Stahlleichtbeton, 2000 kg/m³	1.600	2000	1000
Summe:		26.500						

Konstruktion: **Decke zum Dachraum gedämmt - Lehm\_6**

U-Wert: **0.607 W/m²K**

Bauteilgruppe: **Dach/Decke gegen Luft**

Cwirk, Heizperiode: **16.0 Wh/Km²**

Bauteiltyp: **geneigtes Dach**

Cwirk, Nacht: **6.3 Wh/Km²**

Hinterlüftung: **ja**

Schichtaufbau von außen nach innen:

Nr.	Name	Dicke [cm]	ruhende Luftschicht	zus. ges. Schicht/Flächenanteil in %	Materialbezeichnung	Wärmeleitfähigkeit [W/mK]	Dichte [kg/m³]	spez. Wärmekapazität [Ws/kgK]
1	Schicht 1	2.50	-	-	Vollziegel, Hochlochziegel, Füllziegel, 1600 kg/m³	0.680	1600	1000
2	Schicht 2	2.50	-	-	Konstruktionsholz, 500 kg/m³	0.130	500	1600
3	Schicht 3	40.00	ja	-	-	-	-	-
4	Schicht 4	12.00	-	ja	-	-	-	-
4a	-	-	-	85.00 %	Lehm, 500 kg/m³	0.140	500	1000
4b	-	-	-	15.00 %	Konstruktionsholz, 500 kg/m³	0.130	500	1600
5	Schicht 5	2.50	-	-	Konstruktionsholz, 500 kg/m³	0.130	500	1600
Summe:		59.500						

Konstruktion: **8\_Decke zum Dachraum**

U-Wert: **0.395 W/m<sup>2</sup>K**

Bauteilgruppe: **Dach/Decke gegen Luft**

Cwirk, Heizperiode: **50.0 Wh/Km<sup>2</sup>**

Bauteiltyp: **geneigtes Dach**

Cwirk, Nacht: **15.0 Wh/Km<sup>2</sup>**

Hinterlüftung: **nein**

Schichtaufbau von außen nach innen:

Nr.	Name	Dicke [cm]	ruhende Luftschicht	zus. ges. Schicht/Flächenanteil in %	Materialbezeichnung	Wärmeleitfähigkeit [W/mK]	Dichte [kg/m <sup>3</sup> ]	spez. Wärmekapazität [Ws/kgK]
1	Schicht 1	2.50	-	-	Vollziegel, Hochlochziegel, Füllziegel, 1600 kg/m <sup>3</sup>	0.680	1600	1000
2	Schicht 2	2.50	-	-	Konstruktionsholz, 500 kg/m <sup>3</sup>	0.130	500	1600
3	Schicht 3	40.00	ja	-	-	-	-	-
4	Schicht 4	12.00	-	-	Holzwohle- Leichtbauplatten, d > 25mm, WLG 065	0.065	360	1470
5	Schicht 5	20.00	-	-	Leicht-und Stahlleichtbeton, 1800 kg/m <sup>3</sup>	1.300	1800	1000
Summe:		77.000						

Konstruktion: **EG Aussenwand**

U-Wert: **5.120 W/m<sup>2</sup>K**

Bauteilgruppe: **Wand gegen Luft**

Cwirk, Heizperiode: **67.4 Wh/Km<sup>2</sup>**

Bauteiltyp: **Außenwand**

Cwirk, Nacht: **16.2 Wh/Km<sup>2</sup>**

Hinterlüftung: **nein**

Schichtaufbau von außen nach innen:

Nr.	Name	Dicke [cm]	ruhende Luftschicht	zus. ges. Schicht/Flächenanteil in %	Materialbezeichnung	Wärmeleitfähigkeit [W/mK]	Dichte [kg/m <sup>3</sup> ]	spez. Wärmekapazität [Ws/kgK]
1	Schicht 1	70.00	-	-	Grünschiefer	2200.000	2635	1000
2	Schicht 2	2.50	-	-	Putzmörtel aus Kalk, Kalkzement, hydraulischem Kalk	1.000	1800	1000
Summe:		72.500						

Konstruktion: **EG Zwischendecke**

U-Wert: **1.258 W/m<sup>2</sup>K**

Bauteilgruppe: **Dach/Decke gegen Luft**

Cwirk, Heizperiode: **11.1 Wh/Km<sup>2</sup>**

Bauteiltyp: **Decke gegen niedrig beheizt**

Cwirk, Nacht: **5.6 Wh/Km<sup>2</sup>**

Hinterlüftung: **nein**

Schichtaufbau von außen nach innen:

Nr.	Name	Dicke [cm]	ruhende Luftschicht	zus. ges. Schicht/Flächenanteil in %	Materialbezeichnung	Wärmeleitfähigkeit [W/mK]	Dichte [kg/m <sup>3</sup> ]	spez. Wärmekapazität [Ws/kgK]
1	Schicht 1	2.50	-	-	Konstruktionsholz, 500 kg/m <sup>3</sup>	0.130	500	1600
2	Schicht 2	15.00	ja	-	-	-	-	-
3	Schicht 3	2.50	-	-	Konstruktionsholz, 500 kg/m <sup>3</sup>	0.130	500	1600
Summe:		20.000						

Konstruktion: **Zwischendecke**

U-Wert: **1.070 W/m<sup>2</sup>K**

Bauteilgruppe: **Boden gegen Luft**

Cwirk, Heizperiode: **11.1 Wh/Km<sup>2</sup>**

Bauteiltyp: **Boden gegen niedrig beheizt**

Cwirk, Nacht: **5.6 Wh/Km<sup>2</sup>**

Hinterlüftung: **nein**

Schichtaufbau von außen nach innen:

Nr.	Name	Dicke [cm]	ruhende Luftschicht	zus. ges. Schicht/Flächenanteil in %	Materialbezeichnung	Wärmeleitfähigkeit [W/mK]	Dichte [kg/m <sup>3</sup> ]	spez. Wärmekapazität [Ws/kgK]
1	Schicht 1	2.50	-	-	Konstruktionsholz, 500 kg/m <sup>3</sup>	0.130	500	1600
2	Schicht 2	15.00	ja	-	-	-	-	-
3	Schicht 3	2.50	-	-	Konstruktionsholz, 500 kg/m <sup>3</sup>	0.130	500	1600
Summe:		20.000						

III.III Ergebnisse der Messungen im Windkanal -  
Vergleich Referenzgebäude mit und ohne Erker

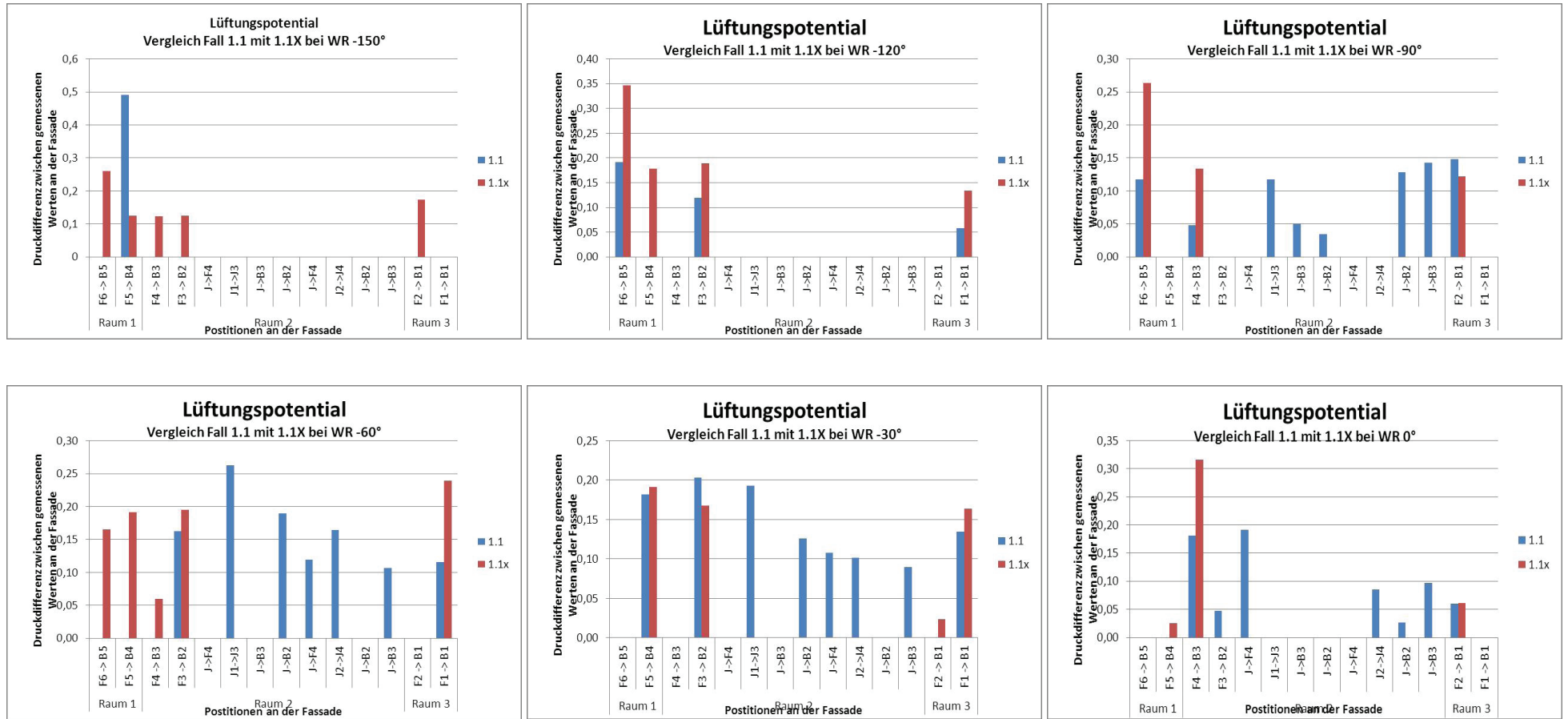


Abb. 261. Druckdifferenzen zwischen den gegenüberliegenden Druckmesspunkten am Referenzgebäude für alle gemessenen Windrichtungen, Fall 1.1 (Referenzgebäude mit Erker) und 1.1x (ohne Erker)

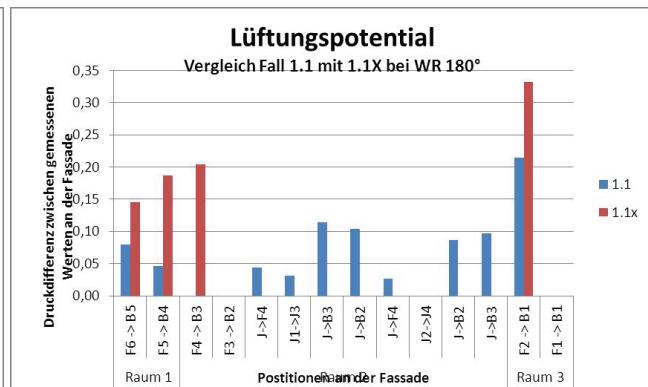
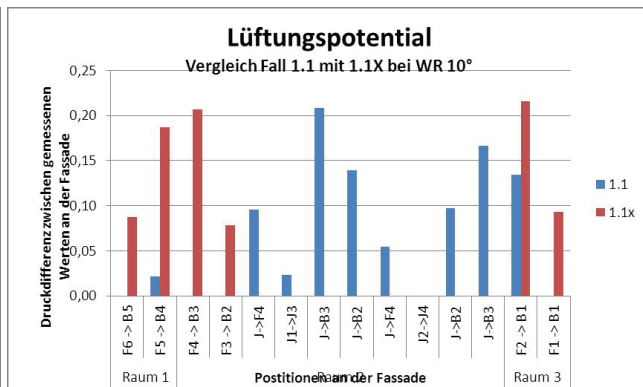
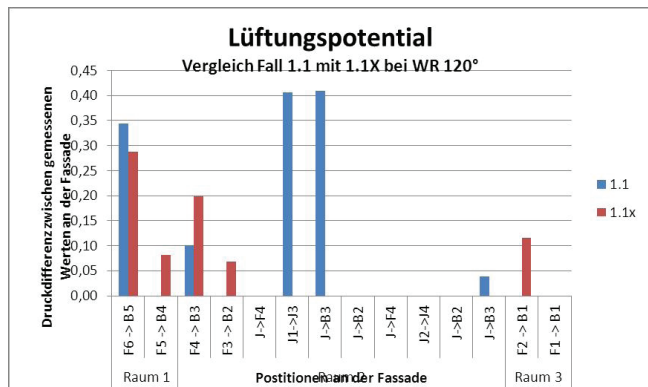
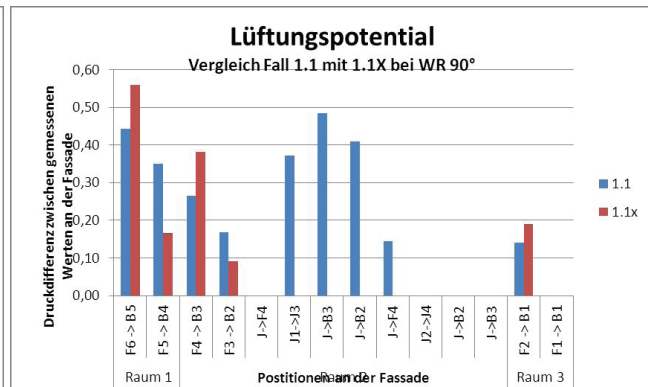
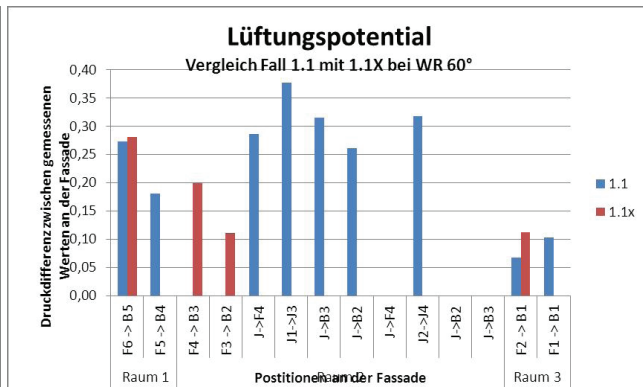
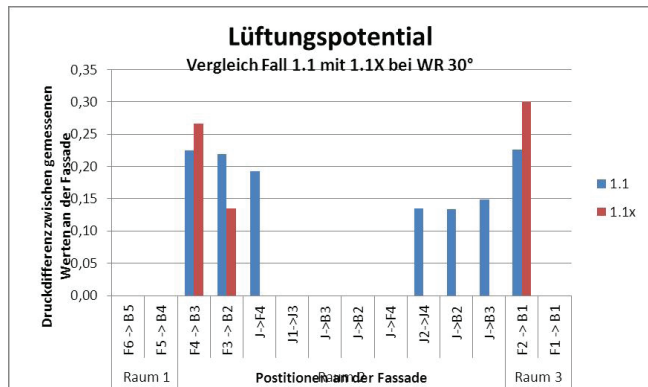


Abb. 266 Fortsetzung



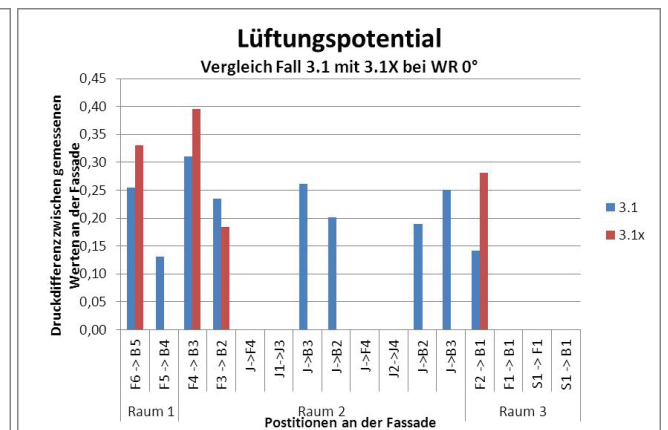
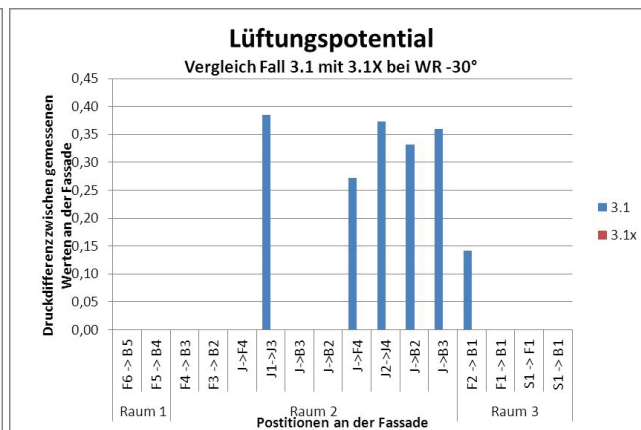
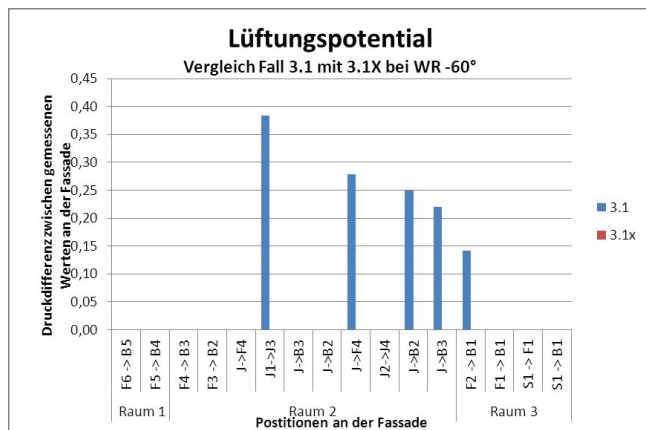
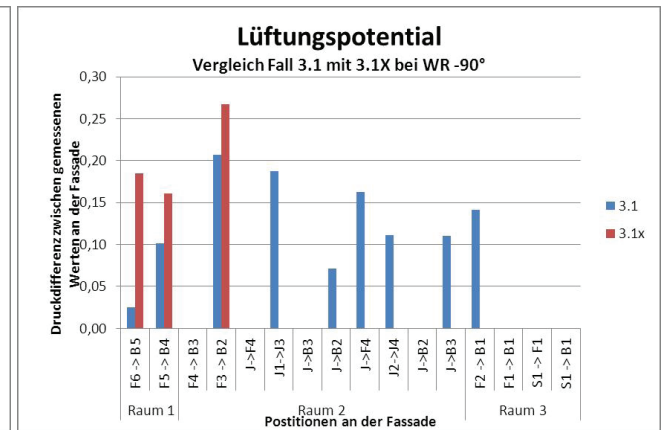
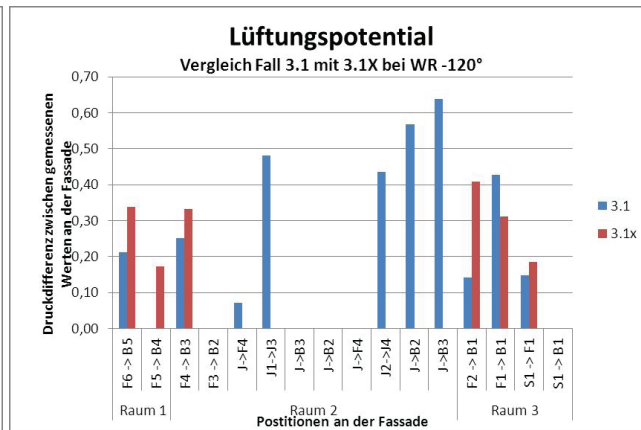
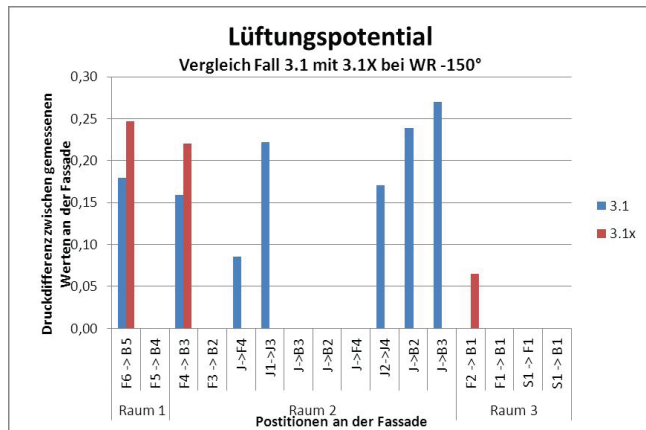


Abb. 262. Druckdifferenzen zwischen den gegenüberliegenden Druckmesspunkten am Referenzgebäude für alle gemessenen Windrichtungen, Fall 3.1 (Referenzgebäude mit Erker) und 3.1x (ohne Erker)

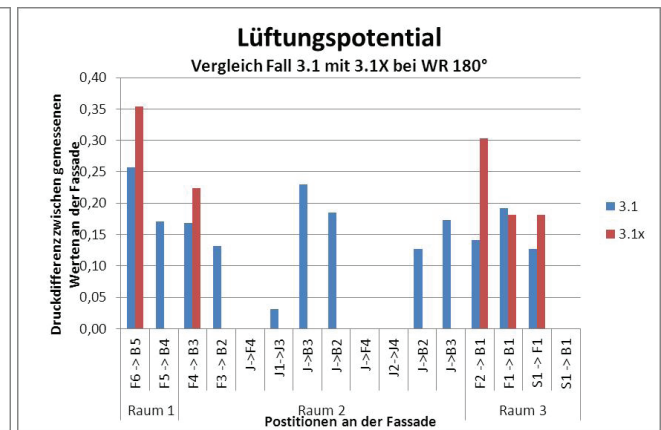
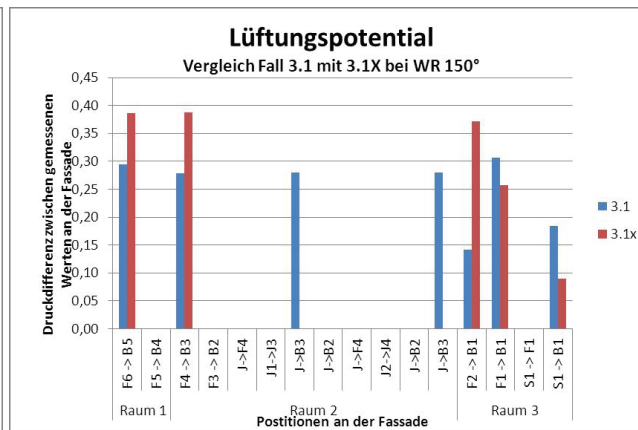
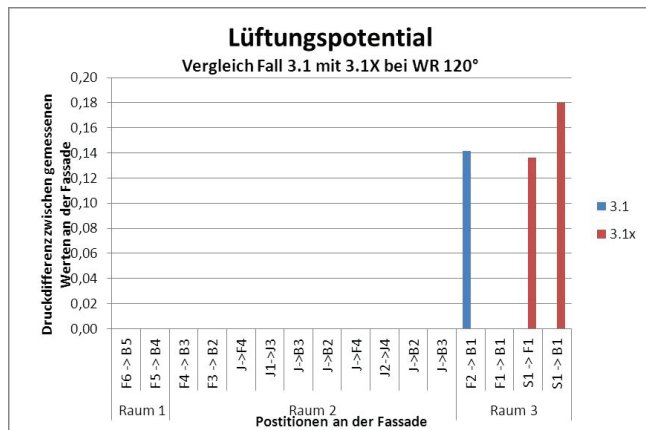
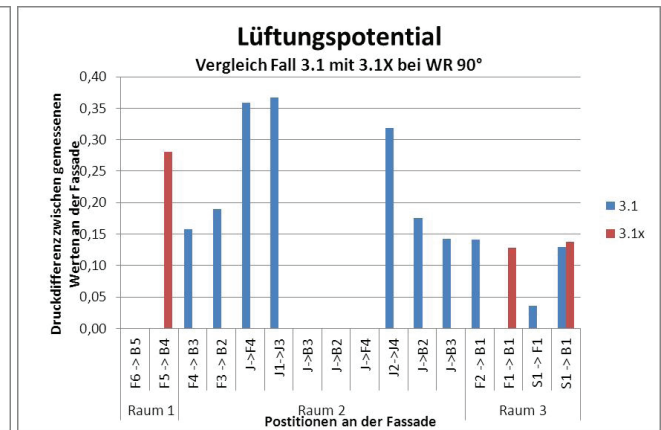
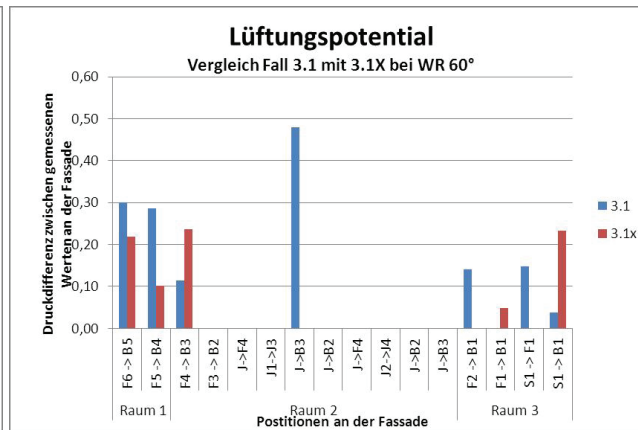
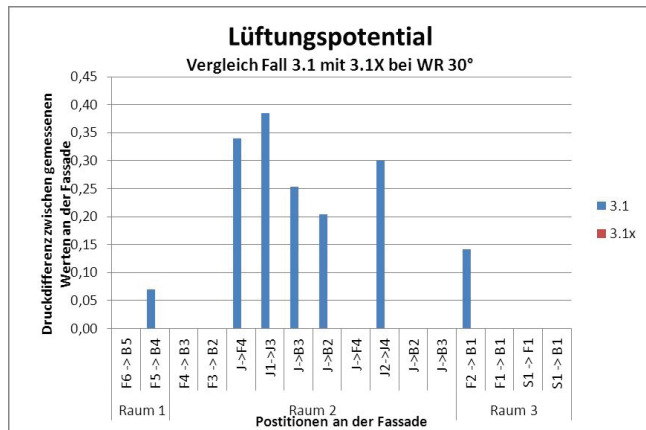


Abb. 267 Fortsetzung

### III.IV Berechnung LWR nach BS 5925-1991

$$m_W = c_d * A_W * v_r * (\Delta c_p)^{0,5} \quad (4)$$

mit:  $m_W$  = Volumenstrom windinduziert;  $c_d$  = Durchflusskoeffizient für die Durchtrittsfläche (rechteckige Öffnung: 0,65);  $A_W$  = wirksame Fensterfläche,  $1 / A_W^2 = 1 / (A1 + A2)^2 + 1 / (A3 + A4)^2$ ;  $v_r$  = Referenz-Windgeschwindigkeit; und  $c_p$  = durchschnittlicher Druck auf der Fassade.

$$v_r = K * z^a * v_f \quad (5)$$

mit:  $K$  = Koeffizient und  $a$  = Exponent zur Berücksichtigung der Umgebung auf die Windgeschwindigkeit (für Stadtzentrum  $K = 0,21$  und  $a = 0,33$ );  $z$  = Gebäudehöhe; und  $v_f$  = Windgeschwindigkeit.

$$LWR = 3600 * m_W / A_{\text{Raum}} \quad (7)$$

Beispielrechnung für Raum 1 bei angenommenen  $\Delta c_p = 0,1$

$$F6 = 1,32 \text{ m}^2 \text{ und } B5 = 1,32 \text{ m}^2 \\ A_W = 0,93 \text{ m}^2$$

$$v_f \text{ 5 m/s:} \\ v_r = 0,21 * 7,65 \text{ m } 0,33 * 5 \text{ m/s} = 2,055 \text{ m/s}$$

$$v_f \text{ 2 m/s:} \\ v_r = 0,21 * 7,65 \text{ m } 0,33 * 2 \text{ m/s} = 0,82 \text{ m/s}$$

Bei einer waagerechten Stellung verringern die Lamellen den Luftdurchlass nicht stärker als ein rechteckiges Fenster, so dass in der Berechnung derselbe Beiwert von  $c_d = 0,64$  berücksichtigt werden kann (Dietze1987:81).

$$v_f \text{ 5 m/s:} \\ m_W = 0,64 * 0,93 \text{ m}^2 * 2,055 \text{ m/s } (0,1)^{0,5} \\ m_W = 0,387 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$v_f \text{ 2 m/s:} \\ m_W = 0,64 * 0,93 \text{ m}^2 * 0,82 \text{ m/s } (0,1)^{0,5} \\ m_W = 0,15 \text{ m}^3/\text{s}$$

Berechnung der Luftwechselrate LWR:

Bei einer Windgeschwindigkeit  $v_f$  von 5 m/s:

$$LWR = 3600 * 0,387 \text{ m}^3/\text{s} / 78 \text{ m}^3 = 17,86$$

Bei einer Windgeschwindigkeit  $v_f$  von 2 m/s:

$$LWR = 3600 * 0,15 \text{ m}^3/\text{s} / 78 \text{ m}^3 = 6,92$$

### III.V Berechnung der LWR bei einem gekippten Fenster

Beispielrechnung Raum 1: Fenster um  $10^\circ$  gekippt, Berechnung der wirksamen Öffnungsfläche  $A_W$  nach Hall (2004:109ff) über die für den Luftwechsel wirksame Fläche bei einem gekippten Fenster.

$$A_W = 0,46 \text{ m}^2$$

$$\text{Mit } v_f \text{ 5 m/s:} \\ v_r = 0,21 * 7,65 \text{ m } 0,33 * 5 \text{ m/s} = 2,055 \text{ m/s}$$

$$\text{Mit } v_f \text{ 2 m/s:} \\ v_r = 0,21 * 7,65 \text{ m } 0,33 * 2 \text{ m/s} = 0,82 \text{ m/s}$$

$$m_W = 0,64 * 0,46 \text{ m}^2 * 0,82 \text{ m/s } (0,1)^{0,5} \\ m_W = 0,076 \text{ m}^3/\text{s}$$

Berechnung der Luftwechselrate LWR:

Bei einer Windgeschwindigkeit  $v_f$  von 2 m/s

$$LWR = 3600 * 0,076 \text{ m}^3/\text{s} / 77,894 \text{ m}^3 = 3,5/\text{h}$$

III.VI Grafik aus Kapitel 5.4

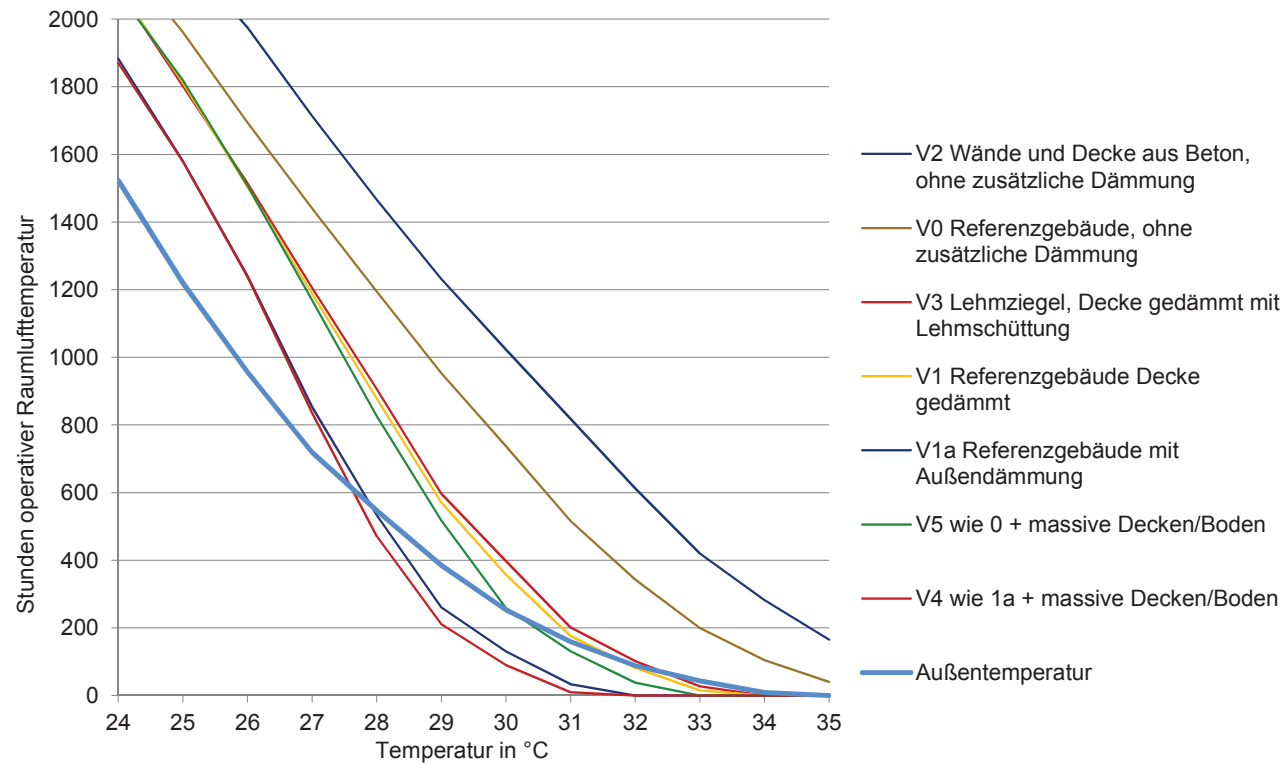


Abb. 263. Stunden operativer Raumlufttemperatur im Innenraum des Referenzgebäudes, Obergeschoss, pro Jahr, Vergleich unterschiedlicher Baumaterialien bei gleicher Kubatur, gleichen Verschattungselementen und einer LWR von 3/h

## IV. Anhang zu Kapitel 6

### IV.1 Rahmenbedingungen der Simulationen ◇ Eingabeparameter für die Nutzungen

Klimadaten: IWEK Datensatz für Thessaloniki

Kunstlicht:

Beleuchtungsstärke 150 [lx]

Regelung E Referenzpunkt < E nenn, ein/aus

Hauptnutzung Wohnen (Wohnraum, Schlafraum, Küche)

Personenbelegung mittel (35.0 m<sup>2</sup>/Person)

Elektrische Geräte mittel (4.0 W/m<sup>2</sup>)

Beleuchtung mittel (4.0 W/m<sup>2</sup>)

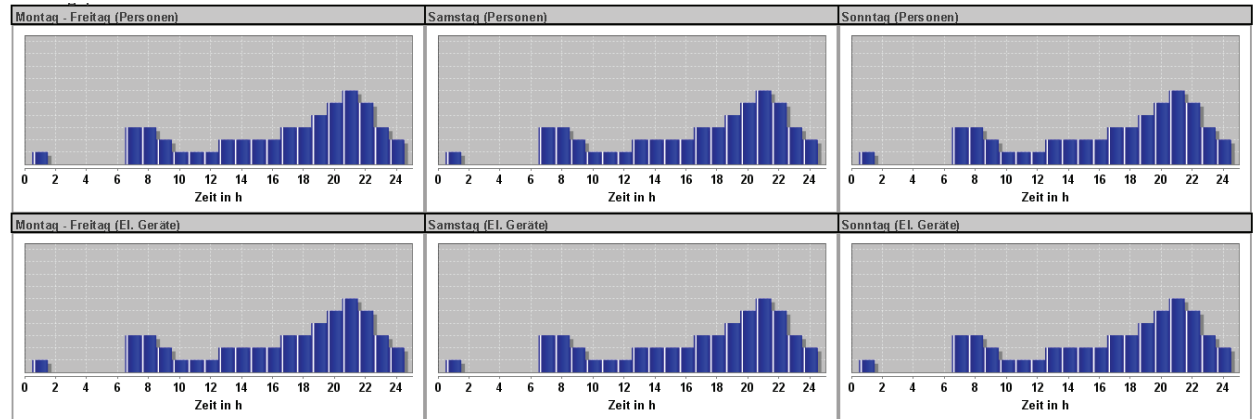


Abb. 264. Nutzungsprofil Wohnraum

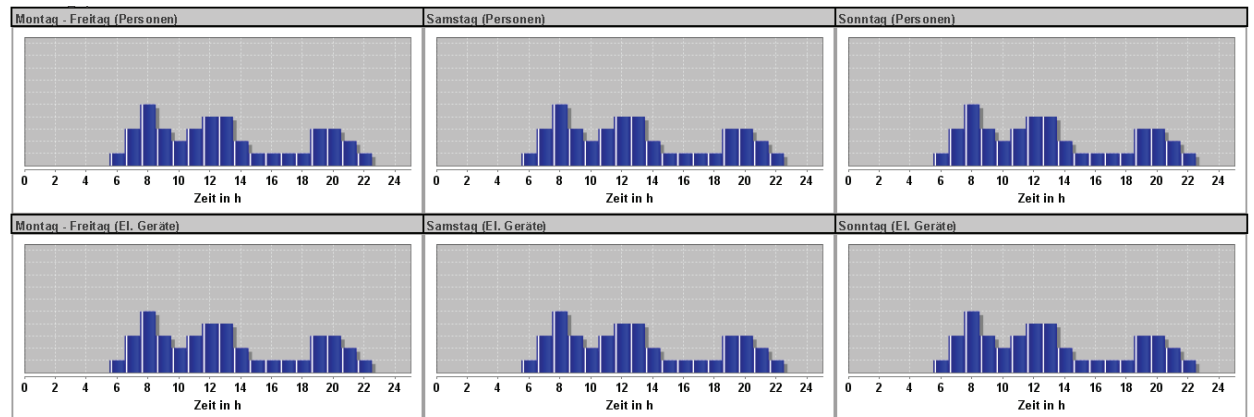


Abb. 265. Nutzungsprofil Küche



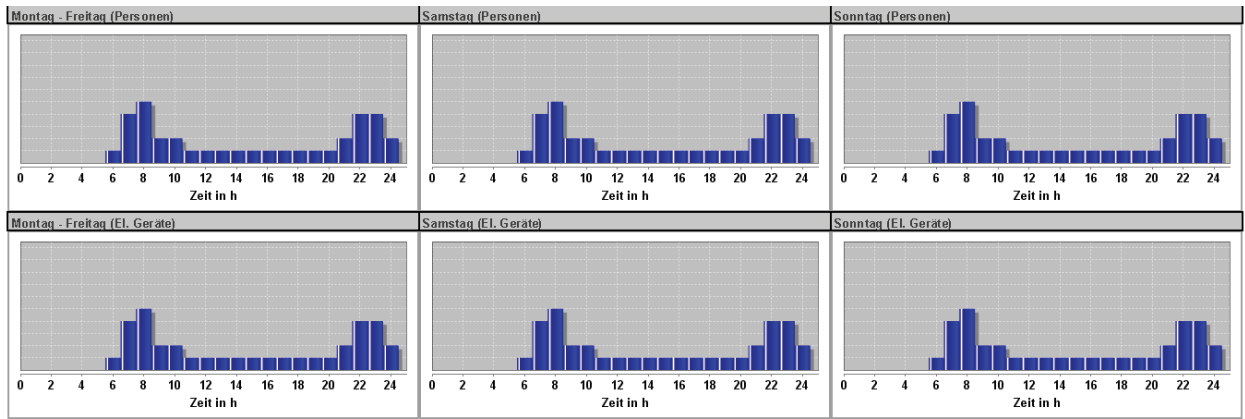


Abb. 266. Nutzungsprofil Schlafzimmer

IV.II Für die Simulationen verwendete  
Bauteilaufbauten und U-Werte

Konstruktion: **0\_A\_Aussenwand**

U-Wert: **2.501 W/m²K**

Bauteilgruppe: **Wand gegen Luft**

Cwirk, Heizperiode: **50.0 Wh/Km²**

Bauteiltyp: **Außenwand**

Cwirk, Nacht: **15.0 Wh/Km²**

Hinterlüftung: **nein**

Schichtaufbau von außen nach innen:

Nr.	Name	Dicke [cm]	ruhende Luftschicht	zus. ges. Schicht/Flächenanteil in %	Materialbezeichnung	Wärmeleitfähigkeit [W/mK]	Dichte [kg/m³]	spez. Wärmekapazität [Ws/kgK]
1	Schicht 1	2.50	-	-	Putzmörtel aus Kalk, Kalkzement, hydraulischem Kalk	1.000	1800	1000
2	Schicht 2	18.00	-	ja	-	-	-	-
2a	-	-	-	15.00 %	Beton, armiert (2% Stahl), 2400 kg/m³	2.500	2400	1000
2b	-	-	-	85.00 %	Vollklinker, Hochlochklinker, Keramikklinker, 1800 kg/m³	0.810	1800	1000
3	Schicht 3	2.50	-	-	Putzmörtel aus Kalk, Kalkzement, hydraulischem Kalk	1.000	1800	1000
	Summe:	23.000						

Konstruktion: **A\_Aussenwand\_2.5cm**

U-Wert: **1.043 W/m²K**

Bauteilgruppe: **Wand gegen Luft**

Cwirk, Heizperiode: **50.0 Wh/Km²**

Bauteiltyp: **Außenwand**

Cwirk, Nacht: **15.0 Wh/Km²**

Hinterlüftung: **nein**

Schichtaufbau von außen nach innen:

Nr.	Name	Dicke [cm]	ruhende Luftschicht	zus. ges. Schicht/Flächenanteil in %	Materialbezeichnung	Wärmeleitfähigkeit [W/mK]	Dichte [kg/m³]	spez. Wärmekapazität [Ws/kgK]
1	Schicht 1	2.50	-	-	Holzfaserdämmplatten, WLG 045	0.045	110	1400
2	Schicht 2	2.50	-	-	Putzmörtel aus Kalk, Kalkzement, hydraulischem Kalk	1.000	1800	1000
3	Schicht 3	18.00	-	ja	-	-	-	-
3a	-	-	-	15.00 %	Beton, armiert (2% Stahl), 2400 kg/m³	2.500	2400	1000
3b	-	-	-	85.00 %	Vollklinker, Hochlochklinker, Keramikklinker, 1800 kg/m³	0.810	1800	1000
4	Schicht 4	2.50	-	-	Putzmörtel aus Kalk, Kalkzement, hydraulischem Kalk	1.000	1800	1000
Summe:		25.500						

Konstruktion: **A\_Aussenwand\_5cm**

U-Wert: **0.660 W/m²K**

Bauteilgruppe: **Wand gegen Luft**

Cwirk, Heizperiode: **50.0 Wh/Km²**

Bauteiltyp: **Außenwand**

Cwirk, Nacht: **15.0 Wh/Km²**

Hinterlüftung: **nein**

Schichtaufbau von außen nach innen:

Nr.	Name	Dicke [cm]	ruhende Luftschicht	zus. ges. Schicht/Flächenanteil in %	Materialbezeichnung	Wärmeleitfähigkeit [W/mK]	Dichte [kg/m³]	spez. Wärmekapazität [Ws/kgK]
1	Schicht 1	5.00	-	-	Holzfaserdämmplatten, WLG 045	0.045	110	1400
2	Schicht 2	2.50	-	-	Putzmörtel aus Kalk, Kalkzement, hydraulischem Kalk	1.000	1800	1000
3	Schicht 3	18.00	-	ja	-	-	-	-
3a	-	-	-	15.00 %	Beton, armiert (2% Stahl), 2400 kg/m³	2.500	2400	1000
3b	-	-	-	85.00 %	Vollklinker, Hochlochklinker, Keramikklinker, 1800 kg/m³	0.810	1800	1000
4	Schicht 4	2.50	-	-	Putzmörtel aus Kalk, Kalkzement, hydraulischem Kalk	1.000	1800	1000
Summe:		28.000						

Konstruktion: **A\_Aussenwand\_7.5cm**

U-Wert: **0.483 W/m²K**

Bauteilgruppe: **Wand gegen Luft**

Cwirk, Heizperiode: **50.0 Wh/Km²**

Bauteiltyp: **Außenwand**

Cwirk, Nacht: **15.0 Wh/Km²**

Hinterlüftung: **nein**

Schichtaufbau von außen nach innen:

Nr.	Name	Dicke [cm]	ruhende Luftschicht	zus.ges. Schicht/Flächenanteil in %	Materialbezeichnung	Wärmeleitfähigkeit [W/mK]	Dichte [kg/m³]	spez. Wärmekapazität [Ws/kgK]
1	Schicht 1	7.50	-	-	Holzfaserdämmplatten, WLG 045	0.045	110	1400
2	Schicht 2	2.50	-	-	Putzmörtel aus Kalk, Kalkzement, hydraulischem Kalk	1.000	1800	1000
3	Schicht 3	18.00	-	ja	-	-	-	-
3a	-	-	-	15.00 %	Beton, armiert (2% Stahl), 2400 kg/m³	2.500	2400	1000
3b	-	-	-	85.00 %	Vollklinker, Hochlochklinker, Keramikklinker, 1800 kg/m³	0.810	1800	1000
4	Schicht 4	2.50	-	-	Putzmörtel aus Kalk, Kalkzement, hydraulischem Kalk	1.000	1800	1000
Summe:		30.500						

Konstruktion: **A\_Aussenwand\_10cm**

U-Wert: **0.381 W/m²K**

Bauteilgruppe: **Wand gegen Luft**

Cwirk, Heizperiode: **50.0 Wh/Km²**

Bauteiltyp: **Außenwand**

Cwirk, Nacht: **15.0 Wh/Km²**

Hinterlüftung: **nein**

Schichtaufbau von außen nach innen:

Nr.	Name	Dicke [cm]	ruhende Luftschicht	zus.ges. Schicht/Flächenanteil in %	Materialbezeichnung	Wärmeleitfähigkeit [W/mK]	Dichte [kg/m³]	spez. Wärmekapazität [Ws/kgK]
1	Schicht 1	10.00	-	-	Holzfaserdämmplatten, WLG 045	0.045	110	1400
2	Schicht 2	2.50	-	-	Putzmörtel aus Kalk, Kalkzement, hydraulischem Kalk	1.000	1800	1000
3	Schicht 3	18.00	-	ja	-	-	-	-
3a	-	-	-	15.00 %	Beton, armiert (2% Stahl), 2400 kg/m³	2.500	2400	1000
3b	-	-	-	85.00 %	Vollklinker, Hochlochklinker, Keramikklinker, 1800 kg/m³	0.810	1800	1000
4	Schicht 4	2.50	-	-	Putzmörtel aus Kalk, Kalkzement, hydraulischem Kalk	1.000	1800	1000
Summe:		33.000						

Konstruktion: **0\_A\_Aussenwand\_Beton**

U-Wert: **3.425 W/m²K**

Bauteilgruppe: **Wand gegen Luft**

Cwirk, Heizperiode: **62.5 Wh/Km²**

Bauteiltyp: **Außenwand**

Cwirk, Nacht: **15.8 Wh/Km²**

Hinterlüftung: **nein**

Schichtaufbau von außen nach innen:

Nr.	Name	Dicke [cm]	ruhende Luftschicht	zus.ges. Schicht/Flächenanteil in %	Materialbezeichnung	Wärmeleitfähigkeit [W/mK]	Dichte [kg/m³]	spez. Wärmekapazität [Ws/kgK]
1	Schicht 1	2.50	-	-	Putzmörtel aus Kalk, Kalkzement, hydraulischem Kalk	1.000	1800	1000
2	Schicht 2	18.00	-	-	Beton, armiert (2% Stahl), 2400 kg/m³	2.500	2400	1000
3	Schicht 3	2.50	-	-	Putzmörtel aus Kalk, Kalkzement, hydraulischem Kalk	1.000	1800	1000
Summe:		23.000						

Konstruktion: **0\_A\_Boden\_Pilotis**

U-Wert: **2.994 W/m²K**

Bauteilgruppe: **Boden gegen Luft**

Cwirk, Heizperiode: **55.3 Wh/Km²**

Bauteiltyp: **Boden gegen Außenluft**

Cwirk, Nacht: **16.4 Wh/Km²**

Hinterlüftung: **nein**

Schichtaufbau von außen nach innen:

Nr.	Name	Dicke [cm]	ruhende Luftschicht	zus.ges. Schicht/Flächenanteil in %	Materialbezeichnung	Wärmeleitfähigkeit [W/mK]	Dichte [kg/m³]	spez. Wärmekapazität [Ws/kgK]
1	Schicht 1	16.00	-	-	Leicht- und Stahlleichtbeton, 2000 kg/m³	1.600	2000	1000
2	Schicht 2	2.00	-	-	Zementmörtel	1.600	2000	1000
3	Schicht 3	1.50	-	-	Keramik, Porzellan	1.300	2300	840
Summe:		19.500						



Konstruktion: **A\_Boden\_Pilotis\_gedaemmt**

U-Wert: **0.387 W/m²K**

Bauteilgruppe: **Boden gegen Luft**

Cwirk, Heizperiode: **55.3 Wh/Km²**

Bauteiltyp: **Boden gegen Außenluft**

Cwirk, Nacht: **16.4 Wh/Km²**

Hinterlüftung: **nein**

Schichtaufbau von außen nach innen:

Nr.	Name	Dicke [cm]	ruhende Luftschicht	zus.ges. Schicht/Flächenanteil in %	Materialbezeichnung	Wärmeleitfähigkeit [W/mK]	Dichte [kg/m³]	spez. Wärmekapazität [Ws/kgK]
1	Schicht 1	2.50	-	-	Putzmörtel aus Kalk, Kalkzement, hydraulischem Kalk	1.000	1800	1000
2	Schicht 2	10.00	-	-	Holzfaserdämmplatten, WLG 045	0.045	110	1400
3	Schicht 3	16.00	-	-	Leicht-und Stahlleichtbeton, 2000 kg/m³	1.600	2000	1000
4	Schicht 4	2.00	-	-	Zementmörtel	1.600	2000	1000
5	Schicht 5	1.50	-	-	Keramik, Porzellan	1.300	2300	840
Summe:		32.000						

Konstruktion: **0\_A\_Dach**

U-Wert: **2.985 W/m²K**

Bauteilgruppe: **Dach/Decke gegen Luft**

Cwirk, Heizperiode: **45.3 Wh/Km²**

Bauteiltyp: **Flachdach (Neigung <= 30°)**

Cwirk, Nacht: **14.2 Wh/Km²**

Hinterlüftung: **nein**

Schichtaufbau von außen nach innen:

Nr.	Name	Dicke [cm]	ruhende Luftschicht	zus.ges. Schicht/Flächenanteil in %	Materialbezeichnung	Wärmeleitfähigkeit [W/mK]	Dichte [kg/m³]	spez. Wärmekapazität [Ws/kgK]
1	Schicht 1	18.00	-	-	Leicht-und Stahlleichtbeton, 1600 kg/m³	1.000	1600	1000
2	Schicht 2	1.50	-	-	Putzmörtel aus Kalk, Kalkzement, hydraulischem Kalk	1.000	1800	1000
Summe:		19.500						

Konstruktion: **A\_Dach\_Daemmung**

U-Wert: **0.306 W/m²K**

Bauteilgruppe: **Dach/Decke gegen Luft**

Cwirk, Heizperiode: **45.3 Wh/Km²**

Bauteiltyp: **Flachdach (Neigung<= 30°)**

Cwirk, Nacht: **14.2 Wh/Km²**

Hinterlüftung: **nein**

Schichtaufbau von außen nach innen:

Nr.	Name	Dicke [cm]	ruhende Luftschicht	zus.ges. Schicht/Flächenanteil in %	Materialbezeichnung	Wärmeleitfähigkeit [W/mK]	Dichte [kg/m³]	spez. Wärmekapazität [Ws/kgK]
1	Schicht 1	1.00	-	-	Bitumendachbahn	0.170	1200	1000
2	Schicht 2	10.00	-	-	Polystyrol (PS)-Partikelschaum, WLG 035	0.035	15	1560
3	Schicht 3	0.30	-	-	Polytetrafluorethylen (PTFE)-Folien	0.250	2200	1000
4	Schicht 4	18.00	-	-	Leicht-und Stahlleichtbeton, 1600 kg/m³	1.000	1600	1000
5	Schicht 5	1.50	-	-	Putzmörtel aus Kalk, Kalkzement, hydraulischem Kalk	1.000	1800	1000
Summe:		30.800						

Konstruktion: **Dach\_Daemmung\_20cm**

U-Wert: **0.163 W/m²K**

Bauteilgruppe: **Dach/Decke gegen Luft**

Cwirk, Heizperiode: **45.3 Wh/Km²**

Bauteiltyp: **Flachdach (Neigung<= 30°)**

Cwirk, Nacht: **14.2 Wh/Km²**

Hinterlüftung: **nein**

Schichtaufbau von außen nach innen:

Nr.	Name	Dicke [cm]	ruhende Luftschicht	zus.ges. Schicht/Flächenanteil in %	Materialbezeichnung	Wärmeleitfähigkeit [W/mK]	Dichte [kg/m³]	spez. Wärmekapazität [Ws/kgK]
1	Schicht 1	1.00	-	-	Bitumendachbahn	0.170	1200	1000
2	Schicht 2	20.00	-	-	Polystyrol (PS)-Partikelschaum, WLG 035	0.035	15	1560
3	Schicht 3	0.30	-	-	Polytetrafluorethylen (PTFE)-Folien	0.250	2200	1000
4	Schicht 4	18.00	-	-	Leicht-und Stahlleichtbeton, 1600 kg/m³	1.000	1600	1000
5	Schicht 5	1.50	-	-	Putzmörtel aus Kalk, Kalkzement, hydraulischem Kalk	1.000	1800	1000
Summe:		40.800						

Bauteilaufbauten für die Simulationen nach den Mindestanforderungen der KENAK

Konstruktion: **Außenwand**

U-Wert: **0.448 W/m<sup>2</sup>K**

Bauteilgruppe: **Wand gegen Luft**

Cwirk, Heizperiode: **50.0 Wh/Km<sup>2</sup>**

Bauteiltyp: **Außenwand**

Cwirk, Nacht: **15.0 Wh/Km<sup>2</sup>**

Hinterlüftung: **nein**

Schichtaufbau von außen nach innen:

Nr.	Name	Dicke [cm]	ruhende Luftschicht	zus.ges. Schicht/Flächenanteil in %	Materialbezeichnung	Wärmeleitfähigkeit [W/mK]	Dichte [kg/m <sup>3</sup> ]	spez. Wärmekapazität [Ws/kgK]
1	Schicht 1	2.00	-	-	Putzmörtel aus Kalk, Kalkzement, hydraulischem Kalk	1.000	1800	1000
2	Schicht 2	12.00	-	-	Holzwohle- Leichtbauplatten, d > 25mm, WLK 065	0.065	360	1470
3	Schicht 3	20.00	-	-	Beton, mittlere Rohdichte, 1800 kg/m <sup>3</sup>	1.150	1800	1000
4	Schicht 4	2.00	-	-	Putzmörtel aus Kalk, Kalkzement, hydraulischem Kalk	1.000	1800	1000
Summe:		36.000						

Konstruktion: **Boden Pilotis**

U-Wert: **0.398 W/m<sup>2</sup>K**

Bauteilgruppe: **Boden gegen Luft**

Cwirk, Heizperiode: **50.0 Wh/Km<sup>2</sup>**

Bauteiltyp: **Boden gegen Außenluft**

Cwirk, Nacht: **15.0 Wh/Km<sup>2</sup>**

Hinterlüftung: **nein**

Schichtaufbau von außen nach innen:

Nr.	Name	Dicke [cm]	ruhende Luftschicht	zus.ges. Schicht/Flächenanteil in %	Materialbezeichnung	Wärmeleitfähigkeit [W/mK]	Dichte [kg/m <sup>3</sup> ]	spez. Wärmekapazität [Ws/kgK]
1	Schicht 1	2.00	-	-	Putzmörtel aus Kalk, Kalkzement, hydraulischem Kalk	1.000	1800	1000
2	Schicht 2	14.00	-	-	Holzwohle- Leichtbauplatten, d > 25mm, WLK 065	0.065	360	1470
3	Schicht 3	15.00	-	-	Beton, mittlere Rohdichte, 1800 kg/m <sup>3</sup>	1.150	1800	1000
Summe:		31.000						

Konstruktion: **Decke**

U-Wert: **0.402 W/m<sup>2</sup>K**

Bauteilgruppe: **Dach/Decke gegen Luft**

Cwirk, Heizperiode: **50.0 Wh/Km<sup>2</sup>**

Bauteiltyp: **Flachdach (Neigung <= 30°)**

Cwirk, Nacht: **15.0 Wh/Km<sup>2</sup>**

Hinterlüftung: **nein**

Schichtaufbau von außen nach innen:

Nr.	Name	Dicke [cm]	ruhende Luftschicht	zus. ges. Schicht/Flächenanteil in %	Materialbezeichnung	Wärmeleitfähigkeit [W/mK]	Dichte [kg/m <sup>3</sup> ]	spez. Wärmekapazität [Ws/kgK]
1	Schicht 1	3.00	-	-	Zement-Estrich	1.400	2000	1000
2	Schicht 2	14.00	-	-	Holzwole- Leichtbauplatten, d > 25mm, WLG 065	0.065	360	1470
3	Schicht 3	20.00	-	-	Beton, mittlere Rohdichte, 1800 kg/m <sup>3</sup>	1.150	1800	1000
Summe:		37.000						