

Christina Rullán Lemke

ArchitekturForm & SolarEnergie

*Eine globale Formenstudie
zur Untersuchung des Einflusses der Gebäudegeometrie
auf Potentiale solarer Energieversorgung über die Gebäudehülle*



Cuvillier Verlag Göttingen
Internationaler wissenschaftlicher Fachverlag

ArchitekturForm & SolarEnergie

*Eine globale Formenstudie
zur Untersuchung des Einflusses der Gebäudegeometrie
auf Potentiale solarer Energieversorgung über die Gebäudehülle*

Vom Promotionsausschuss der
Technischen Universität Hamburg-Harburg
zur Erlangung des akademischen Grades

Doktor-Ingenieurin (Dr.-Ing.)

genehmigte Dissertation

von

Dipl.-Ing. Christina Rullán Lemke

aus Hamburg

Hamburg 2009

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

1. Aufl. - Göttingen : Cuvillier, 2010

Zugl.: (TU) Hamburg-Harburg, Univ. Diss., 2009

978-3-86955-371-9

Titelgrafik Buchumschlag: „Bauklötze“
freundlicher Weise zur Verfügung gestellt von Stefan David
(www.stefan-david.de), genehmigte eigene Überarbeitung

1. Gutachter: Prof. Dr.-Ing. habil. Hans-Jürgen Holle

2. Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Gerhard Schmitz

Prüfungsvorsitzender: Prof. Dr.-Ing. Joseph Pangalos

Weitere Gutachter: Prof. Dr. E.h. Dr.-Ing. habil. Josef Schlattmann

Prof. Dr. rer. pol. Sönke Knutzen

Tag der mündlichen Prüfung: 06.11.2009

© CUVILLIER VERLAG, Göttingen 2010

Nonnenstieg 8, 37075 Göttingen

Telefon: 0551-54724-0

Telefax: 0551-54724-21

www.cuvillier.de

Alle Rechte vorbehalten. Ohne ausdrückliche Genehmigung des Verlages ist es nicht gestattet, das Buch oder Teile daraus auf fotomechanischem Weg (Fotokopie, Mikrokopie) zu vervielfältigen.

1. Auflage, 2010

Gedruckt auf säurefreiem Papier

978-3-86955-371-9

*Für Johanna,
meinen Sonnenschein*

Danksagung

Die vorliegende Arbeit durfte ich als externe Doktorandin und später als Wissenschaftliche Mitarbeiterin am Institut für Angewandte Bautechnik der Technischen Universität Hamburg-Harburg schreiben. Ich möchte all jenen ganz herzlich danken, die mich auf meinem Weg unterstützt und begleitet haben:

- meinem Doktorvater Prof. Dr.-Ing. habil. H.-J. Holle für die engagierte, motivierende und vertrauensvolle Betreuung meiner Arbeit, seine Begeisterungsfähigkeit und Geduld sowie die vermittelte Freude am wissenschaftlichen Arbeiten
- meinem Zweitgutachter Prof. Dr.-Ing. G. Schmitz für viele neue Denkanstöße und wertvolle Hinweise zu angrenzenden Themenfeldern
- dem Prüfungsvorsitzenden Prof. Dr.-Ing. J. Pangalos sowie den zusätzlichen Gutachtern Prof. Dr. E.h. Dr.-Ing. habil. J. Schlattmann und Prof. Dr. rer. pol. S. Knutzen für ihr Engagement und die würdige Gestaltung meiner mündlichen Prüfung
- meinem externen Berater Dr.-Ing. W. Moré für die fachliche Expertise und seine ansteckende Leidenschaft zum Thema Sonnenenergie
- der Doktorandengruppe des Instituts: Dr. M.D. Scherz, Dr. D. Scherz, B. Stein, T. Wahner, B.-A. Dose und W. Kaul für hilfreiche und konstruktive Kritik – vor allem aber für ihre Freundschaft
- allen Mitarbeitern des Instituts: Oberingenieur M. Ludolph, A. Grund-Kindler, F. Switon sowie N. Laude für ihre Hilfsbereitschaft in der „heißen Phase“
- meinen Stipendiengebern: dem Bremer Energiekonsens sowie der Hamburgischen Förderung des Wissenschaftlichen Nachwuchses der TUHH für eine großzügige insgesamt dreijährige Forschungsfinanzierung
- Antonio, Astrid, Bettina, Britta, Daniela, Julia, Jyotsna, Laura, Luzmila, Patricia, Steffi und Svenja für ihre kostbare Freundschaft
- meiner Familie, insbesondere meinen Eltern, für Ermutigung und Unterstützung bei der Verwirklichung meiner Träume, für verlässlichen Rückhalt und ihre bedingungslose Liebe
- meinem Mann Henning und meiner Tochter Johanna für alles

Kurzfassung

ArchitekturForm & SolarEnergie: Eine solare Gebäudeformenstudie

Durch den großflächigen Einsatz gebäudeintegrierter Solartechnologien werden Gebäude zu Energieerzeugern. Mittels einer Optimierung der Ausrichtung potentieller Empfangsflächen wird jedoch das eingeschlossene Bauvolumen in Form und Nutzbarkeit beeinflusst. Die vorliegende Forschungsarbeit beschäftigt sich daher mit der Frage, welche Gebäudeformen möglichst große potentielle Empfangsflächen für solare Strahlung bei gleichzeitig möglichst geringen thermischen Verlustflächen bereitstellen (Min-Max-Aufgabe) und wie eine Anpassung der architektonischen Form an lokale Vorgaben der solaren Strahlung erfolgen kann. Die zentrale Fragestellung der Arbeit lautet, ob mit dem konventionellen, meist orthogonalen Formenkanon des Architekturentwurfes bereits gute Grundlagen zur solaren Energiegewinnung geschaffen wurden oder ob erst durch die Entwicklung einer solaren Formsprache die Potentiale zur gebäudehüllenintegrierten Energiegewinnung deutlich gesteigert werden könnten. Das methodische Vorgehen basiert auf der Variation von Gebäudeformen und der Berechnung des jeweiligen solaren Einstrahlungspotentials an weltweiten Standorten unterschiedlichster klimatischer und strahlungsgeometrischer Bedingungen vom Nordpol bis zum Äquator. Für eine breite Vielzahl möglicher Gebäude-Standort-Kombinationen werden zur energetischen Bilanzierung der Gebäudehülle thermische Verluste und solare Gewinne gegeneinander gerechnet. Auf einer Zeitachse werden die qualitativen Hüllenparameter zum Wärmedurchgangskoeffizienten sowie zum Wirkungs- und Belegungsgrad solarer Technologien variiert, um zukünftige Entwicklungen abbilden zu können. Eine Parameterstudie untersucht den Einfluss der Gebäudegeometrie auf das solare Potential einer Form, eine Rotationsstudie das Optimierungspotential der Gebäudeorientierung. In einer Potentialstudie wird abschließend das globale Potential solarer Vollversorgung über die Gebäudehülle geschätzt. In ergänzenden Studien werden mathematisch-funktionale Zusammenhänge sowie neue energetisch-geometrische Kennziffern herausgearbeitet. Ziel der Arbeit ist die Darstellung der Wechselbeziehungen zwischen solarer Energiegewinnung und architektonischer Formsprache sowie die Ableitung solarer Entwurfsprinzipien als Hilfsinstrument für Planer zur Entwicklung solar-optimierter Gebäudeformen im Sinne von „form follows energy“.

Nomenklatur

a) Lateinische Formelzeichen

Symbol	Bedeutung	Einheit
a_k	Azimutwinkel der Empfangsfläche	°
a_r	Relativer Azimut	°
a_s	Azimutwinkel der Sonne	°
A	Gesamtoberfläche	m^2
A_s	Sonnenoberfläche	m^2
AM	relative optische Masse (Airmass)	-
c	Lichtgeschwindigkeit	m/sec
d	Deckungsgrad	%
$d_{E\lambda}$	Spektrale Strahldichte	$W/m^2 sr Hz$
d_s	Strecke	m
e^-	Elektron	-
e^+	Positron	-
E_0	Extraterrestrische Strahlung auf die Horizontale	W/m^2
E_B	Bindungsenergie	eV
E_G	Globalstrahlung	W/m^2
E_{kor}	Exzentrizitäts-Korrektur-Faktor	-
E_S	Tägliche Sonnenstrahlung auf wirksame aktive Flächen	$W/m^2 d$
E_T	Durchschnittlicher Transmissionswärmeverlust	W/m^2
f	Faktor	-
F	Fläche	m^2
	Projektion wirksamer aktiver Flächen	m^2
G	Oberfläche gegen Erdreich (Gebäudegrundfläche)	m^2
$\dot{G}$	Globalstrahlung	W/m^2
$\dot{G}_s$	Flächenspezifische Ausstrahlung der Sonne	W/m^2
G_t	Gradtage	-
h_m	Höhe über dem Meeresspiegel (NN)	m
I_0	Intensität extraterrestrischer Strahlung auf die Horizontale	W/m^2
I_{0n}	Extraterrestrische Strahlungsstärke in der Normalen	W/m^2
I_G	Intensität der Globalstrahlung	W/m^2
I_{SC}	Solarkonstante	W/m^2
k_t	Clearness Index	-
I_m	Leistung mittäglicher Sonneneinstrahlung	W/m^2

L_0	Geographische Länge	°
L_S	Bezugsmeridian	°
m	Masse	kg
	Optische Masse	-
	Monatsmittlerer Tag	-
m_k	Kernmasse	u
m_n	Neutronenmasse	u
m_p	Protonenmasse	u
Δm	Massendefekt	u
M_E	Erdmittelpunkt	-
M_S	Sonnenmittelpunkt	-
n	Anzahl	-
	Tageszahl	-
$\vec{n}$	Normalenvektor	-
$\bar{n}$	Mittlere tägliche Sonnenscheindauer	h
$\bar{N}$	Maximale mögliche tägliche Sonnenscheindauer	h
N	Neutronen	-
	Gesamtbedeckungsgrad	Octa
O	Oberfläche gegen Luft (Gebäudehüllfläche)	m ²
p	Luftdruck	Pa
p_s	Sättigungsdampfdruck	Pa
P	Protonen	-
	Punkt auf der Erdoberfläche	-
$\dot{Q}$	Wärmestrom	W
r	Radius	m
R	Geometrischer Faktor	-
$\vec{s}$	Sonnenrichtungsvektor	-
t_d	Tageslänge	-
t_λ	Spektraler Transmissionsgrad	-
t_{NC}	Relativer Direktstrahlungsanteil	-
t_S	Sonnenzeit	Uhr
T	Lufttemperatur	K
T_L	Trübungsfaktor	-
T_U	Umgebungstemperatur	K
U	Wärmedurchgangskoeffizient	W/m ² K
v	Geschwindigkeit	m/sec
V	Volumen	m ³
w	Wasserdampfgehalt der Atmosphäre	g/m ³

b) Griechische Formelzeichen

Symbol	Bedeutung	Einheit
α	Elevation (Sonnenhöhe)	°
$\bar{\alpha}$	Durchschnittlicher Absorptionsgrad	%
β	Neigungswinkel	°
δ	Deklination	°
Δ	Differenz	-
ϕ	Relative Feuchte	%
Φ_s	Abgestrahlte Energie	W
φ	Breitengrad	°
Γ	Tageswinkel	-
η	Wirkungsgrad	%
η_{Fs}	Solarer Formwirkungsgrad	-
λ	Wellenlänge	m
	Längengrad	°
μ	Schwächungsfaktor, Proportionalitätsfaktor	-
$\theta_{Dir,K}$	Einfallswinkel für Direktstrahlung auf die Empfangsfläche	°
θ_z	Strahlungsrichtung, Zenitwinkel der Sonne	°
ϑ	Temperatur	K
ρ	Reflexionskoeffizient	%
σ	Stefan-Boltzmann-Konstante	W/m ² K ⁴
τ	Transmissionsgrad	%
ω	Stundenwinkel	°

c) Indizes

Symbol	Bedeutung
<i>a</i>	aussen
<i>A</i>	Mie-Streuung an Aerosolen
<i>at</i>	Himmel
<i>AU</i>	Astronomical Unit
<i>B</i>	Beam
<i>c</i>	Wolken
<i>CD</i>	Clear Dry
<i>D</i>	Diffuse
<i>DMR</i>	Diffusstrahlung-Mehrfachreflexion

<i>Diff</i>	Diffusstrahlung
<i>Dir</i>	Direktstrahlung
<i>E</i>	Erde
<i>el</i>	elektrisch
<i>G</i>	Permanentgasmoleküle
<i>g</i>	Boden
<i>ges</i>	gesamt
<i>Glob</i>	Globalstrahlung
<i>HGT</i>	Heizgradtage
<i>hor</i>	horizontal
<i>i</i>	innen
<i>K</i>	Empfangsfläche (Kollektor)
<i>KGT</i>	Kühlgradtage
<i>max</i>	Maximum
<i>min</i>	Minimum
<i>n</i>	unter Normalbedingungen
<i>O₃</i>	Ozon
<i>R</i>	Rayleigh-Streuung an Molekülen
<i>RC</i>	Real, cloudy
<i>RNC</i>	Real, no clouds
<i>Ref</i>	Reflektierte Strahlung
<i>S</i>	Sonne
<i>SA</i>	Sonnenaufgang
<i>Std</i>	Stunde
<i>SU</i>	Sonnenuntergang
<i>therm</i>	thermisch
<i>W</i>	Wasserdampf

d) Abkürzungen

Symbol	Bedeutung
<i>a.m.</i>	Vormittags (ante meridiem)
<i>A/V</i>	Oberflächen-Volumen-Verhältnis
<i>B</i>	Breite
<i>CDD18</i>	Kühlgradtage (Cooling Degree Days) bezogen auf 18°C
<i>CFC</i>	Cumulativ-Frequency-Curves
<i>COP</i>	Leistungszahl (Coefficient of Performance)

<i>DH</i>	Doppelhaus
<i>EEG</i>	Erneuerbare-Energien-Gesetz
<i>EFH</i>	Einfamilienhaus
<i>EGZ</i>	Entwurfsgütezahl
<i>EW</i>	Einwohner
<i>GF</i>	Großform
<i>H</i>	Höhe
<i>HDD18</i>	Heizgradtage (Heating Degree Days) bezogen auf 18°C
<i>HH</i>	Hochhaus
<i>MEZ</i>	Mitteleuropäische Zeit
<i>MFH</i>	Mehrfamilienhaus
<i>MOZ</i>	Mittlere Ortszeit
<i>N</i>	Nord
<i>NTP</i>	Normalbedingungen (Normal Temperature and Pressure)
<i>O</i>	Ost
<i>p.m.</i>	Nachmittags (post meridiem)
<i>ppm</i>	Parts per million
<i>RH</i>	Reihenhaus
<i>S</i>	Süd
<i>SCE</i>	Solar Collection Envelope
<i>SRE</i>	Solar Rights Envelope
<i>SV</i>	Solar Volume
<i>T</i>	Tiefe
<i>W</i>	West
<i>WOZ</i>	Wahre Ortszeit

Inhaltsverzeichnis

Kapitel 1	Einleitung	1
1.1	Problemaufriss und Motivation	1
1.2	Aufbau der Arbeit.....	5
Kapitel 2	Präfossile Solararchitektur	7
2.1	Sonne und Architektur	7
2.2	Autochthone Solararchitektur	8
2.3	Beispiele regionalspezifischer Solararchitektur	9
2.3.1	Tropen: Batak-Häuser	9
2.3.2	Wüste: Kasbah	10
2.3.3	Mediterran: Megaron	12
2.3.4	Mediterran: Priene (Solare Siedlungsform).....	14
2.4	Kriterien einer solaren Gebäudeform.....	15
Kapitel 3	Postfossile Solararchitektur	19
3.1	Energiedesign.....	19
3.2	Erneuerbare Energien in der Architektur	21
3.3	Architektonische Relevanz	23
3.4	Anforderungen zukünftiger Solararchitektur	25
3.4.1	Amplifikation	26
3.4.2	Konzentration.....	26

3.4.3	Kombination.....	27
3.4.4	Integration.....	27
3.4.5	Substitution.....	27
3.4.6	Adaption.....	28
3.5	Gebäudeform und Energie.....	30
3.6	Verlustminimierungs- versus Gewinnmaximierungsstrategie.....	32
3.7	Forschungsfrage.....	34
Kapitel 4	Formbeeinflussende energetische Gebäudekenngrößen (Stand der Forschung)	35
4.1	Oberflächen-Volumen-Verhältnis (A/V) - Verlustminimierung.....	35
4.1.1	Definition.....	35
4.1.2	Kritische Betrachtung des A/V-Verhältnisses.....	41
4.2	EGZ (<i>Entwurfsgütezahl</i>) – Transmissionsgewinnmaximierung.....	41
4.2.1	Definition.....	41
4.2.2	Kritische Betrachtung der Entwurfsgütezahl.....	46
4.2.3	Kritische Betrachtung der Kombination von A/V und EGZ.....	48
4.3	<i>Solar Envelope</i> - Verschattungsminimierung.....	49
4.3.1	Definition.....	49
4.3.2	Konstruktionsprinzip des <i>Solar Envelopes</i>	51
4.3.3	Ermittlung räumlicher Einflüsse.....	55
4.3.4	Mathematische Konstruktion des <i>Solar Envelopes</i>	56
4.3.5	Programme zur Berechnung eines <i>Solar Envelopes</i>	58
4.3.6	Einfluss der Straßenführung.....	60
4.3.7	Kritische Betrachtung des <i>Solar Envelopes</i>	63
4.4	Zusammenfassung.....	67
Kapitel 5	Untersuchungsaufbau (Methode)	69
5.1	Forschungsansatz.....	69
5.2	Methodisches Vorgehen.....	69
5.3	Ablaufdiagramm.....	72

Kapitel 6	Anlegen der Datenbanken	73
6.1	Generierung der Formenreihen	73
6.1.1	Formengruppe 1	74
6.1.2	Formengruppe 2	75
6.1.3	Formengruppe 3	75
6.1.4	Formengruppe 4	76
6.1.5	Formengruppe 5	76
6.1.6	Formengruppe 6	77
6.1.7	Formengruppe 7	78
6.1.8	Grundvolumina	79
6.2	Ermittlung repräsentativer Standorte	79
6.2.1	Kurzeinführung in die Klimatologie	80
6.2.2	Effektive Klimaklassifizierung nach Köppen.....	82
6.2.3	Einführung temperaturrelevanter Klimazonen.....	84
6.2.4	Kurzeinführung in die Demographie	88
6.2.5	Vorgehen zur Ermittlung der Bevölkerungsgewichtung	89
6.3	Erstellung der Parametermatrix	94
6.3.1	Dämmstandard	94
6.3.2	Solarer Wirkungsgrad	94
6.3.3	Belegungsgrad.....	96
6.3.4	Parametermatrix und Zeitachse	97
Kapitel 7	Festlegung der Vorgaben und Untersuchungsgrenzen	98
7.1	Untersuchungsgrenzen – Formen	98
7.2	Untersuchungsgrenzen – Standorte	99
7.3	Untersuchungsgrenzen – Parameter	99
7.4	Untersuchungsgrenzen – Berechnung	100
Kapitel 8	Grundlagen der Berechnung thermischer Verluste (Formelwerk)	103
8.1	Benötigte Eingangsgrößen	103
8.2	Entwicklung einer Formel zur Abschätzung thermischer Verluste	104

Kapitel 9	Grundlagen der Berechnung solarer Strahlung (Formelwerk)	106
9.1	Verwendete Literatur	107
9.2	Physikalische Daten der Sonne	109
9.3	Energieentstehung in der Sonne	110
9.4	Extraterrestrische Strahlung E_0 und Solarkonstante I_{Sc}	112
9.5	Atmosphärendurchgang	115
9.5.1	Aufbau der Atmosphäre	115
9.5.2	Optisches Fenster	117
9.5.3	Strahlungsspektrum	117
9.6	Modellierung der Erdatmosphäre	118
9.6.1	CD-Atmosphäre (clear, dry)	119
9.6.2	RNC-Atmosphäre (real, no clouds)	119
9.6.3	RC-Atmosphäre (real, cloudy)	119
9.7	Extinktionsvorgänge beim Atmosphärendurchgang	119
9.7.1	Rayleigh-Streuung	121
9.7.2	Mie-Streuung	121
9.7.3	Mehrfachreflexion zwischen Himmel und Umgebung	122
9.7.4	Gesamtbetrag der Diffusstrahlung $E_{DMR,RNC}$	123
9.8	Air Mass AM	124
9.8.1	Extinktion in der CD-Atmosphäre	126
9.8.2	Absorption durch Ozon	127
9.8.3	Absorption durch Permanentgase	127
9.8.4	Streuung an Molekülen	128
9.8.5	Absorption durch Wasserdampf	128
9.8.6	Streuung an Aerosolen	129
9.9	Einfluss der Bewölkung auf die Solarstrahlung	130
9.9.1	Wolkenklassifikation	132
9.9.2	Einfluss der Bewölkung auf den Direktstrahlungsanteil	133
9.9.3	Einfluss der Bewölkung auf den Diffusstrahlungsanteil	133
9.9.4	Bedeckungsgrad	133

9.10	Global-, Direkt- und Diffusstrahlung.....	134
9.11	Direktstrahlung auf geneigte Flächen	135
9.11.1	Zeitgleichung Z	136
9.11.2	Wahre Ortszeit (WOZ) t_S	136
9.11.3	Die sechs Winkel zur Bestimmung des Sonnenstandes	137
9.11.4	Breitengrad φ	138
9.11.5	Stundenwinkel ω	138
9.11.6	Deklination δ	138
9.11.7	Monatsmittlerer Tag m	138
9.11.8	Zenitwinkel θ_Z	139
9.11.9	Sonnenhöhenwinkel (Elevation) α	139
9.11.10	Azimutwinkel a_S	140
9.11.11	Stundenwinkel des Sonnenauf- und -untergangs ω_S	140
9.11.12	Tageslänge t_d	140
9.11.13	Berechnung des Einfallswinkels auf einen beliebig ausgerichteten Kollektor K	141
9.11.14	Neigungswinkel β und Azimut a_K einer beliebig orientierter Flächen K	141
9.11.15	Einfallswinkel der Direktstrahlung $\theta_{Dir,K}$ auf beliebig orientierte Flächen K	141
9.11.16	Stundenwinkel des Sonnenuntergangs $\omega_{S,K}$ beliebig orientierter Flächen K	142
9.11.17	Tageslänge $t_{d,K}$ für eine beliebig orientierte Fläche K	143
9.12	Extraterrestrische Strahlung	144
9.12.1	Intensität extraterrestrischer Strahlung I_0 auf eine horizontale Fläche	144
9.12.2	Summe extraterrestrischer Strahlung E_0 auf eine horizontale Fläche	144
9.13	Berechnung der stündlichen Global- und Diffusstrahlung.....	144
9.14	Clearness Index k_T	145
9.15	Modelle zur Bestimmung des Clearness Index.....	146
9.15.1	Modell nach Page	146
9.15.2	Modell nach Liu und Jordan.....	147
9.15.3	Modell nach Bendt et al.	147
9.15.4	Ergänzung durch Herzog	148
9.15.5	Modell von Hollands und Huget.....	148
9.15.6	Modell von Klein und Beckmann.....	149

9.16	Bestimmung des Diffusanteils über den Clearness Index	149
9.17	Bestimmung des Direktanteils über den Diffusanteil	150
9.18	Global-, Direkt- und Diffusstrahlung auf beliebig ausgerichtete Empfangsflächen K	150
9.18.1	Stündliche Direktstrahlung $\dot{G}_{Dir,K}$ auf eine beliebig ausgerichtete Fläche K	150
9.18.2	Stündliche Diffusstrahlung $\dot{G}_{Diff,K}$ auf eine beliebig ausgerichtete Fläche K	151
9.18.3	Stündliche Reflexionsstrahlung $\dot{G}_{Ref,K}$ auf eine beliebig ausgerichtete Fläche K	152
9.18.4	Stündliche Globalstrahlung $\dot{G}_{G,K}$ auf beliebig geneigte, ausgerichtete Flächen	152
Kapitel 10	Einführung der meteorologischen Datenquelle	153
10.1	Kurze Einführung in die Meteorologie.....	153
10.2	Messung der Solarstrahlung in Bodenstationen	154
10.3	Probleme mit Strahlungsmessung von Bodenstationen	155
10.4	Satellitenmeteorologie	156
10.5	Vorteile der Satellitenmeteorologie.....	157
10.6	Verfügbare Datensätze zur Solarstrahlung.....	158
10.7	Beschreibung der meteorologischen Datenbank SSE	160
Kapitel 11	Validierung der Strahlungsberechnung	163
11.1	Globalstrahlung auf die Horizontale.....	163
11.2	Globalstrahlung auf geneigte südorientierte Empfangsflächen.....	164
11.3	Globalstrahlung auf eine senkrechte Südfassade	164
11.4	Globalstrahlung auf eine senkrechte Nordfassade	166
11.5	Globalstrahlung auf senkrechte Ost- und Westfassaden.....	167
11.6	Zusammenfassung	169
Kapitel 12	Vorstellung des entwickelten Programms	170
12.1	Beschreibung des Programmaufbaus	171
12.2	Eingabe und Verwaltung allgemeiner Gebäudedaten	172
12.3	Gebäudedatenblatt	173
12.4	Gebäudeformeingabe	173
12.5	Standorteingabe	175

Kapitel 13	Durchführung der Untersuchung.....	178
13.1	Ablauf des Versuchs.....	178
13.2	Kombination.....	178
13.3	Kalkulation.....	179
13.4	Rotation.....	179
13.5	Selektion.....	179
13.6	Sortierung.....	179
Kapitel 14	Analyse der Einzelergebnisse.....	180
14.1	Aufbau und Erläuterung des Formenranking-Datenblattes.....	181
14.2	Nutzung der Entwurfsempfehlungen des Formenrankings.....	184
Kapitel 15	Graphische Analyse der Gesamtergebnisse.....	186
15.1	Beschreibung der Analysemethode.....	186
15.2	Durchgeführte Untersuchungen.....	188
15.3	Kompaktheit (A/V-Verhältnis).....	189
15.4	Oberfläche.....	190
15.5	Konventionell / Unkonventionell.....	191
15.6	Konventionell / Unkonventionell (kleine A/V).....	192
15.7	Konventionell / Unkonventionell (mittlere A/V).....	193
15.8	Konventionell / Unkonventionell (große A/V).....	194
15.9	Höhe.....	195
15.10	Quader / Pyramide (flach).....	196
15.11	Quader / Pyramide (mittelhoch).....	197
15.12	Quader / Pyramide (hoch).....	198
15.13	Gruppe1.....	199
15.14	Gruppe 2.....	200
15.15	Gruppe 3.....	201
15.16	Gruppe 4.....	202
15.17	Gruppe 5.....	203

15.18	Gruppe 6	204
15.19	Gruppe 7	205
15.20	Zusammenfassung	206
Kapitel 16	Mathematische Analyse der Gesamtergebnisse	207
16.1	Verhältnis: Gradtage G_t zu Jahresenergiebilanz	209
16.2	Verhältnis: Globalstrahlung/Gradtage E_{Glob} / G_t zu Jahresenergiebilanz	210
16.3	Verhältnis: Kompaktheit A/V zur Einstrahlung auf die Oberfläche E_O	213
16.4	Verhältnis: Oberfläche O zur Jahresenergiebilanz	214
16.5	Verhältnis: Ober-/Grundfläche O/G zu Einstrahlung Oberfl./Globalstrahlung E_O / E_{Glob}	215
16.6	Verhältnis: Grundfläche G zu Einstrahlung Oberfläche/Globalstrahlung E_O / E_{Glob}	217
Kapitel 17	Vertiefende Einzelstudien	218
17.1	Standortstudie	218
17.1.1	Klimadiagramme	219
17.1.2	Jahresverlauf Heiz- und Kühlgradtage	219
17.1.3	Jahresverlauf Transmissionsverluste	220
17.1.4	Jahresverlauf Albedo, Bewölkung und Clearness Index	221
17.1.5	Jahresverlauf Extraterrestrische, Global-, Direkt- und Diffusstrahlung	222
17.1.6	Tagesverlauf Bewölkung und Clearness Index	223
17.1.7	Tagesverlauf Extraterrestrische, Global-, Direkt- und Diffusstrahlung	224
17.1.8	Orientierungsabhängige optimale Neigung der Empfangsflächen	225
17.1.9	Jahresverlauf der Monatsenergiebilanzen	227
17.1.10	Matrix der Jahressummen-Energiebilanzen	228
17.1.11	Analyse der Standortmatrix	229
17.2	Rankingstudie	230
17.2.1	Einfluss der Parameter	230
17.2.2	Einfluss des Standortes	231
17.2.3	Einfluss des Sortierungsmerkmals	232
17.2.4	Analyse der Rankingmatrix	233

17.3	Rotationsstudie.....	235
17.3.1	Aufbau der Rotationsstudie.....	235
17.3.2	Ergebnisse.....	239
17.4	Potentialstudie.....	240
Kapitel 18	Zusammenfassung und Diskussion der Ergebnisse	244
Kapitel 19	Schlussbetrachtung	251
19.1	Das Werkzeug und sein Nutzen	251
19.2	Grenzen der Übertragbarkeit.....	252
19.2.1	Realität des Entwurfsprozesses.....	252
19.2.2	Altbau-Neubau-Diskussion	253
19.3	Gesellschaftliche Bedeutung	256
19.4	Ausblick und Schlusswort.....	258
	Abbildungsverzeichnis	262
	Tabellenverzeichnis	268
	Literaturverzeichnis	270
	Anhänge (A bis J)	285
	Anhang A: Formengruppen.....	287
	Anhang B: Repräsentative Standorte.....	301
	Anhang C: Formenranking Madrid nach Jahresenergiebilanz	305
	Anhang D: Übersichtsmatrix aller 42 Standorte bei mittleren Parametern	311
	Anhang E: Ergebnisfelder mit Farbfilter zur Musteranalyse des Einflusses der Kompaktheit	314
	Anhang F: Zusammenfassende Übersicht der Ergebnisfelder.....	321
	Anhang G: Standortstudie (meteorologisch)	324
	Anhang H: Formenranking Madrid (nach Jahresenergiebilanz bei schlechten Parametern).....	335
	Anhang I: Rankingstudie – Station Nord / Dakar (nach Einstrahlungsdichte u. Jahresenergiebilanz) ...	341
	Anhang J: Standortstudie (Auswertung des Formenrankings)	346

Kapitel 1

Einleitung

1.1 Problemaufriss und Motivation

Die Lösung der Aufgabe, global und in langfristigen Zeiträumen die Versorgung der Weltbevölkerung mit Energie zu sichern, stellt uns heute vor eine der größten Herausforderungen der Menschheitsgeschichte. Das Energieversorgungsproblem zählt zu den drängendsten Fragestellungen des 21. Jahrhunderts und ist aufgrund seiner direkten Wechselbeziehungen zu demographischen Entwicklungen und Klimawandel von zentraler Bedeutung. Die exponentiell wachsende Weltbevölkerung führt zu einem stetig steigenden Weltenergieverbrauch. Dieser wird zu rund 90%¹ durch den Einsatz fossiler Energieträger gedeckt, was auf lange Sicht zu einer Verstärkung des Klimawandels führt, vor allem aber auch zur Folge hat, dass sich die weltweite Schere zwischen Arm und Reich weiter öffnet und zukünftigen Generationen irreversible Schäden am Ökosystem und in den globalen Kreisläufen hinterlassen werden.

Die Zukunftsvision einer Welt ohne Hunger und Trinkwasserknappheit, vor allem ohne Krieg, ohne Ungleichverteilung des Zugangs zu Information und Bildung sowie ohne eine überlebensbedrohende von Wald- und Artensterben begleitete Umweltverschmutzung, ist in erster Linie von der Lösung des Kernproblems - einer nachhaltigen Lösung der Energieversorgungsfrage - abhängig.

Allein aufgrund der Endlichkeit seiner Ressourcen kann ein auf fossilen Energieträgern beruhendes System keine nachhaltige Lösung bieten. Die Nutzung regenerativer Energiequellen im globalen Maßstab wird derzeit mit den Argumenten behindert, es sei sowohl technisch als auch wirtschaftlich nicht realisierbar.

¹ [EIA (2008), S. 155]

Diverse Potentialstudien² konnten jedoch aufzeigen, dass eine globale Energieversorgung allein aus regenerativen Energiequellen unter Annahme typischer Lernkurven neuer Technologien sowohl technisch als auch wirtschaftlich noch in diesem Jahrhundert ohne Einschränkungen in Komfort, Lebensstandard oder industrieller Kapazität möglich ist. Folgende Entwicklungen werden hierfür als notwendig erachtet:

- Umstellung der zentralen auf eine dezentrale Energieversorgungsstruktur
- Zusammenschluss von Kleinstkraftwerken zu einem virtuellen Großkraftwerk
- überregionaler Zusammenschluss und Austausch
- Entwicklung einer entsprechenden Kommunikationstechnologie
- vorausschauendes Last-Management mittels Wettervorhersagemodellen
- Anpassung des Verbrauches an das Angebot (smart metering)
- Änderung der tageszeitspezifischen Strompreise
- Entwicklung neuartiger verlustfreier Speichertechnologien
- stetige Verbesserung der technologischen Wirkungsgrade
- große Technologievielfalt für mehr Versorgungssicherheit
- Effizienzsteigerung in Gebäudesektor, Industrie und Mobilität
- Weiterentwicklung der Elektromobilität,
- Gebäudeautomation,
- solaren Klimatisierung,
- Wärmepumpe und
- Brennstoffzelle.

Durch diese Maßnahmen können fortschreitende Energiesubstitution und zunehmende Energieeffizienz eine nachhaltige Entwicklung zu einem ökonomischen, ökologischen und sozialen Gleichgewicht führen.

Mit dem steilen und stetigen Anstieg der Preise für konventionelle Energieträger als Folge weltweit steigender Nachfrage bei gleichzeitig schwindenden Ressourcen sowie bei Einbeziehung aller Folgekosten, die direkt oder indirekt durch Nutzung fossiler Energieträger entstehen, zeichnet sich zudem immer mehr ab, dass sich bereits in absehbarer Zeit das Argument der Wirtschaftlichkeit umkehren könnte. Dies wird spätestens mit Erreichen der Netzparität der Fall sein, da von diesem Punkt an die Gestehungskosten für fossile Energieversorgung weiter steigen werden, während die regenerative Energiebereitstellung kontinuierlich kostengünstiger wird. Dies ist auf preissenkende Effekte einer sich zunehmend etablieren-

² Verschiedene Szenarien und Energieversorgungsstrukturen wurden beispielsweise in folgenden Projekten untersucht: „Long-Term-Integration of Renewable Energies into the European Energy System and its Potential Economical and Environmental Impacts (LTI)“, „Nachhaltige Energieversorgung unter den Bedingungen der Globalisierung und der Liberalisierung“ und „Energy Rich Japan“. Die Simulationen zeigen, dass einer solaren Vollversorgung innerhalb der nächsten 60 Jahre keine prinzipiellen technischen oder finanziellen Hindernisse entgegenstehen.

den Massenproduktion zurück zu führen, als auch auf die Tatsache, dass lediglich Technologiekosten, aber im laufenden Betrieb keine Brennstoffkosten anfallen.

Mit Hinblick auf die verbleibende Reichweite des weltwirtschaftlich derzeit wichtigsten Energie-Rohstoffes Erdöl bis Mitte dieses Jahrhunderts³ wird deutlich, dass die Entwicklung globaler Lösungsstrategien drängt. Anderenfalls droht eine weitere Weltwirtschaftskrise gefolgt von sozialen Folgen wie Verarmung, Hunger und Krieg. Um einem solchen Szenario vorzubeugen, wird weltweit und fachübergreifend intensiv im Bereich Energieforschung nach Lösungen gesucht, insbesondere im Bereich der Technologien zur Energiegewinnung, Energiespeicherung und Energieumwandlung.

Die größten Fortschritte stammen hierbei aus den Disziplinen der Ingenieur- und Naturwissenschaften. Die Erfindung und Entwicklung von eigenständigen Lösungsansätzen, wie z.B. Photovoltaik, Brennstoffzelle, Wärmepumpe oder das Elektroauto, stellen jeweils einen wichtigen Baustein für das Gesamtbild eines erstrebenswerten Zukunftsszenarios dar und werden von Physikern, Chemikern, Elektrotechnikern, Maschinenbauern und Thermodynamikern vorangetrieben.

Eine vergleichbare Forschungstradition gibt es im Bauwesen nicht. Aufgrund seiner Kleinteiligkeit verfügt man hier auch nicht über entsprechende Forschungsetats wie sie z.B. große Konzerne der Automobil- oder Luftfahrtindustrie für Forschungsprojekte bereitstellen.

Die verschiedenen Potentialstudien heben jedoch gerade den Gebäudesektor als Schlüsselbereich einer zukünftigen solaren Vollversorgung hervor. Dies hat mehrere Gründe. Zum einen liegt hier ein großes Rationalisierungspotential, da ein Großteil des Weltprimärenergiebedarfes im Zusammenhang mit Gebäuden anfällt, welcher mindestens vergleichbar mit der Nachfrage der anderen großen Sektoren Industrie und Mobilität ist⁴. Aufgrund der langen Standzeiten und Sanierungszyklen im Bauwesen gilt zudem jedes heute errichtete Gebäude, das nicht zukünftigen Ansprüchen an Energieeffizienz und solare Nutzung entspricht, für viele Jahrzehnte als Hemmnis. Ein weiterer Grund liegt darin, dass Gebäude in großflächigem und direktem Kontakt mit den zu nutzenden regenerativen Umweltenergien stehen. Es bietet sich geradezu an, die großen Mengen an bislang ungenutzt auf unsere Gebäude einfallende Solarenergie zu aktivieren. Des Weiteren steht zu befürchten, dass die in anderen Disziplinen unter größtem Aufwand erzielten Erfolge durch den Einsatz in einem nicht ebenfalls optimierten architektonisch-städtebaulichen Kontext wieder zunichte gemacht werden könnten. Sofern beispielsweise an Gebäuden nicht durch einen optimierten Entwurf ausreichend geeignete solare Empfangsflächen zur Verfügung gestellt werden, werden die voran-

³ Das Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie schätzte die Reichweite für Erdöl im Jahr 2006 bei statischer Betrachtung auf 42 Jahre [BMWi (2006); S. 6]

⁴ So lag 2007 der Endenergieverbrauch der USA für private Haushalte und Kleinverbraucher (Einrichtungen mit ähnlichem Energiebedarf wie privaten Haushalte, dazu gehören Gebäude der öffentlichen Verwaltung, Krankenhäuser, Gastronomiebetriebe, Kaufhäuser, etc.) bei 39%, Industrie 32% und Transport 29%. [EIA 2007, S. 36]

gegangenen Anstrengungen zur Steigerung des Wirkungsgrades einer Photovoltaik-Zelle nachträglich bedeutungslos.

Daher ist es umso erstaunlicher, dass diesbezüglich aus dem Forschungssektor der Architektur und Stadtplanung bisher kaum Lösungen mit wissenschaftlichem Ansatz hervorgegangen sind. Die vorliegende Arbeit soll einen Beitrag leisten, um diese Forschungslücke im Teilbereich der solaren Gebäudeformen zu schließen. Es wird aufgezeigt, dass durch entsprechende Überlegungen in der frühen Planungsphase allein durch die solare Entwurfsoptimierung der Gebäudeform solare Ertragssteigerungen von über 100% möglich sind. Dieses enorme bisher ungenutzte Potential kann – zumindest im Neubau – ohne zusätzlich anfallende Kosten allein durch vorausschauende Überlegungen in der frühen Planungsphase erschlossen werden. Vor dem Hintergrund, dass zur photovoltaischen Wirkungsgradsteigerung jedes Prozent mit milliardenschweren Investitionen erkauft werden muss, wird das Potential der solaren Formoptimierung besonders deutlich.

Im Rückblick auf das 20. Jahrhundert ist festzustellen, dass verschiedene konzeptionelle Entwicklungen der Architektur der Moderne zur Vernachlässigung der Energiefrage im Entwurf geführt haben. Als wichtigster Aspekt ist hier die Abkehr von regionalen, als reaktionär verpönten, aber klimatisch angepassten Baustilen zu nennen. Bei dieser Entwicklung wurde verdrängt, dass zur Minimierung von thermischen Verlusten und Maximierung der Nutzung lokal vorhandener Umweltenergien eine auf den Standort bezogene entwurfliche Reaktion grundlegende Voraussetzung ist. Diese energetisch sinnvolle Regionalisierung gab man zugunsten neuer Strömungen der Internationalisierung und Globalisierung auf, die zu einem schablonenartig übertragbaren Baustil und der Errichtung gleichartiger Gebäude unter unterschiedlichsten klimatischen Bedingungen führte. Durch die Entwicklung einer weiteren Reduktion der Baumasse bei fortschreitendem Verglasungsanteil wurde die Bereitstellung eines komfortablen Raumklimas in zunehmendem Maße von Klimaanlage und einem damit einhergehenden steigenden Energiebedarf abhängig. Die Entwicklung ging so weit, dass die meisten der heute erstellten Gebäude ohne eine entsprechende, stetig laufende und aus fossilen Quellen gespeiste Energiezufuhr nicht mehr gebrauchstauglich sind. Aufgrund ihres langen Lebenszyklus werden diese Gebäude aber auch im nächsten Jahrhundert noch im Gebrauch sein, wenn fossile Energieträger zu ihrem Betrieb nicht mehr in ausreichendem Maße zur Verfügung stehen werden.

Das Studium rein entwurflicher Maßnahmen eines energieoptimierten Bauens fehlt inzwischen im Curriculum der meisten Architekturfakultäten. Außerdem ist heute der Bereich der Energieerzeugung bzw. Energiegewinnung ein von der architektonischen Planung getrennter Aspekt. An der entsprechenden Schnittstelle gibt der Architekt die Planung des energetischen Systems in die Hände von Fachplanern, die ein Hochleistungssystem zum Heizen, Kühlen und Lüften mit entsprechend komplexen Mess-, Steuer- und Regelungssystemen installieren, so dass trotz fehlender entwurflicher Anpassung des Gebäudes an den jeweiligen Standort ganzjährig ein einheitliches Innenraumklima künstlich erzeugt werden kann.

Selbst wenn Architekten wieder beginnen, regenerative Energien am Gebäude zu nutzen, werden die entsprechenden Technologien meist nur als dekoratives oder plakatives Additivum zum eigentlichen Gebäude betrachtet und ihre konkrete Planung an Fachingenieure abgeschoben. Ihre Integration in den Entwurf wird – falls überhaupt – meist erst nachträglich bedacht. Ein weiteres Hindernis liegt darin, dass die Honorarordnung für Architekten und Ingenieure (HOAI) keine Vergütung einer solaren Optimierung der Gebäudeform vorsieht, obwohl sie mit einem größeren Zeit-, Planungs- und Fortbildungsaufwand verbunden ist.

In dieser Arbeit wird aufgezeigt, dass dem Architekten durch die Rückbesinnung auf seine ureigenste Aufgabe, nämlich die Formfindung im Sinne eines ganzheitlichen Entwurfs, ein sehr potentes Werkzeug in die Hand gelegt ist, um einen entscheidenden Beitrag zur Lösung der Energieversorgungsproblematik des 21. Jahrhunderts leisten zu können. Er kann seiner Rolle als Generalist unter den Planern sowie seiner Aufgabe - der Schaffung einer für den Menschen lebenswerten Umwelt - wieder gerecht werden.

Diese Arbeit richtet sich daher an Architekten und Stadtplaner mit dem Ziel, einen neuen Denkanstoß hinsichtlich des Formfindungsprozesses zu initiieren und Planer in die Lage zu versetzen, nach solaren Kriterien optimierte Gebäudeformen für die Zukunft zu entwickeln.

1.2 Aufbau der Arbeit

Die Arbeit gliedert sich wie folgt in fünf übergeordnete Abschnitte:

1) Herleitung der Forschungsfrage

Hierzu wird in *Kapitel 2* eine kurze Zusammenfassung zu präfossiler Solararchitektur gegeben, um zunächst einen historischen Überblick über einfache Entwurfsprinzipien solarer Gebäudeformen zu erhalten. Darauf aufbauend werden dann in *Kapitel 3* aus Vorgaben neuer Technologien zur Energiegewinnung über die Gebäudehülle zukünftige Anforderungen an solare Gebäudeformen entwickelt, aus welchen sich die Forschungsfrage ableitet.

2) Stand der Forschung

Zur Darstellung des aktuellen Forschungsstandes werden in *Kapitel 4* alle für die frühe Planungsphase bekannten geometrisch-energetischen Parameter und Methoden vorgestellt und bezüglich ihrer Schwächen analysiert.

3) Methode und Durchführung

Nach einem Überblick über das methodische Vorgehen in *Kapitel 5* werden die vorbereitenden Arbeitsschritte vorgestellt. Dazu zählen das Anlegen der Datenbanken (*Kapitel 6*), die Festlegung der Untersuchungsgrenzen (*Kapitel 7*), Grundlagenkapitel zum Formelwerk (*Kapitel 8* und *Kapitel 9*), die Einführung der Datenquelle (*Kapitel 10*) inklusive Validierung der eigenen Strahlungsberechnung (*Kapitel 11*) sowie die Vorstellung des entwickelten Programmes (*Kapitel 12*). In *Kapitel 13* wird die Durchführung der Untersuchung besprochen.

4) Ergebnisse

Zunächst werden die Einzelergebnisse in *Kapitel 14* präsentiert und besprochen. In *Kapitel 15* und *Kapitel 16* erfolgt jeweils die graphische und mathematische Analyse der Ergebnisse, ergänzt durch einzelne Schwerpunktstudien, welche in *Kapitel 17* diskutiert werden.

5) Schluss

Abschließend werden in *Kapitel 18* alle Untersuchungsergebnisse thesenartig zusammengetragen und diskutiert. In *Kapitel 19* erfolgt die Beurteilung der Forschungsergebnisse hinsichtlich Nutzen und Übertragbarkeit; es endet mit einem Ausblick.

Der Arbeit angegliedert sind zudem umfangreiche *Anhänge* zur Veranschaulichung einzelner Arbeitsschritte und –ergebnisse.

Kapitel 2

Präfossile Solararchitektur

Bei der Suche nach Lösungen für die Zukunft ist die Kenntnis von Konzepten, die bereits in der Vergangenheit entwickelt wurden und ihren Nutzen bewiesen haben, grundsätzlich von Vorteil. Finden sich zudem Analogien in der Aufgabenstellung, können bestimmte Erkenntnisse und Prinzipien auf zukünftige Lösungsansätze übertragen werden.

In diesem Kapitel sollen nur beispielhaft historische Methoden der Anpassung von Gebäudeformen an die Sonnenbahn aufgezeigt werden. Sie sind das Ergebnis einer jahrhundertlangen Evolution der Adaption menschlicher Bauwerke an standortspezifische Faktoren wie Klima und solares Angebot sowie der konsequenten Einbindung der Sonne in den Entwurf.

2.1 Sonne und Architektur

Viele der bedeutendsten Bauwerke der Menschheit zeigen einen direkten Bezug zur Sonne und ihren Lichtstrahlen. Das Zentralgestirn unseres Planetensystems ist somit seit Jahrtausenden ein den architektonischen Entwurf beeinflussendes Motiv, insbesondere für Sakral- oder Repräsentationsbauten großer Kulturen:

- Die *ägyptische Pyramiden* sind exakt am Lauf der Sonne ausgerichtet. Ihre Form entspricht den gebündelten Strahlen, die durch eine Wolkendecke brechen. Das entwurfsdominante Dreieck symbolisiert das Licht. Ursprünglich waren die Pyramiden mit poliertem weißem Kalkstein verkleidet und boten tagsüber einen gleißend hellen Anblick, während sie selbst aufgrund der geneigten Oberflächen trotz ihrer Größe kaum einen eigenen Schatten warfen. Ihre Baumeister nutzten den Spiegeleffekt der heißen Wüste, um die vierseitige Pyramide optisch zum Oktaeder zu ergänzen, welcher Erde und Himmel verbinden sollte.

- Die *christlichen Sakralbauten* zeigen über die Jahrhunderte eine Entwicklung im Umgang mit der Inszenierung von Licht, beginnend mit dem sparsamen Einsatz pointierter Lichteffekte in den dunklen Bauten der Romanik bis hin zur lichtdurchfluteten Transparenz der Gotik oder dem Einsatz farbigen Lichtes mittels filigraner Rosettenfenster. Später im Barock werden Spezialeffekte wie die indirekte Beleuchtung entwickelt, welche mittels komplexer Lichtleitsysteme realisiert werden und die wahre Lichtquelle verbergen.
- Gegenüber der lichtbetonten christlichen Architektur zeigen *islamische Sakral- und Palastbauten* eine Inszenierung des paradiesischen Schattens mittels nach innen gekehrter Fassaden. Durch die bewusste Integration der Sonnenbahn in den Entwurf ergänzen im Tagesverlauf spezielle Licht- und Schatteneffekte an reliefierten Wandoberflächen den räumlichen Entwurf um ein zeitliches Element.
- Für *indische Mogulpaläste* entwickelten Architekten spezielle Raum- und Lichtillusionen, die sie durch raffinierte Spiegelgewölbe realisierten. Einen besonderen Lichteffekt bieten transluzente Wände (Mushrabijen), welche mit dem Effekt veränderter Lichtbrechungseigenschaften an schmalen Spalten und der Bildung von Interferenzmustern arbeiten.

2.2 Autochthone Solararchitektur

Anders als in den vorangegangenen Beispielen beschäftigt sich diese Arbeit jedoch ausschließlich mit der *energetische Optimierung* einer solaren Gebäudeform.

Auch hierfür gibt es historische Vorbilder, die zumeist für Wohngebäude zur Verbesserung des thermischen Wohnkomforts entwickelt wurden. Die Idee, Form und Orientierung menschlicher Behausungen dem tages- und jahreszeitlichen Lauf der Sonne anzupassen, um maximalen Komfort im Gebäudeinneren bei geringstmöglichem Einsatz zusätzlicher Energien zu erreichen, ist keineswegs neu. Historische Bauformen zeigen in vielfältiger Weise eine direkte Anpassung der äußeren Gestalt an standortspezifische solare Strahlungsgeometrien. Ob die gewählte Form zu einer Maximierung oder Minimierung einfallender Solarenergie führen soll, ist davon abhängig, ob der Standort in einer kalten oder heißen Klimazone angesiedelt ist.

Bei der Ausweitung seines Lebensraumes fand der Mensch unterschiedlichste klimatische, geografische und geologische Verhältnisse vor, auf die er mit regionalen Bauformen und Bauweisen reagierte, wobei die lokal verfügbaren Baumaterialien die Bauweise vorgaben.

Hierbei ist aber die Beobachtung interessant, dass die Entwicklung bestimmter Urformen wie beispielsweise der Halbkugel, davon unabhängig sowohl in Massivbauweise (Iglu) als auch in Skelettbauweise (Wigwam) erfolgte. Dies unterstreicht die Bedeutung der idealen Form, an welche die Bauweise gegebenenfalls regional angepasst wurde.

Diese im Lauf der Zeit perfektionierten auf ihre natürliche Umwelt abgestimmten autochthonen Bauten erreichen bereits mit minimalen Mitteln einen maximalen Nutzen. Auf der ganzen Welt wurden so verschiedene energieeffiziente Gebäudekonzepte in perfekter Synergie von Klima, Sonne und Form entwickelt.

2.3 Beispiele regionalspezifischer Solararchitektur

Die folgenden ausgewählten Beispiele unterscheiden sich durch die an die Gebäudeform gestellten Anforderungen in verschiedenen Klimazonen. Eine Form kann solare Einstrahlung minimieren oder maximieren. Gegebenenfalls kann diese Anforderung je nach Jahres- oder Tageszeit unterschiedlich sein. Für folgende Klimazonen werden solare Gebäude- und Siedlungsformen besprochen:

- Tropen: ganztägige und ganzjährige Minimierung solarer Exposition (keine Differenzierung)
- Wüste: mittägliche Minimierung und abendliche Maximierung solarer Exposition (tageszeitliche Differenzierung)
- Mediterran: sommerliche Minimierung und winterliche Maximierung solarer Exposition (jahreszeitliche Differenzierung)

2.3.1 Tropen: Batak-Häuser

In den Tropen ist es ganzjährig heiß. Es gibt keine Jahreszeiten und die tageszeitliche Temperaturschwankungen sind sehr gering. Daher lautet die Forderung an eine angepasste Gebäudeform: Ganztägige und ganzjährige Minimierung solarer Exposition (keine Differenzierung).

Die traditionellen Häuser der Batak auf der indonesischen Insel Sumatra zeigen eine markante Formgebung der Dächer, deren Zweckmäßigkeit sich direkt aus dem tages- und jahreszeitlichen Sonnenstand ableiten lässt. Aufgrund des tropischen Klimas Sumatras besteht die Aufgabe der Gebäudeform in maximaler Verschattung und Kühlung.

Direkt am Äquator gelegen, steht die Sonne hier mittags fast senkrecht. Die traditionelle Bauform besitzt daher zum Schutz vor der starken Sonneneinstrahlung ein mächtiges, geschwungenes Giebeldach in Nord-Süd-Ausrichtung, welches weit über die Giebelfassaden auskragt und diese verschattet. Das Dach zeigt diese Auskragung sowohl nach Süden als auch nach Norden gleichermaßen, da die Sonne am Äquator während eines Halbjahres im Süden und im anderen Halbjahr im Norden steht.

Die Auskragung des Daches in Gebäudelängsachse verhindert somit eine direkte Besonnung des Nord- und Südgiebels (s. *Abbildung 2.1*) und damit einen unerwünschten Wärmeintrag.

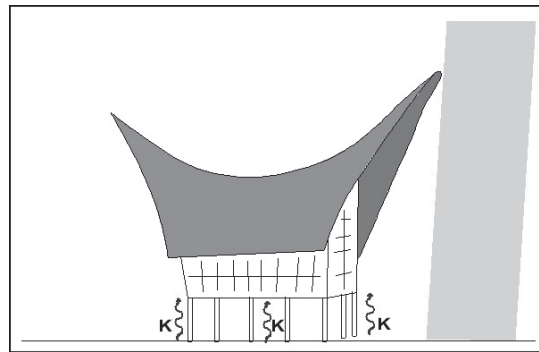


Abbildung 2.1: Batak-Haus zur Mittagszeit

(Grafik: eigene; K=kalt)

Die Verschattung der Ost- und Westfassaden ist aufgrund der vormittags im Osten und nachmittags im Westen deutlich tiefer stehenden Sonne nicht mittels auskragender Dächer zu realisieren. Daher werden die einzelnen Gebäude in der Ost-West-Achse dicht nebeneinander errichtet, so dass sie sich zu diesen Tageszeiten gegenseitig verschatten. Zudem stehen die Ost- und Westfassaden nicht senkrecht, sondern sind leicht zum Boden geneigt, so dass sie nur schleifend von Sonnenstrahlen getroffen werden können (s. *Abbildung 2.2*).

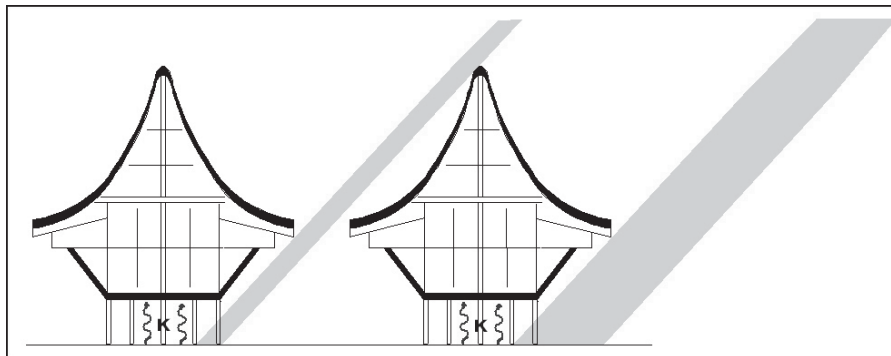


Abbildung 2.2: Batak-Haus vor- und nachmittags

(Grafik: eigene; K=kalt)

Während die intelligente Gebäudeform die solare Exposition und Aufheizung über den gesamten Tag verhindert, unterstützt die leichte Skelettkonstruktion aus Holz und Binsen eine ständige Durchlüftung und zusätzliche Kühlung.

2.3.2 Wüste: Kasbah

In großen Wüsten wie beispielsweise der Sahara herrschen im Laufe eines Tages große Temperaturschwankungen von bis zu 80°C. Daher lautet die Forderung an eine angepasste Gebäudeform: Minimierung solarer Exposition in den Mittagsstunden und maximale Exposition in den Morgen- und Abendstunden (tageszeitliche Differenzierung).

Eine Kasbah ist ein turmartiges, ca. siebenstöckiges, massives Lehm-Gebäude mit einem Innenhof. Aufgrund der Nähe der in Nordafrika liegenden Sahara zum Äquator steht die Sonne relativ hoch, so dass die Fassaden in den Mittagsstunden nur schiefend von Sonnenstrahlen getroffen werden. Der tiefliegende Innenhof ist ganztägig verschattet und dauerhaft kühl.

Das Dach als oberer horizontaler Abschluss des Gebäudes wird dagegen von der Sonnenstrahlung fast senkrecht getroffen und heizt sich auf. Die über der Dachfläche erwärmte Luft steigt nach oben und erzeugt einen Sogeffekt, welcher die kühle Luft aus dem Innenhof mitzieht und so die oberen Stockwerke kühlt (s. *Abbildung 2.3*).

Allein durch diese permanente Luftbewegung sinkt bereits die gefühlte Temperatur. Zusätzlich wird die nachströmende Luft zuerst durch den Keller geleitet, wo sie über mit Wasser gefüllte Tonkrüge geführt wird, an deren Oberfläche das aus den Poren austretende Wasser verdunstet und auf diese Weise die Luft um einige Grad abkühlt und befeuchtet. Im Innenhof herrscht somit tagsüber ständig eine erfrischend kühle Brise, die exakt solange am Laufen gehalten wird, wie eine Kühlung notwendig ist, da ihr Motor die von der Sonne gesteuerte Aufheizung selbst ist.

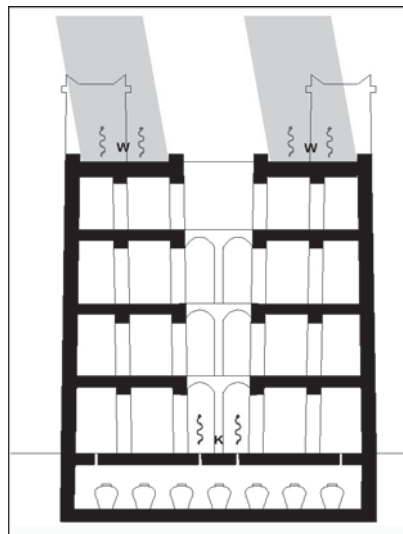


Abbildung 2.3: Kasbah zur Mittagszeit

(Grafik: eigene; K=kalt, W=warm)

Sobald dann am Abend die Sonne tiefer steht, wird die Dachfläche nicht weiter erhitzt, so dass der Luftstrom langsam abschwächt. Die Sonne steht in den letzten Stunden des Tages fast senkrecht auf der Westfassade, welche nun von der Sonne erwärmt wird. Die massive Lehmwand fungiert als idealer Wärmespeicher, der um einige Stunden phasenversetzt in den kühlen Nachtstunden diese nun erwünschte Wärme wieder an die Innenräume abgibt (s. *Abbildung 2.4*).

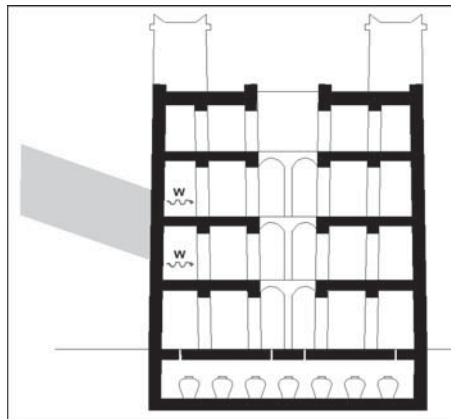


Abbildung 2.4: Kasbah vor- und nachmittags

(Grafik: eigene; W=warm)

Sowohl der Kühlungs- als auch Heizungseffekt der Gebäudeform wird zusätzlich durch das schwere Baumaterial Lehm unterstützt, da er gegenüber den großen tageszeitlichen Temperaturamplituden als thermischer Puffer wirkt.

2.3.3 Mediterran: Megaron

Im Mittelmeerraum sind die tageszeitlichen Temperaturschwankungen aufgrund der ausgleichenden Wassermassen deutlich weniger stark ausgeprägt. Die jahreszeitlichen Schwankungen zwischen Sommer und Winter sind jedoch deutlich spürbar und führen zur Doppelstrategie: Vermeidung von Überhitzung im Sommer bei Förderung passiver Erwärmung im Winter. Daher lautet die Forderung an eine angepasste Gebäudeform: Minimierung solarer Exposition im Sommer und maximale Exposition im Winter (jahreszeitliche Differenzierung).

Das Megaron ist ein elementarer Gebäudetyp der Griechen. Es bildet das Grundelement, aus welchem komplexere Gebäudeformen oder ganze Siedlungen zusammengesetzt werden können. Das Megaron besteht aus einem Hauptraum und einer verschatteten von Säulen getragenen Vorhalle. Sokrates beschrieb als erster das intelligente Zusammenspiel der äußerst energieeffizienten Form und Ausrichtung dieses Wohngebäudetyps. Das Megaron zeigt im Grundriss einen nach Süden geöffneten Trichter. Dagegen werden die Nord-, West-, und Ostfassade durch massive Wände aus Feldsteinen und Lehmputz gebildet. Der Grundriss wird durch zwei parallele Wände mit mittigen Öffnungen in drei Teile zoniert: in einen hinteren nördlichen Bereich, einen mittleren Bereich und eine offene Vorhalle im Süden. Das Dach ist ein nach Norden geneigtes Pultdach und vervollständigt die nach Süden geöffnete Trichterform in der dritten Dimension.

Im Sommer bei hoch stehender Sonne wird das Hauptgebäude durch die südliche Vorhalle verschattet (s. *Abbildung 2.5*). Aufgrund der lockeren Säulenstellung herrscht in der vom auskragenden Dach verschatteten Vorhalle immer eine leichte Brise. Ost- und Westfassade sind durch die Trichterform des Grundrisses leicht nach Norden gedreht, so dass sie nur in

den frühen Morgen- und späten Abendstunden von direkter Sonnenstrahlung getroffen werden. Die Nordfassade wird ganzjährig nicht von Direktstrahlung getroffen und ist zudem durch das niedrig gezogene Pultdach sowie der Trichterform des Grundrisses gegenüber der Südfassade stark verkleinert. Häufig gibt es in diesem Bereich auch Erdanschüttungen, die sowohl im Sommer als auch im Winter als thermischer Puffer wirken. Durch die Neigung des Pultdaches nach Norden fällt im Sommer selbst in den Mittagsstunden die Sonnenstrahlung nicht steil auf die Dachoberfläche, so dass die Erwärmung auch hier weiter reduziert wird.

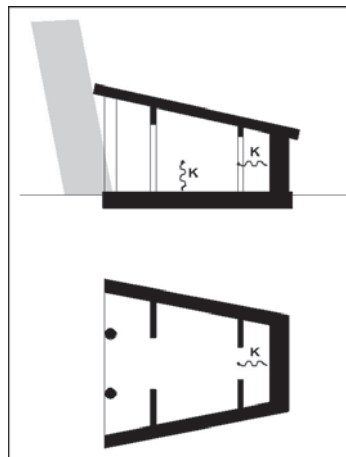


Abbildung 2.5: Megaron im Sommer (Längsschnitt und Grundriss)

(Grafik: eigene; K=kalt)

Im Winter wird durch die Trichterform in Grund- und Aufriss während der wenigen energieintensiven Stunden um die Mittagszeit die Sonnenstrahlung der niedrig stehenden Sonne tief ins Haus geleitet. Dort trifft sie auf den massiven Steinfußboden sowie die nördliche Rückwand und erwärmt so diese thermischen Speichermassen, welche die Energie in den kühlen Nachstunden wieder an den Innenraum abgeben (s. *Abbildung 2.6*).

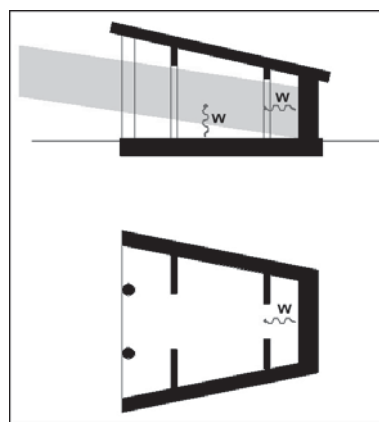


Abbildung 2.6: Megaron im Winter (Längsschnitt und Grundriss)

(Grafik: eigene; W=warm)

Das Megaron zeigt einen nach den Himmelsrichtungen differenzierten Baumaterialeinsatz. Anders als die transparente Südfassade sind die restlichen fünf Umschließungsflächen opak aus massiven thermischen Speichermassen wie Lehm und Feldsteinen errichtet.

2.3.4 Mediterran: Priene (Solare Siedlungsform)

Die antike Stadt Priene an der West-Küste Kleinasiens wurde im 4. Jh. v. Chr. nach dem hellenistischen Prinzip angelegt. Alle Wohngebäude sind nahezu identisch und zeigen eine einfache um einen zentralen Innenhof angeordnete Struktur. Die demokratischen Prinzipien zeigen sich selbst bei der einheitlichen Orientierung aller Gebäude nach Süden, die allen das gleiche Recht auf Zugang zur Sonne sicherstellt. Priene ist streng geometrisch an einem flachen Südhang angelegt (s. *Abbildung 2.7*).

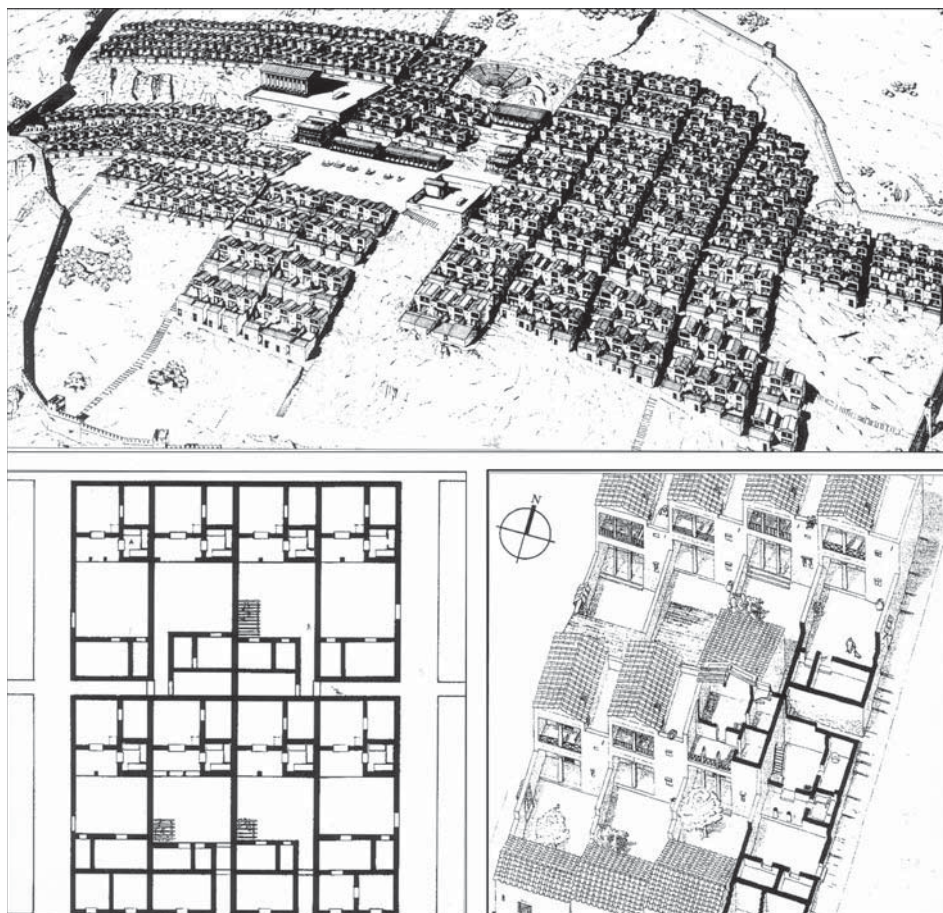


Abbildung 2.7: Rekonstruktion und Struktur der griechischen antiken Stadt Priene

(Grafik: Behling (1996), S. 86)

Basierend auf einem orthogonalen Raster ist jede Einheit gleich groß und besitzt einen Rechteckgrundriss in Nord-Süd-Achse. Jede dieser Einheiten ist ein eigenständiges griechisches Hofhaus. Sein Aufbau zeigt ein nördlich des zentralen Innenhofes liegendes Hauptge-

bäude mit Vorhalle und ein südlich platziertes Nebengebäude. Dieses Nebengebäude ist niedriger und besitzt ein zum Innenhof geneigtes Pultdach, so dass die im Winter tief stehende Mittagssonne den Innenhof und das Hauptgebäude wärmen kann (s. *Abbildung 2.8*).

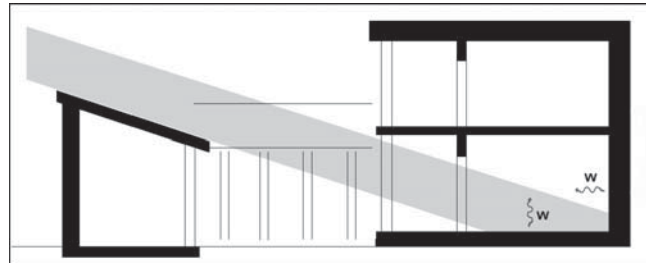


Abbildung 2.8: Griechisches Hofhaus im Winter (Schnitt)

(Grafik: eigene; W=warm)

Im Sommer verhindert die dem Hauptgebäude südlich vorgeschaltete Vorhalle eine sommerliche Überhitzung, indem es direkte Sonne abhält (s. *Abbildung 2.9*). Das Griechische Hofhaus verfügt über einen mit Säulen umstandenen Innenhof, der in den heißen Sommermonaten Schatten spendet, aber im Winter trichterförmig die Sonne einfängt.

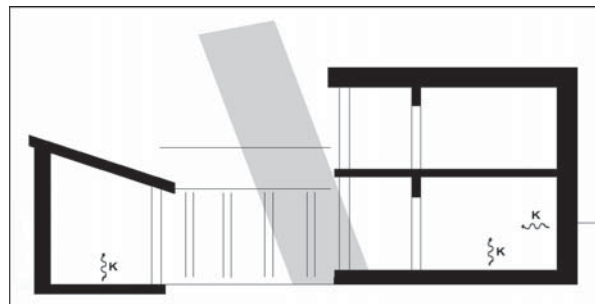


Abbildung 2.9: Griechisches Hofhaus im Sommer (Schnitt)

(Grafik: eigene; K=kalt)

2.4 Kriterien einer solaren Gebäudeform

An den vorangegangenen Beispielen konnte anschaulich demonstriert werden, wodurch sich historische Solararchitektur auszeichnet und welche Lösungsansätze sie uns bezüglich einer äußerst intelligenten Anpassung der Form an die standortspezifischen Vorgaben aus Klima und solarem Strahlungsangebot aufzeigen kann.

Schon geringe Abweichungen in Form und Orientierung würden dazu führen, dass die vorgestellten Gebäude deutlich weniger komfortabel zu bewohnen wären. Es ist leicht vorstellbar, dass ein Batak-Haus in Ost-West- statt Nord-Süd-Ausrichtung, eine hallen- statt turm-