KOMBINIERTE STADTKLIMA- UND GEBÄUDEENERGIEMODELLIERUNG ZUR BESTIMMUNG DES ENERGIEBEDARFES VON URBANEN GEBÄUDEN

Fazia Ali-Toudert
Lehrstuhl Klimagerechte Architektur, Fakultät Architektur und Bauingenieurwesen
Technische Universität Dortmund, Deutschland
Email: fazia.alitoudert@tu-dortmund.de

KURZFASSUNG

Dieser Beitrag berichtet über eine Untersuchung zur notwendigen Verknüpfung von Stadtklima- und Gebäudeenergiemodellen im Hinblick auf die Berechnung des Energiebedarfes urbaner Gebäude, da dieser beeinflusst wird von i) dem urbanen Mikroklima, das von den Standard-Klimadaten (z.B. Testreferenzjahre TRY) abweicht, und ii) der Minderung der solaren Gewinne zwischen den benachbarten Gebäuden aufgrund von gegenseitiger Verschattung und Auch das Standortklima und die Gebäudekonstruktion wirken sich stark auf die Außen- und Innenraumklima und deren Weschselwirkungen durch die angrenzende Gebäudehülle.

Die hier verwendete numerische Methodik beruht auf der Kombination des urban canyon Modells TEB und des Gebäudeenergiemodells TRNSYS 16.1, für die Erfassung des Außenklimas bzw. Innenklimas und ihrer Wechselwirkungen. Zielgröße ist der Nutzwärmebedarf (Heizwärmebedarf) und Nutzkältebedarf (Kühlbedarf), der statistisch, basierend auf der Methode der DOE Versuchsplanung, ausgewertet wird. Ausgewählte Ergebnisse für Standorte in mittlerer europäischer Breite und in den Subtropen werden diskutiert.

ABSTRACT

The present paper addresses the necessity of coupling urban climate and building energy models when investigating the energy demand of urban buildings. Indeed, the energy demand of buildings is still often assessed with the assumption of an unobstructed free horizon although this approach, valid in rural sites, is not applicable in dense urban structures for two main reasons: i) the surrounding urban microclimate differs from the standard weather data (e.g. TRY) and ii) the mutual obstructions between buildings decrease the sunlight and daylight potentials and hence the passive solar gains which are decisive in the building energy balance. As well, the climate and the building construction themselves affect the interactions between outdoor and indoor microclimates through the built envelope being a shared interface.

This paper addresses the following issues:

a. How the urban structure modifies the microclimate outdoors, and how would this "new" microclimate affect the heating and cooling energy demands of the building?
b. What are the effects of urban geometry and plan density in combination with solar orientation on the energy demand of an urban building?
c. To which extent are building describers like façade thermal insulation, thermal inertia, window ratio, etc. also decisive?

The numerical method used combines the urban canyon model TEB, and the building energy model TRNSYS 16.1. By means of an extensive parametric study several urban structures are investigated where the effects of the following factors are explored: i) urban context (aspect ratio and solar orientation), ii) building construction (window ratio, thermal insulation and thermal inertia) and iii) climate type: the European mid-latitude location of Mannheim, 49.21 °N and 2 north-african subtropical locations: the hot-humid Algiers 36.34° N and the hot-dry Gharadia 32.24° N. Target quantities addressed in this paper are heating and cooling loads which are analyzed statistically on the basis of the design of experiments DOE method.

The results basically confirm the significance of all the variables investigated, with dominance of some combinations of aspect ratio, thermal insulation, thermal inertia and window ratio. The importance of adjusting air temperatures according to urban context including the vertical profile geometry, urban density and building materials has been demonstrated. The cooling net energy demand is found to be higher when urban air temperatures are used instead of standard climate data as direct consequence of dominating urban heat island effects, especially for the subtropics. Heating net energy demand is in contrary reduced for the same reasonm in particular for Mannheim. Hence, the total net energy demand as sum strongly depends on the site climate, namely whether the dominating needs are for heating or for cooling.

EINLEITUNG

Der Energiebedarf eines Gebäudes wird immer noch häufig bemessen mit der Annahme eines freien, ungehinderten Horizonts. Dieser Ansatz, ist für dichte Stadtstrukturen nicht zutreffend und zwar aus zwei (Haupt)Gründen:

i. ein spezifisches städtisches Klima bzw. Mikroklima entwickelt sich innerhalb eines Stadtgebietes und unterscheidet sich vom Umlandklima, das in einer Standard-Wetterstation aufgezeichnet wird

ii. die gegenseitigen Behinderungen zwischen den Gebäuden, gegeben durch deren Lage, mindern die Sonnen- und Tageslichtpotenziale und demzufolge auch die passiven solaren Gewinne, welche maßgebend sind für die Energiebilanz des Gebäudes.

Diese Studie spricht folgende Fragen an:

1. Inwiefern verändert die städtische Struktur das äußere Mikroklima und inwieweit beeinträchtigt dieses „neue“ Mikroklima den Heiz- und Kühlbedarf eines Gebäudes?
2. Was sind die Auswirkungen der urbanen Geometrie und Bebauungsdichte, in Kombination mit der Sonnenausrichtung, auf den Energiebedarf eines Gebäudes?
3. In welchem Ausmaß ist auch die Baukonstruktion, beschrieben durch die Qualität der Gebäudehüllendämmung, der Wärmeträgheit des Bauwerks und dem Wand- bzw. Fensterflächenanteil, ausschlaggebend?

Zielgrößen dieser Untersuchung sind i) die urbanen Lufttemperaturen und ii) die Heiz-, Kühl- und Gesamtenergielasten. Vorläufige Ergebnisse wurden in (Ali-Toudert 2009) für den mitteleuropäischen Ort Mannheim und in (Ali-Toudert 2010a) für die subtropischen Orte Algier und Ghardaia veröffentlicht.

METHODIK

Die Untersuchungsmethode beruht auf einer numerischen Modellierung. Das Stadtklimamodell Town Energy Balance TEB (Masson 2000) wird mit dem Gebäudeenergiemodell TRNSYS kombiniert (Transsolar 2010), um die thermischen und energetischen Wechselwirkungen zwischen Außen- und Innenräumen zu beurteilen. Das TEB-Modell (Abb. 1) prognostiziert die turbulenten Wärmeflüsse in urbanen Strukturen. Durch eine detaillierte Beschreibung der Straßenschluchtenoberflächen wird die Lösung der Energiebilanzgleichungen an Wänden, Straßen und Dächern ermöglicht. Das TEB Modell wird im „offline“ Modus verwendet, d.h. die atmosphärischen Daten oberhalb des betrachteten Gebietes werden aus einer Klimadatei als Randbedingungen festgelegt. Beide Modelle werden stundenweise für ein ganzes Jahr ausgeführt.

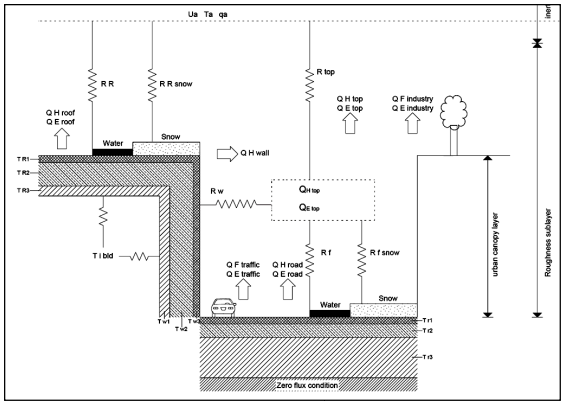

Abbildung 1 Schema des Zweidimensionalen TEB Modells

Simulationen wurden für ein Bürogebäude durchgeführt, das zentral in einer langgestreckten Zeilenbebauung gelegen ist. Der untersuchte Gebüdeabschnitt verfügt über 2 Außenfassaden, die über 5 Etagen verlaufen (s. Abb. 2). Die untersuchten Baukonstruktionen (s. Abb. 3), berücksichtigen sowohl verschiedene Wärmedämmstärken, Massiv- und Leichtbauweisen sowie Lochfassaden bis hin zu vollverglasten Fassaden, entsprechend Tabelle 1.

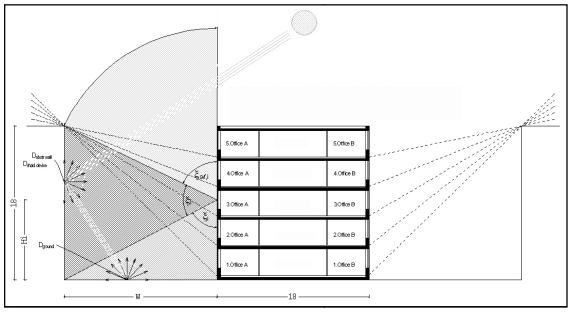

Abbildung 2 Die simulierte urbane Typologie und Bürogebäude

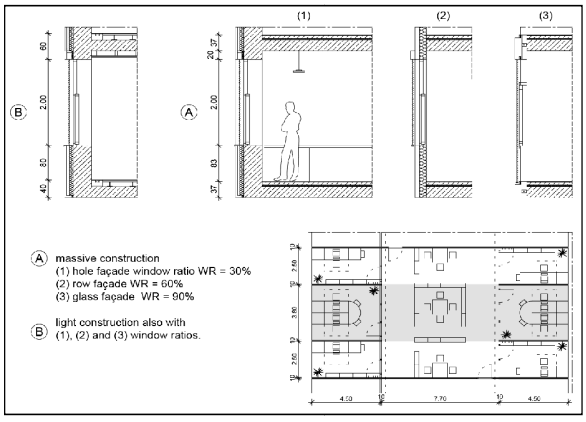

Abbildung 3. Konstruktionsvarianten des untersuchten Bürogebäude

Die Gesamtanzahl an Simulationen mit allen möglichen Kombinationen von Variablen beläuft sich auf 162 für jeden der 3 Standorte (insgesamt 486).

Die Schritt-Werte sind jeweils gleich (weit entfernt), um für die statistische DOE (design of experiments) Analyse vergleichbar zu bleiben, mit dem Ziel, die individuellen Einwirkungen jeder Variablen sowie die 2-Fach- Wechselwirkungen und ihre Hierarchie zu verdeutlichen.

Für die Standorte Algier und Ghardaia wurden die Referenzklimadaten, bereitgestellt durch die Software METEONORM 5.0®, genutzt. Für Mannheim wurde die Reihe N°12 der Testreferenzjahre herangezogen.

Tabelle 1 Simulationseinstellungen für den urbanen Raum und die Gebäudekonstruktion.

Variablen		kodierte Form		
		-1	0	1
Städtischer Kontext				
A =	Vertikales Profil	H/W = 0.2	H/W = 1	H/W = 1.8
B =	Sonnen-orientierung	NS	NOSW	OW
Gebäudekonstruktion				
C =	Fensteranteil	30%: Lochfassade	60%: Bandfassade	90%: Glasfassade
D =	Wärmedämmung	U_{Wand}: 0.15 U_{Dach}: 0.10 $U_{Fenster}$: 0.7	U_{Wand}: 0.40 U_{Dach}: 0.35 $U_{Fenster}$: 1.5	U_{Wand}: 0.65 U_{Dach}: 0.60 $U_{Fenster}$: 2.3
E =	Thermische Trägheit	Leichte Konstruktion	-	Schwere Konstruktion
Klimatische Randbedingungen				
F =	Klima	Mannheim: 49.31°N	Algiers: 36.24°N	Ghardaia: 32.34°N

ERGEBNISANALYSE

Urbane Lufttemperaturen

Abbildung 4 zeigt die minimale Abweichung der urbanen Lufttemperaturen, berechnet mit TEB, für alle Fallbeispiele mit je 1 Kelvin Temperaturspanne.

Es zeigt sich, dass die urbanen Lufttemperaturen hauptsächlich um 1 oder 2 Kelvin höher oder niedriger sind, als die Standard-Klimawerte für alle Standorte, allerdings mit einem klaren Trend zur Erwärmung. Grundsätzlich erfährt der heiß-trockene Wüstenort Ghardaia einen größeren Lufttemperaturanstieg (~ 3K). In Algier dagegen ist die Abkühlung größer. Grund dafür ist wahrscheinlich die dominierende feuchte Luft zusammen mit einer effizienten Verschattung bei häufig klarem Himmel.

Darüber hinaus zeigen die Fehlerbalken den Abweichungsbereich der urbanen Lufttemperatur in Abhängigkeit der unterschiedlichen Kombinationen der Parameter C, D und E. Der Einfluss der Fassadenkonstruktion steigt in Straßen mit hohem Vertikalprofil (H/W = 1.8), bei denen die direkten und diffusen Strahlungsflüsse stärker verändert bzw. reflektiert werden.

Ergänzend zeigt Abb. 5 exemplarisch in einem Fallbeispiel (A = 0, C = -1, D = -1, E = 1) die stündliche und tägliche Entwicklung der urbanen Lufttemperatur für das gesamte Jahr, berechnet mit TEB für Mannheim, Algier und Ghardaia.

.

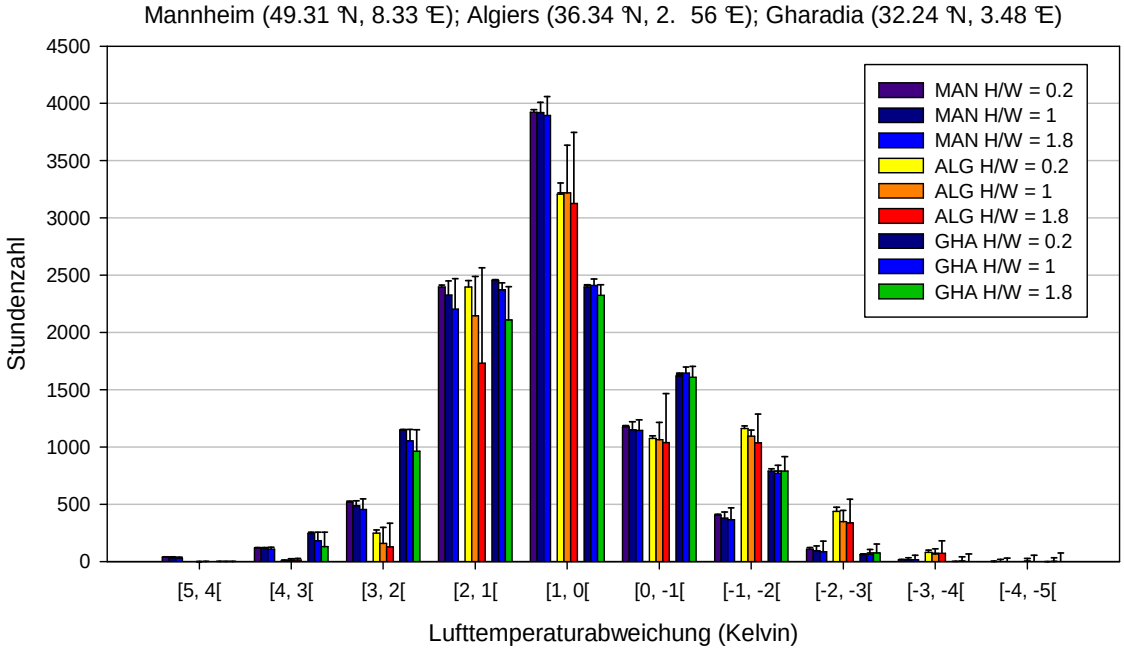

Abbildung 4. Abweichung der Straßenschlucht-Lufttemperatur der Standard-Klimadaten, berechnet mit dem TEB-Modell für Mannheim, Algier und Ghardaia. Die Fehlerbalken stehen für die mögliche Abweichung je nach Gebäudehüllenbau (Wärmedämmung und Wärmespeicherkapazität)

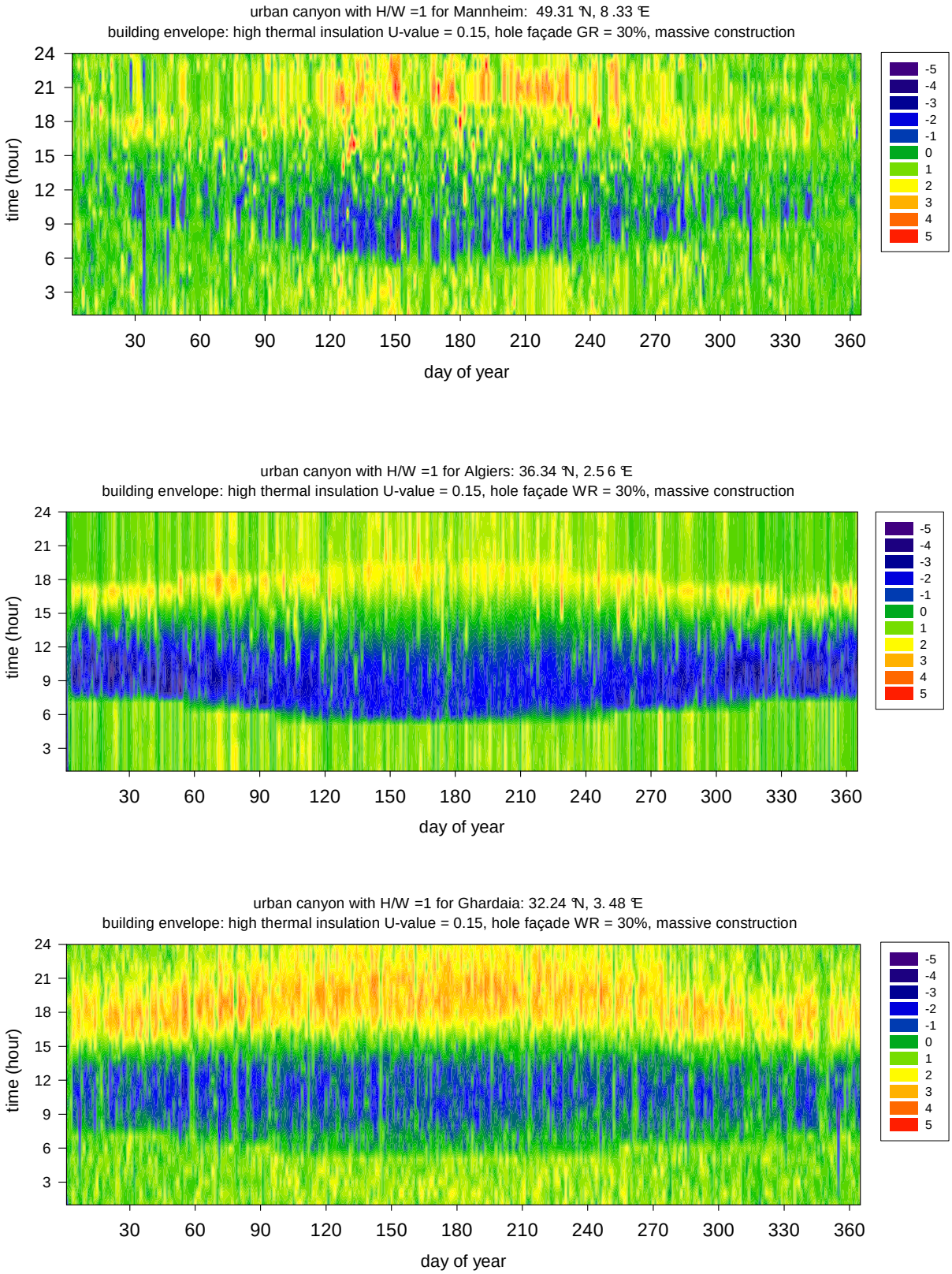

Abbildung 5. Stündliche, tägliche und jährliche Entwicklung der vom TEB prognostizierten urbanen Lufttemperatur für Mannheim, Algier und Ghardaia. Positive Werte entsprechen einer Wärmeinsel im Vergleich zu den als Eingaben verwendeten Standardklimadaten. Negative Werte bedeuten eine Kühlinsel.

Die Abb. 5 bestätigt die Literaturerkenntnisse, dass die Wärmeinsel meistens nachmittags und abends auftritt und in der Sommerzeit von hoher Intensität ist. Spitzen-Wärmewerte werden um 18 Uhr lokaler Zeit erreicht (LST), wenn die am Tag in der Bausubstanz gespeicherte Wärme wieder freigegeben wird. Hingegen tritt die Abkühlung häufiger in den kühlen Morgenstunden auf,, wenn die tiefstehende Sonne zur Verschattung im Straßenraum führt.

Die seltene extreme Abkühlung (bis -5 K) ist auf plötzliches Sinken der Lufttemperatur im Referenzwetterdatensatz zurückzuführen, wobei die urbane Lufttemperatur aufgrund ihrer hohen Wärmespeicherkapazität nur langsam darauf reagiert.

Die unterschiedliche Bilddarstellung in Abb. 5 im Fall Mannheim auf der einen Seite und im Fall der Subtropen auf der anderen Seite ist auf die Quelle der Eingabe-Klimadaten zurückzuführen. Für Mannheim wurde ein Testreferenzjahr-Datensatz verwendet, der hauptsächlich aus langfristigen Messdaten (mit statistischer Anpassung) stammt, während die Quelldaten für die Subtropen mit einer Software ermittelt wurden, die in diesen zwei Fällen nur eingeschränkt Messdaten zur Verfügung hatte.

Nutzwärme- und Nutzkältebedarf

Nachdem die urbanen Lufttemperaturen anhand TEB angepasst wurden, wurde TRNSYS 16.1 zur Simulation des thermischen Verhaltens des Gebäudes eingesetzt. Dabei wurden alle Außenbedingungen, inklusive der verminderten Himmelsicht und Tageslicht- und Solareintrag, verursacht durch die Nachbarbebauung, berücksichtigt.

Abbildung 6 sowie die weiteren Abbildungen zeigen exemplarisch den Fall Mannheim. Im Allgemein ist in Abb. 6 klar zu erkennen, dass aufgrund der höheren Lufttemperatur der Stadtklimadaten zur Berechnung eines geringeren Nutzwärmededarfs führt Eine Ausnahme dazu bildet allerdings der enge Canyon in Kombination mit Leichtbauweise bei dem die fehlende Solargewinne, durch Verschattung der Fassaden, einen höheren Heizwärmebedarf verursacht, insbesondere weil die leichte Bauweise keine Wärmespeicherung ermöglicht. Der Bedarf an Kühlung hingegen ist, wenn das Stadtklima betrachtet wird, in allen Fällen größer, denn die höchsten Wärmeinseleffekte treten im Sommer auf, verbunden mit einem erhöhten Risiko derÜberhitzung.

Darüber hinaus listet die Tabelle 2 für Mannheim die Parameterkombinationen auf, die zu minimalen und maximalen Nutzwärmebedarf, Kühlbedarf und ihre Addition führen. Dabei wird unterschieden ob (a) Standard-Klimadaten oder (b) Stadtklimadaten verwendet werden, bzw. deren (c) Abweichung Diese Darstellung ermöglicht es, einen zusammenfassenden Überblick über die zahlreichen Fallstudien zu bekommen.

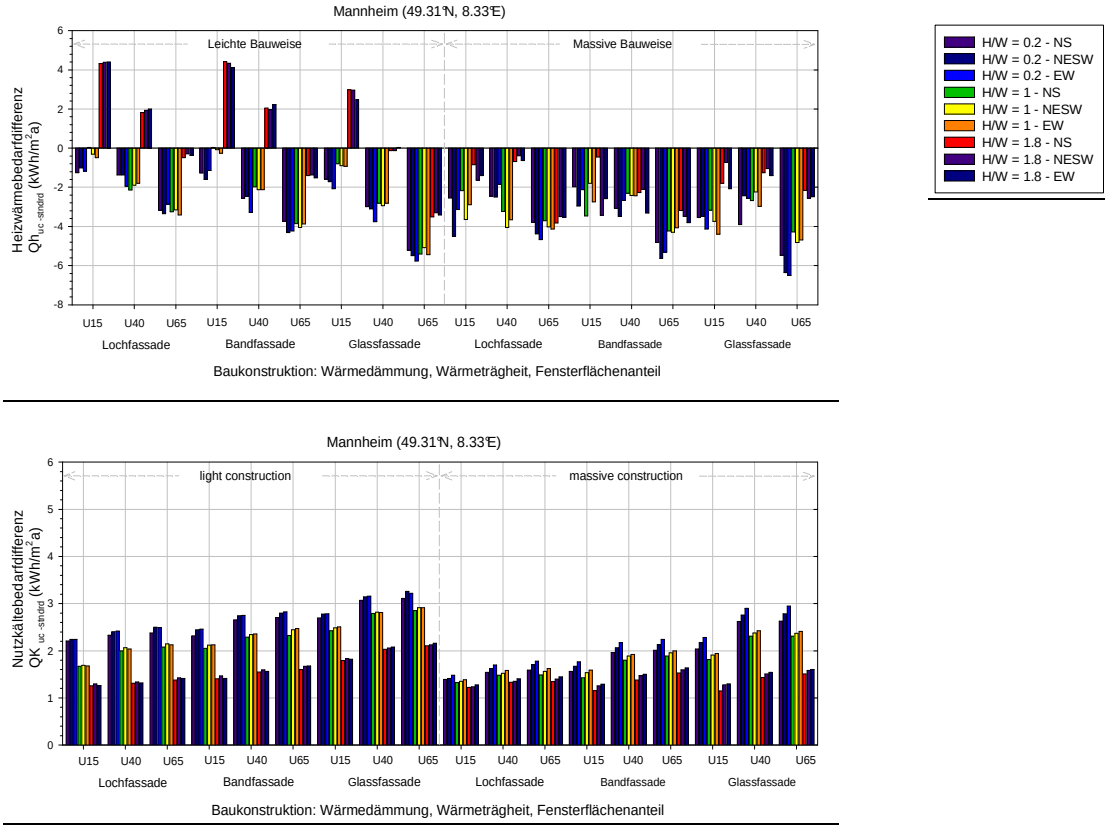

Abbildung 6.Energiebedarfdifferenz ($Q_{urban\ climate} - Q_{standard}$) zwischen den 2 Datenreihen: 1) mit Stadtklimadaten und 2)mit Standardklimadaten für Heizung und Kühlung

Unter Verwendung von Standardklimadaten ist der Energiebedarf des gesamten Gebäudes für:

- Heizung bei der Kombination von Ganzglass-Leichtbaufassade mit geringer Wärmedämmung, überwiegend für NO-SW bzw. O-W (Solar)Ausrichtung am größten und unabhängig von dem Höhen-Breiten-Verhältnis des canyons. Diese Kombination führt ebenso zu einem maximalem Kühlbedarf, allerdings auch bei mäßiger Wärmedämmung, aber nicht in Verbindung mit engen Straßenschluchten. Die Ausrichtung zur Sonne ist hierbei irrelevant. In der Summe von Heizwärme- und Nutzkältebedarf ist die Kombination Hochverglasung, geringe Wärmedämmung und Leichtbau der energiebedürftigste Fall, denn der Nutzwärmebedarf stellt einem Anteil von über 80 %, gegenüber knapp 20% Nutzkältebedarf, dar. Das vertikale Profil und die Solarausrichtung sind ebenfalls nicht relevant. Gründe dafür sind i) der meist bedeckte Himmel mit einem überwiegende Anteil an Diffusstrahlung und ii) die Betrachtung des gesamten Gebäudes d.h. 2 Ausrichtungen gleichzeitig.
- Demzufolge wird ein minimaler Nutzwärmebedarf durch opake Fassaden mit kleinem Fensterflächenanteil, hoher Wärmedämmung, und massiver Bauweise erreicht und das unabhängig von der Straßengeometrie oder der Solarausrichtung. Das gilt ebenfalls für den minimalen Kältewärmebedarf, wobei die Wärmedämmung hier von geringer Bedeutung ist. Beim Gesamten Nutzenergiebedarf für Heizung und Kühlung führt eine hohe Wärmedämmung und eine große Wärmeträgheit zusammen mit geringen bzw. mittleren Fensterflächenanteilen und relativ hoher Wärmedämmung, wie beim Heizen zu den niedrigsten Werten.

Bei der Verwendung von Stadtklimadaten, können, im Vergleich zum ersten Datensatz, folgende Unterschiede beobachtet werden:

- Das vertikale Profil wird relevanter für die maximalen Werte des Heizwärme- und Kühlbedarfs.. Nur breite Straßen führen zu mehr Kühlbedarf, während enge Straßen den Bedarf an Heizenergie erhöhen. Grund dafür sind die i.R. die, im Vergleich zum Standard-Klimadatensatz, höheren Lufttemperaturen im Sommer und die tieferen Luftemperaturen im Winter . Die minimalen Werte bleiben hingegen relativ unberührt.
- Im Vergleich sind die absoluten Werte für die Heizung niedriger und für die Kühlung höher und das sowohl für die Minima als auch für die Maxima. In der Summe weist die Verwendung von Stadtklimadaten leicht niedrigere Werte des Energiebedarfs auf. Das ist nicht überraschend, da aufgrund vorhandener Wärmeinseln mit ihren entsprechenden Temperaturnrsmilderungeffekten auf die Winterbedingungen der Energiebedarf während der in Mannheim dominierenden Heizperiode gemindert wird.

Tabelle 2. Parameterkombinationen für minimale und maximale Nutzwärme- und Nutzkältebedarfswerte in Mannheim

MANNHEIM (49.31 °N, 8.33 °E)

mit Standardklimadaten	Heizung H		Kühlung K		H &K	
	min.	max.	min.	max.	min.	max.
A vertikales Profil	-	-	-	-1, 0	-	-
B Solarausrichtung	-	(-1), 0, 1	-	-	-	-
C Fensterflächenanteil	-1, 0	1	-1, (0, 1)	1	-1, 0	1
D Wärmedämmung	-1, 0	1	-	0, 1	-1, 0	1
E Wärmeträgheit	1	-1	1	-1	1	-1
min.	26,5		1,75		28,7	
max.	70,28		20,73		87,5	
x < min. +10%	30,88		3,65		34,58	
x> max. - 10%	65,90		18,83		81,62	
Q Bereich	43,78		18,98		58,8	

mit Stadtklimadaten	heating H		cooling C		H &C	
	min.	max.	min.	max.	min.	max.
A vertikales Profil	-	0, 1	-	-1	-	-
B Solarausrichtung	-	-	-	-	-	-
C Fensterflächenanteil	-1, 0, (1)	1	-1, 0, (1)	1	-1, 0	1
D Wärmedämmung	-1, 0	1	-	0, 1	-1, 0	1
E Wärmeträgheit	1	-	1	-1	1	-1
min.	24,73		2,95		28,61	
max.	66,97		23,94		85,06	
x < min. +10%	28,95		5,05		34,26	
x> max. - 10%	62,75		21,84		79,42	
Q Bereich	42,24		20,99		56,45	

Werte in kWh/m^2.a. Die kodierte Form, wie in Tabelle 1, wird hier verwendet.
Das minus Symbol "-" bedeutet dass alle 3 Varianten -1, 0 und 1 gleich auftreten

Wie aus der Tabelle 3 zu entnehmen ist, gilt diese Feststellung allerdings nicht für die untersuchten subtropischen Orte Algier und Ghardaia, wo der Bedarf an Kühlenergie das Hauptproblem darstellt. Hier wirkt sich das Stadtklima negativ auf das thermische Verhalten des Gebäudes mit einem steigendem Bedarf an Energie aus, um die Überhitzung der Räume zu vermeiden.

Tabelle 3. Vergleich der minimalen und maximalen Nutzenergiebedarfe für Standard- und Stadtklimadaten für Mannheim, Algier und Ghardaia

Nutzenergiebedarf (kWh/m^{2}a) for:			Heizung H	Kühlung K	H & K
MANNHEIM	standard Klimadaten	min.	26,5	1,75	28,7
		max.	70,28	20,73	87,5
	Stadtklima-daten	min.	24,73	2,95	28,61
		max.	66,97	23,94	85,06
ALGIER	standard Klimadaten	min.	21,14	25,68	56,89
		max.	41,43	74,39	99,02
	Stadtklima-daten	min.	20,76	27,85	60,11
		max.	62,56	78,09	100,28
GHARDAIA	standard Klimadaten	min.	13,66	111,16	130,36
		max.	26,95	200,18	217,82
	Stadtklima-daten	min.	13,61	123,2	140,47
		max.	26,98	221,21	235,83

Abbildung 7 stellt für die Stadtklimadatenreihe die wichtigsten Haupteffekte und 2-fach-Wechselwirkungen der untersuchten Parameter dar, Die große Rolle der Wärmedämmung D und des Fensterflächenanteils C u. A. im Zusammenhang mit der Bauart E und der urbanen Geometrie A ist hier eindeutig. Das vertikale Profil A hingegen ist wie erwartet für diese geographische Lage und dieser Klimazone weniger entscheidend. Die Solarausrichtung B ist nicht relevant, denn die hier angezeigten Ergebnisse sind Mittelwerte für alle 10 Zonen des untersuchten Gebäudes.

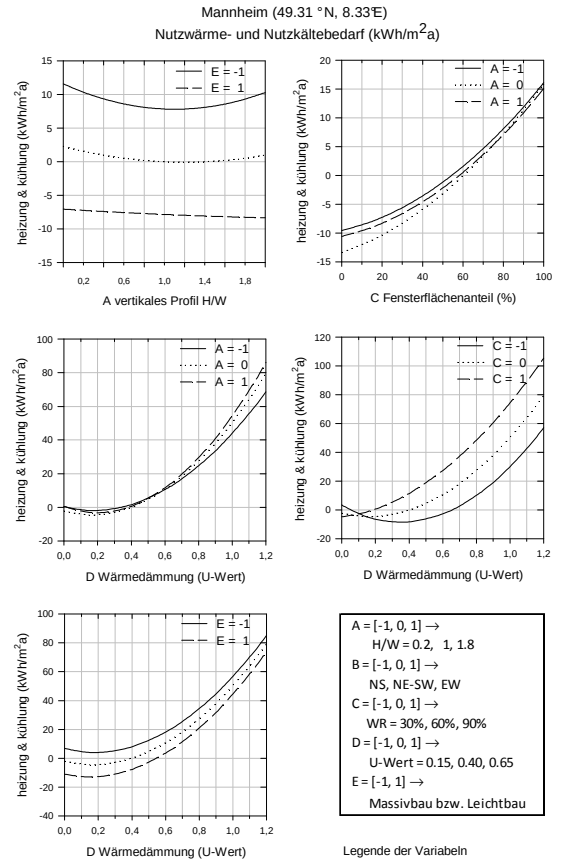

Abbildung 7. Haupteffekte und 2- fach-Wechselwirkungen aller untersuchten Parameter auf den Gesamten Nutzenergiebedarf

SCHLUSSFOLGERUNG

Diese Untersuchung zeigte den Zusammenhang zwischen der städtebaulichen Ebene und der Gebäudeebene in Bezug auf Klima und Energiebedarf. Die Ergebnisse weisen nach, dass die Wärmeinsel bzw. Kühlinsel zeitlich und räumlich sehr variabel ist und nur anhand von numerischer Modellierung (wenn nicht messtechnisch) mit ausreichender Genauigkeit abgebildet werden kann (auch Ali-Toudert 2010b). Es ist nicht fachgemäß die urbane Lufttemperatur „pauschal“ auf 1 oder mehrere Kelvin höher als die Landklimadaten zu setzen, um die Stadtklimaeffekte in Gebäudeanalysen mit zu berücksichtigen. Des Weiteren zeigte diese Studie, dass die urbane Geometrie sowie die Baukonstruktion eine entscheidende Rolle im thermischen Verhalten des städtischen Gebäudes spielen. Eine Hierarchisierung dieser Parameter ist möglich. Ein wesentlicher Nachteil dieser Methodik ist ihr Zeitaufwand, so dass sie bei der alltäglichen Thermischen Gebäudesimulation durch Architekten bzw. Bauingenieure nicht denkbar. Deshalb ist es notwendig ein Rechenwerkzeug zu entwickeln, das gleichzeitig Außen- und Innenraumklima und deren Auswirkungen modelliert. Diese Aufgabe ist eine weitere Komponente des Projektes.

DANKSAGUNG

An die Deutsche Forschungsgemeinschaft: www.dfg.de für die finanzielle Förderung.

LITERATUR

Ali-Toudert, F. 2010a. Heating and cooling Energy Demand of urban office buildings in the subtropics: Relevance of the urban microclimate, urban geometry and building construction. 9th RHEVA Conference CLIMA. Antalya. May 9-12.2010

Ali-Toudert, F. 2010b. Sensitivity analysis on the effects of urban structure properties on the urban microclimate and energy demand of urban buildings. WREC Congress. 25-30 Sept. 2010. Abu Dhabi. United Arab Emirates.

Ali-Toudert, F. 2009. Energy Efficiency of urban buildings: Significance of urban geometry, building construction and climate. International Conference CISBAT, Lausanne, Switzerland. Sep. 2-3 2009

Masson, V. 2000. A physically-based scheme for the urban energy budget in atmospheric models, Boundary-Layer Meteorology, 94, 357-397.

TRANSSOLAR 2010.http://www.transsolar.com/