

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 Lichteffect 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.

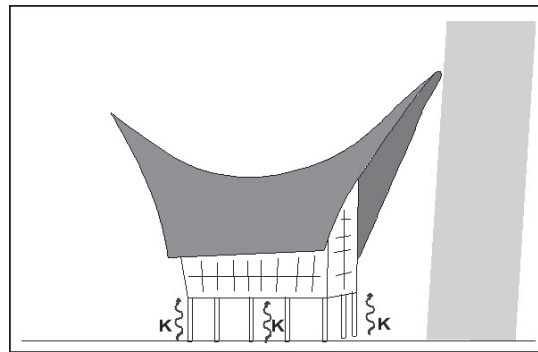


Abbildung 2.1: Batak-Haus zur Mittagszeit

(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 schweifend von Sonnenstrahlen getroffen werden können (s. *Abbildung 2.2*).

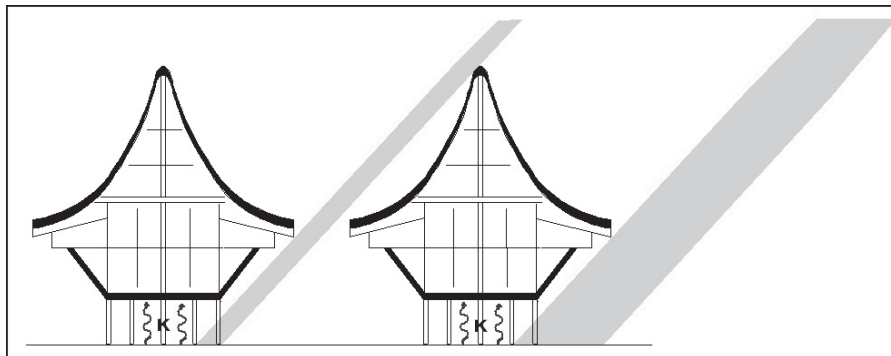


Abbildung 2.2: Batak-Haus vor- und nachmittags

(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 schweifend 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.

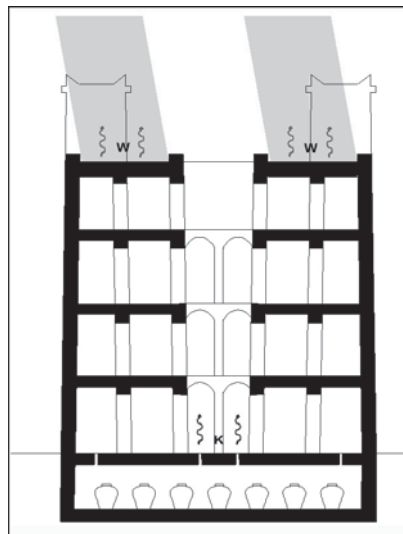


Abbildung 2.3: Kasbah zur Mittagszeit

(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*).

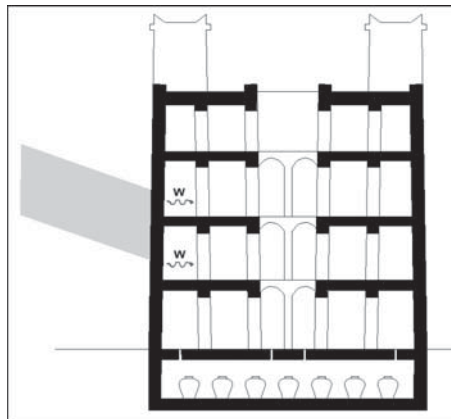


Abbildung 2.4: Kasbah vor- und nachmittags

(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.

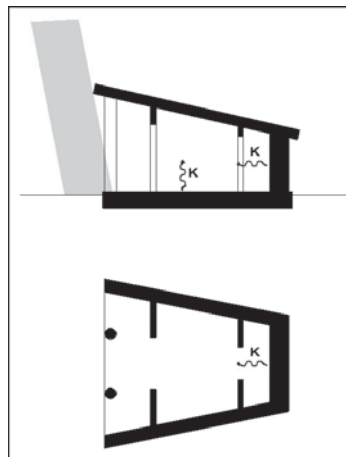


Abbildung 2.5: Megaron im Sommer (Längsschnitt und Grundriss)

(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*).

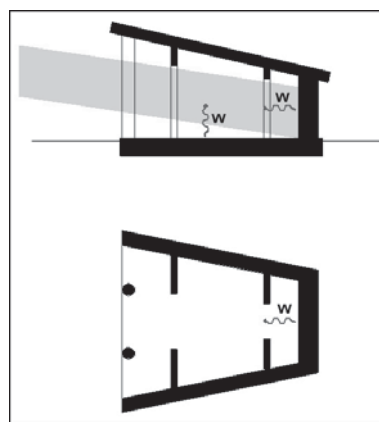


Abbildung 2.6: Megaron im Winter (Längsschnitt und Grundriss)

(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*).

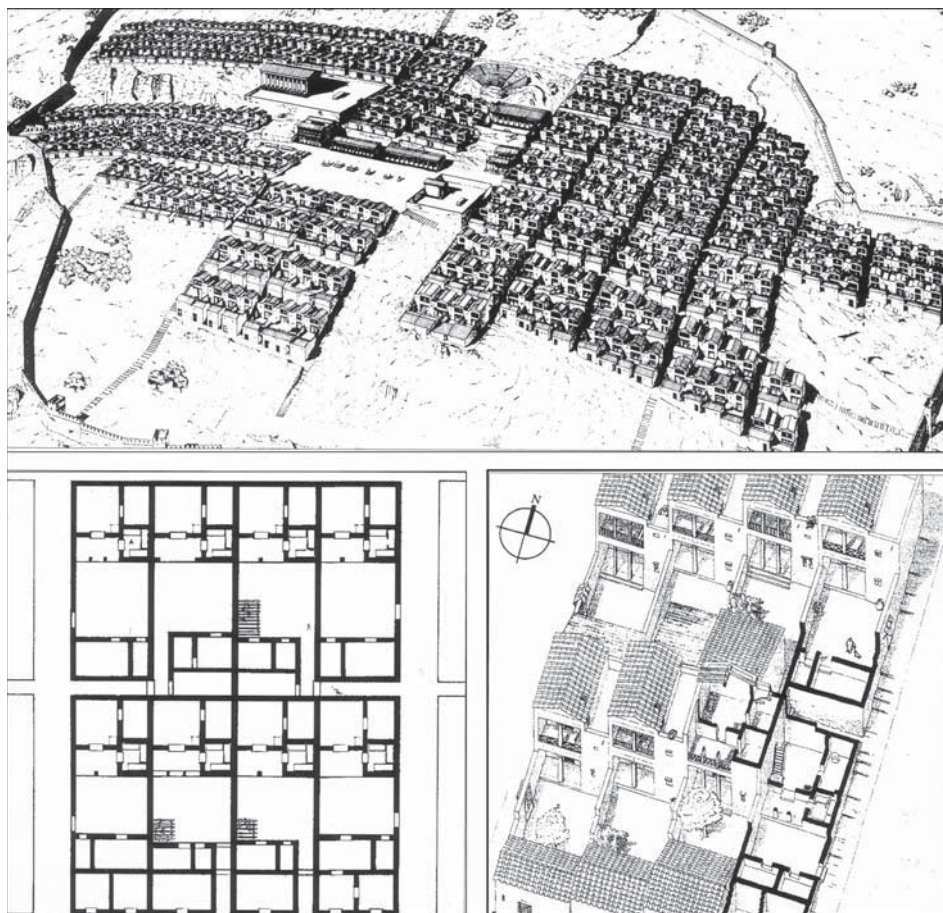


Abbildung 2.7: Rekonstruktion und Struktur der griechischen antiken Stadt Priene

(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*).

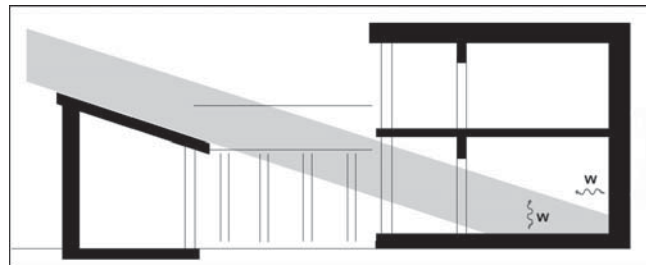


Abbildung 2.8: Griechisches Hofhaus im Winter (Schnitt)

(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.

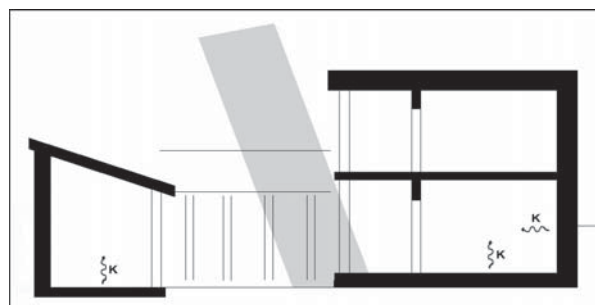


Abbildung 2.9: Griechisches Hofhaus im Sommer (Schnitt)

(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-

förmige Kasbah oder ein nach Norden statt nach Süden geöffnetes Megaron ohne zusätzlichen Einsatz moderner Klimageräte und fossiler Energieträger nicht bewohnbar wären.

Die Essenz aus den vorangegangenen Beispielen ist somit die Erkenntnis, dass im Idealfall sowohl eine zeitliche als auch räumlich-geometrische Korrelation zwischen der Gebäudeform und der im Tages- und Jahresverlauf wechselnden Strahlungsgeometrie in Abhängigkeit von Breitengrad und Klimazone existiert, welche bei der architektonischen Planung grundsätzlich berücksichtigt werden muss.

Das Ziel der Gebäudeform einer Maximierung oder Minimierung der solaren Exposition muss in Abhängigkeit der klimatischen Vorgaben definiert und mittels tages- und jahreszeitlicher Differenzierung für jede einzelne Oberfläche der Gebäudehülle gelöst werden, was wiederum Einfluss auf das eingeschlossene Volumen und damit die Gebäudeform hat.

Heutige Bauwerke in einem zunehmend global einheitlichen Stil sind dagegen nur selten bezüglich Form, Orientierung und Bauweise der Klimazone ihres Standortes angepasst. Eine Differenzierung nach Himmelsrichtungen erfolgt meist weder für die Gebäudeform noch hinsichtlich der Anordnung opaker und transparenter Bauteile (s. *Abbildung 2.10*).

So ist beispielsweise das gläserne Hochhaus ein Exportschlager, der in allen Metropolen der Welt in unterschiedlichsten Klimazonen und Breitengraden wie London oder Dubai vorkommt. Vergleichbares geschieht weniger plakativ aber ebenso folgenreich im Bereich des Wohnungsbaus mit dem Ergebnis, dass beispielsweise bei einem aus Europa nach Ägypten importierten typischen Mehrfamilienhaus die Innentemperaturen tagsüber noch deutlich über den bereits sehr hohen Außentemperaturen liegen können und nur der Einsatz von energieintensiven Klimageräten diese Gebäude überhaupt bewohnbar macht.



Abbildung 2.10: Gläsernes Hochhaus in Boston, USA

(Grafik: Matthias Koranzki / www.PIXELIO.de)

Von einer solaren Stadtplanung wie in Priene, die allen das gleiche Recht auf Zugang zur Sonnenenergie gewährleistet und die Einstrahlung für jedes Grundstück durch geschickte

Straßenführung optimiert, sind wir noch weit entfernt. Zwar gibt es Gesetze zur Einhaltung von Abstandsflächen, um eine übermäßige Verschattung zu vermeiden, doch sind auch diese nicht nach den Himmelsrichtungen differenziert, sondern gelten pauschal für alle Fassaden.

Nun stellt sich die Frage, ob es angesichts der Überlegenheit historischer solarer Bau- und Siedlungsformen nicht sinnvoll wäre, diese zu kopieren und auf heutige moderne Bauweisen zu übertragen. Diese Überlegung kann jedoch eindeutig verneint werden.

Die Begründung liegt in der deutlichen Komforteinbuße, welche mit einer Rückkehr zu den auf passiven solaren Systemen beruhenden historischen Bauformen gegenüber heutigen Ansprüchen und Standards verbunden wäre. Die vorgestellten passiven Prinzipien funktionieren zwar sehr effektiv und zuverlässig, sie sind jedoch weder zentral regelbar oder vom jeweiligen Benutzer auf die individuellen Bedürfnisse einstellbar noch ermöglichen sie das Speichern von Energie, die erst bei Bedarf – und dann in der gewünschten Form als Wärme, Kälte oder Elektrizität – wieder abrufbar ist.

Unabhängig davon wie weit die Reduktion benötigter Energie getrieben wird⁵, sollte jedem bewusst sein, dass bei heutigem Komfortanspruch immer Energie zum Betrieb von Gebäuden notwendig ist. Diesem durch moderne Heiz- und Klimasysteme erreichten Komfortanspruch sollten auch zukünftige Gebäude gerecht werden, allerdings ohne den Einsatz fossiler Energien.

Daher können zukünftig nicht mehr allein passiv solare Gebäudeformen, sondern müssen aktiv solare Gebäudeformen entwickelt werden, die mittels entsprechender Technologien über ihre Gebäudehülle ein Maximum an Umweltenergie einfangen, speichern und bei Bedarf wieder abgeben - zu unterschiedlichsten Zwecken wie Raumkonditionierung, Brauchwassererwärmung, Beleuchtung, Informationstechnologie, Haushaltsgeräte, Elektromobilität etc.

Das Ziel einer zukünftigen Gebäudeform ist somit die Optimierung einer Form für eine solar aktive Nutzung, also zur ganztägigen und ganzjährigen Maximierung der solaren Exposition der aktiven Oberflächen. Für die restlichen Oberflächen gelten weiterhin die Optimierungsprinzipien zur Minimierung der Verluste. Diese Überlegungen fließen auch in die Anordnung opaker und transparenter Oberflächen ein.

Die Umstellung von einer rein passiven, technologiefreien Sonnenenergienutzung auf eine aktive Gewinnung solarer Energie mittels entsprechender Technologien hat jedoch Konsequenzen auf die Gebäudeform. Die Hauptfunktion der sonnenzugewandten Oberflächen ist nicht länger die Transmission, sondern zielt nun ab auf maximale Absorption (s. *Abbildung 2.11*).

⁵ Der Energiebedarf eines Passivhauses liegt beispielsweise bei nur 10% gegenüber dem Referenzbestand.

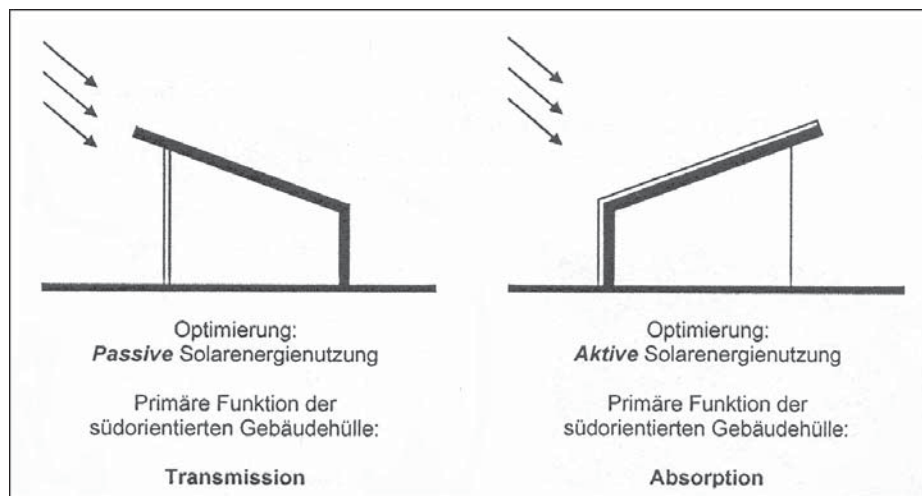


Abbildung 2.11: Zwei gegensätzliche Formoptimierungsprinzipien solarer Architektur zur passiven oder aktiven Nutzung

(Grafik: Stark (2003), S. 233)

Am Beispiel des Megaron ist die Konsequenz dieser Forderungen auf den ersten Blick, die Drehung des Trichters um 180°. Das nun nach Süden geneigte Pultdach wird mittags fast senkrecht getroffen. Die jetzt leicht nach Süden orientierten Ost- und Westfassaden werden vor- und nachmittags ebenfalls fast senkrecht von der tiefstehenden Sonne getroffen. Nachteil der neuen Form ist jedoch die große solarinaktive Nordfassade, die ausschließlich große thermische Verluste produzieren würde. Diese Form ist somit vermutlich noch nicht die ideale solaraktive Gebäudeform. An ihr konnten jedoch die beiden gegensätzlichen Formoptimierungsprinzipien deutlich gemacht werden. Sie demonstrieren, wie der Konflikt zwischen passiver und aktiver Solarenergienutzung die äußere Gebäudeform beeinflusst.

Eine direkte Übertragung historischer Solararchitektur ist somit nicht sinnvoll. Das an den vorangegangenen Beispielen demonstrierte Prinzip der Korrelation von zeitlichen und räumlich-geometrischen Elementen einer solaroptimierten Gebäudeform kann als Analogie jedoch in die Überlegungen zu einer zukünftigen solaraktiven Gebäudeform einfließen.

Doch wie kann eine solche Gebäudeform aussehen, nach welchen Kriterien muss sie optimiert werden und welche Ansprüche werden an sie gestellt?

Kapitel 3

Postfossile Solararchitektur

Gebäudeintegrierte solare Technologien ermöglichen ein radikales Umdenken bei der Beurteilung der Rolle von Gebäuden im Hinblick auf die aktuelle Energie- und Klimaproblematik. Anders als bei den beiden anderen Hauptenergieverbrauchern Industrie und Verkehr ermöglichen solare Technologien im Gebäudesektor erstmals eine positive Gesamtenergiebilanz - sofern das große Potential der bisher ungenutzt auf die Gebäudehülle einfallenden solaren Strahlung nutzbar gemacht wird. Gebäude können somit nicht länger einseitig als Energieverbraucher, sondern müssen als potentielle Energieerzeuger betrachtet werden.

Um jedoch einen nennenswerten Beitrag zur Energieversorgung leisten zu können, muss ein Großteil (z.B. 25 – 50%) der Gebäudehülle – vor allem aber auch nicht länger nur die Einzelfläche, sondern mehrere geeignete Flächen in ihrem tages- und jahreszeitlichen Zusammenspiel – bezüglich ihrer Orientierung und Neigung für solare Nutzungen optimiert werden. Ziel ist hierbei eine möglichst hohe Energiedichte der solaren Einstrahlung zu erreichen, um bereits mit einem möglichst geringen Anteil der Gebäudehülle einen Großteil der insgesamt auf das Gebäude fallenden Energie gewinnen zu können - denn voraussichtlich wird sich in naher Zukunft der Einsatz der vergleichsweise teuren Solartechnologien nur für solche Flächen lohnen, die eine hohe Einstrahlung je Quadratmeter besitzen. In diesem Kapitel sollen daher die formalen Anforderungen an eine zukünftige Solararchitektur besprochen werden.

3.1 Energiedesign

Um eine Symbiose aus Energie und Design im architektonischen Entwurf zu erreichen, ist es zunächst notwendig, sich von herkömmlichen Vorstellungen und bekannten Mustern, die wir mit Gebäuden verbinden, frei zu machen. Der Begriff „Haus“ ist vor dem inneren Auge oft mit konkreten Archetypen wie beispielsweise dem Haus mit Satteldach verbunden. Eine konkrete a priori gesetzte Form würde jedoch den Prozess der Formoptimierung nach solarenerge-

tischen Kriterien behindern. Daher wird folgendes Vorgehen vorgeschlagen: Man denke sich das zu realisierende Bauvolumen abstrakt als eine Knetmasse. Mittels einer bildhauerischen Herangehensweise werden dieser Masse nun von außen sich durch die solare Einstrahlung ergebende Bedingungen aufgeprägt, welche die jahres- und tageszeitliche Varianz des solaren Angebotes in eine räumliche Dimension übersetzen. Es entsteht quasi ein räumlicher Fingerabdruck eines temporalen Effektes. Diese durch Energiedesign entwickelte Gebäudeform besitzt das vorgegebene Volumen, jedoch befreit von Vorgaben wie einer Aufteilung der Gebäudehülle in Kategorien wie Fassaden- und Dachflächen. Jede Teiloberfläche wäre einzeln bezüglich ihrer Ausrichtung und Neigung optimiert und die einzelnen Flächen untereinander in ihrer Größe bezüglich ihrer erzielbaren Einstrahldichte gewichtet. Potentiell günstige Empfangsflächen würden gegenüber ungünstigen vergrößert werden.

Durch diesen Prozess der Anpassung von Neigungswinkeln und Orientierungen dieser besonders geeigneten Teilflächen der Gebäudehülle an solare Vorgaben werden jedoch das eingeschlossene Volumen und damit die Gebäudeform und Nutzbarkeit beeinflusst. In dieser Arbeit wird die Wechselbeziehung zwischen solaren Technologien und architektonischer Formsprache untersucht und verdeutlicht, wie Gebäudeform und -orientierung die effiziente Nutzung solarer Technologien beeinflussen und andersherum solare Technologien den architektonischen Entwurfs- und Gestaltungsprozess verändern können.

Die aus diesen Überlegungen folgenden Entwurfsvorgaben sind dem Energiedesign im Sinne von „form follows energy“⁶ zuzuordnen. Während Energiedesign als Anpassung der Form in der Architektur bislang eher wenig verbreitet ist, gehört sie in vielen anderen Bereichen wie beispielsweise der Automobilindustrie zum Standard. Hier ist es z.B. gängige Praxis, neu entwickelte Automobilkarossen zunächst im Windkanal zu prüfen (s. *Abbildung 3.1*).



Abbildung 3.1: Formoptimierung einer Automobilkarosse im Windkanal

(Grafik: TU Berlin, Hermann-Föttinger-Institut für Strömungsmechani, <http://www2.tu-berlin.de> (Zugriff: 08.05.09))

⁶ Der berühmte Originalauspruch „Form follows function“ (Die Form folgt aus der Funktion) stammt vom amerikanischen Hochhausarchitekten Louis Sullivan und ist ein zentraler Gestaltungsleitsatz aus Design und Architektur. Die Form bzw. die Gestaltung von Produkten/Objekten soll sich dabei aus ihrer Funktion und ihrem Nutzungszweck ableiten. Umgekehrt soll es beim Betrachten einer gelungenen Form immer möglich sein, aus ihrer äußeren Erscheinung ihre Funktion abzuleiten.

Der dabei ermittelte C_w -Wert, der so genannte Luftwiderstandskoeffizient, ist ein reiner Formfaktor, der die Karosseriegeometrie mathematisch auf eine einzige Zahl reduziert. Interessant ist dabei die Beobachtung gegenwärtiger Designtendenzen, dass sich die Formen der Karosserien der unterschiedlichen Automobilmarken immer mehr annähern. Innerhalb der gegebenen Randbedingungen wie Mindest- und Maximalmaßfestsetzungen für Radabstände oder Fahrgastzellen ergibt sich im Windkanal offensichtlich immer die eine wiederkehrende eben nicht beliebige Form, die den geringsten Luftwiderstand und damit die größten Treibstoffersparnisse bietet. Der direkte Zusammenhang von Form und Luftwiderstand bei der Entwicklung von Formen im Automobilbereich ist offensichtlich. Die Kunst des Designers besteht nun darin, sich innerhalb der mathematisch vorgegebenen Exaktheit einen künstlerischen Freiraum zu schaffen und nur durch geringstmögliche Abweichungen von der Idealform das Gesicht der individuelle Marke in Erscheinung treten zu lassen.

In Analogie wäre eine Übertragung eines „solaren C_w -Wertes“ auf die Architektur denkbar. Allerdings sollte dabei bedacht werden, dass die Aufgabe komplexer und multidimensionaler ist. So ist der Luftwiderstand einer Automobilkarosse auf die schnelle Fahrt und somit ausschließlich auf Wind von vorne optimiert. Es gibt also nur eine Optimierungsrichtung.

Zur Optimierung einer Gebäudeform bezüglich solarer Einstrahlung müssen jedoch Tages- und Jahresverlauf der Sonne sowie statistische und stochastische Effekte wie Veränderungen der Atmosphärenzusammensetzung und Wolkenbildung berücksichtigt werden, da sie erheblichen Einfluss auf Absorptions- und Streuvorgänge beim Atmosphärendurchgang solarer Strahlung haben. Richtungsspezifisch ergeben sich somit nicht nur unterschiedliche Quantitäten eingestrahelter Energie, sondern auch Unterschiede der Qualität (Direkt- oder Diffusstrahlung) sowie des jeweiligen Einfallswinkels, was wiederum Einfluss auf die Nutzbarkeit durch bestimmte solare Technologien hat. So können beispielsweise konzentrierende Systeme nur den Direktanteil sowie den circumsolaren Diffusanteil nutzen. Für andere Systeme sind Einstrahlungen mit einem flachen Einfallswinkel unter 5° nicht mehr nutzbar, sondern werden von der Oberfläche reflektiert.

Die Kenntnis von Qualität und Richtung solarer Strahlung ist damit bei der Formfindung von großer Bedeutung.

3.2 Erneuerbare Energien in der Architektur

Die direkte Nutzung erneuerbarer Energie durch die Anpassung der Gebäudeform und die Ablesbarkeit der energetischen Nutzung von außen ist z.B. an der historischen Form der Windmühle jedem bekannt.

Prinzipiell können alle erneuerbaren Energiequellen in direktem Gebäudebezug erschlossen werden. Im Bereich der Gebäudeplanung kommen verschiedene Technologien zur Erzeugung von thermischer oder elektrischer Energie zum Einsatz (s. *Tabelle 3.1*):

Energiequelle	Erscheinungsform	Technologie	Entwurfsrelevant
Solarstrahlung	Globalstrahlung	Photovoltaik, Solarthermie	ja
	Oberflächennahe Erdwärme	Erdwärmetauscher + Wärmepumpe	nein
	Atmosphärenwärme	Luftwärmetauscher + Wärmepumpe	nein
	Wind	Windkraftanlage, Rotor, Turbine	ja
	Laufwasser	Laufwasserkraftwerk, Turbine	nein
	Biomasse	Biogas-, Biokraftstoff-, Pelletofen	nein
Erdwärme	Oberflächenferne Erdwärme	Erdsonden	nein
Gravitation	Gezeitenenergie	Gezeitenkraftwerk	nein

Tabelle 3.1: Technologische Nutzungsmöglichkeiten der verschiedenen Erscheinungsformen erneuerbarer Energiequellen mit Bezug zur Gebäudeform

(Quelle: Stark (2003), eigene Überarbeitung)

Leider erfolgt in den wenigsten Fällen eine gestalterische Integration in den architektonischen Entwurf, sondern die Anlagen werden separat von Fachplanern projektiert. Im Falle von Bestandssanierungen werden diese Anlagen nachträglich als Ersatz für alte Heizkessel geplant, ohne dass dies im Gegenzug Einfluss auf den bestehenden architektonischen Entwurf hat.

Während beispielsweise die Substitution eines Ölkessels durch einen Pelletofen keiner äußerlichen Anpassung des Gebäudeentwurfes bedarf, kann davon ausgegangen werden, dass bei Anbringung einer Solarthermieanlage auf einem noch vor der Erfindung dieser Technologie erbauten Haus vermutlich keine optimalen Bedingungen zur Integration vorgefunden werden.

Die Installation auf bezüglich ihrer Ausrichtung nicht optimierten Oberflächen führt jedoch zwangsweise zu Verlusten und zur Infragestellung des neuen Erscheinungsbildes. Gebäudeform und energetische Nutzung harmonisieren nicht miteinander. Dieser Mangel wird vom Betrachter unterbewusst als Entwurfsflüge⁷ wahrgenommen und verhindert die Akzeptanz der Integration erneuerbarer Energienutzung am Gebäude.

Die Gebäudeintegration entsprechender Technologien erfolgt gegenwärtig in verschiedenen Qualitätsklassen und führt nur selten zur Entwicklung einer neuen Architektursprache.

⁷ „[Nur] Schönes ist wahr und Wahres schön.“ [John Keats: Ode auf eine griechische Urne, London, 1819]

3.3 Architektonische Relevanz

Ein entsprechend dem Gestaltungsleitsatz „form follows energy“ entworfenes Gebäude zeigt an, welche Energieform an ihm genutzt wird. Dies gilt jedoch nur für zwei der oben aufgeführten Technologien (vgl. *Tabelle 3.1*).

Während an der äußeren Gebäudeform nicht ablesbar ist, ob ein Gebäude mit Geothermie oder Biomasse betrieben wird, gibt es zwei Nutzungsformen, die architektonisch relevant sind, zumindest sofern diese Technologie nicht Dekoration, sondern gute Wirkungsgrade bieten soll. Ihr Einsatz erfordert in jedem Fall bauliche Konsequenzen.

Architektonisch relevant, also die Gebäudeform beeinflussend und somit von außen an der Gebäudegestalt ablesbar, sind jedoch nur die Nutzung folgender Energieformen:

- die Nutzung der Globalstrahlung mittels solarer Technologien wie Photovoltaik oder Solarthermie sowie
- die Nutzung der Windkraft durch gebäudeintegrierte Windturbinen oder Darrieus-Rotoren⁸.

Bei der Nutzung der Globalstrahlung am Gebäude sollte die Gebäudeform in ausreichendem Maße geeignete potentielle Empfangsflächen bereitstellen. Die Gebäudeform sollte somit den Bedingungen der Sonnenbahngeometrie angepasst werden (s. *Abbildung 3.2*).

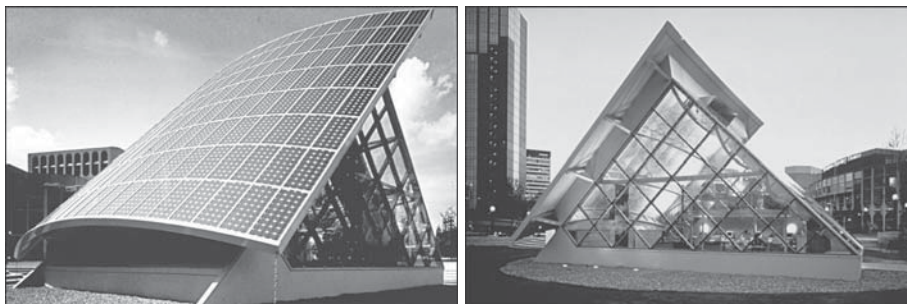


Abbildung 3.2: Beispiel der Formgebung eines Gebäudes nach Vorgaben der Sonnenbahngeometrie; BP Solar Showcase, Port Talbot

(Grafiken: © BP Solar)

Bei der Nutzung von Windkraft am Gebäude sollte auf die Ausrichtung des Gebäudes nach der Hauptwindrichtung geachtet werden. Durch bestimmte Maßnahmen beim Entwurf wird die Gebäudeform den Bedingungen der Windgeometrie angepasst (s. *Abbildung 3.3*).

⁸ Der Darrieus-Rotor (nach seinem Erfinder Georges Darrieus, 1888-1979) stellt eine besondere Windkraftanlagenbauart mit vertikaler Rotationsachse dar. Die Rotorblätter sind am oberen und unteren Ende der Achse befestigt und ragen bogenförmig nach außen.

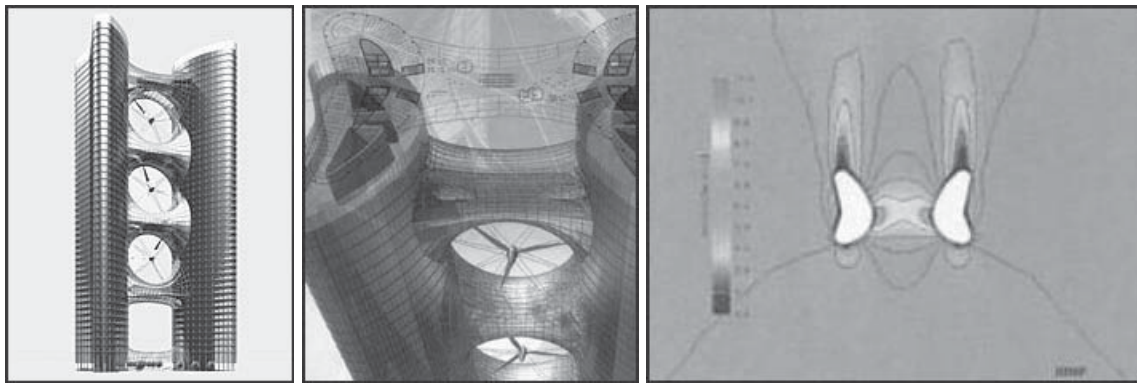


Abbildung 3.3: Beispiel der Formgebung eines Gebäudes nach Vorgaben der Windrichtungsgeometrie; Twin Tower (Entwurf: M. Sehmsdorf, 1999)

(Grafiken: © Universität Stuttgart, Institut für Baukonstruktion, Lehrstuhl 2, Stefan Behling)

Für die Nutzung von Windenergie sind insbesondere Hochhäuser prädestiniert, da sie künstliche Erhebungen darstellen, an denen grundsätzlich höhere Windgeschwindigkeiten herrschen.

Bei diesem Entwurf wurde zudem durch eine spezielle Grundrissform ein zusätzlicher Düseneffekt erzielt. Die doppelte Nierenform saugt die Luft verstärkt an. Aufgrund der zunehmenden Verjüngung des Öffnungsquerschnittes erhöht sich die Strömungsgeschwindigkeit und treibt somit die Turbinen um 25% effektiver an als eine freistehende Windkraftanlage in vergleichbarer Größe und Höhe.

Von allen möglichen Nutzungsformen erneuerbarer Energie am Gebäude gilt ausschließlich für die Nutzung der Globalstrahlung und der Windkraft folgende Wechselbeziehung:

- Die eingesetzte Technologie hat Einfluss auf die architektonische Form.
- Die architektonische Form hat Einfluss auf die Nutzbarkeit der eingesetzten Technologie.

Der ureigensten Aufgabe des Architekten, nämlich der Findung der Form, kommt durch diesen Aspekt eine neue, gesteigerte Aufmerksamkeit zu.

In der vorliegenden Arbeit wird ausschließlich die Nutzung der Globalstrahlung am Gebäude mit dem Ziel der Optimierung der Gebäudeform auf Anforderungen der solaren Technologien untersucht.

Für diese Anwendungen scheint der Gebäudesektor geradezu prädestiniert – insbesondere, wenn man berücksichtigt, dass die Gebäudehülle gegenüber der vom Gebäude überbauten Grundfläche eine um ein Vielfaches vergrößerte Empfangsoberfläche besitzt.

Dieses Prinzip der Oberflächenvergrößerung ist auch von Pflanzen für die Energiegewinnung durch Photosynthese bekannt (s. *Abbildung 3.4*).



Abbildung 3.4: Prinzip der Oberflächenvergrößerung in Analogie: Chlorophyllanordnung im Chloroplasten / Struktur Mannhattans

(Grafik links: www.vivetechnologies.com, letzter Zugriff: 11.05.2009 / Grafik rechts: Reto Fezz (www.pixelio.de), letzter Zugriff: 11.05.2009)

Als Folge dieser auf Oberflächenvergrößerung zielenden Anordnung tritt sowohl im Chloroplasten als auch in einer Stadt der Effekt gegenseitiger Verschattung ein. Im städtischen Kontext nimmt dabei in der Regel die Verschattungsrate mit steigender Bebauungsdichte zu. Dennoch überwiegt der Effekt der Oberflächenvergrößerung, so dass insgesamt mehr Energie auf die luftberührten Gebäudehüllenanteile trifft als auf ihre unbebaute Grundfläche fallen würde. Dies liegt daran, dass insbesondere bei reflektierenden Oberflächen moderner Gebäudefassaden die Strahlung mehrfach auf Hüllflächen auftreffen und so die Richtung ändern kann. Auch ist der Effekt der Verschattung insbesondere bei hohem Diffusanteil weniger problematisch als bei hohem Direktanteil. In Städten überwiegt aufgrund der Anreicherung der Luft mit feinsten Schwebstoffen in der Regel der Diffusanteil, welcher den Effekt der gegenseitigen Verschattung des Direktstrahlungsanteils wieder etwas abmildert.

3.4 Anforderungen zukünftiger Solararchitektur

Die Motivation für einen dringenden Forschungsbedarf auf dem Gebiet der solaren Energiegewinnung an Gebäudeoberflächen ergibt sich aus der Tatsache, dass unser heutiger Neubau und Gebäudebestand aufgrund langer Lebens- und Sanierungszyklen voraussichtlich noch im Gebrauch sein wird, wenn uns fossile Energieträger zu ihrem Betrieb nicht mehr in ausreichender Form zur Verfügung stehen. Sofern möglich sollte deshalb schon heute insbesondere bei der Neuplanung, aber auch beim Um-, An- und Weiterbau im Bestand darauf geachtet werden, die Gebäude auf eine zukünftige Verknappung fossiler Energien vorzubereiten. Im Hinblick auf die Größenordnung der täglich ungenutzten solaren Einstrahlung auf die Gebäudehüllen wäre es ein sinnvoller Schritt, bei der Planung der Gebäudeform und Gebäudeorientierung bereits potentielle solare Empfangsflächen in ausreichender Zahl und

Güte für eine spätere intensive Nutzung solarer Einstrahlung einzuplanen. Die Forderung nach Nachrüstbarkeit gilt auch hinsichtlich der Tatsache, dass solare Technologien zum jetzigen Zeitpunkt noch zu kostenintensiv sind, um tatsächlich bei jedem Gebäude einen großen Anteil der Gebäudehülle (z.B. das günstigste Drittel) zu bedecken. Dies liegt daran, dass bei einer derart großflächigen Anwendung auch Hüllflächenbereiche mit einbezogen werden müssten, die keine optimale Ausrichtung zur Sonne bieten, zukünftig aber im Jahres- oder Tagesverlauf wichtige Energieeinheiten zur Gesamtenergieperformance des Gebäudes beisteuern könnten. Dessen ungeachtet, sollten diese potentiellen Empfangsflächen schon heute im Entwurf der Gebäudeform vorbereitend angelegt werden, selbst wenn sie erst in einigen Jahren mit modernen, dann noch effizienteren und zugleich preiswerteren solaren Technologien belegt werden können.

Für eine gesteigerte Effizienz der Gebäudeform ergeben sich somit folgende Forderungen an eine solaraktive Gebäudehülle:

- Amplifikation
- Konzentration
- Kombination
- Integration
- Substitution
- Adaption.

Diese Forderungen werden im Einzelnen erläutert.

3.4.1 Amplifikation

Für eine angestrebte solare Vollversorgung ist es notwendig, in größeren Maßstäben zu denken. Die solaren Flächen pro Gebäude müssen größer werden. Für das einzelne Gebäude bedeutet dies, dass nicht länger nur einige vereinzelte Module in einer Ecke des optimal ausgerichteten Daches installiert werden, sondern dass ein Großteil der Gebäudehülle, z.B. die günstigsten 25-50%, zur aktiven solaren Nutzung bereitgestellt werden. Obwohl solare Technologien noch relativ kostspielig sind, sollten schon heute Gebäudeformen entwickelt werden, bei denen ein Großteil ihrer Hüllflächen als potentielle solare Empfangsfläche geeignet ist.

3.4.2 Konzentration

Die Vergrößerung der solaren Empfangsflächen darf jedoch nicht wahllos erfolgen, sondern muss bestimmten Zielsetzungen entsprechen. Die wichtigste Optimierungsstrategie bei der Findung der Gebäudeform ist hierbei die der Konzentration eines Großteils der insgesamt auf das Gebäude fallenden Energie auf einige wenige, besonders günstige Hüllflächenanteile. Dies gilt umso mehr, da Wirkungsweise, Wirkungsgrad und Kosten zukünftiger solarer Technologien heute noch nicht vorhersehbar sind. Solange nicht davon auszugehen ist, dass

diese Technologien sehr preiswert zu beziehen sind oder aufgrund sehr hoher Wirkungsgrade nur einen kleinen Anteil der Gebäudeoberfläche benötigen, um den anfallenden Bedarf zu decken, sollten diese Empfangsflächen allgemein auf eine möglichst hohe Konzentration der solaren Energieeinstrahlung optimiert werden.

3.4.3 Kombination

Nicht länger darf nur die einzelne ideal geneigte und orientierte Einzelfläche im Vordergrund stehen. Mit ihr wäre aus geometrischen Gründen bereits die Realisierung einer 50-prozentigen Nutzung der Gebäudehülle nicht mehr möglich, da der rückwärtige Abschluss der Gebäudeform mit den verbleibenden Hüllflächenanteilen nicht mehr gelingen kann – die sich ergebende Form wäre eine plane Scheibe ohne inneres Volumen. Folglich ist es unumgänglich auch diejenigen Teiloberflächen in Betracht zu ziehen, welche von der Idealausrichtung abweichen. Für eine optimale Gesamtenergiestrategie zur solaren Versorgung eines Gebäudes muss daher das jahres- und tageszeitliche Zusammenspiel mehrerer dieser geeigneten Flächen betrachtet werden. Dabei kann sich z.B. eine Fläche mit einer schlechten Jahresbilanz durchaus für eine bestimmte Anwendung besonders gut eignen, z.B. bei einem winterlichen Maximum zur Heizungsunterstützung. Dies gilt analog für die Anpassung der Tageskurven.

3.4.4 Integration

Die Integration von solaren Technologien in die Gebäudehülle statt das nachträgliche fremdkörperartige Anbringen ist eine Grundvoraussetzung, um die formale und konstruktive Einheit von Architektur und solarer Technologie herbeizuführen.

3.4.5 Substitution

In Folge der Integration kommt es zu vorteilhaften Substitutionseffekten, da die in die Hülle integrierten solaren Technologien andere Baumaterialien oder gar ganze Bauteile ersetzen können, indem sie neben der Funktion der Energiegewinnung alle klassischen Aufgaben einer Gebäudehülle wie Witterungsschutz, Wärmeschutz, Lärmschutz, Sichtschutz, Blendenschutz sowie Gestaltungsanforderungen übernimmt. Auf diese Weise können die Kosten pro Quadratmeter realisierte Solarempfangsfläche deutlich reduziert werden, da die Kosten für das substituierte Baumaterial oder Bauteil entfallen. Dies verhilft zu einer schnelleren finanziellen, aber auch energetischen Amortisation⁹ der eingesetzten solaren Technologie.

⁹ Zur Berechnung der Amortisation von Mehrkosten für solare Anlagen sei jedoch daran erinnert, dass für andere Bauteile der Gebäudehülle nicht die Forderung erhoben wird, sich innerhalb eines Zeitraumes finanziell oder energetisch amortisieren zu müssen, obwohl ähnlich hohe finanzielle (z.B. Marmorfassade) oder energetische (z.B. Aluminiumfalzdach) Aufwendungen zu ihrer Realisierung nötig sind.

3.4.6 Adaption

Nicht die nachträgliche Addition von solaren Technologien auf eine nicht nach solaren Kriterien entwickelten Bauform (s. *Abbildung 3.5*), sondern die Adaption, also das unter 3.3 beschriebene harmonische Aufeinandereingehen von Form und Technologie zum Zweck der gegenseitigen Unterstützung (s. *Abbildung 3.6*) führt zu einer ästhetisch ansprechenden solaren Formensprache.

Der Gegensatz von Addition und Adaption soll im Folgenden an zwei Beispielen verdeutlicht werden.



Abbildung 3.5: Beispiel für eine nachträgliche Addition solarer Technologien

(Grafik: Túrelío; Wikimedia Commons)

In *Abbildung 3.5* ist die additive Anbringung einer Solaranlage auf einem Fachwerkhaus gezeigt. Bei genauerer Betrachtung wird deutlich, dass das Gebäude bezüglich seiner Form, seiner Orientierung sowie der Bereitstellung optimierter Empfangsflächen nicht auf solare Anforderungen eingeht. Dies ist nicht verwunderlich, da das Fachwerkhaus noch deutlich vor der Erfindung aktiver solarer Technologie erbaut wurde.

Um dennoch das Gesamtbild zu harmonisieren, wurde versucht bei der Planung der Photovoltaikanlage gestalterisch auf die Vorgaben des Gebäudes zu reagieren, indem beispielsweise der regelmäßige Abstand der Holzständer sowie das quadratische Raster der Gefache optisch fortgeführt werden.

Trotz dieser formalen Übereinstimmung mit dem vorhandenen Entwurf wird die Anlage vom Betrachter als störender Fremdkörper wahrgenommen, der nicht in die Dachhaut integriert ist, den äußeren Abschlüssen der Dachfläche nicht folgt, der Dachdeckung farblich nicht angepasst ist, eine angesichts der Unregelmäßigkeiten der Fassade unpassende Regelmäßigkeit besitzt und gegenüber der dominanten Fassadengestaltung einen starken disharmonischen Gegenpol darstellt.

Als besonders störend nimmt der Betrachter jedoch unterbewusst wahr, dass die solare Technologie und die Gebäudeform untereinander nicht korrespondieren.



Abbildung 3.6: Beispiele für die Adaption solarer Technologien beim Entwurf der Form

(Grafik oben links: Bauer Energietechnik, Ingolstadt, © Sunways AG)

Grafik oben mittig: Einfamilien-Nurdachhaus, © Solar Verlag, Photon 5/2005

Grafik oben rechts: Photovoltaik-Informations-Zentrum, Gelsenkirchen, © Deutsche Shell Solar

Grafik unten links: JuWiSolarhaus, Bolanden, © Stefan Oehler

Grafik unten rechts: BP Solar Showcase, Port Talbot, © BP Solar)

In *Abbildung 3.6* sind fünf Beispiele für adaptive Entwurfskonzepte dargestellt. Auf den ersten Blick fallen die unkonventionellen Gebäudeformen auf, welche sich aus den Anforderungen der in ihre Hüllen großflächig integrierten solaren Technologien ergeben. Die hier entwickelten Gebäudeformen ermöglichen eine maximale Exposition der potentiellen Empfangsflächen gegenüber solarer Einstrahlung im Tages- und Jahresverlauf. Das Prinzip von „form follows energy“ ist an diesen „intelligenten“ Formen direkt ablesbar. Die Synthese von Technologie und Form hat zu einer neuen solaren Architektursprache geführt, die über einen dekorativen Einsatz hinaus funktionelle Ansprüche in den Vordergrund stellt. Das Ergebnis ist dennoch optisch ansprechend und wird vom Betrachter als harmonisch empfunden.

In seiner Dissertation¹⁰ betont Stark, dass das Stadium der Adaption nur dann erreicht ist, wenn die Solarkomponenten in dominanter Art in das Entwurfskonzept eingebunden sind und sich der baukörperliche Entwurf an die technologischen Vorgaben anpasst, um deren Effizienz zu steigern. Es entsteht eine gegenseitige Abhängigkeit, die beim Ersetzen der Solartechnik durch konventionelle Materialien, wie z.B. Holz oder Klinker, den Entwurf in Frage stellen würde. Erst durch die Adaption entstehen neue baukörperliche Ausdrucksformen. Anders als bei der Addition handelt es sich nicht um technologische, sondern um architektonische Lösungen. Solarkomponenten haben somit ein großes Potential, die zukünftige Solararchitektur formal zu prägen.

¹⁰ [Stark (2003); S. 221-232]

An diesen Beispielen werden die Konsequenzen aus den an eine postfossile solare Architektur gestellten Anforderungen - Amplifikation, Konzentration, Kombination, Integration, Substitution und Adaption – deutlich:

- Es ist nicht länger sinnvoll, die Teilflächen der Gebäudeoberfläche einseitig den Kategorien *Dach* oder *Fassade* zuzuordnen. Diese Differenzierung fällt mit neuen, nach solaren Kriterien entworfenen Gebäudeformen zunehmend schwer und wird entbehrlich.
- Die Empfehlung lautet, zukünftig nur noch von einer *Gebäudehülle* zu sprechen, deren Teilflächen im Entwurfsprozess frei von konventionellen Vorstellungen unterschiedlichste Orientierungen und Neigungen annehmen können.

3.5 Gebäudeform und Energie

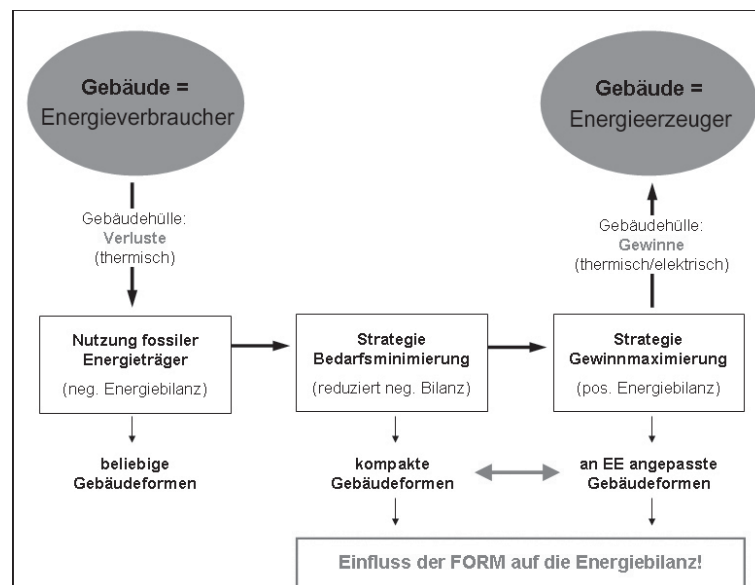


Abbildung 3.7: Schematische Darstellung der Wechselbeziehung von Gebäudeform und Gebäudeenergiebilanz

(Grafik: eigene)

Die Grafik in *Abbildung 3.7* zeigt den gegenseitigen Einfluss von Gebäudeform und Energiebilanz in seiner historischen Entwicklung von links nach rechts.

Traditionell sind Gebäude Energieverbraucher. Ein Grossteil, der im Kontext mit Gebäuden eingesetzten Energiemenge wird hierbei für die Aufrechterhaltung des thermischen Komforts in ihrem Innern aufgewendet. Die Anteile für Brauchwassererwärmung und Elektrizität sind im Bestand vergleichsweise gering. Erst bei hoch gedämmten Gebäuden verliert der thermische Komfort seine Dominanz. Doch selbst bei guter Dämmung erleiden Gebäude über ihre Gebäudehülle kontinuierlich thermische Verluste, welche bislang insbesondere im Altbaube-

stand nur durch den massiven Einsatz fossiler Energieträger ausgeglichen werden konnten. Dies führte jedoch zu einer stark negativen Energiebilanz im Gebäudesektor, welcher in den Industrieländern für rund 40% des Endenergieverbrauchs verantwortlich ist¹¹. Dieser Energieverbrauch im Gebäudesektor steigt tendenziell weiter an. Zu den Gründen zählen wachsende Komfortansprüche, verstärkte Ausstattung der Immobilien mit Klimageräten und zusätzlichen Stromverbrauchern¹² sowie die Zunahme von Singlehaushalten und andere Effekte, die zur stetigen Vergrößerung der beheizten Wohnfläche pro Person führen.

Um dieser Entwicklung entgegenzusteuern, wurden insbesondere nach den Ölkrisen gegen Ende des 20. Jahrhunderts Strategien zur Bedarfsminimierung entwickelt. Zu den bekanntesten zählt hier die Passivhausbewegung. Durch ein Paket aufeinander abgestimmter Einzelmaßnahmen¹³ kann der Energiebedarf eines Gebäudes in Passivhausausführung durchaus um 90% gegenüber dem Bestand reduziert werden.

So lobenswert diese Entwicklung auch ist, man muss sich hierbei darüber im Klaren sein, dass diese Maßnahmen den Bedarf nur reduzieren und die Energiebilanz weiterhin negativ bleibt. Die Reduktion des Verbrauchs bedeutet lediglich die Streckung der fossilen Vorkommen um den erzielten Optimierungsfaktor. Damit ist dies ein sehr guter Ansatz, um Zeit zu gewinnen für die Etablierung weitgreifenderer Lösungen. Auf lange Sicht bietet die Verlustminimierungsstrategie jedoch nicht eine befriedigende Lösung des Energieproblems, sondern stellt einen Zwischenschritt dar.

Für eine Umkehr der Negativbilanz des Gebäudesektors in eine positive Bilanz muss zukünftig die Strategie der Gewinnmaximierung verfolgt werden. Diese fordert, dass Gebäude über ihre Hüllflächen mehr thermische und elektrische Gewinne produzieren, als während ihres gesamten Lebenszyklus für

- ihre Erstellung,
- ihren Betrieb und
- ihren Abriss

notwendig ist.

Nur in diesem Fall können sich Gebäude von Energieverbrauchern zu Energieerzeugern wandeln.

¹¹ Endenergieverbrauch der USA 2007 nach Sektoren: Privathaushalte und öffentliche Gebäude 39%, Industrie 32% und Transport 29%. [EIA 2007, S. 36].

¹² Haushaltsgeräte, Kommunikations- und Medientechnik, Gebäudeautomatisation etc.

¹³ Optimierung der thermischen Hülle durch Superdämmung, Reduktion der Wärmebrücken, Drei- bis Vierfachverglasung, Kompaktheit der Gebäudeform, Luftdichtheit, passive Nutzung solarer Energien zur Heizungsunterstützung im Winter, Einsatz von Lüftungsanlagen mit Wärmerückgewinnung, Effizienzsteigerung der technischen Gebäudeausstattung

Die Strategie der Gewinnmaximierung ist in Ländern mit hohen Altbaubeständen jedoch nicht für jedes einzelne Gebäude problemlos realisierbar. Häufige Probleme sind hier gegenseitige Verschattungssituationen, Auflagen des Denkmalschutzes und nur sehr geringe Möglichkeiten der nachträglichen Optimierung der Gebäudeform.

Umso mehr liegt das Potential in der jährliche Neubau- und Sanierungsrate der Industrieländer sowie dem rasanten Baufortschritt in Entwicklungs- und Schwellenländern.

Durch solar-optimierte Gebäude könnten Energieüberschüsse zur Deckung des Bedarfs im Altbau sowie für Abnehmer Industrie und Verkehr produziert werden.

An den drei Energiestrategien

- fossil,
- bedarfsminimiert und
- gewinnmaximiert

ist zudem deutlich eine direkte Relation zur Gebäudeform abzulesen (s. *Abbildung 3.7*):

- Während die Nutzung fossiler Energien beliebige Gebäudeformen weltweit, leider oft ohne Berücksichtigung regionaler klimatischer Gegebenheiten, ermöglicht hat,
- fordert die Strategie der Bedarfsminimierung eine möglichst kompakte Gebäudeform, da auf diese Weise die Wärme abgebende Gebäudeoberfläche und die damit verbundenen thermischen Verluste reduziert werden. Des Weiteren sollen Großformen vielen einzelnen Kleinformen vorgezogen werden, da sich hierdurch das Verhältnis von Oberfläche zu eingeschlossenem Volumen vorteilhaft entwickelt.
- Anders dagegen die Forderung der Gewinnmaximierung an die Gebäudeform. Diese sollte sich hier an die Vorgaben der gewählten erneuerbaren Energieform anpassen, wie bereits in 3.3 erläutert.

An diesen drei Beispielen ist der deutliche Einfluss der Gebäudeform auf die Energiebilanz eines Gebäudes ablesbar, aber auch die Tatsache, dass sich diese Forderungen konträr gegenüberstehen können.

3.6 Verlustminimierungs- versus Gewinnmaximierungsstrategie

Die Grafik in *Abbildung 3.8* zeigt das gegenseitige Wechselspiel der Anforderungen von Verlustminimierungsstrategie einerseits und Gewinnmaximierungsstrategie andererseits an die konkrete dreidimensionale Gebäudekubatur. Die Ausformung der Gebäudehülle entscheidet über die Dimension thermischer Verluste ebenso wie über das Vorhandensein potentieller solarer Empfangsflächen und den Grad ihrer solaren Exposition.

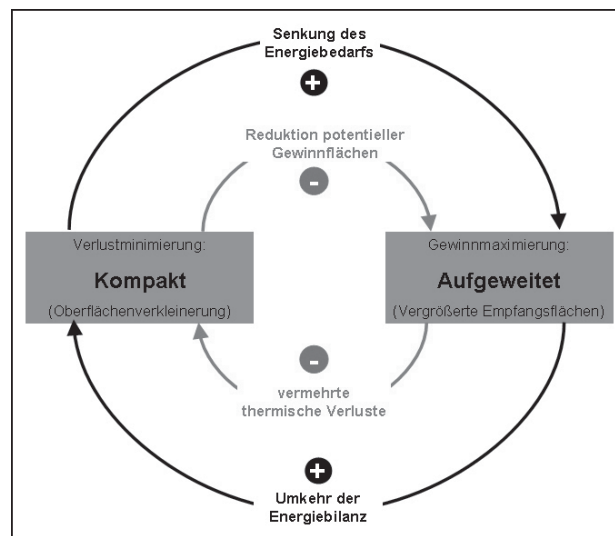


Abbildung 3.8: Schematische Darstellung der gegenseitigen Beeinflussung von Verlustminimierungsstrategie und Gewinnmaximierungsstrategie

(Grafik: eigene)

Zunächst ist auf die gegenseitige positive Beeinflussung der beiden konträren Forderungen von Kompaktheit einerseits und Anpassung an Erneuerbare Energien andererseits hinzuweisen. Durch die Strategie der Verlustminimierung wird der Energiebedarf in einer Größenordnung gesenkt, die das Gebäude in die Lage versetzt, den verbleibenden Restbedarf allein aus regenerativen Quellen zu decken. Dies ist umso wichtiger, da regenerative Energien zwar in sehr großen Mengen, jedoch nur in sehr geringen Dichten vorkommen, so dass zu deren Nutzbarmachung aufwendige und teure Technologien mit zumeist nur niedrigen Wirkungsgraden notwendig sind. Hinzu kommen Speicher- und Umwandlungsverluste. Die Entwicklung der Verlustminimierungsstrategie hat somit überhaupt erst realistische Überlegungen zu Szenarien einer solaren Vollversorgung ermöglicht.

Andererseits kann diese Strategie allein nicht zur Gesamtlösung des Energieproblems führen, sondern es bedarf der Gewinnmaximierungsstrategie und der Nutzung solarer Technologien, um die Negativbilanz in eine Positivbilanz umzukehren.

Das Problem besteht in den widersprüchlichen Konsequenzen der jeweiligen Forderungen:

- der aus der Kompaktheitsforderung resultierenden Oberflächenverkleinerung einerseits (die jedoch zur ungewollten Reduktion potentieller Gewinnflächen führt) und
- der aus der Gewinnmaximierung folgenden Vergrößerung von solaren Empfangsflächen andererseits (welche wiederum zu höheren thermischen Verlusten führt).

Ziel und Aufgabe dieser Forschungsarbeit ist es, den idealen Punkt im Spannungsfeld zwischen den beiden gegensätzlichen Polen zu finden.

3.7 Forschungsfrage

Aus der Zusammenschau aller oben aufgeführten Überlegungen zu einer zukünftigen Solararchitektur ergibt sich eine deutliche Forschungslücke, deren Fragestellungen wie folgt formuliert werden können:

- Welchen Einfluss hat die Gebäudeform auf die Energiebilanz der Hülle aus thermischen Verlusten gegenüber solaren Gewinnen?
- Wie groß ist dieser Einfluss und durch welche Parameter wird er beeinflusst?
- Wie könnte man diesen Formfaktor mathematisch bestimmen?
- Wie können über die Gebäudeform thermische Verluste minimiert und gleichzeitig solare Gewinne maximiert werden?
- Wo liegt der ideale Punkt im Spannungsfeld zwischen Verlustminimierungsstrategie und Gewinnmaximierungsstrategie?
- Wie müssten Gebäude an jeweils verschiedenen konkreten Standorten geformt sein, um eine möglichst positive Energiebilanz aufzuweisen?
- Welchen Einfluss haben klimatische Bedingungen und solares Angebot am jeweiligen Standort auf die Energiebilanz und wie sind sie gewichtet?
- Ergeben sich für unterschiedliche Standorte jeweils typische Gebäudeformen?
- Wie erreicht man durch Formoptimierungsprozesse die maximale Konzentration der einfallenden Solarenergiestrahlung?
- Welchen Einfluss hat allein die Optimierung der Gebäudeausrichtung ohne zusätzliche Solarisierung der Form?
- Sind bereits die Gebäudeformen des Baubestands zur gebäudeintegrierten Solarenergiegewinnung geeignet oder muss eine neue solare Formensprache entwickelt werden?
- Wie groß wäre der Vorteil einer solaren Gebäudeform gegenüber konventionellen Bauformen?
- Gibt es – z.B. in Analogie zum Wirkungsgrad einer PV-Zelle – auch den Wirkungsgrad einer Gebäudeform?
- Gibt es die eine ideale Gebäudeform?

Zur Beantwortung dieser Fragen ergibt sich die Notwendigkeit:

- einer methodisch-mathematischen Untersuchung anhand von Formen- und Parameterstudien unter verschiedenen klimatischen und solaren Randbedingungen
- der Entwicklung eines geeigneten Werkzeuges, mit dem der „Wirkungsgrad einer Gebäudeform“ beurteilt werden kann und
- der Ableitung geometrisch-energetischer Gebäudekenngrößen.

Kapitel 4

Formbeeinflussende energetische Gebäude- kenngrößen (Stand der Forschung)

In der Architektur gibt es nur wenige mathematisch definierte Gebäudekenngrößen, die die Formgebung beeinflussen und das Ziel einer energetischen Optimierung haben. In diesem Kapitel werden die folgenden bekannten Größen bzw. Methoden vorgestellt und ihre Grenzen kritisch beleuchtet:

- Oberflächen-Volumen-Verhältnis (A/V-Verhältnis)
- Entwurfsgütezahl (EGZ)
- Solar Rights Envelope (SRE).

4.1 Oberflächen-Volumen-Verhältnis (A/V) - Verlustminimierung

4.1.1 Definition

Die bekannteste gebäudegeometrische Kennzahl ist das A/V-Verhältnis, welches sich aus der Relation von wärmeübertragender Außenfläche zu umschlossenem Volumen berechnet.

$$A/V - \text{Verhältnis} = \frac{\text{wärmeübertragende Außenfläche } A}{\text{eingeschlossenen Volumen } V} \quad (4.1)$$

Es sollen möglichst kleine A/V-Verhältnisse angestrebt werden, also eine maximale Kompaktheit der Form. Diese kann auf zwei Arten erreicht werden - entweder über die Form oder über die absolute Größe. Je mehr sich die Form der Kugel (bzw. Halbkugel) annähert, umso kompakter ist sie. Je größer eine Form ist, umso besser ist das A/V-Verhältnis, da das Volumen bei einer zentrischen Streckung kubisch wächst, die Oberfläche jedoch nur quadratisch.

Eine bekannte Analogie aus den Naturwissenschaften beschreibt die Bergmannsche Regel, welche besagt, dass bei endothermen Tieren die Individuen einer Art in den kälteren Arealen größer sind als in den wärmeren. Diese ökogeografische Regel erklärt beispielsweise die Zunahme der Körpergröße von Pinguin-Arten vom Äquator zum Pol, welche eine auf die jeweilige Jahresmitteltemperatur optimierte Relation von Körperoberfläche zu Volumen darstellt, mit dem Ziel bei verringerter relativer Körperfläche die relativen Körperwärmeverluste zu minimieren.

Diese Forderung nach einem möglichst kleinen A/V-Verhältnis zielt analog bei Gebäuden darauf ab, die thermischen Verluste über die Gebäudehülle zu minimieren. Das A/V-Verhältnis ist somit der Verlustminimierungsstrategie zuzuordnen. Gesetzliche Regelungen zur Energieeinsparung geben deshalb konkrete A/V-Verhältnisse vor [vgl. EnEV 2009].

Für ein konstantes Volumen V kann in verschiedenen Versuchsreihen unter Variation der Form bzw. der unterschiedlichen Anordnung und Gruppieren gleicher Anzahl an Wohneinheiten die prozentuale Veränderung der Hüllflächengröße und damit des A/V-Verhältnisses untersucht werden (s. *Abbildung 4.1*).

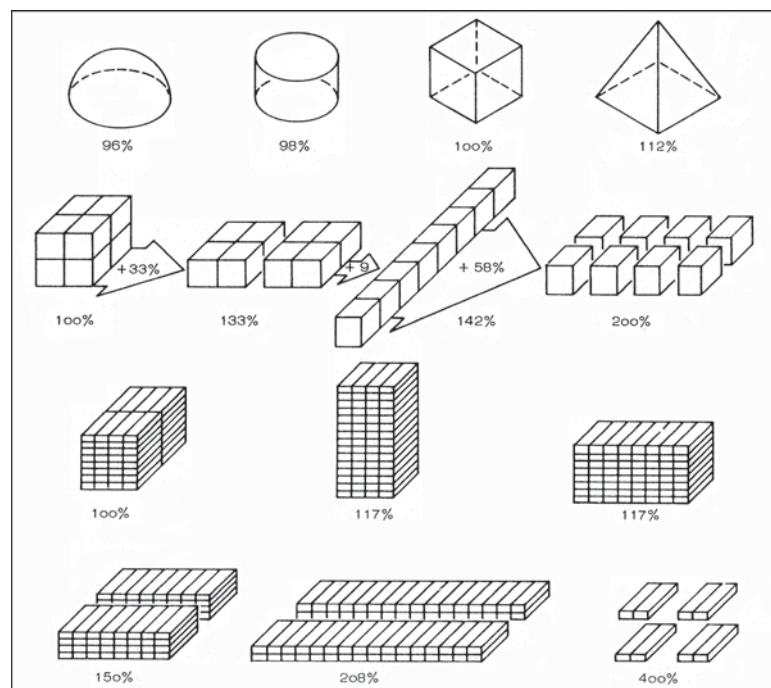


Abbildung 4.1: Prozentuale Veränderungen der Hüllflächengröße bei Variation eines konstanten Volumens bzw. unterschiedlicher Anordnung einer Anzahl Wohneinheiten

(Grafik: Hillman (1982), S. 80)

Hieraus können u.a. folgende Erkenntnisse gewonnen werden:

- Die Halbkugel hat gegenüber dem Würfel als Referenzform ein um 4% geringeres A/V-Verhältnis, während die Pyramide 12% über dem Würfel liegt.

- Ein aus acht kleinen Einzelwürfeln zusammengesetzter kompakter Würfel hat eine um 42% kleinere Hüllfläche als eine aus diesen Einzelwürfeln gebildete Reihe. Die Einzelaufstellung der Würfel führt sogar zu einer Verdoppelung der zu erwartenden thermischen Verluste.
- Die Anordnung von Wohneinheiten in Großformen wie Blöcken oder Hochhäusern führt zu deutlich geringeren A/V-Verhältnissen als die Anordnung in kleineren Mehrfamilien-, Reihen- oder Doppelhäusern.

Um den Einfluss eines einzelnen geometrischen Kriteriums wie beispielsweise der Gebäudehöhe zu untersuchen, müssen Formenreihen entwickelt werden, deren einzelne Elemente alle nach einem einheitlichen Schema konstruiert werden. Am Anfang einer Formenreihe steht ein konstantes Volumen (z.B. 1.000 m³), welches gemäß einer festgelegten Umformungsvorschrift in der äußeren Form variiert wird.

Für die nachfolgenden Untersuchungen wurde beispielhaft die Umformungsvorschrift „Variation der Höhe über quadratischem Grundriss“ gewählt. Damit ergeben sich für die eingeführte Formenreihe (s. *Abbildung 4.2*) die Proportionen von Länge zu Tiefe zu Höhe der einzelnen Formen zu:

- 1:1:10 (Turm)
- 1:1:1 (Würfel)
- 10:10:1 (Halle).

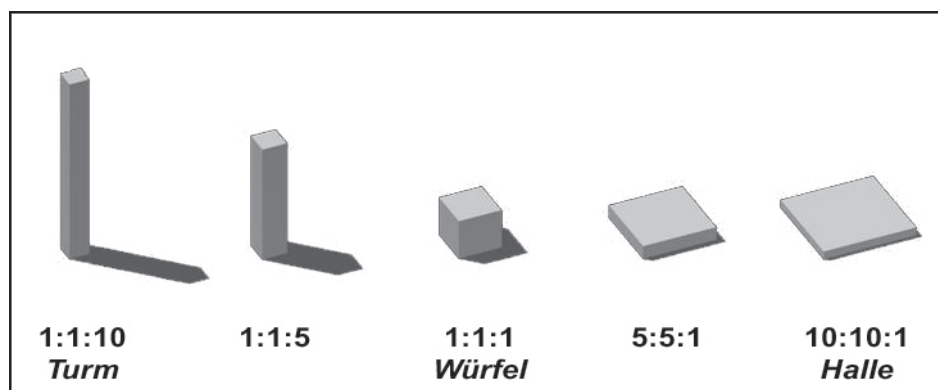


Abbildung 4.2: Formenreihe Turm – Würfel – Halle gemäß der Umformungsvorschrift „Variation der Höhe über quadratischem Grundriss bei konstantem Volumen“

(Grafik: eigene)

Das Volumen bleibt bei dieser Umformung konstant, für jede Form ergibt sich jedoch eine andere Summe der Gesamtoberfläche. Die daraus resultierenden Abweichungen der A/V-Verhältnisse sind in einem Graphen aufgetragen (s. *Abbildung 4.3*). Dieser zeigt für die Formenreihe alle A/V-Verhältnisse bei unterschiedlich gewählten Volumina von 1.000m³ (Einfamilienhaus), 5.000m³ (Reihenhaus), 10.000m³ (Mehrfamilienhaus) und 50.000m³ (Großform).

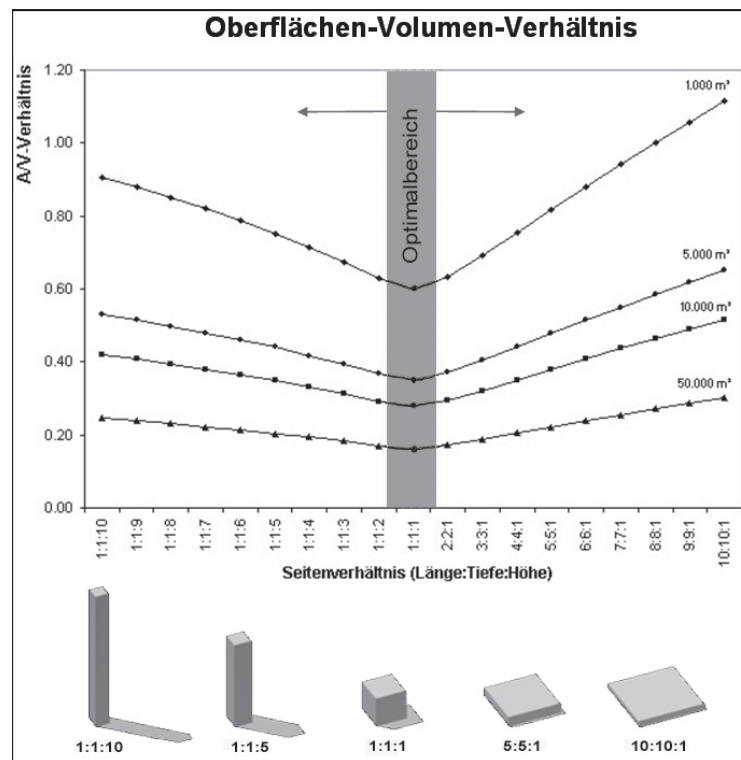


Abbildung 4.3: Diagramm für A/V-Graphen der Formenreihe Turm – Würfel – Halle für verschiedene Volumina

(Grafik: eigene)

Die Grafik zeigt für hohe, kompakte und flache Gebäudeformen deutlich unterschiedliche Entwicklungstendenzen, aber auch den Einfluss der absoluten Gebäudegröße. Besonders niedrige und damit gute A/V-Verhältnisse ergeben sich für das größte Volumen (50.000m³), während das kleinste Volumen (1.000m³) die ungünstigsten Werte erreicht. Hier ist der Einfluss der Gebäudeform auch deutlicher ausgeprägter als bei großen Volumina. Allen Kurven ist gemeinsam, dass sie ihren optimalen Bereich in der Nähe des Würfels haben und Hallen ungünstigere Werte ergeben als Türme. Bei einer gedanklichen Fortführung der Reihe ergeben sich keine typischen Schwellenwerte.

Auf Basis des A/V-Verhältnisses wurden verschiedene Überlegungen angestellt, zu den bekanntesten gehört Olgyays *bioklimatisches A/V-Verhältnis-Konzept*. Nach Olgyay gehört die Betrachtung der Energieumwandlungsprozesse zu den Grundlagen der architektonischen Formfindung im Entwurf.

Vom A/V-Verhältnis sind sowohl Prozesse der Energieaufnahme als auch –abgabe von Gebäuden in Relation zum jeweiligen Klima am Standort abhängig. Olgyay untersuchte deshalb das thermische Verhalten von Gebäuden mit unterschiedlichen Grundrissen in vier verschiedenen Klimazonen und ermittelt das jeweilige Optimum von Form, Proportionen, Orientierung und A/V-Verhältnis in einer Formenstudie (s. Abbildung 4.4).

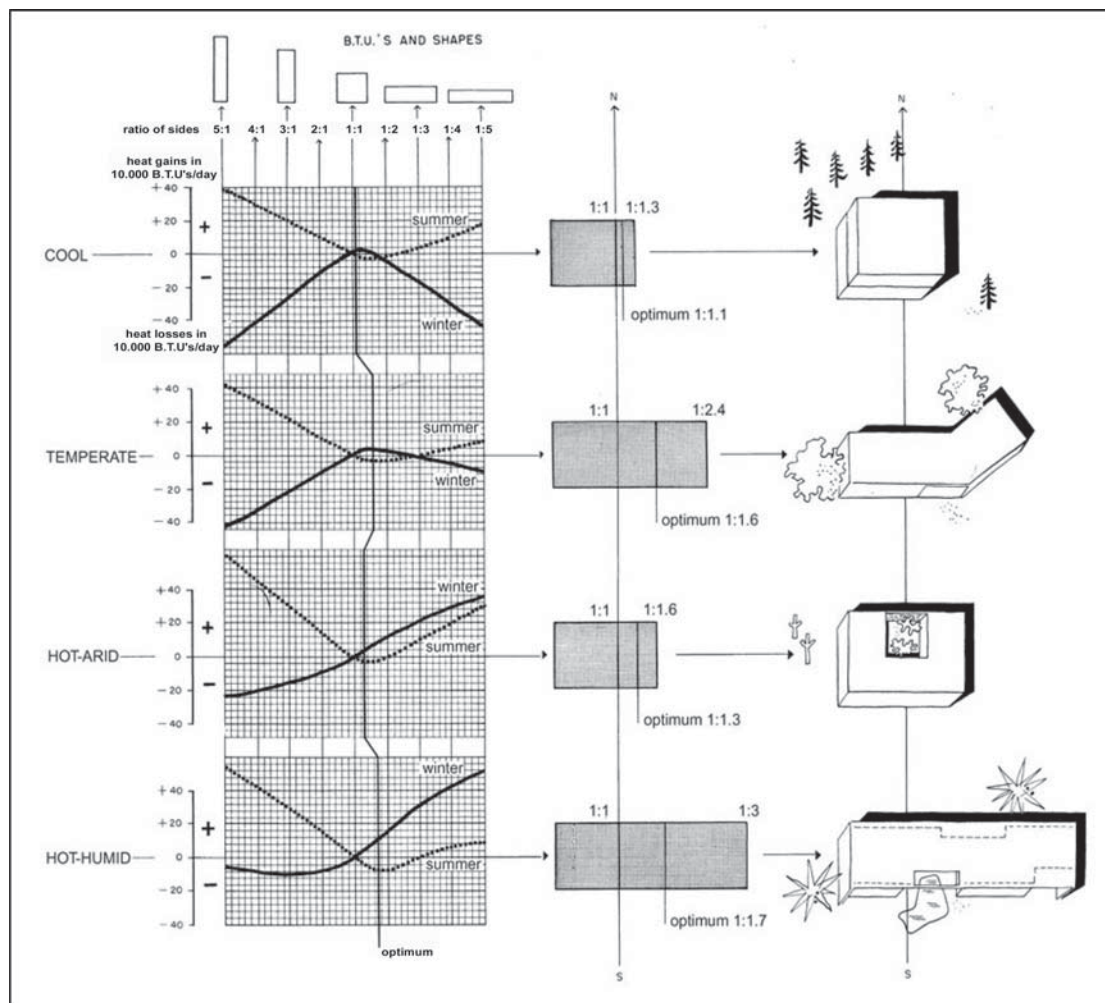


Abbildung 4.4: Gebäudeformenstudie in verschiedenen Klimaten

(Grafik: Topaloglu (2003), S. 27; Primärquelle: Olgyay (1992), S.89; eigene Überarbeitung)

Seine Ergebnisse lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- In der Nord-Süd-Achse verlängerte Gebäude sind im Sommer- und im Winterfall weniger effizient. Im Sommer kommt es an den langen West- und Ostfassaden durch die dort tiefer stehende Sonne zu hohen Kühllasten. Im Winter kann durch die verkleinerte Südfassade nur wenig passiv geheizt werden.
- Für alle Klimate sind in Ost-West-Achse verlängerte Gebäude optimal.
- Die optimale Verlängerung in Ost-West-Achse hängt vom jeweiligen Klima ab. Kalte und heiß-aride Klimazonen bevorzugen kompakte Formen mit möglichst geringer Oberfläche. Gebäude in gemäßigten Zonen genießen diesbezüglich größere Freiheit. Gleiches gilt für heiß-humide Zonen, sofern eine ausreichende Querlüftung sichergestellt wird.
- Ein quadratischer Grundriss ist in keiner Klimazone ideal.

Auch Knowles [vgl. Knowles (1974)] führte Untersuchungen zum A/V-Verhältnis durch und führte den so genannten *Suszeptibilitäts-Koeffizienten* ein. Seine Ergebnisse können wie folgt zusammengefasst werden:

- Je größer die exponierte Hülle gegenüber dem eingeschlossenen Volumen, umso empfindlicher reagiert das Gebäude auf Umwelteinflüsse, denn solche Gebäude gewinnen und verlieren Energie schneller als kompakte Formen.
- Andererseits geht bei kompakten, großen Gebäuden mit niedrigem Suszeptibilitäts-Koeffizienten die Möglichkeit zur Querlüftung und der damit verbundenen Abfuhr interner Lasten verloren.
- Kompakte Gebäude besitzen in Relation zu ihrer Nutzfläche weniger potentielle Oberfläche zur Nutzung von Umweltenergie wie beispielsweise der Solarenergiegewinnung.

Goretzki untersuchte das A/V-Verhältnis im Hinblick auf einzelne Gebäudeparameter wie Länge, Tiefe und Höhe mit folgenden Ergebnissen (s. *Abbildung 4.5*):

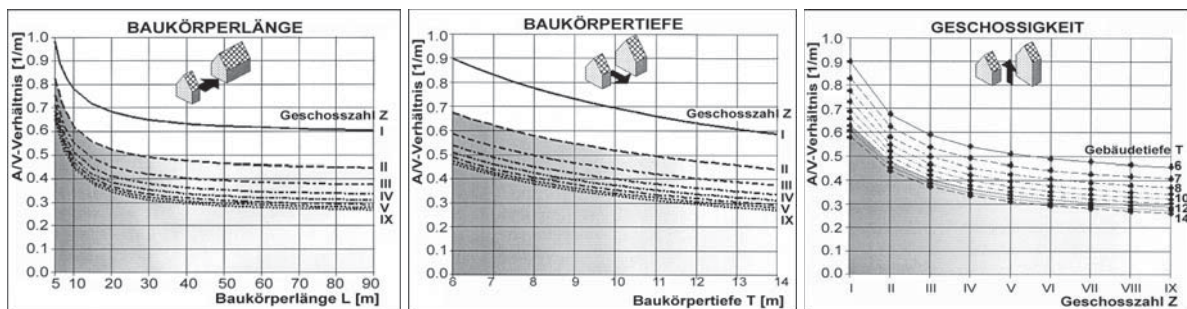


Abbildung 4.5: Untersuchung des Einflusses von Gebäudelänge, Gebäudetiefe und Geschossigkeit auf das A/V-Verhältnis

(Grafiken: Goretzki (1999); www.gosol.de (letzter Zugriff: 05.07.2008); eigene Überarbeitung)

- Bei gleichem Gebäudequerschnitt nimmt das A/V-Verhältnis bei zunehmender Gebäudelänge ab, wobei sich schnell Schwellenwerte einstellen. Zeilen zwischen 20 und 50 Metern Länge erreichen gute Kompaktheit. Darunter steigt das A/V-Verhältnis rapide an, darüber ist keine Verbesserung zu erkennen.
- Bei konstanter Gebäudelänge und –höhe nimmt das A/V-Verhältnis mit zunehmender Gebäudetiefe ab. Es stellt sich kein Schwellenwert ein. Ideale Gebäudetiefen liegen zwischen 8 und 14 Metern. Darunter können passive Solargewinne die erhöhten Wärmeverluste nicht kompensieren, darüber sind natürliche Belichtung und Belüftung unmöglich und führen zu erhöhtem Energiebedarf.
- Bei konstanter Gebäudelänge und –tiefe nimmt das A/V-Verhältnis mit steigender Anzahl an Vollgeschossen ab, dabei ist besonders beim Übergang von ein-, zwei- und dreigeschossigen Gebäuden eine starke Zunahme der Kompaktheit zu beobachten. Ab sechs Geschossen ist der Effekt nur noch minimal.

4.1.2 Kritische Betrachtung des A/V-Verhältnisses

Das A/V-Verhältnis ist eine leicht anzuwendende und daher weit verbreitete Kennzahl.

Aufgrund der starken Vereinfachung kann das A/V-Verhältnis jedoch viele Informationen zur Gebäudeform, die für eine über die reine Verlustminimierung hinausgehende gesamtenenergetische Formoptimierung wichtig wären, nicht wiedergeben. Dazu zählen beispielsweise wichtige geometrische Angaben wie beispielsweise Länge, Breite und Höhe des Gebäudes, die Relation von luft- zu erdberührten Hüllflächenanteilen oder konkreten Angaben zur prozentualen Verteilung von Oberflächen bestimmter Orientierungen und Neigungen.

Das A/V-Verhältnis spiegelt auch nicht die Dachform und –neigung und somit die Nutzbarkeit der Gebäudeform wieder, da auch Lufträume ohne ausreichende Deckenhöhe in das Volumen einfließen. Hier kommt es zu einer Fehlbewertung der Kompaktheit durch das A/V-Verhältnis, welches hier besser von einer anderen Kennzahl, der A/GF abgelöst werden sollte, welche die Oberfläche der Gebäudehülle A in Relation zur innerhalb des Volumens realisierbaren Geschossfläche GF setzt.

Das A/V-Verhältnis ist kein Hilfsmittel zur Optimierung der Gebäudeausrichtung. Auch geht es nicht auf Bedingungen des Standortes ein, obwohl die Analogie zur Bergmannschen Regel gezeigt hat, dass sich die Forderung nach kompakten Formen von den Polen zum Äquator umkehren kann.

Das A/V-Verhältnis ist zur Verhinderung von übermäßig großen Verlusten geeignet, jedoch nicht zur Optimierung von Solarenergiegewinnung am Gebäude. Die so erzielte Reduktion thermischer Verluste allein kann jedoch nie zu einer Nullbilanz führen, da sich die Kurve der Nulllinie nur asymptotisch annähert. Ab einem bestimmten Punkt steigt zudem der Aufwand für Dämmmaßnahmen exponentiell an, während die erzielten energetischen Verbesserungen immer geringer werden.

4.2 EGZ (Entwurfsgütezahl) – Transmissionsgewinnmaximierung

4.2.1 Definition

Eine weitere, jedoch deutlich weniger verbreitete energetisch-geometrische Kennzahl ist die *Entwurfsgütezahl EGZ*. Sie dient der Beurteilung eines Baukörpers hinsichtlich der passiven Sonnenergienutzung im Winter und berechnet sich aus der Relation der Projektion aller südlichen Flächen zur Gesamtoberfläche eines Gebäudes. Die EGZ ist der Strategie der passiven Gewinnmaximierung durch Transmission zuzuordnen und belohnt die Vergrößerung von Südf Flächen.

Die Sonnenstrahlung, die auf ein Gebäude fällt, wird zum Teil an seiner Oberfläche absorbiert bzw. nach dem Durchtritt durch transparente Teile der Gebäudehülle im Gebäudeinnern absorbiert. Diejenigen Bauteile im Gebäudeinnern, welche Strahlung empfangen, erwärmen

sich und geben im Lauf der Zeit diese Wärmeenergie an die Innenluft ab. Wie groß dieser solare Anteil an der Deckung des Heizwärmebedarfs sein kann, hängt von verschiedenen Faktoren ab: Wahl einer leichten oder schweren Bauweise, Anordnung und Art der Wärmedämmung, Größe und Material der Speichermassen, Größe und Art der transparenten Bauteile, aber auch Orientierung und Form des Gebäudes. Zur Beurteilung des Einflusses der rein geometrischen Kriterien – also Form und Orientierung des Gebäudes, hat Walter Pokorny die so genannte *Entwurfsgütezahl EGZ* entwickelt¹⁴.

Pokorny unterteilt die Gebäudehülle in zwei Kategorien:

- *Aktive Flächen* sind Gebäudehüllenteile, welche durch ihren Aufbau zur Aufnahme von Sonnenstrahlung geeignet sind (z.B. transparente Flächen) und auch tatsächlich von Sonnenstrahlen getroffen werden.
- *Passive Flächen* sind alle übrigen Flächen, welche nur dem Schutz vor starken Wärmeverlusten dienen und entsprechend gut gedämmt sein sollten.

Die Größe der aktiven Fläche allein – ohne Bezug zum Sonnenstand – kann den solaren Wärmegewinn nicht beschreiben. Wird eine verglaste Fläche unter einem großen Einfallswinkel – d.h. schleifend – bestrahlt, wird ein Großteil des einfallenden Lichtes wieder reflektiert (s. *Abbildung 4.6*).

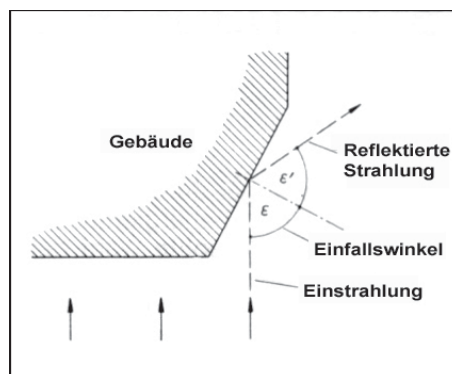


Abbildung 4.6: Reflexion an schleifend beschienenen Gebäudeoberflächen

(Grafik: Pokorny (1982), S. 28; eigene Überarbeitung)

Sofern dieser Strahlungsanteil danach nicht eine andere aktive Fläche trifft, geht er für die Gewinnung von Heizenergie verloren. Trifft der reflektierte Strahl jedoch auf eine andere aktive Fläche und wird dort absorbiert, kann die schleifend bestrahlte Fläche mit zur aktiven Fläche gezählt werden (s. *Abbildung 4.6*).

¹⁴ vgl. [Pokorny (1982)]

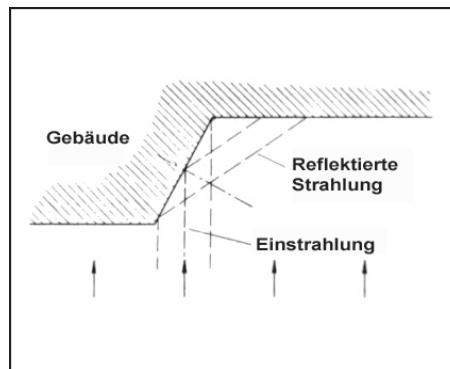


Abbildung 4.7: Absorption reflektierter Strahlung durch Flächen zweiter Ordnung

(Grafik: Pokorny (1982), S. 28; eigene Überarbeitung)

Nach den physikalischen Gesetzen der Reflexion können Einfallswinkel bis 60° zwischen Einstrahlung und Flächennormalen als noch ausreichend wirksam angenommen werden. Flächen, die unter einem größeren Winkel getroffen werden und die von ihnen reflektierte Strahlung nicht eine andere aktive Fläche trifft, müssen aus der Berechnung herausgehalten werden. Zur Berechnung der gesamten aktiven Fläche ist zudem nicht die Abwicklung der verbleibenden Gebäudehüllenteile, sondern nur deren Projektion auf eine zur Strahlung senkrechte Ebene einzubeziehen. Pokorny bezeichnet die Summe der verbleibenden Fläche als *wirksame aktive Fläche* (s. Abbildung 4.8).

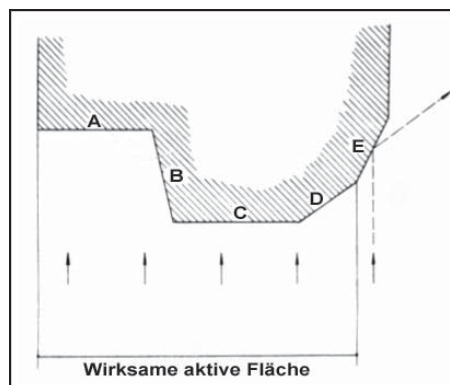


Abbildung 4.8: Ermittlung der wirksamen aktiven Fläche

(Grafik: Pokorny (1982), S. 82; eigene Überarbeitung)

Die Schwierigkeit bei der Berechnung dieser *wirksamen aktiven Fläche* besteht in ihrer ständigen Wandlung im Tagesverlauf mit der Änderung des Sonnenstandes.

Der Deckungsgrad d als Verhältnis zwischen Transmissionswärmeverlusten und solarer Energiezustrahlung kann wie folgt beschrieben werden:

$$d = \frac{E_s \cdot \bar{\alpha}}{F_{ges} \cdot E_T} \quad (4.2)$$

Dabei beschreibt das Produkt aus E_s (tägliche Sonneneinstrahlung auf die wirksamen aktiven Flächen) und $\bar{\alpha}$ (ihr durchschnittlicher Absorptionsgrad) die solare Energiezustrahlung. Das Produkt aus F_{ges} (Gesamtoberfläche des Gebäudes) und E_T (durchschnittlicher Transmissionswärmeverlust pro Quadratmeter Gebäudeoberfläche und Tag) bezeichnet die Transmissionswärmeverluste.

Während dem Gebäude nur durch die wirksamen aktiven Flächen Energie zugeführt wird, geht über die gesamte Gebäudehülle (also der Summe aus passiven und aktiven Flächen einschließlich der wirksam aktiven Flächen) Energie verloren.

Die tägliche Sonnenenergiezustrahlung E_s auf die wirksamen aktiven Flächen kann als Integral über die Zeit zwischen Sonnenauf- und -untergang berechnet werden. Für die vertikale nach Süden orientierte Fläche sind Vereinfachungen möglich, so dass sich für diesen Fall ergibt:

$$E_s = F \cdot I_m \cdot K \quad (4.3)$$

Dabei bedeutet F die Projektion der wirksamen aktiven Flächen auf eine senkrechte südorientierte Ebene, I_m die Leistung der mittäglichen Sonneneinstrahlung und K das von der Gebäudeform unabhängige Integral über den Zeitraum zwischen Sonnenauf- und Sonnenuntergang, welches im Integranden die Winkelfunktion des zeitabhängigen Sonnenazimuts enthält.

Mit (4.3) in (4.2) ergibt sich der Deckungsgrad d zu:

$$d = \frac{F}{F_{ges}} \cdot \frac{I_m \cdot K \cdot \bar{\alpha}}{E_T} \quad (4.4)$$

In dieser Formel ist nur noch der erste Bruch von der Orientierung und Form des Gebäudes abhängig, während der zweite davon unabhängig ist.

Der Deckungsgrad d ist somit in Bezug auf die Variation der Formgebung nur noch vom Quotienten aus F und F_{ges} abhängig. Der Deckungsgrad wird umso größer und damit die benötigte zusätzliche Heizenergie umso kleiner, je größer der Quotient aus F und F_{ges} wird.

Diesen allein durch die Gebäudeform und -orientierung bestimmte Ausdruck bezeichnet Pokorny als *Entwurfsgütezahl EGZ*.

$$EGZ = \frac{F}{F_{ges}} \quad (4.5)$$

Hierbei beschreibt F die Projektion aller wirksamen aktiven Flächen auf eine senkrechte südorientierte Ebene und F_{ges} die gesamte Oberfläche des Gebäudes.

Je größer die *EGZ* umso größer sind die zu erwartenden passiven Gewinne. Die *EGZ* kann jedoch maximal den Wert 0.5 annehmen. Dieser würde sich für eine allein stehende senkrechte südorientierte Kollektorfläche ohne Gebäudevolumen ergeben.

Berechnet man die *Entwurfsgütezahl* für verschiedene zweigeschossige Gebäude mit einer Bruttogeschossfläche von 65 Quadratmetern, ergibt sich folgendes Bild (s. *Abbildung 4.9*).

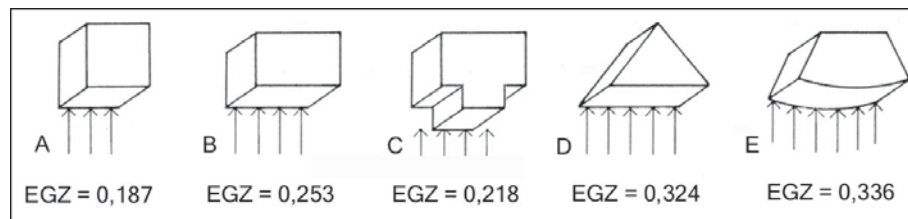


Abbildung 4.9: Entwurfsgütezahl für unterschiedliche Gebäudeformen mit gleicher BGF von 65m²

(Grafik: Treberspurg (1997) S. 68; eigene Überarbeitung)

Beschreibung: Quader in Ost-West-Achse (B) sind besser als Würfel (A). Vorbauten (C) sind ungünstig, da sie keine zusätzlichen aktiven Flächen bringen, aber mehr Gesamtoberfläche, über welche Verluste entstehen. Unkonventionelle Formen (D und E), die gleichzeitig südliche Flächen maximieren und nördliche minimieren, wodurch sie ihre Gesamtoberfläche verringern, schneiden am besten ab.

Aus den Ergebnissen lässt sich folgendes ableiten:

- Konservative, quadratische Grundrisse (A) sind zur passiven Sonnenenergienutzung ungeeignet.
- Langgestreckte rechteckige Grundrisse (B) sind dagegen sehr geeignet.
- Dem Rechteckgrundriss vorgesetzte Gebäudeteile (C) verschlechtern das Ergebnis, da ihre Seitenwände nicht zur Energiezufuhr beitragen, jedoch Wärmeverluste erzeugen.
- Unkonventionelle Formen wie Dreiecksgrundrisse (D) oder Bogensegmente (E) weisen die besten Ergebnisse auf, da sie gleichzeitig südliche Flächenanteile maximieren und nördliche Verlustflächen im rückwärtigen Gebäudeabschluss minimieren.

Wie zuvor für das A/V-Verhältnis kann auch der Einfluss dieser energetisch-geometrischen Kennzahl an der oben eingeführten Formenreihe Turm – Würfel – Halle, jeweils in den gewählten Abstufungen des Gesamtvolumens von 1.000 bis 50.000 m³ untersucht werden.

Der Graph zeigt jedoch deutliche Unterschiede gegenüber dem A/V-Verhältnis auf (s. *Abbildung 4.10*).

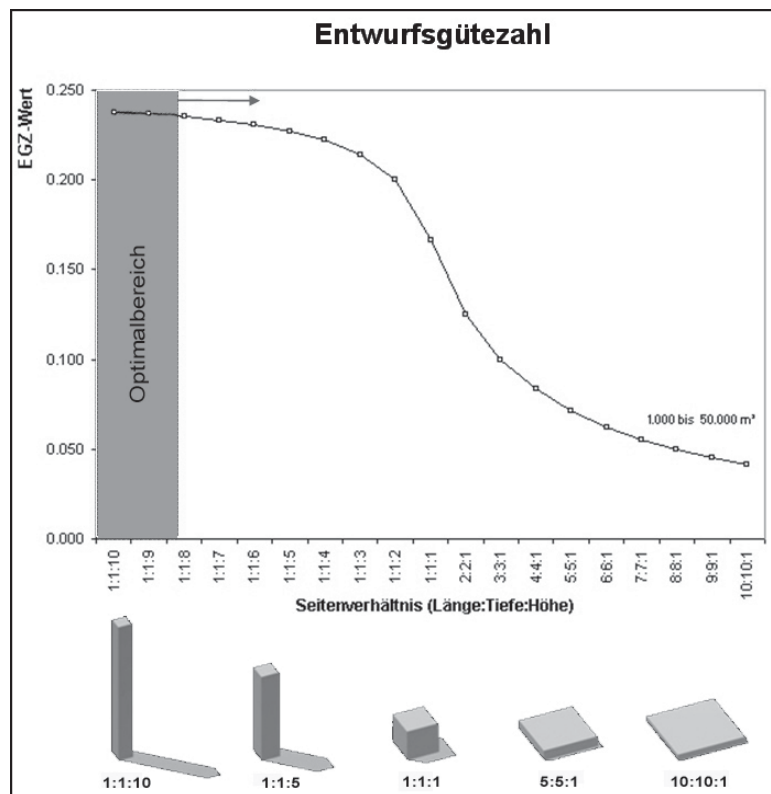


Abbildung 4.10: Diagramm für EGZ-Graphen der Formenreihe Turm – Würfel – Halle für verschiedene Volumina

(Grafik: eigene)

Auffällig ist, dass sich unabhängig vom Gebäudevolumen immer die gleiche Kurve ergibt. Der Grund liegt in den bei der zentrischen Streckung konstant bleibenden Proportionen und der Tatsache, dass anders als beim A/V-Verhältnis sowohl Dividend als auch Divisor beide in der zweiten Potenz wachsen.

Besonders gute (also hohe) Entwurfsgütezahlen ergeben sich im Bereich der Turmartigen, während die Kurve bei den Würfelförmigen stark abfällt und bei den Hallenartigen am schlechtesten ist. Sowohl für den oberen als auch den unteren Wert ergeben sich Schwellenwerte, denen sich die Kurve asymptotisch annähert.

4.2.2 Kritische Betrachtung der Entwurfsgütezahl

Die Entwurfsgütezahl reagiert anders als das A/V-Verhältnis sensibel auf die Orientierung eines Gebäudes. Allerdings ist sie in der Anwendung auf Breitengrade und Klimazonen beschränkt, die Mitteleuropa entsprechen, da sie einseitig auf winterliche Heizungsunterstützung abzielt. Sie ist daher nur zur Optimierung einer Gebäudeform auf maximale passive Energiegewinne geeignet, jedoch nicht zur Optimierung der Gebäudeform für eine ganzjährige aktive Solarenergiegewinnung. Dies soll an folgendem Beispiel erläutert werden (s. *Abbildung 4.11*).

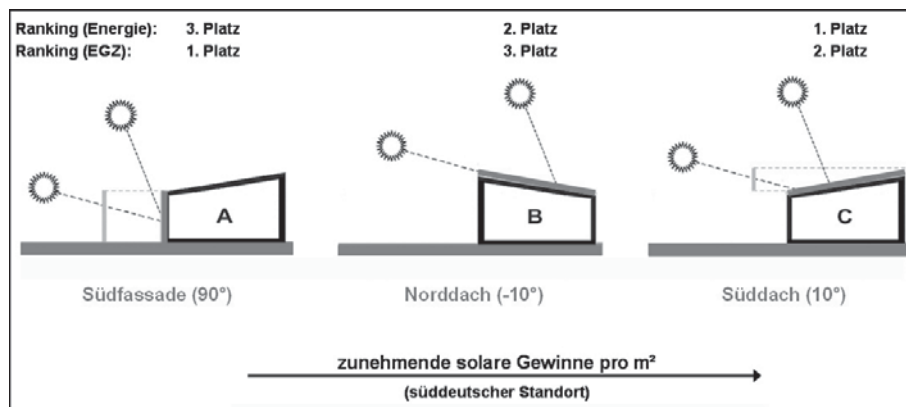


Abbildung 4.11: Graphische Darstellung der EGZ-Prognose (senkrechte Projektion) für verschiedene Teiloberflächen eines Gebäudes mit einem 10° geneigten Pulldach im Vergleich zum tatsächlichen Einstrahlungspotential

(Grafik: eigene)

In der Grafik ist dreimal der Längsschnitt eines Gebäudes dargestellt, welches ein Pulldach mit 10° Neigung besitzt. In der Variante A wird die Südfassade, in B das Norddach, in C das Süddach als potentielle Empfangsfläche betrachtet. Die Berechnung für einen süddeutschen Standort ergibt, dass das Süddach (C) pro Quadratmeter Fläche größere Gewinne erzielt als die Südfassade (A), da in den besonders energieintensiven Monaten im Sommer die Sonne zu hoch steht, um in einem günstigen Winkel auf die Südfassade zu fallen. Berechnet man nun die solare Einstrahlung auf das 10°-geneigte Norddach (B), stellt man fest, dass die sich ergebende Energiedichte pro Quadratmeter immer noch günstiger ausfällt als für die Südfassade (A). Das Energie-Ranking in absteigender Sortierung lautet somit: Süddach, Norddach, Südfassade. Die Reihenfolge, welche sich durch Anwendung der *EGZ* ergibt lautet dagegen: Südfassade, Süddach, Norddach. Letzteres wäre sogar gänzlich unberücksichtigt geblieben.

An der Entwurfsgütezahl ist im Hinblick auf die aktive Nutzung solarer Technologien somit zu kritisieren, dass

- sie die Diffusstrahlung nicht berücksichtigt und daher Nordflächen pauschal unberücksichtigt lässt, obwohl sie teilweise im Jahresverlauf sogar mehr Energie empfangen können als Südfassaden,
- sie lediglich auf die Betrachtung senkrechter Hüllflächenanteile beschränkt ist und geneigte Ebenen trotz offensichtlicher Eignung daher nicht in die Kalkulation einfließen,
- nicht für die Optimierung auf aktive Solarenergienutzung ausgelegt und
- nicht global übertragbar ist.

Die *EGZ* ist ein effektives Optimierungswerkzeug zur Maximierung passiver Solarerträge zur winterlichen Heizungsunterstützung im mitteleuropäischen Raum, sie ist jedoch kein Hilfsmittel zur globalen Optimierung von Gebäudeformen im Hinblick auf eine ganzjährige aktive solare Nutzungen.

4.2.3 Kritische Betrachtung der Kombination von A/V und EGZ

Insbesondere in der Zusammenschau der Forderungen von A/V und EGZ kommt es zu widersprüchlichen, den Entwerfer irritierenden Aussagen. Bereits an den Graphen (s. *Abbildung 4.3 und Abbildung 4.10*) ist ein großer Gegensatz abzulesen: während der optimale Bereich des A/V-Verhältnisses im Bereich der kompakten Würfel liegt, werden durch die EGZ turmartige Formen präferiert.

Diese Widersprüche zeigen sich auch in Untersuchungen zu Umformung und Rotation eines konstanten Volumens V (s. *Abbildung 4.12*).

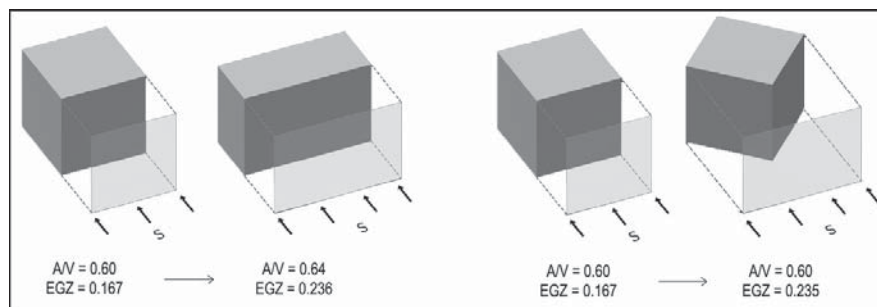


Abbildung 4.12: Graphische Darstellung der widersprüchlichen Aussagen von A/V und EGZ (senkrechte Projektion) bei Umformung eines Würfels in einen Quader gleichen Volumens oder bei der Rotation eines Würfels

(Grafik: eigene)

Wird ein Würfel in einen Quader gleichen Volumens verformt, verschlechtert sich das A/V-Verhältnis, die Entwurfsgütezahl hingegen verbessert sich. Nimmt man diesen Würfel und dreht ihn um 45° um die eigene Achse, bleibt das A/V-Verhältnis konstant, die Entwurfsgütezahl hingegen verbessert sich signifikant. An diesen Beispielen ist noch einmal die Schwäche des A/V-Verhältnisses abzulesen, welches aufgrund seiner einseitigen Forderung nach Kompaktheit der Gebäudehülle

- potentielle Flächen für solare Energiegewinnung reduziert und
- die Orientierung eines Gebäudes nicht berücksichtigt.

Fazit: A/V-Verhältnis und EGZ zeigen bei Verformung und Rotation jeweils gegensätzliche Optimierungstendenzen an und stellen somit keine echte Entwurfshilfe für Architekten dar.

Damit sind die bisher bekannten energetisch-geometrischen Gebäudekennzahlen A/V und EGZ für eine Optimierung von Gebäudeform und –orientierung zur ganzjährigen aktiven Solarenergieernutzung unzulänglich.

4.3 Solar Envelope - Verschattungsminimierung

4.3.1 Definition

Die Methode zur Ermittlung des 1981 von Knowles¹⁵ entwickelten *Solar Envelopes* betrifft zwar wie die vorangegangenen Kennzahlen *A/V* und *EGZ* die Gebäudeform, ist jedoch eher im städtebaulichen Kontext zu sehen. Die Methode des *Solar Envelopes* zielt darauf ab, die gegenseitige Verschattung der Gebäude zu verhindern und ist somit der Verschattungsminimierungsstrategie zuzuordnen.

Während in heißen ariden Klimazonen eine gegenseitige Verschattung der Gebäude angestrebt wird, um die anfallenden Kühllasten gering zu halten, sollte in gemäßigten bis kühlen Klimazonen eine gegenseitige Verschattung zumindest während einer festzulegenden Kernzeit möglichst vermieden werden, um insbesondere natürliche Belichtung sowie passive solare Gewinne zu ermöglichen. Hier kann die Idee des *Solar Envelopes* helfen, gegenseitige Verschattung zu minimieren und jedem die Gewinnung solarer Energie an seinem Gebäude zu ermöglichen, ein Bürgerrecht das zukünftig immer mehr an Bedeutung gewinnen wird.

Die Einhaltung der Entwurfsregeln des *Solar Envelopes* sichert allen den Zugang zur Sonnenenergie am Gebäude, aber auch auf Straßen und öffentlichen Gebäuden. Der *Solar Envelope* definiert das maximal auf einem Grundstück realisierbare Bauvolumen, durch welches umliegende Grundstücke nicht verschattet werden, um so für alle einen gleichberechtigten Zugang zu solarer Energie sicherzustellen. Die Größe und Ausformung des *Solar Envelopes* variiert mit der Größe, Orientierung, der geografischen Lage des Grundstücks und dem angestrebten verschattungsfreien Zeitfenster, sowie der Größe des erlaubten Schattenwurfes auf angrenzende Grundstücke.

Nach Knowles ist der garantierte Zugang zu solarer Strahlung einer der wichtigsten Aspekte für Lebensqualität. Überlegungen zur Sicherung dieses solaren Zugangs haben das Potential, die architektonische und städtebauliche Form zu bestimmen. Aus dieser Überlegung entwickelte Knowles das *Solar Rights Konzept* und das daraus abgeleitete Prinzip des *Solar Envelopes*.

Die Festlegung der *Solar Rights* begann zunächst nur mit der pauschalen Beschränkung von Bauhöhen. Später wurden unter Einbeziehung von Gebäudehöhen Abstandsregeln entwickelt, wie beispielsweise die 45°-Regel¹⁶. Um höhere Bebauungsdichten erzielen zu können, wurden in Portugal die 63°-Regel und in New York die 75°-Regel angewandt.

¹⁵ vgl. [Knowles (1981)]

¹⁶ Die 45°-Regel wurde von Tony Garnier entwickelt und ist ein dreidimensionaler Ansatz zur Festlegung von Abstandsflächen zwischen Gebäuden, indem gedanklich für alle Gebäudefassaden von den oberen Gebäudekanten ein Strahl im 45° Winkel zum Boden ausgeht und dort die Minimalabstände um das Gebäude herum markiert.

Anders als in Europa bilden in den USA die *Solar Rights* Teile von Gesetzen und Vorschriften. Der *Californian Solar Rights Act*¹⁷ wurde bereits 1978 verabschiedet und soll jedem Bürger Zugang zu solarer Strahlung gesetzlich sichern. Dies führte zu einer verstärkten Verbreitung und Nutzung solarer Technologien, da es den Betreibern die uneingeschränkte Nutzung auch bei zukünftigen Veränderungen im baulichen Umfeld sichert.

Das Prinzip, welches den *Solar Rights* zugrunde liegt, wurde aus einer Analogie zu einem der ältesten Gesetze, dem Wasserrecht, abgeleitet. Hierbei kann die Verschattungssituation mit einer flussab oder flussauf gelegenen Wasserentnahmestelle verglichen werden (s. *Abbildung 4.13*).

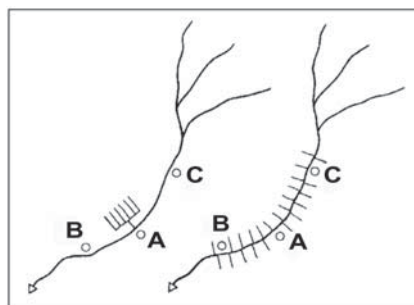


Abbildung 4.13: Zwei gegensätzliche Prinzipien des Wasserrechts

(Grafik: Topaloglu (2003), S. 24; Primärquelle: Knowles (1981), S. 27; eigene Überarbeitung)

Die Grafik zeigt zwei gegensätzliche Prinzipien.

Im Fall 1 (links) siedelt Siedler A als erster am Fluss und etablierte seine Wasserentnahmestelle. Siedler B siedelt zu einem späteren Zeitpunkt flussabwärts und akzeptiert die durch A gesetzten Bedingungen, welche eventuell seine Entnahmemöglichkeiten reduzieren. Siedler C siedelt sich als letzter an, allerdings flussaufwärts. Er ist sich bewusst, dass er durch seine Entnahme das etablierte Recht von Siedler A und B nicht gefährden darf und akzeptiert die sich daraus ergebenden Restriktionen. Für Siedler A gilt nun, dass er die durch ihn geschaffenen Grundbedingungen, welche Siedler B und C akzeptiert haben, auch zukünftig nicht ändern darf.

In Fall 2 (rechts) gilt das Prinzip, dass egal zu welchem Zeitpunkt sich Siedler A, B und C niederlassen, die Wasserentnahmerechte für alle gleich sind und im vornherein so bemessen wurden, dass sie unabhängig von zukünftigen Entwicklungen für alle gesichert sind.

Fall 1 basiert somit auf dem A-Priori-Prinzip, welches die aus der Vergangenheit abgeleiteten konstituierten Rechte schützt, während Fall 2 das vorausschauende A-Posteriori-Prinzip repräsentiert, welches zukünftige Entwicklungen antizipiert und unabhängig vom Zeitpunkt der Realisierung von vornherein gleichberechtigt stellt.

¹⁷ [Energy Policy Initiatives Center (EPIC) (2007)]

Analog lassen sich diese beiden Prinzipien auf das Recht auf freien Zugang zu Sonnenenergie übertragen (s. *Abbildung 4.14*).

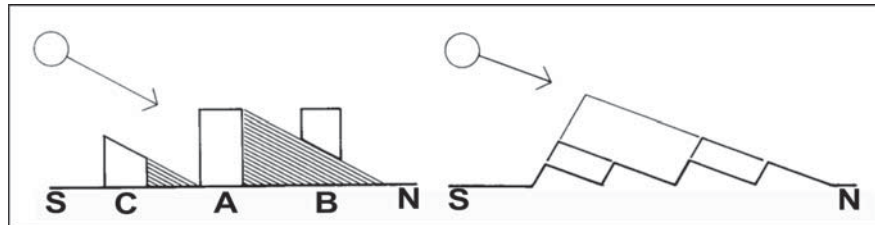


Abbildung 4.14: Die Prinzipien der Solar Rights als Analogie zum Wasserrecht

(Grafik: Topaloglu (2003), S. 25; Primärquelle: Knowles (1981), S. 28; eigene Überarbeitung)

In Fall 1 (links) errichtet Bauherr A ein Gebäude, welches tagsüber ein nördlich gelegenes Grundstück verschattet. Später errichtet Bauherr B ein Gebäude auf diesem Grundstück (nördlich entspricht stromabwärts). Er akzeptiert die Verschattung durch Gebäude A und damit die Beschneidung seines Rechtes auf solare Strahlung aus dieser Richtung. Später errichtet Bauherr C ein Gebäude südlich von Gebäude A und muss die Beschränkungen der Gebäudehöhe akzeptieren, welche das etablierte Recht von Gebäude A auf solare Einstrahlung weiterhin gewährleisten. Bauherr C kann somit nicht das gleiche Bauvolumen realisieren wie Bauherr A und B.

In Fall 2 (rechts) gilt, dass unabhängig vom Zeitpunkt der Errichtung oder bei nachträglicher Veränderung der Parzellengröße alle Bauherren das gleiche und für die Zukunft gesicherte Recht zur Solarenergienutzung erhalten.

Für eine verbreitete Anwendung solarer Technologien muss eine rechtliche Grundlage geschaffen werden, die verhindert, dass bestehende Anlagen durch spätere nachbarliche Bauaktivitäten verschattet werden, aber auch dass später errichtete Gebäude die gleichen Möglichkeiten zur Nutzung solarer Energie erhalten, ohne Einschränkungen durch bereits bestehende Gebäude hinnehmen müssen. Dies ist insofern sinnvoll als dass der Weiterbau von Städten ein ständiger Prozess ist und die Planung einer langfristigen solaren Nutzung nicht für den kurzen Zeitpunkt einer Momentaufnahme des Bestandes, sondern flexibel bezüglich zukünftigen Entwicklungen optimiert werden sollte.

4.3.2 Konstruktionsprinzip des *Solar Envelopes*

Knowles entwickelte das Konstruktionsprinzip des *Solar Envelopes* als formgebende Technik im architektonischen und städtebaulichen Entwurf. Es entstehen nach den Himmelsrichtungen differenzierte dreidimensionale Umrissformen, welche die obere Grenze eines potentiellen Gebäudes beschreiben und umliegende Grundstücke nicht verschatten. Diese maximal erlaubten Bauvolumina werfen während festgelegter kritischer Tages- und Jahreszeiten keinen Schatten. Die so entstehenden pyramidalen Formen nannte Knowles *Solar Envelopes*.

Knowles¹⁸ beschreibt, wie der tägliche und jahreszeitliche Rhythmus der Sonnenwanderung die äußeren Grenzen des *Solar Envelopes* über einem bestimmten Grundstück definiert. Dieser ist somit eine konstruierte Synthese aus Zeit und Raum. Im Folgenden wird die einfache Version des Verfahrens beschrieben, welche sich jedoch nur für Grundstücke mit Rechteck-Grundriss eignet, deren Kanten exakt nach den Himmelsrichtungen ausgerichtet sind.

4.3.2.1 Festlegung der Tagesgrenzen

Die tägliche scheinbare Wanderung der Sonne von morgens Ost bis nachmittags West beschreibt die östlichen und westlichen Grenzen des *Solar Envelopes* (s. Abbildung 4.15).

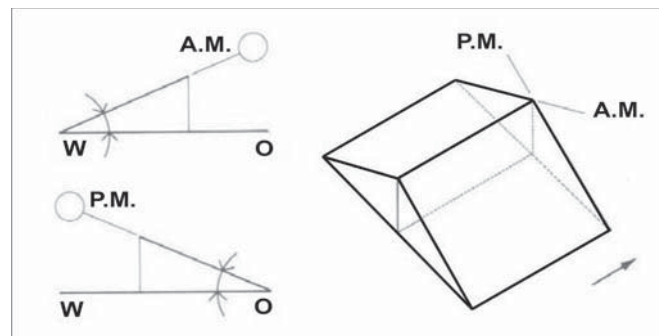


Abbildung 4.15: Aus Tagesgrenzen allein erzeugte Form

(Grafik: Topaloglu (2003), S. 31; Primärquelle: Knowles (1981), S. 54; eigene Überarbeitung)

4.3.2.2 Festlegung der Jahresgrenzen

Die Wintersonne wirft Schatten nach Norden, die Sommersonne wirft zwischen den Wendekreisen zu bestimmten Tageszeiten sogar Schatten nach Süden. Damit beschreibt die saisonale Bewegung der Sonne die nördlichen und südlichen Grenzen des *Solar Envelopes* (s. Abbildung 4.16).

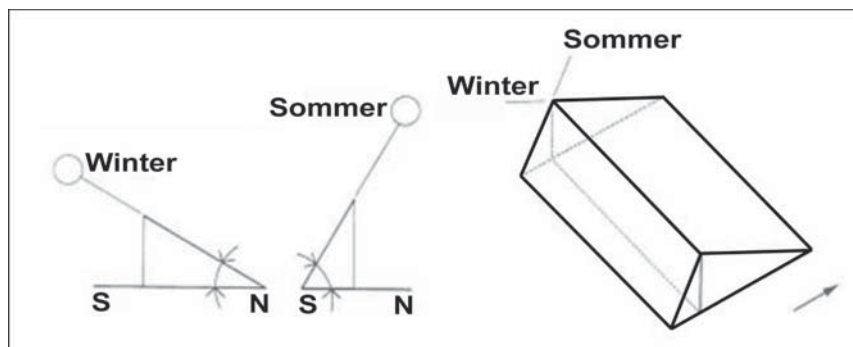


Abbildung 4.16: Aus Jahresgrenzen allein erzeugte Form

(Grafik: Topaloglu (2003), S. 31; Primärquelle: Knowles (1981), S. 55; eigene Überarbeitung)

¹⁸ [Knowles (1981)]

4.3.2.3 Integration der Tages- und Jahresgrenzen

Durch Verschmelzung beider Grenzhüllen entsteht ein für alle vier Seiten geschlossener Körper als integriertes Volumen (s. *Abbildung 4.17*).

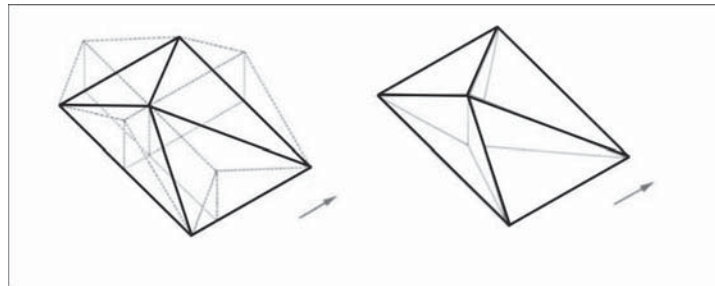


Abbildung 4.17: Aus Tages- und Jahresgrenzen integrierte Form

(Grafik: Topaloglu (2003), S. 31; Primärquelle: Knowles (1981), S. 56; eigene Überarbeitung)

4.3.2.4 Ermittlung des Zeitfensters (*Cut-off-times*)

Um die Hüllgrenzen des *Solar Envelopes* bestimmen zu können, muss zunächst die Zeitspanne „nützlicher Einstrahlung“ definiert werden. Diese Zeitspanne wird durch die Überlegung bestimmt, wann im Tages- und Jahresverlauf Zugang zu solarer Strahlung benötigt wird. Das solare Strahlungsangebot ist zudem aufgrund unterschiedlicher atmosphärischer Minderungseffekte nicht über Tag und Jahr gleichmäßig verteilt. Dieser Effekt lässt sich über die jeweilige Elevation¹⁹ bestimmen, da diese die Dicke der zu durchstrahlenden Atmosphärenschicht beeinflusst. Bei Sonnenauf- und -untergang beträgt die Elevation $\alpha = 0^\circ$, so dass sich $\sin \alpha = 0$ ergibt. Die maximale Höhe erreicht die Sonne zur Mittagsstunde der Sommer- sonnenwende²⁰ und kann für Orte zwischen den Wendekreisen maximal $\alpha = 90^\circ$, also $\sin \alpha = 1$ erreichen. Dieser maximale Wert des Faktors $\sin \alpha$ entspricht 100%.

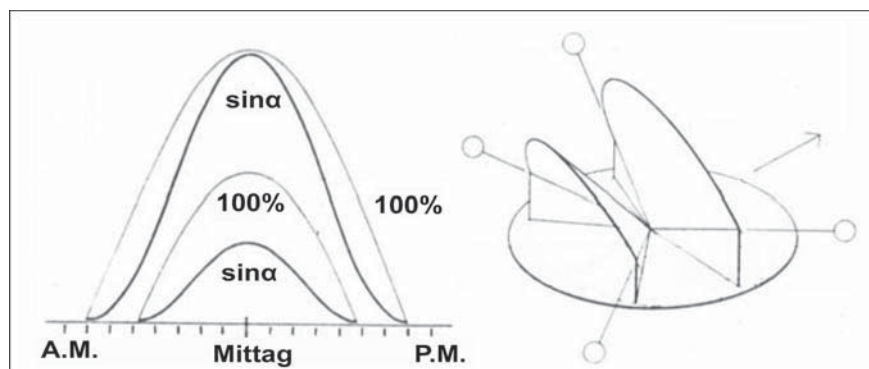


Abbildung 4.18: Ganztägliche Sommer- und Winterstrahlung

(Grafik: Topaloglu (2003), S. 32; Primärquelle: Knowles (1981), S. 57; eigene Überarbeitung)

¹⁹ Sonnenhöhe

²⁰ 21. Juni

Das Zeitfenster kann entweder tagessymmetrisch (s. Abbildung 4.19) oder jahres- und tagesszeitlich asymmetrisch (s. Abbildung 4.20) bestimmt werden.

Die folgenden Beispiele gelten für Los Angeles auf 34° nördlicher Breite.

4.3.2.5 Tagessymmetrische Zeitfenster

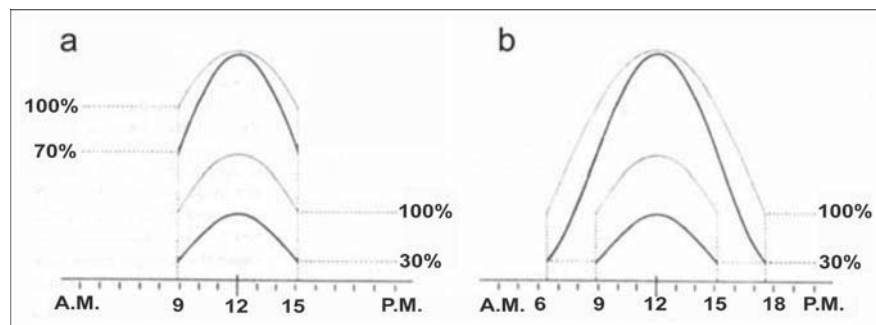


Abbildung 4.19: Verfügbare Energie unterschiedlicher Zeitfenster (Tagessymmetrie)

(Grafik: Topaloglu (2003), S. 33; Primärquelle: Knowles (1981), S. 58; eigene Überarbeitung)

a) konstante Verschattungsausschlusszeiten (Cut-Off-Times)

Wird das Zeitfenster für einen freien solaren Zugang beispielsweise auf sechs Stunden festgelegt, muss für jeden Tag im Jahr eine Verschattung umliegender Grundstücke durch das Gebäude im Zeitraum zwischen 9.00 und 15.00 Uhr ausgeschlossen werden.

Die Energieeinstrahlung außerhalb dieses Zeitraums wird vom Verschattungsverbot ausgeschlossen.

Die sich auf diese Weise ergebenden *Cut-Off-Times* sind für Sommer und Winter konstant.

Der Nachteil dieser Methode liegt darin, dass das Energieniveau im Sommer mit 70% gegenüber dem Winterfall mit nur 30% zu diesen Uhrzeiten noch sehr hoch ist und für eine gesicherte Nutzung verloren geht.

b) konstanter Einstrahlungsanteil / konstantes Energielevel

Soll das Verschattungsverbot nur für Einstrahlungsniveaus oberhalb einer bestimmten Grenze - beispielsweise ab 30% - gelten, ergeben sich im Jahresverlauf variierende *Cut-Off-Times*.

Die Elevation bleibt dabei für das gesamte Jahr konstant, hier für Los Angeles bei $\alpha = 17.46^\circ$ über dem Horizont.

Die sich daraus ergebenden geschützten Zeitfenster ergeben sich zu 6:24 bis 17:36 Uhr im Sommer und 8:54 bis 15:06 Uhr im Winter.

4.3.2.6 Tages- und Jahresasymmetrische Zeitfenster

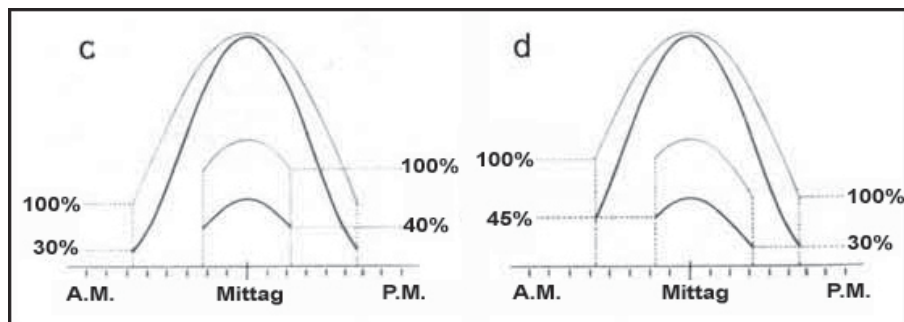


Abbildung 4.20: Verfügbare Energie unterschiedlicher Zeitfenster (Jahres- und Tagesasymmetrie)

(Grafik: Topaloglu (2003), S. 34; Primärquelle: Knowles (1981), S. 59; eigene Bearbeitung)

c) Jahreszeitlich variierende Grenzen des Einstrahlungsanteils/Energielevels

Wird für ein Baugebiet die Priorität solarer Energiegewinnung für die Sommerhälfte definiert und das Winterhalbjahr vernachlässigt, können verschiedene Energieniveaus von beispielsweise 30% im Sommer und 40% im Winter festgelegt werden, was saisonal zu sehr unterschiedlichen geschützten Zeitfenstern führt.

d) Tageszeitlich variierende Grenzen des Einstrahlungsanteils/Energielevels

Ist aus der geplanten Nutzung in einem Baugebiet eine Tagesasymmetrie des Energiebedarfes abzuleiten, kann für Zeiten geringen Bedarfes das Energieniveau auf 45% und für Zeiten hohen Bedarfs auf 30% festgesetzt werden.

4.3.3 Ermittlung räumlicher Einflüsse

Nicht nur zeitliche, sondern auch räumliche Parameter nehmen Einfluss auf die äußeren Grenzen des *Solar Envelopes*. Dazu zählen:

4.3.3.1 Breitengrad

Der Breitengrad beeinflusst über Sonnenhöhe und Einfallswinkel die realisierbare Höhe des *Solar Envelopes* und damit das maximale Bauvolumen. Mit zunehmendem Breitengrad in Richtung der Pole nimmt die zulässige Höhe aufgrund der geringen Elevation der Winter-sonne ab. Zum Äquator hin nimmt das zulässige Bauvolumen zu.

4.3.3.2 Grundstücksgröße

Grundstücke gleicher Form und Proportion jedoch unterschiedlicher Größe ermöglichen ebenfalls ähnliche Formen des *Solar Envelopes*, die sich jedoch in der Größe ihres Bauvolumens entsprechend den Grundstücksgrößen unterscheiden.

4.3.3.3 Bodengefälle

Grundstücke am Südhang ermöglichen höhere und größere *Solar Envelopes* als gleichgroße Grundstücke an Nordhängen.

4.3.3.4 Orientierung des Grundstücks

Durch Rotation eines Rechteckgrundrisses werden Höhe und Volumen des *Solar Envelopes* beeinflusst. Grundstücke in Verlängerung der Ost-West Achse ermöglichen größere Volumen als Grundstücke in der Nord-Süd Achse. Eine Drehung um 50-60° erlaubt die niedrigste Bauhöhe und das geringste Volumen (s. *Abbildung 4.21*).

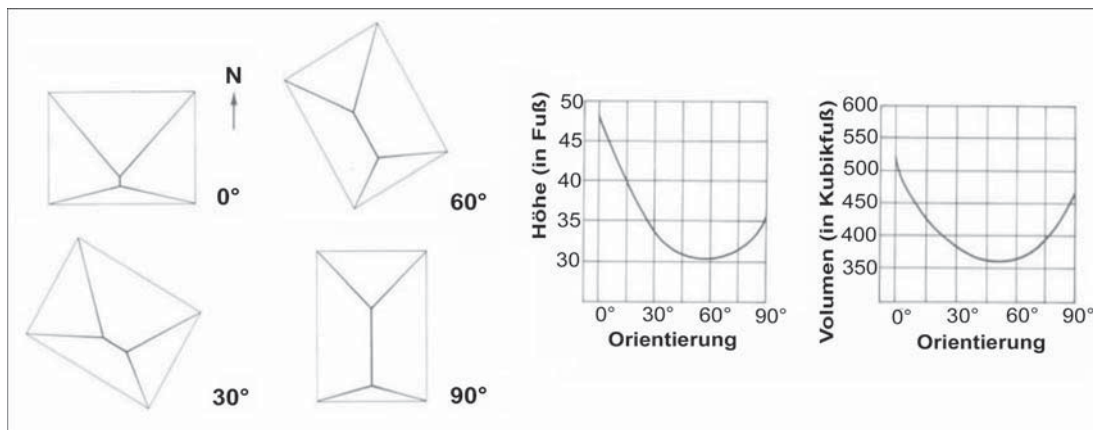


Abbildung 4.21: Einfluss der Grundstücksorientierung auf Höhe und Volumen

(Grafik: Topaloglu (2003), S. 37; Primärquelle: Knowles (1981), S. 70; eigene Bearbeitung)

4.3.4 Mathematische Konstruktion des *Solar Envelopes*

Die folgende Methode zur Konstruktion des *Solar Envelopes* funktioniert für Rechteckgrundstücke beliebiger Ausrichtung.

Zur Ermittlung der relevanten Winkel wird der Vektor der solaren Strahlung in seine Einzel-elemente zerlegt. Die Morgensonne bestimmt den Neigungswinkel der Westfassade, die Abendsonne den Neigungswinkel der Ostfassade. Jahreszeitliche Extreme definieren die Neigungswinkel der Nord- und Südfassade. Aus beiden sich auf diese Weise für die Fassaden ergebenden Neigungswinkeln wird jeweils das Minimum gewählt.

Das Vorgehen wird im Folgenden beispielhaft für eine Stadt auf dem Breitengrad $\varphi = 40^\circ\text{N}$ gezeigt. Die Berechnungsformeln der sich in Abhängigkeit des Breitengrades ergebenden Winkel der Sonnenstandberechnung – Sonnenhöhe α und Sonnenazimut a_z – sind in *Kapitel 9* ausführlich beschrieben.

Die Rotation des Rechteckgrundstückes betrage $\delta = 20^\circ$ (s. *Abbildung 4.22*). Der relative Sonnenazimut der jeweiligen Grundstückskante berechnet sich aus: $a_r = a_z - \delta$.

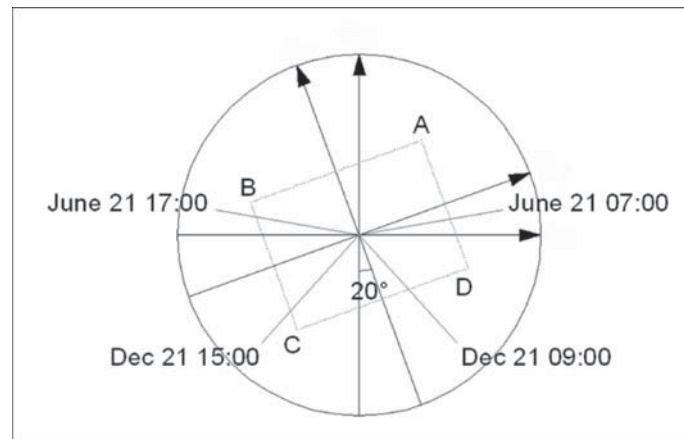


Abbildung 4.22: Beeinflussung der relativen Sonnenposition durch Rotation des Grundstücks

(Grafik: Topaloglu (2003), S. 48; eigene Überarbeitung)

Aus den somit gegebenen Winkelangaben lassen sich über trigonometrische Formeln jeweils zwei Neigungswinkel je Grundstückskante berechnen, von denen später der jeweils kleinere je Fassade (AB, BC, CD und AD) ausgewählt wird. Die folgende Tabelle dient der Übersicht (s. Tabelle 4.1):

Jahreszeit	Zeitfenster	Elevation α	Azimut a_z	Rel. Azimut a_r	Neigungswinkel	Fassade
Winter	09:00	14°	42°	22°	$\beta_1 = 15^\circ$	AB
					$\beta_2 = 34^\circ$	BC
	15:00	14°	318°	298°	$\beta_3 = 28^\circ$	AB
					$\beta_4 = 16^\circ$	AD
Sommer	07:00	26°	100°	80°	$\beta_5 = 70^\circ$	CD
					$\beta_6 = 27^\circ$	BC
	17:00	26°	260°	240°	$\beta_7 = 50^\circ$	CD
					$\beta_8 = 30^\circ$	AD

Tabelle 4.1: Übersicht aller Ausgangswinkel und der sich ergebenden Neigungswinkel je Fassade (hervorgehoben)

(Quelle: Topaloglu (2003), S. 48)

Das sich ergebende Volumen kann nun zeichnerisch nach folgendem Konstruktionsschema ermittelt werden (s. Abbildung 4.23).

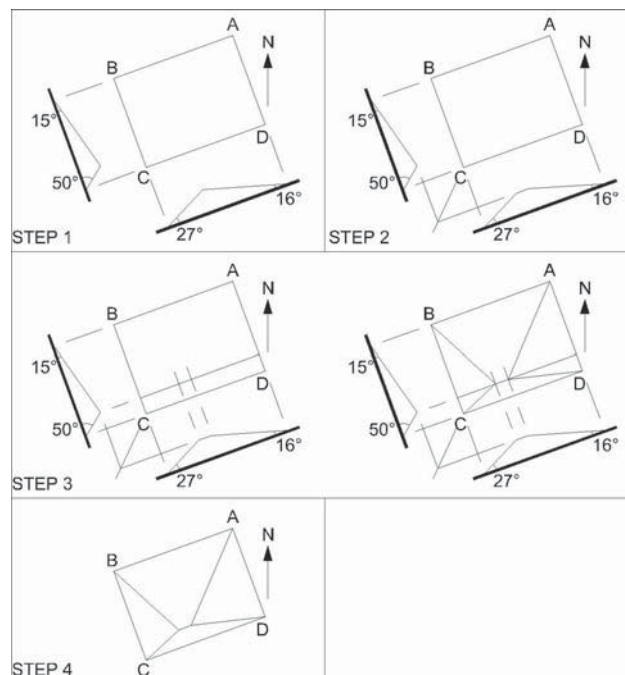


Abbildung 4.23: Zeichenmethode bei rotiertem Rechteckgrundstück

(Grafik: Topaloglu (2003), S. 49)

4.3.5 Programme zur Berechnung eines Solar Envelopes

4.3.5.1 Solvelope

Das Programm *Solvelope*²¹ unterteilt das Feld in der Ebene in einem kartesischen Koordinatensystem in Einzel-Rasterpunkte. Für jeden dieser Fußpunkte wird über die jahres- und tageszeitlich einzustellende Verschattungsregel die maximal erlaubte Höhe bestimmt, so dass es innerhalb des geschützten Zeitraumes zu keiner Selbst- oder Nachbarverschattung kommen kann (s. *Abbildung 4.24*). Nachteil des Programms ist seine Beschränkung auf Rechteckgrundrisse.

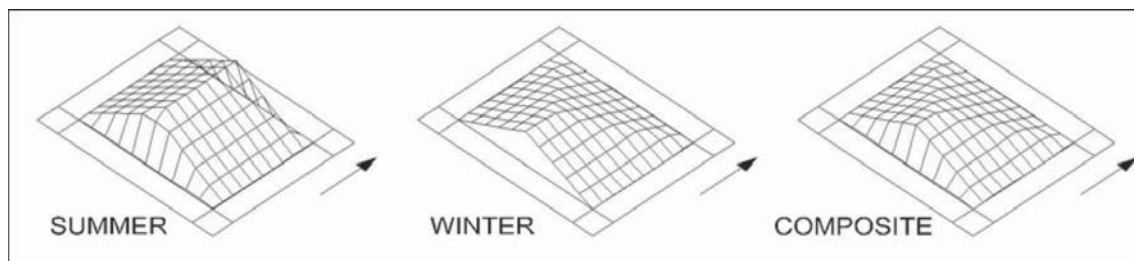


Abbildung 4.24: Mit dem Programm Solvelope berechneter Solar Envelope

(Grafik: Topaloglu (2003), S. 51)

²¹ Programmiert von Schiler und Ueng-Fang

4.3.5.2 EvSurf

Das Programm *EvSurf*²² arbeitet nach einem ähnlichen Prinzip, welches um eine Strahlungsberechnung ergänzt wurde. Allerdings geht in die Berechnung ausschließlich der direkte Strahlungsanteil ein, während die Diffusstrahlung vernachlässigt wird. Die Berechnung der Direktstrahlung erfolgt zudem nicht genau, sondern über die Zuordnung zu fünf definierten Energielevels. Die einzelnen Oberflächen werden dreidimensional eingefärbt, allerdings gibt es nur diese graphische, jedoch keine mathematische Antwort des Programms. Dafür kann man zwei verschiedene Entwurfsvarianten im Tages- und Jahresverlauf gegeneinander vergleichen.

4.3.5.3 SustArc

*SustArc*²³ ist ein Programm, das bei gegebenen urbanen Zusammenhängen für ein festgelegtes Grundstück, welches von der Rechteckform abweichen kann, das maximal erlaubte *Solar Volume* (SV) berechnet. Dieses ergibt sich aus dem *Solar Rights Envelope* (SRE) und dem *Solar Collection Envelope* (SCE).

Der *Solar Rights Envelope* (SRE) beschreibt dreidimensional die maximale Höhe über jedem Punkt des zu überplanenden Grundstücks, so dass ein innerhalb des *Solar Rights Envelopes* realisiertes Bauvolumen die solaren Rechte umliegender Grundstücke für festgelegte tages- und jahreszeitliche Zeitspannen nicht beschneidet (s. *Abbildung 4.25*).

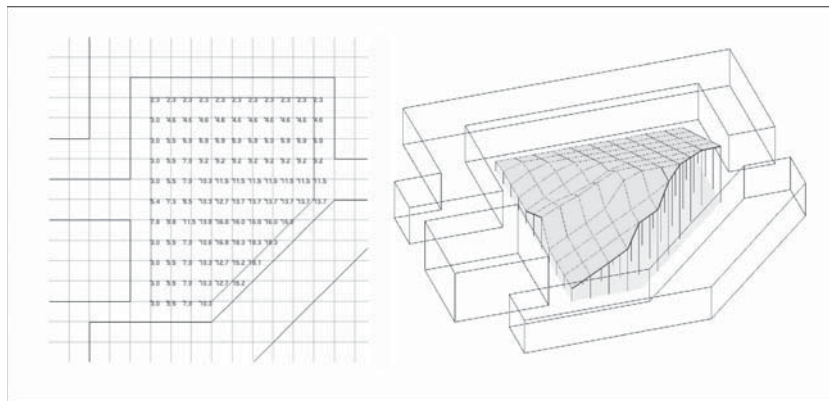


Abbildung 4.25: Konstruktion des Solar Rights Envelopes (SRE) mit SustArc

(Grafik: Capeluto (1999), S. 1342; Höhenkoten dreidimensional interpretiert)

Der *Solar Collection Envelope* (SCE) beschreibt dreidimensional die minimale Höhe über jedem Punkt des zu überplanenden Grundstücks, welche innerhalb festgelegter tages- und jahreszeitlicher Zeitspannen nicht durch bestehende Nachbargebäude verschattet wird (s. *Abbildung 4.26*).

²² Programmiert von da Veiga und La Roche

²³ Programmiert von Capeluto und Shaviv

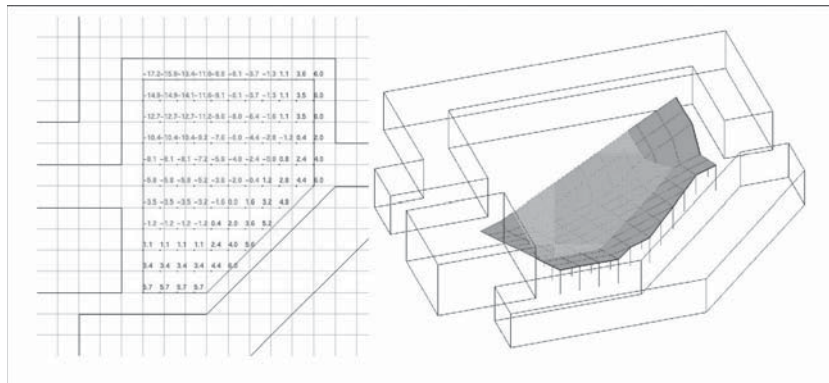


Abbildung 4.26: Konstruktion des Solar Collection Envelopes (SCE) mit SustArc

(Grafik: Capeluto (1999), S. 1342; Höhenknoten dreidimensional interpretiert)

Das sich ergebende *Solar Volume* (SV) zwischen der oberen Grenze des *Solar Rights Envelopes* und der unteren Grenze des *Solar Collection Envelopes* beschneidet weder das Recht der Nachbargebäude auf ungehinderten Zugang zu Solarstrahlung noch wird es selber durch umliegende Gebäude verschattet (s. *Abbildung 4.27*).

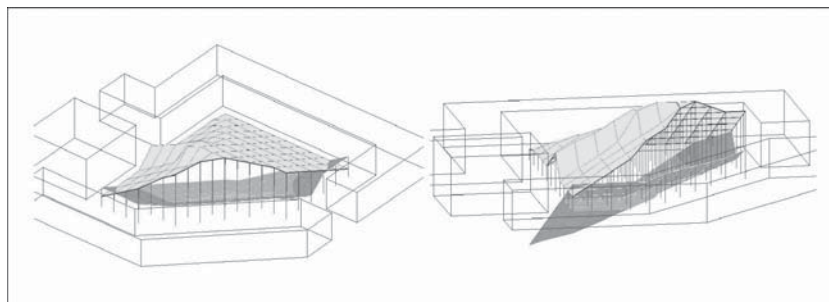


Abbildung 4.27: Synthese des Solar Volume (SV) aus SRE und SCE mit SustArc

(Grafik: Capeluto (1999), S. 1343)

4.3.6 Einfluss der Straßenführung

Zu Beginn einer städtebaulichen Entwurfsphase beschäftigt sich der Stadtplaner mit verschiedenen geometrischen Grundgrößen, wie z.B. Straßenführung, Aufteilung der Landparzellen, Gebäudehöhen und -orientierung, Proportion der Gebäudevolumen, Fußgängerwege und Größe öffentlicher Plätze. Jedes Thema für sich ist komplex, die Ermittlung der besten Lösung wird durch gegenseitige Wechselbeeinflussungen noch erschwert. Größe, Form und Lage des öffentlichen Raumes und von Gebäuden zueinander beeinflusst die Besonnung von Gebäuden im Winter und die erwünschte Verschattung im Sommer. Werden diese Faktoren in der Vorplanung nicht berücksichtigt, kann es zu erheblichen Komforteinbußen für den Aufenthalt sowohl in Gebäuden als auch im öffentlichen Raum kommen, welchen dann wiederum nur mit hohem Energieeinsatz begegnet werden kann.

Ausrichtung und Ausformung von städtebaulichen Blöcken und Straßen haben großen Einfluss auf Besonnung, Verschattung und Zugang zu Tageslicht in Abhängigkeit von den Erfordernissen des jeweiligen Klimas.

Die große Bedeutung einer intelligenten Straßenführung – noch vor den ersten Überlegungen zu Gebäudegrößen und -höhen im Rahmen des Solar Envelopes – soll am Beispiel von Los Angeles demonstriert werden, da diese Stadt über zwei verschiedene Straßenraster verfügt: das historische *Spanish Grid* im 45°-Winkel und das spätere *US Grid* mit exakten Nord-Süd- und Ost-Westachsen (s. *Abbildung 4.28*).



Abbildung 4.28: Das orthogonale US Grid sowie das diagonale Spanish Grid in Los Angeles, USA

(Grafik: Knowles (2000), S. 6)

Im *US Grid* (s. *Abbildung 4.29*) sind die Straßen im Winter stark verschattet, Ost-West-Straßen sogar ganztägig. Die Nordfassaden erhalten über den gesamten Tag keine Sonne. Gebäude und Strassen sind kalt und zugig. Im Sommer sind die Straßen wenig verschattet, Ost-Weststrassen sind ganztägig unverschattet. Die Südfassaden erhalten nie Schatten, Straßenraum und Gebäude heizen stark auf, die Aufenthaltsqualität ist in Sommer und Winter sehr gering.

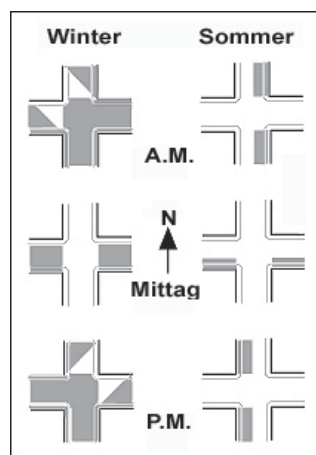


Abbildung 4.29: US Grid

(Grafik: Knowles (2000), S. 6; eigene Überarbeitung)

Das ältere, diagonal angelegte *Spanish Grid* bietet mehrere Vorteile.

Gegenüber dem *US Grid* entsteht weniger Verschattung im Winter, im Lauf des Tages erhält jede Fassade Zugang zu direktem Sonnenlicht. Es gibt somit keine untergeordnete Fassade, welche über den ganzen Wintertag unbesontt bleibt.

Im Sommer ist die erwünschte Verschattung gleichmäßiger verteilt. Auch Fassaden in Südost- oder Südwestorientierung sind zu bestimmten Tageszeiten verschattet, so dass die Aufheizung reduziert wird. Insgesamt führt dies auch zu einer besseren Aufenthaltsqualitäten im Straßenraum.

Die Wohnqualität in diesem Viertel wird von den Bewohnern als besonders hoch empfunden und spiegelt sich trotz der älteren Bausubstanz in höheren Boden- und Ladenmietpreisen wieder.

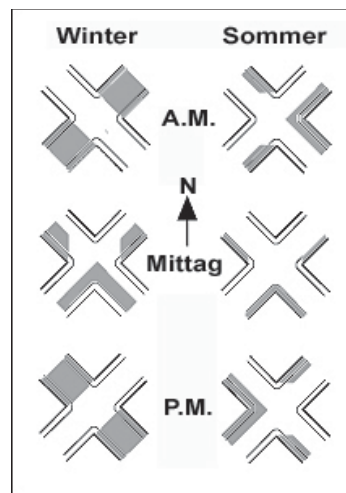


Abbildung 4.30: Spanish Grid

(Grafik: Knowles (2000), S. 7; eigene Überarbeitung)

Leider ist die heutige Straßenplanung nicht von diesen Überlegungen geprägt, obwohl sie neben der qualitativen auch zu einer energetischen Optimierung eines Quartiers beitragen kann.

Dabei ist eine intelligente Straßenführung der erste grundlegende Schritt zur Solarisierung von Bebauungsplänen.

Folgende Tabelle gibt einen Überblick über die Anforderungen an Straßen in unterschiedlichen Klimaten (s. *Tabelle 4.2*).

Klima	Ziele	1. Priorität	2. Priorität	Kommentar
polar	• Maximale Ausnutzung solarer Erwärmung (besonders im Winter) • Auskühlung durch Winde minimieren.	Immer: Wind-abgewandt-heit	Immer: Besonnung	• Gebäudeausrichtung für beste Besonnung • breite Ost-West Straßen für maximale Besonnung im Frühling und Herbst • keine durchgehenden Straßen in winterlicher Hauptwindrichtung
kalt		Winter: Sonne Sommer: Wind	Winter: Windstille Sommer: Schatten	• Straßenführung im 30°-Winkel für bessere Besonnung • durchgehende Straßen in sommerlicher Hauptwindrichtung • breite Ost-West-Straßen und verlängerte Ost-West-Blocks für maximale Einstrahlung im Frühling und Herbst
gemäßigt (arid)	• Maximale Ausnutzung solarer Erwärmung • maximale Verschattung im Sommer • sommerliche Luftzirkulation erlauben, • aber winterliche Wind durchgang vermeiden	Sommer: Verschattung	Sommer: Wind Winter: Sonne	• Schmale Nord-Süd-Straßen für sommerliche Verschattung • Breite Ost-West-Straßen und weite Ost-West-Blocks für mehr Besonnung im Frühling und Herbst
gemäßigt (humid)		Sommer: Wind	Sommer: Schatten Winter: Sonne	• Straßen in Sommerwindrichtung • Breite Ost-West-Straßen und lange Ost-West-Blocks für bessere Besonnung im Frühling und im Herbst • Breite Straßen zur besseren Durchwindung
heiß (arid)	• Maximale Verschattung • Reduktion heißer, staubiger Winde	Immer: Verschattet	Nacht: Wind Tag: Windstille	• Schmale Nord-Süd-Straßen für Verschattung • Verlängerte Nord-Süd-Blocks, falls Ost-West-Fassaden verschattet • Breite Ost-West Straßen
heiß (humid)	• Maximale Verschattung • Maximaler Windfluss	Immer: Wind	Immer: Verschattung	• Straßen in Hauptwindrichtung • Beachtung der zweiten Windrichtung • Breite Straßen für Windfluss

Tabelle 4.2: Anforderungen an Straßen in Abhängigkeit der Klimazone

(Quelle: Brown (2001), S. 103, eigene Überarbeitung)

4.3.7 Kritische Betrachtung des Solar Envelopes

Die Fortschritte der Solartechnik werden das Stadt- und Landschaftsbild nachhaltig beeinflussen. Dementsprechend kommt der ästhetischen und funktionellen Integration von Solaranlagen in die gebaute Umwelt eine große Bedeutung zu.

Noch vor dem eigentlichen Gebäudeentwurf liegen stadtplanerische Planungsschritte wie z.B. Festlegung der Straßenführung, Parzellengrößen und Freiflächenplanung, welche die energetischen Möglichkeiten des zukünftigen Entwurfs stark beeinflussen können. Zu dieser frühen Planungsphase ist jedoch nur ein Minimum an Eingangsdaten bekannt.

Überlegungen wie die zum *Solar Envelope* kommen den Ansprüchen der frühen Planungsphase sehr nahe und ermöglichen ganz neue Ansätze bei der Quartiersplanung. Sowohl für orthogonale (s. Abbildung 4.31) als auch freie Formen (s. Abbildung 4.32) sind mit diesem Planungshilfswerkzeug ansprechende städtebauliche Entwürfe möglich.

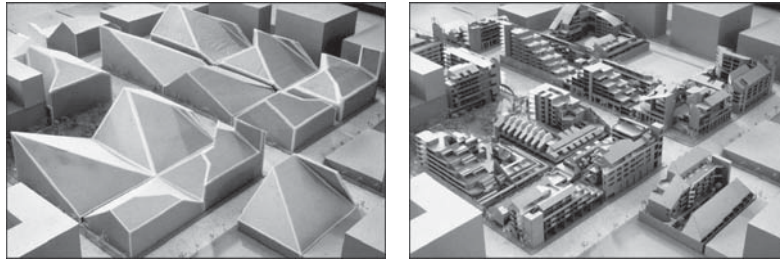


Abbildung 4.31: Solar Envelope und städtebaulicher Entwurf (orthogonales Raster)

(Grafik: Knowles (2000), S. 10)

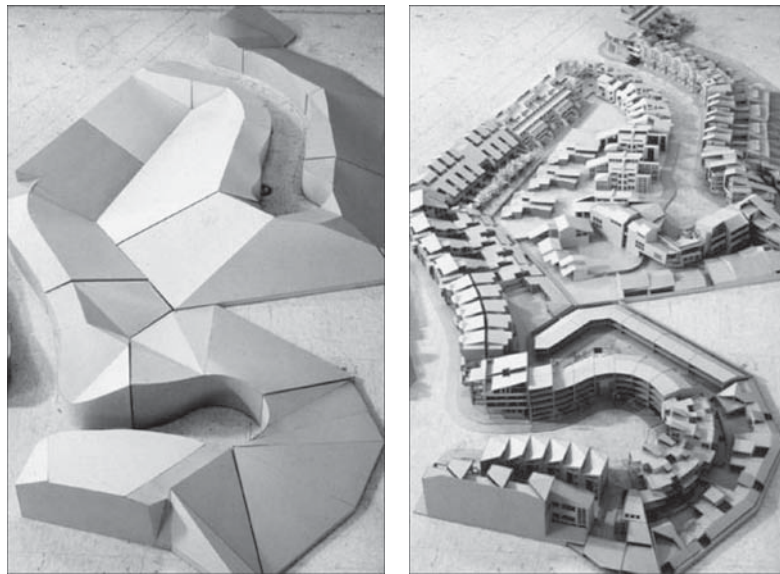


Abbildung 4.32: Solar Envelope und städtebaulicher Entwurf (freie Form)

(Grafik: Knowles (2000), S. 11)

Beide Entwürfe zeigen, dass sich für unterschiedlichste Grundformen eines *Solar Envelopes* ein städtebaulicher Entwurf realisieren lässt, bei dem für jedes Gebäude Verschattungsfreiheit während einer bestimmten Periode garantiert ist, so dass solare Technologien von vornherein zukunftsicher eingeplant werden können. Selbst relativ große Bebauungsdichten sind auf diese Weise realisierbar.

Zu den Hauptkritikpunkten am *Solar Envelope* zählen die sich ergebenden unkonventionellen pyramidalen Strukturen, welche das gewohnte kartesische System verlassen. Die entstehenden Schrägen werden als baukonstruktive Herausforderung wahrgenommen, welche jedoch nicht unlösbar scheint. Der Befürchtung, Gebäude mit schrägen statt senkrecht gestellten Fassaden würden einen Großteil ihrer Nutzfläche verlieren, konnte bereits in anderem Zusammenhang in der Dissertation von Stark²⁴ entkräftet werden.

²⁴ vgl. [Stark (2003), S. 200-203]

Stark wählte zur Untersuchung nichtkartesischer Formenreihen konstanten Raumvolumens folgende zwei Untersuchungsansätze:

- Variation der Grundfläche bei konstanter Höhe
- Variation der Höhe bei konstanter Grundfläche.

Die Parameterstudie „Variation der Grundfläche bei konstanter Höhe“ (s. Abbildung 4.33) zeigt folgendes Ergebnis²⁵:

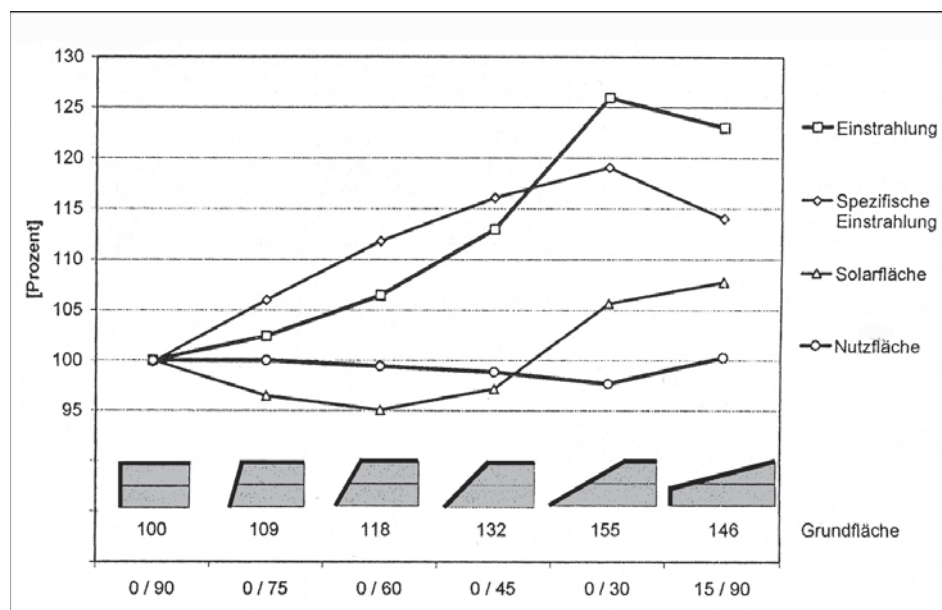


Abbildung 4.33: Parameterstudie für „Variation der Grundfläche bei konstanter Höhe“

(Grafik: Stark (2003), S. 201; eigene Überarbeitung)

- Die Nutzfläche schwankt bei allen Varianten nur um wenige Prozent.
- Die überbaute Grundfläche nimmt jedoch mit flacheren Fassadenwinkeln zu.
- Die Solarfläche²⁶ nimmt zunächst ab, übersteigt jedoch ab einem Winkel zwischen 45° und 30° die der Referenzfläche des Ausgangskubus.
- Das Einstrahlungspotential sowie die gewichtete spezifische Einstrahlung²⁷ nehmen bis zu ihrem Maximum bei 30° stetig zu.

Ergebnis: Bei Gebäuden mit geneigten Fassaden stehen sehr geringe Verluste an Nutzfläche großen Steigerungen des solaren Ertrages gegenüber.

Die Parameterstudie „Variation der Höhe bei konstanter Grundfläche“ (s. Abbildung 4.34) zeigt folgendes Ergebnis:

²⁵ Flächen mit Raumhöhe <1m Faktor 0; bei Raumhöhe 1 bis 2m Faktor 0.5; bei Raumhöhe >2m Faktor 1.

²⁶ Summe aller südorientierten und horizontalen Flächen

²⁷ Gewichteter Mittelwert der neigungsabhängigen Einstrahlungswerte

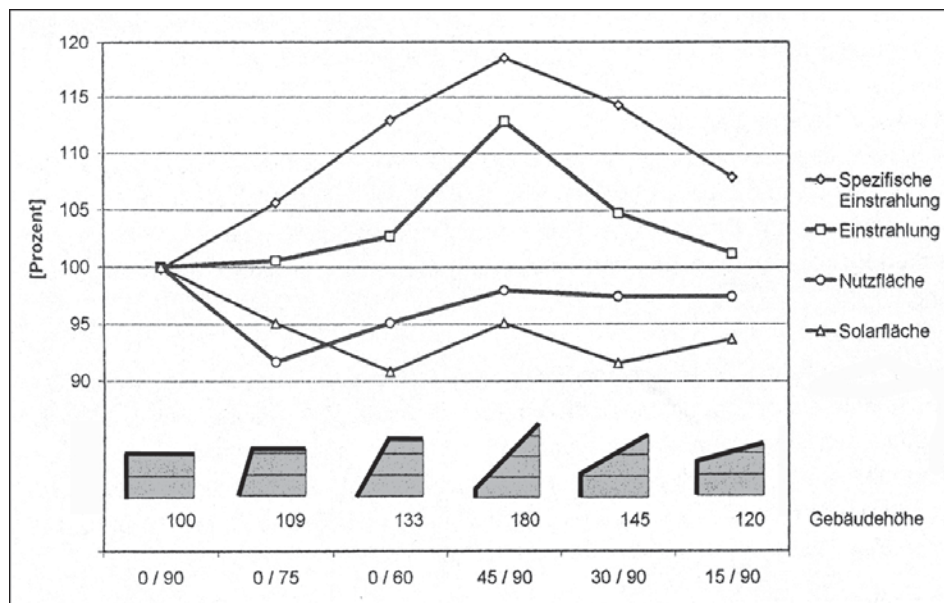


Abbildung 4.34: Parameterstudie für „Variation der Höhe bei konstanter Grundfläche“

(Grafik: Stark (2003), S. 202; eigene Überarbeitung)

- Die Nutzfläche schwankt bei allen Varianten nur um wenige Prozent.
- Die Höhe nimmt bei geneigten Fassaden zu.
- Die Solarfläche nimmt ab und liegt dauerhaft unterhalb der Referenzfläche des Ausgangskubus.
- Das Einstrahlungspotential sowie die gewichtete spezifische Einstrahlung jedoch nehmen bis zu ihrem Maximum bei 45° deutlich zu.

Ergebnis: Auch hier stehen bei Gebäuden mit geneigten Fassaden nur geringe Verluste an Nutzfläche großen Steigerungen des solaren Ertrages gegenüber.

Mit dieser Untersuchung konnte bewiesen werden, dass eine vom orthogonalen Raster abweichende Form nur in sehr geringem Maße Verluste bei der Nutzfläche bedeuten muss. Die Entwicklung geht zu Lasten der benötigten Grundstücksfläche als Folge der aus größeren Gebäudehöhen resultierenden größeren Abstandsflächen.

Die Entwicklung zeigt jedoch besonders positive Ergebnisse im Hinblick auf eine gebäudeintegrierte Solarenergiegewinnung. Zunächst ist die Tatsache erstaunlich, dass das Einstrahlungspotential gesteigert werden konnte, obwohl durch die Schrägstellung die Solarfläche in ihrer Größe reduziert wird. Dieser gegenläufige Trend lässt sich mit der größeren Einstrahlendichte auf geneigte Flächen erklären und ist angesichts der hohen Investitionskosten für Solartechnik ein weiterer positiver Effekt, da an Gebäuden mit geneigten Fassaden mit weniger Kollektorfläche deutlich mehr Energie gewonnen werden kann als an kubischen Gebäuden.

Der große Nachteil des *Solar Envelopes* besteht somit nicht in der Schrägstellung der Fassaden an sich, sondern allein in der Tatsache, dass es sich lediglich um eine Strategie zur

Minimierung von Verschattungen handelt, jedoch nicht um eine Methode zur Maximierung solarer Exposition. Leider führt das Konstruktionsprinzip des *Solar Envelopes* sogar eher dazu, dass die Flächen schleifend und nicht senkrecht beschienen werden. Eine unter flachem Winkel auftreffende Einstrahlung kann jedoch von vielen Solartechnologien aufgrund von Reflexionsvorgängen nicht genutzt werden. Zudem nimmt auch die Einstrahlungsdichte bei niedrigen Einfallswinkeln stark ab.

4.4 Zusammenfassung

Die in der Architektur und Stadtplanung bekannten energetischen Formfaktoren bzw. Methoden wurden in diesem Kapitel vorgestellt und repräsentieren den derzeitigen Stand der Forschung auf diesem Gebiet.

Sie unterscheiden sich grundlegend in ihren Zielsetzungen:

- Das *A/V-Verhältnis* verfolgt die Verlustminimierungsstrategie, bleibt aber in seiner einseitigen Forderung nach Kompaktheit immer im Bereich der Negativbilanz, da die Verluste nie auf Null reduziert werden können. Das A/V-Verhältnis berücksichtigt nicht die konkrete dreidimensionale Ausformung der Gebäudehülle oder geometrische Angaben wie Länge, Breite, Höhe oder das Verhältnis von luft- zu erdberührten Hüllflächenanteilen. Sie ist gegenüber dem konkreten Standort oder der Gebäudeausrichtung undifferenziert.
- Die *Entwurfsgütezahl EGZ* wurde zur Maximierung passiver solarer Gewinne entwickelt, berücksichtigt dabei jedoch nur senkrechte Hüllflächenanteile südlicher Orientierung. Diffusstrahlungsanteile bleiben unberücksichtigt, eine globale Übertragbarkeit ist nicht möglich.
- Die Methode des *Solar Envelope* dient der Verschattungsminimierungsstrategie, so dass eine gegenseitige städtebauliche Verschattung zumindest innerhalb festgelegter Grenzen ausgeschlossen wird. Die eintreffende Strahlung erreicht die Gebäudeoberflächen aufgrund des Konstruktionsprinzips jedoch nur unter einem flachen Winkel und ist somit wenig effizient.

Keine der bekannten energetisch-geometrischen Formfaktoren führt zu einer Optimierung der Gebäudeform im Sinne einer Gewinnmaximierungsstrategie für den Einsatz gebäudehüllenintegrierter aktiver Solartechnologien. Diesbezüglich führen sie alle insgesamt nur zu unbefriedigenden Ergebnissen.

Dennoch werden in den drei unterschiedlichen Ansätzen der Verlustminimierungs-, passive Gewinnmaximierungs- und Verschattungsminimierungsstrategie bestimmte Anforderungen deutlich, welche auch bei der Entwicklung einer neuen Methode berücksichtigt werden sollten.

Diese müßte jedoch einen Ansatz enthalten, welcher auf die Optimierung der konkreten dreidimensionalen Gebäudehüllenausformung sowie die Gebäudeorientierung eingeht und eine Differenzierung nach unterschiedlichen Himmelsrichtungen berücksichtigt. Ein weiteres großes Ziel besteht in der globalen Übertragbarkeit der neuen Methode.

Die zentrale Forschungsfrage dieser Arbeit wurde bereits in *Abschnitt 3.7* erläutert. Die Forschungsaufgabe besteht daher in der Entwicklung einer Methode zur standortspezifischen Form- und Orientierungsoptimierung von Gebäuden im Rahmen einer aktiven Gewinnmaximierungsstrategie für die frühe Planungsphase.

Kapitel 5

Untersuchungsaufbau (Methode)

5.1 Forschungsansatz

Der Forschungsansatz zur Beantwortung der in den vorangegangenen Kapiteln herausgearbeiteten Forschungslücke soll in dieser Arbeit in einer global angelegten *Formenstudie* liegen, um zunächst den Einfluss einzelner geometrischer oder standortspezifischer Faktoren auf das energetische Gesamtergebnis zu ermitteln.

5.2 Methodisches Vorgehen

Das methodische Vorgehen gliedert sich in folgende Schritte (s. *Abbildung 5.1*):

Erstellung der *Datenbanken*:

- *Formen*: Zunächst werden Formenreihen nach festgelegten Formbildungsvorschriften generiert, die in einem bestimmten geometrischen Parameter variieren. Sie werden je nach Fragestellung zu Untersuchungsreihen und -gruppen zusammengefasst und in einer Formen-Datenbank hinterlegt. Zu den Eingabedaten zählen konstante Volumina und bestimmte Umformungsvorschriften.
- *Standorte*: Parallel werden weltweite repräsentative Standorte mit unterschiedlichen klimatischen und strahlungsgeometrischen Randbedingungen ermittelt und ebenfalls in einer Standort-Datenbank angelegt. Die Eingabedaten sind hier Klimazone, Breitengrad, Bevölkerung sowie Geo-Koordinaten mittels denen meteorologische NASA-Satellitendaten abgefragt werden.
- *Parameter*: Für die spätere Berechnung thermischer Verluste und solarer Gewinne sind in einer Parametermatrix Angaben zum Dämmstandard der Hülle, zum Wirkungsgrad der solaren Technologie sowie der Anteil der solar genutzten Gebäudeoberfläche angegeben und in einer Parameterdatenbank abgelegt.

- Zur eindeutigen Begrenzung des betrachteten Untersuchungsrahmens werden sowohl für die Erstellung der Datenbanken als auch für die Durchführung der Berechnungen bestimmte *Untersuchungsgrenzen* festgelegt.

Erstellung eines *Berechnungsprogramms*:

- Aufgrund der großen Datenfülle und umfangreicher Rechenschritte kann die Berechnung ausschließlich computergestützt erfolgen. Da es bislang kein für die angestrebte Untersuchung geeignetes Rechenprogramm gibt, ist die Erstellung eines eigenen Untersuchungswerkzeugs zur Automatisierung der Algorithmen und der Verknüpfung der Datenbanken notwendig.

Durchführung der Untersuchung:

- *Kombination*: Im nächsten Schritt werden alle Formen an jeden der repräsentativen Standorte gestellt und für alle möglichen Parameterkombinationen ihre Energiebilanz aus thermischen Verlusten gegenüber solaren Gewinnen berechnet.
- *Rotation*: Für jede Form wird zudem für den jeweiligen Standort die optimale Orientierung ermittelt. Zu diesem Zweck wird die Form aus der Startposition heraus in 5°-Schritten um die eigene Achse gedreht.
- *Kalkulation*: Für jede mögliche Orientierung der Form wird dann für jede Teiloberfläche der gesamten Gebäudehülle die empfangene Jahresglobalstrahlung als Summe der jeweils empfangenen Direkt-, Diffus- und Reflexionsstrahlung über alle Stunden des Jahres ermittelt.
- *Selektion*: Nach erfolgter Drehung um 360° wird aus allen Ergebnissen diejenige Orientierung gewählt, bei welcher die Gebäudehülle die maximale solare Einstrahlung erzielt. Sowohl die Jahresenergiebilanz der Gebäudehülle als auch die erzielte Dichte der Einstrahlung pro m² werden als Endergebnis festgehalten.
- *Sortierung*: Im letzten Schritt werden für jeden Standort die Formen gemäß ihrer Ergebnisse sowohl nach Energiebilanz als auch Dichte in ein Ranking gebracht.

Dokumentation und Auswertung der Einzel-Ergebnisse:

- Die einzelnen *Rankings* werden graphisch aufbereitet und umfassend analysiert. Dabei können bereits spezielle Detailfragen für jeden einzelnen Standort untersucht werden.
- In einem zweiten Schritt werden die Standorte untereinander in Einzelaspekten vergleichbar gemacht. Dazu wird eine Matrix von Klimazonen über Breitengraden angelegt. Hieran lässt sich die jeweilige Entwicklung in der Achse der Breitengrade von Pol zum Äquator verfolgen sowie in Achse der Klimazonen von der Eiswüste über mediterrane Gebiete bis zu den Tropen.

Auswertung der Gesamt-Ergebnisse:

- Bei der *graphischen Analyse* werden die für jede Stadt erstellten Rangfolgen zu einer alle Städte beinhaltenden Matrix aus Formen über Standorten zusammengefasst. Die Anordnung der Städte erfolgt dabei über den Breitengrad vom Nordpol zum Äquator. Das so entstehende Ergebnisfeld wird mittels eines je nach Fragestellung zu justierenden Farbfilters eingefärbt, um das Ergebnis optisch ablesen zu können. Diese eingefärbten Matrizen werden ihrerseits nach Vorgaben der o.g. Parametermatrix angeordnet, so dass übergeordnete Tendenzen einer zeitlichen Entwicklung ablesbar werden.
- Bei der *mathematischen Analyse* werden die Ergebnisse als Datenpunkte in einem auf die jeweilige Untersuchungsfrage abgestimmten Graphen interpretiert, um aus den sich ergebenden Punkthaufen lineare Abhängigkeiten berechnen zu können.
- Zusätzlich zum Hauptuntersuchungsstrang werden einzelne Fragestellungen herausgelöst in Einzeluntersuchungen betrachtet. Hierbei handelt es sich um eine *Standortstudie* zur vergleichenden Untersuchung der gewählten Standorte, um eine *Rotationsstudie* zur Beurteilung des Einflusses der Orientierungsoptimierung gegenüber der Formoptimierung, eine *Rankingstudie* zur Ableitung allgemeingültiger Erkenntnisse bezüglich der Rangfolgenbildung und eine *Potentialstudie* zur Berechnung des globalen Potentials der solaren Energiegewinnung über die Gebäudehülle.

Ableitung der Endergebnisse:

- Aus der Zusammenschau von graphischer Analyse, mathematischer Analyse und den Einzelstudien können übergeordnete Zusammenhänge und Wirkprinzipien extrahiert werden. Aus diesen werden allgemeingültige Ergebnisse abgeleitet, aus welchen wiederum konkrete Handlungsempfehlungen und die Antworten zu den oben formulierten Forschungsfragen resultieren.

5.3 Ablaufdiagramm

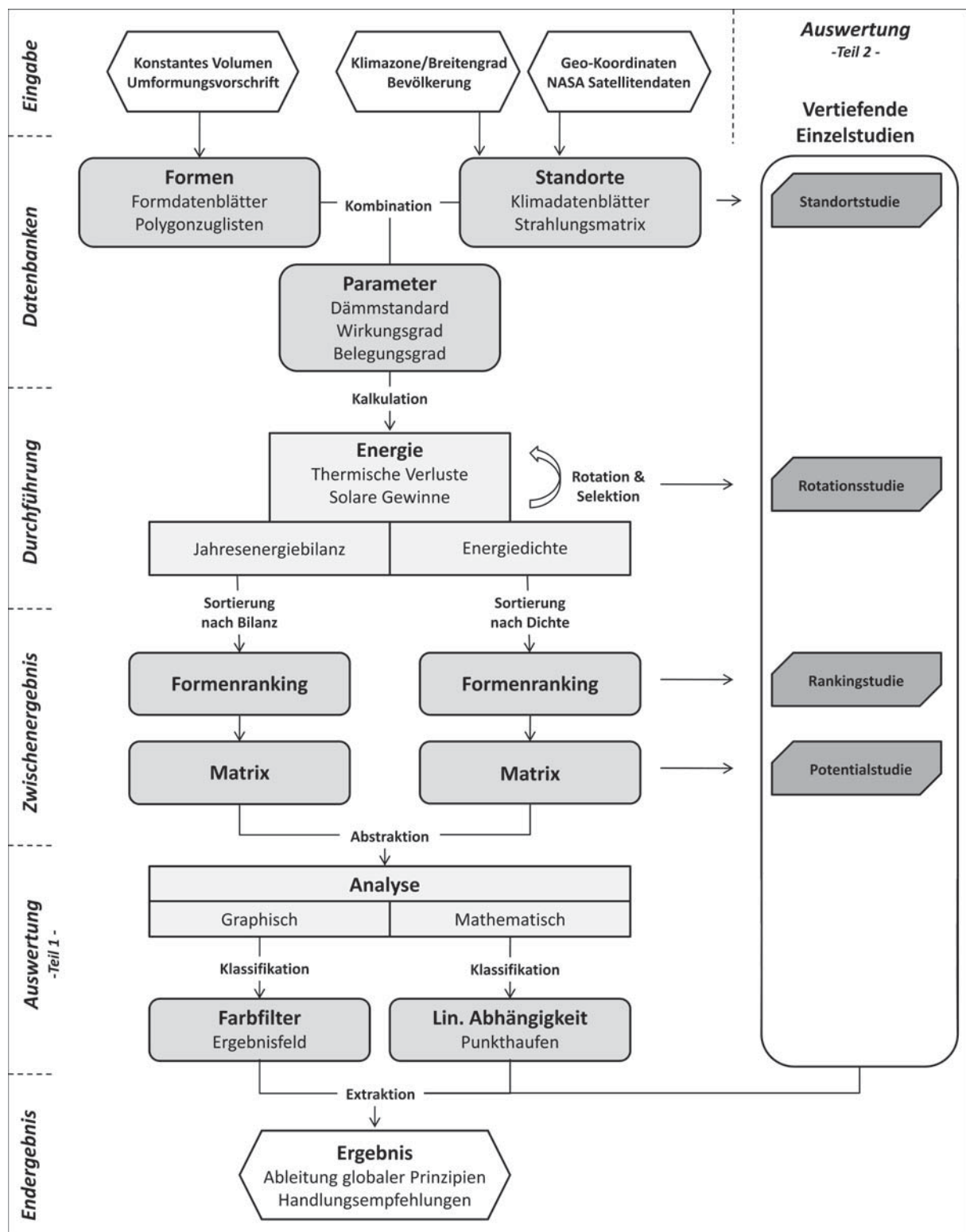


Abbildung 5.1: Übersichtsschema zum methodischen Vorgehen

(Grafik: eigene)

Kapitel 6

Anlegen der Datenbanken

6.1 Generierung der Formenreihen

Für die Formenstudie werden möglichst viele verschiedene Einzelformen, insbesondere auch Extremformen benötigt, um die Ergebnisse untereinander vergleichen und bestimmte Entwicklungstendenzen ablesen zu können, welche aus der Variation eines bestimmten geometrischen Parameters resultieren. Die für diese Untersuchung entwickelten Formen sind nicht beliebig, sondern werden nach bestimmten Umformungsvorschriften generiert.

Um die Formen untereinander vergleichbar zu machen, wird allen ein konstantes Volumen von 1.000 m^3 zugrunde gelegt. Aus dieser Grundmasse werden die einzelnen Körper individuell geformt (s. *Abbildung 6.1*).

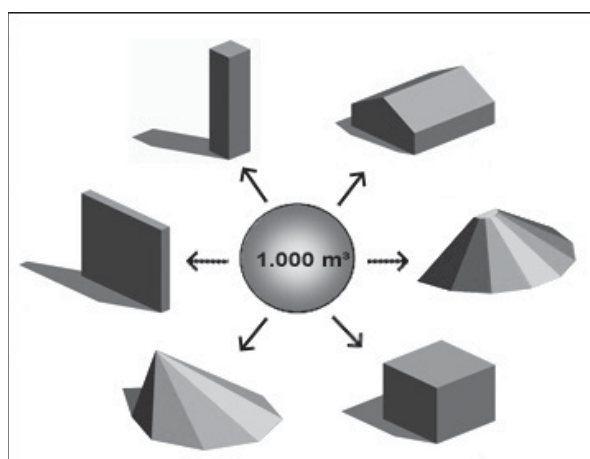


Abbildung 6.1: Generierung unterschiedlichster Formen aus einer konstanten Grundmasse mit 1.000 m^3 Volumen

(Grafik: eigene)

Für die vorliegende Forschungsarbeit wurde die Anzahl der Körper auf insgesamt 64 Formen beschränkt. Sie unterteilen sich in zwei Obergruppen:

- Die Formen von Nr. 1 bis Nr. 29 sind konventionelle Formen mit einer quaderförmigen Primärstruktur bzw. konventionellen Dachformen.
- Die Formen Nr. 30 bis Nr. 64 sind unkonventionelle Formen mit einer pyramidalen Primärstruktur oder gebaute Solararchitektur.

Für die Gruppen 1 bis 4 der konventionellen Gebäudeformen wurden Figuren in Anlehnung an häufige Typenvertreter des Baubestands, wie beispielsweise Turm, Würfel, Halle, Reihe, Scheibe, Riegel, Zeile und Block, aber auch Häuser mit Satteldach, Pultdach oder Mansarddach generiert.

Die Gruppen 5 bis 7 der unkonventionellen Formen basieren auf geometrischen Primärformen wie Pyramiden, Prismen, Zylindern oder Kegeln, welche nicht zum üblichen Entwurfsrepertoire bei der Formfindung zählen, für deren solare Eignung es jedoch Hinweise in den Voruntersuchungen (s. *Kapitel 3* bis *Kapitel 5*) gab.

Insgesamt entstehen also sieben Untersuchungsgruppen, welche sich aus insgesamt dreizehn Untersuchungsreihen zu je fünf in einer bestimmten Abfolge stehenden Einzelformen zusammensetzen. Da der Würfel (Form Nr. 3) in zwei Untersuchungsreihen vorkommt, entstehen somit nicht 65, sondern nur 64 zu untersuchende Einzelformen.

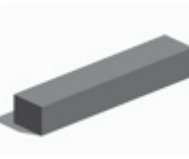
Innerhalb einer Untersuchungsreihe mit je fünf Einzelformen gelten bezüglich des Formgenerierungsmodus bestimmte Umformungsvorschriften, deren Gesetzmäßigkeiten zur Untersuchung des Einflusses eines isolierten geometrischen Parameters dienen. Dazu werden bestimmte Parameter konstant gehalten, während ein Parameter innerhalb einer bestimmten Bandbreite variiert wird.

6.1.1 Formengruppe 1

Reihe 1:	
Untersuchung:	Gebäudehöhe

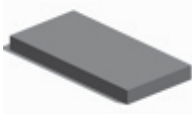
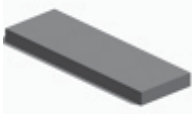
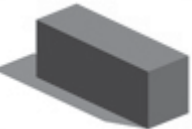
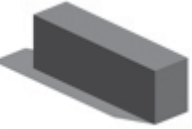
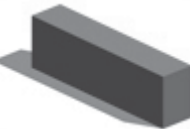
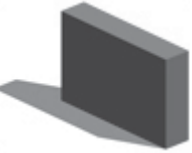
Die Untersuchungsreihe 1 entstand nach der Umformungsvorschrift „Variation der Höhe über quadratischem Grundriss“. Die Kantenlängen der Quader (Breite:Tiefe:Höhe) ergeben sich zu 1:1:10 bzw. 1:1:5 für die beiden Türme, 1:1:1 für den Würfel und 5:5:1 bzw. 10:10:1 für die beiden Hallen. Innerhalb dieser Entwicklung kann somit der Einfluss der Gebäudehöhe auf die spätere Energiebilanz (thermische Verluste/solare Gewinne) untersucht werden.

6.1.2 Formengruppe 2

	    
Reihe 2:	Nr. 6 Nr. 7 Nr. 3 Nr. 8 Nr. 9
Untersuchung:	Gebäudebreite und -tiefe

Analog zur Formengruppe 1 entstanden diese Formen nach der Umformungsvorschrift „Variation der Gebäudetiefe bei quadratischer Fassade“. Die Kantenlängen (Breite:Tiefe:Höhe) ergeben sich somit zu 10:1:10 bzw. 5:1:5 bei den beiden Scheiben, 1:1:1 beim Würfel und 1:5:1 bzw. 1:10:1 bei den beiden Zeilen. Innerhalb der Reihe 2 kann somit der Einfluss der Gebäudetiefe bzw. -breite untersucht werden.

6.1.3 Formengruppe 3

	    
Reihe 3a:	Nr. 10 Nr. 11 Nr. 12 Nr. 13 Nr. 14
	    
Reihe 3b:	Nr. 15 Nr. 16 Nr. 17 Nr. 18 Nr. 19
	    
Reihe 3c:	Nr. 20 Nr. 21 Nr. 22 Nr. 23 Nr. 24
Untersuchung:	Rechteckige Grundrissformen und Gebäudehöhe

Die Formengruppe 3 besteht aus drei einzelnen Formenreihen, welche alle nach dem gleichen Prinzip, jedoch mit unterschiedlicher Gebäudehöhe entwickelt wurden. Innerhalb der einzelnen Reihen wird der Einfluss der Grundrissproportionen bei Rechteckgrundrissen un-

tersucht. Die Kantenlängen (Breite:Tiefe) entwickeln sich 1:1, 1:2, 1:3, 1:4 bis 1:5. In der Abfolge der drei Reihen kann somit der Einfluss der Gebäudehöhe von Quadern mit Rechteckgrundriss untersucht werden. Die Höhe beträgt in Reihe 3a 3 Meter (eingeschossig), in Reihe 3b 9 Meter (dreigeschossig) und in Reihe 3c 15 Meter (fünfgeschossig).

6.1.4 Formengruppe 4

Reihe 4:					
	Nr. 25	Nr. 26	Nr. 27	Nr. 28	Nr. 29
Untersuchung:	Typische Dachformen				

In Reihe 4 werden auf einem konstanten Quader der Grundrissmaße 12x14 Meter und 3 Meter Höhe folgende verschiedene Dachformen aufgesetzt: symmetrisches Satteldach, asymmetrisches Satteldach, Pultdach, Bogentonnendach und Mansarddach. Der Einfluss der Dachform kann somit untersucht werden.

6.1.5 Formengruppe 5

Reihe 5a:					
	Nr. 30	Nr. 31	Nr. 32	Nr. 33	Nr. 34
Reihe 5b:					
	Nr. 35	Nr. 36	Nr. 37	Nr. 38	Nr. 39
Reihe 5c:					
	Nr. 40	Nr. 41	Nr. 42	Nr. 43	Nr. 44
Untersuchung:	Regelmäßige polygone Grundrissformen und Gebäudehöhe				

Formengruppe 5 besteht wie Gruppe 3 aus drei einzelnen Reihen, welche dem gleichen Konstruktionsschema folgen, jedoch unterschiedliche konstante Höhen aufweisen. Innerhalb einer Reihe entwickelt sich der regelmäßige Polyongrundriss vom Dreieck, über des Viereck, Fünfeck und Sechseck zum regelmäßigen Achteck. Über diesen Grundrissen werden schiefe Pyramiden errichtet, wobei jeweils der Fußpunkt der Pyramidenspitze über einem der Polygoneckpunkte liegt.

Es handelt sich um schiefe statt um regelmäßige Pyramiden, da bei letzteren der Lotfußpunkt über dem Polygonmittelpunkt liegt. Dies hätte eine Rotationssymmetrie mit geringen Spielräumen bei der Orientierungsoptimierung sowie eine zu allen Himmelsrichtungen identische Neigung der Empfangsflächen zur Folge. Die für diese Untersuchung gewählten schiefen Pyramiden hingegen können für alle Himmelsrichtung verschiedene Neigungen vorweisen. Des Weiteren entstehen bei diesem Konstruktionsprinzip immer zwei senkrechte Fassaden, was Vorteile bezüglich Baustatik und innerer Nutzfläche bietet.

Die Gebäudehöhe entspricht dabei wie in Gruppe 3 in Reihe 5a 3 Meter, in 5b 9 Meter und in 5c 15 Meter. Innerhalb der einzelnen Reihen kann somit der Einfluss des Polyongrundrisses untersucht werden, während innerhalb der Gruppe der Einfluss der Gebäudehöhe – auch in direkter Relation zur Gruppe 3 – untersucht werden kann.

6.1.6 Formengruppe 6

Reihe 6a:	    
Reihe 6b:	    
Reihe 6c:	    
Untersuchung:	Unregelmäßig polygone Grundrissformen und Gebäudehöhe

Gruppe 6 besteht ebenfalls aus drei einzelnen Reihen der drei bekannten Höhen von 3, 9 und 15 Meter. Wie in Gruppe 5 handelt es sich um schiefe Pyramiden, hier jedoch über unregelmäßigen Polygongrundrissen. Das Konstruktionsprinzip innerhalb einer Reihe basiert immer auf der gleichen Grundform, einem Scheitelpunkt, von dem aus im immer gleichen Öffnungswinkel von 120° zwei gleichlange Schenkel ausgehen.

Der so entstehende Winkel wird in den beiden ersten Fällen jeweils zu einem unregelmäßigen Fünfeck ergänzt. Im ersten Fall wird der 120° -Sektor in die Einzelwinkel 30° , 60° und 30° aufgeteilt. Im zweiten Fall in die Winkel 15° , 90° und 15° . Bei der dritten Form wird der Öffnungswinkel zu einem Sechseck ergänzt, wobei die vier Einzelwinkel jeweils 30° betragen. Abweichend von der symmetrischen Konstruktion der beschriebenen drei Formen mit gleichen Schenkellängen stehen bei der vierten und fünften Form dieser Reihe die Schenkel der Ausgangsfigur im Verhältnis 1:2. Der zugrunde gelegte Öffnungswinkel von 120° wird ausgehend von dem kurzen Schenkel in 15° , 30° , 60° und 45° unterteilt. Zur Konstruktion der fünften Form wird die vierte gespiegelt.

Innerhalb einer Reihe lässt sich der Einfluss unterschiedlicher asymmetrischer Polygongrundrisse untersuchen, während in der Gruppe wieder der Einfluss der Gebäudehöhe - auch im Vergleich zu Gruppe 3 und 5 - betrachtet werden kann.

6.1.7 Formengruppe 7

					
Reihe 7:	Nr. 60	Nr. 61	Nr. 62	Nr. 63	Nr. 64
Untersuchung:	Gebaute Solararchitektur				

Gruppe 7 zeigt die vereinfachten Primärformen gebauter Solararchitektur, wie sie beispielsweise in *Abbildung 3.6* zu sehen ist. Es handelt sich um ein Nurdachhaus (Prisma), eine geneigte Schrägfassade, ein Parabeltonne, eine geneigte Tonne, sowie einen Halbkegelstumpf. Ihre jeweilige energetische Performance kann insbesondere gegenüber der Gruppe der Quader aber auch der Pyramiden untersucht werden.

Zu allen Formen werden in *Anhang A* neben der zusätzlichen grafischen Darstellung der jeweiligen Grundrisse genaue Angaben zu geometrischen Parametern wie Größe der Grundfläche G , der Oberfläche O , der Gebäudehöhe H , aber auch beispielsweise dem A/V-Verhältnis angegeben. Auch wird die prozentuale Aufteilung der einzelnen Teiloberflächen nach bestimmten Neigungswinkeln berechnet.

6.1.8 Grundvolumina

Die vorgestellten 64 Formen wurden zunächst aus dem konstanten Volumen von 1.000 m³ konstruiert. Dieses Bauvolumen entspricht etwa einem Gebäude aus der Gruppe der Einfamilienhäuser oder Doppelhäuser.

Um den gesamten Baubestand abbilden zu können, werden drei weitere Grundvolumina von 5.000 m³, 10.000 m³ und 50.000 m³ eingeführt, um auch Reihenhäuser, Mehrfamilienhäuser, Hochhäuser und andere Großformen realitätsnah darstellen zu können (s. *Tabelle 6.1*).



Größe:	1.000 m ³	5.000 m ³	10.000 m ³	50.000 m ³
Gebäudeart ²⁸ :	EFH, DH	DH, RH, MFH	RH, MFH, HH, GF	MFH, HH, GF

Tabelle 6.1: Die vier gewählten Grundvolumina mit den von ihnen repräsentierte typischen Gebäudearten

(Grafik: eigene)

Die energetischen Berechnungen thermischer Verluste und solarer Gewinne über die Gebäudehülle werden jedoch nur für die aus 1.000 m³ erzeugten Formen aufwendig berechnet. Die Ergebnisse für die drei größeren Volumina können über Faktoren der zentrischen Streckung direkt von diesen abgeleitet werden.

6.2 Ermittlung repräsentativer Standorte

Zur Berechnung der jeweiligen Energiebilanzen der oben vorgestellten Formen sind drei standortspezifische Faktoren relevant.

Zur Berechnung thermischer Verluste:

- die *Lufttemperatur* (diese beeinflusst maßgeblich den Heiz- und Kühlenergiebedarf und ist abhängig von der *Klimazone*, in welcher sich der Standort befindet)

Zur Berechnung solarer Gewinne:

- die *Einstrahlungsgeometrie* (Elevation und Azimut der Sonnenposition, welche aufgrund astronomischer Zusammenhänge ausschließlich vom *Breitengrad* des Standortes abhängen)

²⁸ EFH = Einfamilienhaus; DH = Doppelhaus; RH = Reihenhause; MFH = Mehrfamilienhaus; HH = Hochhaus; GF = Grossform

- sowie der *Zustand der Atmosphäre* (mit Witterungsparametern wie beispielsweise Wolkenbildung, welche die Strahlungsquantität und –qualität durch Absorptions-, Reflexions- und Streuvorgänge beim Atmosphärendurchgang beeinflussen und wiederum abhängig von der *Klimazone* sind).

Daraus folgt, dass die Berechnung der Energiebilanzen von Gebäudehüllen ausschließlich standortbezogen durchgeführt werden kann.

Um Berechnungen zur Energiebilanzierung an verschiedenen Standorten durchführen zu können und um später aus den unterschiedlichen Ergebnissen auf standortspezifische Eigenschaften rückfolgern zu können, müssen diese Standorte nach bestimmten Auswahlkriterien festgelegt werden.

Die Wahl repräsentativer Standorte erfolgt daher nicht beliebig, sondern richtet sich nach den o.g. Einflussfaktoren:

- Breitengrad
- Klimazone.

Die Unterteilung des Globus in 180 Breitengrade vom Nord- bis zum Südpol wird als bekannt vorausgesetzt. Zum besseren Verständnis der klimatischen Randbedingungen folgt eine kurze Einführung in die Klimatologie sowie die Herleitung der für die Auswahl repräsentativer Standorte im Rahmen dieser Forschungsarbeit notwendigen Festsetzungen.

6.2.1 Kurzeinführung in die Klimatologie

Das Klima beschreibt den durchschnittlichen Zustand der Atmosphäre an einem Ort als Gesamtheit aller möglichen Wetterzustände. Es beinhaltet alle meteorologischen Werte in ihrer typischen tages- und jahreszeitlichen Schwankung.

Das Klima wird beeinflusst durch:

- Prozesse innerhalb der Atmosphäre
- Wechselbeziehungen der Sphären (Atmosphäre, Lithosphäre, Pedosphäre, Biosphäre, Hydrosphäre, Kryosphäre)
- Sonnenaktivität.

In der zeitlichen Dimension unterscheidet man:

- Wetter (Stunden bis Wochen)
- Witterung (Tage bis Wochen)
- Klima (statistisches Mittel aus 30 Jahren).

Je kürzer der Referenzzeitraum, desto schwieriger wird die Beurteilung der Schwankungen meteorologischer Parameter mittels statistischer Methoden im Hinblick auf Extremereignisse. Andererseits unterschlagen Mittelwerte aus sehr langen Messzeiträumen kurzfristige Trends.

Die WMO²⁹ hat im Hinblick auf die Problematik der Referenzzeiträume daher sog. Klimanormalperioden festgelegt, welche grundsätzlich einen Referenzzeitraum von 30 Jahren umfassen. Es handelt sich um abgeschlossene (1931-1961; 1961-1990), die gegenwärtige (1991-2020) und zukünftige (2021-2050) Klimanormalperioden.

In der räumlichen Dimension unterscheidet man:

- Mikroklima (einige Meter bis wenige Kilometer; Einzelklima z.B. Straßenzug)
- Mesoklima (einige hundert Kilometer; Lokalklima, z.B. Stadtklima)
- Makroklima (mehr als 500 Kilometer; Großklima, z.B. kontinentale und globale Zusammenhänge)

Als Klimaelemente bezeichnet man die messbaren Eigenschaften des Klimasystems, also alle meteorologische Größen. Die Erdatmosphäre ist ein chaotisches System, in welchem bestimmte Einflüsse zu negativen oder positiven Rückkopplungen führen können.

Der energetische Antrieb des Klimas ist hauptsächlich die Solarstrahlung, in geringen Teilen jedoch auch die Erdwärme in Form von Vulkanismus sowie seltene Großereignisse wie Meteoriteneinschläge. Veränderungen der Sonnenaktivität³⁰ sowie die Milankovitch-Zyklen³¹ sind ebenfalls externe Verursacher von Klimaveränderungen. Klimazonen sind Gebiete gleicher klimatischer Bedingungen. Im Allgemeinen unterscheidet man maritimes und kontinentales Klima, es gibt jedoch deutlich feinere Klimaklassifikationen.

Man unterscheidet effektive und genetische Klimaklassifizierung:

- Bei der *genetischen Klimaklassifikation*³² bilden die globalen Windzirkulationssysteme³³ das Hauptkriterium für die Zuordnung eines Ortes zu einer bestimmten Klimazone. Die Entstehung³⁴ des Klimas steht im Vordergrund, wobei vereinfachend angenommen wird, dass das Klima eines Ortes hauptsächlich durch das System der globalen Windzirkulation erzeugt wird. Zunächst wird der zu untersuchende Kontinent abweichend von seiner realen Form als zusammenhängende Landmasse angenommen, welche entlang jedes Breitengrades ge-

²⁹ World Meteorological Organisation

³⁰ Die Sonnenaktivität kann anhand der Anzahl und Größe der Sonnenflecken beobachtet werden. Sonnenflecken entstehen durch Störungen im solaren Magnetfeld und sind als dunkle Bereiche auf der Photosphäre sichtbar. Die Periodizität ihrer Häufigkeit beschreibt der 11-jährige Schwabe-Zyklus.

³¹ nach Milutin Milancovic (1879-1958). Zeitvariantes Muster zur langperiodischen Variation der sogenannten Solarkonstanten in der Größenordnung von circa 5 bis 10 Prozent. Als planetare Ursache für diese Schwankungen der Intensität der Sonneneinstrahlung auf der Erde gelten drei sich überlagernde Effekte: die Präzession der Erdrotationsachse („trudelnder Kreisel“) mit einem Zyklus von 25.700 Jahren, die Erdschiefe (Veränderung des Neigungswinkels der Erdachse) mit einem Zyklus von 41.000 Jahren und die Änderung der Exzentrizität (Variation des Radius der Erdumlaufbahn um die Sonne mit einem Zyklus von 100.000 Jahren)

³² nach Flohn sowie Terjung/Louie

³³ Diese vier globalen Zirkulationssysteme sind: Äquatoriale Westwindzone mit innertropischen Konvergenzen, subtropische Trocken- und Passatzone, außertropische Westwindzone, hochpolare Ostwindzone

³⁴ Genese

nauso breit ist, wie der reale Landanteil auf diesem Breitenkreis. So erhält man einen hypothetischen Idealkontinent in Form einer sog. *Klimarübe*. Auf dieser werden die Klimazonen in Anlehnung an die globalen Windsystem-Gürtel abgetragen.

- Bei der *effektiven Klimaklassifizierung*³⁵ wird nicht die Genese der Klimate, sondern deren Erscheinungen betrachtet, basierend auf der Annahme, dass gleiche Vegetationsformen nur unter gleichen klimatischen Bedingungen wachsen. Es handelt sich somit um eine beschreibende Klimaklassifikation, die auf Schwellenwerten für Temperatur und Niederschläge sowie ihrer jahreszeitlichen Verteilung basiert. Die gewählten Schwellenwerte sind daher nicht willkürlich gewählt, sondern berücksichtigen die Auswirkungen auf die Vegetation.

Für diese Arbeit wurde die Effektive Klimaklassifikation nach Köppen³⁶ gewählt, da sie auch international am häufigsten verwendet wird und zudem nur wenige meteorologische Messdaten zur Klassifikation mittels Klimaformel benötigt werden.

6.2.2 Effektive Klimaklassifizierung nach Köppen

Das System Köppens definiert fünf übergeordnete *Klimazonen* sowie diverse *Klimatypen* und *-untertypen*. Es basiert ausschließlich auf den zwei wichtigsten meteorologischen Faktoren:

- den jährlichen und monatlichen Durchschnittstemperaturen sowie
- den Niederschlagsmengen und deren jahreszeitlichem Verteilungsmuster.

Jeder *Klimatyp* wird mit einer Klimaformel als einer Kombination aus zwei oder drei Buchstaben beschrieben.

Die *Klimazonen* sind durch Großbuchstaben von A bis E gekennzeichnet (s. *Tabelle 6.2*):

A	Tropisches Regenklimate (humid - ohne kalte Jahreszeit)	Alle Monatsmitteltemperaturen über 18°C
B	Trockenklimate (arid)	Niederschläge unterhalb der Trockengrenze
C	Warm-gemäßigtes Klimate (warm-humid)	Kältestes Monatsmittel zwischen -3 und 18°C
D	Boreales Schnee-Wald-Klimate (kalt-humid)	Kältestes Monatsmittel unter -3°C, wärmstes über 10°C
E	Polar- und Schneeklimate (humid, ohne warme Jahreszeit)	Wärmstes Monatsmittel unter 10°C

Tabelle 6.2: Klassifizierung der fünf übergeordneten Klimazonen anhand typischer Verteilung monatsmittlerer Lufttemperaturen

(Quelle: Heyer (1984), S. 169)

³⁵ nach Köppen/Geiger, Koeppen/De Long sowie Troll/Pfaffen

³⁶ Wladimir Köppen (1846-1940)

Die übergeordneten *Klimazonen* A, C, D und E unterscheiden sich durch die Einhaltung unterschiedlicher Temperaturgrenzen, die Zone B wird durch Unterschreitung der Trockengrenze definiert, welche sich aus der Kombination jährlicher Niederschlagsmengen und Lufttemperaturen berechnet. Der zweite Buchstabe der Klimaformel bezeichnet den *Klimatyp* anhand seines Niederschlagsmusters (s. *Tabelle 6.3*).

f	Feucht	Alle Monate sind feucht
s	Sommertrocken	Regenreichster Wintermonat hat mind. dreimal soviel Niederschlag wie der regenärmste im Sommer
w	Wintertrocken	Regenreichster Sommermonat hat mind. zehnmal soviel Niederschlag wie der regenärmste im
m	Monsun	Trockenzeit nur kurz und nicht effektiv
S	Steppe	Arid, aber Niederschlag größer als Trockengrenze
W	Wüste	Arid, Niederschlag unterhalb Trockengrenze

Tabelle 6.3: Klassifizierung des Klimatyps anhand der jährlichen Niederschlagsmenge und –verteilung

(Quelle: Heyer (1984), S. 170)

Ein dritter Buchstabe bezeichnet den *Klimauntertyp* anhand der genaueren Betrachtung von Sommerwärme und Winterkälte (s. *Tabelle 6.4*).

a	Heiße Sommer	Wärmster Monat über 22°C und mind. 4 Monate wärmer als 10°C
b	Warme Sommer	Alle Monate unter 22°C, aber mind. 4 Monate über 10°C
c	Kalte Sommer	1-3 Monate wärmer als 10°C, kältester Monat wärmer als -38°C
d	Sehr kalte Winter, kontinental	1-3 Monate wärmer als 10°C, kältester Monat kälter als -38°C
h	Heiß-arid	Jahresmitteltemperatur über 18°C
k	Kalt-arid	Jahresmitteltemperatur unter 18°C
T	Polar Tundra	Wärmster Monat über 0°C
F	Polar Frost	Wärmster Monat unter 0°C

Tabelle 6.4: Klassifizierung des Klimauntertyps anhand der Einordnung von Sommerwärme und Winterkälte

(Quelle: Heyer (1984), S. 171)

Bei der *Effektiven Klimaklassifizierung* nach Köppen ergeben sich somit insgesamt 31 mögliche Kombinationen (s. *Tabelle 6.5*).

Klimazone	A	B	C	D	E
Klimatyp (nach Niederschlag)	f, s, w, m	S, W	f, s, w	f, s, w	
Klimauntertyp (nach Temperatur)		h, k	a, b, c, d	a, b, c, d	T, F

Tabelle 6.5: Überblick der möglichen Kombinationen von übergeordneter Klimazone und niederschlagsabhängigem Klimatyp sowie temperaturabhängigen Klimauntertyp

(Quelle: Heyer (1984), eigene Zusammenstellung)

6.2.3 Einführung temperaturrelevanter Klimazonen

Diese Vielzahl kleinteilig differenzierter Klimate wird für die energetische Hüllenbilanzierung reduziert. Da nicht das Niederschlagsmuster, sondern ausschließlich der Temperaturverlauf Einfluss auf Transmissionswärmeverluste hat, gehen in die vereinfachte Klimaformel nur Klimazone und Klimauntertyp ein. Es verbleiben somit 12 temperaturrelevante Klimate, welche der Gebäudehülle jeweils eine spezifische thermische Last aufprägen³⁷ (s. Tabelle 6.6).

Temp.relevante Klimazone	Bezeichnung mit Beschreibung	Vertretene Untergruppen	Therm. Fingerabdruck HGT / KGT	
A	Tropisch – Savanne, Regenwald	Af, As, Aw, Am	19	2.400
Bh	Heißes Wüsten- und Steppenklima	BSh, BWh	518	2.199
Bk	Kaltes Wüsten- und Steppenklima	BSk, BWk	3.760	446
Ca	Subtropisch – mediterran	Cfa, Csa, Cwa	1.409	857
Cb	Gemäßigt – warme Sommer	Cfb, Csb, Cwb	2.617	230
Cc	Gemäßigt – kalte Sommer	Cfc, Csc, Cwc	4.346	8
Da	Kontinental – warme Sommer	Dfa, Dsa, Dwa	4.656	365
Db	Kontinental – kühle Sommer	Dfb, Dsb, Dwb	5.663	130
Dc	Subpolar – kalte Sommer	Dfc, Dsc, Dwc	8.645	24
Dd	Subpolar – sehr kalte Winter	Dfd, Dsd, Dwd	11.996	24
ET	Polar - Tundra	ET	10.800	3
EF	Polar - Eisdecke	EF	19.410	0

Tabelle 6.6: Auflistung der für diese Arbeit gewählten 12 temperaturrelevanten Klimazonen und ihres jeweiligen thermischen Fingerabdruckes

(Quelle: Rullán Lemke / Stein (2008))

³⁷ Die Gruppe der 12 temperaturrelevanten Klimazonen wurde in folgenden Veröffentlichungen eingeführt und zur Berechnungen energetischer Bilanzen genutzt: [vgl. Stein, Rullán Lemke (2007); Rullán Lemke, Stein (2008)]

Die temperaturrelevanten Klimazonen geben in Abhängigkeit der Abweichung der Außenlufttemperatur von einer angestrebten Innenraumtemperatur³⁸ typische Heiz- und Kühlenergiebedarfe vor. Dieser Energiebedarf wird in Jahressummen für Heiz- und Kühlgradtage³⁹ angegeben und wird im Folgenden als *thermischer Fingerabdruck* eines Ortes bezeichnet.

Um die oben definierten 12 temperaturrelevanten Klimazonen auf dem Globus zu lokalisieren, wird die *Köppensche Klimaformel* auf global vorliegende Messdaten zu Lufttemperatur und Niederschlägen angewendet.

Als Datenbasis werden hierzu aus einer Vielzahl vorliegender Messreihen unterschiedlicher Institutionen die Satellitenmessungen der NASA⁴⁰ gewählt. Gegenüber den anderen auf Bodenstationsmessungen beruhenden Datenquellen bieten sie den großen Vorteil einer weltweit einheitlichen und präzisen Erfassung aller relevanten meteorologischen Größen in einer sehr hohen Auflösung von 180 Breitengraden x 360 Längengraden – also insgesamt 64.800 einzelnen Koordinatengitternetzfeldern.

Da die Satellitenmessungen sowohl Land- als auch Wasserflächen betreffen, müssen zunächst die Wasserflächen mittels einer Land-Wasser-Maske neutralisiert werden (s. Abbildung 6.2). Hierzu berechnet ein selbst geschriebenes Programm für jeden der 64.800 Kartenpunkte die Zugehörigkeit zur Land- oder Wassermasse.

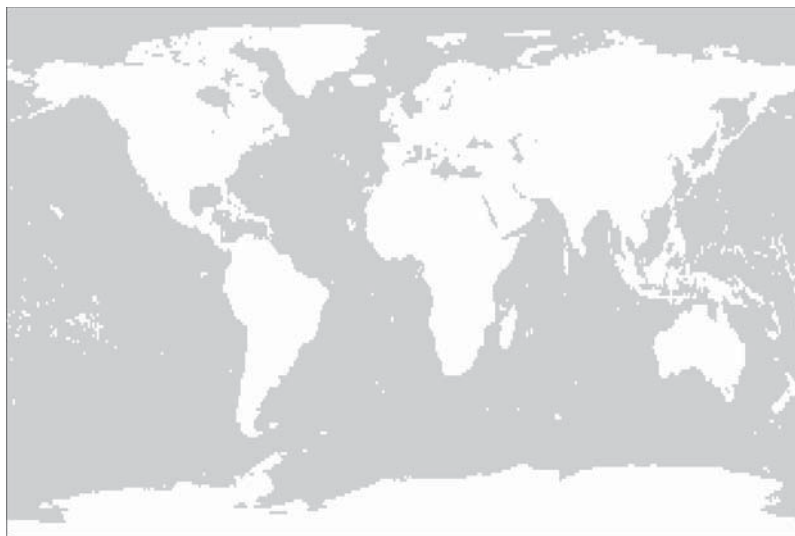


Abbildung 6.2: Globale Land-Sea-Mask

(Grafik: eigene; Datenbasis: Climate Research Unit (<http://www.cru.uea.ac.uk/>))

³⁸ Der Wert der angestrebten Innenraumtemperatur ist international nicht einheitlich festgelegt. Eine Zieltemperatur von 18°C ist jedoch üblich und auch Grundlage der in dieser Arbeit verwendeten Datenbasis der NASA.

³⁹ HGT=Heizgradtag, KGT=Kühlgradtag. Dabei kann ein Heizgradtag abbilden, dass z.B. die Lufttemperatur 24 Stunden lang 1° unter der Zieltemperatur lag oder aber eine Stunde lang 24°C darunter. Die für jeden Klimatyp identifizierten charakteristischen Heiz- und Kühlgradtage wurden über eine globale Mittelwertbildung aus für alle 64.800 Weltkoordinatenfelder vorliegenden Satellitenmessdaten der NASA berechnet.

⁴⁰ NASA (2006). Mehr Informationen zur Satellitenmeteorologie folgen in Kapitel 5.

In einem zweiten Schritt berechnet das Programm basierend auf der Köppenschen Klimaformel aus allen vorliegenden Satellitenmesswerten zu Lufttemperatur und Niederschlag für jeden Punkt der Landmasse den entsprechenden Klimatyp und legt das betreffende Koordinatengitternetzfeld farbig an. Zusammen mit der Markierung von Breitengradgürteln in 10° Abständen ergibt sich folgende Weltkarte zur Verteilung der Klimate (s. *Abbildung 4.3*).

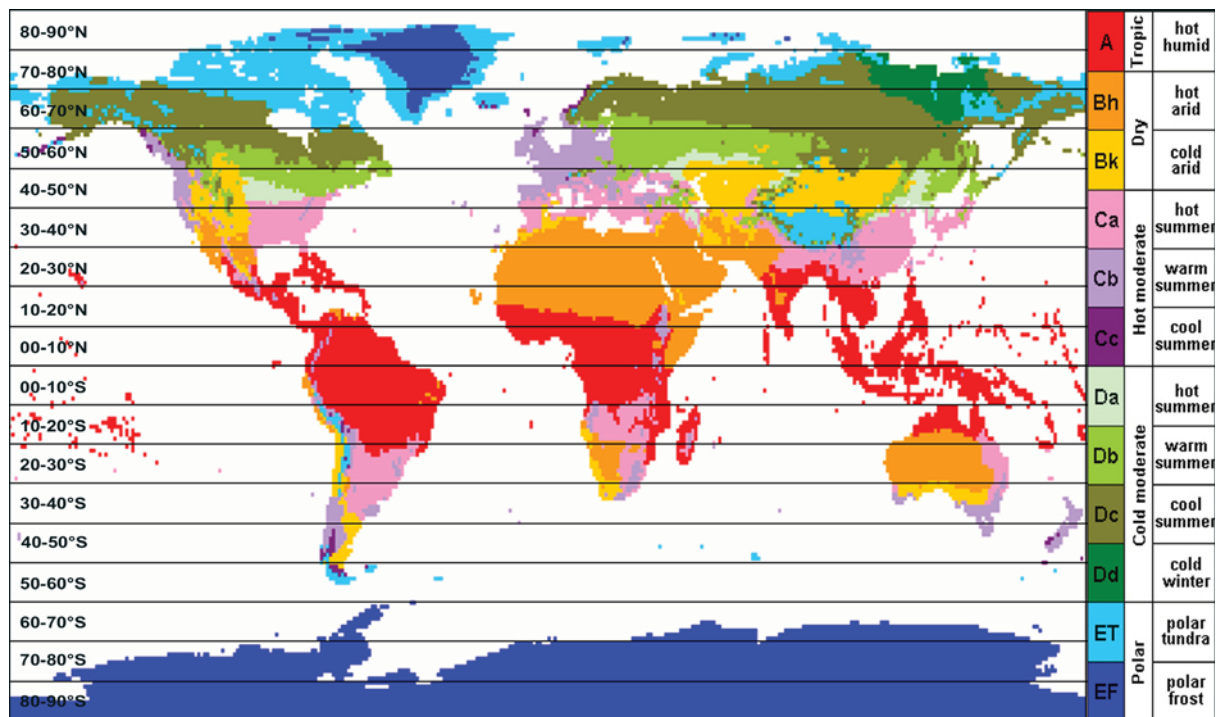


Abbildung 4.3: Globale Klimakarte der 12 temperaturrelevanten Klimazonen bestehend aus 64.800 graphisch interpretierten einzelnen Datenpunkten mit Einordnung nach Breitengradgürteln

(Grafik: eigene; Berechnungen: eigene; Datenquelle: NASA (2006))

Beim Betrachten der Grafik wird deutlich, dass sich für die Lokalisierung der Klimazonen auf der nördlichen und südlichen Hemisphäre eine Spiegelung am Äquator ergibt. Allerdings verfügt die Südhalbkugel über keine D-Klimate, da ihr die Landmassen in den entsprechenden Breitengradzonen fehlen. Die Nordhalbkugel hingegen verfügt über alle Kombinationen aus Breitengradgürteln und Klimazonen, die auch auf der Südhalbkugel vorkommen, so dass die Südhalbkugel vollständig von der Nordhalbkugel repräsentiert werden könnte. Da zudem über 87%⁴¹ der Weltbevölkerung auf der Nordhalbkugel leben, wird im Folgenden die Suche nach repräsentativen Standorten auf die Nordhalbkugel reduziert.

Für die nördliche Hemisphäre werden nun für jeden Breitengradstreifen die vorkommenden Klimate ermittelt (s. *Tabelle 4.7*).

⁴¹ Eigene Berechnung basierend auf den Bevölkerungsdaten von Helders (2005)

	Breitengrad-Klimazonen-Kombinationen der Nordhalbkugel											
	EF	ET	Dd	Dc	Db	Da	Cc	Cb	Ca	Bk	Bh	A
80 - 90°N	(1)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
70 - 80°N	-	(2)	(3)	(4)	-	-	-	-	-	-	-	-
60 - 70°N	-	(5)	(6)	(7)	(8)	-	(9)	(10)	-	-	-	-
50 - 60°N	-	(11)	-	(12)	(13)	(14)	-	(15)	-	-	-	-
40 - 50°N	-	-	-	(16)	(17)	(18)	-	(19)	(20)	(21)	-	-
30 - 40°N	-	(22)	-	(23)	(24)	(25)	-	(26)	(27)	(28)	(29)	-
20 - 30°N	-	(30)	-	-	-	-	-	(31)	(32)	(33)	(34)	(35)
10 - 20°N	-	-	-	-	-	-	-	(36)	(37)	-	(38)	(39)
00 - 10°N	-	-	-	-	-	-	-	(40)	-	-	(41)	(42)

Tabelle 6.7: Matrix der 42 globalen Kombinationen von Breitengradgürteln und temperaturrelevanten Klimazonen auf der Nordhalbkugel

(Quelle: eigene; Datenbasis: NASA (2006))

Nachdem die 42 real vorkommenden Kombinationen aus Breitengrad und Klimazone ermittelt sind, stellt sich die Frage, welche Städte quasi als Platzhalter die entsprechenden Felder repräsentieren könnten. Jedes dieser Felder stellt unterschiedliche Anforderungen an die Gebäudeform, da es bedingt durch das Klima und den Breitengrad ein eigenes Profil aus Heiz- und Kühlgradtagen sowie solarem Strahlungsangebot aufweist. Um die thermischen Verluste und solaren Gewinne für die 64 Formen unter diesen Bedingungen zu berechnen, bedarf es jedoch konkreter Standorte mit bekannten Klima- und Strahlungsdaten.

Es sollen somit möglichst bekannte, also große Städte, mit entsprechendem Profil für die 42 Felder gesucht werden. Daraus resultiert die Notwendigkeit der zusätzlichen Einbindung einer demographischen Datenbank.

Eine weitere Frage mit demographischem Bezug ist die Gewichtung der einzelnen repräsentativen Standorte, um die späteren Rechenergebnisse der einzelnen Felder untereinander in ihrer Bedeutung vergleichbar zu machen. Dies soll an folgendem Beispiel erläutert werden:

Für die Städte der Felder 1 bis 8 gilt aufgrund ihrer Zugehörigkeit zu den Extremklimaten E und D eine hohe thermische Last bei gleichzeitig nur geringem solarem Angebot, aufgrund der hohen Breitengradlage. Feld 30 hingegen hat zwar ebenfalls eine hohe thermische Last, verfügt jedoch aufgrund des günstigeren Breitengrades über bessere Einstrahlungsgeometrien und damit über ein größeres solares Angebot. Die Felder 26 bis 42 hingegen haben nur eine geringe thermische Last bei einem gleichzeitig maximalen solaren Angebot aufgrund ihrer Äquatornähe. Es ist daher sehr wahrscheinlich, dass viele der in Abschnitt 6.1 entwi-

ckelten 64 Formen hier eine positive Energiebilanz aus thermischen Verlusten gegenüber solaren Gewinnen aufweisen werden – ganz anders als für die Felder 1 bis 8 zu erwarten ist. Zur vergleichenden Beurteilung der globalen Ergebnisse ist jedoch die demographische Gewichtung der einzelnen Felder zu berücksichtigen. Jedem der 42 Felder muss daher eine Bevölkerungszahl zugeordnet werden, welche beschreibt, wie viele Menschen unter diesen klimatischen und breitengradspezifischen Randbedingungen leben und durch eine Stadt (s. Tabelle 6.9) als konkretem Standort in diesem Feld repräsentiert werden. Erst durch eine derartige Bevölkerungsgewichtung kann beispielsweise die Bedeutung des zu erwartenden schlechten Ergebnisses der Felder 1 bis 8 in Relation zum globalen Gesamtergebnis abgeschätzt werden.

Zur Ermittlung der repräsentativen Standorte müssen daher die bisher vorgenommen Klassifizierungen mit einer demographischen Datenbank gekoppelt werden. Dazu reicht es jedoch nicht aus, die Bevölkerung einzelner Ländern zu kennen, da die Bevölkerung innerhalb eines Landes nicht homogen verteilt ist und sich viele Länder zudem über mehrere Klimazonen und Breitengradgürtel erstrecken. Es wird somit eine exakte Bevölkerungsverteilung in gleicher koordinatengenaue Auflösung wie die ermittelten Klimazonen benötigt, um diese Informationen miteinander zu verknüpfen. Zum besseren Verständnis der weiteren Vorgehensweise folgt eine Kurzeinführung in die Demographie.

6.2.4 Kurzeinführung in die Demographie

Die Demographie erfasst die menschliche Bevölkerung zahlenmäßig und in ihrer räumlichen Verteilung, meist gruppiert nach Staaten oder Kontinenten, summiert zur Weltbevölkerung. Die angewendeten Methoden zur Datenerhebung sind Volkszählungen⁴² und laufend fortgeschriebene Statistiken aus Stichproben.

Der Begriff Bevölkerung bezeichnet eine menschliche Population innerhalb bestimmter geographischer Grenzen, deren räumliche Verteilung die Bevölkerungsgeographie als Teilgebiet der Humangeographie untersucht. Als Bevölkerung wird demnach die Summe der Einwohner in einem genau festgelegten Gebiet zu einem bestimmten Zeitpunkt bezeichnet. Dabei können folgende Probleme zu Ungenauigkeiten der Angaben führen:

- Naturkatastrophen, Bürgerkriege, Völkermord und Flüchtlingsströme können Volkszählungen und eine kontinuierliche und einheitliche Bevölkerungserfassung über mehrere Jahre verhindern.

⁴² Bei der klassischen Volkszählung wird nicht nur eine repräsentative Stichprobe, sondern die gesamte Bevölkerung direkt befragt (Totalerhebung=Makrozensus). Die ermittelten Daten werden durch den jährlichen Mikrozensus (Repräsentativbefragungen=Rollierender Zensus) fortgeschrieben. Die Stichprobengröße hierfür liegt bei 1%. Mit den Jahren steigt die resultierende Fehlerquote, so dass in größeren Abständen die Volkszählung wiederholt werden muss. Beim Registerzensus wird auf Daten der Melderegister zurückgegriffen und so die Befragung umgangen. Es gibt auch registergestützte Zählungen, die mit Stichproben ergänzt werden. Genaue Bevölkerungsdaten werden als Grundlage für politisches Handeln, Infrastrukturplanungen und Steuerschätzungen benötigt.

- Bei Stammesrivalitäten oder gekoppelter Verteilung von Parlamentssitzen werden bestimmte Bevölkerungsgruppen systematisch vergrößert oder verkleinert.
- Manche Entwicklungsländer erhöhen ihre Bevölkerungszahl, damit das jeweilige Pro-Kopf-Einkommen sinkt, um höheren Wirtschaftshilfen zu erhalten.
- Einige Naturvölker entziehen sich bewusst oder unwissentlich der Erfassung.
- In Entwicklungsländern gibt es Probleme mit der Bevölkerungsfortschreibung aufgrund der Untererfassung von Sterbefällen, da meist die Geburt aber selten der Tod eines Kindes erfasst wird.
- Lange Auslandsaufenthalte sind statistisch schwer einzuordnen.
- Bei fehlender Meldepflicht kann es selbst in Industriestaaten zu Unsicherheiten kommen, Sozialversicherungsnummer und Wahlregister sind nur Indikatoren.

Angaben zur aktuellen Weltbevölkerung findet man im *World Population Prospect*⁴³ der United Nations. Für jeden Staat ist hier die aktuelle Bevölkerungszahl angegeben, welche auf Basis früher Zählungen und entsprechenden Fortschreibungen berechnet wird. Dazu werden für jedes Land entsprechend seiner spezifischen wirtschaftlichen und politischen Umstände bestimmte Annahmen zu Fertilität, Frauenanteil der Bevölkerung, Altersstruktur, Lebenserwartung, Säuglingssterblichkeit und Migrationsverhalten getroffen. Die Bevölkerungsentwicklung ergibt sich aus der Differenz zwischen Geburten- und Sterberate in Bezug auf die bekannte Population der letzten Zählung. Die Geburtenrate wird dabei hauptsächlich von der Anzahl der Frauen, ihrer Altersstruktur und Fertilität, Gesundheit und kulturellen Prägung sowie dem Bildungs- bzw. Entwicklungsniveau beeinflusst. Die Sterberate wird durch die bestehende Altersstruktur, die Säuglings- und Kindersterblichkeit, die durchschnittliche Lebenserwartung basierend auf dem medizinischen Entwicklungsstand sowie Seuchen oder Krieg beeinflusst. Die Berechnungen werden durch nationale und internationale Migrationsströme erschwert. Insgesamt gelten die Angaben jedoch als sehr präzise.

Allerdings enthält der *World Population Prospect* nur Angaben zur aktuellen Bevölkerung einzelner Staaten, jedoch nicht zu ihrer geographischen Verteilung. Die Bevölkerungsdichte ist jedoch keinesfalls als homogen anzunehmen, sondern kann regional sehr unterschiedlich sein und zwischen 16.000 EW/km² in Monaco und 2 EW/km² in der Mongolei schwanken.

6.2.5 Vorgehen zur Ermittlung der Bevölkerungsgewichtung

Um die Weltbevölkerung koordinatengenau zu lokalisieren werden für diese Arbeit die Angaben des *World Populations Prospects* mit denen des *World Gazetteers*⁴⁴ verknüpft.

Der *World Gazetteer* beinhaltet eine weltweite Liste menschlicher Ansiedlungen mit aktuellen Bevölkerungszahlen sortiert nach Breitengrad vom Nordpol bis zum Südpol. Jeder Ortschaft sind neben ihrer Länderzugehörigkeit auch die Einwohnerzahl der letzten Erhebung und die

⁴³ UN (2006)

⁴⁴ Helders (2005)

exakten Geo-Koordinaten hinterlegt. Diese für die vorliegende Arbeit wichtige Verknüpfung von Geokoordinaten und Einwohnerzahl bietet keine der anderen Bevölkerungslisten⁴⁵.

Weltweit sind 315.715 geografische Objekte mit Einwohnerzahl im *World Gazetteer* namentlich und geografisch erfasst. Dabei sind selbst sehr kleine Einheiten erfasst, sofern sie namentlich bekannt sind. Für Indien beispielsweise mit einer Gesamtbevölkerung im Jahr 2009 von 1.169.733.970 Menschen zählt die kleinste erhobene Einheit 22 Einwohner. Nur noch kleinere Orte sind nicht erfasst. Für Deutschland beträgt die kleinste erhobene Einheit 4 Einwohner. Für viele Entwicklungsländer ist die räumliche Erfassung jedoch nicht so genau. Die Daten des *World Gazetteer* stammen zu 38% aus Volkszählungen und zu 62% aus Volksschätzungen. Das Erhebungsjahr schwankt zwischen 1984 und 2005 und liegt im Durchschnitt bei 2000.

Addiert man die gesamte im *World Gazetteer* mit Geo-Koordinaten erfasste Bevölkerung und vergleicht die Summe mit den Angaben des *World Population Prospect*, stellt man jedoch fest, dass ein gewisser Teil der Weltbevölkerung nicht in der Städteliste erfasst ist. Hierbei handelt es sich zumeist um ländliche Bevölkerung, Slumbewohner oder nomadisierende Stämme, die nicht an einem bestimmten, namentlich bekannten Ort leben. Zum Teil beruht der Fehler auch auf der seit der letzten Erhebung stattgefundenen Bevölkerungsentwicklung insbesondere in den Schwellen- und Entwicklungsländern.

Um auch den nicht in der Städteliste erfassten Teil der Bevölkerung geographisch zuordnen zu können, werden für diese Arbeit die Angaben des *World Gazetteers* mit denen des *World Population Prospect* verknüpft. Der *World Population Prospect* gibt für jedes Land die Gesamtbevölkerung an. Aus der Differenz zur tatsächlich mit Geokoordinaten erfassten Bevölkerung des *World Gazetteers* ergibt sich somit ein länderspezifischer Interpolationsfaktor.

⁴⁵ CIA – *The World Fact Book* (<https://www.cia.gov/library/publications/the-world-factbook/index.html>); detaillierte länderbezogene Angaben, keine Einzelstädte (Quelle: CIA-Central Intelligence Agency)
City Population (www.citypopulation.de) nur Gesamtbevölkerung von Ländern sowie der größten Ballungstädteliste (Quelle: Privatperson)
Population Statistics (<http://www.populstat.info/>) länderbezogene Gesamtbevölkerung in Jahresschritten (historisch + Prognosen), nur wenige Hauptstädte erfasst (Quelle Privatperson)
Statistical Agencies (http://www.census.gov/main/www/stat_int.html) länderbezogenen Gesamtbevölkerung, keine Städte (Quelle: U.S. Census Bureau)
Geonet Names Server (http://earth-info.nga.mil/gns/html/cntry_files.html) präzise Geo-Koordinaten für alle Orte ohne Einwohnerzahl, ländersortiert (ohne USA) (Quelle: US-Militär, National Geospatial-Intelligence Agency)
International Data Base (IDB) (<http://www.census.gov/ipc/www/idb/>) statistische Daten zur demografischen Entwicklung nach Ländern, ohne Städte (Quelle: U.S. Census Bureau)
Nation Master (<http://www.nationmaster.com/index.php>) Zusammenstellung und grafische Aufarbeitung der Daten von UN, OECD und CIA-Factbook nach Ländern, ohne Städte (Quelle: Rapid Intelligence, Australien)
Population Datafinder (<http://www.prb.org/>) verschiedene demografische Daten, auch länderbezogen, keine Städte (Quelle: PBR-Population Reference Bureau)
UN Statistic Division (UNSD) (<http://unstats.un.org/unsd/demographic/sconcerns/densurb/urban.aspx>) länderbezogene Bevölkerungsdaten sowie Städte mit mehr als 100.000 Einwohnern (Quelle: UN Data)
World Population Prospect. The 2006 Revision (<http://esa.un.org/unpp>), länderbezogene Angaben (Quelle: UN)
World Atlas (<http://www.worldatlas.com/city pops.htm>) jedoch nur größte Metropolen bzw. Landesbevölkerung, keine Einzelstädte als Karten (Quelle: GraphicMaps, Rom)

Dieser liegt für gut erfasste Länder wie Deutschland nahezu bei 1.0 für untererfasste Länder wie Afghanistan deutlich darüber. Mit Hilfe des jeweiligen Interpolationsfaktors wird nun die geografisch erfasste Bevölkerung jedes Landes um den nicht erfassten Teil ergänzt, so dass in Summe die Werte des *World Population Prospect* erreicht werden. Der hierdurch entstehende Fehler ist vermutlich gering, da die fehlende ländliche Bevölkerung häufig im nahen Umkreis größerer Städte angesiedelt ist. Auch Slumbewohner gehören zum nicht erfassten Bevölkerungsteil, sind aber geographisch den Koordinaten der erfassten Stadtbevölkerung zuzuordnen. Insgesamt spiegelt der Interpolationsfaktor somit nur den Effekt der weltweit zunehmenden Verstädterung wider.

So erhält man die aktuellen Bevölkerungszahlen des *World Population Prospects* in der räumlich präzisen Zuordnung über Geokoordinaten des *World Gazetteers*. Im letzten Schritt werden diese Daten nach Koordinatenzugehörigkeit sortiert und für alle 64.800 Koordinatenfelder die aktuellen Bevölkerungssummen ermittelt werden. Über die Koordinaten können die so ermittelten Bevölkerungszahlen - auch über Landesgrenzen hinweg - mit den Klimazonen und Breitengradgürteln aus *Tabelle 6.7* verknüpft werden, um so die Bevölkerungsgewichtung der einzelnen repräsentativen Standorte zu ermitteln (s. *Tabelle 6.8*).

	Anteil der Weltbevölkerung je Temperatur-Klimatyp und 10°-Breitengradbereiches in % (2007)												
	EF	ET	Dd	Dc	Db	Da	Cc	Cb	Ca	Bk	Bh	A	
80 - 90°	<0.1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	<0.1
70 - 80°	-	<0.1	<0.1	<0.1	-	-	-	-	-	-	-	-	<0.1
60 - 70°	-	<0.1	<0.1	0.2	<0.1	-	<0.1	<0.1	-	-	-	-	0.3
50 - 60°	-	<0.1	-	0.3	2.1	<0.1	-	3.0	-	-	-	-	5.4
40 - 50°	-	-	-	0.2	3.2	3.3	-	3.4	1.9	0.8	-	-	12.8
30 - 40°	-	<0.1	-	0.2	0.9	3.3	-	1.1	15.2	1.9	3.0	-	25.6
20 - 30°	-	<0.1	-	-	-	-	-	1.0	13.5	0.2	4.7	5.5	24.9
10 - 20°	-	-	-	-	-	-	-	1.2	0.8	-	3.0	11.9	16.9
00 - 10°	-	-	-	-	-	-	-	1.1	-	-	0.4	12.6	14.1
Summe	<0.1	0.1	<0.1	0.9	6.2	6.6	<0.1	10.8	31.4	2.9	11.1	30.0	100.0

Tabelle 6.8: Matrix der globalen Bevölkerungsverteilung nach Breitengradgürtel und Klimazone (inklusive gespiegelt integrierter Südhalbkugel)

(Quelle: eigene; Datenbasis: Helders (2005) und NASA (2006))

Beim Betrachten der Tabelle wird die obige Vermutung bestätigt, dass die extrem kalten E- und D-Klimate von der Menschheit gemieden werden. Warme Klimazonen wie das mediterrane Ca-Klima und das tropische A-Klima werden jedoch bevorzugt besiedelt. Hier wohnen mehr als 60% der Weltbevölkerung. Auch innerhalb der Wüsten zeigt sich die Tendenz, eher im heißen Bh-Klima als im kalten Bk-Klima zu siedeln.

Für die Breitengrade ergibt sich ebenfalls das Bild, dass Gebiete in Polnähe gemieden werden, während die größte Bevölkerungsansammlung im Bereich der Wendekreise liegt, wo das Strahlungsangebot aufgrund günstiger Einstrahlwinkel besonders hoch ist. In Äquatornähe, wo die thermische Belastung wieder zunimmt, geht die Bevölkerung jedoch wieder zurück.

Für die spätere Berechnung der energetischen Hüllbilanzen der 64 Formen ist somit festzuhalten, dass der Großteil der Weltbevölkerung in Zonen geringer thermischer Belastung bei gleichzeitig maximalem solarem Angebot lebt.

Im Folgenden wird mit Hilfe der durch Kopplung von Bevölkerungs- und Klimadaten erzeugten Tabelle für jedes Feld die größte Stadt ermittelt, welche denjenigen Teil der Weltbevölkerung repräsentiert, der unter diesen gleichen klimatischen und strahlungsgeometrischen Bedingungen lebt.

Die in der folgenden Weltkarte eingezeichneten repräsentativen Standorte (s. Abbildung 6.4) sowie die zugehörige Tabelle (s. Tabelle 6.9) sind im Anhang B ausführlicher bzw. farbig abgebildet.



Abbildung 6.4: Die festgelegten 42 repräsentativen Standorte als Vertreter aller global identifizierten Breitengrad-Klimazonen-Kombinationen

(Grafik: eigene; Berechnungen: eigene; Datenquellen: Helders (2005) und NASA (2006))

Nr.	Breite	Klima	Name	Gewichtung	Geo-Koordinaten	
1	80-90°N	EF	Station Nord	<0.1	81.36 N	-16.40 W
2	70-80°N	ET	Tiksi	<0.1	71.63 N	128.87 O
3		Dd	Saskylah	<0.1	71.92 N	114.08 O
4		Dc	Hammerfest	<0.1	70.68 N	23.71 O
5	60-70°N	ET	Nuuk	<0.1	64.18 N	-51.73 W
6		Dd	Jakutsk	<0.1	62.03 N	129.73 O
7		Dc	Reykjavik	0.2	64.14 N	-21.92 W
8		Db	Helsinki	<0.1	60.17 N	24.94 O
9		Cc	Bergen	<0.1	60.38 N	5.34 O
10		Cb	Kalvåg	<0.1	61.77 N	4.88 O
11	50-60°N	ET	Haines	<0.1	59.24 N	-135.45 W
12		Dc	Oslo	0.3	59.91 N	10.75 O
13		Db	Moskau	2.1	55.75 N	37.62 O
14		Da	Saratov	<0.1	51.57 N	46.03 O
15		Cb	Berlin	3.0	52.52 N	13.38 O
16	40-50°N	Dc	Hailar	0.2	49.23 N	119.71 O
17		Db	Toronto	3.2	43.65 N	-79.38 W
18		Da	Chicago	3.3	41.84 N	-87.68 W
19		Cb	Paris	3.4	48.86 N	2.34 O
20		Ca	Madrid	1.9	40.42 N	-3.71 W
21		Bk	Baotou	0.8	40.60 N	110.05 O
22	30-40°N	ET	Murgob	<0.1	38.16 N	73.94 O
23		Dc	Xining	0.2	36.62 N	101.77 O
24		Db	Grand Junction	0.9	39.09 N	-108.55 W
25		Da	Peking	3.3	39.93 N	116.40 O
26		Cb	Kabul	1.1	34.53 N	69.17 O
27		Ca	Schanghai	15.2	31.23 N	121.47 O
28		Bk	Damaskus	1.9	33.50 N	36.32 O
29		Bh	Kairo	3.0	30.06 N	31.25 O
30	20-30°N	ET	Lhasa	<0.1	29.65 N	91.10 O
31		Cb	Kathmandu	1.0	27.71 N	85.31 O
32		Ca	Delhi	13.5	28.67 N	77.21 O
33		Bk	León	0.2	21.12 N	-101.69 W
34		Bh	Dubai	4.7	25.27 N	55.33 O
35		A	Kalkutta	5.5	22.57 N	88.36 O
36	10-20°N	Cb	Mexiko	1.2	19.43 N	-99.14 W
37		Ca	Luang Prabang	0.8	19.89 N	102.14 O
38		Bh	Dakar	3.0	14.72 N	-17.48 W
39		A	Mumbai	11.9	18.96 N	72.82 O
40	0-10°N	Cb	Addis Abeba	1.1	9.03 N	38.74 O
41		Bh	Mogadischu	0.4	2.05 N	45.33 O
42		A	Singapore	12.6	1.30 N	103.85 O

Tabelle 6.9: Liste der 42 repräsentativen Städte mit Bevölkerungsgewichtung sowie Angaben zu Geo-Koordinaten für die Abfrage der meteorologischen NASA-Datensätze

(Quelle: eigene)

6.3 Erstellung der Parametermatrix

Zur Berechnung der Bilanz sind neben Angaben zum Standort und der Gebäudeform drei zusätzliche Vorgaben wichtig:

- Dämmstandard (repräsentiert durch den mittleren U-Wert)
- aus der Einstrahlung erzielbarer Gewinn (repräsentiert durch den solaren Wirkungsgrad des Gesamtsystems)
- Anteil der solar genutzten Oberfläche (repräsentiert durch den Belegungsgrad).

Für jeden dieser drei Parameter gilt, dass ihre typischen Werte sich im Lauf der Standzeit eines Gebäudes verändern können. Daher soll für jeden von ihnen ein bestimmtes Spektrum eröffnet werden, innerhalb dessen sich gegenwärtige und zukünftige Entwicklungen abbilden lassen.

6.3.1 Dämmstandard

In Anlehnung an Angaben zum Altbaubestand sowie durch Fortschreibung aktueller Tendenzen der thermischen Optimierung der Gebäudehülle werden folgende drei Stufen für die Berechnungen festgelegt (s. *Tabelle 6.10*):

Dämmstandard	U [W/m ² Ka]
Niedrig ⁴⁶	1.0
Mittel ⁴⁷	0.5
Hoch ⁴⁸	0.1

Tabelle 6.10: Festlegungen zu Dämmstandards als jeweils mittlerer thermische Qualität der Gebäudehülle

(Quelle: eigene)

6.3.2 Solarer Wirkungsgrad

Ähnlich wie beim Dämmstandard werden für eine flächig angenommene solare Technologie folgende drei Qualitätsstufen des Wirkungsgrades angenommen (s. *Tabelle 6.11*):

⁴⁶ Entspricht einer ungedämmten 36 cm starken Wand aus Mauerziegeln oder einer 75 cm starken Betonwand.

⁴⁷ In Anlehnung an Vorgaben der EnEV 2009 an opake Bauteile.

⁴⁸ In Anlehnung an Zielvorgaben zur Passivhauszertifizierung. Allerdings werden bereits heute für bestimmte opake Bauteile in Passivhäusern sogar schon bessere Dämmwerte als 0.1 kWh/m²a erzielt.

Wirkungsgrad	η [%]
Niedrig	5
Mittel	10
Hoch	20

Tabelle 6.11: Festlegungen zu Wirkungsgraden einer solaren Technologie*(Quelle: eigene)*

Die Festlegung der Wirkungsgrade der solaren Technologie erfolgt in Anlehnung an übliche Wirkungsgrade in der Photovoltaik. Sie sollen den Prozentteil der auf eine Fläche eingestrahlt Energie beschreiben, welcher nach der physikalischen Umwandlung von Licht in Strom und weiteren Umwandlungs-, Leitungs- und Speicherverlusten tatsächlich dem Nutzer zur Verfügung steht. Gemeint ist also der Wirkungsgrad des Gesamtsystems.

Für den ersten Umwandlungsschritt liegen aktuelle Modulwirkungsgrade zwischen derzeit 6% bei Dünnschichtmodulen bis zu 18% bei monokristallinen Modulen. Hiervon abzuziehen sind Wechselrichterverluste von 2-5%. Die Performance Ratio spiegelt die Verluste bei einem nicht reibungsfreien Zusammenspiel der Einzelkomponenten und Verschaltungen, aber auch Verschmutzungs- und Verschattungsverluste wider, die in dieser Untersuchung jedoch als minimal angenommen werden. Hinzu kommen Leitungsverluste und gegebenenfalls Speicherverluste, so dass sich insgesamt die oben aufgeführten Anteile der in Relation zur Gesamteinstrahlung beim Nutzer tatsächlich bereitstehenden Energie ergeben.

Die Wirkungsgrade solarthermischer Anlagen liegen mit ca. 60% zwar deutlich höher als die photovoltaischer Anlagen, doch folgende Gründe sprechen im Rahmen dieser Arbeit für eine Untersuchung auf Basis elektrischer Energieerzeugung:

- Elektrische Energie ist hochwertiger als thermische Energie. Sie ist leicht in anderen Energieformen umwandelbar und die entsprechenden Verteilernetze sind im Gebäudeumfeld bereits vorhanden. Mit ihr können alle im Kontext zu Gebäuden anfallenden Bedarfe wie Heizung, Kühlung, Warmwasserbereitung, Betrieb von Lüftungs- und Haushaltsgeräten, Kommunikations- und Informationstechnologien, bis hin zu Elektromobilität betrieben werden. Weitere Überschüsse können problemlos eingespeist und somit gewinnbringend beispielsweise an den energieintensiven Industriesektor verkauft werden.
- Die in dieser Studie unterstellte großflächige Anwendung würde bei solarthermischer Nutzung schnell zu nicht verwendbaren Überschüssen und Problemen bei Verteilung oder saisonaler Speicherung führen.

Durch diese Festlegung muß jedoch beachtet werden, dass im Folgenden die berechneten thermischen Transmissionswärmeverluste in $\text{kWh}_{\text{therm}}$ mit elektrischen solaren Gewinnen in kWh_{el} gegeneinander bilanziert werden, obwohl es sich hierbei um Energien unterschiedli-

cher Qualität handelt. Auf dieses Problem wird im Zuge der Erläuterungen zu den getroffenen Untersuchungsgrenzen in *Abschnitt 7.4* genauer eingegangen. Elektrische Energie ist hochwertiger als thermische Energie. Mithilfe einer Wärmepumpe könnte unter Nutzung von Umweltenergie die eingesetzte elektrische Energie bei der Umwandlung in thermische Energie beispielsweise verdreifacht⁴⁹ werden. Eine Gewichtung nach Energiequalität würde das Endergebnis somit noch weiter verbessern. Die erzielten Ergebnisse und die daraus abgeleiteten Aussagen sind somit eher unterschätzt.

6.3.3 Belegungsgrad

Belegungsgrad	[%]
Niedrig	25
Mittel	33
Hoch	50
Sehr hoch	75
Komplett	100

Tabelle 6.12: Festlegungen zu Belegungsgraden mit solaren Technologien

(Quelle: eigene)

Ein Belegungsgrad von 25 bis 33% wird in dieser Studie für die nahe Zukunft als realistisch angenommen und ist bereits heute beispielsweise in Form kompletter Energiedächer in der Baupraxis zu sehen. Belegungsgrade unter 25% sind für diese Studie irrelevant, da hierfür die Optimierung der Ausrichtung einer einzelnen Teiloberfläche ausreichen und damit die Anpassung der gesamten Gebäudeform unnötig machen würde.

Ein hoher Belegungsgrad von mehr als 50% der Gebäudehülle ist bei derzeitigen Preisen für solare Technologien in der Regel noch zu kostspielig, da mit zunehmendem Belegungsgrad auch weniger geeignete Hüllflächenanteile solar aktiviert werden müssen. Die weiteren aufgeführten Belegungsgrade von bis zu 100% sind aufgrund der Flächenkonkurrenz zu Fenstern und anderen Funktionen der Gebäudehülle für die Baupraxis nicht realistisch. In dieser Studie dienen sie aber der Darstellung der gesamten theoretischen Bandbreite und der Fortschreibung aktueller Entwicklungstendenzen wie beispielsweise der Integration transluzenter Photovoltaikzellen in Fensterflächen.

⁴⁹ Die Leistungszahl (COP=Coefficient of Performance) der Wärmepumpe wird in diesem Beispiel mit 3 angenommen. Dies ist ein derzeit beim Hausbau gängiger Wert.

6.3.4 Parametermatrix und Zeitachse

Alle drei Parameter sind in einer bestimmten Bandbreite angegeben, die eine zeitliche Entwicklungsrichtung für stetige Verbesserungen aufzeigt. In der Zusammenschau ergibt sich eine dreidimensionale Matrix, deren x-Achse die Entwicklung des solaren Wirkungsgrades, die y-Achse die des Dämmstandards und die z-Achse den solaren Belegungsgrad zeigt.

Zwischen der schlechtesten Kombination und der besten spannt sich somit eine Zeitachse auf, welche die Entwicklung von der Vergangenheit über die Gegenwart in die Zukunft beschreibt (s. *Abbildung 6.5*). Für Deutschland könnte beispielsweise die Parameterkombination von mittlerem Dämmstandard ($0.5\text{W/m}^2\text{K}$), mittlerem solaren Wirkungsgrad (10%) und geringem Belegungsgrad (25%) aktuelle Gegebenheiten engagierter Baupraxis abbilden.

Mit der Zeit wird jedoch der Dämmstandard im Zuge weiterer Sanierungswellen zunehmen. Die Wirkungsgrade solarer Technologien steigen aufgrund der Lernkurve weiter und werden sich eines Tages der physikalischen Obergrenze annähern. Eine Zunahme des Belegungsgrades hängt von Preisentwicklungen der solaren Technologien gegenüber fossil erzeugter Energie sowie von Überlegungen zur Versorgungssicherheit ab. Belegungsgrade von deutlich über 50% sind aber voraussichtlich auch in Zukunft nur in Ausnahmefällen wirklich sinnvoll, da hier bereits Hüllflächenanteile mit geringer Einstrahldichte einbezogen werden müssten. Belegungsgrade von 100% sind aufgrund von Flächenkonkurrenzen praktisch kaum möglich und werden in dieser Untersuchung nur zur vollständigen Abbildung der Entwicklung in den Extremen genutzt.

In der dreidimensionalen Parametermatrix kann der Einfluss jedes Parameters einzeln oder in der Zusammenschau untersucht werden. Insgesamt ergeben sich für diese Forschungsarbeit 45 mögliche Parameter-Kombinationen für die spätere Durchführung der Berechnungen.

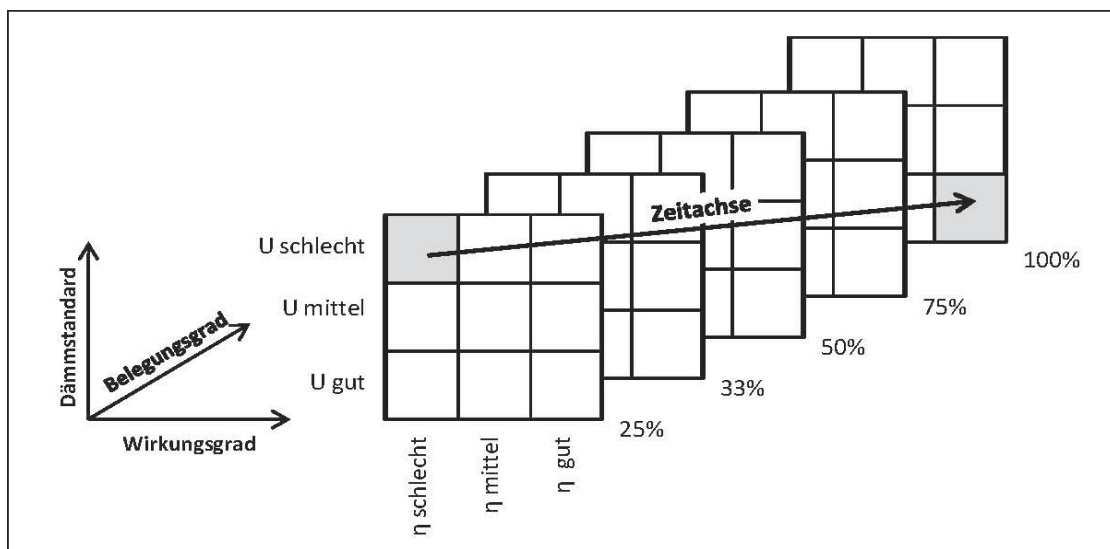


Abbildung 6.5: Die drei Dimensionen der Parametermatrix und die Zeitachse

(Grafik: eigene)

Kapitel 7

Festlegung der Vorgaben und Untersuchungsgrenzen

Vor der Durchführung der Berechnungen werden folgende Vorgaben und Untersuchungsgrenzen bezüglich der Formen, Standorte, Parameter und Berechnungen festgelegt:

7.1 Untersuchungsgrenzen – Formen

- Es werden keine realen Gebäudeformen mit Dachüberständen, Balkonen oder Schornsteinen generiert, sondern auf Primärformen abstrahierte geometrische Grundfiguren, die sich aus Quadern, Pyramiden, Prismen, Zylindern und Kegeln zusammensetzen lassen.
- Die so erzeugten Formen dürfen sich nicht selbst verschatten, weshalb für jede beliebige Schnittfläche der Form die Bedingung gilt, dass keiner der Innenwinkel des entstehenden Schnittflächenpolygons überstumpf sein darf. Ausschließlich konvexe Schnittflächen sind zulässig.
- Auch für die einzelnen Teilflächen der Gebäudehülle gilt, dass konkave, stellare und gekrümmte Flächen nicht zulässig sind. Die Eckpunkte jedes Polygons müssen in einer Ebene liegen.
- Alle Formen verfügen über das gleiche Volumen, eine horizontale Grundfläche und mindestens zwei senkrechte Fassaden. Die übrigen Teiloberflächen sind in Neigung und Orientierung frei wählbar und müssen nicht eindeutig als Dach oder Fassade kategorisierbar sein.
- Die Gebäudehülle wird als dünne Schicht ohne eigene Bauteildicke, ohne Berücksichtigung von Konstruktionsaufbau oder Statikanforderungen angenommen. Als Membran umgibt sie das eingeschlossene Volumen, dessen jeweilige dreidimensionale Ausformung sie nach außen abbildet.

- Innerhalb des Volumens erfolgt keine Differenzierung nach nutzbaren und nicht nutzbaren Raumanteilen, sondern es entsteht immer ein einheitlich zusammenhängender Raum konstanter Größe.
- Die Generierung der Formen geschieht ausschließlich nach festgelegten Umformungsvorschriften ohne weitere Berücksichtigung anderer Aspekte des realen Entwurfsprozesses wie innerer Organisation, typischen Raumgrößen, Funktionalität, ästhetischen Ansprüchen oder Konstruktionsprinzipien.

7.2 Untersuchungsgrenzen – Standorte

- Die repräsentativen Standorte dienen ausschließlich der Festlegung bestimmter klimatischer und strahlungsphysikalischer Randbedingungen. Der Standort selber meint nicht einen konkreten Bauplatz in der jeweiligen Stadt.
- Es handelt sich nicht um eine Situierung im realen Bauumfeld, sondern der Standort wird idealisiert ohne topografische Erhebungen, ohne umgebende Bebauung oder Vegetation und somit ohne jegliche Verschattung gedacht.
- Die Durchführung der Berechnung muss für viele Standorte möglichst unterschiedlicher Randbedingungen durchgeführt werden, um den Einfluss der standortspezifischen Unterschiede auf die Energiebilanz von Gebäudeformen herausarbeiten zu können.

7.3 Untersuchungsgrenzen – Parameter

- Bei den angesetzten Wirkungsgraden der solaren Technologie werden keine Aussagen zu bestimmten Herstellern, Produkten oder konkreten Bausystemen getroffen. Angenommen wird jedoch die Erzeugung von elektrischer Energie aus Sonnenlicht, womit eine Affinität zur Photovoltaik besteht.
- Es wird nicht in einer speziellen solaren Technologie gearbeitet. Die angegebenen Wirkungsgrade lehnen sich jedoch an solche der Photovoltaik an. Der Prozentsatz soll nicht den Wirkungsgrad der Zelle oder des Moduls beschreiben, sondern den des Gesamtsystems, also denjenigen Anteil der auf die Hülle eingestrahltten Gesamtenergie, der nach Gewinnung, Umwandlung, Speicherung und gegebenenfalls Transport dem Nutzer in der gewünschten Energieform tatsächlich zur Verfügung steht.
- Die solare Technologie wird als flächig und hüllenintegriert angenommen. Obwohl sie konzeptionell an die Photovoltaik angelehnt ist, wird sie nicht in Modulen mit bestimmten zu befolgenden Rastern und Größenvorgaben oder Schweißbahnen mit einzuhaltenden Abstandsflächen gedacht, sondern eher wie ein Anstrich, welcher die zur Verfügung stehenden Flächen restlos ausnutzt,

keinem orthogonalen Raster folgt und auch ungewöhnliche Formen sowie kleinste Teilflächen vollständig ausfüllt.

- Bei der auf eine Empfangsfläche einstrahlenden Energie wird die gesamte direkte, diffuse und reflektierte Strahlung addiert, welche in einem Winkel zwischen 1 und 90° auf die Fläche trifft. Damit werden auch sehr flache Einfallswinkel von unter 5° berücksichtigt, welche bei photovoltaischer Anwendung aufgrund von Reflektionen nicht genutzt werden können. Ebenso wird der Einfluss der Lufttemperatur auf die Leistungskurve nicht berücksichtigt, da kein konkretes Produkt berechnet wird und zudem zukünftige Entwicklungen im Zeithorizont der Gebäudestandzeit nicht absehbar sind.
- Aus dem direkten, diffusen und reflektierten Anteil wird für jede Teilfläche eine Gesamtsumme gebildet. Damit wird Strahlung unterschiedlicher Qualität pauschal gleich behandelt. Eine kurze Einstrahlung von Direktstrahlung hoher Intensität kann somit zum gleichen Ergebnis führen wie eine lange Exposition unter sehr schwacher Diffusstrahlung. Auch dies ist der Unvorhersehbarkeit bezüglich der Wirkungsweise einer zukünftigen Technologie geschuldet.
- Flächenkonkurrenzen solarer Technologien zu Fensterflächen und anderen Funktionen der Gebäudehülle werden in der Rechnung nicht berücksichtigt.
- Solare Technologien werden ausschließlich als starre, unbewegliche und in die Gebäudehülle integrierte Systeme angenommen. Aufständereien oder Aufstellwinkel, die nicht parallel zu den einzelnen Teiloberflächen der Gebäudehülle ausgeführt werden, sind unzulässig. Gleiches gilt für Systeme mit einachsiger, zweiachsiger oder schienenbasierter kontinuierlicher Nachführung. Auch das Gebäude als solches wird als nicht drehbar gelagert angenommen. Derart mobile Systeme würden eine gänzlich andere Optimierung von Form und Orientierung benötigen, bilden keine architektonische Einheit von Gebäudehülle und eingeschlossenem Volumen und würden zu Selbstverschattung führen. Anders als bei konzentrierenden, auf Direktstrahlung basierenden Systemen ist für die photovoltaische Nutzung, welche auch den Diffusanteil nutzt, die Nachführung nur mit einer minimalen Einstrahlungsverbesserung verbunden. Demgegenüber ist eine Nachführung technisch aufwendig und mit höheren Wartungs- und Betriebskosten verbunden. Stabilität und Sturmfestigkeit müssen statisch gesichert werden und der zur Nachführung notwendige Elektromotor schmälert wiederum die erzielbaren Gewinne.

7.4 Untersuchungsgrenzen – Berechnung

- Nach Festlegung der Datenbanken zu Formen, Standorten und Parametern ist der einzige für die Berechnungen verbleibende Optimierungsfaktor die Gebäudeorientierung. Die Orientierungsoptimierung erfolgt für die fünf verschiedenen

Belegungsgrade getrennt. Die dafür notwendige Rotation wird nicht für 1°-Schritte berechnet, sondern erfolgt in 5°-Schritten mit Interpolation der Zwischenwerte.

- Die Berechnung wird idealisiert durchgeführt unter der Festlegung, dass weder Eigen- noch Fremdverschattung vorliegt.
- Alle äußeren und inneren Faktoren der Entwurfsrealität wie städtebauliche Randbedingungen, Gestaltungsansprüche, sinnvolle Grundrissplanung, funktionelle und technische Komponenten sowie Wirtschaftlichkeitsaspekte werden ausgeblendet, um allein den geometrischen Einzelaspekt der solaren Gebäudeform in ihrer Wechselbeziehung zu lokalen klimatischen und strahlungsgeometrischen Vorgaben untersuchen zu können.
- Es wird zwischen der gesamten Gebäudehülle A , der luftberührten Oberfläche O und der Gebäudegrundfläche G unterschieden. Es gilt: $A = O + G$. In die Berechnung gehen ausschließlich die Bilanzen aus thermischen Verlusten und solaren Gewinnen der luftberührten Anteile O ein. Für die Grundfläche G kann naturgemäß keine solare Einstrahlung berechnet werden. Auch die thermischen Verluste durch die Grundfläche G werden nicht berücksichtigt, da sich erdberührte Oberflächen aufgrund abweichender Temperaturamplituden anders verhalten als luftberührten Oberflächen. Auch werden in der Formenstudie keine Angaben zu Kellergeschossen gemacht, welche den erdberührten Anteil der Gebäudehülle gegenüber einer reinen Bodenplatte vergrößern könnten.
- Genauso wenig wie die Verluste durch die Grundfläche G werden Lüftungsverluste, Wärmebrückenverluste, der Energiebedarf zur Brauchwassererwärmung, der Elektrizitätsbedarf für Beleuchtung, Haushaltsgeräte sowie Kommunikations- und Informationstechnologien einkalkuliert. Andererseits bleiben auch solare Gewinne über Verglasungen und interne Gewinne durch Wärmeabstrahlung von Personen, Beleuchtung und Haushaltsgeräten unberücksichtigt. Bei der Untersuchung geht es ausschließlich um die Untersuchung von Gebäudeparametern, welche einen direkten Bezug zur konkreten Gebäudeform haben, also auf die formrelevanten Verluste und Gewinne der luftberührten Hülle. Bei der abschließenden Betrachtung der sich ergebenden Hüllenenergiebilanzen muss jedoch bedacht werden, dass aus eventuellen Überschüssen die oben aufgezählten Energiebedarfsposten - gegebenenfalls zusätzlich zu Herstellungs- und Entsorgungsenergie des Gebäudes, Elektromobilität und dem Verkauf von Stromüberschüssen - gedeckt werden müssen.
- Wie bereits in *Abschnitt 6.3.2* angesprochen werden die thermischen Transmissionswärmeverluste in $\text{kWh}_{\text{therm}}$ mit elektrischen solaren Gewinnen in kWh_{el} verrechnet, obwohl sie nicht die gleiche energetische Qualität haben. In die Jahresenergiebilanz der Gebäudehülle gehen sie jedoch mit der gleichen Einheit

kWh/m²a ein. Dabei wird nicht berücksichtigt, dass photovoltaisch erzeugter Strom reine Exergie⁵⁰ und somit viel wertvoller als thermische Energie ist, welche auch eine anenergetische Komponente besitzt. Der Exergiegehalt von Wärme ist durch den thermodynamischen Wirkungsgrad begrenzt, während Strom zu 100% aus Exergie besteht und nahezu vollständig in andere Energieformen wie mechanische Energie oder Wärmeenergie umgewandelt werden kann. Da bei der Hüllenbilanz somit Energie- und nicht die viel aussagekräftigeren Exergiegehalte miteinander verglichen werden, sind folglich die solaren Gewinne gegenüber den thermischen Verlusten tendenziell unterschätzt. Das bedeutet, dass die berechneten Energiebilanzen eigentlich noch besser ausfallen als in *Kapitel 14* dargestellt. Beide werden direkt miteinander vergleichbar, wenn mit elektrischer Energie beispielsweise eine Wärmepumpe der Leistungszahl 3 zur Gewinnung von Niedertemperaturwärme betrieben wird. Dies bedeutet, dass 3 kWh Niedertemperaturwärme aus 1 kWh elektrischer Energie und 2 kWh Umgebungswärme gewonnen werden. Man erhält somit dreimal mehr Wärmeenergie als investierte elektrische Energie.

- Bei der Berechnung thermischer Verluste erfolgt keine Differenzierung zwischen Heiz- und Kühlenergiebedarf, obwohl die Erzeugung von Kühlenergie technisch und energetisch aufwendiger ist. Infolge ist die benötigte Kühlenergie gegenüber der Heizenergie tendenziell unterbewertet.
- Es werden ausschließlich Jahresenergiebilanzen betrachtet und nicht monatliche, tägliche oder stündliche Schwankungen, welche nur mittels genauer Simulationen auf Basis stochastischer Klimamodelle abgebildet werden könnten.
- Die energetische Bilanzierung erfolgt nicht in hoher zeitlicher Auflösung von Minuten oder gar Sekunden, sondern nur über die 8.760 Stundenmittel eines Jahres, welche abschließend zur Jahresgesamtbilanz addiert werden.
- Die energetische Bilanzierung wird nicht um eine finanzielle Betrachtung ergänzt, da keine belastbaren Prognosen zur Kostenentwicklung für solare Technologien oder fossile Energieträger über die lange Zeitspanne von mehreren Jahrzehnten eines Gebäudelebenszyklus vorliegen.

⁵⁰ Exergie bezeichnet den Anteil arbeitsfähiger Energie in einem System. Exergie wird in Anergie umgewandelt, wenn im System Arbeit verrichtet wird. Anergie ist die nicht mehr arbeitsfähige Energie. Die Energie wird somit nicht vernichtet, sondern von einem Zustand geringer Entropie in einen Zustand höherer Entropie überführt. Dieser Vorgang ist irreversibel, da die Entropie eines geschlossenen Systems nicht abnehmen kann. Dieses Gesetz der Entropiezunahme verhindert, dass beispielsweise Wärmeenergie direkt in Bewegungsenergie oder Elektrizität umgewandelt werden kann. Zur Umwandlung thermischer Energie sind Wärmequellen oder Wärmesenken nötig. Je größer die Temperaturdifferenz desto höher der Wirkungsgrad (nach Carnot). Auch kann nicht die gesamte in der Temperaturdifferenz gespeicherte Wärmemenge überführt werden. Die Umwandlung von Wärme in Elektrizität ist umso unvollständiger je geringer das verfügbare Temperaturgefälle ist. Elektrische Energie hingegen kann nahezu vollständig in andere Energieformen umgewandelt werden.

Kapitel 8

Grundlagen der Berechnung thermischer Verluste (Formelwerk)

8.1 Benötigte Eingangsgrößen

Die meisten Berechnungsmethoden zur Kalkulation thermischer Verluste benötigen sehr detaillierte Angaben zum Bauprojekt, wie beispielsweise den genauen Schichtaufbau der Wände mit materialspezifischen Angaben zu Wärmeleiteigenschaften einzelner Bauteile und Strukturen, Lage und Größe der Fenster, Qualität der Verglasung und Rahmenanteil, Lage und Größe aller Wärmebrücken, Beheizungsart, Länge der Heizungsrohre, Anlagenaufwandszahl bis hin zum Stromverbrauch der Umwälzpumpen.

Zu einem frühen Planungszeitpunkt, welcher im Fokus der vorliegenden Arbeit steht, können derart detaillierte Angaben jedoch noch nicht gemacht werden. Auch versperren sie den Blick auf die eigentliche, zentrale Entscheidung, die in dieser Phase getroffen werden muss, nämlich die Findung der Gebäudeform, welche zeitlich deutlich vor der Entscheidung zu baukonstruktiven und anlagentechnischen Details liegt. Zudem werden in dieser Phase meist verschiedene Entwurfsvarianten miteinander verglichen, so dass es nicht sinnvoll ist, zu jeder Variante derart fortgeschrittene Planungen anlegen zu müssen, nur um im Folgenden darauf basierend scheinbar präzise Berechnungen durchführen zu können.

Zur Abschätzung der gebäudeformspezifischen thermischen Verluste müssen wenige, zu diesem frühen Entwurfszeitpunkt bekannte Angaben ausreichen. Folgende Größen sind in der Folge als bekannt vorauszusetzen, zumindest sofern eine konkrete Ideenskizze vorliegt:

- die Größe der Hüllfläche (A),
- der angestrebte mittlere Dämmstandard ($\bar{U}$)
- sowie die standortspezifische Anzahl der Heiz- und Kühlgradtage (n_{HGT} , n_{KGT}).

Im Folgenden soll eine Formel abgeleitet werden, um aus diesen wenigen Angaben bereits eine gute Abschätzung der über die Hülle stattfindenden Verluste⁵¹ berechnen zu können.

8.2 Entwicklung einer Formel zur Abschätzung thermischer Verluste

Der Wärmestrom $\dot{Q}$ [in W] durch eine Fläche der Größe A [in m²] mit einem mittleren Wärmedurchgangskoeffizienten $\bar{U}$ [in W/(m²K)] bei einer Temperaturdifferenz zwischen Innen- und Außenluft von $\Delta\vartheta = \vartheta_i - \vartheta_a$ [in K] errechnet sich zu:

$$\dot{Q} = \bar{U} \cdot A \cdot \Delta\vartheta \quad (8.1)$$

Die stündliche Verlustenergie Q_{Std} [in Wh] ergibt sich somit zu:

$$Q_{Std} = \dot{Q} \cdot 1h = \bar{U} \cdot A \cdot \Delta\vartheta \cdot 1h \quad (8.2)$$

Die Verlustsumme pro Tag Q_{Tag} [in Wh] ist demnach:

$$Q_{Tag} = 24 \cdot Q_{Std} = 24h \cdot \bar{U} \cdot A \cdot \Delta\vartheta \quad (8.3)$$

Die Verlustsumme pro Gradtag $Q_{Gradtag}$ [in Wh] ist definiert als der Verlust pro Tag bei einer Temperaturdifferenz zwischen Innen- und Außenluft von $\Delta\vartheta = \vartheta_i - \vartheta_a = 1K$. Je nach Vorzeichen kann es sich hierbei um einen Heiz- oder Kühlgradtag handeln. Er ergibt sich zu:

$$Q_{Gradtag} = 24h \cdot \bar{U} \cdot A \cdot 1K \quad (8.4)$$

Die jährlich Verlustsumme $Q_{Jahr,Heiz}$ bzw. $Q_{Jahr,Kühl}$ [in Wh] auf Basis einer bekannten Anzahl n_{HGT} an Heizgradtagen bzw. Anzahl n_{KGT} an Kühlgradtagen berechnet sich wie folgt:

$$Q_{Jahr,Heiz} = Q_{Gradtag} \cdot n_{HGT} = 24h \cdot \bar{U} \cdot A \cdot 1K \cdot n_{HGT} \quad (8.5)$$

$$Q_{Jahr,Kühl} = Q_{Gradtag} \cdot n_{KGT} = 24h \cdot \bar{U} \cdot A \cdot 1K \cdot n_{KGT} \quad (8.6)$$

Als Angabe pro Quadratmeter Gebäudehülle ($A = 1m^2$) und der Einheit kWh/m² ergibt sich:

$$q_{Jahr,Heiz} = \frac{24h}{1000} \cdot \bar{U} \cdot 1K \cdot n_{HGT} \quad (8.7)$$

$$q_{Jahr,Kühl} = \frac{24h}{1000} \cdot \bar{U} \cdot 1K \cdot n_{KGT} \quad (8.8)$$

⁵¹ Weitere Verluste wie beispielsweise über Wärmebrücken oder durch Lüftung sind nicht mit einberechnet, da sie nicht direkt von der Gebäudeform, sondern von Baukonstruktion und technischer Gebäudeausrüstung abhängen und die entsprechenden Angaben zu diesem frühen Planungsstadium noch nicht bekannt sind.

Ist nun für einen Standort die Anzahl der Heiz- und Kühlgradtage quasi als lokalspezifischer thermischer Fingerabdruck bekannt, können für eine Form der Oberfläche A für alle U -Werte der Parametermatrix aus *Abschnitt 6.3.1* die jeweiligen thermischen Verluste über die Gebäudehülle berechnet werden.

Gemäß den festgelegten Untersuchungsgrenzen in *Kapitel 7* geht jedoch nicht die gesamte Oberfläche A der Form in die Berechnung ein, sondern lediglich die luftberührten Anteile O ohne die erdberührte Grundfläche G .

Kapitel 9

Grundlagen der Berechnung solarer Strahlung (Formelwerk)

Ein zentraler Aspekt der Arbeit liegt in der Berechnung derjenigen solaren Energie, die auf eine Gebäudehülle im Jahresverlauf fällt – d.h. auf eine Gruppe beliebig geneigter und orientierter Empfangsflächen. Ein umfassendes und fundiertes Verständnis der Strahlungsphysik als auch des Einflusses der Atmosphärenchemie ist notwendig, um die daraus folgenden späteren Rückschlüsse für eine angepasste Architekturform und -geometrie sinnvoll treffen zu können und um bestimmte, sich in den späteren Endergebnissen zeigende Effekte interpretieren zu können. Daher wird im Folgenden sehr umfassend das benötigte Grundlagenwissen zusammengetragen.

In diesem Kapitel wird lückenlos der Weg der solaren Strahlung von ihrer Entstehung in der Sonne bis zum Auftreffen auf eine beliebig ausgerichtete Empfangsfläche an einem Gebäude auf der Erde verfolgt.

Die von der Sonne durch Kernfusion freigesetzte elektromagnetische Strahlung trifft als Extraterrestrische Strahlung am oberen Atmosphärenrand auf. Beim Passieren der Erdatmosphäre wird sie durch Streuung, Reflexion und Absorption an Atmosphärenbestandteilen geschwächt und aufgrund daraus resultierender unterschiedlicher Erwärmung der Luftschichten oder Verdunstung in andere Energieformen wie Wind- und Wasserkraft umgewandelt.

Als Globalstrahlung bezeichnet man jenen Anteil der Extraterrestrischen Strahlung, welcher nach dem Atmosphärendurchgang auf eine horizontale Fläche an der Erdoberfläche auftrifft. Die Globalstrahlung setzt sich zusammen aus einem direkten Anteil aus Richtung der aktuellen Sonnenposition und einem diffusen Anteil, welcher in unterschiedlicher Intensität aus allen Richtungen des Himmeldomes auf die Empfangsfläche trifft. Stündliche Werte zur Globalstrahlung liegen von Bodenmessstationen sowie Satellitenmessungen vor. Diese Werte beziehen sich jedoch ausschließlich auf horizontale Empfangsflächen.

Die auf eine beliebig ausgerichtete Fläche treffende solare Strahlung kann nur durch aufwendige Umrechnung der bekannten Globalstrahlung auf eine Horizontale ermittelt werden. Hierzu müssen diverse astronomische, meteorologische, physikalische, geographische sowie strahlungsgeometrische Randbedingungen bekannt sein. So wird beispielsweise das Verhältnis von direktem zu diffusem Strahlungsanteil entscheidend durch das Zusammenspiel astronomischer Faktoren wie Elevation der Sonne und Deklination der Erdachse aber auch meteorologischer Faktoren wie Clearness Index und Bewölkungsgrad beeinflusst.

Auf eine geneigte Empfangsfläche trifft anders als auf eine Horizontale zusätzlich zum Direkt- und Diffusanteil ein dritter, vom Boden reflektierter Anteil. Dieser hängt vom im Jahresverlauf variierenden Rückstrahlungsgrad der Erdoberfläche ab. Auch Mehrfachreflexionen zwischen Erdoberfläche und Wolkenunterseiten sind zu berücksichtigen. Auf die im Tages- und Jahresverlauf variierenden strahlungsgeometrischen und meteorologischen Parameter reagieren der direkte, diffuse und reflektierte Anteil jedoch je nach Ausrichtung der Empfangsfläche sehr unterschiedlich. Um die auf eine beliebig ausgerichtete Empfangsfläche treffende Strahlung zu berechnen, muss daher zunächst die auf der Horizontalen gemessene Globalstrahlung in ihren direkten und diffusen Anteil zerlegt werden. Die einzelnen Fraktionen werden getrennt auf die angestrebte Neigung und Orientierung der potentiellen Empfangsfläche umgerechnet, um anschließend wieder zur Globalstrahlung zusammengesetzt zu werden, welche nun auf diese beliebig ausgerichtete Empfangsfläche trifft. Aufgrund der tages- und jahreszeitlichen Schwankungen der beeinflussenden Parameter sollte dies engmaschig z.B. in Stundenschritten über ein ganzes Jahr geschehen.

In diesem Kapitel werden die Berechnungsgrundlagen erläutert, mit deren Hilfe für jede Teiloberfläche einer Gebäudehülle die solare Einstrahlung einzeln berechnet werden kann. Sie sind in dieser Komplexität für die vorliegende Untersuchung notwendig, da Quantität, Qualität, Einfallswinkel und zeitliche Verteilung solarer Einstrahlung auf jede beliebig geneigte und orientierte Empfangsoberfläche an jedem weltweiten Standort ermittelbar sein muss.

9.1 Verwendete Literatur

Die nachfolgende Zusammenstellung von Formeln ist eine für diese Arbeit notwendige Auswahl aus dem Standardwerk

- Iqbal (1983): An Introduction to Solar Radiation

und folgenden ergänzenden Veröffentlichungen:

- Albizzati (2001): Radiación solar diaria promedio mensual sobre superficies inclinadas calculada con modelos isotrópicos y anisotrópicos
- Andersen (1980): Calculation of Monthly Average Insolation on Tilted Surfaces
- Bendt/Collares-Pereira/ Rabl(1981): Frequency Distribution of daily Insolation
- Coffari (1977): The Sun and the Celestial Vault

- Collares-Pereira/Rable (1979): The Average Distribution of Solar Radiation – Correlations between Diffuse and Hemispherical and between Daily and Hourly Insolation Values
- Dickinson/Cheremisinoff (1980): Solar Energy Technology Handbook – Part A: Engineering Fundamentals
- Dietze (1957): Einführung in die Optik der Atmosphäre
- Erbs/Klein/Duffie (1982): Estimation of the diffuse radiation fraction for hourly, daily and monthly average global radiation
- Hay (1979): Calculation of the monthly mean solar radiation for horizontal and inclined surfaces
- Herzog (1985): Estimation of hourly and monthly average daily insolation on tilted surfaces
- Hollands/Huget (1983): A Probability density function for the Clearness Index
- Hottel (1976): A simple model for estimating the transmittance of direct solar radiation through clean atmospheres
- Kambezidis (1990): Solar Position and atmospheric Refraction
- Khartchenko (1995): Thermische Solaranlagen – Grundlagen, Planung und Auslegung
- Klein (1977): Calculation of Monthly Average Insolation on Tilted Surfaces
- Klein/Theilacker (1981): An Algorithm for Calculating monthly-average Radiation on Inclined Surfaces
- Klein/Beckmann (1984): Review of solar radiation utilizability
- Klein/Beckman/Abdulla (2000): A new correlation for the prediction of the frequency distribution of daily solar radiation
- Klucher (1979): Evaluation of Models to predict insolation on tilted surfaces
- Liu/Jordan. (1960): The interrelationship and characteristic distribution of direct, diffuse and total solar radiation
- Liu/Jordan (1962): Daily Insolation on Surfaces Tilted towards the Equator
- Orgill/Hollands (1977): Correlation equations for hourly diffuse radiation on a horizontal surface
- Page (1986): Prediction of solar radiation on inclined surfaces
- Perez/Steward (1986): Solar Irradiance Conversion Models
- Perez/Seals/Ineichen (1987): A new simplified version of the Perez Diffuse Irradiance Model for tilted surfaces
- Reindl/Beckmann/Duffie (1989): Diffuse Fraction Correlations
- Rodríguez/González (1994): Radiación solar sobre superficies horizontales y inclinadas – Manual de radiación solar en Colombia
- Schabbach (1998): Physikalisch-stochastisches Modell zur Simulation klimatisch beeinflusster Solarstrahlung
- Tuller (1976): Relationship between diffuse, total and extraterrestrial Radiation
- Walraven (1978): Calculating the position of the sun

9.2 Physikalische Daten der Sonne

Physikalisch gesehen ist die Sonne eine autonome Energiequelle, welche über einen sehr langen Zeitraum kontinuierlich eine konstante Energiemenge abstrahlt. Die Sonne ist das Zentralgestirn unseres Planetensystems mit einem geschätzten Alter von etwa 5 Milliarden Jahren und einer prognostizierten verbleibenden Lebensdauer bei jetziger Helligkeit von etwa gleicher Länge. Ihr Durchmesser beträgt $\phi = 1,39 \cdot 10^6 \text{ km}$ bei einer Masse von $m = 2 \cdot 10^{30} \text{ kg}$. Die Sonne befindet sich im Plasmazustand⁵².

Ihre Hauptbestandteile sind:

- 75% Wasserstoff
- 23% Helium
- 2% verschiedene schwere Elemente (in teilweise ionisierter oder atomarer Form).

Die Kugelform der Sonne bildet sich aus mehreren einzelnen Schalen. Ihre Abfolge von innen nach außen:

- Kern⁵³
- Photosphäre⁵⁴
- Chromosphäre⁵⁵
- Korona⁵⁶.

Die Wellenlängen λ der als Röntgen- oder Gammastrahlung im Kern freigesetzten Energie werden auf ihrem Weg nach außen immer größer, je weiter sie sich vom Sonnenzentrum entfernen und die Temperaturen sinken.

Die im Kern der Sonne freigesetzte Energie wird in Kernnähe mittels Gamma- und Röntgenstrahlung sowie zur Photosphäre hin durch Konvektion bis zur Sonnenoberfläche weitergeleitet, wo sie an den Weltraum abgegeben wird. Dieser die Sonne verlassende Energiestrom wird in die Anteile Materiestrahlung und elektromagnetische Strahlung unterteilt.

Die Materiestrahlung besteht aus Protonen und Elektronen, die die Sonne mit einer Geschwindigkeit von etwa $v = 500 \text{ km/sec}$ verlassen. Das terrestrische Magnetfeld lenkt die

⁵² Der Plasmazustand ist der vierte Aggregatzustand. Plasma ist ein dissoziiertes Gas, welches aus freien Ladungsträgern wie Ionen oder Elektronen besteht.

⁵³ Im Kern der Sonne herrscht ein Druck von 200 Milliarden bar und eine Temperatur von 8 bis 40 Million K. Der Kern nimmt zwar nur 15% des Gesamtvolumens der Sonne ein, bildet jedoch 40% der Gesamtmasse mit einer deutlich höheren Materiedichte. Hier werden 90% der gesamten Sonnenenergie erzeugt.

⁵⁴ Die Photosphäre bildet die Oberflächenschicht der Sonne. Sie ist nur einige hundert Kilometer dick und besitzt eine geringe Dichte bei einer Temperatur von 5785 K. Von hier geht die Sonnenstrahlung ins Weltall hauptsächlich aus.

⁵⁵ Die Chromosphäre ist eine fast 10.000 km dicke Gasschicht mit sehr geringer Dichte und einer Temperatur von 5000 K.

⁵⁶ Die Korona bildet die äußerste Schicht der Sonne mit einer extrem niedrigen Dichte, aber einer Temperatur von ca. 1 Million K.

elektrisch geladenen Teilchen jedoch ab, so dass nur wenige von ihnen die Erdoberfläche erreichen.

Die hauptsächlich von der Photosphäre ausgehende elektromagnetische Strahlung deckt den gesamten Frequenzbereich von kurzweiliger bis langweiliger Strahlung ab. Dabei entspricht die Abstrahlung der Sonne nach Spektrum und Energiemenge in etwa der eines *idealen schwarzen Körpers*⁵⁷ mit einer Temperatur von $\tau = 5777 \text{ K}$.

9.3 Energieentstehung in der Sonne

In der Kernregion der Sonne liegen Temperaturen von etwa $15 \cdot 10^6 \text{ K}$ vor. Hier laufen Kernfusionsprozesse ab, bei denen über verschiedene Zwischenreaktionen vier Wasserstoffkerne zu einem Heliumkern verschmelzen, der aus zwei Neutronen und zwei positiv geladenen Protonen besteht. Dabei werden zwei Positronen und zwei Neutrinos erzeugt. Die Formel des in der Sonne ablaufenden Kernfusionsprozesses lautet somit:



Nach der Reaktion kann man im Folgenden feststellen, dass die Gesamtmasse der beteiligten Bestandteile abgenommen hat.

Jeder Atomkern (N+ZK) besteht aus N Neutronen (1n) und Z Protonen (1p), die zusammen als Nukleonen bezeichnet werden. Obwohl sich nach dem *Coulombschen Gesetz*⁵⁸ gleich geladene Partikel eigentlich abstoßen müssten, hält der Atomkern zusammen, da zwischen den Nukleonen die sog. Kernkräfte wirken.

Die gegenseitige Umwandlung eines Protons in ein Neutron und ein π -Meson ist von wesentlicher Bedeutung für den Zusammenhalt des Kerns. Diesen sehr starken Kernkräften entspricht eine große Energie, die beim Aufbau eines Kerns aus seinen Nukleonen frei wird, bzw. derjenigen Energie, die andersherum zur Trennung der Nukleonen nötig wäre. Beim Zusammenbau des Atomkerns aus Protonen und Neutronen muss also erst dessen Bindungsenergie E_b freiwerden, damit ein stabiler Kern entsteht. Diese Energie zeigt sich im sog. Massendefekt Δm , also in der Tatsache, dass die Summe der Einzelmassen der Nukleonen größer ist als dessen Kernmasse. Für die Masse des Kerns m_k gilt:

$$m_k < Z \cdot m_p + N \cdot m_n \quad (9.2)$$

Für den sog. Massendefekt gilt somit:

$$\Delta m = (Z \cdot m_p + N \cdot m_n) - m_k \quad (9.3)$$

⁵⁷ nach dem Stefan-Boltzmann-Gesetz von Josef Stefan (1835-1893) und Ludwig Boltzmann (1844-1906)

⁵⁸ nach Charles Augustin de Coulomb (1736-1806)

Die Massendifferenz Δm nach der in der Sonne ablaufenden Kernfusionsreaktionsgleichung berechnet sich somit mittels Formel (9.1) zu

$$\begin{aligned}\Delta m &= 4 \cdot m_p - m_\alpha - 2 \cdot m_e - 2 \cdot m_\nu & (9.4) \\ &= 4 \cdot 1,00727646677\text{u} - 4,0015061771127\text{u} - 2 \cdot 0,00054857990943\text{u} \\ &= 0,026502529\text{u}\end{aligned}$$

Damit ist die Gesamtmasse der nach der Fusion entstandenen Teilchen um 0,026502529 u geringer als die der Ausgangsteilchen. Der Massenverlust Δm wird durch die Umwandlung in freiwerdende Energie ΔE erklärt, die sich mit Lichtgeschwindigkeit c von der Sonne entfernt. Damit ergibt sich die freiwerdende Energie aus Einsteins Gleichung⁵⁹ $E = m \cdot c^2$ zu

$$\begin{aligned}\Delta E &= \Delta m \cdot c^2 & (9.5) \\ &= 0,026502529 \cdot 1,660538782 \cdot 10^{-27} \text{ kg} \cdot \left(299792458 \frac{\text{m}}{\text{sec}} \right)^2 \\ &= 3,955284681 \cdot 10^{-12} \text{ J} = 24,6869475 \text{ MeV}\end{aligned}$$

In der bisherigen Rechnung wurden jedoch die Elektronen in der Atomhülle vernachlässigt und allein die Atomkerne betrachtet. In einem Wasserstoffatom (1H) befindet sich ein Elektron in der Atomhülle, beim Heliumatom (+He) zwei Elektronen. Vor der Reaktion besitzen die vier in die Reaktion eingehende Wasserstoffatome somit insgesamt vier Elektronen, von denen sich zwei im entstehenden Heliumatom wiederfinden und zur Ladungsneutralisierung der zwei positiven Protonen im Heliumkern führen. Die verbleibenden zwei Elektronen e-annihilieren⁶⁰ mit den beiden Positronen e+, was dazu führt, dass je zwei Elektronen und Positronen in Strahlungsenergie umgewandelt werden. Dabei entspricht diese Strahlungsenergie insgesamt dem Vierfachen der Masse eines Elektrons bzw. Positrons m_e :

$$\begin{aligned}\Delta E &= 4 \cdot m_e \cdot c^2 & (9.6) \\ &= 4 \cdot 0,54857990943 \cdot 10^{-3} \cdot 1,660538782 \cdot 10^{-27} \text{ kg} \cdot \left(299792458 \frac{\text{m}}{\text{sec}} \right)^2 \\ &= 3,274841749 \cdot 10^{-17} \text{ J} = 2,043995637 \text{ MeV}\end{aligned}$$

Damit addiert sich die insgesamt bei der Kernfusionsreaktion in der Sonne freigesetzte Energie aus (9.5) und (9.6) zu

$$\Delta E = 24,687 \text{ MeV} + 2,044 \text{ MeV} = 26,731 \text{ MeV} \quad (9.7)$$

⁵⁹ aus: „Ist die Trägheit eines Körpers von seinem Energieinhalt abhängig?“ (1905), Nachtrag zur Abhandlung „Zur Elektrodynamik bewegter Körper“ (1905); Albert Einstein (1879-1955)

⁶⁰ Unter Annihilation versteht man die Vernichtung eines Elementarteilchen-Antiteilchen-Paares unter Aussendung von zwei bis drei Photonen als sog. Vernichtungsstrahlung.

In jeder Sekunde werden in der Sonne aus etwa $650 \cdot 10^6$ t Wasserstoff $646 \cdot 10^6$ t Helium gebildet. Genauere Messungen ergeben, dass die Sonne pro Sekunde $4,3 \cdot 10^6$ t ihrer Masse verliert. Eben diese Massendifferenz Δm wird in die abgestrahlte Energie Φ_S umgewandelt:

$$\begin{aligned}\Phi_S &= \Delta m \cdot c^2 & (9.8) \\ &= 4,3 \cdot 10^9 \frac{\text{kg}}{\text{sec}} \cdot \left(3 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{sec}} \right)^2 \\ &= 3,87 \cdot 10^{23} \text{ kW}\end{aligned}$$

Damit strahlt die Sonne sekundlich einen Energiestrom von $\Phi_S \approx 4 \cdot 10^{23}$ kW aus.

Um die flächenspezifische Ausstrahlung $\dot{G}_S$ der Sonne zu erhalten, muss dieser Wert in Relation zur Sonnenoberfläche A_S gebracht werden:

$$\begin{aligned}\dot{G}_S &= \frac{\Phi_S}{A_S} & (9.9) \\ &= \frac{\Phi_S}{4 \cdot \pi \cdot r^2} = \frac{3,87 \cdot 10^{26} \text{ W}}{4 \cdot \pi \cdot (6,96 \cdot 10^8 \text{ m})^2} \\ &= 63,76 \frac{\text{MW}}{\text{m}^2}\end{aligned}$$

Hieraus kann über das *Stefan-Boltzmann-Gesetz* die Temperatur der Sonnenoberfläche berechnet werden zu:

$$\begin{aligned}\tau &= \sqrt[4]{\frac{\dot{G}}{\sigma}} & (9.10) \\ &= \sqrt[4]{\frac{63,76 \cdot 10^6 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}}{5,67 \cdot 10^{-8} \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{K}^4}}} \\ &= 5790 \text{ K}\end{aligned}$$

Dieser Wert entspricht etwa der Temperatur der Photosphäre ($\tau = 5785$ K), von welcher die Strahlung in den Weltraum hauptsächlich ausgeht.

9.4 Extraterrestrische Strahlung E_0 und Solarkonstante I_{Sc}

Zur Berechnung der an der äußeren Atmosphärenschicht der Erde ankommenden extraterrestrischen Strahlung E_0 denkt man sich eine Hüllkugel um den Sonnenmittelpunkt M_S

durch den Erdmittelpunkt M_E . Der Radius der Hüllkugel r_{SE} beschreibt somit den mittleren Abstand zwischen Sonnen- und Erdmittelpunkt und beträgt rund $1,5 \cdot 10^8 \text{ km}$.

Aufgrund der elliptischen Bahn der Erde um die Sonne variiert der Sonne-Erde-Abstand zwischen $0,983 \text{ AU}^{61}$ und $1,017 \text{ AU}$. Folgende *Fourier-Reihe*⁶² beschreibt den Exzentrizitäts-Korrektur-Faktor $E_{\text{kor}}^{\text{63}}$ in Abhängigkeit von der Tageszahl⁶³ n :

$$E_{\text{kor}} = \left(\frac{r_0}{r} \right)^2 \quad (9.11)$$

$$= 1,000110 + 0,034221 \cdot \cos \Gamma + 0,001280 \cdot \sin \Gamma + 0,000719 \cdot \cos 2\Gamma + 0,000077 \cdot \sin 2\Gamma$$

$$\text{mit: Tageswinkel } \Gamma = 2 \cdot \pi \cdot \frac{n-1}{365}$$

Mit dieser vereinfachten Version⁶⁴ kann die Exzentrizität hinreichend genau berechnet werden.

$$E_{\text{kor}} = \left(\frac{r_0}{r} \right)^2 \quad (9.12)$$

$$= 1 + 0,033 \cdot \cos \left(\frac{360 \cdot n}{365} \right)$$

Durch die kugelförmige Oberfläche der Sonne A_S muss nun die gleiche Gesamtstrahlungsleistung passieren wie durch die Oberfläche der großen Hüllkugel um Sonne und Erde A_{SE} . Dabei nimmt die auf den Quadratmeter bezogene Strahlungsstärke mit dem Quadrat der Entfernung ab. Die spezifische Ausstrahlung $\dot{G}_S$ der Sonne ist somit deutlich größer als die Bestrahlungsstärke E_0 , die als extraterrestrische Strahlung auf die äußere Erdatmosphäre auftrifft.

$$\text{Es gilt:} \quad \dot{G}_S \cdot A_S = E_0 \cdot A_{SE} \quad (9.13)$$

Daraus folgt:

$$\begin{aligned} E_0 &= \frac{\dot{G}_S \cdot A_S}{A_{SE}} \\ &= \frac{\dot{G}_S \cdot \pi \cdot \varnothing^2}{4 \cdot \pi \cdot r_{SE}^2} = \frac{63,76 \frac{\text{MW}}{\text{m}^2} \cdot \pi \cdot (1,39 \cdot 10^6 \text{ km})^2}{4 \cdot \pi \cdot (1,5 \cdot 10^8 \text{ km})^2} \\ &= 1369 \frac{\text{W}}{\text{m}^2} \end{aligned}$$

⁶¹ AU = Astronomical Unit = $1.496 \cdot 10^{11} \text{ m}$

⁶² vgl. [Spencer (1971): „Fourier Series representation of the position of the sun“, Search 2 (5), p. 172]

⁶³ Tageszahl $n = 1$ (für den 1. Januar) bis 365 (für den 31. Dezember)

⁶⁴ s. [Duffie/Beckmann (1991)]

Von der gesamten von der Sonne abgestrahlten Energie erreicht somit nur der geringe Anteil von rund 0,00216% die äußere Atmosphärenschicht der Erde. Die von der Sonnenscheibe ausgehende Energiestrahlung erreicht die Erde unter einem Raumwinkel⁶⁵ von lediglich 0,53° bzw. 32'.

Die Stärke der extraterrestrischen Strahlung E_0 variiert aufgrund schwankender Sonnenaktivität innerhalb mehrerer Jahre, jedoch nur um weniger als 0,1%.

Genauere Messungen haben ergeben, dass die *Solarkonstante* $I_{sc} = 1367 \pm 2 \text{ W/m}^2$ beträgt. Diese bezeichnet die Stärke der extraterrestrischen Strahlung E_0 auf eine senkrecht zur Strahlung gerichtete Fläche außerhalb der Erdatmosphäre. Sie entspricht einem stündlichen Energiestrom $\bar{I}_h$ von:

$$\begin{aligned}\bar{I}_h &= I_{sc} \cdot \frac{3600 \text{ sec}}{h} \\ &= 4,921 \frac{\text{MJ}}{\text{m}^2 \text{ h}}\end{aligned}\quad (9.14)$$

Im Jahresverlauf unterliegt die am oberen Atmosphärenrand der Erde ankommende Sonnenstrahlung saisonalen Schwankungen. Ursache hierfür ist die Elliptizität der Erdbahn, aufgrund derer der Abstand zwischen Sonne und Erde im Jahresverlauf um $\pm 1,7\%$ schwankt. Dieser Abstand zur Sonne ist am 3. Januar⁶⁶ mit 147 Mio. km am kleinsten und am 3. Juli⁶⁷ mit 152 Mio. km am größten. Daher erreicht die Erde im Dezember etwa 7% mehr Sonnenenergie als im Juni.

Die extraterrestrische Strahlungsstärke I_{on} auf eine senkrecht zur Strahlung gerichtete Fläche außerhalb der Erdatmosphäre schwankt im Jahr um $\pm 3,3\%$ und wird wie folgt mittels der *Solarkonstanten* I_{sc} und der *Exzentrizität* E_{kor} für jeden Tag n des Jahres errechnet:

$$I_{on} = I_{sc} \cdot \left[1 + 0,033 \cdot \cos\left(\frac{360 \cdot n}{365}\right) \right] \quad (9.15)$$

Damit ergibt sich der größte Wert von $I_{on} = 1412 \text{ W/m}^2$ am 1. Januar und der kleinste von $I_{on} = 1322 \text{ W/m}^2$ am 1. Juli. Im Winter herrschen auf der Nordhalbkugel niedrigere Temperaturen als im Sommer trotz höherer Strahlungsintensität am Atmosphärenrand. Dies liegt an der Tatsache, dass die Rotationsachse der Erde mit der Ebene ihrer Umlaufbahn um die Sonne einen Winkel von 66,5° bildet. Dadurch ist im Winterhalbjahr die Südhalbkugel mehr zur Sonne ausgerichtet als die Nordhalbkugel und verfügt somit im Vergleich über höhere Sonnenstände und längere Sonnenscheindauern.

⁶⁵ Dieser Winkel ergibt sich aus dem Sonnenradius und dem Abstand zwischen Erde und Sonne aus: $\tan(\alpha/2) = r_s/r_{SE}$ zu $\alpha = 2 \cdot \arctan(r_s/r_{SE}) = 2 \cdot \arctan(7 \cdot 10^5 \text{ km} / 1,5 \cdot 10^8 \text{ km}) = 0,53^\circ = 32'$

⁶⁶ Perihel

⁶⁷ Aphel

Die Nordhalbkugel trifft die Sonnenstrahlung dann unter einem flacheren Winkel, die nördlichsten Gebiete bleiben zeitweise sogar den gesamten Tag auf der sonnenabgewandten Seite. Zur Wintersonnenwende am 21. Dezember herrscht für alle Orte nördlich von $66,5^\circ\text{N}$ die „ewige Polarnacht“, während entsprechend südlich von $66,5^\circ\text{S}$ die Sonne nicht mehr untergeht und als „Mitternachtssonne“ zu sehen ist. Im weiteren Lauf der Erde um die Sonne ändert sich ihre relative Position. Nur am 21. März und 23. September⁶⁸ werden beide Pole zugleich von der Sonne beschienen. Aufgrund der Neigung der Erdachse gegenüber der Ekliptik unterliegt die solare Einstrahlung örtlich teilweise erheblichen jahreszeitlichen Schwankungen.

Sonnenflecken, welche in einem Zyklus von rund 11 Jahren vermehrt auftreten und weitere nur schwer vorhersagbaren solaren Aktivitäten wie Faculae⁶⁹, Protuberanzen⁷⁰ und Flares⁷¹ führen zu lokalen und temporären Schwankungen der ausgestrahlten Energiemenge sowie der spektralen Zusammensetzung. Auch die Eigenrotation der Sonne mit einer Dauer von 27 Erdtagen für eine Gesamtumdrehung führt zu weiteren Irregularitäten, die in dieser Arbeit jedoch vernachlässigt werden.

9.5 Atmosphärendurchgang

Auf der Erde werden Werte für die solare Strahlung gemessen, die deutlich unterhalb der Solarkonstanten I_{sc} liegen. Dies liegt an der Reduktion der Bestrahlungsstärke beim Durchdringen der Erdatmosphäre. Von der auf den oberen Atmosphärenrand der Erde auftreffenden solaren Einstrahlung erreicht nur ein Bruchteil die Erdoberfläche. Auf dem Weg durch die Atmosphäre und ihre Bestandteile wird die Strahlung teilweise reflektiert, absorbiert oder diffus gestreut. Dies ist abhängig vom im Tages- und Jahresverlauf unterschiedlichen Einstrahlungswinkel sowie lokalen meteorologischen Begebenheiten wie Wolken- und Nebelbildung.

9.5.1 Aufbau der Atmosphäre

Eine durch Gravitation gehaltene Gashölle bildet die Erdatmosphäre. Sie ist keine homogene Gashölle, sondern kann aufgrund innerer und äußerer Einflüsse in klar abgegrenzte Schichten untergliedert werden. Diese entstehen aufgrund der Temperaturabhängigkeit chemischer Prozesse und der höhenabhängigen Unterschiede der Strahlungsdurchlässigkeit. Die Erdatmosphäre lässt sich nach Temperaturverlauf von unten nach oben in folgende fünf Schichten (Sphären) und drei Grenzschichten (Pausen) gliedern:

⁶⁸ 21. März und 23. September (Äquinoktien)

21. Juni und 21. Dezember (Solstitien)

⁶⁹ auch „Sonnenfackeln“. Gebilde erhöhter Temperatur und Helligkeit zumeist in Nähe von Sonnenflecken

⁷⁰ Materieströme auf der Sonne. Ruhende Protuberanzen werden durch starke Magnetfelder über Monate konstant in Form gehalten. Aktive Protuberanzen sind kurzzeitige koronale Massenauswürfe/Sonneneruptionen.

⁷¹ Plasma-Magnetfeldbögen. Gebilde mit erhöhter Strahlung innerhalb der Chromosphäre.

- 1. Schicht: Troposphäre⁷²
- Tropopause
- 2. Schicht: Stratosphäre⁷³
- Stratopause
- 3. Schicht: Mesosphäre⁷⁴
- Mesopause
- 4. Schicht: Thermosphäre⁷⁵
- 5. Schicht: Exosphäre⁷⁶

Für die Nutzung regenerativer Energien ist nur der unterste Atmosphärenbereich, die *Troposphäre*, als wetterwirksame Schicht mit ihrer Wolken- und Niederschlagsbildung von Bedeutung. In ihr sind etwa 90% der Luft, sowie der gesamte Wasserdampf der Atmosphäre enthalten. In der Troposphäre fällt die Temperatur mit jedem Kilometer Höhenzunahme um 6,5°C. An der Tropopause über dem Äquator herrscht somit eine Temperatur von -75°C, während an den Polen nur -45°C erreicht werden. Diese Temperaturdifferenzen fördern das Hochsteigen warmer und das Absinken kalter Gase, was zu einer Durchmischung der Luft und der Entstehung von Wetter führt. Aus dem in der Luft vorhandenen Wasserdampf bilden sich Wolken und es entsteht Regen.

Die Atmosphäre setzt sich bis 20 km Höhe aus einem Gasgemisch zusammen. Die Grundmasse - trockene reine Luft - besteht aus einem Gemisch von permanenten Gasen, die unter atmosphärischen Bedingungen nicht in die flüssige oder feste Phase übergehen können. Diese zeitlich und räumlich konstanten Volumenbestandteile trockener Luft bei Normalnull sind:

- Stickstoff (78 %)
- Sauerstoff (21%)
- Edelgas Argon (1%)

⁷² Die Troposphäre beginnt an der Planetenoberfläche und wird durch die Tropopause begrenzt. Ihre Schichtdicke beträgt aufgrund der Erdrotation am Äquator 18 km, an den Polen nur 8 km. Da die Troposphäre durch die Wärmeabstrahlung der Erdoberfläche erwärmt wird, sinkt mit zunehmender Höhe die Temperatur - je Kilometer Höhenzunahme etwa um 6,5°C.

⁷³ Die Stratosphäre wird in etwa 50 km Höhe durch die Stratopause begrenzt. Im Gegensatz zur Tropopause steigt die Temperatur mit zunehmender Höhe, da das in der Stratopause befindliche Ozon UV-Strahlung absorbiert und in Wärme umwandelt.

⁷⁴ Die Mesosphäre wird in etwa 80 km Höhe durch die Mesopause begrenzt. Aufgrund der ausgedünnten Luft und dem geringen Ozonanteil sinkt die Temperatur mit zunehmender Höhe.

⁷⁵ Die Thermosphäre reicht bis etwa 500 - 1.000 km Höhe. Die Temperatur nimmt mit steigender Höhe zu, da die Gasmoleküle der extrem dünnen Atmosphärenschicht von der eintreffenden energiereichen kosmischen Strahlung ionisiert werden.

⁷⁶ Die Exosphäre stellt den fließenden Übergang zum interplanetaren Raum dar. Ihre äußere Grenze von 10.000 km Höhe ist nicht genau definiert, da die Gasdichte kontinuierlich abnimmt und theoretisch nie den Wert Null erreicht. Erst hier können Gasteilchen der Atmosphäre das Gravitationsfeld aufgrund der eigenen Geschwindigkeit verlassen.

Dieses Gasgemisch kann zeitlich und örtlich stark wechselnd durchsetzt sein mit:

- Wasserdampf (bis 4%)
- Kohlenstoffdioxid (385 ppm - mit steigender Tendenz)⁷⁷
- weiteren Gasen (Ozon, Radon, Schwefeldioxid, Kohlenstoffmonoxid, Methan, Neon, Helium, Kohlenwasserstoffe)
- Aerosolen (Sulfate, Nitrate, Staub, Asche, Meerwassersalz, Eiskristalle, Biomasse).

Der jährliche Sonnenenergiestrom an der oberen Grenze der Erdatmosphäre beträgt etwa $E_{0,a} = 5,6 \cdot 10^{24}$ J bzw. $1,56 \cdot 10^{18}$ kWh Leistung. Hiervon werden ca. 33% am oberen Atmosphärenrand ins All zurück reflektiert, während 67% in die Atmosphäre eindringen. Von der gesamten auf der äußeren Atmosphärenschicht auftreffenden Strahlung werden auf der Erde umgewandelt:

- 43% für die Erwärmung der Erdoberfläche
- 23% für Verdunstung und Niederschlagsbildung
- 0,5% für Luftströmung und Windenergie
- 0,3% für in die Photosynthese
- 0,2% für Wellenbildung und Wasserströmungen.

9.5.2 Optisches Fenster

Die Erdatmosphäre ist für solare Strahlung größtenteils undurchlässig und bietet nur zwei kleine optische Fenster im Wellenlängenbereich von $\lambda = 0,3 - 5,0 \mu\text{m}$ und im niederfrequenten Bereich mit Wellenlängen von $\lambda = 0,01 - 100 \text{ m}$. Aus Leistungsgründen ist für die Solarenergienutzung nur das Fenster im Bereich des sichtbaren Lichtes von $\lambda = 0,38 - 0,78 \mu\text{m}$ bedeutsam. Durch Absorption werden Röntgen- und Teilchenstrahlung vollständig und UV-Strahlung beinahe vollständig geschluckt. Somit unterscheidet sich das auf der Erdoberfläche eintreffende Lichtspektrum stark von dem der extraterrestrischen Strahlung.

9.5.3 Strahlungsspektrum

Das Spektrum gibt die Zusammensetzung des Lichtes als Anteile der verschiedenen Wellenlängen an der Gesamtstrahlung an. Die Sonne strahlt ein elektromagnetisches Spektrum im Wellenlängenbereich $\lambda = 0,25 - 5 \mu\text{m}$ aus, also von Röntgenstrahlen über Ultraviolett-Strahlung und sichtbares Licht bis hin zur Infrarot-Wärmestrahlung. Beim extraterrestrischen Spektrum entfallen 7% der Einstrahlung auf den ultravioletten, 47% auf den sichtbaren und 46% auf den infraroten Bereich. 98,8% der extraterrestrischen Strahlung entfallen auf den Bereich $\lambda = 0,25 - 3,5 \mu\text{m}$, davon sind 48% sichtbares Licht und 32,6% nahe Infrarotstrahlung. Damit ist die Sonnenstrahlung eine kurzwellige Strahlung.

⁷⁷ Der Wert von 385 ppm gilt für das Jahr 2008. Die jährliche Zunahme beträgt ca. 1,4 ppm.

Die Solarkonstante $I_{sc} = 1367 \text{ W/m}^2$ ist ein Integralwert, welcher der Fläche unter der Kurve der extraterrestrischen Strahlung für alle Wellenlängen des gesamten Sonnenspektrums (s. *Abbildung 9.1*) entspricht.

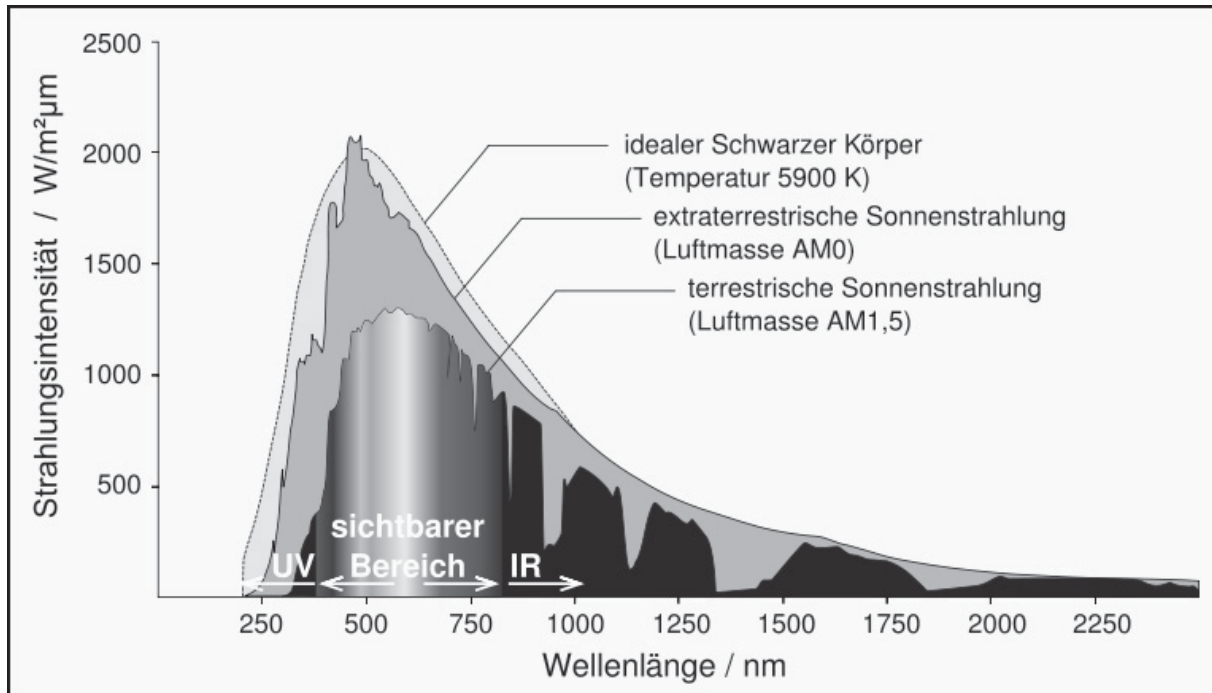


Abbildung 9.1: Sonnenspektrum mit Kurven der Extraterrestrischen und Terrestrischen Sonnenstrahlung sowie selektiver Absorption

(Grafik: Wikipedia Commons)

Beim Passieren der Atmosphäre wird die Sonnenstrahlung durch selektive Absorption geschwächt. Hierbei werden Teile der solaren Strahlungsenergie absorbiert und in Wärme umgewandelt. Verschiedene Gasteilchen der Atmosphäre wie Wasserdampf, Ozon, Sauerstoff und Kohlenstoffdioxid sind stark selektiv und absorbieren nur bestimmte Spektral- und Wellenlängenbereiche des Sonnenlichtes. Beim terrestrischen Spektrum sind deshalb deutliche Einbrüche infolge Absorption verschiedener Gase zu erkennen (s. *Abbildung 9.1*).

9.6 Modellierung der Erdatmosphäre

Beim einfachen Schalenmodell der Erdatmosphäre (s. *Abbildung 9.2*) können die Transmissionsgrade der einzelnen Schichten miteinander multipliziert werden. Dabei werden die Konzentrationen der einzelnen atmosphärischen Komponenten durch die jeweiligen Dicken der einzelnen Schichten repräsentiert. Die Transmissionskoeffizienten der jeweiligen Schicht werden separat bestimmt und zur Bilanzierung von Direkt- und Diffusstrahlung genutzt.

Diese Transmissionsgrade der wolkenlosen Atmosphäre werden im Gesamttransmissionsgrad τ_{RNC} (s. Abbildung 9.3) zusammengefasst:

$$\tau_{RNC} = \tau_W \cdot \tau_A \cdot \tau_R \cdot \tau_G \cdot \tau_{O_3} \quad (9.16)$$

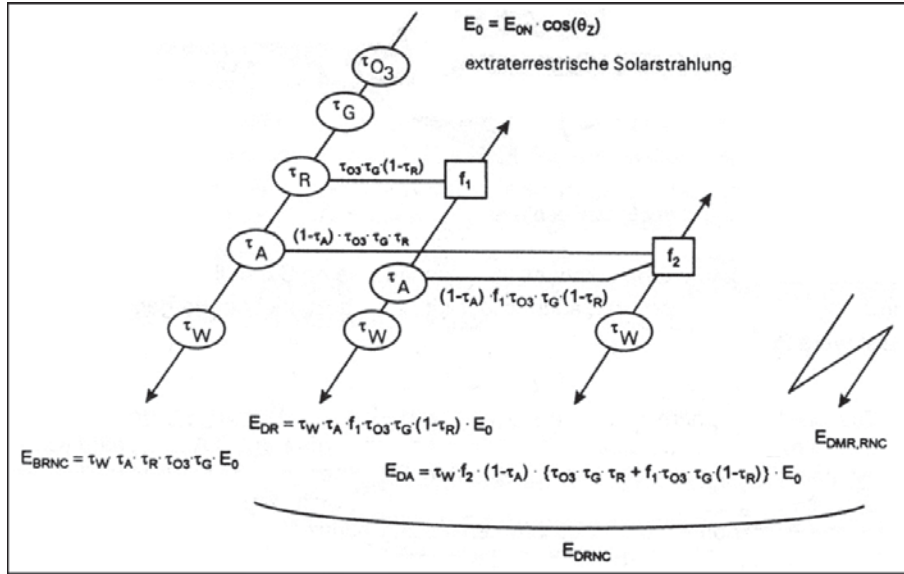


Abbildung 9.3: Modellierung der Direkt- und Diffusstrahlung sowie Mehrfachreflexion in der wolkenlosen RNC-Atmosphäre

(Grafik: Schabach (1998), S. 8)

Mit dem Gesamttransmissionsgrad der einzelnen Schichten τ_{RNC} , der extraterrestrischen Solarstrahlung auf eine Fläche normal zur Strahlungsrichtung E_{0n} sowie dem Zenitwinkel zwischen Flächennormalen der horizontalen Fläche und Strahlungsrichtung θ_z kann die auf eine horizontale Ebene auf der Erde auftreffende Direktstrahlung $E_{B,RNC}$ ⁸⁰ berechnen zu:

$$E_{B,RNC} = \tau_{RNC} \cdot E_{0n} \cdot \cos \theta_z \quad (9.17)$$

Zusätzlich zur Direktstrahlung $E_{B,RNC}$ erreicht die Diffusstrahlung $E_{D,RNC}$ ⁸¹ die horizontale Empfangsfläche auf der Erdoberfläche. Sie beinhaltet die Gesamtheit der gestreuten und reflektierten Strahlung aus dem Halbraum über ihr. Die den Erdboden erreichende primäre Diffusstrahlung besteht aus dem von Luftmolekülen (Rayleigh-Streuung) verursachten Diffusanteil E_{DR} und dem durch Aerosole (Mie-Streuung) entstandenen Anteil E_{DA} . Zusätzlich muss die Mehrfachreflexion zwischen Atmosphäre und Erdboden $E_{DMR,RNC}$ berücksichtigt werden (s. Abbildung 9.3). Damit ergibt sich:

$$E_{D,RNC} = E_{DR} + E_{DA} + E_{DMR,RNC} \quad (9.18)$$

⁸⁰ $E_{B,RNC}$ = Direktstrahlung (beam) in wolkenloser RNC-Atmosphäre

⁸¹ $E_{D,RNC}$ = Diffusstrahlung (diffuse) in wolkenloser RNC-Atmosphäre

9.7.1 Rayleigh-Streuung

Die Rayleigh-Streuung⁸² erfolgt an molekularen Bestandteilen der Luft, deren Durchmesser weniger als ein Zehntel der Wellenlänge des einfallenden Lichtes beträgt. Es erfolgt keine Änderung der Wellenlänge oder Umwandlung in eine andere Energieform, sondern lediglich eine Ablenkung der Strahlungsrichtung. Die Strahldichte vorwärts ($\varphi = 0^\circ$) und rückwärts ($\varphi = 180^\circ$) ist etwa doppelt so groß wie seitlich. Diese Symmetrie bewirkt, dass die Hälfte der Strahlung in den Weltraum zurückgeworfen wird und nur die andere Hälfte auf die Erde fällt. Hieraus ergibt sich der Faktor $f_R = 0,5$, welcher den zum Boden hin gestreuten Anteil beschreibt. Der Anteil $(1 - f_R)$ wird in den Weltraum zurückgestrahlt.

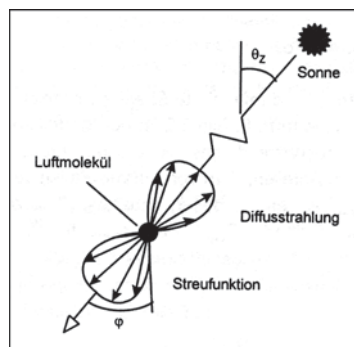


Abbildung 9.4: Rayleigh-Streuung an Molekülen

(Grafik: Schabbach (1998), S. 10)

Der Diffusstrahlungsanteil E_{DR} aus Streuung an molekularen Atmosphärenbestandteilen berechnet sich damit zu:

$$E_{DR} = \tau_W \cdot \tau_A \cdot f_R \cdot (1 - \tau_R) \cdot \tau_G \cdot \tau_{O_3} \cdot E_{0n} \cdot \cos \theta_z \quad (9.19)$$

9.7.2 Mie-Streuung

Die Mie-Streuung⁸³ beschreibt Streuprozesse an Aerosolen, also Feststoffpartikeln im Größenbereich $5 \cdot 10^{-2} \mu\text{m}$ bis $50 \mu\text{m}$. Diese größeren Teilchen werden entweder als mineralischer Staub vom Erdboden hoch gewirbelt oder sind industriell bedingte Rauch-, Ruß- oder Ascheteilchen. Die Mie-Streuung ist weniger von der Wellenlänge des einfallenden Lichtes abhängig als die Rayleigh-Streuung, sondern vom Standort und dem Grad der Luftverunreinigung. Der zum Erdboden hingeworfene Anteil f_M ist hingegen von der Strahlungsabsorption der Aerosole ω_o und dem zenitwinkelabhängigem Verhältnis von vorwärtsgestreutem zu gesamtaerosolgestreutem Anteil F_c abhängig und ergibt sich somit zu:

$$f_M = \omega_o \cdot F_c \quad (9.20)$$

⁸² nach John William Strutt, 3. Baron Rayleigh (1842-1919)

⁸³ nach Gustav Adolf Feodor Wilhelm Ludwig Mie (1868-1957)

Für ω_o gelten Werte von 0,6 (bei starken Luftverunreinigungen) bis 0,95 (bei unbelasteter Luft). Für F_c gelten Werte von 0,91 (für Zenitwinkel von 0° bis 45°) und $0,45 + 0,65 \cdot \cos \theta_z$ (für Zenitwinkel von 45° bis 85°).

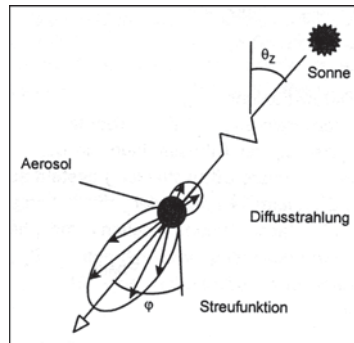


Abbildung 9.5: Mie-Streuung an Aerosolen

(Grafik: Schabbach (1998), S. 10)

Die Diffusstrahlung nach Streuung an Aerosolen E_{DA} unter Berücksichtigung des molekülgestreuten Diffusanteils E_{DR} ergibt sich aus:

$$E_{DA} = \tau_W \cdot f_M \cdot (1 - \tau_A) \cdot [\tau_R \cdot \tau_G \cdot \tau_{O3} + f_R \cdot (1 - \tau_R) \cdot \tau_G \cdot \tau_{O3}] \cdot E_{0n} \cdot \cos \theta_z \quad (9.21)$$

9.7.3 Mehrfachreflexion zwischen Himmel und Umgebung

Nach der primären Durchstrahlung der wolkenlosen Erdatmosphäre treffen auf den Erdboden die Direktstrahlung $E_{B,RNC}$ und die Diffusstrahlungsanteile E_{DR} und E_{DA} . Diese werden vom Erdboden wiederum diffus reflektiert, wobei der mittlere Reflexionskoeffizient⁸⁴ des Erdbodens von Jahreszeit, Bewuchs und Versiegelungsgrad abhängig ist. Dieser vom Erdboden reflektierte Anteil wird von der Atmosphäre bei klarem Himmel wiederum diffus nach unten reflektiert (s. Abbildung 9.6).

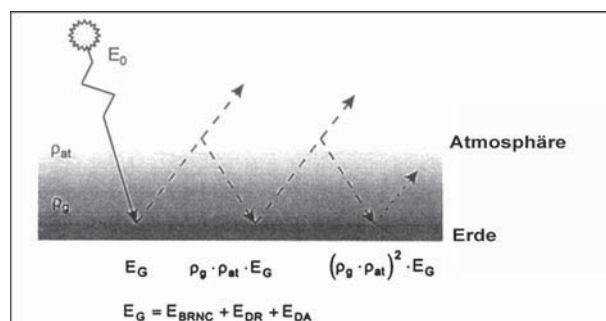


Abbildung 9.6: Mehrfachreflexionen zwischen Erdoberfläche und Himmel

(Grafik: Schabbach (1998), S. 8; eigene Überarbeitung)

⁸⁴ Albedo

Für den Reflexionskoeffizienten des Bodens ρ_g gilt der übliche Mittelwert von $\rho_g = 0,2$. Er kann jedoch konkret im Bereich von 0,05 (Wald) bis 0,9 (Schnee) liegen. Für den Reflexionskoeffizienten des Himmels ρ_{at} gilt folgende Beziehung zum Gesamtbedeckungsgrad N und dem mittleren Wolkenreflexionskoeffizienten ρ_c :

$$\rho_{at} = 0,0658 \cdot (1 - N) + 0,0124 + \rho_c \cdot N \quad (9.22)$$

Dieser setzt sich zusammen aus der Reflexion an molekularen Bestandteilen des unbewölkten Himmels ($0,0658 \cdot (1 - N)$), der Aerosolstreuung am unbewölkten Himmel ($0,0124$) und der Reflexion des wolkenbedeckten Himmels ($\rho_c \cdot N$).

Der mittlere Wert für die Reflexion an der Wolkenunterseite beträgt $\rho_c = 0,6$. Bei wolkenloser Atmosphäre ($N = 0$) beträgt somit der Reflexionskoeffizient des Himmels $\rho_{at,RNC} = 0,0782$.

9.7.4 Gesamtbetrag der Diffusstrahlung $E_{DMR,RNC}$

Daraus folgt der Gesamtbetrag, der als Diffusstrahlung $E_{DMR,RNC}$ infolge Mehrfachreflexion zusätzlich den Boden erreicht:

$$\begin{aligned} E_{DMR,RNC} &= (E_{B,RNC} + E_{DR} + E_{DA}) \cdot \left\{ \rho_g \cdot \rho_{at} + (\rho_g \cdot \rho_{at})^2 + (\rho_g \cdot \rho_{at})^3 + \dots \right\} \quad (9.23) \\ &= (E_{B,RNC} + E_{DR} + E_{DA}) \cdot \frac{\rho_g \cdot \rho_{at}}{1 - \rho_g \cdot \rho_{at}} \end{aligned}$$

Einen Überblick über die oben beschriebenen strahlungsphysikalischen Vorgänge in der Erdatmosphäre unter verschiedenen Bedingungen gibt *Abbildung 9.7*.

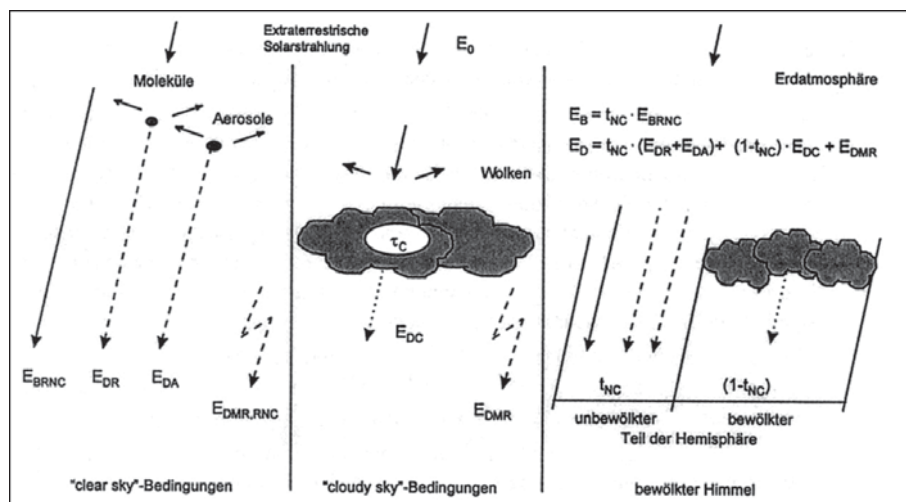


Abbildung 9.7: Strahlungsphysikalische Vorgänge in der Atmosphäre unter verschiedenen Bedingungen

(Grafik: Schabach (1998), S. 4)

9.8 Air Mass AM

Die Luftmasse AM ist ein astronomisches Maß für den relativen Weg, den die Strahlung durch die Atmosphäre bis zum Boden zurücklegen muss. Dabei gibt es einen Zusammenhang zwischen der Sonnenhöhe und den jeweiligen Reduktionseinflüssen definiert als:

$$AM = \frac{1}{\sin \alpha} \quad (9.24)$$

Bei senkrechtem Sonnenstand beträgt $AM = 1$, im Weltall gilt $AM = 0$.

Die Extinktionsverluste beim Durchstrahlen der Permanentgasschicht sind ausschließlich abhängig von der Länge des zurückzulegenden Weges durch die Atmosphäre sowie der Dichte der Atmosphärenbestandteile. Die Permanentgaskonzentrationen sind im Jahresverlauf konstant anzunehmen, während die Ozonkonzentration saisonalen Schwankungen unterliegt. Deshalb können die Transmissionsgrade t_{CD} , t_G und t_R durch die aus dem Zenitwinkel θ_Z resultierende relative optische Masse AM bestimmt werden, während für den Transmissionsgrad der Ozonschicht t_{O_3} die im Jahresverlauf variierende Ozonkonzentration benötigt wird.

Die Extinktionsverluste der Aerosol- und Wasserdampfschicht zeigen zusätzlich zur saisonalen Variation eine erhebliche Beeinflussung durch das aktuelle Wettergeschehen. Zur Berechnung des mittleren Transmissionsgrades t_A wird der Mittelwert des Trübungsfaktors und für t_W der mittlere Jahresverlauf des Wasserdampfgehaltes aus Umgebungstemperatur und relativer Feuchte ermittelt.

Das Extinktionsgesetz von *Bouguer*⁸⁵ beschreibt die wolkenlose Atmosphäre als ein optisch trübes und deshalb absorbierendes und streuendes Medium. Es besagt, dass in Abhängigkeit von der Wellenlänge λ die Abnahme der spektralen Strahldichte dE_λ proportional zur durchstrahlten Strecke ds und der Dichte $\rho(s)$ des absorbierenden und streuenden Mediums ist. Der Schwächungsfaktor $\mu(\lambda, s)$ ist ebenso wellenlängen- und schichtdickeabhängig.

$$\frac{dE_\lambda}{E_\lambda} = -\mu(\lambda, s) \cdot \rho(s) \cdot ds \quad (9.25)$$

Mit Annahme des *Lambert-Beerschen*⁸⁶ Gesetzes, der Proportionalitätsfaktor $\mu(\lambda, s)$ sei unabhängig vom Weg, erhält man durch Integration über die gesamte Weglänge s der Solarstrahlung für jede Wellenlänge den spektralen Transmissionsgrad t_λ des Mediums.

$$\tau_\lambda = \frac{E_\lambda(s=0)}{E_{\lambda,0}} = \exp \left[-\mu(\lambda) \cdot \int_{s=0}^{\infty} \rho(s) ds \right] \quad (9.26)$$

⁸⁵ Pierre Bouguer (1698-1758)

⁸⁶ nach Johann Heinrich Lambert (1728-1777) und August Beer (1825-1863)

Die spektrale Strahldichte dE_λ der Solarstrahlung in großer Höhe entspricht der Extraterrestrischen Strahlung $E_{\lambda 0}$ am Atmosphärenrand. Das Integral beschreibt die optische Masse m :

$$m = \int_{s=0}^{\infty} \rho(z) dz \quad (9.27)$$

Wo die Sonne im Zenit steht, ist der Weg der Strahlung durch die Atmosphäre am kürzesten ($s = z$) und die optische Masse m erreicht ihren niedrigsten Wert.

$$m_0 = \int_{z=0}^{\infty} \rho(z) dz \quad (9.28)$$

Die relative optische Masse AM ergibt sich aus

$$AM = \frac{m}{m_0} = \frac{\int_{s=0}^{\infty} \rho(s) ds}{\int_{z=0}^{\infty} \rho(z) dz} \quad (9.29)$$

Die relative optische Masse erreicht ihren minimalen Wert ($AM = 1$) nur, wenn der Atmosphärendurchgang exakt senkrecht zur Erdoberfläche erfolgt (Zenitwinkel $\theta_Z = 0^\circ$). Für alle anderen Fälle gilt $AM > 1$. Für eine homogene, nicht brechende Atmosphäre beschreibt der Weg der einfallenden Solarstrahlung eine Gerade. Damit ergibt sich AM zu:

$$AM = \frac{1}{\cos \theta_Z} = \frac{1}{\sin \alpha} \quad (9.30)$$

Die Strahlen werden jedoch beim Durchgang durch die verschiedenen Medien der schichtförmig zusammengesetzten Atmosphäre unterschiedlich gebrochen (s. *Abbildung 9.8*).

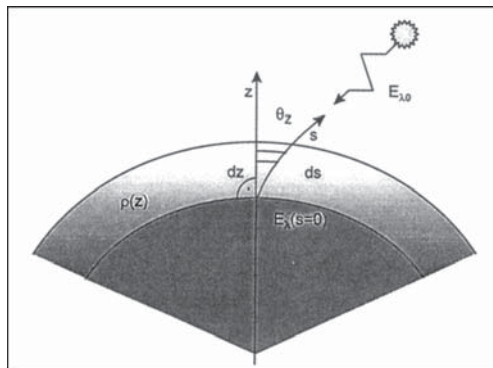


Abbildung 9.8: Weglänge in Abhängigkeit vom Zenitwinkel

(Grafik: Schabbach (1998), S. 14)

Unter Normalbedingungen n ergibt sich die relative optische Masse zu:

$$AM_n = \frac{1}{\cos \theta_z + 0,50572 \cdot (96,07995 - \theta_z)^{-1,6364}} \quad (9.31)$$

Liegen keine Normalbedingungen vor, wird die Abhängigkeit vom Luftdruck p bzw. der Ortshöhe h mit folgenden Formeln angegeben:

$$AM = AM_n \cdot \frac{p}{1013,25 \text{ mbar}} \quad (9.32)$$

$$AM = AM_n \cdot \exp\left(-\frac{h_M}{8445,95 \text{ m}}\right) \quad (9.33)$$

Mit der relativen optischen Masse AM folgt für das Extinktionsgesetz zur Bestimmung des spektralen Transmissionsgrades aus Formel (9.26):

$$\tau_\lambda = \exp[-\mu(\lambda) \cdot AM \cdot m_0] \quad (9.34)$$

Der dimensionslose spektrale Extinktionskoeffizient δ_λ berechnet sich zu:

$$\delta_\lambda = \mu(\lambda) \cdot m_0 \quad (9.35)$$

Durch Integration über das gesamte solare Spektrum erhält man den Gesamttextinktionskoeffizienten δ sowie den Gesamttransmissionsgrad τ

$$\delta = \int_{\lambda=0}^{\infty} \delta_\lambda d\lambda \quad (9.36)$$

$$\tau = \int_{\lambda=0}^{\infty} \tau_\lambda d\lambda = \exp[-AM \cdot \delta] \quad (9.37)$$

9.8.1 Extinktion in der CD-Atmosphäre

Im vereinfachten Schalenmodell gilt für den Transmissionsgrad τ_{CD} der reinen trockenen CD-Atmosphäre

$$\tau_{CD} = \tau_R \cdot \tau_{O_3} \cdot \tau_G \quad (9.38)$$

Die drei Extinktionskoeffizienten δ_R , δ_{O_3} und δ_G werden auch zum Gesamttextinktionskoeffizienten δ_{CD} , der integralen optischen Dicke der CD-Atmosphäre zusammengefasst zu:

$$\tau_{CD} = \exp(-\delta_{CD} \cdot AM) \quad (9.39)$$

Dieser berücksichtigt die Streuung an Gasmolekülen und die Absorption durch die Gase Ozon, Kohlendioxid und Sauerstoff innerhalb der Atmosphäre. Es gelten folgende Approximationen:

$$AM > 20: \quad \delta_{CD} = \frac{1}{9,4 + 0,9 \cdot AM} \quad (9.40)$$

$$1 \leq AM \leq 20: \quad \delta_{CD} = \frac{1}{6,6296 + 1,7513 \cdot AM - 0,1202 \cdot AM^2 + 0,0065 \cdot AM^3 - 0,00013 \cdot AM^4} \quad (9.41)$$

9.8.2 Absorption durch Ozon

Aus Sauerstoff entsteht in der Stratosphäre durch Absorption von UV-Strahlung Ozon. Hier befinden sich etwa 90% dieses Gases. In 30 km Höhe erreicht der Ozongehalt sein Maximum bei ca. 10 ppm. Die mittlere Vertikal- und Gesamtozonverteilung hängt von der geographischen Breite und der Jahreszeit ab. Der mittlere Ozongehalt h_{O_3} beträgt am Äquator unter Normalbedingungen $0,24 \text{ cm(NTP)}^{87}$ und nimmt mit dem Breitengrad zu, so dass in den Polarregionen bis zu $0,46 \text{ cm(NTP)}$ gemessen werden. Jahreszeitlich erreicht der Ozongehalt sein Maximum im Frühjahr und sein Minimum im Herbst. Ozon absorbiert etwa 50% der solaren UV-Strahlung und schützt somit das Leben auf der Erde.

Der Transmissionsgrad der Ozonabsorption τ_{O_3} kann in Abhängigkeit von der relativen durchstrahlten Luftmasse AM berechnet werden zu:

$$\begin{aligned} \tau_{O_3} &= 1 - \alpha_{O_3} \\ &= 1 - \frac{0,153 \cdot h_{O_3} \cdot AM}{(1 + 139,5 \cdot h_{O_3} \cdot AM)^{0,3035}} \end{aligned} \quad (9.42)$$

Der mittleren Ozongehalt h_{O_3} lässt sich in Abhängigkeit von Breitengrad φ , Längengrad λ und Jahrestag n berechnen zu:

$$h_{O_3} = 0,235 + [150 + 4 \cdot \sin(0,0172 \cdot (n - 30)) + 20 \cdot \sin(3 \cdot (\lambda + 0,35))] \cdot \sin^2(1,28 \cdot \varphi) \cdot 10^{-3} \quad (9.43)$$

9.8.3 Absorption durch Permanentgase

Bis ca. 100 km Höhe ist die Zusammensetzung der Luft nahezu konstant, nur der Wasserdampfgehalt nimmt rasch ab. Die Strahlungsabsorption durch die Permanentgase Stickstoff, Sauerstoff und Kohlendioxid ist daher nur abhängig von der Länge der durchstrahlten Luftsäule AM . Der Transmissionsgrad der Permanentgasschicht beträgt approximiert:

$$\tau_G = \exp(-0,0127 \cdot AM^{0,26}) \quad (9.44)$$

⁸⁷ Standardbedingungen (engl. „Normal Temperature and Pressure“): Standardtemperatur $T = 298,15 \text{ K} = 25 \text{ °C}$ oder $T = 293,15 \text{ K} = 20 \text{ °C}$; Standarddruck $p = 1 \text{ atm} = 101325 \text{ Pa} = 1,01325 \text{ bar}$

9.8.4 Streuung an Molekülen

Der Transmissionsgrad infolge Streuung an Molekülen τ_R wird aus dem Transmissionsgrad der trockenen wolkenlosen Atmosphäre τ_{CD} und den Transmissionsgraden infolge Absorption durch Permanentgase τ_G und Ozon τ_{O_3} bestimmt zu:

$$\tau_R = \frac{\tau_{CD}}{\tau_G \cdot \tau_{O_3}} \quad (9.45)$$

9.8.5 Absorption durch Wasserdampf

Gasförmiger Wasserdampf ist der stärkste Absorber der realen, wolkenfreien RNC-Atmosphäre. Die vertikale Verteilung zeigt, dass sich in den unteren 2 km 50% und in den unteren 4 km 95% der Gesamtmenge an Wasserdampf befinden. Oberhalb der Troposphäre ist nur sehr wenig Wasserdampf vorhanden. Bis zu 10 % der einfallenden Solarstrahlung werden von Wasserdampf in mehreren spektralen Banden absorbiert. Die spektral gemittelte atmosphärische Extinktion durch Wasserdampf τ_W kann durch AM und den Wasserdampfgehalt w in cm(ppw) beschrieben werden:

$$\begin{aligned} \tau_W &= 1 - \alpha_W \\ &= 1 - \frac{3,014 \cdot w \cdot AM}{(1 + 119,3 \cdot w \cdot AM)^{0,644} + (5,814 \cdot w \cdot AM)} \end{aligned} \quad (9.46)$$

Der Wasserdampfgehalt der Atmosphäre w wird über die Integrationsgleichung der höhenabhängigen Wasserdampfdichte bestimmt, welche sich vereinfacht aus der relativen Feuchte ϕ , der Umgebungstemperatur T_u und dem Sättigungsdampfdruck p_s in Bodennähe ergibt:

$$w = 0,4933 \cdot \frac{\phi}{T_u} \cdot p_s(T_u) \quad (9.47)$$

Dabei ergibt sich der Sättigungsdampfdruck aus der semiempirischen Formel:

$$p_s = \exp\left(26,23 - \frac{5416}{T_u}\right) \quad (9.48)$$

Der Wasserdampfgehalt w kann auch direkt aus dem absoluten Wasserdampfgehalt x und dem örtlichen Luftdruck p ermittelt werden:

$$w = 0,4933 \cdot \frac{p}{T_u} \cdot \frac{x}{0,622 + x} \quad (9.49)$$

Der örtliche Luftdruck p berechnet sich dabei in Abhängigkeit von der Höhe des Ortes h_M :

$$p = 1,01325 \cdot 10^5 \cdot \exp\left(-\frac{h_M}{8445,95}\right) \quad (9.50)$$

9.8.6 Streuung an Aerosolen

Aerosole sind luftgetragene atmosphärische Verunreinigungen wie Staub, Rauch, Salzkristalle vor allem Ammoniumsulfat. Ein Großteil entsteht aus Salzen durch Abtrocknen in der Gischt zersprühten Meerwassers. Aufgrund hygroskopischer Eigenschaften variiert die Aerosolgröße durch Anlagerung kondensierten Wassers in Abhängig von der relativen Luftfeuchte. Der Aerosolgehalt ist in Erdbodennähe maximal und nimmt exponentiell mit zunehmender Höhe ab. In 10 km Höhe erreicht er nur noch ein Zehntausendstel des Bodenwertes.

Für den spektralen Transmissionsgrad infolge Aerosolstreuung $\tau_{A\lambda}$ gilt:

$$\tau_{A\lambda} = \exp(-\delta_{A\lambda} \cdot AM) \quad (9.51)$$

Die spektrale vertikale optische Dicke der Aerosolschicht $\delta_{A\lambda}$ ist eine Funktion der Wellenlänge λ . Der Wellenlängenexponent α ist das Maß der Aerosolgrößenverteilung. Der Angströmsche Trübungskoeffizient β gibt den Gehalt an Aerosolen in der Atmosphäre an.

$$\delta_{A\lambda} = \beta \cdot \left[\frac{\lambda}{\mu m} \right]^{-\alpha} \quad (9.52)$$

Der durch Aerosole verursachte Gesamttransmissionsgrad τ_A kann bestimmt werden zu:

$$\tau_A = 0,1245 \cdot \alpha - 0,0162 + (1,003 - 0,125 \cdot \alpha) \cdot \exp[-\beta \cdot AM \cdot (1,089 \cdot \alpha + 0,5123)] \quad (9.53)$$

Da für den Wellenlängenexponenten α und den Angströmschen Trübungskoeffizienten β jedoch kaum Messwerte vorliegen, verwendet man den Trübungsfaktor nach Linke⁸⁸ T_L , der die Strahlungsextinktion von Wasserdampf und Aerosolen zusammen beschreibt. T_L gibt an, einem wie vielfach längeren Weg durch die ideale Atmosphäre die Schwächung der Strahlung durch die tatsächliche Atmosphäre entspricht - also die Anzahl an reinen, trockenen CD-Atmosphären, die notwendig wären, um die gleiche Strahlungsextinktion wie die reale, wolkenlose RNC-Atmosphäre zu verursachen.

$$\tau_{RNC} = \tau_{CD} \cdot \tau_A \cdot \tau_W = \tau_{CD}^{T_L} \quad (9.54)$$

Der Transmissionsgrad der Aerosolschicht τ_A beträgt damit:

$$\tau_A = \frac{1}{\tau_W} \cdot \tau_{CD}^{(T_L-1)} = \frac{\tau_{RNC}}{\tau_W \cdot \tau_{CD}} \quad (9.55)$$

Für den Trübungsfaktor T_L gilt bezüglich der langjährigen Monatsmittel der Global- und Diffusstrahlung I_G und I_D :

⁸⁸ Karl Wilhelm Franz Linke (1878 - 1944) war deutscher Geophysiker und Meteorologe

$$T_L = (0,9 + 9,4 \cdot \cos \theta_z) \cdot \ln \left(\frac{I_D}{I_{G,RNC} - I_{D,RNC}} \right) \quad (9.56)$$

Der Trübungsfaktor der realen wolkenlosen Atmosphäre τ_{RNC} beschreibt den Anteil der Direktstrahlung $I_{B,RNC}$ an der am Boden ankommenden Strahlung I_0 :

$$\tau_{RNC} = \frac{I_{B,RNC}}{I_0} \quad (9.57)$$

Die Globalstrahlung $I_{G,RNC}$ setzt sich zusammen aus der Direktstrahlung $I_{B,RNC}$ und der Diffusstrahlung $I_{D,RNC}$, so dass für die Berechnung der Direktstrahlung gilt:

$$I_{B,RNC} = I_{G,RNC} - I_{D,RNC} \quad (9.58)$$

Mit Formel (9.56), (9.57) und (9.58) kann somit der Transmissionsgrad der realen wolkenlosen Atmosphäre τ_{RNC} berechnet werden zu:

$$\tau_{RNC} = \exp \left[- \frac{T_L}{0,9 + 9,4 \cdot \cos \theta_z} \right] \quad (9.59)$$

Mit Formel (9.54) und (9.59) erhält man den Transmissionsgrad der Aerosolschicht τ_A :

$$\tau_A = \frac{1}{\tau_W \cdot \tau_{CD}} \cdot \exp \left[- \frac{T_L}{0,9 + 9,4 \cdot \cos \theta_z} \right] \quad (9.60)$$

Der Trübungsfaktor T_L ist starken zeitlichen Schwankungen aufgrund großräumiger meteorologischer sowie geographisch-topographischer Bedingungen unterworfen. Der Verlauf der Temperatur und des davon beeinflussten Wasserdampfgehaltes der Luft ist an die Ausprägungen des Jahresganges gekoppelt. Aufgrund dieser oft starken Schwankungen sind nur mittlere Werte berechenbar.

9.9 Einfluss der Bewölkung auf die Solarstrahlung

Wolken beeinflussen den Strahlungshaushalt der Erde und damit die Lufttemperatur. Wolken am Tag schirmen die Globalstrahlung ab, so dass die Temperatur sinkt, während eine geschlossene Wolkendecke in der Nacht die terrestrische Wärmeabstrahlung ins Weltall und somit eine Abkühlung verhindert. Art und Grad der Bewölkung beeinflussen Qualität und Quantität der auf dem Erdboden ankommenden solaren Strahlung. Schon bei geringer Bewölkung wird die Direktstrahlung bereits stark reduziert. Dagegen nimmt die Diffusstrahlung infolge von strahlungsphysikalischen Streueffekten sowie Mehrfachreflexionen an den Wol-

kenunterseiten bei Bewölkung zu. Wolken sind Ansammlungen von unterschiedlich großen Wassertröpfchen oder Eiskristallen als Kondensations- bzw. Resublimationsprodukte. Je nach Größe und Auftreten bilden sie Wolken, Nebel, Dunst, Regen oder Schnee.

Wolken bestehen aus Aerosol, also einer Ansammlung fein disperser Teilchen im Gasgemisch der Luft. Erst nach Abkühlung unterhalb des Taupunktes bilden sich aus Wasserdampf Wassertröpfchen, unterhalb des Gefrierpunktes dann Eiskristalle. Die Wassertröpfchen messen im Durchmesser zwischen 1 bis 15 μm und haben daher nur eine geringe Fallgeschwindigkeit. Große Tropfen in Regenwolken erreichen Durchmesser von ca. 3 mm, überschreitet ihre Fallgeschwindigkeit infolge gravitativen Absinkens aufgrund zu geringer konvektiver Aufwinde einen bestimmten Schwellenwert, beginnt es zu regnen.

Über den Ozeanen führt Dimethylsulfid, ein Zersetzungsprodukt der Algen, zu Wolkenbildung. Über den Landflächen erfolgt Wolkenbildung durch Kondensation oder Resublimation von Wasserdampf an Kondensationskernen, wie z.B. Staubkörnchen, größeren Molekülen, Pollen oder Salzkristallen. Erst die Veränderung von Temperatur und Luftfeuchtigkeit einer Luftmasse bewirkt die Entstehung oder Auflösung von sichtbaren Wolken. Treibende Kräfte sind hierbei Hebungsprozesse durch Kalt- oder Warmfronten, thermische Aufwinde, Hangaufwinde sowie die Zufuhr kälterer oder feuchterer Luftmassen. An der Oberfläche der Wassertröpfchen findet ein ständiger Austausch von Wassermolekülen mit der Umgebungsluft statt. Nur wenn die Kondensationsrate höher ist als die Verdunstungsrate können Tröpfchen wachsen und zur Wolkenbildung führen. Dieser Prozess ist abhängig von der Anzahl der Wasserdampfmoleküle und der Temperatur der Wassertropfen. Wolkenbildung wird somit begünstigt durch niedrige Temperaturen und hohe Luftfeuchtigkeit.

Die optische Dicke einer Wolke bestimmt ihren Durchdringungs-, Absorptions- und Reflexionsgrad einer Wolke. Einflussgrößen sind die vertikale Ausdehnung, Verteilung, Menge und Größe der Tröpfchen und Kristalle sowie die Verteilung der Wolken selbst am Himmel. Wolken sind für kurzwellige UV-Strahlung durchlässiger als für das langwelligere sichtbare Licht. Direkte Strahlung wird nun zusätzlich zur Streuung an Luftteilchen auch an Wassertröpfchen gestreut, so dass die Photonenwege zunehmen, was zu mehr Absorption und damit zu einer verringerten Lichtmenge führt. Im globalen langjährigen Mittel strahlen Wolken 20% der kurzwelligen Strahlung zurück ins All und absorbieren zusätzlich 3%.

Neben der Reflexion nach oben ist ein weiterer wichtiger Effekt der Bewölkung auf die atmosphärische Gegenstrahlung das Zusammenspiel zwischen der Albedo der Bodenoberfläche und dem Reflektionsgrad der Wolkenunterseite. Die Albedo bestimmt, wie viel der direkten und diffusen Strahlung vom Erdboden wieder zurück in Richtung der Wolken reflektiert wird. Die optische Dicke der Wolke, welche zunächst die auf den Erdboden treffende Globalstrahlung negativ beeinflusst, bewirkt nun, dass die terrestrische Strahlung zum Teil wieder auf die Erde zurückreflektiert wird. Dabei kommt es beliebig oft zu Mehrfachreflexionen zwischen Erdboden und Wolkenunterseite. Dieser Effekt der atmosphärischen Gegenstrahlung erhöht die Globalstrahlung und gleicht den abschirmenden Effekt der Wolken teilweise wieder aus.

9.9.1 Wolkenklassifikation

Der Transmissionsgrad der Wolken hängt stark von der jeweiligen Wolkengattung ab. Ihre Absorptions-, Streu- und Reflexionseigenschaften hängen von Mächtigkeit, Höhe und Zusammensetzung der Wolke ab. Die phänomenologische Wolkenklassifikation unterscheidet zehn Wolkengattungen nach ihren typischen Höhenlagen (s. Abbildung 9.9 und Tabelle 9.1).

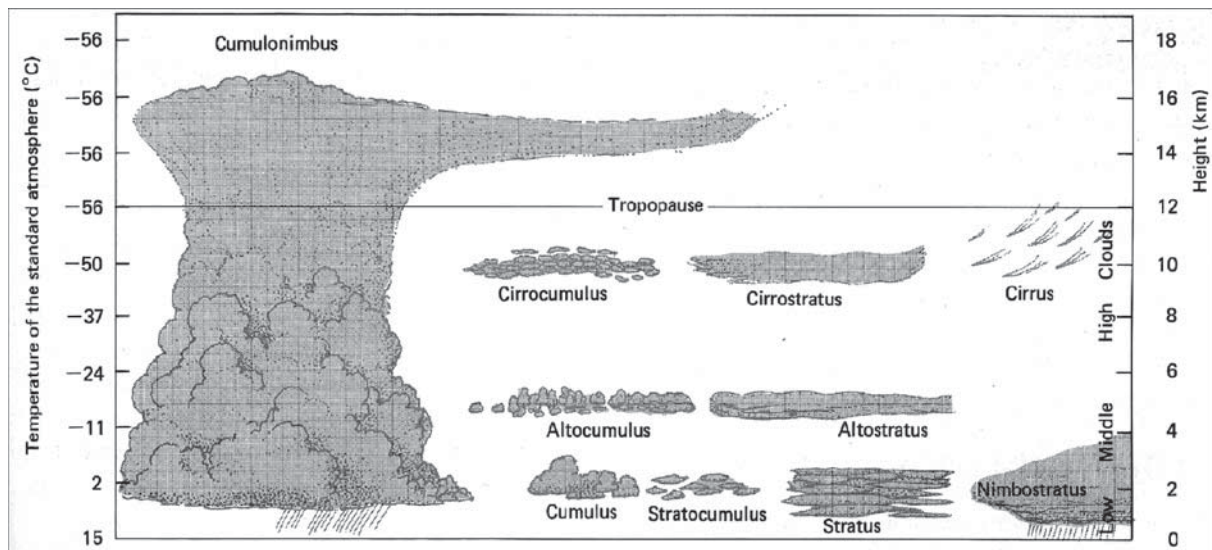


Abbildung 9.9: Die zehn Wolkentypen nach phänomenologischer Klassifikation

(Grafik: <http://iacweb.ethz.ch/staff/eszeter/vorlesung/Folien/wolkenphysik/wolkentypen.pdf> (Zugriff: 07.04.2009))

Gattung	Beschreibung	Transmissionsgrad τ_C
Hohe Wolken:	Untergrenze liegt über 6 km	
<i>Cirrus</i> (Ci)	Reine Eiswolken (getrennte Fasern)	0.5 bis 0.6
<i>Cirrostratus</i> (Cs)	Reine Eiswolken (gleichförmige Schicht)	0.5 bis 0.6
<i>Cirrocumulus</i> (Cc)	Reine Eiswolken (kleine Ballen)	0.5 bis 0.6
Mittelhohe Wolken:	Untergrenze liegt zwischen 2,5 und 6 km	
<i>Altostratus</i> (As)	(wie Cs) als gleichmäßige Wolkenschicht	0.2 bis 0.3
<i>Altopumulus</i> (Ac)	Schäfchenwolke (größer als Cc mit Flecken)	0.2 bis 0.3
Tiefe Wolken:	Untergrenze liegt unter 2,5 km	
<i>Nimbostratus</i> (Ns)	Graue Wolke, aus der Niederschlag fällt	0.15 bis 0.2
<i>Stratus</i> (St)	Hochnebel	0.2 bis 0.3
<i>Stratocumulus</i> (Sc)	Ausgedehnte Wolkenschicht größerer Wolken	0.2 bis 0.3
<i>Cumulus</i> (Cu)	Einzelne Haufenwolken mit bauchiger Oberseite	0.2 bis 0.3
<i>Cumulonimbus</i> (Cb)	Aufgetürmte Gewitterwolke	< 0.1

Tabelle 9.1: Die zehn Wolkentypen nach phänomenologischer Klassifikation

(Quelle: World Meteorological Organization (1990))

9.9.2 Einfluss der Bewölkung auf den Direktstrahlungsanteil

Die Auswirkung der Bewölkung ist für den Direkt- und Diffusstrahlungsanteil unterschiedlich. Dabei kann bereits die Passage dünner Cirruswolken die Direktstrahlung erheblich mindern.

Mit dem statistisch ermittelbaren relativen Direktstrahlungsanteil t_{NC} als Verhältnis von tatsächlicher gegenüber bei unbewölktem Himmel maximal möglicher Direktstrahlung ergibt sich für die Direktstrahlung bei bewölktem Himmel E_{BC} :

$$E_{BC} = t_{NC} \cdot E_{B,RNC} \quad (9.61)$$

9.9.3 Einfluss der Bewölkung auf den Diffusstrahlungsanteil

Aus dem unbewölkten Teil des Himmels treffen die Diffusstrahlungsanteile E_{DR}^{89} und E_{DA}^{90} auf die horizontale Empfangsfläche. Mit dem gattungsspezifischen Wolkentransmissionsgrad τ_C , welcher das Verhältnis der die Wolken durchdringenden zu der auf die Wolken treffender Solarstrahlung beschreibt, kann der aus dem bewölkten Teil des Himmels auf die Empfangsfläche eintreffende Diffusanteil E_{DC} berechnet werden:

$$E_{DC} = \tau_C \cdot (E_{B,RNC} + E_{DR} + E_{DA}) \quad (9.62)$$

9.9.4 Bedeckungsgrad

Grob wird zwischen wolkenfreiem, bewölkten und vollständig bedecktem Himmel unterschieden. Der Bedeckungsgrad N gibt den Teilbetrag des Himmels in Achteln an, der von Wolken bedeckt ist und wird zu festgelegten Uhrzeiten im Tagesverlauf gemessen (in Octa 0 bis 8). Der Bedeckungsgrad N und der relative Direktstrahlungsanteil t_{NC} hängen wie folgt zusammen:

$$N = 1 - t_{NC} \quad (9.63)$$

Bei einem kontinuierlich erfassten Bedeckungsgrad N kann die aus dem gesamten Halbraum auf die Empfangsfläche treffende Diffusstrahlung berechnet werden zu:

$$E_D = (1 - N) \cdot (E_{DR} + E_{DA}) + N \cdot E_{DC} + E_{DMR} \quad (9.64)$$

Für ein Zeitintervall Δt ergeben sich somit folgende Strahlungssummen:

$$E_B = t_{NC}(\Delta t) \cdot E_{B,RNC} \quad (9.65)$$

$$E_D = t_{NC}(\Delta t) \cdot (E_{DR} + E_{DA}) + (1 - t_{NC}(\Delta t)) \cdot E_{DC} + E_{DMR} \quad (9.66)$$

⁸⁹ DR (diffuse Molekülstreuung nach Rayleigh)

⁹⁰ DA (diffuse Aerosolstreuung nach Mie)

Durch Mehrfachreflexion zwischen Erdboden und wolkenloser Atmosphäre wird der Diffusstrahlungsanteil um den Anteil E_{DMR} erhöht, welcher vom Reflexionskoeffizienten des Bodens ρ_g und dem Himmelsreflexionskoeffizienten ρ_{at} wie folgt abhängt:

$$E_{DMR} = (E_B + E_D) \cdot \frac{\rho_g \cdot \rho_{at}}{1 - \rho_g \cdot \rho_{at}} \quad (9.67)$$

Durch Bewölkung wird der Himmelsreflexionskoeffizient ρ_{at} erhöht:

$$\rho_{at} = 0.0658 \cdot t_{NC}(\Delta t) + 0.0124 + \rho_C \cdot (1 - t_{NC}(\Delta t)) \quad (9.68)$$

Dabei beträgt der mittlere Wert für die Reflexion an der Wolkenunterseite $\rho_C = 0.6$ gegenüber dem Himmelsreflexionskoeffizienten bei wolkenloser Atmosphäre $\rho_{at,RNC} = 0.0782$.

9.10 Global-, Direkt- und Diffusstrahlung

Die oben beschriebenen Streuungsmechanismen bewirken innerhalb der Atmosphäre, dass auf der Erdoberfläche sowohl direkte als auch diffuse Strahlung auftritt. Als Direktstrahlung $\dot{G}_{Dir}$ bezeichnet man die direkt von der Sonne kommende und an einem bestimmten Punkt auftreffende Strahlung. Diffusstrahlung⁹¹ $\dot{G}_{Diff}$ hingegen entsteht durch Streuungen in der Atmosphäre und erreicht einen bestimmten Empfangspunkt nur indirekt. Die Direktstrahlung und Diffusstrahlung werden auf eine horizontale Empfangsfläche bezogen. Aus ihnen setzt sich die ebenfalls horizontal gemessene Globalstrahlung $\dot{G}_G$ zusammen.

$$\dot{G}_G = \dot{G}_{Dir} + \dot{G}_{Diff} \quad (9.69)$$

Bei der Berechnung solarer Einstrahlung auf eine Empfangsfläche muss jedoch zwischen direkter und diffuser Strahlung unterschieden werden, da sie jeweils mit einem unterschiedlichen Einfallswinkel auf die Empfangsfläche eintreffen.

Der Anteil der Diffus- oder Direktstrahlung an der gesamten an einem Punkt auftreffenden Globalstrahlung unterliegt tages- und jahreszeitlichen Schwankungen. In mitteleuropäischen Breiten übersteigt im Jahresdurchschnitt der diffuse Strahlungsanteil $\dot{G}_{Diff}$ bei weitem den direkten Anteil $\dot{G}_{Dir}$. Selbst im Sommer, wenn der Anteil der direkten Strahlung stark zunimmt, bleibt er im Durchschnitt dennoch immer geringer als derjenige der Diffusstrahlung.

Die Intensität⁹² der Globalstrahlung I_G hängt von der geographischen Breite φ , der Tages- und Jahreszeit sowie den vorherrschenden Witterungsbedingungen ab. Bei tiefstehender Sonne hat die Sonnenstrahlung einen weiteren Weg durch die Lufthülle, so dass die zu

⁹¹ auch als Himmelsstrahlung bezeichnet

⁹² auch Bestrahlungsstärke oder Strahlungsstromdichte

durchstrahlende Luftmasse größer und infolgedessen die Intensität I_G kleiner wird. In Äquatornähe jedoch kann an klaren Sommertagen die Intensität $I_G = 1000 \text{ W/m}^2$ erreichen mit einem Direktanteil von 90% und einem Diffusanteil von 10% erreichen. In Mitteleuropa erreicht die Intensität höchstens $I_G = 900 \text{ W/m}^2$. An trüben Wintertagen mit völlig bedecktem Himmel kann die Intensität auf $I_G = 100 \text{ W/m}^2$ mit 100% Diffusanteil sinken.

Die mittlere jährliche Stärke der Globalstrahlung auf der Erdoberfläche liegt zwischen $I_G = 800 \text{ W/m}^2$ und 2400 W/m^2 . Die Verteilung der Jahressumme der Globalstrahlung, die auf eine horizontale Fläche auf der Erdoberfläche auftrifft, ist weltweit nicht gleichmäßig verteilt, sondern hängt neben dem Breitengrad auch von klimatischen und meteorologischen Einflussgrößen ab, wie auf entsprechenden Weltkarten zu sehen ist (s. Abbildung 9.10).

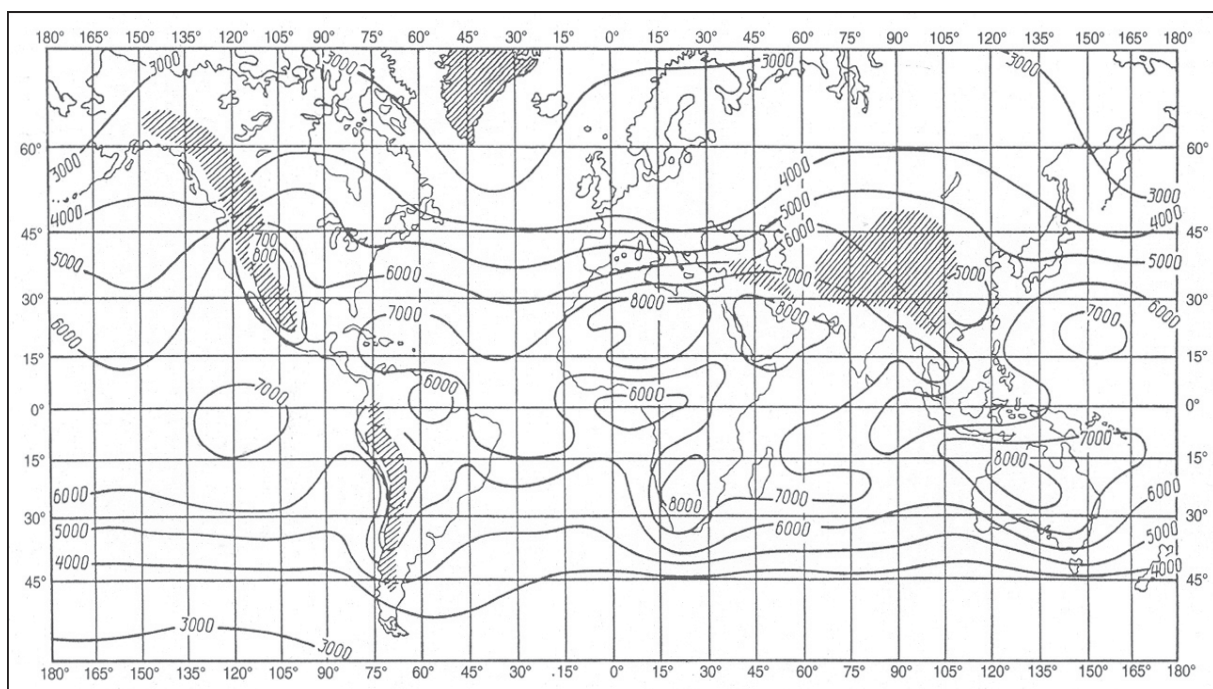


Abbildung 9.10: Jahreswerte der Globalstrahlung auf eine Horizontale in $\text{kJ/m}^2\text{a}$

(Grafik: Khartchenko (1995); S. 7)

Mitteleuropa erreicht über den gesamten Jahresverlauf insgesamt durchschnittlich die Globalstrahlung $\dot{G}_{G,\text{Jahr}} = 1000 \text{ kWh/m}^2\text{a} = 3,6 \text{ MJ/m}^2\text{a}$. Die mittlere tägliche Einstrahlung beträgt demnach $\dot{G}_{G,\text{Tag}} = 2,75 \text{ kWh/m}^2\text{a}$. Sie schwankt von maximal $\dot{G}_{G,\text{Tag,max}} = 8 \text{ kWh/m}^2\text{d}$ an einem klaren Sommertag bis minimal $\dot{G}_{G,\text{Tag,min}} = 0,1 \text{ kWh/m}^2\text{d}$ an einem bewölkten Wintertag.

9.11 Direktstrahlung auf geneigte Flächen

Zur Berechnung der Quantität solarer Einstrahlung auf eine beliebig orientierte und geneigte Empfangsfläche auf der Erde, die qualitative Zusammensetzung der Strahlung aus einem

Direkt- und einem Diffusanteil sowie ihre tages- und jahreszeitliche Verteilung müssen verschiedene astronomische und geometrische Werte bestimmt werden. Wichtig ist zunächst die Bestimmung des Zeitpunktes des solaren Empfanges über die Zeitgleichung Z und die wahre Ortszeit t_S , um hierüber die geometrischen Randbedingungen und Winkelstände berechnen zu können.

9.11.1 Zeitgleichung Z

Die *Zeitgleichung* Z ist eine Korrekturgleichung, welche für den Tag mit der Tageszahl n die nicht exakt kreisförmige, sondern im Jahresverlauf leicht elliptische Form der Kreisbahn der Erde um die Sonne ausgleichen soll:

$$Z = 0,0066 + 7,5325 \cdot \cos\left(\frac{360 \cdot n}{365} + 85,9^\circ\right) + 9,9359 \cdot \cos\left(2 \cdot \frac{360 \cdot n}{365} + 108,9^\circ\right) + 0,3387 \cdot \cos\left(3 \cdot \frac{360 \cdot n}{365} + 105,2^\circ\right) \quad (9.70)$$

9.11.2 Wahre Ortszeit (WOZ) t_S

Für die Berechnung der stündlichen Sonnenstrahlung wird die *wahre Ortszeit* (WOZ) genutzt, die auch als *Sonnenzeit* t_S bekannt ist. Bei Sonnenhöchststand gilt: $t_S = 12.00$ Uhr. Ein Sonnentag ist definiert als der Zeitraum, den die Sonne braucht, um wieder aus der gleichen Richtung zu erscheinen. Die Länge des Sonnentages variiert im Verlauf des Jahres. Eine Differenz von maximal 16 min pro Tag ist möglich. Dies liegt an der Elliptizität der Erdumlaufbahn um die Sonne und der Neigung der Erdachse gegenüber der Umlaufbahn.

Die Sonnenzeit t_S unterscheidet sich von der *örtlichen Standardzeit* bzw. *mittleren Ortszeit* (MOZ) t_0 aufgrund der Abweichung der geographischen Länge L_0 des Ortes P vom Bezugsmeridian L_S der jeweiligen Zeitzone. Für die mitteleuropäische Zeit (MEZ) liegt der Zeitmeridian auf 15° östlicher Länge, in der Sommerzeit wird der Zeitmeridian um 15 Grad nach Osten verschoben. Die Korrektur beträgt vier Minuten je Grad Längendifferenz.

$$MOZ = MEZ - 4 \cdot (15 - \lambda) \quad (9.71)$$

Die zweite Korrektur erfolgt durch die *Zeitgleichung* Z .

$$WOZ = MOZ + Z \quad (9.72)$$

Für Orte östlich vom Greenwich-Nullmeridian berechnet sich die wahre Ortszeit t_S somit zu:

$$t_S = t_0 + 4 \cdot (L_S - L_0) + Z \quad (9.73)$$

9.11.3 Die sechs Winkel zur Bestimmung des Sonnenstandes

Die Lage eines Ortes P auf der Erdoberfläche bezüglich der Sonnenstrahlung zu einem bestimmten Zeitpunkt t_s wird durch drei Hauptwinkel angegeben (s. *Abbildung 9.11*):

- geographische Breite φ
- Stundenwinkel ω
- Deklination der Sonne δ .

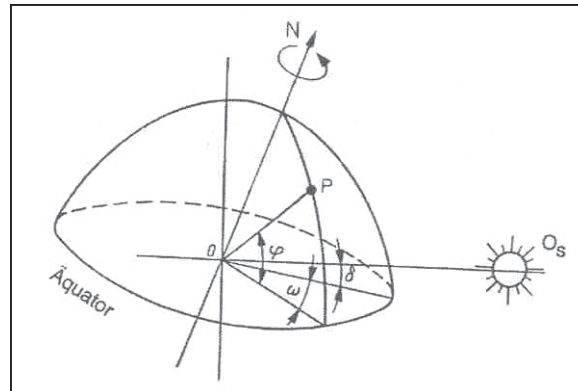


Abbildung 9.11: Die drei Hauptwinkel φ , ω und δ

(Grafik: Khartchenko (1995), S. 12)

Zur Berechnungen der einfallenden Sonnenstrahlen werden neben den oben genannten Hauptwinkeln noch folgende Winkel benötigt (s. *Abbildung 9.12*):

- Zenitwinkel der Sonne θ_z ,
- Höhenwinkel⁹³ der Sonne α
- Azimutwinkel der Sonne a_s .

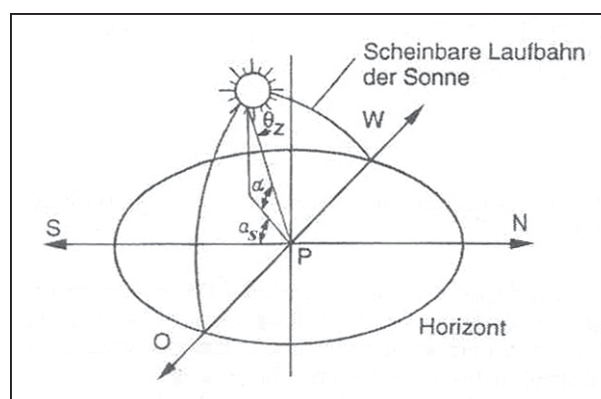


Abbildung 9.12: Die zusätzlich benötigten Winkel θ_z , α und a_s

(Grafik: Khartchenko (1995), S. 13)

⁹³ auch Elevation

9.11.4 Breitengrad φ

Die *geographische Breite* φ beschreibt den Winkelabstand beliebigen Ortes P vom Äquator. Sie ist der Winkel zwischen der Linie $\overline{OP}$, die den Ort P mit dem Erdzentrum O verbindet, und ihrer Projektion auf die Äquatorebene (s. Abbildung 9.11). Am Äquator gilt $\varphi = 0^\circ$, für die Nordhalbkugel gelten positive für die Südhalbkugel negative Angaben. Die Breitengradangaben für einen beliebigen Ort auf der Welt reichen von $\varphi = 90^\circ$ am Nordpol bis zu $\varphi = -90^\circ$ am Südpol.

9.11.5 Stundenwinkel ω

Der *Stundenwinkel* ω ist der Winkel in der Äquatorebene zwischen der Projektion der Linie $\overline{OP}$ und der Projektion der Linie $\overline{OO_S}$ auf die Äquatorebene, die das Zentrum der Erde O mit dem Zentrum der Sonne O_S verbindet (s. Abbildung 9.11). Dabei entspricht der Sonnenhöchststand um 12.00 Uhr der Sonnenzeit t_s dem Nullpunkt ($\omega = 0$). Jede Stunde Abweichung vom Mittag entspricht 15° . Per Definition ist der Stundenwinkel am Vormittag positiv, am Nachmittag negativ. Damit berechnet sich ω wie folgt:

$$\omega = 15^\circ \cdot (12 - t_s) \quad (9.74)$$

9.11.6 Deklination δ

Die *Deklination* δ der Sonne ist der Winkelabstand zwischen dem Sonnenmittelpunkt bei ihrem höchsten Stand ($t_s = 12.00$ Uhr) und dem Himmelsäquator. Sie ist der Winkel zwischen der Linie $\overline{OO_S}$ und ihrer Projektion auf die Äquatorebene (s. Abbildung 9.11). Die Umdrehungsachse der Erde steht immer im Winkel von $66,55^\circ$ gegen die Ebene der Erdumlaufbahn geneigt. Aufgrund der scheinbaren Sonnenbewegung schwankt die Deklination δ der Sonne je nach Jahreszeit zwischen $\delta = -23,45^\circ$ am 21. Dezember (Wintersonnenwende) und $\delta = 23,45^\circ$ am 21. Juni (Sommersonnenwende). Am 21. März und 23. September (Äquinox) beträgt $\delta = 0^\circ$. Die Deklination δ kann für den Verlauf eines Tages als konstant angenommen werden und berechnet sich zu:

$$\delta = 23,45 \cdot \sin\left(360 \cdot \frac{284 + n}{365}\right) \quad (9.75)$$

Die Variable n bezeichnet hierbei die Nummer des Tages im Jahr von 1 bis 365.

9.11.7 Monatsmittlerer Tag m

Der mittlere Tag im Monat m wurde als derjenige Tag festgelegt, dessen zugehörige Deklination δ am besten der mittleren Deklination des Monats entspricht. An diesem monatsmittleren Tag m entspricht die einfallende Extraterrestrische Strahlung der mittleren monatlichen Extraterrestrischen Strahlung.

Der monatsmittlere Tag m kann dafür genutzt werden, die empfangene Strahlung in einem Monat zu berechnen, ohne dafür für jeden einzelnen Tag alle astronomischen Winkel neu berechnen zu müssen. Stattdessen wird für den monatsmittleren Tag m für jede Stunde des Tages die einfallende Strahlung berechnet und zur Tagessumme aufaddiert. Anschließend multipliziert man diesen Wert mit der Tageszahl des betreffenden Monats und erhält somit die durchschnittliche Monatssumme der einfallenden Solarenergie.

Es sind folgende monatsmittlere Tage m tabellarisch festgelegt (s. Tabelle 9.2):

Monat	Tag m	Jahrestag n	Deklination δ
Januar	17	17	-20.9
Februar	16	47	-13.0
März	16	75	-2.4
April	15	105	9.4
Mai	15	135	18.8
Juni	11	162	23.1
Juli	17	198	21.2
August	16	228	13.5
September	15	258	2.2
Oktober	15	288	-9.6
November	14	318	-18.9
Dezember	10	344	-23.0

Tabelle 9.2: Liste der monatsmittleren Tage jeweils mit zugehöriger Deklination

(Quelle: Klein (1977))

9.11.8 Zenitwinkel θ_z

Der *Zenitwinkel* der Sonne θ_z ist der Winkel zwischen einem Sonnenstrahl und der Vertikalen im Punkt P (s. Abbildung 9.12). Er entspricht dem Einfallswinkel der Direktstrahlung $\theta_{Dir,hor}$ auf eine horizontale Fläche und lässt sich wie folgt berechnen:

$$\cos \theta_z = \cos \delta \cdot \cos \omega \cdot \cos \varphi + \sin \delta \cdot \sin \varphi \quad (9.76)$$

9.11.9 Sonnenhöhenwinkel (Elevation) α

Der *Sonnenhöhenwinkel* α ist der in der vertikalen Ebene gemessene Winkel zwischen dem Sonnenstrahl aus dem Sonnenmittelpunkt und der Projektion des Sonnenstrahls auf eine horizontale Ebene (s. Abbildung 9.12). Es gilt:

$$\alpha = 90^\circ - \theta_z \quad (9.77)$$

$$\sin \alpha = \cos \theta_z$$

Die Brechung durch die Erdatmosphäre hat diesbezüglich einen vernachlässigbaren Einfluss. Die sichtbare Sonnenhöhe ist dabei immer etwas größer als die berechnete und ist abhängig von Lufttemperatur und Luftdruck.

9.11.10 Azimutwinkel a_S

Der *Azimutwinkel der Sonne* a_S beschreibt die Winkelabweichung der Projektion des Sonnenstrahls auf eine horizontale Ebene von der exakten Südrichtung (s. Abbildung 9.12). Hierbei wird eine Abweichung nach Osten positiv, nach Westen negativ angegeben. Der Azimutwinkel der Sonne a_S nimmt somit Werte zwischen 180° und -180° an:

$$\cos a_S = \frac{\cos \delta \cdot \cos \omega \cdot \sin \varphi - \sin \delta \cdot \cos \varphi}{\cos \alpha} \quad (9.78)$$

9.11.11 Stundenwinkel des Sonnenauf- und -untergangs ω_S

Der *Stundenwinkel des Sonnenauf- und -untergangs* ω_S wird über die Formel des Zenitwinkels (9.76) für den Fall $\theta_Z = 90^\circ$ berechnet, was der Sonne am Horizont entspricht:

$$\begin{aligned} \cos \omega &= \frac{-\sin \delta \cdot \sin \varphi}{\cos \delta \cdot \cos \varphi} = -\tan \delta \cdot \tan \varphi \\ \omega_S &= \arccos(-\tan \delta \cdot \tan \varphi) \end{aligned} \quad (9.79)$$

Als Ergebnis erhält man den Stundenwinkel des Sonnenaufgangs für eine horizontale Fläche. Sonnenauf- bzw. -untergang unterscheiden sich über das Vorzeichen:

$$\begin{aligned} \omega_{SA,hor} &= \arccos(-\tan \delta \cdot \tan \varphi) \\ \omega_{SU,hor} &= -\arccos(-\tan \delta \cdot \tan \varphi) \end{aligned}$$

Mit der Formel des Stundenwinkels ω ergeben sich die entsprechenden Zeitpunkte zu:

$$\begin{aligned} t_{SA,hor} &= 12 - \frac{\omega_{SA,hor}}{15} \\ t_{SU,hor} &= 12 - \frac{\omega_{SU,hor}}{15} \end{aligned}$$

9.11.12 Tageslänge t_d

Die *Tageslänge* t_d bezeichnet die Stundenzahl von Sonnenaufgang bis Sonnenuntergang:

$$t_{d,hor} = \frac{2 \cdot \omega_{S,hor}}{15} \quad (9.80)$$

bzw.

$$t_{d,hor} = t_{SU,hor} - t_{SA,hor}$$

9.11.13 Berechnung des Einfallswinkels auf einen beliebig ausgerichteten Kollektor K

Die bisherigen Formeln beziehen sich ausschließlich auf eine horizontale Empfangsfläche. Es folgt die Umrechnung aller Winkel für eine beliebig ausgerichtete Kollektorfläche K der Neigung β und der Orientierung a_K .

9.11.14 Neigungswinkel β und Azimut a_K einer beliebig orientierter Flächen K

Eine beliebig orientierte und geneigte Fläche besitzt einen *Neigungswinkel* β gegenüber der Horizontalen und einen *Azimutwinkel* a_K , der in der horizontalen Ebene zwischen der Ausrichtung nach Süden und der Projektion der Flächennormalen gemessen wird. Es gilt die Festsetzung, dass $a_K = 0^\circ$ bei exakter Ausrichtung nach Süden und $a_K = \pm 180^\circ$ für Ausrichtung nach Norden. Für westliche Ausrichtungen erhält a_K ein positives Vorzeichen für östliche ein negatives.

9.11.15 Einfallswinkel der Direktstrahlung $\theta_{Dir,K}$ auf beliebig orientierte Flächen K

Die Direktstrahlung auf eine beliebig orientierte, geneigte Fläche wird über den Winkel der Direktstrahlung auf eine horizontale Fläche $\theta_{Dir,hor}$ sowie die Neigung β und den Azimut a_K der Empfangsfläche berechnet. Der Einfallswinkel der Direktstrahlung auf die orientierte, geneigte Empfangsfläche $\theta_{Dir,K}$ ist der Winkel zwischen der Flächennormalen senkrecht zur Empfangsfläche und dem Winkel der einfallenden Solarstrahlung (s. Abbildung 9.13).

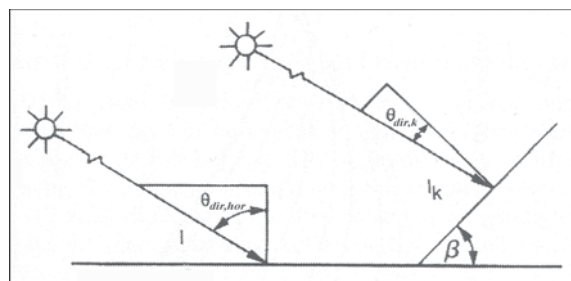


Abbildung 9.13: Einfallswinkel der Direktstrahlung auf eine beliebig geneigte Empfangsfläche K

(Grafik: Khartchenko (1995), S. 14)

Für eine beliebig orientierte geneigte Fläche an einem bestimmten Breitengradabhängigen Standort φ zu einem beliebigen Zeitpunkt ω ist somit der Einfallswinkel der Direktstrahlung $\theta_{Dir,K}$ abhängig von dem Neigungswinkel der Fläche β und der Ausrichtung der Fläche a_K , sowie vom Sonnenstand, welcher durch den Sonnenhöhenwinkel α und die Sonnendeklination δ ausgedrückt wird.

Der Einfallswinkel $\theta_{Dir,K}$ entspricht dem Winkel zwischen dem Vektor $\vec{s}$ in Sonnenrichtung und dem Normalenvektor $\vec{n}$ der geneigten Ebene K . Die Sonnenposition wird in kartesische Basisvektoren in Richtung Nord, West und Zenit umgerechnet.

Damit ergibt sich für die beiden Vektoren $\vec{s}$ und $\vec{n}$:

$$\vec{s} = \begin{pmatrix} \cos a_S \cdot \cos \alpha \\ -\sin a_S \cdot \cos \alpha \\ \sin \alpha \end{pmatrix} \quad (9.81)$$

$$\vec{n} = \begin{pmatrix} -\cos a_K \cdot \sin \beta \\ \sin a_K \cdot \sin \beta \\ \cos \beta \end{pmatrix}$$

Beide Vektoren sind normiert, so dass der Einfallswinkel der direkten Sonnenstrahlung $\theta_{Dir,K}$ auf die beliebig geneigte und orientierte Ebene K aus dem Skalarprodukt beider Vektoren berechnet werden kann:

$$\theta_{Dir,K} = \arccos(\vec{s} \cdot \vec{n}) \quad (9.82)$$

$$\cos \theta_{Dir,K} = \cos a_S \cdot \cos \alpha \cdot (-\cos a_K) \cdot \sin \beta - \sin a_S \cdot \cos \alpha \cdot \sin a_K \cdot \sin \beta + \sin \alpha \cdot \cos \beta$$

Mit Formel (9.78) für den Sonnenazimut a_S folgt:

$$\begin{aligned} \cos \theta_{Dir,K} = & \sin \delta \cdot (\sin \varphi \cdot \cos \beta - \cos \varphi \cdot \sin \beta \cdot \cos a_K) + \\ & + \cos \delta \cdot \cos \omega \cdot (\cos \varphi \cdot \cos \beta + \sin \varphi \cdot \sin \beta \cdot \cos a_K) + \\ & + \cos \delta \cdot \sin \beta \cdot \sin a_K \cdot \sin \omega \end{aligned} \quad (9.83)$$

9.11.16 Stundenwinkel des Sonnenuntergangs $\omega_{S,K}$ beliebig orientierter Flächen K

Für den Stundenwinkel des Sonnenauf- $\omega_{SA,K}$ und -untergangs $\omega_{SU,K}$ für eine beliebig orientierte Fläche K gilt gegenüber der horizontalen Fläche eine ungünstigere Situation, da die Fläche durch Selbstverschattung noch vor dem eigentlichen Sonnenuntergang nicht mehr von Sonnenstrahlen beschienen wird, bzw. nach Sonnenaufgang noch nicht sofort beschienen wird. Deshalb können $\omega_{SA,K}$ und $\omega_{SU,K}$ maximal gleichgroß wie ω_S sein. Es gilt gegenüber dem maximalen Stundenwinkel für eine horizontale Fläche ω_S :

$$\omega_S = \arccos(-\tan \delta \cdot \tan \varphi)$$

$$\omega_{SA,K} \leq \omega_S \quad (9.84)$$

$$\omega_{SU,K} \leq \omega_S \quad (9.85)$$

Die Stundenwinkel des Sonnenauf- und -untergangs $\omega_{SA,K}$ und $\omega_{SU,K}$ können bei nicht-äquatorial ausgerichteten Flächen nicht identisch sein. Für beide ist also jedes Mal im Einzelfall zu prüfen, ob ihr Stundenwinkel nicht größer ist als der für eine horizontale Fläche.

Für beliebig orientierte Fläche kann über die Formel für direkte Strahlung auf eine beliebig geneigte und orientierte Oberfläche $\theta_{Dir,K}$ gefolgert werden:

Für $a_k = 0$ (Süd): $\omega_{SA,K} = \min \begin{cases} \arccos(-\tan \delta \cdot \tan \varphi) \\ \arccos(-\tan \delta \cdot \tan(\varphi - \beta)) \end{cases} \quad (9.86)$

$$\omega_{SU,K} = -\min \begin{cases} \arccos(-\tan \delta \cdot \tan \varphi) \\ \arccos(-\tan \delta \cdot \tan(\varphi - \beta)) \end{cases} \quad (9.87)$$

Für $a_k > 0$ (Ost): $\omega_{SA,K} = \min \begin{cases} \arccos(-\tan \delta \cdot \tan \varphi) \\ \arccos \frac{-x \cdot y - \sqrt{x^2 - y^2 + 1}}{x^2 + 1} \end{cases} \quad (9.88)$

$$\omega_{SU,K} = -\min \begin{cases} \arccos(-\tan \delta \cdot \tan \varphi) \\ \arccos \frac{-x \cdot y + \sqrt{x^2 - y^2 + 1}}{x^2 + 1} \end{cases} \quad (9.89)$$

Für $a_k < 0$ (West): $\omega_{SA,K} = \min \begin{cases} \arccos(-\tan \delta \cdot \tan \varphi) \\ \arccos \frac{-x \cdot y + \sqrt{x^2 - y^2 + 1}}{x^2 + 1} \end{cases} \quad (9.90)$

$$\omega_{SU,K} = -\min \begin{cases} \arccos(-\tan \delta \cdot \tan \varphi) \\ \arccos \frac{-x \cdot y - \sqrt{x^2 - y^2 + 1}}{x^2 + 1} \end{cases} \quad (9.91)$$

Mit: $x = \frac{\cos \varphi}{\sin a_k \cdot \tan \beta} + \frac{\sin \varphi}{\tan a_k} \quad (9.92)$

$$y = \tan \delta \cdot \left(\frac{\sin \varphi}{\sin a_k \cdot \tan \beta} - \frac{\cos \varphi}{\tan a_k} \right) \quad (9.93)$$

Mit $\omega = 15^\circ \cdot (12 - t_s)$:

$$t_{SA,K} = 12 - \frac{\omega_{SA,K}}{15}$$

$$t_{SU,K} = 12 - \frac{\omega_{SU,K}}{15}$$

9.11.17 Tageslänge $t_{d,K}$ für eine beliebig orientierte Fläche K

Die *Tageslänge* $t_{d,K}$ bezeichnet die Stundenzahl von Sonnenaufgang bis Sonnenuntergang für eine beliebig orientierte Fläche. Dabei muß beachtet werden, dass die Stundenwinkel des Sonnenauf- $\omega_{SA,K}$ und -untergangs $\omega_{SU,K}$ für eine beliebig orientierte Fläche nicht größer sein können als die einer horizontalen Fläche. Der Zeitraum, in dem eine Empfangsfläche K sonnenbeschienen ist beträgt:

$$t_{d,K} = t_{SU,K} - t_{SA,K} \quad (9.94)$$

9.12 Extraterrestrische Strahlung

9.12.1 Intensität extraterrestrischer Strahlung I_0 auf eine horizontale Fläche

Die Intensität der extraterrestrischen Strahlung I_0 zu einer bestimmten Stunde mit dem Stundenwinkel ω auf eine horizontale Fläche außerhalb der Erdatmosphäre berechnet sich aus der Intensität der extraterrestrischen Strahlung I_{0n} auf eine senkrecht zur Strahlung liegende Fläche und dem Einfallswinkel θ auf die horizontale Fläche.

$$I_{0,hor} = I_{0n} \cdot \cos \theta_z \quad (9.95)$$

$$I_{0,hor} = I_{sc} \cdot \left(1 + 0,033 \cdot \cos \frac{360 \cdot n}{365} \right) \cdot (\cos \varphi \cdot \cos \delta \cdot \cos \omega + \sin \varphi \cdot \sin \delta)$$

Für die Tagessumme der extraterrestrischen Strahlung E_0 auf eine horizontale Fläche außerhalb der Erdatmosphäre an einem bestimmten Tag n mit dem Stundenwinkel des Sonnenuntergangs ω_{su} gilt:

$$E_0 = \frac{24 \cdot 3600}{\pi} \cdot I_{sc} \cdot \left(1 + 0,033 \cdot \cos \frac{360 \cdot n}{365} \right) \cdot \left(\cos \varphi \cdot \cos \delta \cdot \sin \omega_{su} + \frac{\pi \cdot \omega_{su}}{180} \sin \varphi \cdot \sin \delta \right) \quad (9.96)$$

Die Schwankungen der Tagessumme extraterrestrischer Strahlung E_0 auf eine horizontale Fläche sind zu den Polen hin größer als am Äquator. In den jeweiligen Sommermonaten ist die Tagessumme extraterrestrischer Strahlung bei höheren Breitengraden sogar größer.

9.12.2 Summe extraterrestrischer Strahlung E_0 auf eine horizontale Fläche

Für einen beliebigen Zeitabschnitt zwischen den Stundenwinkeln ω_1 bis ω_2 gilt:

$$E_0 = \frac{12 \cdot 3600}{\pi} \cdot I_{sc} \cdot \left(1 + 0,033 \cdot \cos \frac{360 \cdot n}{365} \right) \cdot \left(\cos \varphi \cdot \cos \delta \cdot (\sin \omega_2 - \sin \omega_1) + \frac{\pi \cdot (\omega_2 - \omega_1)}{180} \sin \varphi \cdot \sin \delta \right) \quad (9.97)$$

9.13 Berechnung der stündlichen Global- und Diffusstrahlung

Strahlungsdaten für einen Ort stehen meist als in der Horizontalen gemessene Globalstrahlungsdaten zur Verfügung. Für die Berechnung der einfallenden Solarstrahlung auf eine beliebig geneigte orientierte Fläche müssen diese für die geänderte Aufstellungsgeometrie umgerechnet werden. Da aber die eintreffende Direkt- und Diffusstrahlung in unterschiedlicher Weise von der Ausrichtung der Empfangsfläche beeinflusst werden, muß vor der Berechnung zunächst die Globalstrahlung auf die Horizontale in ihren direkten und diffusen Strahlungsanteil zerlegt werden. Hierzu gibt es verschiedene empirische Ansätze, die auf der sta-

tistischen Analyse von langjährig gemessenen Strahlungsdaten beruhen. Sie ermöglichen die Berechnung der stündlichen Strahlungswerte aus den vorliegenden, gemessenen Tageswerten. Für Orte für welche zuverlässige Strahlungsmessdaten fehlen, kann die Globalstrahlung mittels empirischer Beziehungen geschätzt werden.

9.14 Clearness Index k_T

Wie bereits in *Abschnitt 9.9* beschrieben führt die vereinfachte Annahme einer wolkenlosen Atmosphäre zur Überschätzung der direkten Strahlung gegenüber der Diffusstrahlung. Die Direktstrahlung wird durch Wolken, ihrer Dicke und Anzahl der Wolkenschichten stark beeinflusst. Während der Diffusanteil aus mehreren Komponenten besteht und nahezu gleichmäßig aus allen Richtungen des Himmels auf eine Fläche auftrifft, ist die Direktstrahlung einkomponentig und auf den schmalen Winkel aus dem Bereich der Sonnenscheibe beschränkt.

Wolken führen zu einer Reduktion von Direktstrahlung bei gleichzeitiger Zunahme der Diffusstrahlung. Auch Mehrfachreflexionen hängen stark mit der Beschaffenheit der Wolken zusammen. Die Richtungsverteilung der auf der Fläche auftreffenden Diffusstrahlung wird allerdings durch die Wolken und ihre Position am Himmel ebenfalls beeinflusst. Wenn diese Richtungsverteilung der Diffusstrahlung nicht einheitlich ist, spricht man von anisotroper Verteilung. Nur bei völlig bedecktem Himmel kommt aus allen Richtungen gleich viel Diffusstrahlung, so dass eine isotrope Verteilung vorliegt.

Für eine genaue Berechnung der direkten und diffusen Strahlung würden stundengenaue Angaben zu den auftretenden Wolkentypen, ihren optischen Eigenschaften, der Menge der Wolken, ihrer Dicke, der Anzahl der Wolkenschichten, vor allem aber zu ihrer genauen Position am Himmel benötigt werden. Solche Daten sind jedoch in aller Regel nicht verfügbar. Typische Messwerte sind hingegen die Globalstrahlung auf die Horizontale, Sonnenscheinstunden, Bewölkungsgrad, Wolken-Albedo und Boden-Albedo.

Dies macht die Einführung einer neuen Größe notwendig, um aus den vorliegenden Messdaten eine Aufspaltung der Globalstrahlung in ihren Direkt- und Diffusanteil zu jeder Stunde des Tages ermöglichen.

Der zu diesem Zweck entwickelte *Clearness Index* k_T beschreibt die Reinheit der Atmosphäre als Grad ihrer Durchlässigkeit für solare Strahlung. Der Clearness Index beschreibt das Verhältnis zwischen der am Atmosphärenrand auftreffenden extraterrestrischen Strahlung E_0 , welche sich über astronomische Formel für jeden Standort zu jeder Stunde exakt berechnen lässt, und dem verbleibenden Anteil, der nach dem Atmosphärendurchgang an der Erdoberfläche tatsächlich als stündliche terrestrische Globalstrahlung E_G auf eine Horizontale auftrifft. Der Clearness Index k_T beschreibt somit das Maß an Strahlung, das die Erdatmosphäre durchdringt.

Mit den für eine bestimmte Stunde gemessenen Werten für die Summe aller in diesem Zeitraum empfangenen Globalstrahlung E_G und extraterrestrischen Strahlung E_0 erhält man den *stündlichen Clearness Index* k_T :

$$k_T = \frac{E_G}{E_0} \quad (9.98)$$

9.15 Modelle zur Bestimmung des Clearness Index

Der Clearness Index k_T ist für jeden Ort der Welt in seinem Jahres- und Tagesverlauf unterschiedlich. Für Standorte ohne vorliegende Messreihen zur stündlichen Globalstrahlung werden in der Literatur verschiedene aufeinander aufbauende Modelle zur Bestimmung des Clearness Index k_T beschrieben.

9.15.1 Modell nach Page

Der mittlere Clearness Index eines Monats $\bar{K}_T$ wird in Beziehung gesetzt mit dem gemessenen *Mittelwert der täglichen Sonnenscheindauer* $\bar{n}$ sowie dem *Monatsmittelwert der maximal möglichen täglichen Sonnenscheindauer* $\bar{N}$ aus der Tageslängenkalkulation. Für die Beziehung zwischen dem Verhältnis der Monatsmittelwerte der täglichen Globalstrahlung $\bar{E}_G$ und der extraterrestrischen Strahlung $\bar{E}_0$ auf eine horizontale Fläche sowie dem mittleren Bruchteil $\bar{n}/\bar{N}$ als Relation der Tagessonnenscheindauer gilt nach Page:

$$\bar{K}_T = \frac{\bar{E}_G}{\bar{E}_0} = a + b \cdot \frac{\bar{n}}{\bar{N}} \quad (9.99)$$

Die Werte für $\bar{E}_0$ werden aus der Formel (9.96) über die Solarkonstante I_{sc} berechnet. Die Parameter a und b sind ortsspezifische Regressionskonstanten, welche aus der linearen Regression von $\bar{E}_G/\bar{E}_0$ und $\bar{n}/\bar{N}$ aus großen Datenmengen erhalten werden. Es gelten die folgenden Wertebereiche: $a = 0,14$ bis $0,54$ und $b = 0,18$ bis $0,73$. Für Orte mit feuchter, trüber Atmosphäre beträgt $a + b = 0,65$. In trockener, staubfreier Atmosphäre gilt $a + b = 0,80$. Ferner gilt:

$$a = 0,1 + 0,24 \cdot \frac{\bar{n}}{\bar{N}} \quad (9.100)$$

$$b = 0,38 + 0,008 \cdot \frac{\bar{n}}{\bar{N}}$$

So dass aus Formel (9.99) folgt:

$$\bar{K}_T = \frac{\bar{E}_G}{\bar{E}_0} = 0,18 + 62 \cdot \frac{\bar{n}}{\bar{N}} \quad (9.101)$$

Der Abgleich mit langjährigen Messreihen zeigt eine gute Übereinstimmung für Werte von $\bar{K}_T < 0,4$. Die hieraus ableitbare mittlere Globalstrahlung $\bar{E}_G$ darf jedoch nur für Strahlungssummen über große Zeiträume angewendet werden. Für Tages- oder gar Stundenwerte ist die Formel zu ungenau.

9.15.2 Modell nach Liu und Jordan

Liu und Jordan verallgemeinern die Verteilung täglicher Solarstrahlung, indem sie in einer graphischen Lösung auf Basis jahrelanger Messreihen eine Kurvenschar erarbeiten, die sog. Cumulativ-Frequency-Curves (CFC). Diese bilden Funktionen ab von K_t über f . Sie zeigen den monatlichen Clearness Index als Verhältnis von der für einen Monat durchschnittlichen täglichen Solarstrahlung auf eine horizontale Fläche zur für diesen Monat durchschnittlichen extraterrestrischen Strahlung. Hierbei fällt auf, dass für Monate mit gleichem mittleren Clearness Index, auch für verschiedene Orte, die kumulierte Häufigkeit für die jeweiligen Werte für den Clearness Index einander sehr ähnlich sind. Die Langzeitverteilung der Globalstrahlung über einen Monat korrespondiert demnach mit dem monatspezifischen Clearness Index unabhängig von Ort und Jahreszeit. Bei einem bekannten aus langjährigen Datenreihen ermittelten monatsmittleren Clearness Index kann demnach aus der CFC für jeden beliebigen Ort der Clearness Index abgelesen werden.

9.15.3 Modell nach Bendt et al.

Bendt et al. erarbeiten ein Modell, dass die Kurven von Liu und Jordan mathematisch repräsentiert. Ihr Modell berücksichtigt den maximalen täglichen Clearness Index $K_{t,\max}$, den minimalen täglichen Clearness Index $K_{t,\min}$ und den für einen Monat gemittelten Clearness Index $\bar{K}_t$. Sie nutzen die Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion, die Taylorreihe sowie statistische Zahlen aus einer 20-jährigen Messreihe von 90 Wetterstationen der USA, um alle notwendigen Koeffizienten zu ermitteln.

$$\bar{K}_t = \frac{\left(K_{t,\min} - \frac{1}{\gamma}\right) \cdot \exp(\gamma \cdot K_{t,\min})}{\exp(\gamma \cdot K_{t,\min}) - \exp(\gamma \cdot K_{t,\max})} - \frac{\left(K_{t,\max} - \frac{1}{\gamma}\right) \cdot \exp(\gamma \cdot K_{t,\max})}{\exp(\gamma \cdot K_{t,\min}) - \exp(\gamma \cdot K_{t,\max})} \quad (9.102)$$

mit

$$f = \frac{\exp(\gamma \cdot K_{t,\min}) - \exp(\gamma \cdot K_t)}{\exp(\gamma \cdot K_{t,\min}) - \exp(\gamma \cdot K_{t,\max})} \quad (9.103)$$

Bendt et al. schlagen für $K_{t,\min}$ einen Wert von 0,05 vor. Für $K_{t,\max}$ gilt eine Abhängigkeit von den gemessenen Werten zu $\bar{K}_t$. Damit ist $K_{t,\max}$ ein Wert, der in die Formel eingeht, jedoch nicht festgelegt, sondern von den Werten von $\bar{K}_t$ abhängig ist. Für das Bendt-Modell müssen somit $\bar{K}_t$ und $K_{t,\max}$ bekannt sein. Um das Modell benutzen zu können, muss die obere

Formel nach γ aufgelöst werden und in die zweite Formel eingesetzt werden, um die benötigte $f - \bar{K}_t$ - Verteilung generieren zu können.

9.15.4 Ergänzung durch Herzog

Herzog schlägt eine explizite Formel für γ vor:

$$\gamma = -1,498 + \frac{1,184 \cdot \frac{K_{t,\max} - K_{t,\min}}{K_{t,\max} - \bar{K}_t} - 27,182 \cdot \exp\left(-1,5 \cdot \frac{K_{t,\max} - K_{t,\min}}{K_{t,\max} - \bar{K}_t}\right)}{K_{t,\max} - K_{t,\min}} \quad (9.104)$$

Benutzt man also das Herzog Modell für γ in dem Bendt-Modell, um die Häufigkeitsverteilung zu ermitteln, bleibt als einzige benötigte Eingabe der monatsmittlere Clearness Index $\bar{K}_t$, welcher jedoch nicht oft für einen Standort vorliegt. Die Häufigkeitsverteilung zeigt, dass das Ergebnis des kombinierten Bendt- und Herzog-Modells die CFC-Kurven von Liu und Jordan gut repräsentiert, mit Ausnahme hoher K_t -Werte. Sofern für einen Ort aus langjährigen Messungen $\bar{K}_t$ bekannt ist, kann das Bendt-Herzog Modell direkt angewendet werden.

9.15.5 Modell von Hollands und Huget

Hollands und Huget nutzen die klassische Wahrscheinlichkeitstheorie, um ihr Häufigkeitsverteilungsmodell zu erstellen. Aus der Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion und der numerischen Differentiation der Liu-Jordan-Kurven folgt mit der Konstanten C:

$$P(K_t, \bar{K}_t) = C \cdot \frac{K_{t,\max} - K_t}{K_{t,\max}} \cdot \exp(\lambda \cdot K_t) \quad (9.105)$$

In diesem Modell gibt es kein $K_{t,\min}$, da für K_t der Bereich von 0 bis $K_{t,\max}$ festgelegt wird.

$$\bar{K}_t = \frac{\left(\frac{2}{\lambda} + K_{t,\max}\right) \cdot (1 - \exp(\lambda \cdot K_{t,\max})) + 2 \cdot K_{t,\max} \cdot \exp(\lambda \cdot K_{t,\max})}{\exp(\lambda \cdot K_{t,\max}) - 1 - \lambda \cdot K_{t,\max}} \quad (9.106)$$

$$\lambda = \frac{2 \cdot \frac{K_{t,\max}}{K_{t,\max} - \bar{K}_t} - 17,519 \cdot \exp\left(-1,3118 \cdot \frac{K_{t,\max}}{K_{t,\max} - \bar{K}_t}\right)}{K_{t,\max}} - \frac{1062 \cdot \exp\left(-5,0426 \cdot \frac{K_{t,\max}}{K_{t,\max} - \bar{K}_t}\right)}{K_{t,\max}} \quad (9.107)$$

$$f = \frac{\frac{\lambda^2 \cdot K_{t,\max}}{\exp(\lambda \cdot K_{t,\max}) - 1 - \lambda \cdot K_{t,\max}}}{K_{t,\max} \cdot \lambda \cdot \frac{\lambda}{1 + \lambda \cdot K_{t,\max}}} \cdot \left(\exp(\lambda \cdot K_t) \cdot \left(1 - \frac{\lambda}{1 + \lambda \cdot K_{t,\max}} \cdot K_t\right) - 1 \right) \quad (9.108)$$

Um die Kurven von Liu und Jordan möglichst gut zu treffen, wird $K_{t,\max}$ auf 0,864 festgelegt. Dieser Wert überschätzt jedoch die aktuellen Beobachtungen.

9.15.6 Modell von Klein und Beckmann

Da sowohl das Bendt-Herzog-Modell als auch das Hollands-Huget-Modell für die Vorhersage zu erwartender Strahlung Messdaten benötigen, die für nur für sehr wenige Orte vorliegen, wird abschließend das Klein-Beckmann-Modell vorgestellt. Dieses generiert für jeden beliebigen Ort der Welt einen Wert für den maximalen täglichen Clearness Index $K_{t,\max}$, welches in das Hollands-Huget-Modell eingesetzt wird und Daten einer $f - K_t$ -Verteilung liefert, die dichter an den aktuellen Messungen liegen als bei Verwendung des Bendt-Herzog-Modells.

Die vorgeschlagene Formel bezieht verschiedene Faktoren mit ein, die einen Einfluss auf den Wert des maximalen täglichen Clearness Index haben: den durchschnittlichen monatlichen Clearness Index $\bar{K}_t$, die Jahreszeit⁹⁴ repräsentiert durch die Sonnendeklination δ , die geographische Lage⁹⁵ durch den Breitengrad φ , die topographische Höhe⁹⁶ über dem Meeresspiegel Z . Nach Abgleich mit 20-jährigen Messreihen für verschiedene Orte der USA erhält man die Formel zur Bestimmung von $K_{t,\max}$:

$$K_{t,\max} = 0,51585 + 0,34847 \cdot \bar{K}_t + 2,3028 \cdot 10^{-4} \cdot \delta + 3,4108 \cdot 10^{-4} \cdot \varphi + 9,5709 \cdot 10^{-6} \cdot Z \quad (9.109)$$

Mit den hieraus erhaltenen Werten für $K_{t,\max}$ erhält man durch Einsetzen in das Hollands-Huget-Modell sehr gut Übereinstimmungen mit den aktuell gemessenen Daten.

9.16 Bestimmung des Diffusanteils über den Clearness Index

Zur Aufteilung der auf eine Horizontale treffenden Globalstrahlung in ihren Direkt- und Diffusanteil mittels Clearness Index sind in der Literatur verschiedene Modelle bekannt. Die beiden bekanntesten sind das Orgill-Hollands- und das Erbs-Modell. Bei bekannten stündlichen Werten des Clearness Index k_T können die stündlichen Werte des Anteils der Diffusstrahlung E_{Diff} an der stündlichen Globalstrahlung E_G auf eine horizontale Fläche berechnet werden.

Nach dem *Orgill-Hollands-Modell* über:

$$\frac{E_{Diff}}{E_G} = \begin{cases} 1,0 - 0,249 \cdot k_T & \text{für } k_T < 0,35 \\ 1,557 - 1,84 \cdot k_T & \text{für } 0,35 \leq k_T \leq 0,75 \\ 0,177 & \text{für } k_T > 0,75 \end{cases} \quad (9.110)$$

⁹⁴ Im Sommer liegen die Werte für den Clearness Index immer höher als im Winter

⁹⁵ In den Tropen ist der Clearness Index in der Regel höher als an den Polen

⁹⁶ Höher gelegene Orte neigen zu weniger atmosphärischem Dunst und Staub, so dass sie einen höheren Clearness Index haben.

Etwas genauer nach dem *Erbs-Modell* über:

$$\frac{E_{Diff}}{E_G} = \begin{cases} 1,0 - 0,09 \cdot k_T & \text{für } k_T \leq 0,22 \\ 0,9511 - 0,1604 \cdot k_T + 4,388 \cdot k_T^2 - 16,638 \cdot k_T^3 + 12,336 \cdot k_T^4 & \text{für } 0,22 < k_T < 0,8 \\ 0,165 & \text{für } k_T \geq 0,8 \end{cases} \quad (9.111)$$

9.17 Bestimmung des Direktanteils über den Diffusanteil

Die empfangene Globalstrahlung auf die Horizontale setzt sich zusammen aus der Direkt- und der Diffusstrahlung auf die Horizontale. So dass sich bei Kenntnis des Diffusanteiles der Direktanteil ergibt zu:

$$\dot{G}_{Dir,hor} = \dot{G}_{G,hor} - \dot{G}_{Diff,hor} \quad (9.112)$$

9.18 Global-, Direkt- und Diffusstrahlung auf beliebig ausgerichtete Empfangsflächen K

9.18.1 Stündliche Direktstrahlung $\dot{G}_{Dir,K}$ auf eine beliebig ausgerichtete Fläche K

Der geometrische Faktor R beschreibt das Verhältnis der Einstrahlung $\dot{G}_{Dir,K}$ auf eine beliebig ausgerichtete Empfangsfläche K im Vergleich zur bekannten Einstrahlung auf eine horizontale Fläche $\dot{G}_{Dir,hor}$. Dieser steht in Relation zum Einstrahlwinkel der Direktstrahlung θ_{Dir} und dem Zenitwinkel θ_Z (s. Abschnitt 9.11.15):

$$R = \frac{\dot{G}_{Dir,K}}{\dot{G}_{Dir,hor}} = \frac{\cos \theta_{Dir}}{\cos \theta_Z} \quad (9.113)$$

Mit Formel (9.83), dem Neigungswinkel β gegenüber der Horizontalen, dem Sonnenazimut a_S und der Ausrichtung a_K der Flächennormalen bezüglich der Himmelsrichtung folgt:

$$\begin{aligned} \dot{G}_{Dir,K} &= \dot{G}_{Dir,hor} \cdot \frac{\cos \theta_K}{\cos \theta_Z} \\ &= \dot{G}_{Dir,hor} \cdot \frac{\cos a_s \cdot \cos \alpha \cdot (-\cos a_K) \cdot \sin \beta - \sin a_s \cdot \cos \alpha \cdot \sin a_K \cdot \sin \beta + \sin \alpha \cdot \cos \beta}{\cos \varphi \cdot \cos \delta \cdot \cos \omega + \sin \varphi \cdot \sin \delta} \end{aligned} \quad (9.114)$$

9.18.2 Stündliche Diffusstrahlung $\dot{G}_{Diff,K}$ auf eine beliebig ausgerichtete Fläche K

Die Umrechnung des diffusen Anteils der Solarstrahlung $\dot{G}_{Diff,K}$ auf eine beliebig ausgerichtete Empfangsfläche K ist von einer Vielzahl von Faktoren abhängig und nicht geschlossen analytisch darstellbar. Man unterscheidet dabei den stark vereinfachenden isotropen Ansatz und den deutlich genaueren anisotropen Ansatz.

Beim isotropen Ansatz wird zunächst vereinfachend angenommen, dass die Diffusstrahlung gleichmäßig im Raum verteilt sei. Dies trifft im Fall einer klaren, unbewölkten oder einer vollständig bewölkten Atmosphäre zu. Unter Annahme dieser für alle Himmelsrichtungen gleich verteilten Strahldichte trifft die Diffusstrahlung aus allen Richtungen des Halbraumes zu gleichen Teilen auf einen bestimmten Punkt P der Erdoberfläche. Auf einer geneigten Fläche wird die diffuse Strahlung im Gegensatz zur Horizontalen reduziert, da der Anteil hinter der Ebene wegfällt und somit nicht mehr die Diffusstrahlung aus dem gesamten Halbraum empfangen werden kann. Unter diesen vereinfachten Randbedingungen berechnet sich der Diffusanteil $\dot{G}_{Diff,K}$ auf eine beliebig orientierte Empfangsfläche K mit dem Neigungswinkel β über die Diffusstrahlung auf eine horizontale Fläche $\dot{G}_{Diff,hor}$ wie folgt:

$$\dot{G}_{Diff,K} = \dot{G}_{Diff,hor} \cdot \frac{(1 + \cos \beta)}{2} \quad (9.115)$$

Dieses Modell überschätzt jedoch für alle nicht direkt beschienenen Flächen die Diffusstrahlung, während sie für direkt beschienene Flächen die Diffusstrahlung aufgrund des fehlenden circumsolaren⁹⁷ Anteils unterschätzt.

Die Annahme einer isotropen Strahlungsverteilung beschreibt somit nur eingeschränkt die tatsächlichen Begebenheiten und reicht deshalb nicht aus. Da die Strahldichte besonders an klaren Tagen je nach Himmelsrichtung stark unterschiedlich ist muss ein anisotroper Ansatz gewählt werden, der eine Zunahme der Helligkeit am Horizont sowie in Sonnennähe annimmt. Zur Berechnung der diffusen Strahlung, die im Bereich um den jeweiligen Sonnenstand meist heller ist als am übrigen Himmel wird in der folgenden Formel von einem gleichmäßig im Raum verteilten isotropen Strahlungsanteil ausgegangen, dem ein circumsolarer Anteil überlagert wird.

Dabei wird die Horisontthelligkeit beschrieben mit: $1 + \sin^3 \frac{\beta}{2}$

Den circumsolaren Anteil beschreibt: $1 + \cos^2 \theta_{Dir,K} \cdot \sin^3 \theta_z$

Somit wird die Formel des isotropen Ansatzes ergänzt zu:

$$\dot{G}_{Diff,K} = \dot{G}_{Diff,hor} \cdot \frac{(1 + \cos \beta)}{2} \cdot \left(1 + \sin^3 \frac{\beta}{2}\right) \cdot \left(1 + \cos^2 \theta_{Dir,K} \cdot \sin^3 \theta_z\right) \quad (9.116)$$

⁹⁷ im Bereich und in unmittelbarer Nähe der Sonnenscheibe

Das Modell wird durch eine Modulationsfunktion F für die Horizonthelligkeit und den Circumsolaren Anteil weiter verfeinert zu:

$$\dot{G}_{Diff,K} = \dot{G}_{Diff,hor} \cdot \frac{1 + \cos \beta}{2} \cdot \left(1 + F \cdot \sin^3 \frac{\beta}{2} \right) \cdot \left(1 + F \cdot \cos^2 \theta_{Dir,K} \cdot \sin^3 \theta_z \right) \quad (9.117)$$

mit $F = 1 - \left(\frac{\dot{G}_{Diff,hor}}{\dot{G}_{G,hor}} \right)^2$

9.18.3 Stündliche Reflexionsstrahlung $\dot{G}_{Ref,K}$ auf eine beliebig ausgerichtete Fläche K

Ein gewisser Anteil $\dot{G}_{Ref,K}$ der in der Umgebung auftreffenden Globalstrahlung wird auf die beliebig ausgerichtete Empfangsfläche K weiterreflektiert. Er wird aus der Globalstrahlung auf die horizontale Fläche $\dot{G}_{G,hor}$, der Albedo A und dem Neigungswinkel β gegenüber der Horizontalen berechnet.

$$\dot{G}_{Ref,K} = \frac{1}{2} \cdot A \cdot \dot{G}_{G,hor} \cdot (1 - \cos \beta) \quad (9.118)$$

Bei dieser Formel wird davon ausgegangen, dass sowohl die direkte als auch die diffuse Strahlung vom Boden in gleicher Weise reflektiert wird, so dass eine einheitliche Albedo für beide Strahlungsarten angenommen werden kann. Bei der Berechnung der Bodenreflexion reicht ein isotroper Ansatz aus, da ein anisotroper Ansatz nur eine vernachlässigbare Verbesserung bringt.

Die Albedo A hängt von den jeweils spezifischen Umweltbedingungen am betrachteten Standort ab. Entsprechende Albedo-Werte bewegen sich bei Schnee zwischen $A = 0.7$ bis 0.9 , bei Sand zwischen $A = 0.25$ bis 0.35 , bei Wald und Ackerflächen zwischen $A = 0.05$ bis 0.2 . Falls nicht bekannt wird im Mittel $A = 0.2$ angenommen.

Je flacher der Neigungswinkel einer Fläche, umso geringer der Einfluss der Albedo, eine horizontale Fläche empfängt keine Rückstrahlung vom Boden.

9.18.4 Stündliche Globalstrahlung $\dot{G}_{G,K}$ auf beliebig geneigte, ausgerichtete Flächen

Die auf eine beliebig geneigte, ausgerichtete Empfangsfläche auftreffende Globalstrahlung $\dot{G}_{G,K}$ setzt sich abschließend aus der ankommenden Direktstrahlung $\dot{G}_{Dir,K}$, der Diffusstrahlung $\dot{G}_{Diff,K}$ und der reflektierten Strahlung $\dot{G}_{Ref,K}$ zusammen:

$$\dot{G}_{G,K} = \dot{G}_{Dir,K} + \dot{G}_{Diff,K} + \dot{G}_{Ref,K} \quad (9.119)$$

Für diese Forschungsarbeit liegen somit alle notwendigen Formeln zur Berechnung stündlicher Globalstrahlung auf eine beliebig geneigte und ausgerichtete Empfangsflächen K vor.

Kapitel 10

Einführung der meteorologischen Datenquelle

10.1 Kurze Einführung in die Meteorologie

Als Teil der Atmosphärenwissenschaften beschäftigt sich die Meteorologie mit der Atmosphärenphysik. Die Klimatologie betrachtet mittels Trendanalysen langfristige Änderungen in der Atmosphärendynamik. Für das Klima gelten somit deutlich längere Zeitskalen als für das Wetter. Klima- und wetterrelevante Vorgänge in der Atmosphäre können vom Boden beobachtet werden, zunehmend erfolgt jedoch die Beobachtung aus dem Weltraum. Zur Auswertung der gesammelten Daten ist ein interdisziplinärer Ansatz nötig, da hierfür Methoden aus Physik (Thermodynamik, Optik), Chemie, Mathematik (Funktionsanalyse, Differentialgleichungen) und Informatik (Algorithmen, Datenverwaltung) benötigt werden.

Hauptaufgabe der Meteorologie ist die Erfassung, Bearbeitung und Auswertung großer Datenmengen. Zu den wichtigsten Messgrößen zählen (s. *Tabelle 10.1*):

Messgröße	Messinstrument
Lufttemperatur	Thermometer
Luftfeuchtigkeit	Hygrometer
Luftdruck	Barometer
Windrichtung, -stärke	Anemometer
Niederschlagsart, -menge	Ombrometer
Bewölkung	Nephometer
Globalstrahlung	Pyranometer
Direktstrahlung	Pyrheliometer
Albedo	Albedometer

Tabelle 10.1: Überblick über meteorologische Messgrößen und Messinstrumente

(Quelle: eigene Zusammenstellung)

10.2 Messung der Solarstrahlung in Bodenstationen

In einem globalen Netz aus Bodenstationen werden weltweit und über lange Zeiträume Messungen zur Solarstrahlung durchgeführt. Die gebräuchlichsten Messinstrumente sind diesbezüglich das Pyranometer zur Messung der Globalstrahlung sowie das Pyrhemliometer zur Messung der Direktstrahlung. Ihre Funktionsweisen werden im Folgenden kurz erläutert:

Pyranometer dienen der Messung von Globalstrahlung und unterscheiden sich aufgrund unterschiedlicher Sensoren in thermische Sensoren und Siliziumsensoren.

Bei Pyranometern mit thermischem Sensor befindet sich in einer Thermosäule ein geschwärztes Absorberplättchen, welches vom Sonnenlicht erwärmt wird, so dass über die Temperatur die dazu proportionale Einstrahlung abgelesen werden kann. Mit abgeschatteten Pyranometern wird die Diffusstrahlung gemessen, indem durch einen dem Sonnenverlauf exakt nachgeführten Schattenball der direkte Strahlungsanteil ausgeschaltet wird. Erfolgt die Abschattung durch einen festen Schattenring muss nachträglich der mitverschattete Diffusanteil wieder eingerechnet werden. Solare Direktstrahlung kann nicht mit Pyranometern gemessen, sondern höchsten aus der Differenz von Global- und Diffusstrahlung berechnet werden, was aber in der Folge zu Ungenauigkeiten führt.

Pyranometern mit Siliziumsensor besitzen einen Strahlungssensor aus einem Halbleiter, welcher proportional zur Einstrahlung Strom produziert. Sein Vorteil gegenüber dem eher trägen thermischen Sensor besteht in einer deutlich schnelleren Einstellzeit bei Schwankungen der Strahlungsintensität sowie seiner Eignung für einen wartungsarmen Betrieb, da er deutlich unempfindlicher gegenüber Verschmutzung ist. Nachteilig ist die schmalbandigere spektrale Empfindlichkeit gegenüber den breitbandigen thermischen Sensoren. Dies kann jedoch durch Extrapolation im Infrarotbereich gut aufgefangen werden. Bei tiefen Sonnenständen oder besonderen Atmosphärensituationen kommt es aber weiterhin zu großen Meßabweichungen.

Ein weiterer Fehler ergibt sich durch die Temperaturabhängigkeit der Halbleiter-Sensoren von ca. 6% Wirkungsgradverlust je 10°C Temperaturzunahme, welcher jedoch nachträglich rechnerisch korrigiert werden kann. Die schnelle Ansprechzeit der Siliziumsensoren ermöglicht die gleichzeitige Messung von Global- und Diffusstrahlung mit nur einem gemeinsamen Sensor. Beim Rotating-Shadowband-Pyranometer rotiert minütlich ein Schattenband am Detektor vorbei, so dass zu diesem Zeitpunkt nur die Diffusstrahlung gemessen wird. Aus der Differenz aus Global- und Diffusstrahlung ergibt sich auch hier in Folge die Direktstrahlung.

Zur direkten Messung der Direktstrahlung nutzt man *Pyrhemliometer*, welche mithilfe eines der Sonne nachgeführten Rohres gewährleisten, dass nur direkte Strahlung aus dem Raumwinkel der Sonnenscheibe den Sensor erreicht. Diese Nachführung muss kontinuierlich und exakt erfolgen, was das System daher anfällig für Fehler macht.

10.3 Probleme mit Strahlungsmessung von Bodenstationen

Für Pyranometer und Pyrhelimeter ergeben sich mehrere Fehlerquellen:

- Mangelnde Stabilität der Kalibrierung
- Nichtlinearität der Proportionalität von Strahlung und Messstrom
- Ausrichtungsfehler
- Temperaturempfindlichkeit
- Spektralfehler.

Die Genauigkeit der Messgeräte unterscheidet sich in drei Klassen:

- Primary Standard (Weltstrahlungsreferenz des World Radiation Centers WRC)
- Secondary Standard (3% für Tagessummen)
- First Class Standard (5% für Tagessummen)
- Second Class Standard (10% für Tagessummen, 15% bei Siliziumsensoren).

Am gebräuchlichsten ist der First Class Standard, so dass bei Strahlungsmessungen von Bodenstationen grundsätzlich von einem mittleren Fehler von 5% ausgegangen werden muss. Bei Strahlungswerten, welche aus anderen Messwerten abgeleitet werden, verstärkt sich der Fehler der Ursprungsgrößen und erreicht damit meist nicht mehr die geforderte Genauigkeit. Zu den systematischen Fehlern kommen hinzu:

- Fehlerhafte Aufstellung der Geräte
- Falsche Kalibrierung der Nachführung
- Mangelhafte Wartung.

Dies macht deutlich, dass sowohl hochwertige Messgeräte als auch qualifizierte Betreiber zur Erstellung möglichst präziser Messdatensätze notwendig sind. Diese optimalen Grundbedingungen können jedoch für viele Bodenstationen – insbesondere außerhalb der Industrieländer – nicht als gegeben vorausgesetzt werden.

Ein weiteres Problem bei Messungen von Bodenstationen stellt die Herstellung von räumlicher und zeitlicher Vergleichbarkeit der Messungen dar.

Beim Vorliegen von oftmals jahrzehnte- bis jahrhundertelanger Messreihen muss bei jeder neuen Umstellung auf eine modernere Messapparatur auch der resultierende Wechsel der Datenqualität mit berücksichtigt werden. Auch für die Vergleichbarkeit von Messungen an verschiedenen Standorten müssen unterschiedliches Alter, Qualität, Genauigkeit, Eichung und Wartungszustand der Geräte berücksichtigt werden.

Eine räumliche Interpolation zwischen bestehenden Messpunkten ist daher sehr schwierig. Insbesondere dort, wo kein enges Messnetz an Bodenstationen vorhanden ist wie beispielsweise im Bereich der Ozeane oder dem afrikanischen Kontinent, birgt die großflächige Datenextrapolation ein großes Fehlerpotential. Eine räumliche Vergleichbarkeit ist ausschließ-

lich bei Satellitenmessung gegeben, da ein eventuell auftretender Fehler einheitlich alle Messpunkte betrifft und gegebenenfalls herausgerechnet werden kann.

Die Messung der Extraterrestrischen Strahlung schließlich ist vom Boden aus nur im Hochgebirge oder mit Flugzeugen und Wetterballons möglich, jedoch nie ohne den störenden Einfluss von Atmosphärenverunreinigung durch Staub und Wasserdampf.

10.4 Satellitenmeteorologie

Erst die NASA⁹⁸ konnte 1968-1971 im Weltraum Messungen der Extraterrestrischen Strahlung durchführen. Das hieraus abgeleitete Strahlungsspektrum wird als NASA-Standard bezeichnet. Alle alten Daten der Bodenmessungen wurden nach einer Neukalibrierung der Messinstrumente 1981 durch die WMO⁹⁹ überarbeitet und bilden heute den sog. WRC-Standard¹⁰⁰. Inzwischen stimmen NASA- und WRC-Spektrum im Wesentlichen überein.

Seitdem befasst sich die Satellitenmeteorologie mit der Auswertung der Messungen von Wettersatelliten. Man unterscheidet geostationäre Satelliten und polarumlaufende Satelliten.

Geostationäre Satelliten fliegen in 35.800 km Höhe über dem Äquator mit der selben Winkelgeschwindigkeit wie die Erdumdrehung, so dass sie an einem festen Punkt über der Erde stehen. Zur Stabilisation rotieren sie zudem um die eigene Achse. Ein geostationärer Satellit hat direkt unter sich eine sehr hohe Auflösung (1 km), die zu den Bildrändern (Polen) hin immer schlechter wird (5 km), da dort keine direkte Aufsicht mehr möglich ist. Da ein geostationärer Satellit nur etwa 2/5 der Erdoberfläche abdeckt, ist zur lückenlosen Erfassung ein Satellitenverbund notwendig.

Polarumlaufende Satelliten fliegen auf einem polaren, sonnensynchronen Orbit in etwa 800 km Höhe. Da ein Umlauf etwa 100 Minuten dauert, wird die Erde alle 12 Stunden komplett abgetastet. Die Auflösung ist hier auch im Bereich der Pole sehr gut (100 – 1000 m).

Die verschiedenen Radiometer an Bord eines Wettersatelliten messen die Strahlung in den verschiedenen Spektralbändern.

Zu diesen Kanälen gehören unter anderem der VIS (visible) und der IR (infrarot)-Kanal. Um die so entstehenden Daten korrekt interpretieren zu können, müssen die Strahlungsgesetze der Physik angewandt werden.

An Bord unterscheidet man zudem die aktiven und die passiven Instrumente. Passive Instrumente detektieren lediglich die Strahlung, z.B. die elektromagnetische Strahlung der Erdoberfläche, aktive Instrumente senden Radar- oder Laserstrahlen zur Erde und messen das reflektierte Signal.

⁹⁸ National Aeronautics and Space Administration

⁹⁹ World Meteorological Organization

¹⁰⁰ World Radiation Center

Der VIS-Kanal misst ausschließlich die von Erde und Atmosphäre reflektierte Sonnenstrahlung. Die aus Wassertropfen bestehenden Wolken reflektieren z.B. besonders stark und erscheinen im VIS-Kanal sehr hell. Wolken aus Eiskristallen absorbieren stark im nahen Infrarotbereich, so dass sie in diesen Kanälen dunkel erscheinen. Nur durch Kombination der Daten aus den verschiedenen Kanälen kann daher auf verschiedene Wolkenarten und deren vertikale Schichtung geschlossen werden. Zur Bestimmung der Bodenalbedo muss der jeweilige Bodentyp durch den Vergleich der Spektren verschiedener Vis-Kanäle ermittelt werden. Sind keine störenden Wolken vorhanden, kann sogar mittels der Schwarzkörperstrahlung direkt die Temperatur der Erdoberfläche bestimmt werden.

Das Radiometer misst somit in den drei Spektralbändern:

- VIS (visible) / Das sichtbare Band: 0,45 bis 1,0µm. Tagsüber werden zwei Radiometer (VIS1 und VIS2) zur visuellen Beobachtung genutzt
- WV (water vapour) / Das Wasserdampf-Absorptionsband: 5,7 bis 7,1µm. Wird zur Bestimmung des Wasserdampfgehaltes der Atmosphäre genutzt.
- IR (Infrared) / Das thermische Infrarotband: 10,5 bis 12,5 µm. Wird zur Bestimmung der Temperatur von Wolken-, Land- und Meeresoberflächen genutzt.

Aus dem VIS- und IR-Kanal wird je ein Wolkenindex bestimmt. Beide Indices werden empirisch in eine effektive Transmission des jeweiligen Pixels umgerechnet. Die den Boden erreichende Direktstrahlung wird mittels Strahlungstransfergleichungen unter Berücksichtigung des reduzierenden Einflusses von Ozon, Wasserdampf und Aerosolen auf die Transmission berechnet. Durch die Kombination mehrerer Kanäle können somit unterschiedliche Wolkenarten erkannt werden und Schneeflächen lassen sich eindeutig von Eiswolken unterscheiden.

Das Radiometer tastet die Erde zeilenweise ab. Die von Wolken und Erde reflektierte Strahlung wird über ein Spiegelsystem erfasst, digitalisiert und zur Empfangsstation gefunkt.

10.5 Vorteile der Satellitenmeteorologie

Für eine präzise Berechnung solarer Strahlung müssen Messwerte in einer möglichst hohen zeitlichen Auflösung und in exakter räumlicher Zuordnung vorliegen. Diese Anforderung war vom globalen Netz der Bodenstationen nicht in der benötigten Präzision zu leisten. Dank der Satellitenmeteorologie liegen uns heute belastbare Daten über längere Messperioden in großer räumlicher und zeitlicher Konsistenz vor.

Während in Bodenstationen bei der Strahlungsmessung mit Pyranometern und Pyrhelioimetern nur die auf wenige Quadratzentimeter fallende Strahlung ermittelt werden kann, wird mit Satellitenaufnahmen das Flächenmittel der Strahlung im gesamten betreffenden Gebiet gemessen. Dies führt bereits zu deutlich geringeren Fehlern als die punktuelle Messung durch eine an einem beliebigen Ort innerhalb dieses Gebietes positionierten Bodenstation.

Für belastbare Berechnungen müssen die langjährigen Mittelwerte für Global- und Direktstrahlung ausreichend stabil sein. Die Anforderungen verlangen die Einhaltung eines Schwankungsbereichs von maximal 5% ist für Globalstrahlung. Diese Varianz ist meist bereits nach vier Mittelungsjahren unterschritten. Für Direktstrahlung dauert die Messung dagegen mindestens zehn Jahre, da die Direktstrahlung gegenüber Globalstrahlung eine dreimal höhere Variabilität aufweist¹⁰¹. Derart lange Messreihen sind bei Bodenstationsmessungen häufig inkonsistent. Es empfiehlt sich daher, besser auf Satellitendaten zurückzugreifen, da diese inzwischen für einen Zeitraum von mehr als 20 Jahren durchgängig existieren.

Aufgrund starker regionaler Unterschiede ist die angestrebte hohe räumliche Auflösung selbst bei dem sehr dichten Netz von Bodenstationen in vielen Industrieländern nicht ausreichend. Oft ist bereits bei einem Abstand von wenigen Kilometern zwischen zwei Bodenstationen die satellitengestützte Bestimmung der Solarstrahlung zutreffender, als die Interpolation zwischen den beiden Messstationen¹⁰² – selbst für den Fall, dass diese fehlerfrei messen könnten. Die Anforderung an hohe Auflösung und flächendeckende Erfassung ist somit nur durch Satellitendaten zu erreichen.

10.6 Verfügbare Datensätze zur Solarstrahlung

Datenbank	Orte	Gebiet	Zeitraum (J)	Parameter
BGUni (Ben-Gurion University)	8	Israel	1989-1999 (10)	Dir
BSRN (Baseline Surface Radiation Network)	36	Europa	ab 1992 (17)	G, Diff, Dir
Climate1	1.200	Welt	unterschiedlich	G, T
E.S.R.A. 2000 (European Solar Radiation Atlas)	586	Europa+Nordafrika	1981-1990 (9)	G, Diff, T
GAW (Global Atmosphere Watch)	22	Welt	ab 1994 (15)	G, Diff, Dir
GEBA (Global Energy Balance Archive)	1.405	Welt	ab 1992 (17)	G
IDMP (International Daylight Measurement Programme)	48	Welt	ab 1991 (18)	G, Dir, Dif
METEONORM 4.0	2.400	Welt	unterschiedlich	G, D, T
NSRDB (National Solar Radiation Data Base)	239	USA	1961-1990	G, D
S@tel-Light	250.000	Europa+Nordafrika	1996-2000 (4)	G, D, T
Skal-ET	3	Spanien	2000-2003 (3)	G, Diff
SSE (NASA Surface Meteorology and Solar Energy Data)				
Release 5 (2005)	64.800	Welt	1983-1993 (10)	72
Release 6 (2008)	64.800	Welt	1983-2005 (22)	200
WDRC (World Radiation Data Center)	1.195	Welt	1964-1993	G

Tabelle 10.2: Auswahl an Datenbanken für Solarstrahlung

(Quellen: Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (2006), S. 22; Quaschnig: Datenbanken für Solarstrahlung, <http://www.volker-quaschnig.de/downloads/sww8-2001.pdf> (zuletzt abgerufen am 05.02.09))

¹⁰¹ vgl. [Lohmann (2006)]

¹⁰² vgl. [Perez et al. (1997)]

Die Datenbasis verfügbarer meteorologischer Datensätze ist groß und wächst ständig. Viele Datenbanken greifen jedoch auf gleiche Ursprungsquelle zurück. Zwischen unterschiedlichen Quellen können die Abweichungen dennoch oft sehr hoch sein. Die in *Tabelle 10.2* aufgelisteten Datenbanken für solare Strahlung sind nicht vollständig, sondern bieten einen Überblick über die größten und meistgenutzten Quellen.

Für die vorliegende Forschungsarbeit wird eine Datenquelle gesucht, welche folgende Ansprüche erfüllt:

- Globale Datenerfassung, da weltweite Standorte abgefragt werden.
- Hohe räumliche und zeitliche Auflösung, da für Temperatur und Strahlung stündliche Werte benötigt werden.
- Korrelierende Datensätze zu Solarstrahlung und meteorologischen Größen, da für jeden Standort sowohl solare Gewinne als auch thermische Verluste berechnet werden.
- Belastbare Angaben zu den Messgrößen Lufttemperatur, Heizgradtagen, Kühlgradtagen, Globalstrahlung, Clearness Index, Bewölkungsgrad und Bodenalbedo, da diese zur Anwendung der in den Formelwerken aufgeführten Rechenwege benötigt werden.

Insbesondere die Datensätze auf Basis von Bodenstationsmessungen können aus o.g. Gründen den Anspruch an eine globale und homogene Datenerfassung nicht gewährleisten. Insgesamt ist die Anzahl der erfassten Orte zudem oft sehr gering, teilweise fehlt hier die Erfassung ganzer Kontinente. Auch ist die Zugänglichkeit zu diesen Daten oft erschwert.

Bei den auf Satellitenmessungen basierenden Datenbanken wie beispielsweise S@tel-Light und Skal-ET sind die Messzeiträume mit 3-4 Jahren für eine sichere Prognose der Strahlung zu kurz. Die Ergebnisse sind zudem leider auch teilweise nur in Form von Weltkarten jedoch nicht als auslesbare Einzelwerte erhältlich.

Als Datenquelle für die vorliegende Arbeit wurde die Satelliten-Datenbank *Surface Meteorology and Solar Energy (SSE)* der amerikanischen Weltraumorganisation NASA gewählt.

Diese lag zum Zeitpunkt des entsprechenden Bearbeitungsschrittes dieser Forschungsarbeit Ende 2005 zum Download aktuell als Release 5¹⁰³ vor.

¹⁰³ Seit Ende 2008 ist Release 6 veröffentlicht. Die Versionen unterscheiden sich im wesentlichen durch den von 10 auf 22 Jahre verlängerten Messzeitraum und die damit erreichte höhere Belastbarkeit der Mittelwerte sowie die Erweiterung der Messung von 72 auf 200 meteorologischen Parametern. Beim Vergleich der beiden Versionen kann man folgende weltweite Entwicklung erkennen: Clearness Index und Globalstrahlung nehmen leicht zu, die Albedo nimmt als Folge schmelzender Eisfelder insbesondere an den Polen ab, die Lufttemperatur nimmt zu, was zu einer leichten Verschiebung der Heiz- und Kühlgradtagssummen führt. Insgesamt spiegeln diese Veränderungen Anzeichen des Klimawandels wider. Die Zunahme des Strahlungsangebots und der Rückgang der Heizgradtage würden daher bei einer erneuten Berechnung auf Basis der aktuelleren Daten aus Release 6 die folgenden Gebäude-Energiebilanzen sogar um einige Prozent zusätzlich verbessern.

Folgende Gründe sprechen für die Wahl der Satelliten-Datenbank SSE der NASA als Datenquelle für die vorliegende Arbeit:

- Räumlich, zeitlich und messtechnisch konsistente Datenbasis
- Hohe räumliche Auflösung von 1x1 Grad (64.800 Koordinatengitternetzfelder), gemittelt für das jeweilige Feld statt der punktuellen Mikroklimaaufzeichnung einer einzelnen Bodenstation
- Hohe zeitliche Auflösung von Stundenwerten, aber auch Tagesmittel und Monatssummen
- Parallele Messung von 72 meteorologischen Größen, darunter alle in dieser Arbeit benötigten Parameter
- Ausreichender Messzeitraum von 10 Jahren
- Kostenfreie Verfügbarkeit über das Internet nach erfolgter Registrierung
- Einfaches Format, das ein Auslesen in Exceltabellen ermöglicht
- Der Datenabruf erfolgt über die Eingabe der Standortkoordinaten, welche in dieser Arbeit durch die Verknüpfung mit der Datenbank des *World Gazetteers* zur Verfügung stehen.

10.7 Beschreibung der meteorologischen Datenbank SSE

Das Datenportal *Surface meteorology and Solar Energy* des *NASA Earth Science Enterprise Programm* und ist unter <http://eosweb.larc.nasa.gov/sse/> abrufbar. Die gemessenen Daten stammen aus dem *NASA Science Mission Directorate's satellite and re-analysis Programm*.

Die SSE Datenbank soll eine belastbare Grundlage für die Auslegung von Anlagen zur Nutzung erneuerbaren Energien bieten. Folgende Partner haben in Zusammenarbeit die umfangreichen Datenbanken aus Satellitenmessungen der NASA ausgewertet und zur SSE Datenbank zusammengestellt:

- amerikanische Bundesbehörden (U.S. Air Force, U.S. Army, U.S. Navy, U.S. State Department Headquarters, U.S. Department of Energy)
- Industriepartner (BP Solar, Shell Renewables, Duke Solar Energy)
- Forschungseinrichtungen (über 100 Universitäten)
- Gemeinnützigen Organisationen (National Science Foundation, NOAA, The World Bank, UNESCO).

Die SSE Datasets werden unter anderem verwendet von:

- World Health Organisation (WHO)
- United Nations Environmental Program (UNEP)
- Natural Resources Canada (NRCan)
- Klimamodellen des IPCC
- Solar Energy International's On Line PV Design Course

Durch ihr mehrjähriges Satelliten-Programm verfügt die US-Bundesbehörde für Luft- und Raumfahrt NASA über Langzeitmessreihen zu meteorologischen Daten sowie zur Solarstrahlung für den gesamten Erdball. Insbesondere für unzugängliche Gebiete oder solche mit dünnem oder nicht vorhandenem Bodenstationsmessnetz sind die Satellitendaten die einzige vorhandene Datenquelle. Die umfangreichen Datenbanken der NASA-Satellitenmessungen sind aufgrund ihrer sowohl räumlichen als auch zeitlichen Konsistenz einzigartig. Um dieses sehr umfangreichen Datenmaterial für Forschung und Industrie zugänglich zu machen, wurde das *Surface meteorology and Solar Energy Dataset* speziell für den Bedarf bei der Projektierung von Photovoltaikanlagen und anderen Nutzungen erneuerbarer Energie erstellt. Diese Datenblätter sind nach vorheriger Registrierung im Internet kostenlos verfügbar. Die erste Version wurde 1993 veröffentlicht, aktuell ist Release 6 erhältlich.

Die Satellitenmessungen werden mit den Messungen der 1195 Bodenstationen für die 30-Jahres-Spanne von 1964-1993 des World Radiation Data Centers abgeglichen. Im Allgemeinen gilt, dass nur qualitativ sehr hochwertige Bodenstationsmessungen genauer als satellitengestützte Messungen sind. Bei Bodenmessungen ist zudem nur schwer abschätzbar, welche Fehlerquoten sich aus Messungenauigkeiten, abweichende Kalibrierung, operationale Betriebsfehler, Verschmutzungen, Messunterbrechungen und statistisch gefüllte Datenlücken ergeben. Hinzu kommt, dass die meisten Bodenstationen nicht über Messgeräte der obersten Qualitätskategorie und entsprechend geschultes Personal verfügen. 1989 schätzte daher das World Climate Research Programm, dass die Mehrheit der Bodenstationsmessungen mit Unsicherheiten von 6-12% behaftet ist. Für die wenigen hochqualitativen Stationen gelten immerhin noch Abweichungen von 3-6% als üblich. Die Messungen der SSE werden weltweit mit Bodendaten des Baseline Surface Radiation Network, des National Climate Data Center sowie der RETScreen Weather Database verglichen.

Die so ermittelten Abweichungen betragen gegenüber der jeweiligen Bezugsquelle:

Parameter	Bezugsquelle	Systematische Abw.
Globalstrahlung auf die Horizontale E_{Glob}	BSRN	-0.1 %
Diffusstrahlung auf die Horizontale E_{Dif}	BSRN	+7.49 %
Direktstrahlung auf die Horizontale E_{Dir}	BSRN	-4.06 %
Tagesmaximum Lufttemperatur T_{max}	NCDC	-1.83 °C
Tagesminimum Lufttemperatur T_{min}	NCDC	+0.24 °C
Tagesmittelwert Lufttemperatur T_{mittel}	NCDC	-0.58 °C
Heizgradtage HDD_{18}	NCDC	+17.28 Gradtage
Kühlgradtage CDD_{18}	NCDC	-5.65 Gradtage
Windgeschwindigkeit	RETScreen	-0,2 m/sec

Tabelle 10.3: Systematische Abweichung der Satelliten- zu Bodenstationsmessungen

(Quelle: SSE Methodology, NASA (2006))

Bei dieser Gegenüberstellung erkennt man, dass die Satellitenmessungen zur Globalstrahlung mit den Werten der Bodenstationen nahezu exakt übereinstimmen. Damit kann eine hohe Genauigkeit der Datenquelle für die in dieser Forschungsarbeit zentrale Rechengröße angenommen werden.

Des Weiteren ist zu erkennen, dass die Satellitenmessung zu Überschätzung des Diffusanteils bei gleichzeitiger Unterschätzung des Direktanteils tendieren, was bei der späteren Betrachtung der hierauf basierenden Berechnungsergebnisse zur Strahlungsverteilung berücksichtigt werden muss.

Die Lufttemperatur wird im Mittel leicht unterschätzt, so dass es in Folge zu einer Überschätzung der Heizgradtage bei gleichzeitiger geringer Unterschätzung der Kühlgradtage kommt. Auch dies muss später bei der Interpretation der Energiebilanzen berücksichtigt werden.

Insgesamt kann man jedoch eine sehr gute Übereinstimmung der Daten feststellen. Eingedenk der Messfehler der Bodenstationen kann davon ausgegangen werden, dass die Satellitendaten durchaus in verlässlicher Weise die Realität abbilden.

Kapitel 11

Validierung der Strahlungsberechnung

Im Folgenden soll die in *Kapitel 10* gewählte Datenquelle und die mit ihren Messwerten durchgeführte Berechnungsmethode zur Umrechnung solarer Strahlung auf beliebig geneigte und orientierte Empfangsflächen (s. *Kapitel 9*) validiert werden. Hierzu werden für einen beliebigen Standort die eigenen Rechenergebnisse mit den Angaben anderer Quellen verglichen. Beispielhaft wird die Stadt Hamburg gewählt, da für sie in allen zum Vergleich gewählten Referenz-Quellen Strahlungsdaten hinterlegt sind. Die Referenz-Angaben stammen aus:

- DIN V 4108-6 (Vornorm, Anhang A)
- Europäischer Strahlungsatlas [Palz (1984)]
- PVGIS (Internetprogramm: <http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis>)
- SOLARCALC (Internetprogramm: www.solarcalc.de)

11.1 Globalstrahlung auf die Horizontale

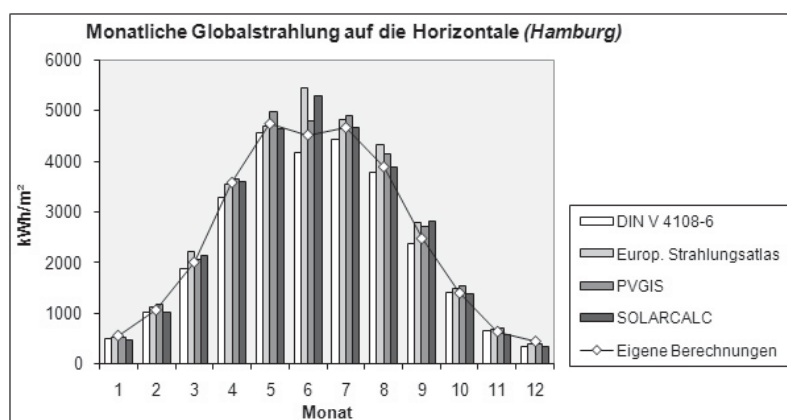


Abbildung 11.1: Monatliche Globalstrahlung auf die Horizontale in Hamburg
(Grafik: eigene)

Die Grafik (s. Abbildung 11.1) zeigt eine sehr gute Übereinstimmung der eigenen Berechnungsergebnisse mit den Vergleichsquellen. Für den Monat Juni fällt jedoch auf, dass die Werte des Europäischen Strahlungsatlas sowie von SOLARCALC nicht den kurzzeitigen Strahlungsrückgang aufweisen, den die DIN, PVGIS und die eigenen Berechnungsergebnisse deutlich angeben. Es zeigt sich bereits, dass sich die Quellen in zwei Gruppen aufteilen, wobei in einer Gruppe offensichtlich mit Vereinfachungen und Symmetrien gerechnet wurde, ohne ortstypische Phänomene wie beispielsweise tageszeitabhängige Bewölkungshäufigkeit oder andere temporäre Beeinflussungen des Clearness Index zu berücksichtigen.

11.2 Globalstrahlung auf geneigte südorientierte Empfangsflächen

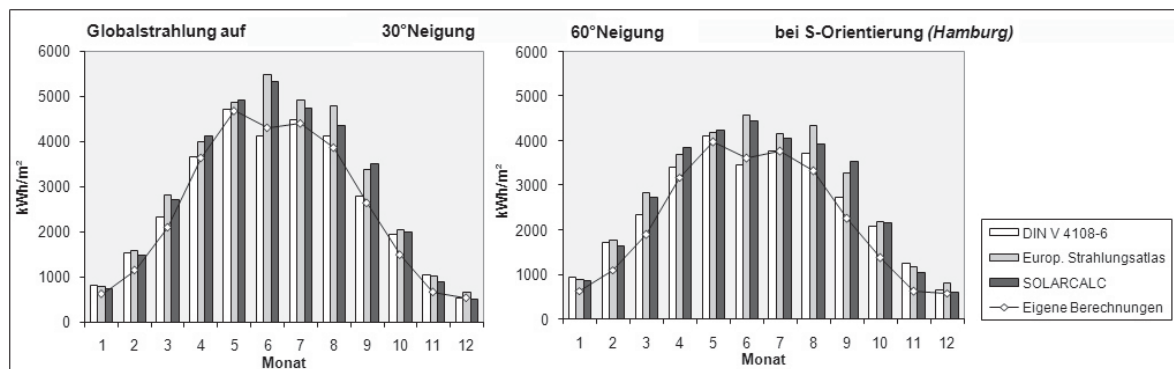


Abbildung 11.2: Monatliche Globalstrahlung auf eine 30° bzw. 60° geneigte südorientierte Empfangsfläche in Hamburg

(Grafik: eigene)

Ein ähnliches Bild (s. Abbildung 11.2) ergibt sich für die monatliche Globalstrahlung auf geneigte südorientierte Empfangsflächen. Sowohl bei einer Neigung von 30° als auch 60° zeigen sich zwei Gruppen. Wieder stimmen die Ergebnisse des Europäischen Strahlungsatlas sowie von SOLARCALC gut überein, beide zeigen nicht den deutlichen Strahlungseinbruch im Juni. Für PVGIS liegen keine Angaben zu geneigten Empfangsflächen vor. Die eigenen Berechnungsergebnisse decken sich gut mit den Angaben der DIN. Insgesamt liegen die eigenen Ergebnisse tendenziell eher unter den Angaben anderer Quellen, so dass die später darauf aufbauenden Gesamtenergiebilanzen keinesfalls als über- sondern eher als unterschätzt gelten können.

11.3 Globalstrahlung auf eine senkrechte Südfassade

Beim Vergleich der Werte für eine Südfassade (s. Abbildung 11.3) ist deutlich zu erkennen, dass die eigenen Berechnungen im Allgemeinen eine gute Übereinstimmung mit der DIN, SOLARCALC, PVGIS und dem Europäischen Strahlungsatlas zeigen. Insgesamt tendieren

die eigenen Angaben jedoch zur Unterschätzung des Gesamtenergieeintrages insbesondere in den Wintermonaten.

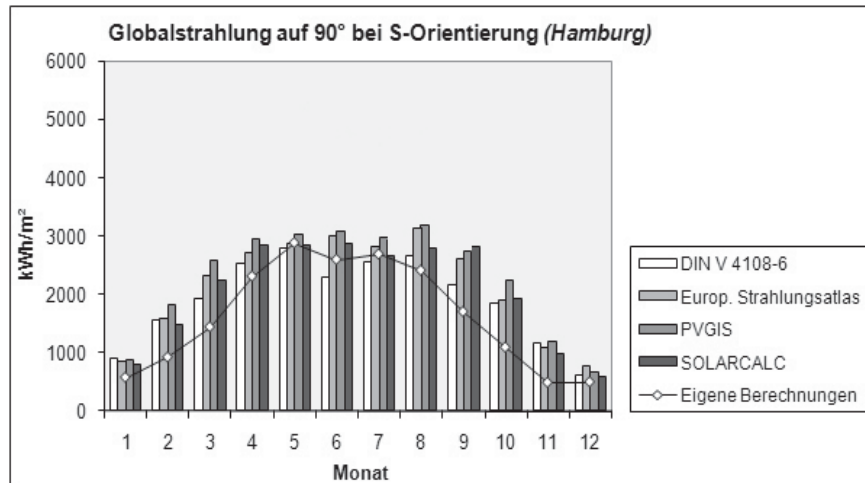


Abbildung 11.3: Monatliche Globalstrahlung auf eine senkrecht stehende südorientierte Empfangsfläche in Hamburg

(Grafik: eigene)

Die Vermutung liegt daher nahe, dass der Direktstrahlungsanteil für die Südfassade in den eigenen Berechnungen niedriger ausfällt. Dies spiegelt die in *Tabelle 10.3* gezeigte systematische Unterschätzung der satellitenbasierten SSE-Datenbank gegenüber den Bodenstationsmessungen wieder. Zur Überprüfung werden die Werte des monatlichen Clearness Index verglichen, welcher wie in den *Abschnitten 9.14 bis 9.16* erläutert den mathematischen Schlüssel zur Zerlegung der Globalstrahlung in einen Direkt- und einen Diffusanteil für geneigte Empfangsflächen darstellt.

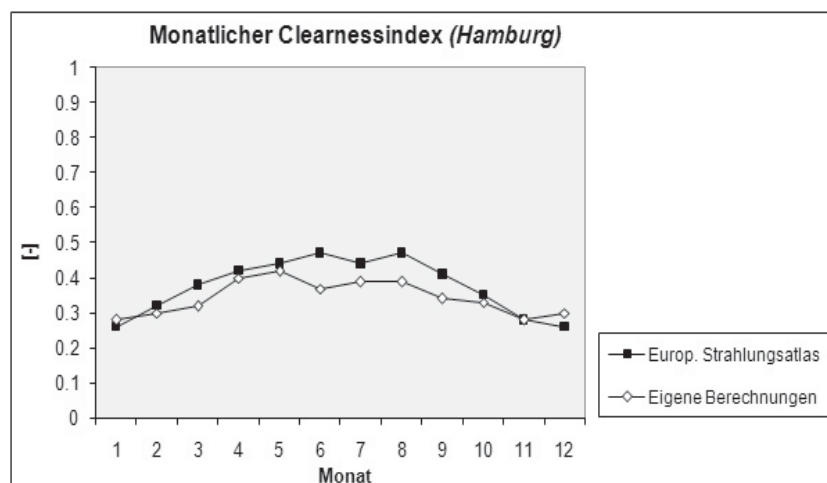


Abbildung 11.4: Monatlicher Clearness Index für den Standort Hamburg

(Grafik: eigene)

Die Grafik (s. Abbildung 11.4) bestätigt die obige Vermutung. Da der eigene Clearness Index niedriger liegt als die Referenzangaben des auf Bodenstationsmessungen basierenden Europäischen Strahlungsatlas, erfolgt die Zerlegung der Globalstrahlung in die beiden Fraktionen bei der eigenen Berechnung leicht zugunsten der Diffusstrahlung bei gleichzeitiger Reduktion des Direktstrahlungsanteiles. Für Flächen mit tendenziell hohen Direktstrahlungsanteilen – wie in diesem Fall bei einer Südfassade – kommt es daher in der Summe zu einer Unterschätzung der empfangenen Globalstrahlung. Andersherum führt die Abweichung des Clearness Index zu einer Überschätzung der Globalstrahlung bei Flächen, die tendenziell wenig Direktstrahlung empfangen wie beispielsweise Nordfassaden. Diese Hypothese wird im Folgenden überprüft.

11.4 Globalstrahlung auf eine senkrechte Nordfassade

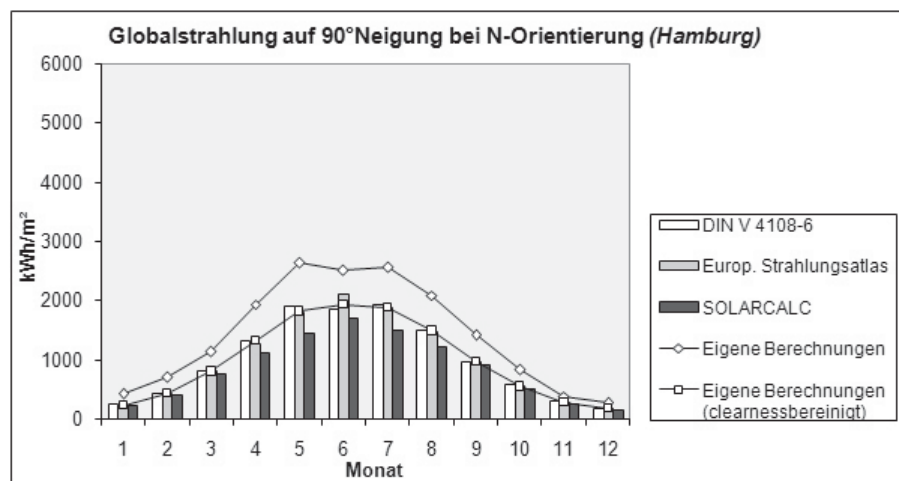


Abbildung 11.5: Monatliche Globalstrahlung auf eine 90° geneigte nordorientierte Empfangsfläche in Hamburg

(Grafik: eigene)

Die Grafik zur Globalstrahlung auf eine Nordfassade (s. Abbildung 11.5) bestätigt, dass die eigene Berechnung über den Angaben der DIN, SOLARCALC und dem Europäischen Strahlungsatlas liegt. Werden jedoch die Angaben des Europäischen Strahlungsatlas zum Clearness Index auf die eigene Berechnung angewendet, zeigt die so bereinigte Kurve eine sehr gute Übereinstimmung mit den anderen Vorgaben. Damit wird deutlich, dass die abweichenden Ergebnisse ausschließlich auf den unterschiedlichen Basisdaten der Satelliten- gegenüber den Bodenstationsmessungen bezüglich des Clearness Index beruhen. Aufgrund der in Abschnitt 10.5 erläuterten höheren Verlässlichkeit und Genauigkeit der Satellitenmesswerte wird für diese Arbeit die Entscheidung getroffen, die Daten der SSE-Datenbank unverändert in die Berechnungen einfließen zu lassen, zumal für die meisten repräsentativen Standorte keine Bodenstationsmessungen für den Clearness Index vorliegen.

11.5 Globalstrahlung auf senkrechte Ost- und Westfassaden

Für Ost- und West-Orientierungen wird von den meisten Referenzquellen eine pauschale Symmetrie an der Süd-Achse angenommen. Daher findet sich in diesen Datenbanken auch nur eine einzelne Angabe, die sowohl für die ost- als auch die westorientierte Empfangsfläche gleichermaßen gilt.

Dass diese Annahme zu großen Fehlern führen kann, da sie die ortstypischen Witterungsveränderungen im Tagesverlauf ignoriert, soll an der folgenden Tabelle mit stündlichen Globalstrahlungswerten für die Stadt Hamburg verdeutlicht werden (s. *Tabelle 11.1*):

Glob [kWh/m ²]	Jan	Feb	Mrz	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez
00.30 Uhr	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
01.30 Uhr	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
02.30 Uhr	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
03.30 Uhr	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
04.30 Uhr	-	-	-	-	0.00	0.01	0.00	-	-	-	-	-
05.30 Uhr	-	-	-	0.04	0.06	0.07	0.06	0.04	-	-	-	-
06.30 Uhr	-	-	0.02	0.07	0.13	0.14	0.13	0.09	0.04	-	-	-
07.30 Uhr	-	0.00	0.03	0.11	0.19	0.20	0.19	0.13	0.06	0.02	-	-
08.30 Uhr	0.02	0.04	0.10	0.20	0.28	0.27	0.27	0.22	0.13	0.08	0.03	0.02
09.30 Uhr	0.04	0.08	0.16	0.28	0.36	0.34	0.35	0.30	0.21	0.13	0.06	0.04
10.30 Uhr	0.06	0.12	0.23	0.37	0.45	0.41	0.43	0.39	0.28	0.19	0.09	0.06
11.30 Uhr	0.08	0.14	0.25	0.39	0.47	0.43	0.45	0.41	0.29	0.20	0.10	0.07
12.30 Uhr	0.10	0.17	0.26	0.40	0.49	0.45	0.47	0.42	0.31	0.20	0.11	0.08
13.30 Uhr	0.12	0.19	0.28	0.42	0.51	0.47	0.49	0.44	0.32	0.21	0.12	0.09
14.30 Uhr	0.09	0.15	0.24	0.36	0.45	0.42	0.44	0.39	0.27	0.16	0.08	0.06
15.30 Uhr	0.05	0.11	0.19	0.31	0.39	0.37	0.39	0.33	0.22	0.12	0.05	0.03
16.30 Uhr	-	0.06	0.15	0.25	0.33	0.32	0.34	0.28	0.17	0.07	-	-
17.30 Uhr	-	-	0.06	0.17	0.24	0.24	0.25	0.20	0.11	-	-	-
18.30 Uhr	-	-	-	0.07	0.15	0.17	0.17	0.11	-	-	-	-
19.30 Uhr	-	-	-	-	0.05	0.09	0.08	-	-	-	-	-
20.30 Uhr	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
21.30 Uhr	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
22.30 Uhr	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
23.30 Uhr	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Tabelle 11.1: Stündliche Globalstrahlung auf eine horizontale Empfangsfläche am Standort Hamburg in [kWh/m²]

(Quelle: NASA SSE (2006))

Die Tabelle zeigt die über das Jahr gemittelte stündliche Globalstrahlung auf eine horizontale Empfangsfläche und basiert auf langjährigen Satellitenmessungen der NASA. Die gedachte Symmetrieachse bei 12.00 Uhr liegt zwischen den stundenmittleren Werten von 11.30 Uhr

und 12.30 Uhr. Bei Vorliegen einer Symmetrie müssten demnach die Strahlungswerte vormittags und nachmittags bei gleichem Abstand von der Symmetrieachse nahezu identisch sein. Zu Vergleichszwecken sind die Werte für 8.30 Uhr und 15.30 Uhr hervorgehoben. Im Folgenden können große Unterschiede festgestellt werden. Im Juli fallen beispielsweise zwischen 8.00 Uhr und 9.00 Uhr insgesamt 0.27 kWh/m^2 auf die Horizontale, während zwischen 15.00 Uhr und 16.00 Uhr 0.39 kWh/m^2 einstrahlen. Dies entspricht einer Abweichung von 44% gegenüber dem Vormittagswert, obwohl sich die Sonnenhöhe aufgrund der nach Süden symmetrischen Sonnenbahn zu beiden Zeitpunkten exakt gleicht.

Die deutliche Abweichung kann somit nur in den sich im Tagesverlauf ändernden Bedingungen beim Atmosphärendurchgang begründet sein. Hier zeigt jeder Standort seine eigenen spezifischen Eigenschaften - beispielsweise die Neigung einer zum Nachmittag hin zunehmenden Bewölkung oder Winden, welche durch Staubaufwirbelungen den Clearness Index der Atmosphäre verändern. Andersherum gibt es an manchen Standorten Morgennebel, der sich erst mit steigender Sonne im Tagesverlauf auflöst, so dass hier die nachmittäglichen Werte regelhaft über denen des Vormittag liegen. Auf die zahlreichen Faktoren zur Beeinflussung der Strahlung beim Atmosphärendurchgang ist ausführlich in *Kapitel 9* eingegangen worden.

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass die pauschalisierte Annahme einer zur Süd-Achse symmetrischen Strahlungsverteilung eine starke Vereinfachung und daher eine große Fehlerquelle der meisten Referenz-Quellen darstellt.

Aus der zeitlichen Komponenten kann auf eine räumliche zurückgerechnet werden, da aus einer höheren Einstrahlung auf eine Horizontale am Nachmittag der Schluss gefolgert werden kann, dass die Westfassade deutlich mehr Energie empfängt als die Ostfassade (s. *Abbildung 11.6*).

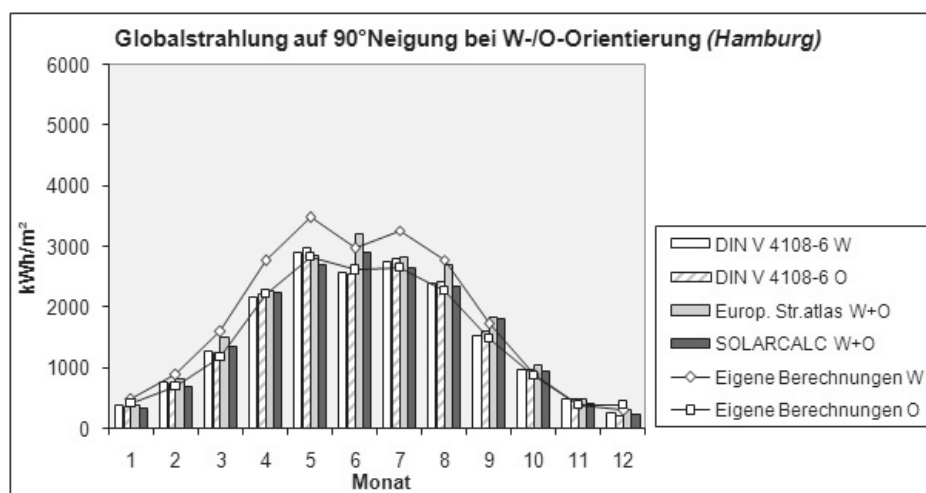


Abbildung 11.6: Monatliche Globalstrahlung auf eine 90° geneigte Empfangsfläche mit entweder westlicher oder östlicher Orientierung in Hamburg

(Grafik: eigene)

Eine der wenigen Quellen, die keine pauschale Symmetrie annehmen und zwischen West- und Ostfassade differenzieren, ist die DIN. Sowohl der Europäische Strahlungsatlas als auch SOLARCALC geben nur einen gemittelten Wert an, der für West und Ost identisch ist. In der Grafik zeigt sich, dass die eigenen Berechnungsergebnisse gut mit den veröffentlichten Daten harmonisieren, dass sich jedoch der Unterschied zwischen West- und Ostfassade in den eigenen Berechnungen am deutlichsten abzeichnet.

11.6 Zusammenfassung

Abschließend bleibt festzuhalten, dass auch bei den Referenzquellen lediglich die Angaben für die Horizontale gemessen sind, während jene für geneigte Empfangsflächen durch bestimmte Algorithmen umgerechnet wurden. Diese Umrechnung muss deshalb immer erfolgen, weil es keine Verfahren zur Strahlungsmessung für beliebig ausgerichtete Empfangsflächen gibt, bzw. derartige Messungen sehr aufwendig wären.

Selbst beim Vorliegen vergleichbarer Messwerte für die Horizontale wird das Ergebnis nach der Umrechnung für die beliebig ausgerichtete Empfangsfläche immer aufgrund unterschiedlich gewählter Modelle und Algorithmen leicht voneinander abweichen.

Für eine angestrebte Optimierung der Gebäudeform ist vor allem die räumliche Umrechnung des zeitlichen Verhaltens der Einstrahlung im Tagesverlauf wichtig, welche maßgeblich vom Wandel des stündlichen Clearness Index abhängt.

Der stichprobenartige Abgleich mit o.g. Referenz-Quellen konnte im Allgemeinen eine gute Übereinstimmung der eigenen Berechnungsergebnisse mit den veröffentlichten Daten zeigen. Die dargestellten Abweichungen basieren hauptsächlich auf Unterschieden in den gewählten Algorithmen, vereinfachenden Annahmen zur Symmetrie sowie systemimmanenten und messtechnischen Unterschieden zwischen Bodenstations- und Satellitenmessungen.

Kapitel 12

Vorstellung des entwickelten Programms

Es befinden sich viele Computerprogramme und Simulations-Tools zur Berechnung solarer Strahlung auf dem Markt. Allerdings dienen sie meist nicht der genauen Berechnung der Global-, Direkt- und Diffusstrahlungsstrahlung für eine beliebig ausgerichtete Empfangsflächen an einem beliebigen globalen Standort, sondern der konkreten Berechnung des solaren Ertrages bei Nutzung einer bestimmten solaren Technologie – sei es Photovoltaik oder Solarthermie- oder gar eines konkreten Produktes eines bestimmten Herstellers. Die Auswahlmöglichkeit der Standorte ist zudem oft sehr begrenzt. Dafür werden bereits sehr detaillierte Angaben zu produktbezogenen Wirkungsgraden, physikalischen Kennlinien und bestimmten Hersteller-Systemen abgefragt, um die Programme überhaupt nutzen zu können. Für die im Rahmen dieser Forschungsarbeit benötigten Berechnungen sind die vorhandenen Programme damit ungeeignet – insbesondere da sie grundsätzlich nur die Erträge einer Einzelfläche und nicht des geometrischen Zusammenspiels aller Flächen einer gesamten Gebäudehülle ermitteln.

Daraus ergibt sich die Notwendigkeit der Entwicklung eines eigenen Computerprogrammes, zumal sehr umfangreiche Datenbanken miteinander verknüpft und zahlreiche Rechenoperationen durchgeführt werden müssen. Das selbst erstellte Programm dient somit als Werkzeug zur Durchführung der komplexen Untersuchung und stellt ein eigenständiges Ergebnis dieser Arbeit dar.

Als Programmiersprache wurde Visual Basic gewählt, da die windowsähnliche Oberfläche für spätere Nutzer gewohnt ist und eine gute grafische Darstellung der Ergebnisse erlaubt. Auch ist die Einbindung von Office-Applikationen wie z.B. Excel leicht möglich. Das von Microsoft entwickelte Visual Basic ist eine prozedurale, objektorientierte Programmiersprache, d.h. dass das Programm in einzelne Prozeduren zur Lösung von Teilaufgaben untergliedert wird und dass Daten und die darauf arbeitenden Routinen zu Einheiten, den sog. Objekten, zusammengefasst werden. Die Zusammenführung untereinander agierender Objekte bildet ab-

schließend das Computerprogramm. Ein wichtiger Vorteil der Sprache liegt in der leichten Erlernbarkeit sowie der bewussten Verwendung englischer Wörter anstelle von Symbolen (z.B. „AND“ statt „&&“ in C++). Es besitzt eine integrierte Entwicklerumgebung mit während der Programmierung sehr hilfreichen Funktionen wie Compiler, Debugger und Syntaxhilfen.

12.1 Beschreibung des Programmaufbaus

Das Hauptprogramm beinhaltet die Menüführung und organisiert die Navigation durch die verschiedenen Bereiche und Untermodule des Programms. Es bietet eine kurze Einführung mit Anleitung sowie eine einfache Benutzerführung und besteht aus folgenden Teilen:

Einführung

- Erläuterung des Programmaufbaus
- Kurzanleitung zur Benutzerführung (Tutorial)

Datenbanken

- Eingabe und Verwaltung allgemeiner Gebäudedaten
- Eingabe und Verwaltung dreidimensionaler Gebäudeformen
- Eingabe und Verwaltung von standortspezifischen Klima- und Strahlungsdatensätzen
- Eingabe und Verwaltung der Rechenparameter (Dämmstandard, Wirkungsgrad, Belegungsgrad)

Versuchsdurchführung

- Auswahl der Gebäude-Standort-Kombinationen
- Festlegung der Rechenparameter
- Berechnung thermischer Verluste und solarer Einstrahlung
- Optimierungsprozedur zur Gebäudeorientierung

Ergebnisse (Dokumentation und Verwaltung)

- Dokumentation und Ergebnisverwaltung je Standort
- Dokumentation und Ergebnisverwaltung je Form
- Zusammenfassung aller Standorte und Formen (Matrix)

Auswertung

- Grafische Analyse (Farbfilter, Klassifikation)
- Mathematische Analyse (Punkthaufen, Lineare Abhängigkeiten)
- Ableitung allgemeiner Prinzipien und Erkenntnisse

Im Folgenden werden einzelne Module des Hauptprogramms kurz erläutert.

12.2 Eingabe und Verwaltung allgemeiner Gebäudedaten

In diesem Untermodul (s. *Abbildung 12.1*) werden alle für eine statistische Auswertung benötigten allgemeinen Gebäudedaten erhoben wie beispielsweise Gebäudeart (freistehendes Einfamilienhaus, Reihenhaus, Zeile, Blockrand, Hochhaus, Halle), Nutzung (Wohn- oder Büronutzung), Geschossgröße, Geschossanzahl, Dachform (Sattel-, Flach-, Pult-, Tonnendach) und viele weitere.

Besondere Aufmerksamkeit liegt in der Kategorisierung der Primärform in eine eher konventionelle oder unkonventionelle Erscheinung, in Quaderartige oder Pyramidale. Diese Zuordnung ist für die spätere Ergebnisauswertung gemäß der zentralen Fragestellung zur Notwendigkeit der Entwicklung einer neuen, nicht-orthogonalen Architektursprache von großer Bedeutung.

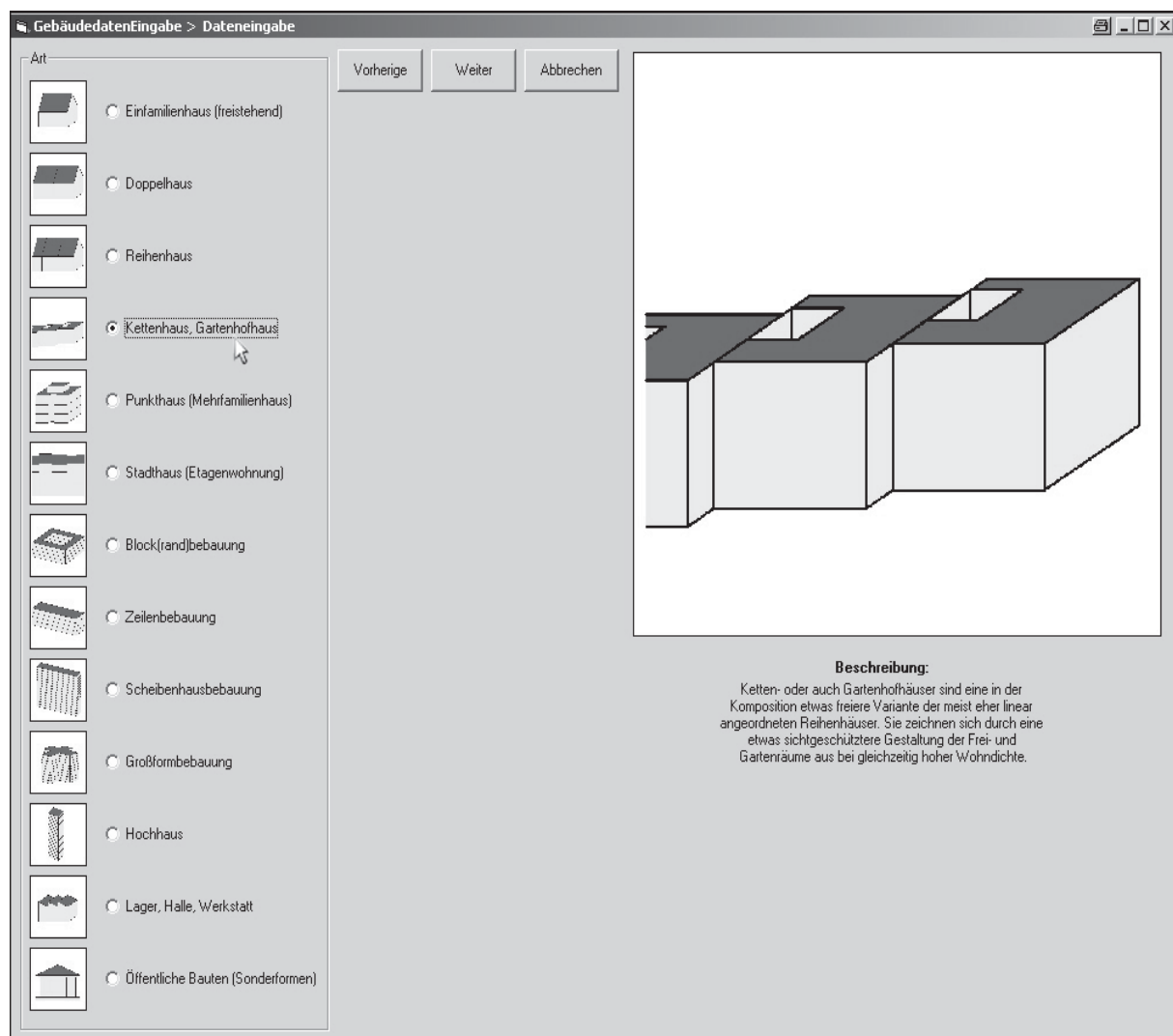


Abbildung 12.1: Maske zur Eingabe der allgemeinen Gebäudecharakteristika

(Grafik: eigene; Screenshot dient ausschließlich dem visuellen Gesamteindruck)

12.3 Gebäudedatenblatt

Für die statistische Auswertung werden die erfassten Angaben systematisch in einem Gebäudedatenblatt (s. *Abbildung 12.2*) gespeichert und später mit den geometrischen Gebäudedaten zur dreidimensionalen Form verknüpft.

Gebäude - Datenblatt Nr.: 	<u>Gebäudeform</u>	Typ:	Variante:
<u>Kategorie</u> ☐ konventionelle Baubestandsform ☐ unkonventionelle Form (n. solar) ☐ unkonventionelle Form (solar) <u>Art</u> ☐ Einfamilienhaus (freistehend) ☐ Doppelhaus ☐ Reihenhhaus ☐ Ketten-, Gartenhofhaus ☐ Punkthaus (Mehrfamilienhaus) ☐ Stadthaus (Etagenwohnungen) ☐ Block(rand)bebauung ☐ Zeilenbebauung ☐ Scheibenhausebebauung ☐ Großformbebauung ☐ Hochhaus ☐ Lager, Halle, Werkstatt ☐ Off. Bauten (Sonderformen) <u>Nutzung</u> ☐ Wohnen ☐ Büro, Verwaltung ☐ Gewerbe, Industrie ☐ Kultur, Bildung, Sport, Religion <u>Anbauten</u> ☐ keine ☐ Wintergarten ☐ Garage, Kellersatzräume ☐ Treppenhaus, Laubengang ☐ Balkon ☐ sonstige	<u>Grundriß</u> ☐ Rechteck - Basis ☐ Trapezoid - Basis ☐ Dreieck - Basis ☐ Winkel - Basis ☐ Polygon - Basis ☐ Kreissegment - Basis ☐ organische Form ☐ freie Form ☐ zusammengesetzte Form <u>Umrßlinie</u> ☐ klar, großßförmig, einfach ☐ zergliedert, strukturiert, komplex <u>Kubatur</u> ☐ kompakt, großßförmig, einfach ☐ zergliedert, strukturiert, komplex <u>Nutzungseinheiten</u> ☐ Anzahl der Nutzungseinheiten ☐ geschätzte Personenanzahl m² Brutto-Geschoßfläche m² Netto-Grundfläche <u>Gruppierung</u> ☐ einzeln ☐ gereiht ☐ gestapelt <u>Verkettung</u> ☐ keine ☐ einseitig angebaut ☐ zweiseitig angebaut ☐ mehrseitig angebaut	<u>Dach</u> ☐ Flachdach ☐ Staffel - Flachdach ☐ Pultdach ☐ Staffel - Pultdach ☐ Satteldach ☐ (Krüppel-)Walmdach ☐ Mansarddach ☐ Zeltdach ☐ Sheddach ☐ Tonnen-, Kuppeldach, gewölbt ☐ Kombidach, Freiform, Sonstige ☐ Nurdach ☐ geneigte Außenwand <u>Dach-Fassaden-Verhältnis</u> ☐ klar getrennt ☐ Gestaltübergang <u>Dachneigung</u> ☐ einheitlich ° ☐ unterschiedlich ° ° ° <u>Dachauf- und -einbauten</u> ☐ keine ☐ Gaube: ☐ Zwerchhaus, Dachkerker ☐ Loggia ☐ Schornstein ☐ sonstige <u>Geschosse</u> ☐ Anzahl Vollgeschosse ☐ Anzahl Dach-, Staffelgesch.	<u>Isometrie</u> <u>Dachaufsicht/Grundriß</u> <u>Außenmaße</u> m maximale Länge (L) m maximale Tiefe (T) m maximale Höhe (H) <u>Datenquelle</u> ☐ eigene Form ☐ angelehnt an: Ort: aus:

Abbildung 12.2: Datenblatt zur Gebäudeeingabe

(Grafik: eigene; Screenshot dient ausschließlich dem visuellen Gesamteindruck)

12.4 Gebäudeformeingabe

Dieses graphische Modul (s. *Abbildung 12.3*) ermöglicht die direkte Eingabe der Gebäudeform über Eckkoordinaten in einem dreidimensionalen Zeichenfeld. Das Objekt wird als Gittermodell in einem durch drei Achsen aufgespannten Raum dargestellt. Aktivierter, also in Bearbeitung befindliche einzelne Oberflächen, sind farbig hervorgehoben. Das Objekt ist während der Eingabe um alle Raumachsen beliebig drehbar und kann im Raum verschoben und vergrößert werden. Die Eingabe des Objektes erfolgt über die Raumkoordinaten seiner Eckpunkte, wobei jede Teiloberfläche aus einem geschlossenen Polygonzug besteht. Bereits während der Punkteingabe über die kartesischen Koordinaten wird eine Plausibilitätsprüfung

durchgeführt. Das Polygon muss zwingend planar¹⁰⁴, konvex¹⁰⁵ sowie nicht-stellar¹⁰⁶ sein. Zusätzlich kann die Eingabe auch visuell überprüft werden. Änderungen sind jederzeit möglich, da jede eingegebene Fläche und jeder Punkt einzeln wieder angesteuert werden kann.

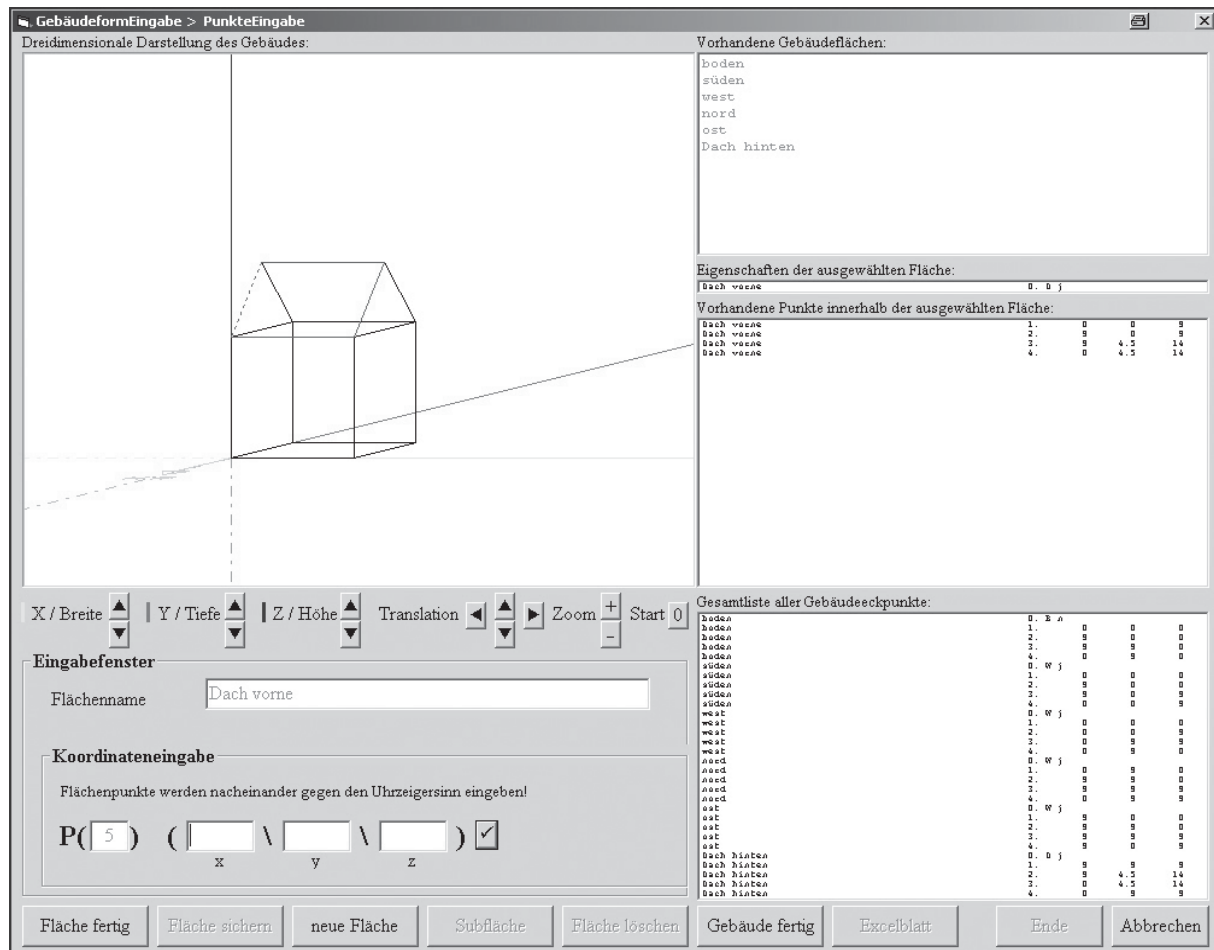


Abbildung 12.3: Maske zur Formeingabe mit dreidimensionalem Zeichenfeld und Verwaltung der Polygonzüge

(Grafik: eigene; Screenshot dient ausschließlich dem visuellen Gesamteindruck)

Sobald die Eingabe eines Gebäudes abgeschlossen ist, liegt die Gebäudeform als ein auf seine Hüllflächen reduziertes und abstrahiertes Kantenmodell vor. Aus den tabellarisch in Polygonzügen verwalteten Einzelpunkten berechnet das Programm automatisch für jede Teiloberfläche ihre Größe und ihren Normalenvektor, aus welchem wiederum die Neigung der betreffenden Fläche gegen die Vertikale sowie seine Orientierung als Abweichung gegenüber Süden errechnet werden kann. Der Gebäudeform sind somit im Ergebnis alle Einzeloberflächen mit ihrer spezifischen Größe, Neigung und Orientierung hinterlegt.

¹⁰⁴ planar: alle Punkte liegen in einer Ebene

¹⁰⁵ konvex: die Polygonkanten schneiden in ihrer Verlängerung nicht das Polygoninnere

¹⁰⁶ stellar: die Polygonkanten schneiden sich an mehr Punkten als nur den Eckpunkten

12.5 Standorteingabe

In diesem Modul (s. *Abbildung 12.4*) kann ein beliebiger weltweiter Standort eingegeben werden, um seine geographischen Koordinaten zu ermitteln. Dazu wird im Feld Ortseingabe der Name des gewünschten Standortes eingegeben. Daraufhin durchsucht das Programm die umfangreiche Datenbank des World Gazetteers nach passenden Ergebnissen, die in einem Ergebnisfeld mit differenzierten Angaben zu Land, Kontinent und Einwohnerzahl zur Auswahl gestellt werden. Durch Markieren des zutreffenden Ortes ermittelt das Programm im World Gazetteer die zugehörigen Geo-Koordinaten dieses geografischen Objektes.

Standorteingabe

Ortsangabe

Bitte geben Sie den Namen des Ortes ein.
Nutzen Sie bei ausländischen Orten die germanisierte Schreibweise.

Bremen

Suchen!

Alternative Ortsangabe

Bitte geben Sie die Gitternetzkoordinaten des Ortes an.
Die Angabe muß auf zwei Nachkommastellen genau sein.

Breitengrad: ☐ Nord ☐ Süd

Längengrad: ☐ Ost ☐ West

Suchen!

Suchergebnisse

Bitte wählen Sie den gewünschten Ort durch Markieren der Zeile aus.

Bremen, Georgia, USA, Nordamerika, 5.299 Einwohner
Bremen, Kentucky, USA, Nordamerika, 367 Einwohner
Bremen, Ohio, USA, Nordamerika, 1.227 Einwohner
New Bremen, Ohio, USA, Nordamerika, 2.993 Einwohner
Bremen, Indiana, USA, Nordamerika, 4.646 Einwohner
Bremen, Maine, USA, Nordamerika, 813 Einwohner
Bremen, Bremen, Deutschland, Europa, 548.501 Einwohner

Klimadaten erstellen

Abbildung 12.4: Maske zur Standorteingabe mit Verknüpfung zur Ortsdatenbank des World Gazetteers

(Grafik: eigene; Screenshot dient ausschließlich dem visuellen Gesamteindruck)

Die Aufgabe dieses Moduls besteht nun in der Verknüpfung zweier großer Datenbanken, denn mit diesen Koordinaten wird eine Abfrage bei der auf langjährigen Satellitenmessungen basierenden meteorologischen Datenbank Surface Meteorology and Solar Energy (SSE) der NASA gestartet (s. *Abbildung 12.5*).

36143	Neulehe	5300	740	53,00	N	7,40	O	Europa	Deutschland	Niedersachsen	53,5	7,5	717
36144	Nennndorf	5308	733	53,08	N	7,33	O	Europa	Deutschland	Niedersachsen	53,5	7,5	717
36145	Werdum	5365	772	53,65	N	7,72	O	Europa	Deutschland	Niedersachsen	53,5	7,5	691
36146	Brinkum	5327	757	53,27	N	7,57	O	Europa	Deutschland	Niedersachsen	53,5	7,5	689
36147	Utarp	5362	748	53,62	N	7,48	O	Europa	Deutschland	Niedersachsen	53,5	7,5	655
36148	Schweindorf	5338	743	53,38	N	7,43	O	Europa	Deutschland	Niedersachsen	53,5	7,5	637
36149	Baltrum	5372	737	53,72	N	7,37	O	Europa	Deutschland	Niedersachsen	53,5	7,5	465
36150	Hagermarsch	5365	730	53,65	N	7,30	O	Europa	Deutschland	Niedersachsen	53,5	7,5	450
36151	Bremen	5308	881	53,08	N	8,81	O	Europa	Deutschland	Bremen	53,5	8,5	546501
36152	Oldenburg	5315	821	53,15	N	8,21	O	Europa	Deutschland	Niedersachsen	53,5	8,5	159218
36153	Bremerhaven	5355	858	53,55	N	8,58	O	Europa	Deutschland	Bremen	53,5	8,5	117446
36154	Wilhelmshaven	5354	811	53,54	N	8,11	O	Europa	Deutschland	Niedersachsen	53,5	8,5	84393
36155	Delmenhorst	5306	864	53,06	N	8,64	O	Europa	Deutschland	Niedersachsen	53,5	8,5	75893
36156	Cuxhaven	5387	869	53,87	N	8,69	O	Europa	Deutschland	Niedersachsen	53,5	8,5	52677
36157	Stuhr	5302	874	53,02	N	8,74	O	Europa	Deutschland	Niedersachsen	53,5	8,5	32507
36158	Osterholz-Scharmbeck	5323	879	53,23	N	8,79	O	Europa	Deutschland	Niedersachsen	53,5	8,5	31405
36159	Ganderkesee	5304	854	53,04	N	8,54	O	Europa	Deutschland	Niedersachsen	53,5	8,5	31141
36160	Nordenham	5352	849	53,52	N	8,49	O	Europa	Deutschland	Niedersachsen	53,5	8,5	27714
36161	Bad Zwischenahn	5319	800	53,19	N	8,00	O	Europa	Deutschland	Niedersachsen	53,5	8,5	27550
36162	Varel	5340	814	53,40	N	8,14	O	Europa	Deutschland	Niedersachsen	53,5	8,5	25212
36163	Rastede	5325	819	53,25	N	8,19	O	Europa	Deutschland	Niedersachsen	53,5	8,5	20046
36164	Schwanewede	5324	860	53,24	N	8,60	O	Europa	Deutschland	Niedersachsen	53,5	8,5	20015
36165	Langen	5362	860	53,62	N	8,60	O	Europa	Deutschland	Niedersachsen	53,5	8,5	18863
36166	Lillenthal	5314	891	53,14	N	8,91	O	Europa	Deutschland	Niedersachsen	53,5	8,5	18293
36167	Loxstedt	5347	865	53,47	N	8,65	O	Europa	Deutschland	Niedersachsen	53,5	8,5	16382
36168	Brake	5334	855	53,34	N	8,55	O	Europa	Deutschland	Niedersachsen	53,5	8,5	16211
36169	Wardenburg	5307	820	53,07	N	8,20	O	Europa	Deutschland	Niedersachsen	53,5	8,5	16019
36170	Hude	5312	846	53,12	N	8,46	O	Europa	Deutschland	Niedersachsen	53,5	8,5	15567
36171	Wiefelstede	5326	811	53,26	N	8,11	O	Europa	Deutschland	Niedersachsen	53,5	8,5	14775
36172	Ritterhude	5319	874	53,19	N	8,74	O	Europa	Deutschland	Niedersachsen	53,5	8,5	14192
36173	Schiffdorf	5354	865	53,54	N	8,65	O	Europa	Deutschland	Niedersachsen	53,5	8,5	14143
36174	Hatten	5305	858	53,05	N	8,58	O	Europa	Deutschland	Niedersachsen	53,5	8,5	13499
36175	Worpswede	5322	893	53,22	N	8,93	O	Europa	Deutschland	Niedersachsen	53,5	8,5	9417
36176	Sande	5350	800	53,50	N	8,00	O	Europa	Deutschland	Niedersachsen	53,5	8,5	9359

NASA Surface meteorology and Solar Energy - Location

Enter BOTH latitude and longitude either in decimal degrees or degrees and minutes separated by a space.

Example:

Latitude?

Longitude?

Latitude 33 5
Longitude -80.75

OR

Latitude 33 30
Longitude -80 45

South: -90 to 0
West: -180 to 0

North: 0 to 90
East: 0 to 180

This form is "Reset" if the input is out of range.

Abbildung 12.5: Verknüpfung der Ortsdatenbank des World-Gazetteers mit der Satellitendatenbank SSE der NASA; hier: Koordinatenübergabe

(Grafik: eigene; Screenshot dient ausschließlich dem visuellen Gesamteindruck)

Nach erfolgter Koordinatenübergabe werden alle für die weiteren Berechnungen benötigten meteorologischen Größen des betreffenden Weltkoordinatengitternetzfeldes online aus der NASA-Datenbank herunter geladen. Dabei wird eine Auswahl (s. Tabelle 12.1) aus den 72 zur Verfügung stehenden Parametern getroffen, die auf die in Kapitel 8 und Kapitel 9 hergeleiteten Formelwerke abgestimmt sind. Mit diesen Daten wird automatisch ein umfassendes Klimadatenblatt erstellt. Den größten Aufwand stellt dabei die Erzeugung der Strahlungsdatenblätter dar. Hierzu werden umfangreiche Berechnungsprozesse gestartet, welche jeweils

- für jede Stunde des Jahres
- für alle möglichen Orientierungen und Neigungen
- für die drei Strahlungsarten Direktstrahlung, Diffusstrahlung und Reflektierte Strahlung sowie in ihrer Summe als Globalstrahlung

die sich ergebenden Werte ermitteln und tabellarisch erfassen.

Die Datenblätter beinhalten somit eine Zusammenstellung aller für die thermischen und solaren Berechnungen notwendigen Angaben, auf welche später vom Bilanzierungsmodul ohne die Notwendigkeit einer erneuten Berechnung punktuell zugegriffen werden kann.

Parameter / Auflösung	Einheit	Erläuterung
Extraterrestrische Strahlung	kWh/m ² d	Summe aller auf dem obersten Atmosphärenrand auftreffenden elektromagnetischen Strahlung
Globalstrahlung; 3-stündlich	kWh/m ² d	Summe aller auf der Erdoberfläche auftreffenden elektromagnetischen Strahlung (für die Horizontale)
Diffusstrahlung; 3-stündlich	kWh/m ² d	Summe des diffusen Anteils der Globalstrahlung (für die Horizontale)
Normierte Direktstrahlung	kWh/m ² d	Summe des direkten Anteils der Globalstrahlung, welcher auf eine senkrecht (normal) zur Strahlung ausgerichtete Fläche trifft
Bewölkung	%	Anteil der Bewölkung während der Tageslichtstunden
Clearness Index	-	Anteil der am oberen Atmosphärenrand auftreffenden Extraterrestrischen Strahlung, welcher nach dem Atmosphärendurchgang als Globalstrahlung die Erdoberfläche erreicht
Albedo	-	Anteil der von der Erdoberfläche reflektierten Strahlung
Deklination; Monatsmittelwert	°	Winkel zwischen der Sonne und der Äquatorebene
Sonnenhöhe	°	Winkel der Sonne über dem Horizont in der Vertikalen
Sonnenazimut	°	Winkel der Sonne in der Horizontalen gegenüber Süden
Winkel des Sonnenauf- und -untergangs	°	Winkel zwischen Sonnenauf- und -untergang
Tageslichtstunden	h	Zeitspanne zwischen Sonnenauf- und -untergang
Lufttemperatur (stündlich)	°C	Lufttemperatur in 10 m über der Erde
Maximale Tageslufttemperatur	°C	Maximale Lufttemperatur in 10 m über der Erde
Minimale Tageslufttemperatur	°C	Minimale Lufttemperatur in 10 m über der Erde
Temperaturamplitude	°C	Differenz zwischen höchster und niedrigster Tages-Lufttemperatur
Heizgradtage; Monatssumme	Gradtage	Monatssumme der Heizgradtage, Tagesmitteltemperatur <18°C
Kühlgradtage; Monatssumme	Gradtage	Monatssumme der Kühlgradtage, Tagesmitteltemperatur >18°C
Windgeschwindigkeit	m/sec	Windgeschwindigkeit in 50m über der Erde
Hauptwindrichtung	°	Windrichtung in 50m über der Erde
Relative Luftfeuchtigkeit	%	Verhältnis zwischen aktuellem partialem Wasserdampfdruck gegenüber dem partialen Sattedampfdruck
Niederschlag	mm/d	Mittlere tägliche Niederschlagsmenge aus der Monatssumme aller Niederschläge geteilt durch die Anzahl der Tage

Tabelle 12.1: Liste der für jeden Standort ausgelesenen meteorologischen Größen

(Quelle: eigene)

Kapitel 13

Durchführung der Untersuchung

13.1 Ablauf des Versuchs

Nach Abschluss aller Vorarbeiten zur Datenbankerstellung, Zusammenstellung der Formelwerke und Programmierung kann die Untersuchung durchgeführt werden.

Diese läuft entsprechend dem Übersichtsschema zum methodischen Vorgehen (s. *Abbildung 5.1*) in folgenden aufeinander aufbauenden Schritten ab:

- Kombination
- Kalkulation
- Rotation
- Selektion
- Sortierung.

Die einzelnen Arbeitsschritte werden im Folgenden kurz erläutert.

13.2 Kombination

Die angelegten Datenbanken zu Formen, Standorten und Parametern werden in diesem Arbeitsschritt miteinander verknüpft und ihre Elemente untereinander kombiniert.

Die 64 unterschiedlichen Formen werden jeweils an die 42 repräsentativen Standorte gestellt und unter jeweils 45 verschiedenen Kombinationen der Parameter Dämmstandard, Wirkungsgrad und Belegungsgrad in die Berechnungsprozedur übergeben. Somit erhält man 120.960 mögliche Kombinationen, welche alle für die vorliegende Forschungsarbeit berechnet und ausgewertet werden müssen.

13.3 Kalkulation

Für alle Kombinationen erfolgt die Kalkulation der thermischen Verluste und solaren Gewinne unter den gegebenen Parametern über die o.g. Berechnungsformeln. Aus diesen Werten kann sowohl die Jahresenergiebilanz der Gebäudehülle als auch die Konzentration (Dichte) der empfangenen Solarenergie pro Quadratmeter Gebäudeoberfläche ermittelt werden.

13.4 Rotation

Während die Berechnung der thermischen Verluste für jeden Standort nur einmal durchgeführt werden muss, ist der Berechnung solarer Einstrahlung eine Rotationsprozedur zur Optimierung der Orientierung vorgeschaltet. In dieser wird das Gebäude in 5°-Schritten vollständig um die eigene Achse gedreht und für jede der 72 eingenommen Positionen die solare Einstrahlung aller Teiloberflächen auf Basis ihrer geänderten Ausrichtung neu berechnet.

13.5 Selektion

Aus diesen 72 Positionen muss nun die optimale Orientierung selektiert werden. Diese Prozedur muss auf die fünf unterschiedlichen Belegungsgrade abgestimmt werden. Bei einem Belegungsgrad von 25% müssen für jede der 72 Positionen die einzelnen Teiloberflächen bezüglich der Konzentration ihrer Einstrahlung sortiert werden. Beginnend mit der Fläche der höchsten Energiedichte pro Quadratmeter wird solange das Ergebnis der nächsten Flächen addiert, bis ihre gemeinsame Fläche in der Summe genau 25% der gesamten luftberührten Gebäudehülle ergibt. Da das Ergebnis nur selten exakt aufgeht, entsteht bei der zuletzt eingehenden Teiloberfläche ein Rest. Dieser Anteil der empfangenen Strahlung darf nicht in die Gesamtbilanz eingehen. Das so ermittelte Endergebnis wird mit denen der anderen möglichen Gebäudeorientierungen verglichen und von allen die Beste ausgewählt. Die optimale Ausrichtung ist für die verschiedene Belegungsgrade unterschiedlich und selten eine exakte Südausrichtung. Die erzielbare Konzentration der empfangenen solaren Strahlung nimmt mit steigendem Belegungsgrad ab, da nicht nur der kleine Anteil optimal ausgerichteter Teiloberflächen genutzt wird, sondern zunehmend auch ungünstig orientierte Hüllflächenanteile.

13.6 Sortierung

Die Ergebnisse der nun für die optimierte Orientierung durchgeführten Berechnung der Energiebilanz sowie Energiedichte für jede Form an einem bestimmten Standort unter bestimmten Parameterkonditionen werden nun absteigend sortiert und in eine Rangfolge gebracht. Es entsteht ein standortspezifisches Formenranking.

Kapitel 14

Analyse der Einzelergebnisse

Die Einzelergebnisse zeigen Formenrankings zu jedem der 42 Standorte unter jeweils einer der 45 möglichen Parameterkombinationen. Alle 64 Formen werden zu diesem Zweck in eine absteigende Rangfolge gebracht. Es wird nach zwei verschiedenen Kriterien sortiert:

- *Jahresenergiebilanz* aus thermischen Verlusten und solaren Gewinnen über die Gebäudehülle. Für die Bilanzierung sind die jeweiligen Parameterangaben zu Dämmstandard, solarem Wirkungsgrad sowie solarem Belegungsgrad notwendig. Es gibt daher insgesamt (42x45) 1.890 Formenrankings zur Jahresenergiebilanz. Die Jahresenergiebilanz zeigt die energetische Gesamtpformance der Gebäudehülle, wobei aufgrund des thermischen Faktors die absolute Größe der Gebäudehülle sowie das A/V-Verhältnis eine bedeutende Rolle spielen. Die Jahresenergiebilanz kann eine Positiv- oder Negativbilanz sein.
- *Einstrahlungsdichte* als mittlerer erzielter Einstrahlung pro Quadratmeter solar genutzter Oberfläche. Dieser Wert ist von Dämmstandard und solarem Wirkungsgrad unabhängig, so dass der einzige variierende Parameter der in 5 Stufen differenzierte solare Belegungsgrad ist. Daher gibt es insgesamt (42x5) 210 Formenrankings zur Energiedichte. Von Qualität und Größe der Hülle unabhängig zeigt die Dichte, wie geeignet die dreidimensionale Ausformung einer Gebäudehülle bezüglich des optimalen Empfangs solarer Einstrahlung ist. Die erzielte Energiedichte der Hülle wird mit der standortspezifischen Globalstrahlung auf die Horizontale verglichen. Kann das Gebäude pro Quadratmeter Empfangsfläche Energie in höherer Konzentration empfangen als die horizontale Grundfläche, wird die Effizienz der Technologie durch die Gebäudeform erhöht.

In *Anhang C* ist beispielhaft das Formenranking für die Stadt Madrid - fortlaufend in vier Teilen - abgebildet, um im Folgenden exemplarisch Aufbau und Analyse eines solchen Formenrankings zu verdeutlichen.

Es handelt sich um das konkrete Formenranking:

- nach Jahresenergiebilanz
- für die Stadt Nr. 20 (Madrid)

bei den Parameterwerten:

- Mittlerer Belegungsgrad (33 %)
- Mittlerer Dämmstandard (0.5 W/m²K)
- Mittlerer solarer Wirkungsgrad (10 %).

14.1 Aufbau und Erläuterung des Formenranking-Datenblattes

Erläuterungen zu den roten Positionsnummern auf dem ersten Teil (s. *Anhang C*):

Nr.	Inhalt und Bedeutung der jeweiligen Zeile
1	Hier stehen die Angaben, unter denen das Formenranking gerechnet wurde. In diesem Fall bei einem Belegungsgrad von 33% und sowohl mittlerem Dämmstandard von 0.5 W/m ² K als auch mittlerem solaren Wirkungsgrad von 10%. Die Sortierung erfolgte in abnehmender Reihenfolge nach Jahresenergiebilanz aus thermischen Verlusten und solaren Gewinnen. Die Berechnung erfolgte für den Standort 20_Madrid.
2	Rangnummer 1 bis 64 (unterteilt in vier Teile; Teil 1: 1-16, Teil 2: 17-32, Teil 3: 33-48, Teil 4: 49-64)
3	Je Rangplatz ist die entsprechende Form dreidimensional abgebildet sowie mit zugehöriger Form-Nummer entsprechend der Formdatenbank in <i>Anhang A</i> angegeben.
4	Angabe zur Orientierung, welche die maximale Einstrahlung und damit die beste Energiebilanz aufgewiesen hat. Die Angabe erfolgt bildlich über eine Windrose sowie über eine Gradangabe im mathematischen Drehsinn aus der exakt südorientierten Startposition heraus. Die formspezifische Startposition wird aus der genordeten Dachaufsicht in <i>Anhang A</i> ersichtlich.
5	Jahresenergiebilanz der Form als Absolutangabe in kWh. Sie reicht von einem erzielten Überschuss von 14.377 kWh bei der besten Form bis zu einem geringeren Plus von 922 kWh auf dem letzten Platz. Für andere Standorte oder andere Parameterkombinationen können sich auch Negativbilanzen ergeben. Sofern eine Bilanz positiv ist, wird sie farbig hervorgehoben. Der Überschuss beschreibt den Anteil des solaren Gewinnes, welcher nach Deckung der thermischen Verluste für andere Zwecke zur Verfügung steht, also für Lüftung, Brauchwassererwärmung, Beleuchtung, Betrieb von Haushaltsgeräten oder auch Elektromobilität. In diesem Fall kann mit dem Überschuss der besten Form von 14.377 kWh ein Elektroauto mit mittlerem Verbrauch von 30kWh/100km jährlich rund 48.000 km fahren.
6	Hier ist die Anzahl derjenigen Monate im Jahr angegeben, in welchen die Monatssumme der solaren Einstrahlung die der thermischen Verluste zu 100% decken kann. Obwohl die Jahresenergiebilanz für eine Form positiv ist, kann es Monate geben, in denen der Solarertrag zur Deckung des Bedarfs nicht ausreicht, so dass die Anzahl der 100%-Monate ein Maß für die Notwendigkeit saisonaler Speicherung ist. In diesem Fall erzielt die beste Form 8 vollversorgte Monate, die schlechteste Form immerhin noch 7. Erst bei 10 oder mehr vollversorgten Monaten würde das Feld farbig hervorgehoben werden.
7	Statistische und geometrische Angaben zur jeweiligen Form wie: Einteilung nach konventioneller oder unkonventioneller Form, Größe der luftberührten Oberfläche O, A/V-Verhältnis, Flächenanteile nach Neigungswinkeln, Primärform, Grundrissform und allgemeine Angabe zur Höhe unterschieden in flach, mittel und hoch – entsprechend Formdatenbank in <i>Anhang A</i> .
8	Es folgt eine Auflösung des einzeiligen Rankings in die jeweiligen 7 Formengruppen (Gr. 1-7), bestehend aus 13 einzelnen Formenreihen (vgl. <i>Abschnitt 6.1</i>). Auf diese Weise wird die Analyse der Rangfolge der jeweils 5 Formen innerhalb einer Formenreihe vereinfacht und der Vergleich der Reihen untereinander visuell erleichtert.

Tabelle 14.1: Erläuterung zu den roten Positionsnummern für Teil 1

Erläuterungen zu den roten Positionsnummern auf dem vierten Teil:

Nr.	Positive Bewertung	Negative Bewertung
9	Am Ende des vierten Teils des Rankings befindet sich zeilenweise der Auswertungsteil. Hier wird verallgemeinernd in gute und schlechte Eigenschaften differenziert. Die Auswertung erfolgt dabei über eine mathematische Gewichtung der erzielten Rangplätze gemäß dem jeweiligen Bewertungskriterium innerhalb jeder einzelnen Zeile.	
10	Insgesamt positiv hat Gruppe 5 abgeschnitten.	Am schlechtesten hat Gruppe 1 abgeschnitten.
11	Reihe 6a ist der Gewinner.	Reihe 3c erzielte die schlechtesten Rangplätze.
12	Unkonventionelle Formen lagen bevorzugt vorn.	Konventionelle Formen schnitten im Mittel schlecht ab.
13	Große Oberflächen erzielen günstige Ergebnisse.	Kleine Oberflächen bleiben zurück.
14	Unkompakte Formen liegen tendenziell vorn.	Kompakte Formen liegen eher hinten.
15	Flache Oberflächenneigungen von 0-50° sind positiv.	Steile Neigungen von 55-90° wirken sich negativ aus.
16	Pyramidale Formen erzielen gute Ergebnisse.	Quaderförmige Formen bringen schlechte Ergebnisse.
17	Polygongrundrisse schneiden gut ab.	Rechteckgrundrisse schneiden schlecht ab.
18	Im Allgemeinen sind flache Formen besser.	Hohe Formen sind eher ungünstig.
19	Für Reihe 1 gilt: Hallen sind günstig.	Türme sind ungünstig.
20	Für Reihe 2 gilt: Reihen sind günstig.	Scheiben sind ungünstig.
21	Für Reihe 3a gilt: längliche Grundrisse sind günstig.	Kompakte Grundrisse sind ungünstig.
22	Für Reihe 3b gilt: längliche Grundrisse sind günstig.	Kompakte Grundrisse sind ungünstig.
23	Für Reihe 3c gilt: längliche Grundrisse sind günstig.	Kompakte Grundrisse sind ungünstig.
24	Für Gruppe 3 (3a-3c) gilt: flache Formen sind günstig.	Hohe Formen sind ungünstig.
25	Für Reihe 4 gilt: Pultdächer sind günstig.	Satteldächer sind ungünstig.
26	Für Reihe 5a gilt: 3Eck-Grundrisse sind günstig.	8Eck-Grundrisse sind ungünstig.
27	Für Reihe 5b gilt: 3Eck-Grundrisse sind günstig.	8Eck-Grundrisse sind ungünstig.
28	Für Reihe 5c gilt: 3Eck-Grundrisse sind günstig.	8Eck-Grundrisse sind ungünstig.
29	Für Gruppe 5 (5a-5c) gilt: flache Formen sind günstig.	Hohe Formen sind ungünstig.
30	Für Reihe 6a gilt: 5Eck/90 ist günstig.	6Eck/30 ist ungünstig.
31	Für Reihe 6b gilt: 6Eck/15 ist günstig.	5Eck/60 ist ungünstig.
32	Für Reihe 6c gilt: 6Eck/15 ist günstig.	5Eck/60 ist ungünstig.
33	Für Gruppe 6 (6a-6c) gilt: flache Formen sind günstig.	Hohe Formen sind ungünstig.
34	Für Reihe 7 gilt: Halbkegelform ist günstig.	Nurdachform ist ungünstig.

Tabelle 14.2: Erläuterung zu den roten Positionsnummern für Teil 4

Teil 1 bis Teil 4 des Formenrankings zeigen hintereinander gelegt die vollständige Reihenfolge und ermöglichen somit eine schnelle visuelle Interpretation des Ergebnisses.

Zusätzlich erfolgt in der letzten Spalte von Teil 4 durch arithmetische Gewichtung für jeden Einzelaspekt eine eindeutige Bewertung in „günstig“ und „ungünstig“ für den konkreten Standort und unter den gewählten Parameterbedingungen.

Aus diesen Hinweisen lassen sich konkrete Entwurfshilfen für die frühe Planungsphase formulieren, hier z.B.: „Bei einem Bauvorhaben unter vergleichbaren Standort- und Parameterbedingungen sind tendenziell unkompakte, flache Formen mit großer Grundfläche, kleinem Oberfläche/Grundfläche-Verhältnis und flachen Oberflächenneigungen im Bereich von 0-50° empfehlenswert, während hohe Formen mit kleiner Grundfläche und einem großen Anteil steiler Oberflächenneigungen >50° ungeeignet sind.“

Diese Empfehlung spiegelt sich auch in der Gegenüberstellung derjenigen Formen wider, die im besprochenen Formenranking jeweils am besten oder am schlechtesten abgeschnitten haben. Hierzu werden im Folgenden die Formen auf den drei vordersten Rangplätzen mit denen der letzten drei verglichen (s. *Anhang C*):

günstig / empfehlenswert			ungünstig / nicht empfehlenswert		
Platz 1	Platz 2	Platz 3	Platz 62	Platz 63	Platz 64
					
					
Nr. 46	Nr. 49	Nr. 48	Nr. 20	Nr. 2	Nr. 1
G [m²] = 1000.00	1000.00	1000.00	66.67	34.22	21.53
A/V = 2.12	2.11	2.11	0.62	0.75	0.90
O/G = 1.12	1.11	1.11	8.35	20.99	41.02
Höhe [m] = 3.00	3.00	3.00	15.00	29.24	46.42
≤50°: 89.97%	90.22%	90.22%	11.97%	4.76%	2.44%
>50°: 10.03%	9.78%	9.78%	88.03%	95.24%	97.56%

Tabelle 14.3: Gegenüberstellung günstiger und ungünstiger Formen für den Standort Madrid bei der gewählten Parameterkombination (33% Belegungsgrad, 0.5W/m²K Dämmstandard, 10% solarer Wirkungsgrad) zur Verdeutlichung der Entwurfsempfehlungen bezüglich einzelner geometrischer Formkriterien

(Grafik: eigene)

14.2 Nutzung der Entwurfsempfehlungen des Formenrankings

Für die frühe Entwurfsphase können zwei Fälle unterschieden werden: die Anwendung auf einen vorliegenden Entwurf oder als allgemeine Orientierungshilfe vor der ersten Skizze.

Die Auswertung jedes Formenrankings bietet dem Planer die Möglichkeit, seinen eigenen Entwurf an die aus dem Ranking gewonnen Erkenntnisse zu einzelnen geometrischen Aspekten wie z.B. A/V-Verhältnis, Grundriss- und Gebäudeprimärform, Gebäudehöhe und Oberflächenneigungen anzupassen. Zu diesem Zweck wählt der Entwerfer dasjenige Ranking aus der Datenbank aller 1.890 Jahresbilanz-Formenrankings aus, welches bezüglich Standort, Klima, Breitengrad und den eingestellten Parametern zu Dämmstandard, solarem Wirkungs- und Belegungsgrad seinem eigenen konkreten Projekt am besten entspricht.

Im ersten Schritt kann er seinen Entwurf durch visuelle Überprüfung einer der 64 Formen oder einer bestimmten Formengruppe zuordnen und liest die Platzierung ab. Aus der relativen Position innerhalb der Rangfolge lässt sich das Optimierungspotential abschätzen. Stimmt der Entwurf mit einer der 64 Formen überein, kann sogar die optimale Orientierung abgelesen werden, um zu prüfen, ob diese auf dem konkreten Bauplatz realisierbar ist.

Falls keine der 64 Formen mit der eigenen Entwurfsidee vergleichbar ist, kann auch das Berechnungsprogramm genutzt werden, um die eigene Form in das Ranking einfügen zu lassen. Der Vorteil besteht darin, dass nicht nur die Platzierung, sondern auch die zu erwartende Jahresenergiebilanz in Relation zu den übrigen Formen gesetzt werden kann. Eine schlechte Platzierung deutet auf ein großes im bisherigen Entwurf nicht ausgeschöpftes energetisches Formoptimierungspotential hin. Weitere Optimierungsschritte können dabei konkret an die in der letzten Spalte formulierten Entwurfshilfen angelehnt werden. In diesem Fall - Standort Madrid bei mittleren Parametern - raten die Entwurfsempfehlungen von hohen Formen ab, da diese in hohem Maße Oberflächen steiler Neigung $>50^\circ$ besitzen, welche an diesem konkreten Standort aus strahlungsgeometrischen Gründen deutlich weniger Energie empfangen als die weniger stark geneigten Oberflächen an flacheren Formen.

Da große Hülloberflächen und A/V-Verhältnisse günstig bewertet werden, kann davon ausgegangen werden, dass für diesen Standort bei der gewählten mittleren Parameterkombination (33% Belegungsgrad, $0.5\text{W/m}^2\text{K}$ Dämmstandard, 10% solarer Wirkungsgrad) die auf einer Fläche erzielbaren solaren Gewinne die thermischen Verluste bereits überschreiten, so dass jede Verkleinerung der Hülloberfläche oder eine kompakte Bauweise potentielle Gewinne reduzieren und somit die Energiebilanz verschlechtern würde. Der Break-Even-Point, von dem an der Gewinnmaximierungs- gegenüber der Verlustminimierungsstrategie Vorzug gegeben werden sollte, ist hier bereits überwunden. Dennoch reicht es nicht, eine beliebige unkompakte Form zu wählen, da die konkrete dreidimensionale Gestalt entscheidend ist.

Tabelle 14.4 zeigt eine Gegenüberstellung der Jahresenergiebilanzen der jeweils drei günstigsten und ungünstigsten Formen am Standort Madrid für die gewählte Parameterkombination (33% Belegungsgrad, $0.5\text{W/m}^2\text{K}$ Dämmstandard, 10% solarer Wirkungsgrad).

günstig / empfehlenswert			ungünstig / nicht empfehlenswert		
Platz 1	Platz 2	Platz 3	Platz 62	Platz 63	Platz 64
Nr. 46	Nr. 49	Nr. 48	Nr. 20	Nr. 2	Nr. 1
Die erzielten Jahresenergiebilanzen [kWh/a] zeigen den Energieüberschuss an, welcher nach Abzug der thermischen Verluste von den solaren Gewinnen verbleiben. Man sieht einen deutlichen Unterschied zwischen der geeignetsten Form Nr. 46 mit 14.377kWh/a und der ungeeignetsten Form Nr. 1 mit 922kWh/a:					
14.377 kWh/a	14.331 kWh/a	14.331 kWh/a	2.772 kWh/a	1.474 kWh/a	922 kWh/a
Dieser Überschuss kann in Relation zur inneren Gebäudenutzfläche [m²] gebracht werden um abzuschätzen, ob die verbleibenden quadratmeterbezogene Bedarfswerte [kWh/m²a] für Warmwasser, Lüftung, bisher unberücksichtigte thermische Verluste über Wärmebrücken und die Bodenplatte sowie der Strombedarf für Haushaltgeräte und Beleuchtung autark gedeckt werden können. Beim Vergleich der Extreme stehen Form Nr. 46 hierfür 57 kWh/m²a zur Verfügung, Form Nr.1 dagegen nur 3 kWh/m²a.					
250 m²	250 m²	250 m²	333 m²	342 m²	322 m²
57 kWh/m²a	57 kWh/m²a	57 kWh/m²a	8 kWh/m²a	4 kWh/m²a	3 kWh/m²a
Der Überschuss kann andererseits auch in eine Stromvergütung [Euro/a] gemäß EEG oder in die Reichweite bei Elektromobilität [km/a] umgerechnet werden. Bei einer angenommenen Vergütung von 40 cent/kWh, bzw. einem durchschnittlichen Verbrauch eines Elektroautos von 30 kWh/100km ergeben sich die folgenden Werte:					
5.750 Euro/a	5.732 Euro/a	5.732 Euro/a	1.109 Euro/a	590 Euro/a	369 Euro/a
47.923 km/a	47.770 km/a	47.770 km/a	9.240 km/a	4.913 km/a	3.073 km/a

Tabelle 14.4: Gegenüberstellung günstiger und ungünstiger Formen am Standort Madrid bei gewählter Parameterkombination (33% Belegungsgrad, 0.5W/m²K Dämmstandard, 10% solarer Wirkungsgrad) zur Vergleichung erzielbarer Energieüberschüsse

(Grafik: eigene)

Die energetischen Unterschiede zwischen günstigen und ungünstigen Formen sind signifikant. Dies ist zunächst erstaunlich, da in allen sechs Fällen exakt das gleiche Bauvolumen am selben Standort realisiert wird bei solarer Aktivierung des jeweils besten Drittels der Hülle und bei identischen Werten zu Dämmung und Solartechnologie – also vergleichbaren Baukosten. Die Formen unterscheiden sich ausschließlich in ihrer dreidimensionalen Gestalt.

Dies betont das große Potential der Formoptimierung und verdeutlicht die Konsequenzen der in der Entwurfsphase getroffenen Entscheidungen für die langjährige Betriebsphase.

Kapitel 15

Graphische Analyse der Gesamtergebnisse

Gemäß des gewählten Untersuchungsaufbaus zur weltweiten Formenstudie mit vielen Einzelparametern, welche in bestimmten Grenzen variieren, wird folgende Datenfülle erzeugt:

- Die generierten 64 Formen
- werden an 42 repräsentative Standorte gestellt
- unter 45 Parameterkombinationen zu Dämm-, Wirkungs- und Belegungsgrad
- in 72 jeweils 5° voneinander abweichenden Orientierungen
- für die durchschnittlich 10 Teiloberflächen einer Form
- für die vier Strahlungsarten Direkt-, Diffus-, Reflex- und Globalstrahlung
- für alle 8.760 Stunden im Jahr berechnet und nach den
- 2 Sortierungsmerkmalen Jahresenergiebilanz und Einstrahlungsdichte

in eine absteigend sortierte Reihenfolge gebracht, welche die einzelnen standort- und parameterspezifischen Formrankings darstellen, wie in *Kapitel 14* erläutert.

Die gesamte Berechnung ergibt somit über $6 \cdot 10^{12}$ Einzelwerte, deren individuelle Interpretation nicht zu leisten ist. Daher erfolgt eine Analyse mittels visueller Mustererkennung.

15.1 Beschreibung der Analysemethode

Das Vorgehen bei dieser Analysemethode wird im Folgenden anhand der konkreten Frage nach dem Einfluss des A/V-Verhältnisses auf die Jahresenergiebilanz beschrieben.

Die Mustererkennung soll dazu dienen, aus der Gesamtheit aller Daten übergeordnete Prinzipien und Tendenzen herauszuarbeiten und ablesbar zu machen.

Dafür erfolgt zuvor eine Zusammenstellung aller Ergebnisse in zwei Teilschritten:

- Zunächst werden alle unter der gleichen Parameterkombination gerechneten 42 Formenrankings in einer Übersichtsmatrix zu Standorten und Formen angeordnet. Dabei steht jede Zeile für eine der repräsentativen Standorte und beinhaltet jeweils die Rangfolge der 64 Formen. Die Städte-Zeilen sind gemäß ihrer aus Breitengrad und Klimazone resultierenden Nummerierung (vgl. *Tabelle 6.9*) untereinander vom Nordpol bis zum Äquator angeordnet. Beispielhaft ist in *Anhang D* die Übersichtsmatrix für die konkrete Parameterkombination (mittlerer Belegungsgrad 33%, mittlerer Dämmstandard 0.5 W/m²k, mittlerer solarer Wirkungsgrad 10%) mit allen 42 Standorten abgebildet.
- Aufgrund der 45 möglichen Parameterkombinationen gibt es entsprechend auch 45 derartige Matrizen. Diese lassen sich gemäß der in *Abschnitt 6.3* beschriebenen dreidimensionalen Parametermatrix mit den drei Zeitachsen Dämmstandard, solarer Wirkungsgrad und Belegungsgrad anordnen.

Das Ergebnis ist die Zusammenstellung aller Formenrankings in einer Gesamtübersicht, welche aus 5 aufeinander folgenden Datenblättern mit jeweils 9 Matrizen besteht (s. *Anhang E*; hier bereits nach unten beschriebener Methode eingefärbt). Eine Interpretation des insgesamt aus (45x42x64) 120.960 Einzelfeldern bestehenden Gesamtergebnisses oder die Beantwortung der anfangs gestellten Frage nach dem Einfluss des A/V-Verhältnisses kann aus dieser Abbildung jedoch noch nicht geleistet werden.

Zu diesem Zweck werden nun – je nach Fragestellung – Farbfilter eingesetzt, welche die 120.960 Einzelfelder gemäß ihres Inhaltes klassifizieren und entsprechend einfärben. Im konkreten Beispiel der Untersuchung des Einflusses des A/V-Verhältnisses werden alle kompakten Formen mit einem A/V-Verhältnis unterhalb einer bestimmten Grenze (hier gewählt <0.8) hellgrün gefärbt, während die Gruppe der unkompakten Formen mit A/V-Verhältnissen >0.8 gelb gefärbt werden. Die beiden Extreme, die Form Nr. 3 mit dem kleinsten A/V-Verhältnis von 0.600 und die Form Nr. 34 mit dem größten A/V-Verhältnis von 2.147, werden gesondert in dunkelgrün und rot gefärbt und dienen im späteren Verlauf als Indikatorlinien innerhalb der sich ergebenden Farbfelder.

Der so eingestellte Farbfilter wird nun auf die 120.960 Einzelfelder der Gesamtübersicht angewendet. Das Ergebnis ist in *Anhang E* abgebildet.

Es ist sehr deutlich zu erkennen, wie sich entlang der drei Betrachtungsachsen zum Dämmstandard, solaren Wirkungsgrad und Belegungsgrad die zunächst heterogen verteilten Felder farblich zu einheitlichen Gruppen zusammenfinden. Bestimmte Felder tauschen auf der Zeitachse ihre Positionen. Lag beispielsweise die gelbe Gruppe der unkompakten Formen bei schlechten Parameterwerten tendenziell auf den letzten Plätzen, wandern sie – zunächst nur für Städte in Äquatornähe – in der Rangfolge nach vorne, bis sie bei guten Parameterwerten weltweit vorn liegen. Die beiden Indikatorlinien zeichnen dabei jeweils die Spur der Form mit kleinstem und größtem A/V-Verhältnis nach und zeigen die gleiche Entwicklung wie die beiden großen Farbfelder.

Zur Analyse der Entwicklungstendenzen muss jedoch nicht die gesamte aus 120.960 Einzelfeldern bestehende Übersicht untersucht werden. Für die drei Entwicklungsachsen werden prägnante Stationen ausgewählt (diese sind in *Anhang E* durch Rahmen hervorgehoben) und in ein Übersichts-Schema (s. *Anhang F*) übertragen, welches aus zwei Teilen besteht:

- Jahresenergiebilanz
- Energiedichte

und folgende Parameterkombinationen als prägnante Stationen aufweist:

- Belegungsgrad mit solaren Technologien: 25%, 50% und 100%
- energetische Hüllenqualität, als Kombination aus Dämm- u. solarem Wirkungsgrad: schlecht ($1.0\text{W/m}^2\text{K}$, 5%), mittel ($0.5\text{W/m}^2\text{K}$, 10%), gut ($0.1\text{W/m}^2\text{K}$, 20%).

Die so entstehende Matrix stellt eine Verdichtung der Gesamtübersicht dar und zeigt alle zur Interpretation relevanten Anfangs-, Wende- und Endstationen der geografisch-räumlichen und zeitlichen Entwicklung.

In einem weiteren Abstraktionsschritt wird jede der aus (42×64) 2.688 Farbpunkten bestehenden Einzelmatrizen auf eine Anordnung homogener Farbfelder und Linien reduziert (s. *Anhang F*), um abschließend die so entstehende Grafik bezüglich der von ihr aufgezeigten Entwicklungstendenzen interpretieren zu können.

15.2 Durchgeführte Untersuchungen

a) Untersuchungen zur Kompaktheit

- Formen mit kleinen gegen Formen mit großen A/V-Verhältnissen
- Formen mit großer gegen Formen mit kleiner Oberfläche

b) Kreuzuntersuchungen zu Kompaktheit und konventionellen/unkonventionellen Formen

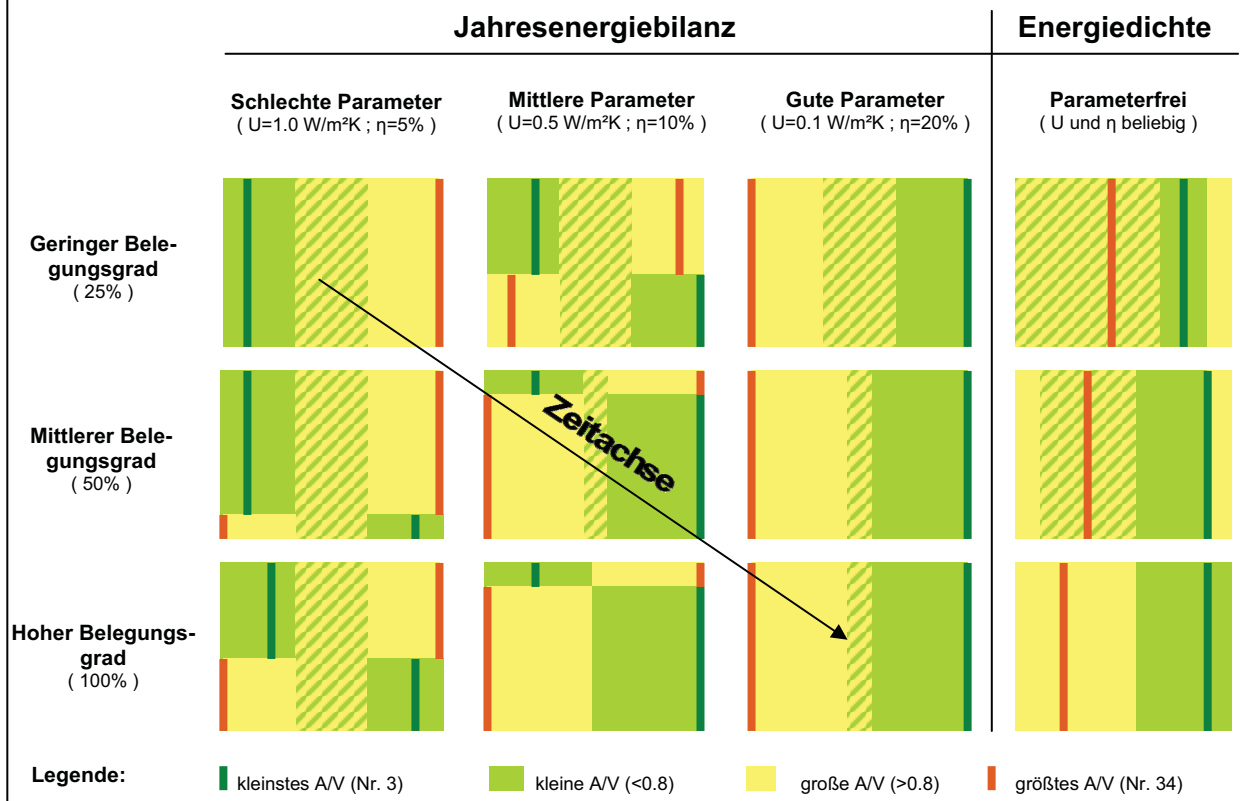
- Gruppe konventioneller gegen Gruppe unkonventioneller Gebäudeformen
- Konventionelle Formen gegen konventionelle Formen (beide mit kleinem A/V)
- Konventionelle Formen gegen konventionelle Formen (beide mit mittlerem A/V)
- Konventionelle Formen gegen konventionelle Formen (beide mit großem A/V)

c) Kreuzuntersuchungen zu Gebäudehöhe und Quader/Pyramiden

- Hohe gegen flache Formen
- Quader gegen Pyramiden (beide mit niedriger Höhe)
- Quader gegen Pyramiden (beide mit mittlerer Höhe)
- Quader gegen Pyramiden (beide mit großer Höhe)

d) Vergleichende Untersuchung zu den Formengruppen 1 bis 7

- Kompaktheit (A/V-Verhältnis) -



Jahresenergiebilanz:

Der Untersuchungsaspekt *Kompaktheit* zeigt einen prägnanten Einfluss auf die Rangfolge. Bei schlechten Parametern (25%, 1.0, 5%) liegt die Gruppe mit kleinen A/V-Verhältnissen noch durchgängig vorn und die mit großen hinten, dies wird in den Extremen durch die beiden Indikatorlinien bestätigt. Mit zunehmender Verbesserung der Parameter kehrt sich die Rangfolge jedoch um und unkompakte Formen wandern nach vorne. Diese Entwicklung setzt zunächst nur für Städte in Äquatornähe ein, zieht sich dann aber bis zum Nordpol hoch, wobei die Zäsur jeweils einem bestimmten Breitengrad zuzuordnen ist.

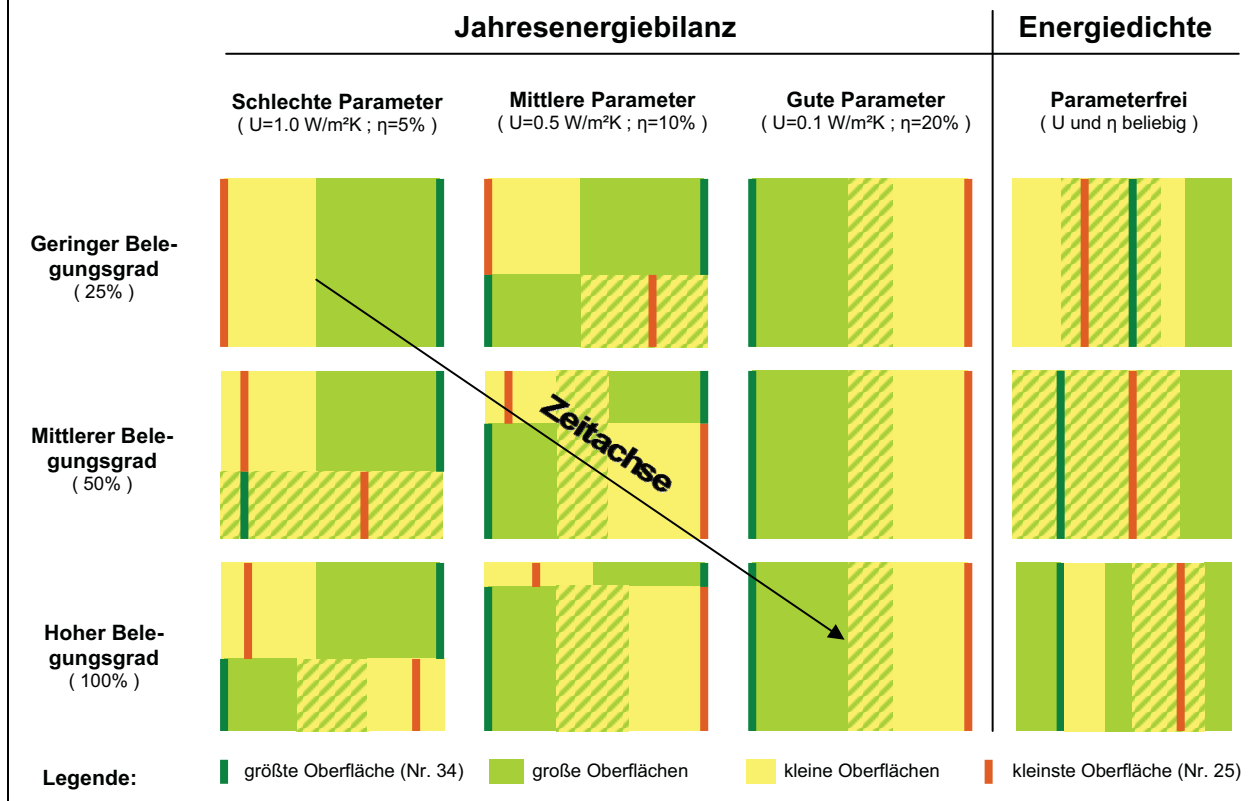
Energiedichte:

Für einen geringen Belegungsgrad liegen sowohl Formen mit kleinen als auch großen A/V-Verhältnissen gleichermaßen vorne, wobei die Indikatorlinien eine Präferenz großer A/V anzeigen. Mit steigendem Belegungsgrad zeigt die Sortierung eine deutlichere Abgrenzung der beiden Gruppen, wobei weiterhin unkompakte Formen zu bevorzugen sind.

Zusammenfassung:

Tendenziell zeigen zukünftig unkompakte Formen mit großen A/V mehr Potential, da ihre gestiegenen solaren Gewinne über die vergrößerte Hüllfläche die ebenfalls erhöhten thermischen Verluste mehr als ausgleichen können. Die bisher in der Fachliteratur vorherrschende Forderung nach möglichst kompakten Gebäudeformen ist daher nicht länger empfehlenswert, sobald die Parameter zu Bau- und Anlagentechnik kontinuierlich verbessert werden.

- Oberflächengröße O -



Jahresenergiebilanz:

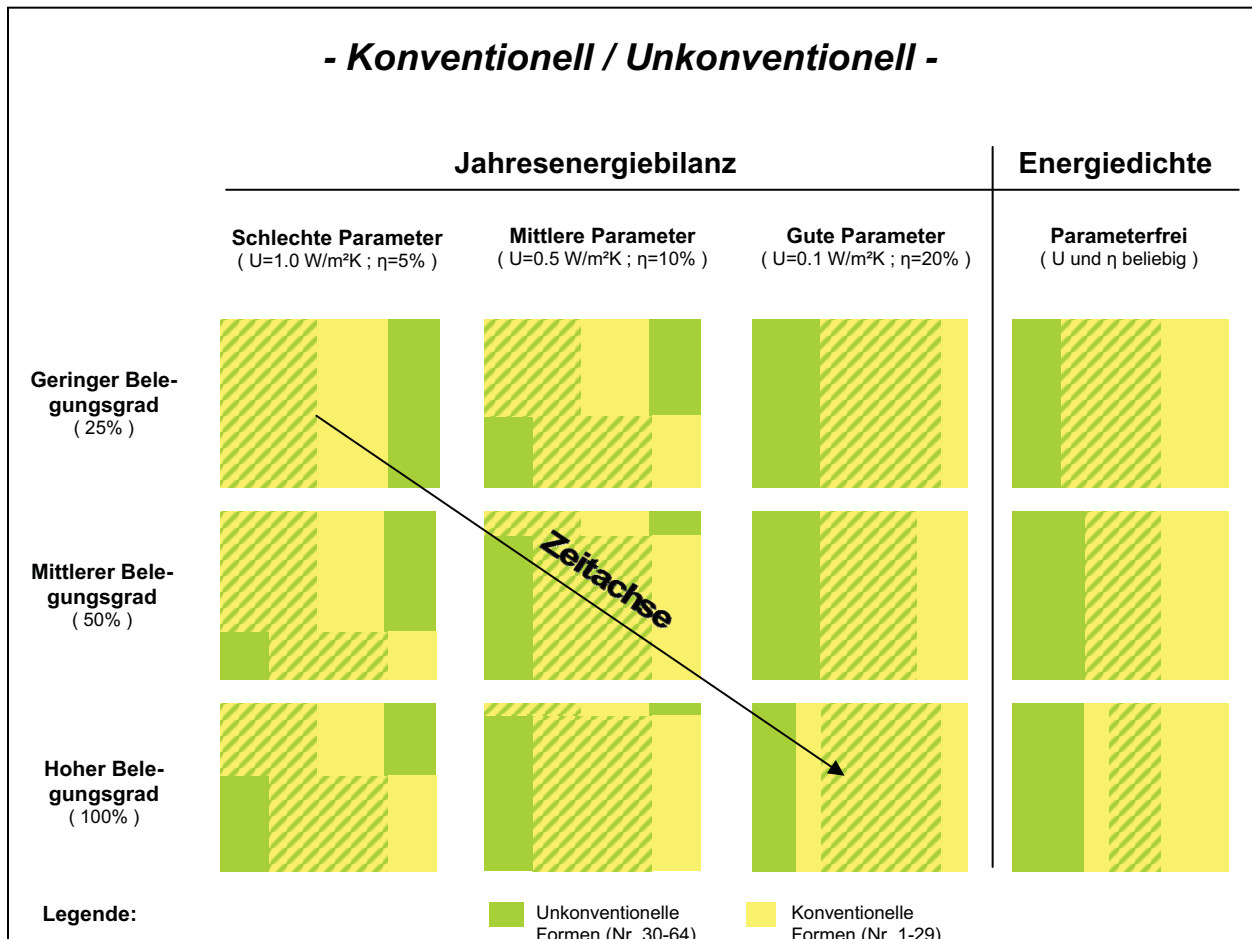
Der Untersuchungsaspekt *Oberfläche* zeigt einen prägnanten Einfluss auf die Rangfolge. Bei schlechten Parametern liegt die Gruppe der kleinen Oberflächen noch durchgängig vorn und die der großen hinten, dies wird in den Extremen durch die beiden Indikatorlinien bestätigt. Mit zunehmender Verbesserung der Parameter kehrt sich die Rangfolge um und unkompakte Formen mit großen Oberflächen wandern nach vorne. Diese Entwicklung beginnt am Äquator und erreicht später den Nordpol. Die beschriebene Tendenz ähnelt derjenigen der Kompaktheit, die luftberührte Oberfläche O und das A/V -Verhältnis unterscheiden sich jedoch bezüglich der Einbeziehung der erdberührten Grundfläche G . Es gilt: $A = O + G$.

Energiedichte:

Für einen geringen Belegungsgrad liegen Formen mit kleinen Oberflächen vorne. Mit steigendem Belegungsgrad zeigen die Indikatorlinien in einem heterogenen Feld die zunehmende Präferenz großer Oberflächen an.

Zusammenfassung:

Tendenziell zeigen zukünftig Formen mit großen Oberflächen das höhere Potential, da aufgrund der stetig verbesserten Parameter die solaren Gewinne über die vergrößerte Hüllfläche gesteigert und die thermischen Verluste so überkompensiert werden können. Die konventionelle Forderung nach möglichst kleinen Gebäudeoberflächen ist somit unter Annahme einer sich stetig verbessernden Bau- und Anlagentechnik nicht länger empfehlenswert.



Jahresenergiebilanz:

Die vergleichende Untersuchung *Konventionelle / Unkonventionellen Formen* zeigt einen prägnanten Einfluss auf die Rangfolge. Bei schlechten Parametern führt zunächst keine der beiden Gruppen die Rangfolge an. Eine Verbesserung der Parameter sortiert die unkonventionellen Formen nach vorne und eine kleine Gruppe konventioneller Formen nach hinten. Mittig verbleibt jedoch ein großes heterogenes Feld. Eine vergleichbare Entwicklung zeigt sich auch bei zunehmendem Belegungsgrad. Gegen diesen Trend schließt bei hohem Belegungsgrad und guten Parametern eine Gruppe konventioneller Formen direkt an die führenden unkonventionellen Formen an. Es handelt sich um Formen der Reihe 1 und 2.

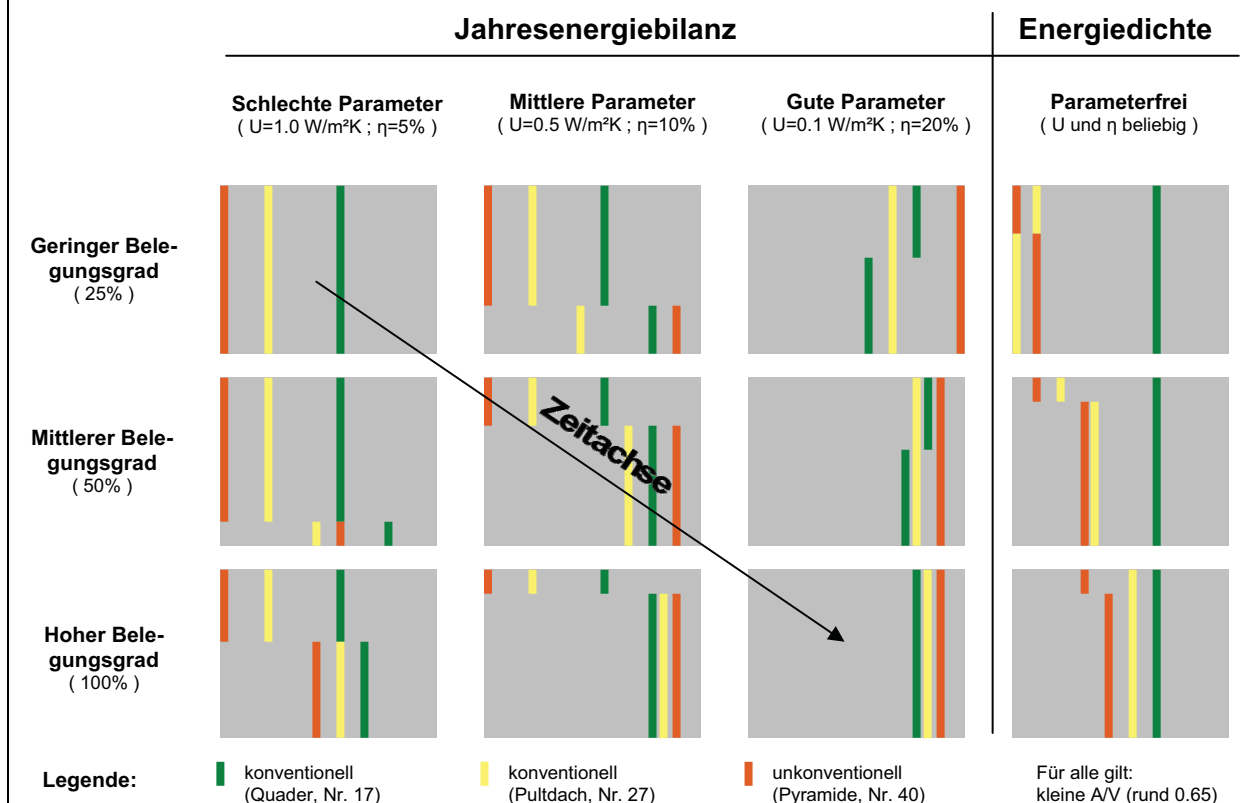
Energiedichte:

Für einen geringen Belegungsgrad liegt nur eine kleine Gruppe unkonventioneller Formen vorne, gefolgt von einem großen heterogenen Feld. Den Abschluss bilden konventionelle Formen. Mit zunehmendem Belegungsgrad vergrößert sich die Gruppe der führenden unkonventionellen Formen.

Zusammenfassung:

Tendenziell zeigen zukünftig unkonventionelle Formen das größere Potential, da höhere Energiedichten erzielt werden können. Die Entwicklung einer solaren Formensprache scheint empfehlenswert. Dennoch gibt es auch einige Formen im Bestand mit guten Ergebnissen.

- Konventionell / Unkonventionell (kleine A/V)-



Jahresenergiebilanz:

Die Untersuchung *Konventionelle / Unkonventionellen Formen bei kleinen A/V* wird beispielhaft an zwei konventionellen Formen (Quader und Pulldach) und einer unkonventionellen Form (Pyramide) durchgeführt. Es zeigt sich ein prägnanter Einfluss auf die Rangfolge. Bei schlechten Parametern dominiert die unkonventionelle Pyramide, bei den konventionellen Formen liegt der Quader hinten. Verbesserungen der Parameter führen jedoch dazu, dass sich die Sortierung umkehrt, jedoch liegen hier alle Formen mit kleinem A/V in einem engen Feld weit hinten. Diese Entwicklung zeigt sich auch bei zunehmendem Belegungsgrad.

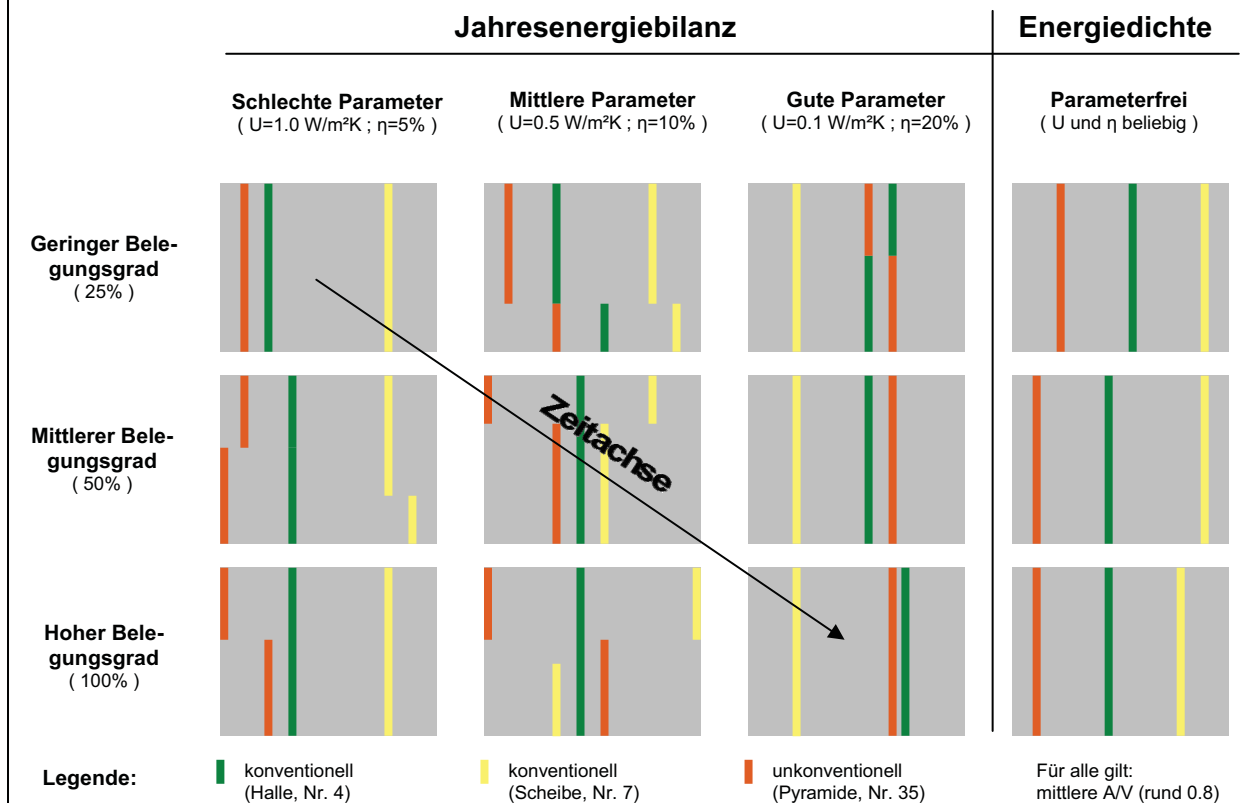
Energiedichte:

Bei Sortierung nach erzielbarer Energiedichte liegt der Quader konstant hinten. Bei geringem Belegungsgrad liegt zunächst noch das konventionelle Pulldach vorn, wird jedoch bald von der unkonventionellen Pyramide abgelöst. Insgesamt zeigt sich auch bei der Dichte mit zunehmendem Belegungsgrad eine kontinuierliche Verschlechterung für Formen mit kleinem A/V, egal ob konventionell oder unkonventionell.

Zusammenfassung:

Bei Formen mit ähnlich kleinem A/V zeigen zukünftig unkonventionelle Formen das größere Potential. Insgesamt schneiden Formen mit kleinem A/V zukünftig zunehmend schlechter ab, da eine kleine Gebäudehüllfläche potentielle Empfangsflächen reduziert.

- Konventionell / Unkonventionell (mittlere A/V)-



Jahresenergiebilanz:

Die Untersuchung *Konventionelle / Unkonventionellen Formen bei mittleren A/V* wird beispielhaft an zwei konventionellen Formen (Halle und Scheibe) und einer unkonventionellen Form (Pyramide) durchgeführt. Es zeigt sich ein prägnanter Einfluss auf die Rangfolge. Bei schlechten Parametern dominiert die unkonventionelle Pyramide, bei den konventionellen Formen liegt die Scheibe hinten. Verbesserungen der Parameter führen jedoch dazu, dass sich die Sortierung umkehrt. Pyramide und Halle schneiden jedoch deutlich schlechter ab als die Scheibe. Diese Entwicklung zeigt sich auch bei zunehmendem Belegungsgrad.

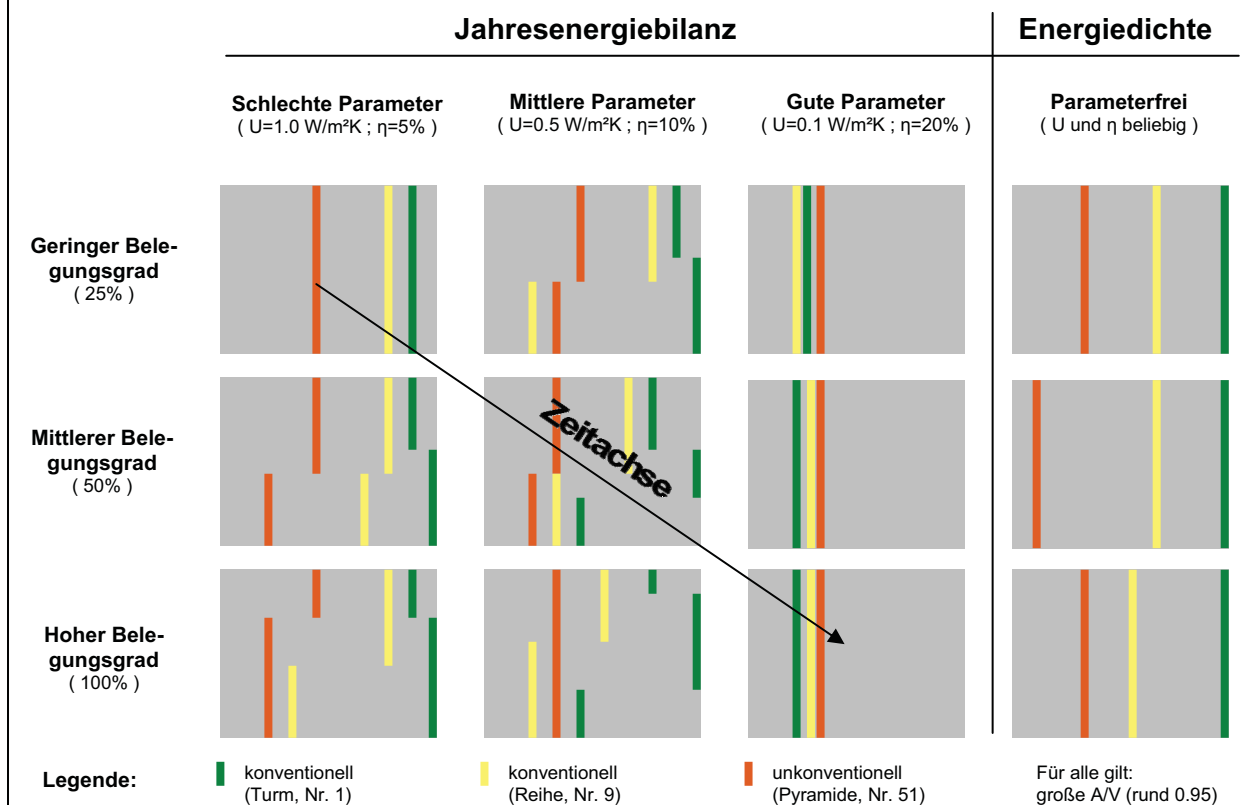
Energiedichte:

Bei Sortierung nach erzielbarer Energiedichte liegt die Scheibe konstant hinten. Durchweg gute Ergebnisse zeigt die Pyramide, während die Halle durchgängig im Mittelfeld liegt.

Zusammenfassung:

Bei Formen mit vergleichbar mittlerem A/V zeigt zukünftig die konventionelle Scheibenform eine gute Energiebilanz. Die gesamte Fläche der Gebäudehülle ist bei den drei untersuchten Formen gleich groß. Die Scheibe hat von den untersuchten Formen jedoch die kleinste Grundfläche, so dass sie im Vergleich über eine größere aktive Oberfläche verfügt und davon zukünftig profitiert. In Bezug auf erzielbare Einstrahldichten liegt die Pyramide vorn. Insgesamt schneiden diese Formen mit mittlerem A/V besser ab als die mit kleinem A/V.

- Konventionell / Unkonventionell (große A/V)-



Jahresenergiebilanz:

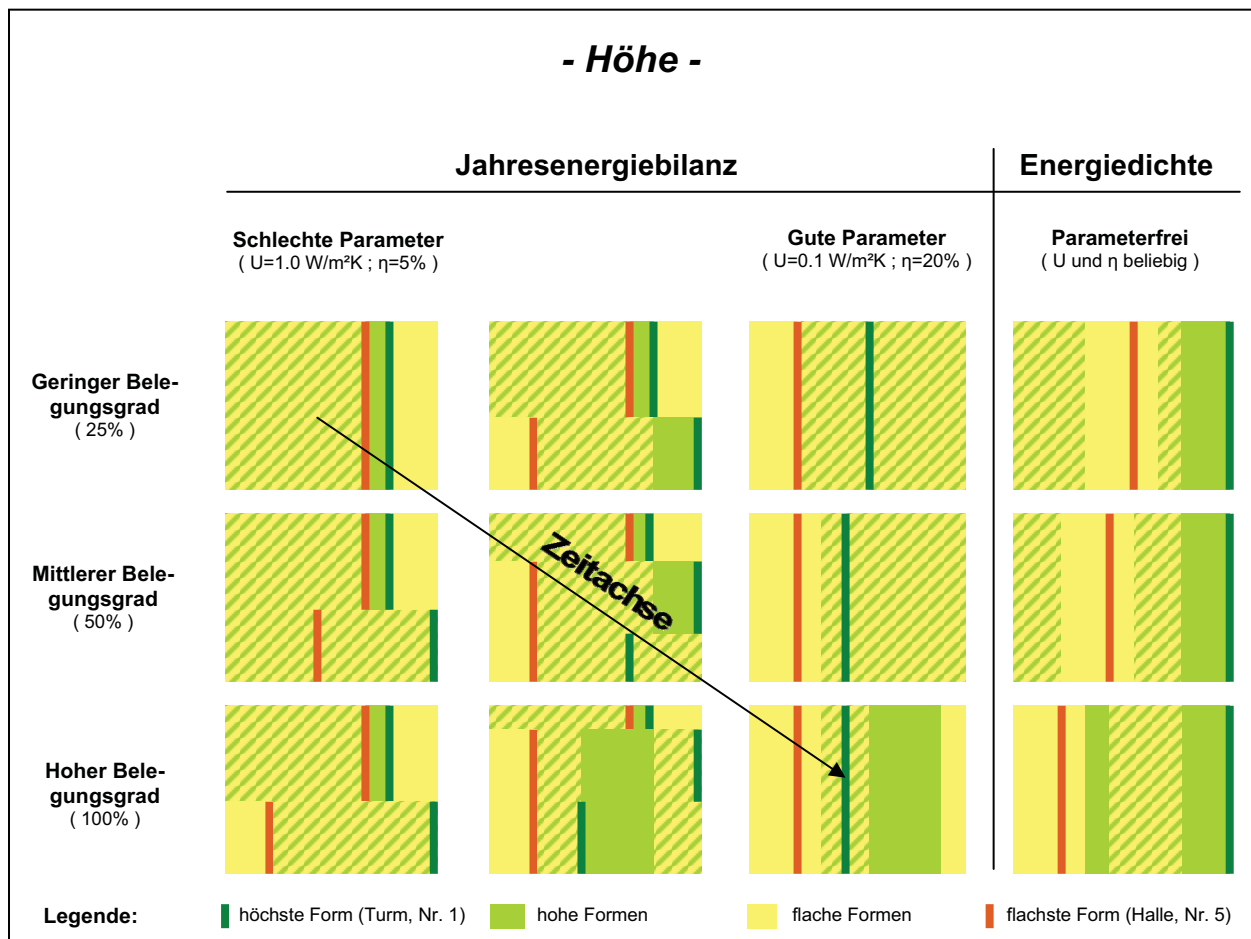
Die Untersuchung *Konventionelle / Unkonventionellen Formen bei großen A/V* wird beispielhaft an zwei konventionellen Formen (Turm und Halle) und einer unkonventionellen Form (Pyramide) durchgeführt. Es zeigt sich ein prägnanter Einfluss auf die Rangfolge. Bei schlechten Parametern dominiert die unkonventionelle Pyramide, bei den konventionellen Formen liegt der Turm hinten. Verbesserungen der Parameter führen jedoch dazu, dass sich die Sortierung genau umkehrt. Diese Entwicklung zeigt sich auch bei zunehmendem Belegungsgrad. Zuletzt liegen Turm, Reihe und Pyramide dicht zusammen im guten Bereich.

Energiedichte:

Bei Sortierung nach erzielbarer Energiedichte liegt der Turm konstant auf dem letzten Platz. Auch die Reihe befindet sich immer in der hinteren Hälfte. Die Pyramide zeigt durchweg gute Ergebnisse, insbesondere bei mittlerem Belegungsgrad.

Zusammenfassung:

Bei Formen mit vergleichbar großem A/V zeigen zukünftig die konventionellen Formen Turm und Reihe eine gute Energiebilanz, was an den vergleichsweise kleinen Grundflächen und größeren aktiven Oberflächen liegt. Bei der erzielbaren Einstrahldichte liegt die Pyramide vorn. Insgesamt schneiden Formen mit großem A/V deutlich besser ab als die mit mittlerem oder kleinem A/V, da bei zunehmend verbesserten Parametern die potentiellen solaren Gewinne gegenüber den thermischen Verlusten überwiegen.



Jahresenergiebilanz:

Der Untersuchungsaspekt *Höhe* zeigt auf den ersten Blick keinen prägnanten Einfluss auf die Rangfolge. Bei schlechten Parametern liegt ein heterogenes Feld aus hohen und flachen Formen vorne, während eine Gruppe flacher Formen die letzten Plätze belegt. Die Indikatorlinien liegen beide im letzten Drittel. Mit zunehmender Verbesserung der Parameter jedoch sortieren sich Bereiche hoher und flacher Formen aus dem heterogenen Feld, ihre Abfolge zeigt aber zunächst keine einheitliche Entwicklung. Gleiches gilt für zunehmenden Belegungsgrad. Dennoch kann insgesamt die Tendenz abgelesen werden, dass flache Formen gegenüber hohen im Vorteil sind.

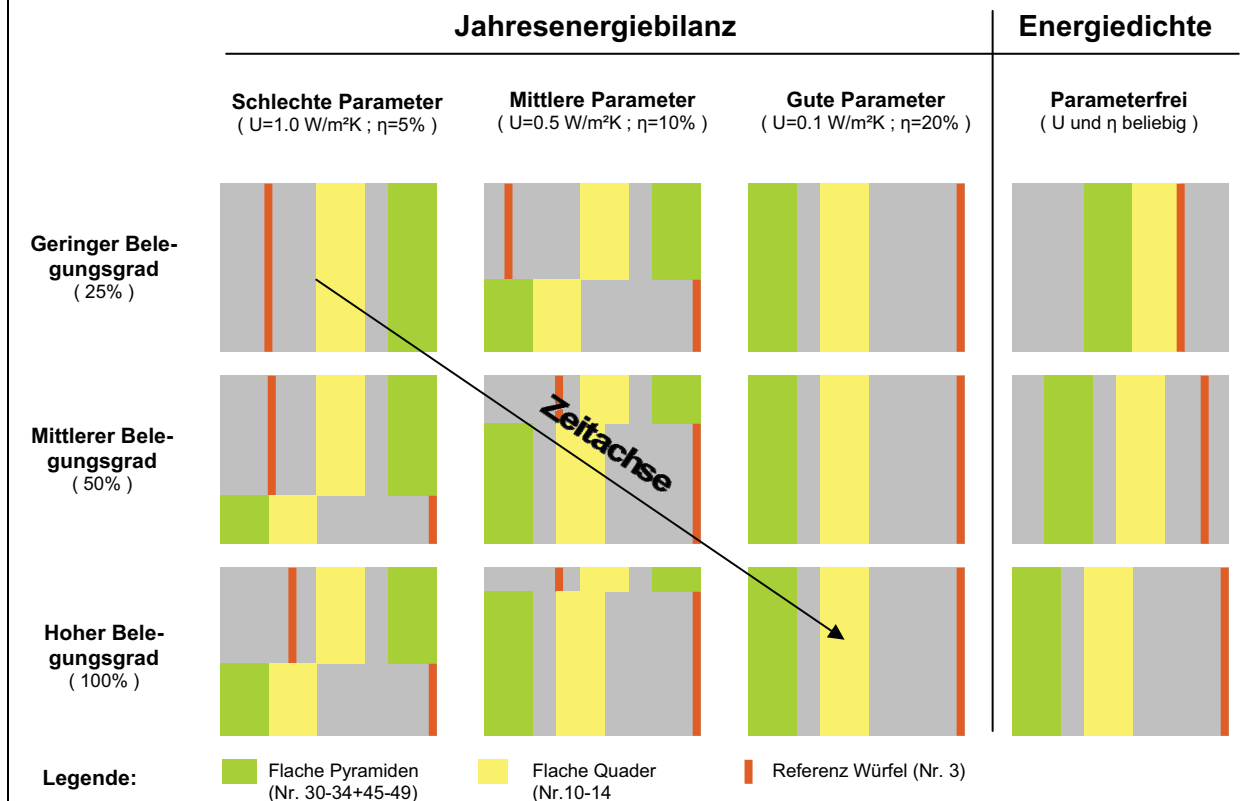
Energiedichte:

Das Ergebnis der Sortierung nach Energiedichte ist jedoch deutlicher. Bei steigendem Belegungsgrad zeigt die Verteilung der Felder sowie die Lage der zugehörigen Indikatorlinien eine deutlich Präferenz flacher Formen an.

Zusammenfassung:

Der Aspekt der Gebäudehöhe zeigt zunächst keinen einheitlichen Einfluss auf die Sortierung. Mit zunehmender Verbesserung der Parameter zeigt sich jedoch ein Vorteil für flache Formen, was insbesondere für die erzielbare Energiedichte gilt. Dies liegt daran, dass bei hohen Formen größere Hüllflächenanteile steile Neigungswinkel aufweisen und daher durchschnittlich weniger Diffusstrahlung erhalten als flach geneigte Flächen an niedrigen Formen.

- Quader/Pyramiden (flach)-



Jahresenergiebilanz:

Die vergleichende Gegenüberstellung von *flachen* Quadern und Pyramiden zeigt, dass für schlechte Parameter die Gruppe der Quader durchgängig günstiger ist, wenngleich flache Formen insgesamt nur in der zweiten Hälfte der Rangfolge liegen. Mit zunehmender Verbesserung der Parameter wandern flache Formen nach vorne und die Gruppe der Pyramiden setzt sich an die Spitze.

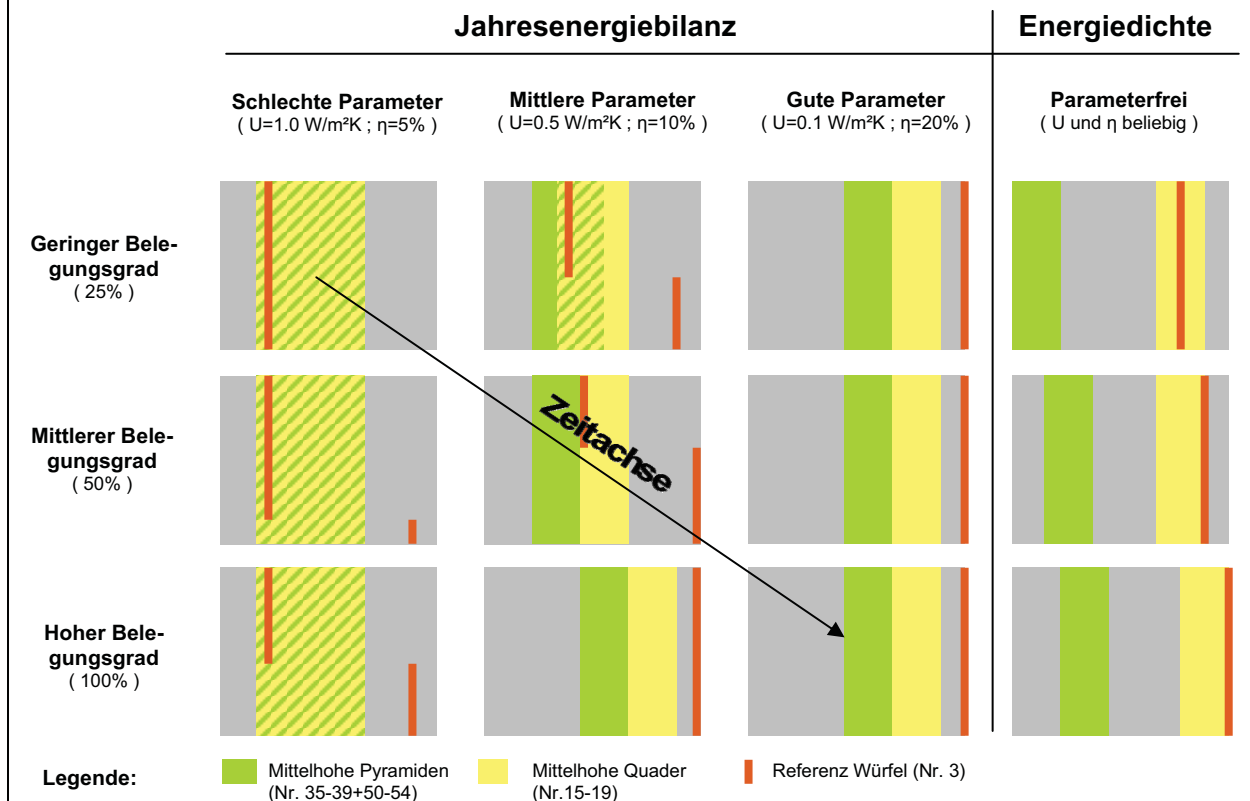
Energiedichte:

Bezüglich der erzielbaren Energiedichte sind Pyramiden geeigneter als Quader. Mit steigendem Belegungsgrad belegen sie die vordersten Plätze.

Zusammenfassung:

Auf der Zeitachse zeigen flache Pyramiden gegenüber flachen Quadern sowohl bezüglich der Jahresenergiebilanz als auch der Energiedichte das größere Potential, da ihre Hüllen über eine größere Vielfalt an Neigungen und Orientierungen verfügen als die auf die Senkrechte und Horizontale beschränkten Quader. Auch können die schiefen Pyramiden gegenüber den rotationssymmetrischen Quadern das Optimierungspotential der Orientierung besser ausnutzen, was bei hohem Belegungsgrad in zunehmendem Maße wichtig wird. Insgesamt schneiden flache Formen unter Annahme einer stetigen Optimierung der Parameter zukünftig gut ab.

- Quader/Pyramiden (mittelhoch)-



Jahresenergiebilanz:

Die vergleichende Gegenüberstellung von *mittelhohen* Quadern und *Pyramiden* zeigt, dass für schlechte Parameter zunächst im vorderen Drittel ein gemischtes Feld beider Gruppen entsteht. Mit zunehmender Verbesserung der Parameter trennen sich Pyramiden und Quader, wobei die Gruppe der Pyramiden leicht im Vorteil ist. Insgesamt wandern die mittelhohen Formen vom vorderen ins hintere Drittel.

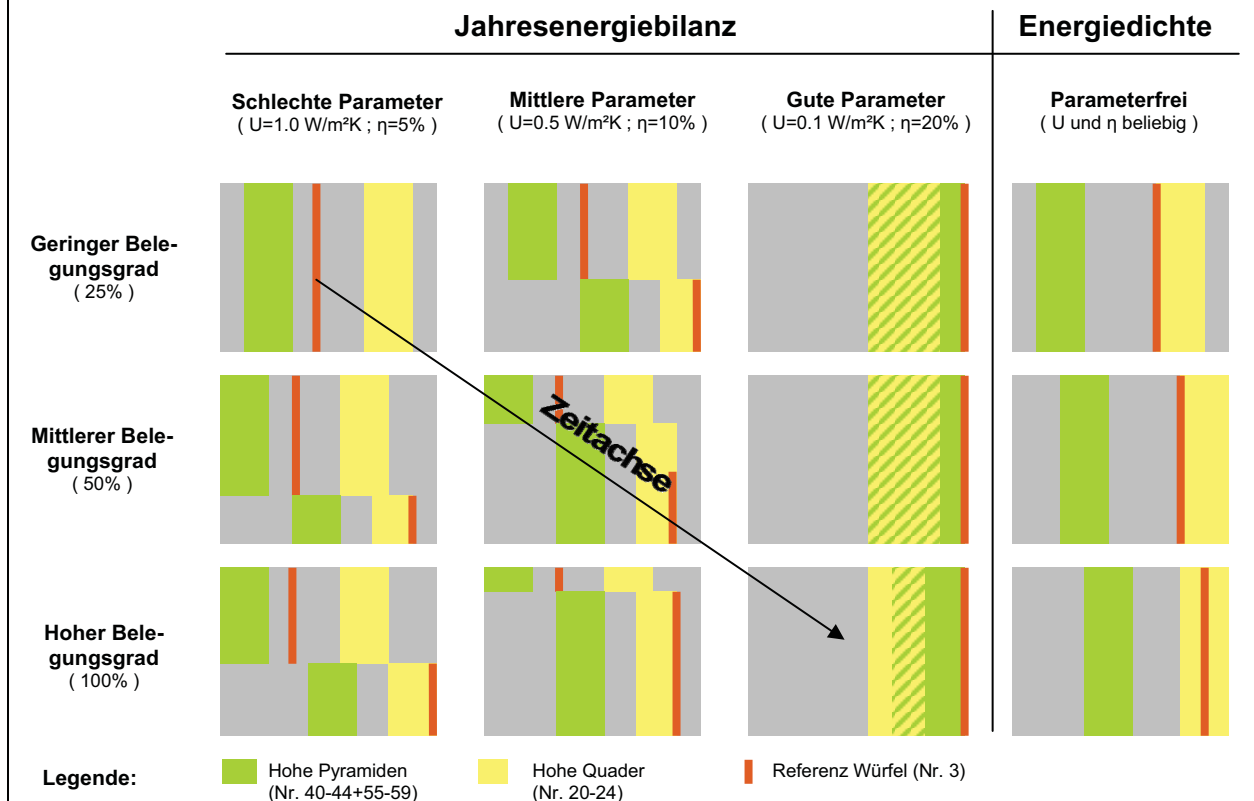
Energiedichte:

Bezüglich der erzielbaren Energiedichte sind Pyramiden deutlich geeigneter als Quader. Mit steigendem Belegungsgrad wandern Quader auf die letzten Plätze. Auch die Pyramiden verzeichnen Einbußen und erzielen zunehmend schlechtere Ergebnisse.

Zusammenfassung:

Auf der Zeitachse zeigen mittelhohe Pyramiden gegenüber mittelhohen Quadern sowohl bezüglich der Jahresenergiebilanz als auch der Energiedichte das größere Potential. Insgesamt ist die Tendenz für mittelhohe Formen jedoch ungünstig, da sie aufgrund ihrer Kompaktheit weniger potentielle Empfangsflächen besitzen.

- Quader/Pyramiden (hoch)-



Jahresenergiebilanz:

Die vergleichende Gegenüberstellung von *hohen* Quadern und Pyramiden zeigt, dass für schlechte Parameter die Pyramiden das vordere und die Quader das hintere Drittel belegen. Mit zunehmender Verbesserung der Parameter werden hohe Formen für Standorte in Polnähe günstiger, während sie in Äquatornähe schlechter abschneiden. Für sehr gute Parameter sind hohe Formen – egal ob Pyramide oder Quader – nahezu gleichmäßig schlecht, wobei die hohen Pyramiden zunehmend schlechte Plätze belegen.

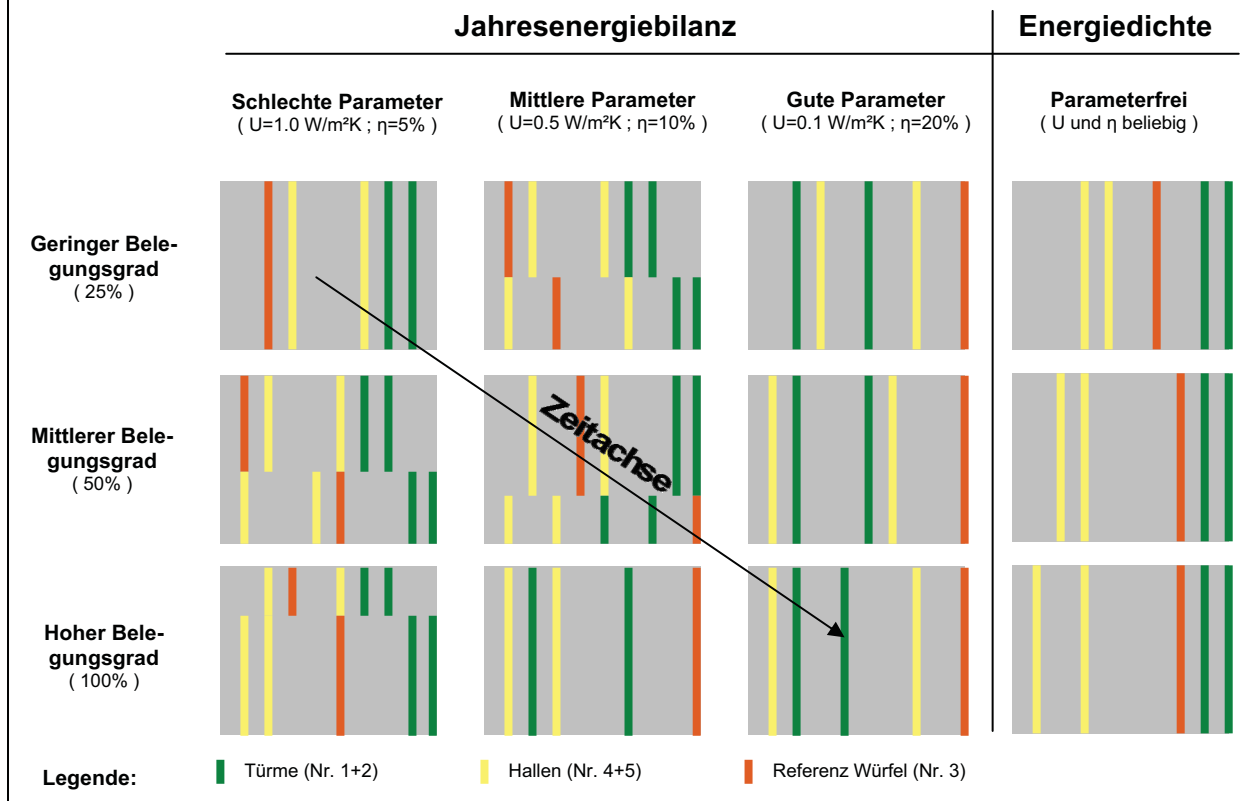
Energiedichte:

Bezüglich der erzielbaren Energiedichte sind Pyramiden deutlich geeigneter als Quader. Mit steigendem Belegungsgrad wandern jedoch Quader sowie Pyramiden sukzessive nach hinten.

Zusammenfassung:

Hohe Formen schneiden für mittlere Parameter in Polnähe besser und in Äquatornähe schlechter ab. Dies ist mit der jeweiligen Einstrahlungsgeometrie bei tendenziell eher niedrig bzw. sehr hoch stehenden Sonnenposition zu erklären. Sobald größere Hüllflächenanteile genutzt werden, zeigt sich jedoch, dass hohe Formen tendenziell ungünstig sind.

- Gruppe 1 -

**Jahresenergiebilanz:**

Bei der Entwicklung der Rangfolge innerhalb der *Formengruppe 1* kann man beobachten, dass für schlechte Parameter der Würfel als kompakteste Form deutlich vorne liegt, gefolgt von den beiden hallenartigen Formen, während die Türme den Abschluss der Rangfolge bilden. Während die Entwicklung zu besseren Parametern für Halle und Turm kein einheitliches Bild zeigt, geht die Entwicklung des Würfels schrittweise von einer guten zur letzten Platzierung im Feld über.

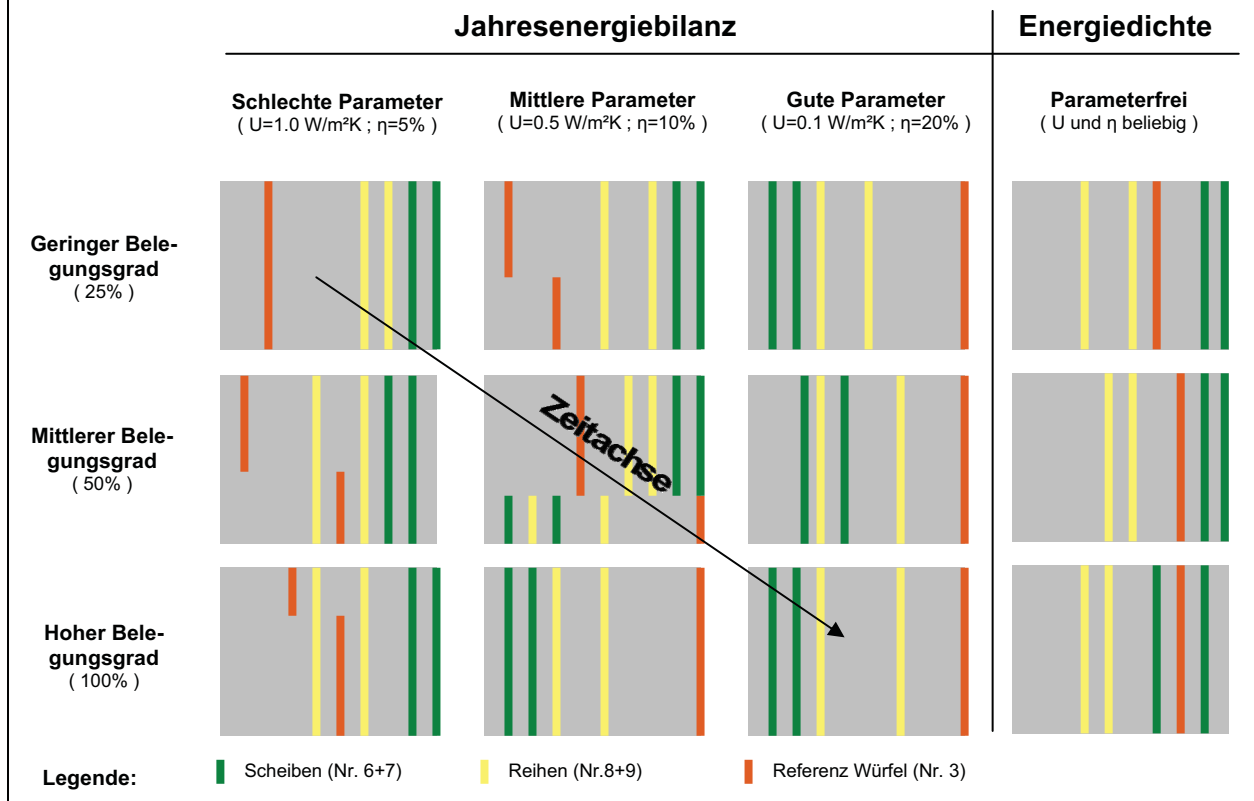
Energiedichte:

Bezüglich der erzielbaren Energiedichte führen Hallen grundsätzlich die Rangfolge an, gefolgt vom Würfel. Den Abschluss bilden durchgängig die Türme. Während sich der Würfel bei steigendem Belegungsgrad bezüglich empfangener Energiedichte verschlechtert, wandern die Hallen in der Rangfolge nach vorne.

Zusammenfassung:

Der Würfel schneidet zukünftig bei hohem Belegungsgrad und verbesserten Parametern immer schlechter ab, da aufgrund seiner Kompaktheit potentielle Empfangsflächen reduziert sind. Das gute Abschneiden der Hallen gegenüber dem schlechten Ergebnis der Türme kann damit erklärt werden, dass bei hohem Belegungsgrad zunehmend Teiloberflächen mit geringem Direkt- und hohem Diffusanteil einbezogen werden. Da für die Horizontale der sichtbare Himmelsdom größer ist als für die Senkrechte, empfangen Hallen mehr Diffusstrahlung.

- Gruppe 2 -

**Jahresenergiebilanz:**

Bei der Entwicklung der Rangfolge innerhalb der *Formengruppe 2* kann man beobachten, dass für schlechte Parameter die kompakteste Form, der Würfel, deutlich vorne liegt, gefolgt von den beiden Reihen. Die Scheiben bilden jeweils den Abschluss der Rangfolge. Während die Entwicklung zu besseren Parametern für Reihen und Scheiben kein einheitliches Bild zeigt, geht die Entwicklung des Würfels schrittweise von einer guten zur letzten Platzierung.

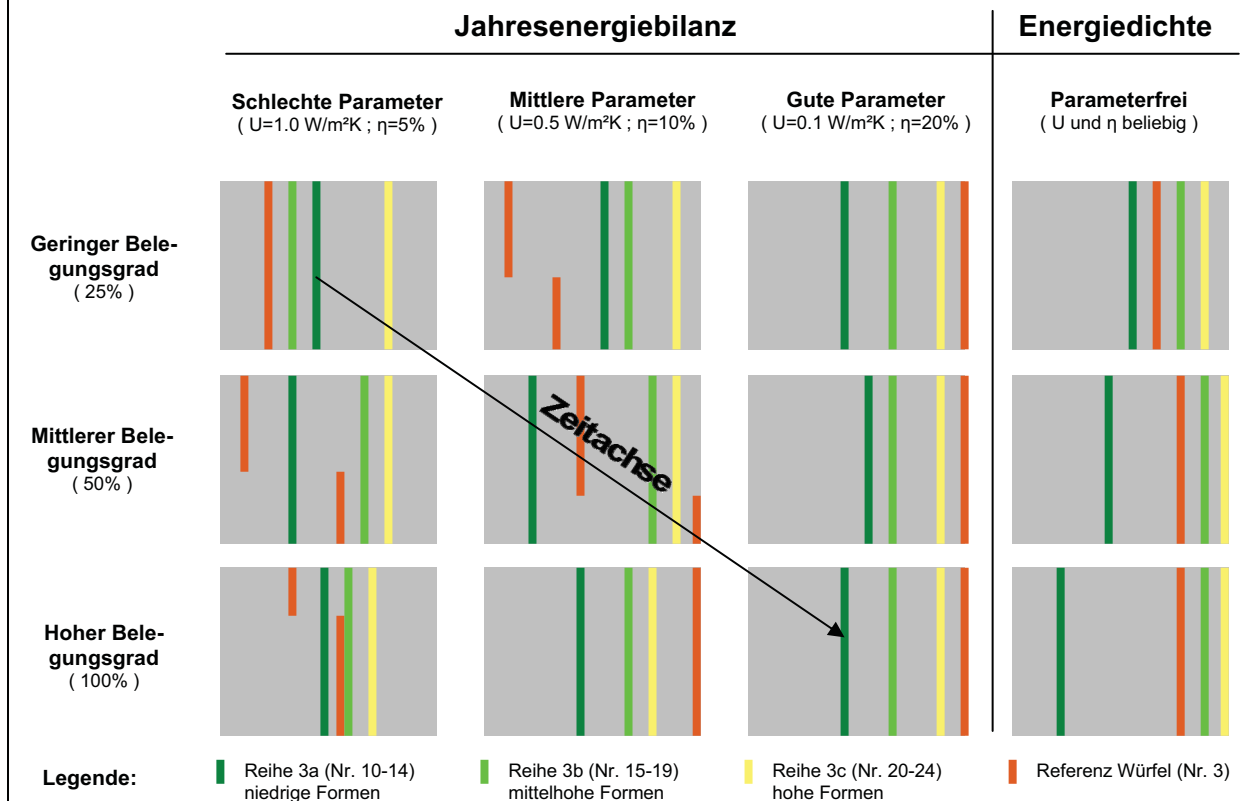
Energiedichte:

Bezüglich der erzielbaren Energiedichte führen Reihen grundsätzlich die Rangfolge an, gefolgt vom Würfel. Den Abschluss bilden mit Ausnahme des letzten Falles durchgängig die Türme. Während sich der Würfel bei steigendem Belegungsgrad bezüglich empfangener Energiedichte verschlechtert, wandern die Reihen in der Rangfolge nach vorne.

Zusammenfassung:

Der Würfel schneidet zukünftig bei hohem Belegungsgrad und verbesserten Parametern immer schlechter ab, da aufgrund seiner Kompaktheit potentielle Empfangsflächen reduziert sind. Das gute Abschneiden der Reihen gegenüber dem schlechten Ergebnis der Scheiben kann damit erklärt werden, dass bei hohem Belegungsgrad zunehmend Teiloberflächen mit geringem Direkt- und hohem Diffusanteil einbezogen werden. Da für horizontale Flächen der sichtbare Himmelsdom größer ist als für senkrechte, empfangen Reihen im Vergleich mehr Diffusstrahlung als Scheiben.

- Gruppe 3 -

**Jahresenergiebilanz:**

Bei der Entwicklung der Rangfolge innerhalb der *Formengruppe 3* kann man beobachten, dass für schlechte Parameter der Würfel als kompakteste Form deutlich vorne liegt, gefolgt von Reihe 3b, der mittelhohen und damit kompaktesten der drei Reihen. Es folgen die flachen Quader der Reihe 3a und zuletzt die hohen Formen in Reihe 3c. Die Entwicklung zu besseren Parametern führt dazu, dass die flache Reihe 3a die kompakte Reihe 3b überholt, während die hohe Reihe 3c hinten verbleibt.

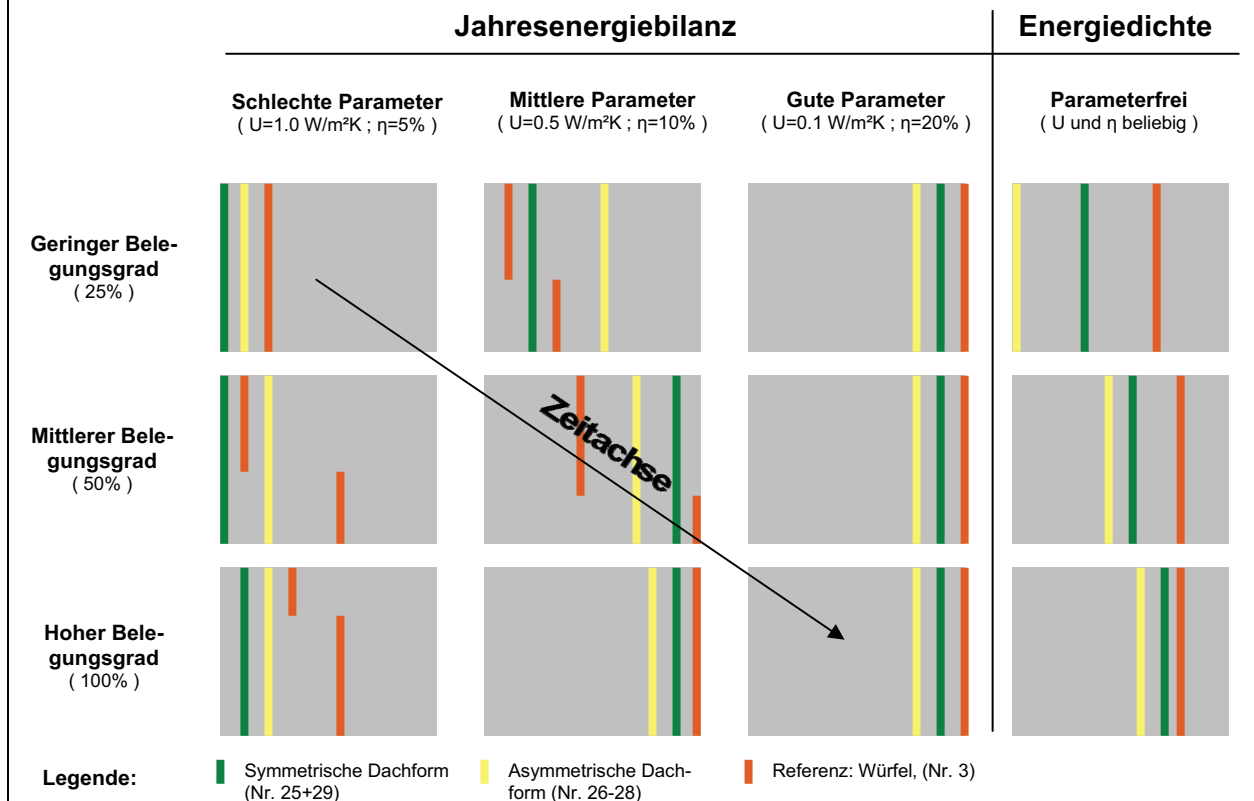
Energiedichte:

Bezüglich der erzielbaren Energiedichte führen flache Formen der Reihe 3a grundsätzlich die Rangfolge an, gefolgt vom Würfel. Den Abschluss bilden kompakte Quader in Reihe 3b und hohe Quader in Reihe 3c.

Zusammenfassung:

Bezüglich der Energiebilanz schneiden kompakte Formen zukünftig zunehmend schlechter ab, da bei ihnen aufgrund ihrer Kompaktheit potentielle Empfangsflächen in ihrer absoluten Größe reduziert sind. Das gute Abschneiden der flachen Formen in Reihe 3a gegenüber den hohen in Reihe 3c kann damit erklärt werden, dass bei hohem Belegungsgrad zunehmend Teiloberflächen mit geringem Direkt- und hohem Diffusanteil einbezogen werden. Da für horizontale Flächen der sichtbare Himmelsdom größer ist als für senkrechte, empfangen niedrige Formen mehr Diffusstrahlung als hohe, welche mehr steile Oberflächen besitzen.

- Gruppe 4 -

**Jahresenergiebilanz:**

Bei der Entwicklung der Rangfolge innerhalb der *Formengruppe 4* kann man beobachten, dass für schlechte Parameter symmetrische Dachformen das Feld anführen. Erst mit zunehmender Verbesserung der Parameter liegen asymmetrische Dachformen vorn. Allerdings sind bessere Parameter insgesamt mit einem zunehmend schlechten Abschneiden der Gruppe 4 verbunden. Insgesamt scheidet sie jedoch in allen Fällen besser ab als der Referenzwürfel.

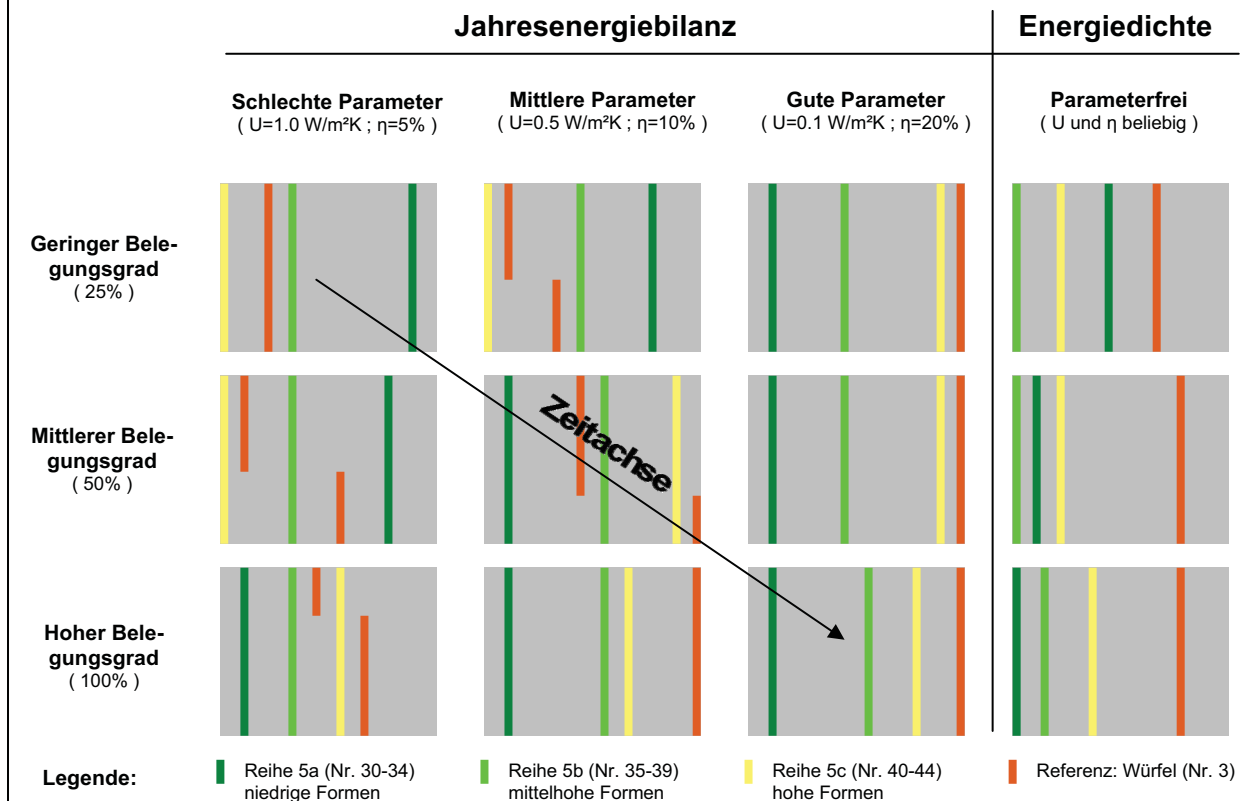
Energiedichte:

Bezüglich der erzielbaren Energiedichte führen asymmetrische Dachformen grundsätzlich die Rangfolge an, gefolgt von symmetrischen Dachformen. Den Abschluss bildet durchgängig der Referenzwürfel. Ein höherer Belegungsgrad führt immer zur Verschlechterung der Platzierung.

Zusammenfassung:

Die Bevorzugung asymmetrischer Dachformen kann damit erklärt werden, dass diese Formen verschiedene Dachneigungen aufweisen, während symmetrische Formen eine konstante Neigung besitzen. Maximale Diversität der Ausrichtung von potentiellen Empfangsflächen ist jedoch mit zunehmendem Belegungsgrad ein Vorteil. Gleiches gilt für die Orientierungsoptimierung, da asymmetrische Formen einen maximalen Optimierungssektor von 360° besitzen, symmetrische Formen aufgrund von Rotationssymmetrien hingegen nur von $<180^\circ$.

- Gruppe 5 -

**Jahresenergiebilanz:**

Bei der Entwicklung der Rangfolge innerhalb der *Formengruppe 5* kann man beobachten, dass für schlechte Parameter die hohen Formen der Gruppe 5c deutlich vorn liegen, gefolgt von der mittelhohen Reihe 5b, während die flachen Formen der Reihe 5a den Abschluss bilden. Die Entwicklung zu besseren Parametern führt dazu, dass die flache Reihe 5a nach vorne rückt, während hohe Formen in Reihe 5c nach hinten wandern. Sie schneiden jedoch nicht so schlecht ab wie der kompakte Referenzwürfel.

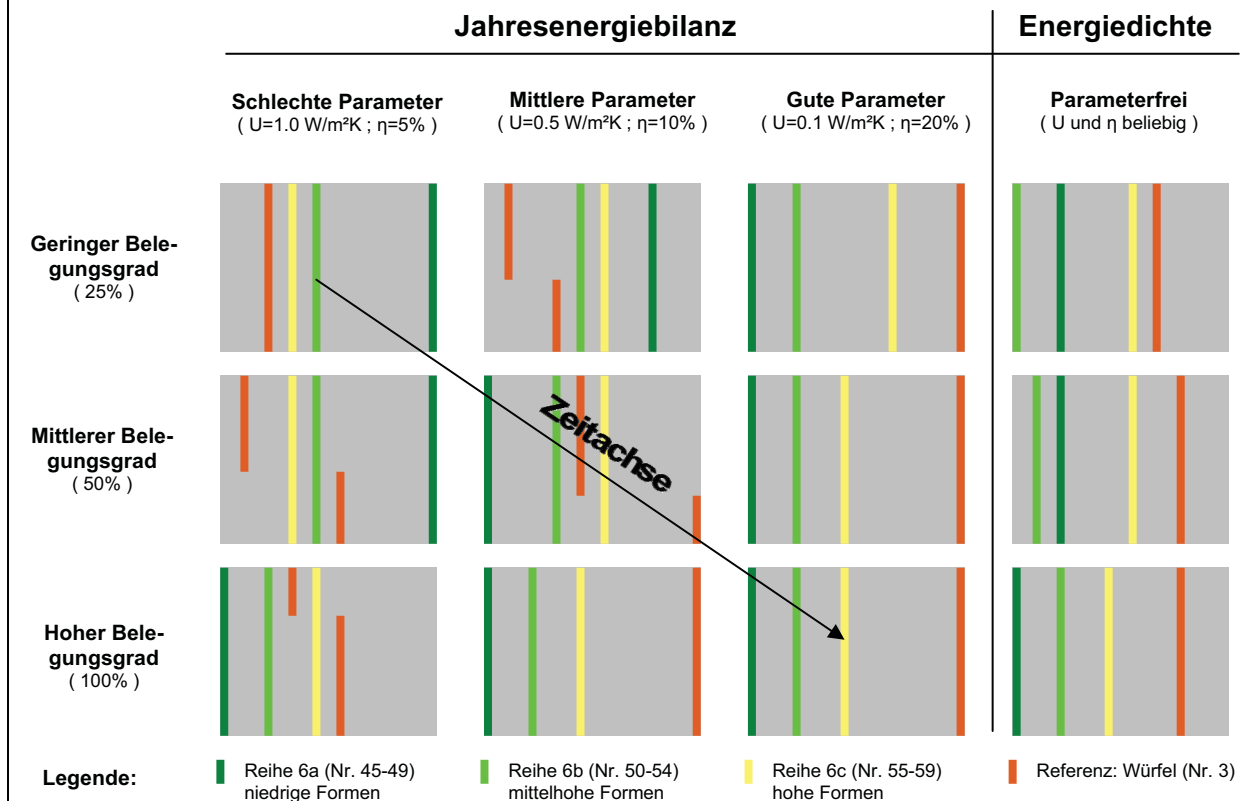
Energiedichte:

Bezüglich der erzielbaren Energiedichte führen zunächst kompakte Formen der Reihe 5b das Feld an, gefolgt von hohen Formen der Reihe 5c. Mit zunehmendem Belegungsgrad liegen flache Formen der Reihe 5a vorn und hohe Formen der Reihe 5c hinten.

Zusammenfassung:

Bezüglich der Energiebilanz sowie Energiedichte schneiden flache Formen der Reihe 5a zukünftig besser ab als hohe der Reihe 5c. Dies kann damit erklärt werden, dass bei hohem Belegungsgrad zunehmend Teiloberflächen mit geringem Direkt- und hohem Diffusanteil einbezogen werden. Da für horizontale Flächen der sichtbare Himmelsdom größer ist als für senkrechte, empfangen niedrige Formen mehr Diffusstrahlung als hohe, welche im Vergleich über mehr steile bis senkrechte Oberflächen verfügen.

- Gruppe 6 -

**Jahresenergiebilanz:**

Das Muster ähnelt dem aus Gruppe 5. Bei der Entwicklung der Rangfolge innerhalb der *Formengruppe* 6 kann man beobachten, dass für schlechte Parameter die hohen Formen der Gruppe 6c vorn liegen, gefolgt von den mittelhohen der Reihe 6b, während die flachen Formen der Reihe 6a den Abschluss bilden. Die Entwicklung zu besseren Parametern führt dazu, dass die flachen Formen der Reihe 6a nach vorne rücken, während die hohen Formen aus Reihe 6c nach hinten wandern. Sie schneiden jedoch deutlich besser ab als der kompakte Referenzwürfel.

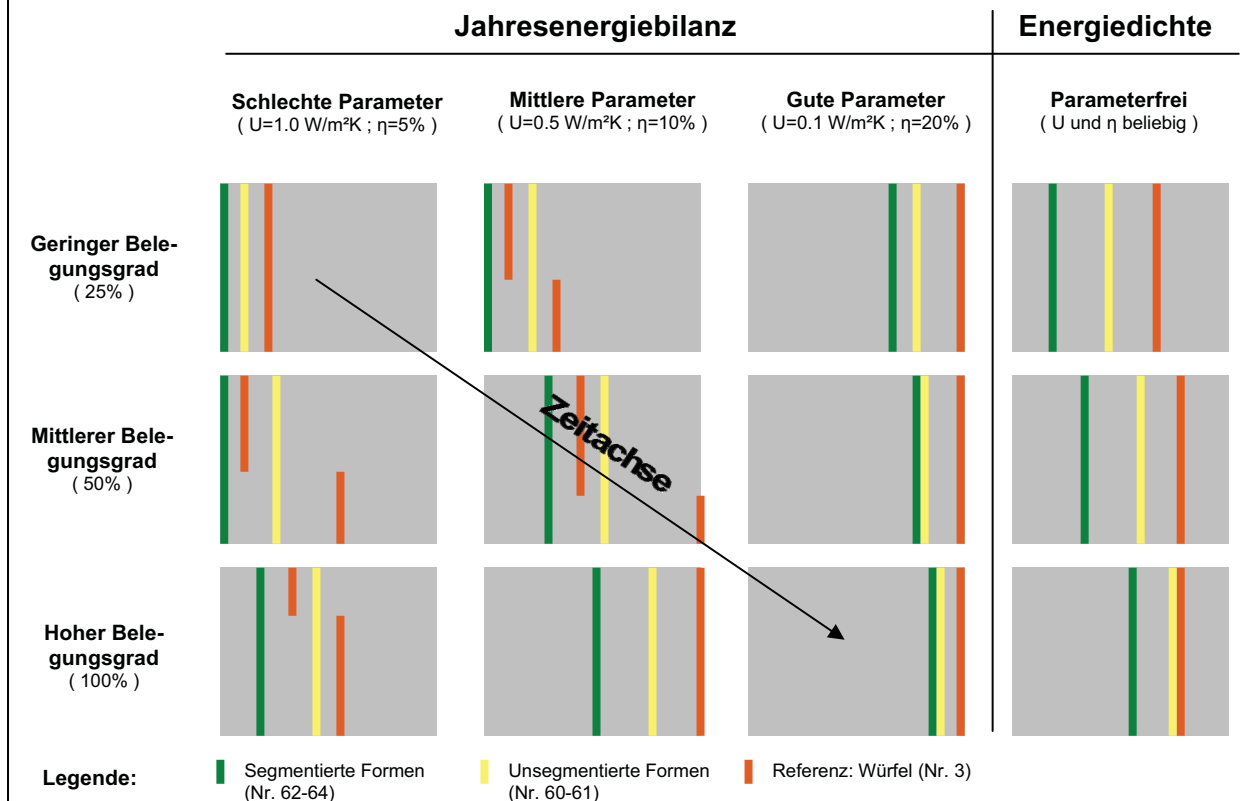
Energiedichte:

Das Muster ähnelt dem aus Gruppe 5. Bezüglich der erzielbaren Energiedichte führen zunächst kompakte Formen der Reihe 6b gefolgt von flachen Formen der Reihe 6a das Feld an. Mit zunehmendem Belegungsgrad sind flache Formen der Reihe 6a ganz vorn und hohe Formen aus Reihe 6c weiter hinten platziert.

Zusammenfassung:

Bezüglich Energiebilanz und Energiedichte schneiden flache Formen der Reihe 6a zukünftig besser ab als hohe aus Reihe 6c. Dies kann damit erklärt werden, dass bei hohem Belegungsgrad zunehmend Teiloberflächen mit geringem Direkt- und hohem Diffusanteil einbezogen werden. Da für horizontale Flächen der sichtbare Himmel größer ist als für senkrechte, empfangen niedrige Formen mehr Diffusstrahlung als hohe Formen mit steilen Flächen.

- Gruppe 7 -

**Jahresenergiebilanz:**

Das Muster entspricht dem Bild der Gruppe 4. Bei der Entwicklung der Rangfolge innerhalb der *Formengruppe* 7 kann man beobachten, dass sich diese für schlechte und gute Parameter kaum ändert. Segmentierte Formen liegen grundsätzlich vor den unsegmentierten Formen. Mit zunehmender Verbesserung der Parameter wandert die Gruppe jedoch von den vorderen auf die hinteren Plätze. Die Formen der Gruppe 7 schneiden durchgängig besser ab als der Referenzwürfel.

Energiedichte:

Das Muster entspricht dem Bild der Gruppe 4. Bezüglich der erzielbaren Energiedichte führen segmentierte Formen grundsätzlich die Rangfolge an, gefolgt von unsegmentierten Dachformen. Den Abschluss bildet immer der Referenzwürfel. Ein höherer Belegungsgrad führt immer zur Verschlechterung der Platzierung.

Zusammenfassung:

Die Tendenz zu segmentierten Formen kann damit erklärt werden, dass diese Formen verschiedene Hüllflächenneigungen aufweisen, während die unsegmentierten oft eine konstante Neigung besitzen. Maximale Diversität der Ausrichtung von potentiellen Empfangsflächen ist jedoch mit zunehmendem Belegungsgrad ein Vorteil. Gleiches gilt für die Orientierungsoptimierung, da segmentierte Formen einen maximalen Optimierungssektor von bis zu 360° besitzen, unsegmentierte Formen aufgrund von Rotationssymmetrien hingegen nur von $<180^\circ$.

15.3 Zusammenfassung

Unter Annahme der zukünftigen und stetigen Verbesserung der Parameter zum Dämmstandard sowie zum solarem Wirkungs- und Belegungsgrad von Gebäudehüllen zeigen sich einheitlich folgende zukünftige Empfehlungstendenzen:

- von konventionellen zu unkonventionellen Formen,
- von kompakten Formen zu solchen mit großer Oberfläche,
- von mittelhohen zu flachen Formen (hohe Formen sind immer ungünstig)
- von symmetrischen zu asymmetrischen, stark segmentierten Formen.

Diese Entwicklungen können unter anderem damit erklärt werden, dass für jeden Standort ab einer bestimmten Parameterkombination der Break-Even-Point überschritten wird, von dem an die Gewinnmaximierungsstrategie gegenüber der Verlustminimierungsstrategie schlagartig in den Vordergrund tritt. Bei guten Parametern zu Dämmung und solarem Wirkungsgrad ist jeder Quadratmeter der Hüllfläche – selbst bei ungünstiger Ausrichtung – eine potentielle Gewinnfläche. Dies wird besonders bei sinkenden Kosten für großflächige solare Energiegewinnung zunehmend interessant. Da kompakte Formen jedoch in Relation zum eingeschlossenen Volumen nur über eine kleine Oberfläche verfügen, führt der Verlust dieser potentiellen Empfangsflächen zukünftig zu schlechteren Ergebnissen in der Rangfolge.

Eine weitere Erklärung der oben genannten Empfehlungstendenzen liegt in der Tatsache, dass bei hohem Belegungsgrad zunehmend Teiloberflächen mit geringem Direkt- und hohem Diffusanteil einbezogen werden. Da für Flächen flacher Neigungswinkel der sichtbare Himmelsdom größer ist als für steile, empfangen flache Formen mehr Diffusstrahlung als hohe, da diese im Vergleich mehr steile statt flach geneigte Oberflächen besitzen.

Auch die Asymmetrie einer Form ist zukünftig vorteilhaft, weil hierdurch unterschiedliche Hüllflächenneigungen bereitstellt werden und sie aufgrund dieser Diversität der Ausrichtung von potentiellen Empfangsflächen mit zunehmendem Belegungsgrad eine deutlich vielseitigere Auswahl vorhält. Durch Vermeidung von Rotationssymmetrien kann zudem der maximale Optimierungssektor von 360° für die Orientierungsoptimierung genutzt werden.

Diese Tendenzen setzen in ihrer Entwicklung immer zunächst in Äquatornähe ein, wo bereits schlechte bis mittlere Parameter diesen Wendepunkt zeigen. Nur für Standorte in Polnähe sind optimale Parameterkonstellationen nötig, um von der gängigen Forderung nach einer kompakten Form abweichen zu können. Die Tendenzen stimmen dabei entlang der drei Achsen zu Belegungs-, Dämm- und Wirkungsgrad grundsätzlich überein. Die Verbesserung jeweils eines der drei Parameter führt somit immer zu einem ähnlichen Ergebnis.

Für Jahresenergiebilanz und Einstrahlungsdichte ergeben sich oft unterschiedliche Aussagen. Die Optimierung der Form auf maximale Einstrahlungsdichte ist dabei zeitlos geometrisch, bezüglich der Jahresenergiebilanz gelten dagegen jeweils temporäre Parameterannahmen.

Kapitel 16

Mathematische Analyse der Gesamtergebnisse

Die aus der graphischen Analyse mittels visueller Auswertung der Farbfilter-Muster resultierenden Ergebnisse legen nahe, dass für bestimmte Formen- und Standortfaktoren direkte mathematisch beschreibbare Zusammenhänge zu Jahresenergiebilanz und solarer Einstrahlungsdichte bestehen. Daher wird im Folgenden eine systematische Prüfung auf mathematisch-funktionale Zusammenhänge durchgeführt zwischen:

- Jahresenergiebilanz
- absoluter und relativer solarer Einstrahlung auf die Gebäudehülle
- geometrischen Größen von Formen wie A/V-Verhältnis, Oberfläche O, Grundfläche G oder O/G-Verhältnis sowie
- thermisch-solaren Größen von Standorten wie Gradtage und Globalstrahlung.

Folgende Übersicht zeigt die untersuchten Paarungen (s. *Tabelle 16.1*):

		Energetische Größen		
		Jahresenergiebilanz E	Absolute Einstrahlung auf die Hülle E_o	Relative Einstrahlung auf die Hülle E_o/E_{glob}
Stand- ortspez. Größen	Gradtage G_t	X		
	Solarangebot/Gradtage E_{glob}/G_t	X		
Form- spezifische Größen	A/V-Verhältnis		X	
	Oberfläche O	X		
	O/G-Verhältnis			X
	Grundfläche G			X

Tabelle 16.1: Übersichtstabelle untersuchter mathematisch-funktionaler Zusammenhänge zwischen standortspezifischen, formspezifischen und energetischen Größen

Für diese Paarungen jeweils zweier Kriterien, für welche ein Zusammenhang zu vermuten ist – wie beispielsweise Gradtage und Jahresenergiebilanz – werden Streudiagramme erstellt. Durch den Schwerpunkt der so entstehenden Punkthaufen werden Regressionsgeraden gelegt, um die Paarung auf lineare Zusammenhänge zu überprüfen.

- Für geometrische Formkriterien erfolgt diese Untersuchung jeweils für möglichst unterschiedliche Städte, um die globale Gültigkeit der gefundenen Beziehungen zu überprüfen. Hierzu werden vom Pol zum Äquator durch mehrere Klimazonen folgende vier Städte gewählt:
 - Station Nord (81°N, EF)
 - Berlin (53°N, Cb)
 - Kairo (30°N, Bh)
 - Singapore (1°N, A)
- Für standortspezifische Faktoren erfolgt die Untersuchung für möglichst unterschiedliche Formen, um die geometrische Allgemeingültigkeit der gefundenen Beziehung zu überprüfen. Hierzu werden folgende sechs Formen ausgewählt:
 - Turm (Nr. 1)
 - Würfel (Nr. 3)
 - Halle (Nr. 5)
 - Scheibe (Nr. 6)
 - Reihe (Nr. 9)
 - Pyramide (Nr. 34).

Mit dieser breiten Auswahl an unterschiedlichsten Standorten und Formen wird beispielhaft eine Auswahl der gefundenen funktionalen Zusammenhänge besprochen.

Es handelt sich im Folgenden jeweils um mathematisch-funktionale Untersuchungen zum Verhältnis:

- von Gradtagen G_t eines Standortes zur Jahresenergiebilanz (für sechs verschiedene Formen)
- vom Quotienten aus Globalstrahlung und Gradtagen E_{Glob} / G_t eines Standortes zur Jahresenergiebilanz (für sechs verschiedene Formen)
- von der Kompaktheit A/V einer Form zur Einstrahlungssumme auf die Oberfläche E_O (für vier verschiedenen Standorte)
- von der Oberfläche O einer Form zur Jahresenergiebilanz (für vier verschiedene Standorte)
- vom Quotienten aus Oberfläche und Grundfläche O/G zum Quotienten aus Einstrahlung auf die Oberfläche zur Globalstrahlung E_O / E_{Glob} (für vier verschiedene Standorte)
- von der Grundfläche G einer Form und dem Quotienten aus Einstrahlung auf die Oberfläche und Globalstrahlung E_O / E_{Glob} (für vier verschiedene Standorte).

16.1 Verhältnis: Gradtage G_t zu Jahresenergiebilanz

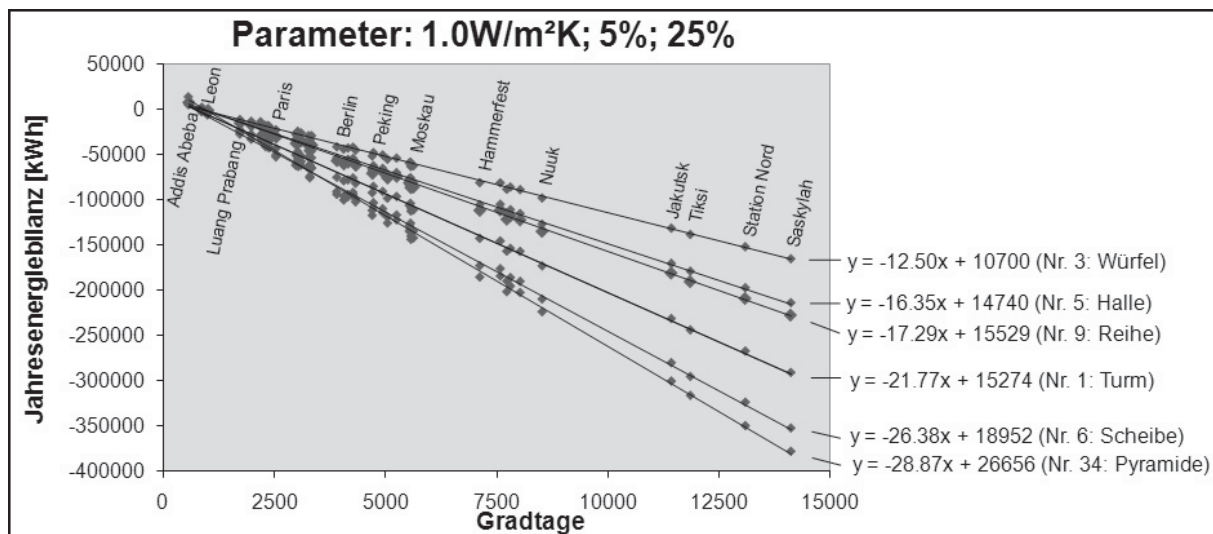


Abbildung 16.1: Funktionaler Zusammenhang zwischen Gradtagen eines Standortes und der erzielbaren Jahresenergiebilanz für sechs verschiedene Formen unter der Parameterkombination schlechter Dämmstandard (1.0W/m²K), schlechter solarer Wirkungsgrad (5%), geringer Belegungsgrad (25%)

(Grafik: eigene)

In *Abbildung 16.1* ist deutlich der funktionale Zusammenhang zwischen der Anzahl der Gradtage G_t an einem Standort und der erzielbaren Jahresenergiebilanz abzulesen. Dabei spielt es keine Rolle, ob die Summe aus Heiz- und/oder Kühlgradtagen gebildet wird. Bei der vorliegenden ungünstigsten Parameterkombination (Dämmung: 1.0W/m²K; solarer Wirkungsgrad: 5%; solar aktivierter Hüllenanteil: 25%) werden für alle Standorte und alle Formen negative Jahresenergiebilanzen erzielt.

Die Schwerpunktlinie des jeweiligen Punkthaufens ergibt eine Gerade der allgemeinen Form $f(x) = -mx + c$. Für jede Gebäudeform gelten jedoch spezifische Funktionen. Für den Würfel ergibt sich beispielsweise die Formel $f(x) = -12.50 \cdot x + 10700$.

Alle Geraden schneiden sich in einem Punkt bei ca. 1.000 Gradtagen, repräsentiert durch den Standort Leon. Unter den hier gegebenen meteorologischen Bedingungen ergibt sich unter Zugrundelegen der gewählten Parameterkombination (1.0W/m²K; 5%; 25%) für jede Form die gleiche ausgeglichene Jahresenergiebilanz, d.h. dass hier mit 25% der Hülle bei einem solaren Wirkungsgrad von 5% genau soviel Energie gewonnen werden kann, wie über 100% der Hülle bei einem Dämmstandard von 1.0 W/m²K verloren geht.

Da diese Aussage auf alle Formen gleichermaßen zutrifft, kann die interessante Schlussfolgerung getroffen werden, dass es an diesem Ort unter der gewählten Parameterkombination nicht relevant ist, welche dreidimensionale Ausformung das Volumen von 1.000 m³ im konkreten Fall besitzt.

Da Form Nr. 3 und Form Nr. 34 das Feld begrenzen und jeweils die Formen mit dem kleinsten bzw. größten A/V-Verhältnis in der Formendatenbank darstellen, deutet dies zunächst auf einen direkten Einfluss des A/V-Verhältnisses auf die Jahresenergiebilanz hin. Die Tatsache jedoch, dass die Graphen von Form Nr. 5 und Form Nr. 6 weit auseinander liegen, obwohl sie das gleiche A/V-Verhältnis besitzen, zeigt, dass dieser Zusammenhang nicht direkt besteht.

Auffällig an der Grafik ist, dass - obwohl über die Gradtage der Standort und damit auch indirekt die Größenordnung der zur Verfügung stehenden solaren Einstrahlung kodiert ist - diese zu keinen Streueffekten in den Punkthaufen führt. Dies bestätigt der Korrelationskoeffizient, welcher ein Maß dafür ist, wie exakt die einzelnen Punkte auf einer Geraden angeordnet sind.

Die Erklärung liegt in diesem Fall bei der gewählten Parameterkombination, welche zu einer Dominanz der thermischen Verluste gegenüber solaren Gewinnen führt. Erst bei gutem solaren Wirkungsgrad (20%) wird das Erscheinungsbild der Punkthaufen diffuser.

16.2 Verhältnis: Globalstrahlung/Gradtage E_{Glob} / G_t zu Jahresenergiebilanz

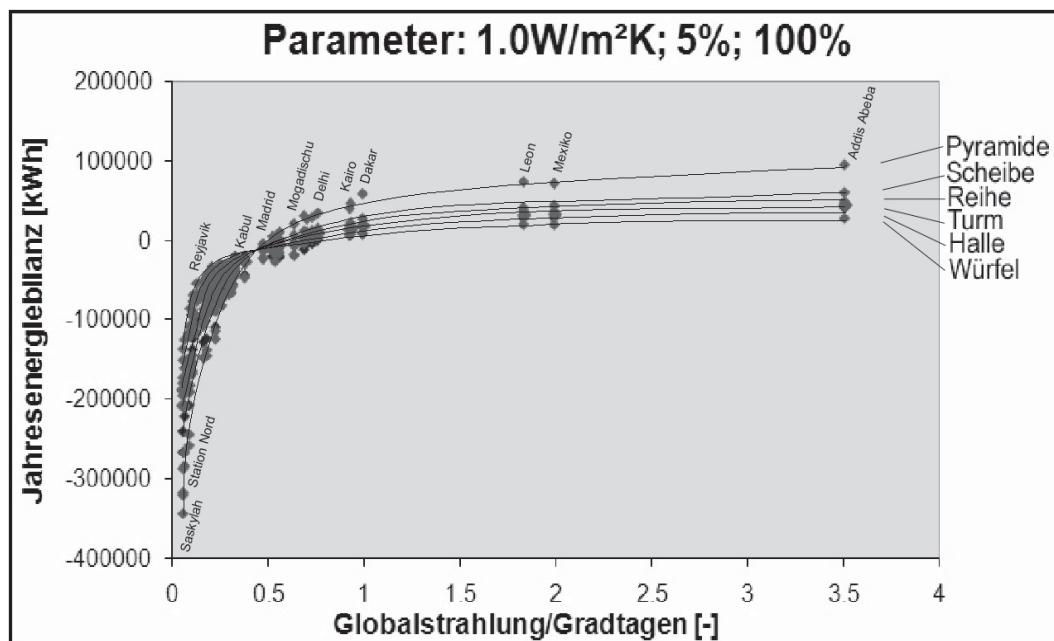


Abbildung 16.2: Funktionaler Zusammenhang zwischen dem Quotienten aus Globalstrahlung und Heizgradtagen eines Standortes und der erzielbaren Jahresenergiebilanz für sechs verschiedene Formen unter der Parameterkombination schlechter Dämmstandard (1.0W/m²K), schlechter solarer Wirkungsgrad (5%), geringer Beleungsgrad (25%)

(Grafik: eigene)

In *Abbildung 16.2* ist das funktionale Verhältnis zwischen dem Quotienten aus Globalstrahlung und Gradtagen E_{Glob} / G_t eines Standortes gegenüber der erzielbaren Jahresenergiebilanz aufgetragen.

Man erkennt ebenfalls eine Kurvenschar, hier mit der allgemeinen Funktion $f(x) = c \cdot x - \frac{1}{mx}$.

Auch für geometrisch sehr verschiedene Formen ergibt sich ein ähnliches Ergebnis. Da die Kurven sehr eng zusammen liegen, kann unabhängig von der tatsächlichen dreidimensionalen Ausbildung der Form die zu erwartende Jahresenergiebilanz hinreichend genau abgeschätzt werden, sofern von einem Standort Globalstrahlung und Gradtage bekannt sind. Dieses Verhältnis aus solarem Angebot und thermischer Last kann als *thermisch-solarer Fingerabdruck* E_{Glob} / G_t eines Ortes bezeichnet werden. Seine Einführung kann somit zur Vereinfachung übersichtlicher Berechnungen empfohlen werden.

Trotz der Gleichförmigkeit der Kurven fällt auf, dass die Quaderförmigen gegenüber der Pyramide eine eigene Gruppe bilden und dass die Pyramide am besten abschneidet. Ihre Empfangsflächen sind nicht nur auf Senkrechte und Horizontale beschränkt, so dass sie mittels differenziert geneigter Teiloberflächen das im thermisch-solaren Fingerabdruck implizierte Strahlungsangebot geometrisch besser nutzen kann.

Auch hier schneiden sich die Kurven der unterschiedlichen Formen in einem Punkt, an dem unabhängig von der Form immer die gleiche Jahresenergiebilanz erzielt wird. Er liegt bei einem Verhältnis von Strahlungsangebot zu thermischer Last E_{Glob} / G_t von ca. 0.5. Interessanter Weise haben große Sprünge im E_{Glob} / G_t -Verhältnis oberhalb dieses Wendepunktes, wie beispielsweise zwischen Addis Abeba ($E_{Glob} / G_t = 3.5$) und Madrid ($E_{Glob} / G_t = 0.5$) nur einen geringen Einfluss auf die Jahresenergiebilanz. Dies gilt insbesondere für quaderförmige Strukturen. Unterhalb des Wendepunktes haben bereits kleine Abweichungen wie z.B. zwischen Reykjavik ($E_{Glob} / G_t = 0.1$) und Saskylah ($E_{Glob} / G_t = 0.05$) großen Einfluss auf die Jahresenergiebilanz.

Während Addis Abeba (9°N) einen besonders günstigen thermisch-solaren Fingerabdruck von 3.505 besitzt, ist dieser für Saskylah (71°N) mit 0.055 besonders ungünstig. Dies ist auf den ersten Blick mit der jeweiligen Breitengradlage zu erklären. In der Abfolge der Städte vom Pol bis zum Äquator fällt jedoch auf, dass das Ergebnis der Stadt Kabul (34°N) – anders als zunächst zu erwarten – zwischen denen von Reykjavik (64°N) und Madrid (40°N) liegt. Eine ähnliche Abweichung zeigt Mogadischu (2°N) vor Delhi (29°) sowie Dakar (15°N) vor Leon (20°N). Dieses Phänomen lässt sich durch die Abhängigkeit des thermisch-solaren Fingerabdruckes von der jeweiligen Klimazone erklären. Obwohl tendenziell Standorte mit zunehmender Nähe zum Äquator über ein größeres Strahlungsangebot, geringeren Heizenergiebedarf und damit einen besseren thermisch-solaren Fingerabdruck verfügen, tritt je nach Klimazone ab einem bestimmten Breitengrad bezüglich des thermisch-solaren Fingerabdrucks ein gegenteiliger Effekt ein. Die thermische Belastung steigt nach einer kontinuierlichen Abnahme des Heizenergiebedarfes vom Pol in Richtung Äquator nach Durchschreiten des Minimums aufgrund eines nun stetig zunehmenden Kühlenergiebedarfes wieder steil an.

Dieser Effekt wird in *Tabelle 16.2* verdeutlicht. Sie zeigt eine Übersicht aller 42 Standorte jeweils in absteigender Sortierung nach:

- thermisch-solarem Fingerabdruck E_{Glob} / G_t
- solarem Angebot (Globalstrahlung auf die Horizontale) E_{Glob}
- thermischer Belastung (Gradtage als Summe der Heiz- und Kühlgradtage) G_t .

Standort	E_{Glob}/G_t	E_{Glob}	G_t
Addis Abeba	3.505	2026	578
Mexiko	1.991	1742	875
León	1.831	1851	1011
Dakar	0.991	2180	2199
Kairo	0.929	1847	1989
Luang Pra-	0.925	1604	1735
Delhi	0.758	1795	2368
Kalkutta	0.728	1684	2312
Damaskus	0.701	1677	2393
Mumbai	0.686	2080	3032
Mogadischu	0.634	1971	3110
Dubai	0.558	1867	3345
Schanghai	0.539	1370	2544
Singapore	0.534	1626	3044
Kathmandu	0.522	1712	3276
Madrid	0.473	1414	2991
Kabul	0.376	1608	4276
Paris	0.326	1079	3306
Peking	0.314	1487	4734
Grand Juncti-	0.307	1519	4942
Chicago	0.304	1267	4164
Baotou	0.294	1547	5254
Toronto	0.276	1195	4334
Xining	0.258	1434	5566
Berlin	0.247	967	3911
Saratov	0.224	1241	5540
Lhasa	0.223	1695	7583
Kalvåg	0.204	831	4067
Bergen	0.186	875	4707
Oslo	0.185	933	5049
Murgob	0.178	1388	7811
Moskau	0.169	943	5576
Hailar	0.161	1290	8028
Helsinki	0.160	904	5632
Reykjavík	0.125	695	5575
Hammerfest	0.106	754	7121
Haines	0.104	804	7729
Nuuk	0.091	775	8522
Jakutsk	0.086	986	11424
Tiksi	0.062	737	11851
Station Nord	0.055	718	13086
Saskylah	0.055	770	14109

Standort	E_{Glob}
Dakar	2180
Mumbai	2080
Addis Abeba	2026
Mogadischu	1971
Dubai	1867
León	1851
Kairo	1847
Delhi	1795
Mexiko	1742
Kathmandu	1712
Lhasa	1695
Kalkutta	1684
Damaskus	1677
Singapore	1626
Kabul	1608
Luang Pra-	1604
Baotou	1547
Grand Juncti-	1519
Peking	1487
Xining	1434
Madrid	1414
Murgob	1388
Schanghai	1370
Hailar	1290
Chicago	1267
Saratov	1241
Toronto	1195
Paris	1079
Jakutsk	986
Berlin	967
Moskau	943
Oslo	933
Helsinki	904
Bergen	875
Kalvåg	831
Haines	804
Nuuk	775
Saskylah	770
Hammerfest	754
Tiksi	737
Station Nord	718
Reykjavík	695

Standort	G_t
Addis Abeba	578
Mexiko	875
León	1011
Luang Pra-	1735
Kairo	1989
Dakar	2199
Kalkutta	2312
Delhi	2368
Damaskus	2393
Schanghai	2544
Madrid	2991
Mumbai	3032
Singapore	3044
Mogadischu	3110
Kathmandu	3276
Paris	3306
Dubai	3345
Berlin	3911
Kalvåg	4067
Chicago	4164
Kabul	4276
Toronto	4334
Bergen	4707
Peking	4734
Grand Juncti-	4942
Oslo	5049
Baotou	5254
Saratov	5540
Xining	5566
Reykjavík	5575
Moskau	5576
Helsinki	5632
Hammerfest	7121
Lhasa	7583
Haines	7729
Murgob	7811
Hailar	8028
Nuuk	8522
Jakutsk	11424
Tiksi	11851
Station Nord	13086
Saskylah	14109

Tabelle 16.2: Listen aller 42 Standorte, jeweils sortiert nach thermisch-solarem Fingerabdruck E_{Glob}/G_t , Globalstrahlungsangebot E_{Glob} und Gradtagen G_t

(Quelle: eigene, Datenbasis: NASA (2006))

Vergleicht man beispielsweise die Städte Kabul und Madrid, stellt sich heraus, dass beide über ein vergleichbares solares Angebot von 1.608 bzw. 1.414 kWh/m²a verfügen, in Kabul mit 4.276 Gradtagen die Gebäudehülle thermisch deutlich mehr belastet wird als in Madrid mit einer Summe von 2.991 Heiz- und Kühlgradtagen. Dies hat trotz vordergründig besserer Breitengradlage Kabuls (34°N gegenüber 40°N) einen negativen Effekt auf den thermisch-solaren Fingerabdruck und damit auch auf die Jahresenergiebilanz zur Folge.

Der thermisch-solare Fingerabdruck ist somit eine Kennzahl, welche das an einem Ort herrschende Wechselspiel zwischen thermischer Belastung der Gebäudehülle durch die Außenlufttemperatur und solarem Angebot in prägnanter Weise abbildet und eine einfache Prognose der zu erwartenden Jahresenergiebilanz ermöglicht. Der thermisch-solare Fingerabdruck kodiert somit Informationen, welche über jene hinausgehen, die sich aus der geographischen Breitengradlage ablesen lassen, und beinhaltet sogar standortspezifische Details.

Für Reykjavik auf 64°N mit 5.575 Gradtagen gilt beispielsweise die Besonderheit, dass es zwar aufgrund seiner Lage am Golfstrom in Bezug auf seine Breitengradlage vergleichsweise nur geringe thermische Lasten hat (vgl. Jakutsk 62° mit 11.424 Gradtagen), dafür aber mit einer Globalstrahlung von nur 695 kWh/m²a über das geringste solare Angebot verfügt (vgl. Jakutsk 986 kWh/m²a). Daher verfügt es über einen schlechteren thermisch-solaren Fingerabdruck als andere Städte dieser Breite (vgl. Reykjavik 0.125 gegenüber Kalvag 0.204).

16.3 Verhältnis: Kompaktheit A/V zur Einstrahlung auf die Oberfläche E_o

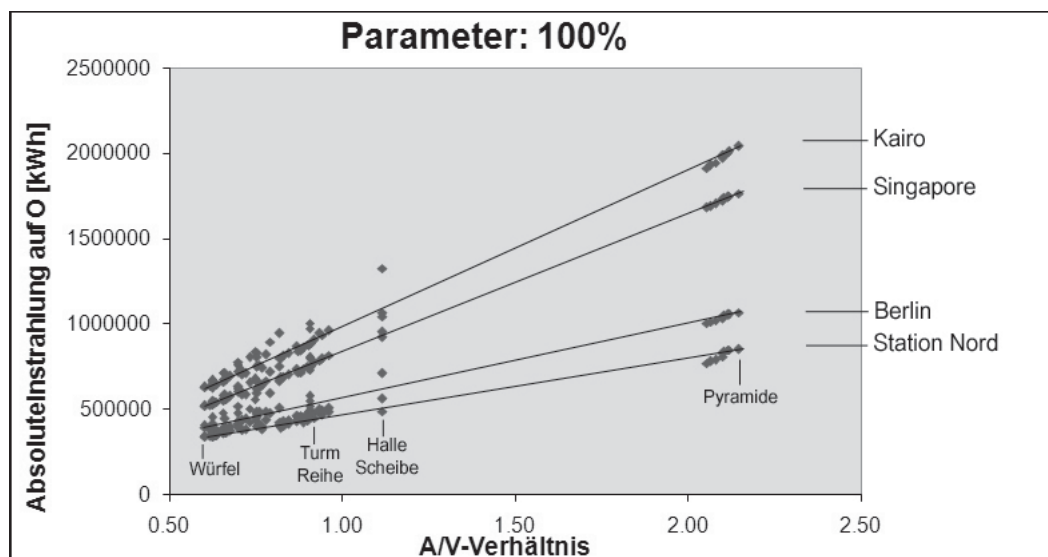


Abbildung 16.3: Funktionaler Zusammenhang zwischen der durch das A/V-Verhältnis repräsentierten Kompaktheit einer Form und erzielbarer Gesamteinstrahlung auf die Gebäudeoberfläche für vier verschiedene Städte bei einem Belegungsgrad von 100%

(Grafik: eigene)

In *Abbildung 16.3* ist der lineare Zusammenhang zwischen der Kompaktheit A/V einer Form und der Einstrahlung auf ihre Oberfläche E_O dargestellt. Es ergeben sich Geraden der allgemeinen Funktion $f(x) = mx + c$.

In ihrer Verlängerung würden sich die Geraden in einem Punkt schneiden. Dieser ist jedoch ein rein theoretischer Wert, da er in der Praxis nicht realisierbar ist. Er setzt nämlich ein unerreichbar kleines A/V -Verhältnis vor, welches noch unterhalb des - bei einem Ausgangsvolumen von 1.000 m^3 - kleinstmöglichen erzielbaren A/V -Verhältnis einer Kugel von 0.48 läge.

Die Grafik zeigt für abnehmende Kompaktheit eine Zunahme des Strahlungsempfanges. Die schlechtesten Einstrahlungswerte erzielt der Würfel (Nr. 3), die besten die Pyramide (Nr. 34).

Obwohl die Stadt Singapore aufgrund ihrer Nähe zum Äquator über die günstigste Einstrahlungsgeometrie verfügt, wird sie von Kairo übertroffen. Dies kann mit den für Kairo höheren Werten zur Globalstrahlung begründet werden. Diese Abweichung hängt wiederum mit dem unterschiedlichen Verhalten des Clearness Index an beiden Standorten zusammen. Erwartungsgemäß schneidet Station Nord aufgrund seiner strahlungsgeometrisch ungünstigen Lage in Polnähe am schlechtesten ab.

16.4 Verhältnis: Oberfläche O zur Jahresenergiebilanz

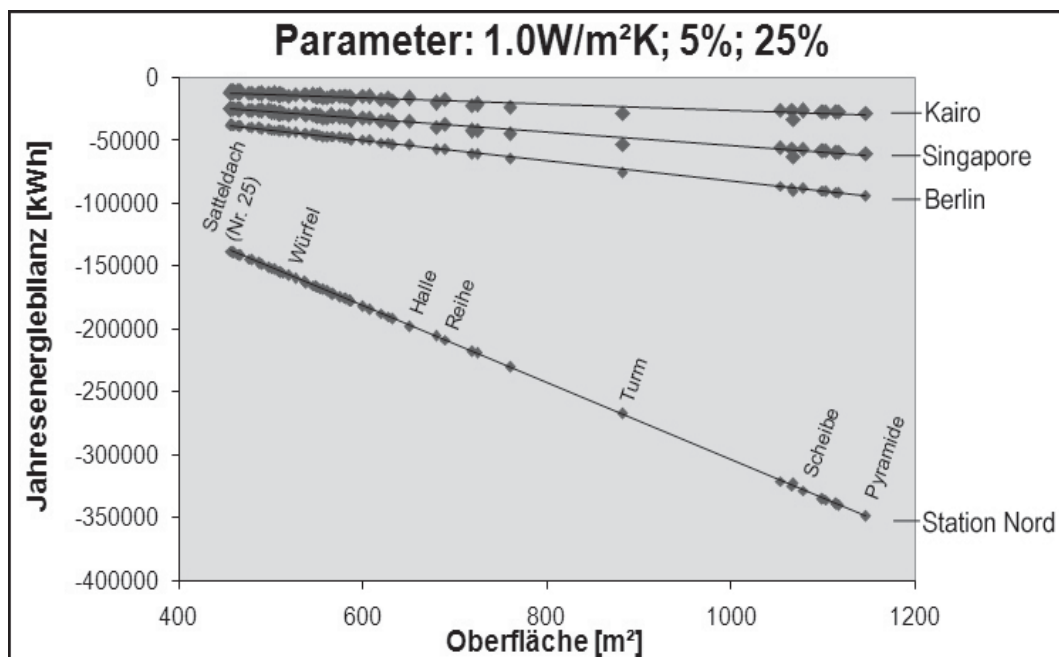


Abbildung 16.4: Funktionaler Zusammenhang zwischen der Größe der Oberfläche einer Form und der erzielbaren Jahresenergiebilanz für vier verschiedene Städte unter der Parameterkombination schlechter Dämmstandard ($1.0 \text{ W/m}^2\text{K}$), schlechter solarer Wirkungsgrad (5%), geringer Belegungsgrad (25%)

(Grafik: eigene)

Die in *Abbildung 16.4* dargestellte lineare Beziehung zwischen der luftberührten Oberfläche O eines Gebäudes und der Jahresenergiebilanz zeigt eine Kurvenschar der allgemeinen Funktion $f(x) = -mx + c$. Auch hier existiert ein theoretischer Schnittpunkt aller Graphen, welcher jedoch bei einem Grundvolumen von 1.000 m^3 außerhalb der geometrischen Realisierbarkeit liegt.

Aufgrund der Parameterkombination aus jeweils ungünstigsten Werten, ist die Vergrößerung der Oberfläche immer auch mit größeren Verlusten verbunden. Allerdings weist nur der extreme Standort Station Nord eine stark abfallende Gerade auf, während die übrigen Städte nahezu horizontale Geraden besitzen. Eine leichte Verbesserung mindestens eines der Parameter würde bereits zum stetigen Ansteigen der Graphen führen. Dies würde dann bedeuten, dass von nun an eine Oberflächenvergrößerung grundsätzlich auch mit einer Verbesserung der Jahresenergiebilanz einher gehen würde.

Der in *Abschnitt 3.6* besprochene Break-Even-Point als Wendepunkt des abrupten Umschlagens von der Verlustminimierungs- zur Gewinnmaximierungsstrategie wäre somit in dem Fall für einen Standort erreicht, wenn die Gerade exakt horizontal verlaufen würde.

16.5 Verhältnis: Ober-/Grundfläche O/G zu Einstrahlung Oberfl./Globalstrahlung E_O / E_{Glob}

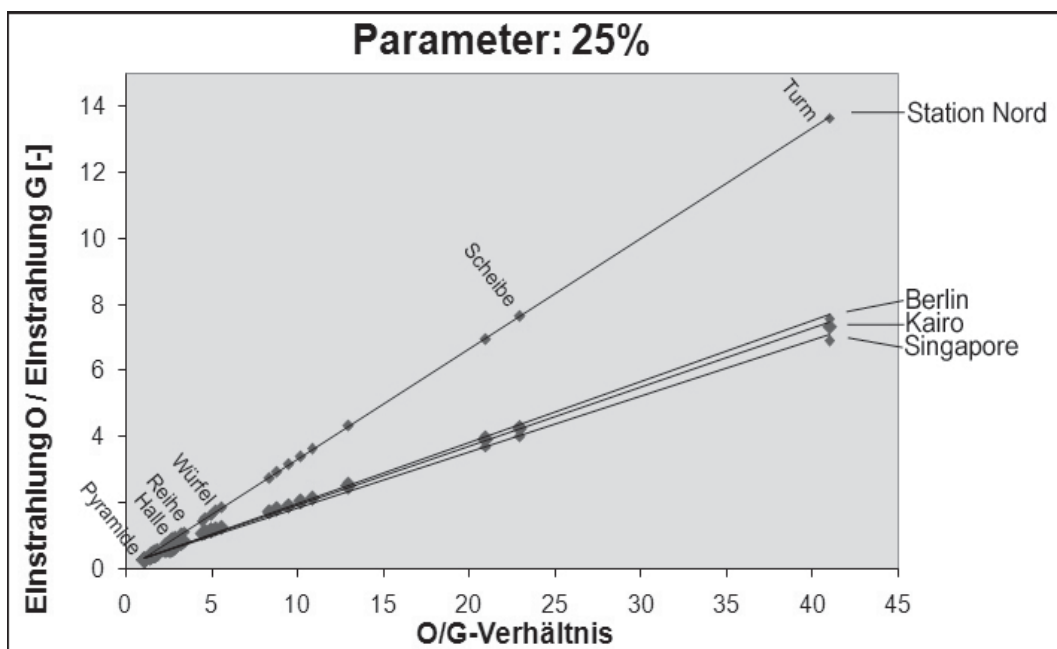


Abbildung 16.5: Funktionaler Zusammenhang zwischen dem Quotienten aus Oberfläche und Grundfläche einer Gebäudeform und dem Quotienten aus Einstrahlung auf die Oberfläche zur Globalstrahlung bei einem Belegungsgrad von 25%

(Grafik: eigene)

Abbildung 16.5 zeigt den funktionalen Zusammenhang, welcher zwischen der geometrischen Größe des Quotienten aus luftberührter Oberfläche und erdberührter Grundfläche O/G zu dem Quotienten aus der Einstrahlung auf die betrachteten besten 25% der Hülle und der Globalstrahlung auf die Horizontale E_O / E_{Glob} besteht.

Standortspezifisch ergeben sich Geraden der allgemeinen Funktion $f(x) = mx + c$, welche sich in der Nähe des Koordinatenursprungs treffen. An diesem Punkt ist es für die betreffende Form irrelevant, an welchem Standort sie konkret steht.

Beim Betrachten der Graphik fällt das abweichende Verhalten von Station Nord gegenüber den anderen Standorten auf.

Die Geraden für Berlin, Kairo und Singapore liegen dagegen sehr eng beieinander. Dies ist erstaunlich, da sich diese Städte auf verschiedenen Breitengraden und zudem in sehr verschiedenen Klimazonen befinden. Sie unterscheiden sich untereinander stark in Bezug auf jeweils vorherrschende Strahlungsgeometrien im Tages- und Jahresverlauf, Einfallswinkel sowie Bewölkung und Clearness Index. Dies führt zu großen Abweichungen bezüglich der standortspezifischen Globalstrahlung sowohl hinsichtlich der Quantität der zur Verfügung stehenden Strahlung, als auch hinsichtlich der Qualität, also der Aufteilung in einen Direkt-, Diffus- und reflektierten Anteil. Aus diesen Abweichungen resultieren je Standort sehr unterschiedliche Verteilungsmuster der Einstrahlrichtungen und somit des Strahlungsdiagramms.

Das abweichende Verhalten von Station Nord lässt sich jedoch damit erklären, dass ein Gebäude hier bezüglich der Einstrahlung am meisten von einer gegenüber der Grundfläche vergrößerten Oberfläche profitiert. Dies kann damit begründet werden, dass Station Nord in Polnähe nur über sehr flache Einstrahlwinkel für die auf der Horizontalen gemessenen Globalstrahlung verfügt. Jegliche dreidimensionale Ausformung in Gestalt einer Gebäudehülle über dieser horizontalen Grundfläche bedeutet hier automatisch immer auch eine Optimierung der Einstrahlungsgeometrie auf die Empfangsfläche. Daher ist es nicht verwunderlich, dass der Turm besonders gut abschneidet. Für die äquatornahe Stadt Singapore, welche über eine ganzjährig nahezu senkrechte Einstrahlung verfügt, gilt der Vorteil der gegenüber der Grundfläche vergrößerten Oberfläche dagegen nur in eingeschränktem Maße.

Die Graphik zeigt, dass die konkrete dreidimensionale Form großen Einfluss auf das Einstrahlungsverhältnis hat, dass sich jedoch alle Formen gemäß ihres O/G -Verhältnisses - also dem Verhältnis aus luftberührtem zu erdberührtem Hüllflächenanteil – auf einer standortspezifischen Geraden anordnen. Ist also für einen konkreten Standort diese Gerade bekannt, kann die Einstrahlung auf die geeignetsten 25% der Gebäudehülle auf einfache Weise überschläglich bestimmt werden, sofern von der Form die Größe von Oberfläche und überbauter Grundfläche bekannt ist sowie die Globalstrahlung auf die Horizontale am jeweiligen Standort. Da die Lage einer Form auf der standortspezifischen Geraden über ihr O/G -Verhältnis bestimmt wird, kann somit über die Geradengleichung die Einstrahlung auf die Oberfläche aus diesen wenigen Angaben, welche bereits in der frühen Planungsphase bekannt sind, mit vergleichsweise geringem Aufwand berechnet werden.

16.6 Verhältnis: Grundfläche G zu Einstrahlung Oberfläche/Globalstrahlung E_O / E_{Glob}

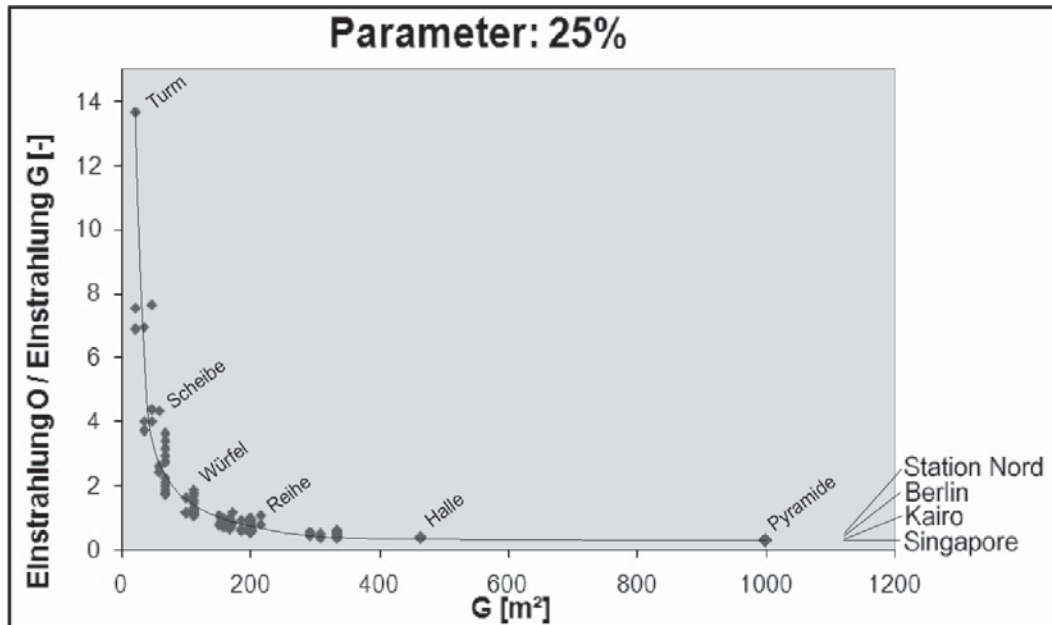


Abbildung 16.6: Funktionaler Zusammenhang zwischen der Größe der Grundrissfläche einer Form zum Quotienten aus Einstrahlung auf die Oberfläche zur Globalstrahlung bei einem Belegungsgrad von 25%

(Grafik: eigene)

Der funktionale Zusammenhang zwischen der Grundfläche G einer Form und dem Quotienten aus Einstrahlung auf die Gebäudehülle und Globalstrahlung auf die Horizontale E_O / E_{Glob} ist in *Abbildung 16.6* gezeigt.

Interessanterweise liegen die asymptotischen Kurven für die vier unterschiedlichen Standorte nahezu deckungsgleich übereinander.

Die Funktion hat die allgemeine Formel $f(x) = \frac{1}{x}$, welche der Umkehrfunktion entspricht.

Der Graph zeigt, dass Formen mit kleiner Grundfläche eine deutlich größere Verbesserung der Einstrahlung auf ihre Oberfläche - gemessen an der Einstrahlung auf die Horizontale - erzielen können als Formen mit großen Grundflächen.

Dementsprechend nimmt der Turm den höchsten Wert ein, während die Pyramide den niedrigsten Wert aufweist. Der hohe Turm profitiert bei dieser Darstellung von seiner minimierten Grundfläche gegenüber der flächenintensiven niedrigen Pyramide. Der Turm entspricht somit am besten der in *Abbildung 3.4* in Anlehnung an die Photosynthese beschriebenen an Solararchitektur gestellten Anforderung nach relativer Oberflächenvergrößerung.

Kapitel 17

Vertiefende Einzelstudien

17.1 Standortstudie

In der Standortstudie werden die unterschiedlichen standortspezifischen Einflüsse untersucht, insbesondere ihre Bedeutung für die räumliche und zeitliche Verteilung solarer Strahlung.

Das Ziel der Standortanalyse liegt darin, die einzelnen Ergebnisse der Formenrankings besser analysieren und auf Basis der meteorologischen Gegebenheiten erklären zu können.

Im Folgenden werden zwei klimatisch extreme Standorte der Standortmatrix (s. *Anhang G*) miteinander verglichen. Es handelt sich um die Standorte:

- Station Nord in Grönland auf 81.5°N
- Dakar im Senegal auf 14,5° N.

Die Gegenüberstellung erfolgt für folgende meteorologischen Aspekte:

- Jahresverlauf von Lufttemperatur und Niederschlag (Klimadiagramme)
- Jahresverlauf der Heiz- und Kühlgradtage
- Jahresverlauf der Transmissionsverluste
- Jahresverlauf von Bewölkung, Clearness Index und Albedo
- Jahresverlauf von Extraterrestrischer, Global-, Direkt- und Diffusstrahlung
- Tagesverlauf von Bewölkung und Clearness Index
- Tagesverlauf von Extraterrestrischer, Global-, Direkt- und Diffusstrahlung
- Orientierungsabhängige optimale Neigungswinkel von Empfangsflächen
- Jahresverlauf der monatlichen Energiebilanzen
- Jahressumme der Energiebilanzen.

17.1.1 Klimadiagramme

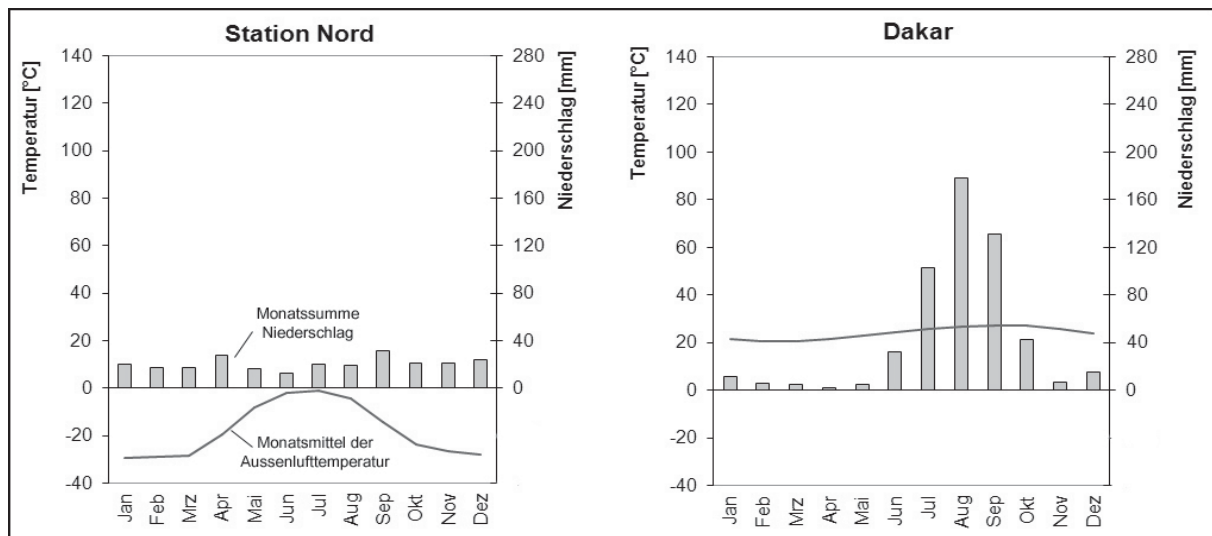


Abbildung 17.1: Klimadiagramme mit Angaben zu monatsmittlerer Lufttemperatur und Monatssumme des Niederschlages für Station Nord und Dakar

(Grafik: eigene; Datenquelle: NASA (2006))

Station Nord liegt in der Klimazone Polar Frost (EF). Wie in *Abbildung 17.1* zu sehen gibt es keinen Monat mit einer mittleren Lufttemperatur oberhalb von 0°C. Dakar liegt in heiß-aridem Klima (Bh), die Jahresmitteltemperatur liegt über 18°C, die meisten Monate sind arid, unterbrochen von einer Regenzeit im Spätsommer.

17.1.2 Jahresverlauf Heiz- und Kühlgradtage

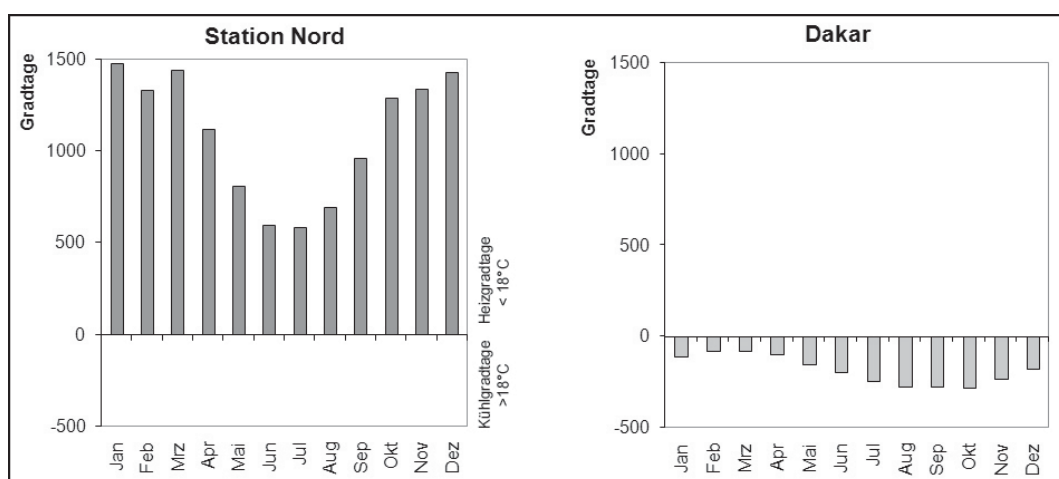


Abbildung 17.2: Diagramme der Monatssummen für Heiz- und Kühlgradtage für Station Nord und Dakar

(Grafik: eigene; Datenquelle: NASA (2006))

Aus den stündlichen Werten der Lufttemperatur lassen sich für Station Nord ca. 13.100 Heizgradtage und für Dakar ca. 2.200 Kühlgradtage errechnen. Die Werte unterscheiden sich stark in ihrer absoluten Summe, ihrem Vorzeichen, aber auch hinsichtlich ihrer Jahresverteilung wie in *Abbildung 17.2* zu sehen.

17.1.3 Jahresverlauf Transmissionsverluste

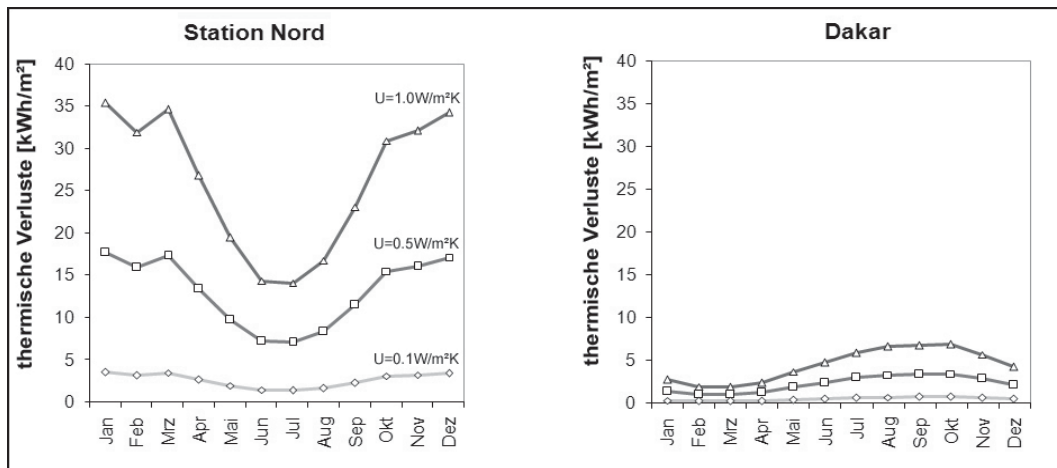


Abbildung 17.3: Diagramme der Jahreskurven der aus den monatlichen Heiz- und Kühlgradtagen berechneter Transmissionsverluste für drei verschiedene Wärmedurchgangskoeffizienten

(Grafik: eigene; Datenquelle: NASA (2006); Berechnungen: eigene)

Über die Heiz- und Kühlgradtage lassen sich die Transmissionsverluste je Quadratmeter Oberfläche der Gebäudehülle berechnen (s. *Abbildung 17.3*). Hierzu werden die drei verschiedenen in 6.3 vorgestellten Dämmstandards in die in *Kapitel 8* entwickelte Formel eingesetzt und die Werte für jeden Monat einzeln berechnet. Bei Station Nord sieht man einen winterlichen Heizbedarf, bei Dakar einen spätsommerlichen Kühlbedarf. Der Heizbedarf für Station Nord ist dabei deutlich größer als der Kühlbedarf in Dakar. Dies liegt an der größeren Abweichung der Außenlufttemperatur von der Innenraumzieltemperatur von 18°C. Für Station Nord ergibt sich bei ca. -30°C Lufttemperatur eine Differenz zur Innenraumzieltemperatur von insgesamt 48°C. Demgegenüber muß in Dakar bei ca. 25°C Außenlufttemperatur die Luft nur um 7° abgekühlt werden. Obwohl, wie in *Abschnitt 7.4* erläutert, der energetische und technische Aufwand zum Kühlen höher ist als zum Heizen, dominiert beim Vergleich dieser beiden Standorte der Heizenergiebedarf. Die mit hohem Energieeinsatz zu überwindenden klimatischen Bedingungen in Station Nord sind extremer als in Dakar. Für Dakar muß jedoch berücksichtigt werden, dass die angegebene monatsmittlere Lufttemperatur im Tagesverlauf stark schwankt und ebenfalls extreme Werte einnehmen kann. Der Kühlbedarf ist somit wiederum unterschätzt. Für beide Klimate gilt, je besser der Dämmstandard, desto geringer die jahreszeitliche Ausprägung der Kurvenminima und -maxima.

17.1.4 Jahresverlauf Albedo, Bewölkung und Clearness Index

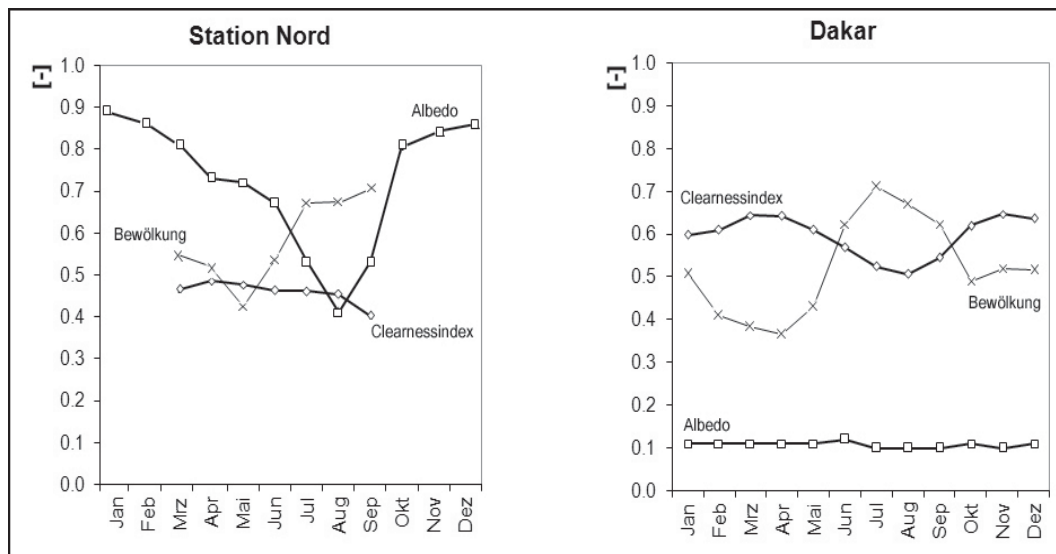


Abbildung 17.4: Diagramme der Jahreskurven für Boden-Albedo, Bewölkungsgrad und Clearness Index für Station Nord und Dakar

(Grafik: eigene; Datenquelle: NASA (2006))

Wie in *Abbildung 17.4* zu sehen ist, liegt in Station Nord die Kurve der Albedo, welche den Rückstrahlungswert der Erdoberfläche beschreibt und damit den Teil der reflektierten Strahlung beeinflusst, insgesamt sehr hoch. In den Wintermonaten werden Werte über 0.8 erreicht, was bedeutet, dass 80% der auf den Boden treffenden Energie reflektiert wird und als Rückstrahlung auf die Gebäudefassade treffen kann. Die hohe Albedo entsteht durch die hellen Schnee- und Eisoberflächen, welche ausschließlich in den Sommermonaten - in der Grafik Juli bis September - teilweise auftauen.

Für Bewölkung und Clearness Index existieren nur für die Monate März bis September gemessene Werte. Dies liegt daran, dass im Winterhalbjahr nördlich des Polarkreises ewige Polarnacht herrscht. Da es dort dann keine solare Strahlung gibt, wird weder Clearness Index noch Bewölkungsgrad gemessen. Der Clearness Index beschreibt, wie groß der Anteil der Extraterrestrischen Strahlung ist, der als Globalstrahlung nach dem Atmosphärendurchgang die Erdoberfläche erreicht. Für Station Nord gelten Werte um 40%. Der Clearness Index beschreibt also den Reinheits- bzw. Trübungsgrad der Atmosphäre und beeinflusst somit auch das Verhältnis von Direkt- zu Diffusanteil als Komponenten der Globalstrahlung. Über Station Nord steht die Sonne nie sehr hoch, so dass aufgrund des flachen Einfallswinkels der Weg durch die Atmosphäre entsprechend länger ist. Somit kann ein Großteil der Strahlung beim Atmosphärendurchgang absorbiert oder ins All zurückreflektiert werden.

Im schneelosen Dakar liegt die Albedo ganzjährig bei niedrigen 10%. Die Bewölkung nimmt zur Regenzeit im Spätsommer von 40% auf 70% stark zu.

In beiden Diagrammen erkennt man deutlich die Gegenläufigkeit von Bewölkung und Clearness Index. So nimmt in Dakar der Clearness Index in der spätsommerlichen entgegengesetzt zur Zunahme der Bewölkung ab.

17.1.5 Jahresverlauf Extraterrestrische, Global-, Direkt- und Diffusstrahlung

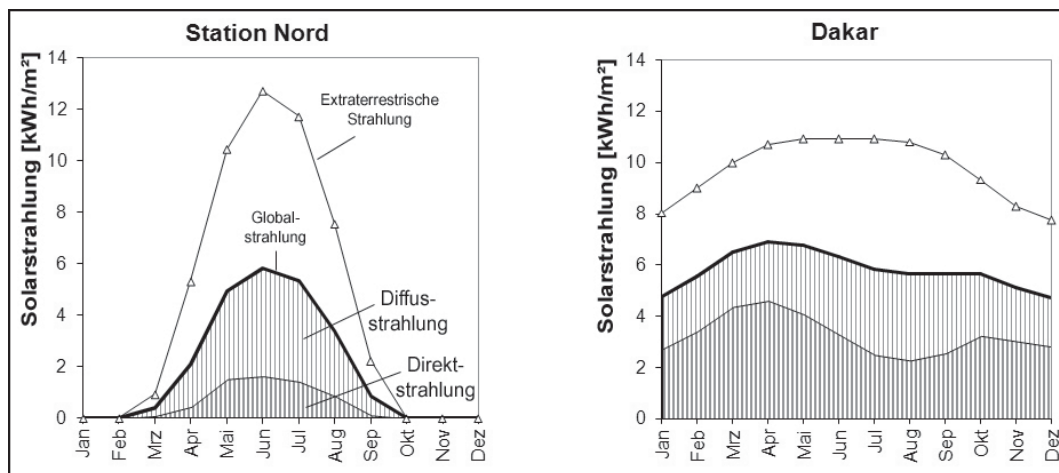


Abbildung 17.5: Diagramme der Jahreskurven für Extraterrestrische Strahlung, Globalstrahlung, Direktstrahlung und Diffusstrahlung für Station Nord und Dakar

(Grafik: eigene; Datenquelle: NASA (2006); Berechnungen: eigene)

In *Abbildung 17.5* ist zu sehen, dass Station Nord für die Extraterrestrische Strahlung eine steile, schmale Kurve ohne Strahlungsangebot in den Wintermonaten zeigt. Dies ist wieder auf das Phänomen von Polartag und -nacht nördlich des Polarkreises zurückzuführen.

Die Differenz zwischen Extraterrestrischer Strahlung und Globalstrahlung entspricht dem durch die Atmosphäre herausgefilterte Strahlungsanteil. Dieser ist hier relativ hoch. Innerhalb der Globalstrahlung ist wiederum der Anteil der Direktstrahlung relativ gering – eine indirekte Folge des niedrigen Clearness Index und hohen Bewölkungsgrades. Der positive Einfluss der hohen Albedo zeigt sich hier nicht, da die Werte für die Horizontale gemessen werden, welche aus geometrischen Gründen keine Rückstrahlung vom Boden empfangen kann.

Dakar zeigt für die Extraterrestrische Strahlung eine flache Kurve mit einem ganzjährigen Strahlungsangebot. Die Verteilung zeigt den für die Nordhalbkugel typischen Jahresgang bestehend aus einem sommerlichen Maximum und einem winterlichen Minimum. Da Dakar allerdings bereits südlich des nördlichen Wendekreises in Äquatornähe liegt, ist das sommerliche Maximum der Extraterrestrischen Strahlung jedoch nicht sehr ausgeprägt, sondern zeigt eher ein breiteres Plateau in den Monaten Mai, Juni und Juli. Vom großen und beständigen Angebot der Extraterrestrischen Strahlung erreicht nach dem Atmosphärendurchgang ein im Vergleich zu Station Nord deutlich größerer Anteil als Globalstrahlung die Erdoberfläche. Der Direktstrahlungsanteil ist dabei vergleichsweise hoch – als Folge eines hohen

Clearness Index bei niedrigem Bewölkungsgrad. Interessant ist hierbei die deutliche Einwirkung des während der Regenzeit im Spätsommer reduzierten Clearness Index auf die Kurve der Direktstrahlung. Der eingeknickte Kurvenverlauf des Clearness Index zeichnet sich parallel in der Direktstrahlungskurve und damit auch in der Globalstrahlungskurve ab.

Ein spannendes Detail ist die Tatsache, dass Station Nord im Mai, Juni und Juli (also den Monaten um die Sommersonnenwende) sogar mehr Extraterrestrische Strahlung empfängt als Dakar. Dies liegt zum einen daran, dass sich der ungünstige Einfallswinkel für Station Nord aufgrund der im Sommer für die Nordhalbkugel günstigen Neigung der Erdachse verbessert, aber vor allem daran, dass die Strahlung im Sommer 24 Stunden durchgängig zur Verfügung steht und somit große Tages- bzw. Monatssummen entstehen. Aus diesem Grund erreicht im Juni Station Nord im Laufe eines Tages sogar mehr Globalstrahlung als Dakar.

Insgesamt ist die Jahressumme der Globalstrahlung, also das Integral unterhalb der Globalstrahlungskurve, in Station Nord jedoch deutlich geringer als in Dakar.

17.1.6 Tagesverlauf Bewölkung und Clearness Index

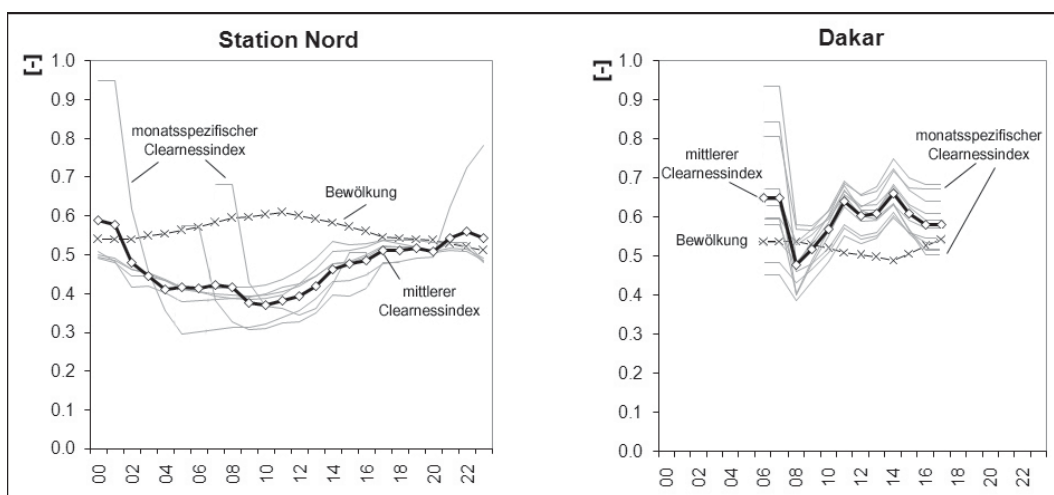


Abbildung 17.6: Diagramme der Tageskurven für Bewölkungsgrad und Clearness Index für Station Nord und Dakar

(Grafik: eigene; Datenquelle: NASA (2006))

Im Tagesverlauf wird die Albedo nicht betrachtet, da sie über einen Tag als konstant angenommen wird. Für Bewölkung und Clearness Index ist jedoch deutlich ein tageszeitabhängiges Verhalten zu erkennen.

In *Abbildung 17.6* sind für jeden Monat des Jahres die gemittelten Tagesverläufe als feine graue Linien aufgetragen. Die dickere schwarze Linie beschreibt den aus diesen Einzelkurven über das Jahr gemittelten Tagesverlauf des Clearness Index. Die gestrichelte schwarze Linie beschreibt den über das Jahr gemittelten Tagesgang der Bewölkung.

Für Station Nord zeigt die Graphik Werte für jede Stunde des Tages, also auch für die Nachtstunden. Dies resultiert aus dem Phänomen, dass nördlich des Polarkreises in den Sommermonaten die Sonne nicht untergeht. Tendenziell nimmt die Bewölkung gegen Mittag zu, woraus eine mittägliche Reduktion des Clearness Index folgt. Das Tagesmaximum des Clearness Index liegt bei Mitternacht.

Für Dakar existieren nur Werte von 6 bis 18 Uhr, da die Tage hier ganzjährig eine konstante Länge von 12 Stunden haben. Alle Monatskurven zeigen einen deutlich parallelen und damit ortstypischen Verlauf. Der übers Jahr gemittelte Clearness Index bewegt sich innerhalb einer engen Kurvenschar ähnlicher Verläufe. Auch hier ist die Gegenläufigkeit von Bewölkung und Clearness Index zu beobachten.

In beiden Orten zeigen einige der hellgrauen Monatskurven zum jeweiligen Sonnenauf- oder -untergang einen deutlichen Sprung. Dies kann mit dem Phänomen des *Civil Twilight* erklärt werden. Zum Tagesanbruch dämmt es, so dass bereits Strahlung auf der Erdoberfläche gemessen werden kann, obwohl zu diesem Zeitpunkt die Berechnung der Extraterrestrischen Strahlung noch keine Werte größer Null ergibt. Dies liegt daran, dass sich die Sonne zum Zeitpunkt des *Civil Twilight* noch etwa 6° unterhalb des Horizontes befindet. Aufgrund von Brechungsvorgängen in der Atmosphäre erreicht uns zu diesem Zeitpunkt aber bereits Diffusstrahlung, obwohl die Sonne in Bezug auf die Erdkrümmung rein geometrisch noch nicht im richtigen Einstrahlwinkel zum Standort steht. Da der Clearness Index jedoch in Abhängigkeit von Extraterrestrischer Strahlung und Globalstrahlung berechnet wird, ergibt sich zu diesen Randstunden der Dämmerung ein mathematisch unsauberer Term mit Null als Divisor. Die Korrektur führt zu den im Diagramm sichtbaren Sprüngen des Clearness Index.

17.1.7 Tagesverlauf Extraterrestrische, Global-, Direkt- und Diffusstrahlung

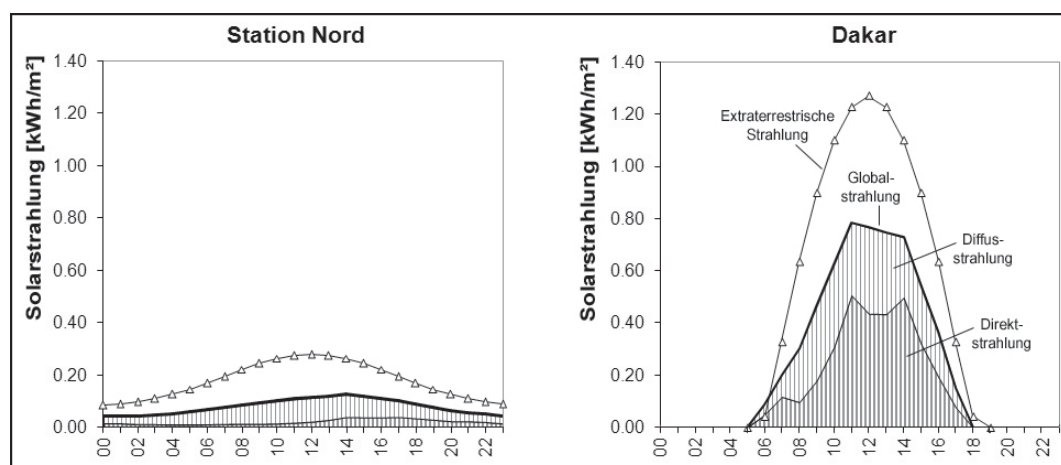


Abbildung 17.7: Diagramme der Tageskurven für Extraterrestrische Strahlung, Globalstrahlung, Direktstrahlung und Diffusstrahlung für Station Nord und Dakar

(Grafik: eigene; Datenquelle: NASA (2006); Berechnungen: eigene)

Auch der Tagesverlauf solarer Strahlung kann aus dem Tagesverlauf des Clearness Index berechnet werden.

Für Station Nord sieht man in *Abbildung 17.7* eine ganztägige sehr flache Kurve. Die Globalstrahlung beträgt nur etwa die Hälfte des Extraterrestrischen Strahlungsangebotes. Der Direktstrahlungsanteil ist sehr gering mit einem zum Tagesverlauf des Clearness Index analogen Maximum am Abend.

In Dakar zeigt die Extraterrestrische Strahlung im Tagesverlauf eine hohe schmale Kurve, von der ein Großteil als Globalstrahlung die Erdoberfläche erreicht. Der Direktstrahlungsanteil ist hoch und folgt den mittäglichen Schwankungen des Clearness Index.

17.1.8 Orientierungsabhängige optimale Neigung der Empfangsflächen

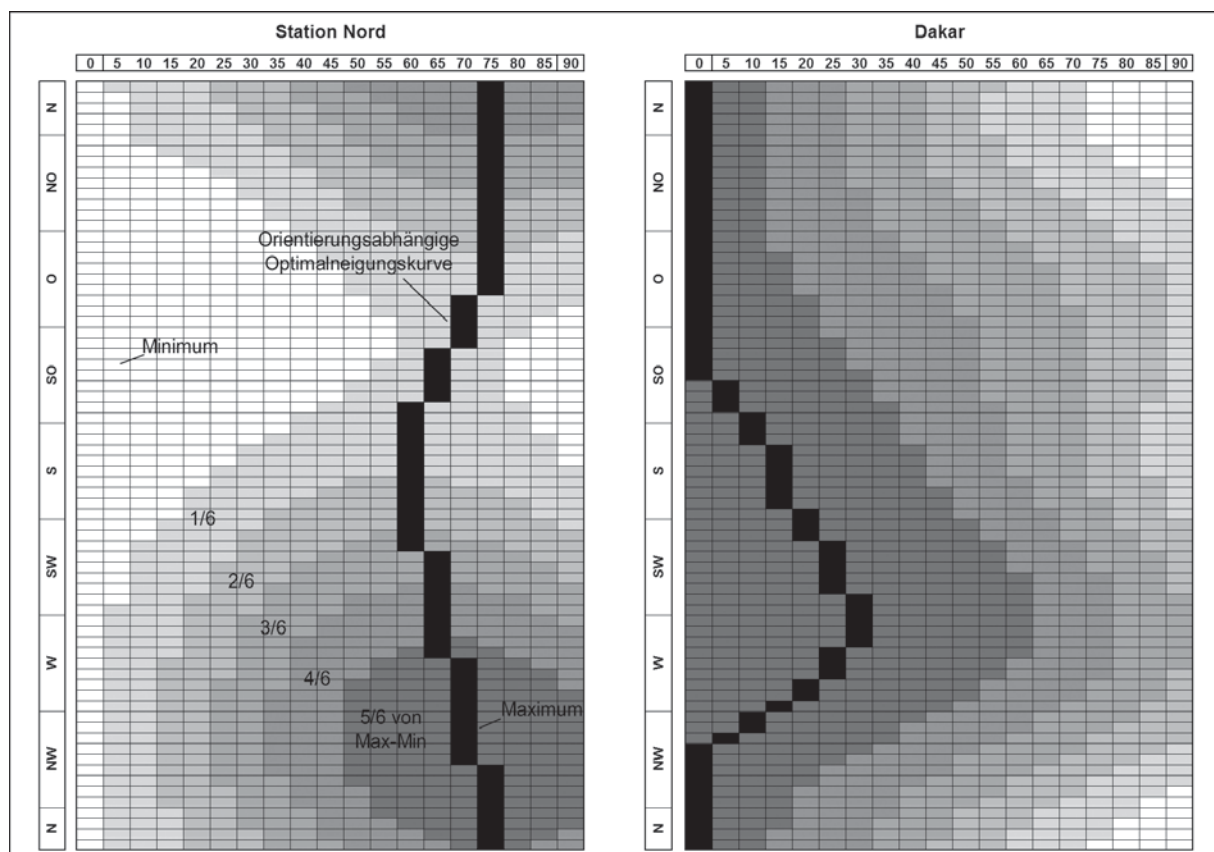


Abbildung 17.8: Strahlungsdiagramme der Jahressumme einfallender Globalstrahlung auf Empfangsflächen beliebiger Orientierung und Neigung mit markierten orientierungsabhängigen Maximalwerten für Station Nord und Dakar

(Grafik: eigene; Datenquelle: NASA (2006); Berechnungen: eigene)

Zur Erstellung eines in *Abbildung 17.8* gezeigten Strahlungsdiagramms werden über die in *Kapitel 9* vorgestellten komplexe Formelsysteme die für die Horizontale bekannten Werte der

Global-, Direkt- und Diffusstrahlung für Flächen beliebiger Neigung (0 bis 90°) und Orientierung (0 bis $\pm 180^\circ$) berechnet. Dabei entspricht jedem Feld eine bestimmte Ausrichtung, welche eine Teiloberfläche einer Gebäudehülle einnehmen kann.

Zur Berechnung der Jahressumme der Globalstrahlung für jedes Feld müssen für alle Stunden im Jahr die Direkt-, Diffus- und Reflektierte Strahlung berechnet und aufsummiert werden. Aufgrund der jeweiligen Flächengeometrie ergeben sich je Strahlungsart unterschiedliche Verteilungen. Färbt man diese Felder entsprechend der erzielten Jahreseinstrahlung - wobei eine geringe Einstrahlung hell, eine hohe Einstrahlung dunkel gefärbt wird - ergeben sich für Station Nord und Dakar jeweils unterschiedliche Diagramme (s. *Abbildung 17.8*).

Bei beiden Standorten befindet sich das Strahlungsmaximum jedoch nicht, wie zunächst vermutet, bei den südorientierten Flächen, sondern ist nach Westen verschoben. Dies ist auf die am Nachmittag tendenziell höheren Werte des Clearness Index an beiden Standorten zurückzuführen.

Bei Station Nord liegt das Maximum nord-westlich auf einer 70° geneigten Fläche, in Dakar auf West-Süd-West auf einer 30° geneigten Fläche.

Der je Orientierung erzielbare Maximalwert ist schwarz markiert, so dass der optimale Neigungswinkel für jede Orientierung direkt ablesbar ist. Bei Station Nord liegt dieser zwischen 60 bis 80° Neigung, also relativ steil. In Dakar liegt er größtenteils auf der Horizontalen oder im flachen Winkel von 0 bis 30°.

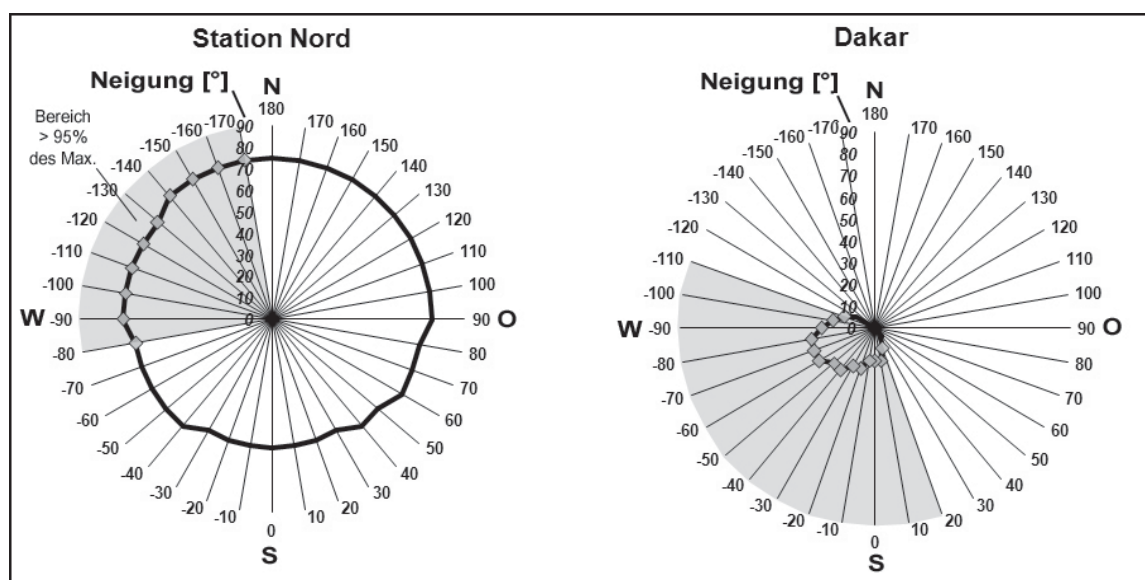


Abbildung 17.9: Windrosendiagramme der orientierungsabhängigen optimalen Neigungswinkel potentieller Empfangsflächen für Station Nord und Dakar. Orientierungen für Empfangsflächen, die mindestens 95% des örtlichen Maximalwertes erzielen, sind mit Rauten markiert. Dieser für eine solare Entwurfsoptimierung interessante Sektor ist zudem flächig in Grau hervorgehoben.

(Grafik: eigene; Datenquelle: NASA (2006); Berechnungen: eigene)

Diese optimalen orientierungsabhängigen Neigungswinkel lassen sich auf eine Windrose übertragen (s. Abbildung 17.9), an der alle möglichen Orientierungen einer Gebäudehüllfläche abzulesen sind. Die radiale Abszisse beschreibt die möglichen Neigungen potentieller Empfangsflächen von 0° (horizontal) im Zentrum des Diagramms bis 90° (senkrecht) am äußeren Rand.

Bei Station Nord liegen für alle Orientierungen die optimalen Neigungswinkel im Diagramm weit außen, also im steilen Bereich. Bei Dakar liegen sie im Zentrum des Diagramms, also im flachen Bereich. Dieses kann mit dem niedrigen Sonnenstand am Pol und dem hohen Sonnenstand am Äquator begründet werden. Durch angepasste Neigung der Empfangsflächen wird eine möglichst senkrechte Besonnung und damit eine hohe Einstrahldichte sowie maximale Ausbeute erzielt. Derjenige Sektor der Windrose, in dem bei optimierter Neigung immerhin noch Strahlungswerte von mindestens 95% des an diesem Standort erzielbaren Maximums erreicht werden, ist flächig in Grau hervorgehoben. Bei der Gestaltung der Gebäudehülle sollte im Entwurf diesem Bereich besondere Aufmerksamkeit entgegengebracht werden, da hier durch eine angepasste Gebäudeform über die Gebäudehülle eine optimale Energieausbeute und eine maximale Effizienz der Solartechnologie erreicht werden können.

Für Station Nord liegt der optimale Sektor im nord-westlichen Quadranten, was wiederum mit dem spätabendlichen Clearness-Index-Maximum an diesem Standort korreliert. In Dakar werden maximale Werte im süd-westlichen Quadranten erzielt. Auch dies harmonisiert mit dem dort nachmittäglichen Clearness-Index-Maximum.

17.1.9 Jahresverlauf der Monatsenergiebilanzen

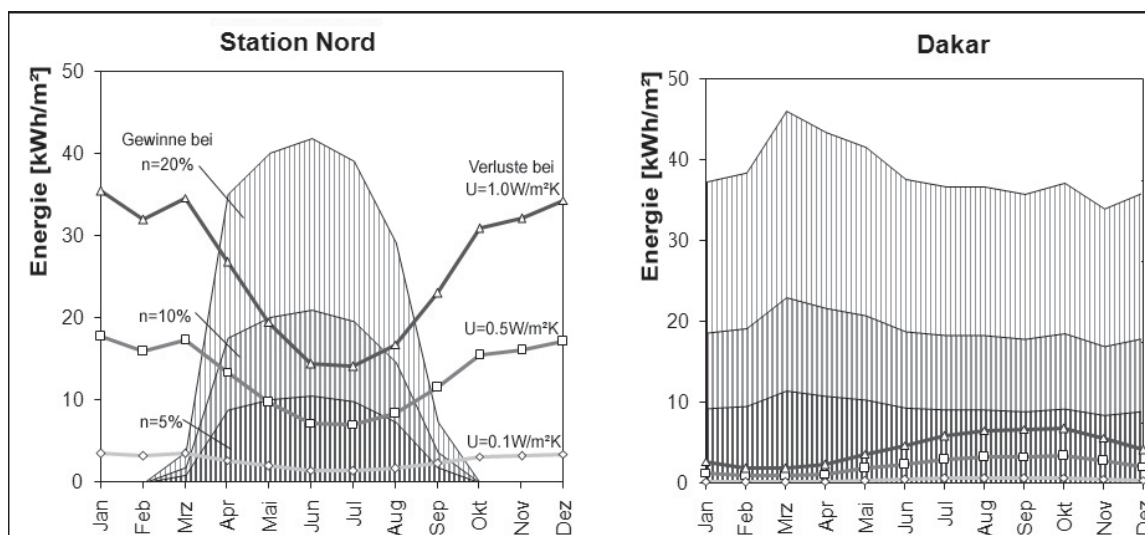


Abbildung 17.10: Diagramme der Jahreskurven für Transmissionsverluste und solare Gewinne für jeweils drei verschiedene Transmissionskoeffizienten bzw. Technologiewirkungsgrade für Station Nord und Dakar

(Grafik: eigene; Datenquelle: NASA (2006); Berechnungen: eigene)

Nachdem die einzelnen Berechnungen täglicher thermischer Verluste und solarer Gewinne durchgeführt wurden, können diese zu Monatssummen addiert und in eine gemeinsame Jahresgraphik der Einheit kWh/m² eingetragen werden (s. *Abbildung 17.10*). Auf die Konsequenzen dieser gemeinsamen Bilanzierung ist bereits in *Abschnitt 7.4* eingegangen worden.

Die Transmissionsverluste werden für die drei verschiedenen in 6.3 vorgestellten Dämmstandards berechnet. Analog können die solaren Gewinne anhand der ebenfalls in 6.3 eingeführten drei solaren Wirkungsgrade ermittelt werden.

Für Station Nord erkennt man die Gegenläufigkeit von thermischen Verlusten und solarer Einstrahlung im Jahresverlauf. Der Heizbedarf ist dann besonders hoch, wenn keine solaren Gewinne zur Verfügung stehen. Ohne saisonale Speicher ist deshalb selbst bei der Kombination aus bestem Dämmwert und optimalen Wirkungsgrad keine ganzjährige Deckung des Energiebedarfs möglich.

Bei Dakar zeigen sich dagegen ausgeglichene Kurvenverläufe ohne starke jahreszeitliche Schwankungen. Selbst die Kombination aus schlechtestem Dämmstandard und ungünstigstem solaren Wirkungsgrad erlaubt die ganzjährige solare Deckung ohne saisonale Speicher.

An beiden Diagrammen wird deutlich, dass sich die jahreszeitliche Ausprägung der Kurve bei gutem Dämmstandard verringert und bei guten solaren Wirkungsgraden verstärkt.

17.1.10 Matrix der Jahressummen-Energiebilanzen

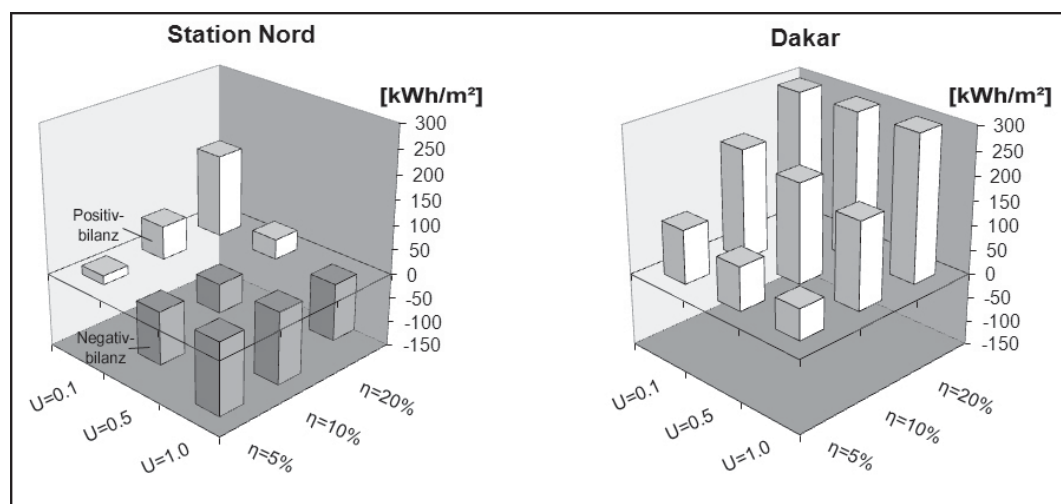


Abbildung 17.11: 3D-Diagramme als 3x3-Matrix der Jahressummenbilanzen aus Transmissionsverlusten und solaren Gewinnen für jeweils drei verschiedene Transmissionskoeffizienten bzw. Technologiewirkungsgrade für Station Nord und Dakar

(Grafik: eigene; Datenquelle: NASA (2006); Berechnungen: eigene)

Betrachtet man die Kombinationsmatrix aus den drei Dämmstandards und den drei solaren Wirkungsgraden ergibt sich das Säulendiagramm in *Abbildung 17.11*.

In der Jahresbilanz – anders noch als im Jahresverlauf – ergeben sich selbst für so ungünstige Orte wie Station Nord für bestimmte Kombinationen von Dämmstandard und Wirkungsgrad durchaus auch positive Energiebilanzen. Diese können grundsätzlich mit dem besten Dämmwert erreicht werden, aber auch bei mittlerem Dämmstandard sofern gleichzeitig der beste solare Wirkungsgrad eingesetzt wird. Für Dakar ergibt sich für die Jahresbilanz bei jeder Kombination der U-Werte und solaren Wirkungsgrade eine positive Jahresbilanz.

Aus diesen Graphiken wird deutlich, dass sich bei Betrachtung einer einzelnen Fläche immer die Möglichkeit einer positiven Energiebilanz bietet. Es muss dabei jedoch bedacht werden, dass nicht die gesamte Gebäudehülle mit solaren Technologien ausgestattet sein kann, jedoch über die gesamte Gebäudehülle thermische Verluste entstehen. Der Anteil, welcher solare Gewinne produziert, muss demnach in seiner Bilanz einen derart großen Überschuss erwirtschaften, dass die Negativbilanzen der reinen Verlustflächen aufgefangen werden.

Derjenige Punkt (Break-Even-Point), von dem an sämtliche thermische Verluste der Gebäudehülle durch solare Überschüsse der Empfangsflächen gedeckt werden, kann für den jeweiligen Standort berechnet werden. Er markiert den Wendepunkt, von dem an die Entwurfsempfehlung von der Verlustminimierungs- zur Gewinnmaximierungsstrategie umschwenkt.

17.1.11 Analyse der Standortmatrix

In der globalen Standortstudie in *Anhang G* sind die oben besprochenen Einzelaspekte für alle 42 repräsentativen Standorte in einer Übersichtsmatrix aufgetragen. Die Sortierung der Städte erfolgt dabei gemäß der in *Abschnitt 6.2* erläuterten Weise entlang der zwei Achsen:

- nach Breitengrad vom Nordpol (90°N) zum Äquator (0° N) und
- nach Klimazone von Polar Frost (EF) bis Tropen (A).

In dem sich ergebenden Feld ordnen sich die Städte somit gemäß ihrer solaren Einstrahlungsgeometrie und thermischen Belastung an. Für jeden der oben beispielhaft beschriebenen Einzelaspekte lässt sich anhand dieser Matrix die jeweilige Entwicklung entlang der Breitengrade sowie der Klimazonen ablesen. Für folgende Aspekte lassen sich die feinen Abstufungen auf der Achse zwischen den Extremen Station Nord und Dakar gut nachvollziehen:

- Heiz- und Kühlgradtage
- Tages- und Jahresverlauf von Bewölkung, Clearness Index und Albedo
- Tages- und Jahresverlauf von Extraterr., Global-, Direkt- und Diffusstrahlung
- Neigungsabhängige optimale Neigungswinkel
- Jahres- und Monatsenergiebilanzen.

Aufgrund der Homogenität der Entwicklungen kann davon ausgegangen werden, dass die Auswahl repräsentativer Standorte keine Sonderfälle enthält. Dies stützt die Belastbarkeit der in *Abschnitt 17.4* folgenden Potentialstudie, da die gewählten Standorte tatsächlich repräsentativ für den von ihnen vertretenden Anteil der Weltbevölkerung sind.

17.2 Rankingstudie

Aufbauend auf den Analyseergebnissen in *Kapitel 14* können die einzelnen Formenrankings differenziert untersucht werden. Hier soll der Einfluss der Variation einzelner Parameter herausgearbeitet werden. Diese sind:

- Einfluss der Parameter zu Dämm-, Wirkungs- und Belegungsgrad
- Einfluss des Standortes von Nr. 1 Station Nord bis Nr. 42 Singapore
- Einfluss des Sortierungsmerkmals Energiebilanz oder Einstrahlungsdichte.

17.2.1 Einfluss der Parameter

Zur Darstellung des Einflusses der Parameterkombination sind in *Anhang C und H* zwei Formenrankings für die Stadt Madrid abgebildet. Das Ergebnis bei mittleren Parameterwerten (s. *Anhang C*) ist bereits in *Kapitel 14* beschrieben worden. Diese sind:

- Mittlerer Belegungsgrad (33 %)
- Mittlerer Dämmstandard (0.5 W/m²K)
- Mittlerer solarer Wirkungsgrad (10 %).

Sie führen dazu, dass alle 64 Formen eine positive Jahresenergiebilanz aufweisen und unkompatte Formen bevorzugt werden

Bei schlechteren Dämmwerten und Wirkungsgraden sowie geringerem Belegungsgrad gilt noch der umgekehrte Fall. In *Anhang H* ist dazu das Formenranking für die Stadt Madrid abgebildet für die ungünstigste Parameterkombination:

- niedriger Belegungsgrad 25 %
- niedriger Dämmstandard 1.0 W/m²K
- niedriger solarer Wirkungsgrad 5 %.

Im Gegensatz zum Ranking bei mittleren Parametern erkennt man, dass keine der 64 untersuchten Formen über das Jahr eine Positivbilanz erzielen kann und dass kompakte Formen mit kleinen Oberflächen gegenüber unkompaten mit großen Hüllen deutlich bevorzugt werden. Reihe 6a, welche bei mittleren Parametern zuvor die Rangfolge angeführt hat, landet bei Wahl der ungünstigen Parameterkombination auf den letzten Plätzen. Die Veränderung der Parameter führt somit sowohl zu einem deutlichen Einfluss auf die Rangfolge als auch auf das erzielbare Ergebnis. Während bei schlechten Parametern keine Form eine positive Bilanz erzielt und die günstigste Form immerhin noch eine Negativbilanz von -24.245kWh/a aufweist, kann sich das Ergebnis bei mittleren Parametern schon so stark wandeln, dass alle Formen - selbst die ungünstigsten - eine Positivbilanz auf weisen und die beste Form sogar einen Überschuss von +14.377 kWh/a erwirtschaftet. Dies unterstreicht erneut die Notwendigkeit zum dynamischen Denken auf dem Zeitstrahl bei dem „Jahrhundert-Produkt“ Haus.

17.2.2 Einfluss des Standortes

Um den Einfluss des Standortes unter gleichen Parametern zu zeigen, werden zwei sehr unterschiedliche Standorte miteinander verglichen. Es handelt sich um die Formenrankings nach erzielter Einstrahlungsdichte für die Städte (s. *Anhang I*):

- Nr. 1 (Station Nord)
- Nr. 38 (Dakar).

Da es sich bei der Einstrahlungsdichte der Globalstrahlung in kWh/m²a um einen rein geometrischen Einfluss handelt, sind Angaben zu Dämmstandard und solarem Wirkungsgrad irrelevant. Daher wird nur der Parameter zum Belegungsgrad festgelegt auf:

- Mittlerer Belegungsgrad (33 %).

Im Folgenden soll der Einfluss des Standortes auf das Ranking für die Formenreihe 1 beispielhaft besprochen werden. *Abbildung 17.12* zeigt das sich jeweils ergebende Energiedichte-Ranking für Station Nord und Dakar bezüglich Reihe 1 (Untersuchung der Höhe über quadratischem Grundriss).

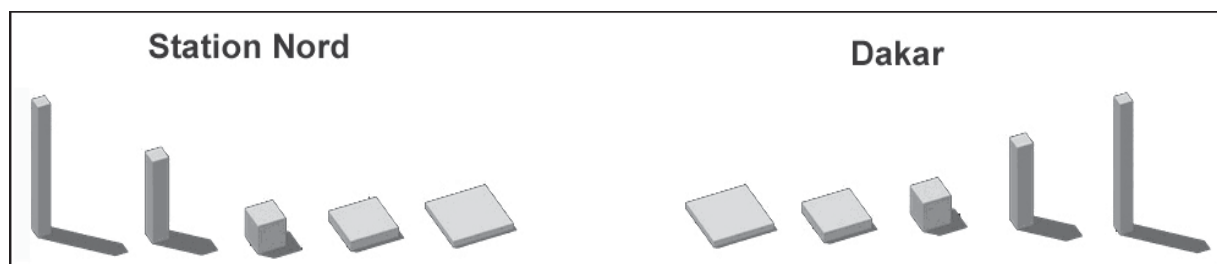


Abbildung 17.12: Formenranking nach erzielter Einstrahlungsdichte auf die besten 33% der Gebäudehülle für Station Nord und Dakar

(Grafik: eigene; Berechnungen: eigene)

Für Station Nord ergibt sich die Abfolge *Turm* → *Würfel* → *Halle*. Dies kann damit erklärt werden, dass die am Nordpol flach stehende Sonne zu senkrechten Fassadenflächen in besonders günstigem Winkel steht. Zudem werden senkrechte Flächen stärker von Bodenreflexionen getroffen als horizontale, welche hier aufgrund der schneebedingt hohen Albedo besonders stark ausgeprägt ist.

Für Dakar ergibt sich exakt die gegenläufige Abfolge: *Halle* → *Würfel* → *Turm*, was daran liegt, dass die hoch stehende Sonne am Äquator horizontale Flächen bevorzugt bescheint. Der Direktstrahlungsanteil ist hier sehr hoch und die Albedo sehr niedrig, was in der Folge zu einer geringen Einstrahlung auf senkrechte Fassaden führt.

Das Ranking nach erzielter Energiedichte spiegelt somit das Einstrahlungspotential einer Form in Bezug auf die standortspezifische Einstrahlungsgeometrie dar.

17.2.3 Einfluss des Sortierungsmerkmals

Um den Einfluss des Sortierungsmerkmals – also den Unterschied zwischen einem Ranking nach Einstrahlungsdichte und Jahresenergiebilanz – aufzuzeigen, wird für die Städte Station Nord und Dakar im Folgenden das Ranking nach Energiebilanz (s. *Anhang I*) besprochen. Da hierfür die thermische Qualität der Hülle sowie die Güte der eingesetzten solaren Technologie von Bedeutung sind, werden die Parameter beispielhaft wie folgt festgelegt:

- Mittlerer Belegungsgrad (33 %)
- Mittlerer Dämmstandard ($0.5 \text{ W/m}^2\text{K}$)
- Mittlerer solarer Wirkungsgrad (10 %).

Da die Jahresenergiebilanz anders als die Energiedichte zusätzlich zu den solaren Gewinnen auch die Komponente der thermischen Verluste beinhaltet, bekommen weitere standortspezifische Aspekte wie die Außenlufttemperatur größeren Einfluss. *Abbildung 17.13* zeigt das sich jeweils ergebende Jahresenergiebilanz-Ranking für Station Nord und Dakar für die Formen der Reihe 1 (Untersuchung der Höhe über quadratischem Grundriss).

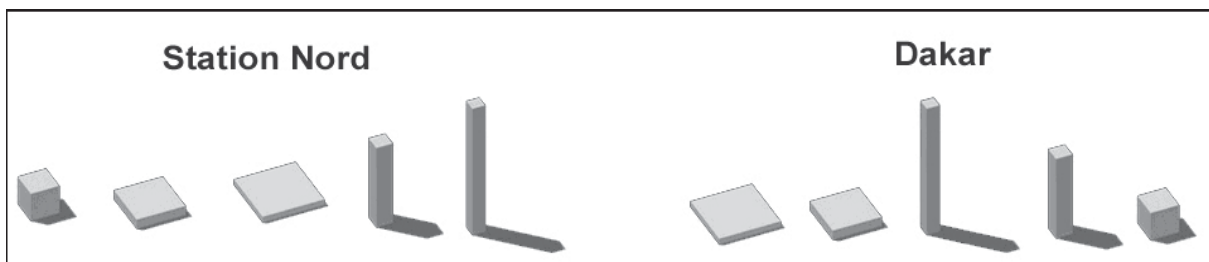


Abbildung 17.13: Formenranking nach erzielbarer Energiebilanz auf den besten 33% der Gebäudehülle bei mittlerem Transmissionskoeffizient und Technologiewirkungsgrad für Station Nord und Dakar

(Grafik: eigene; Berechnung: eigene)

Für Station Nord erhält man nun die Abfolge *Würfel* → *Halle* → *Turm*. Dies erklärt sich aus der Dominanz der Energieverluste gegenüber den solaren Gewinnen an einem extremen Ort wie Station Nord. Der Würfel als kompakteste Bauform erhält den ersten Platz. Obwohl der Turm aus Sicht maximaler solarer Einstrahlung der Halle vorzuziehen wäre, wird nun bei der Betrachtung der Energiebilanz die Halle bevorzugt, da sie eine geringere Oberfläche gegen Außenluft hat als der exponierte Turm. Unter den gewählten mittleren Parametern sind die thermischen Verluste an diesem Standort gegenüber solaren Gewinnen stark dominant.

Für Dakar ändert sich bei Betrachtung der Energiebilanz die Reihenfolge in *Halle* → *Turm* → *Würfel*. Die Halle steht aufgrund ihres großen solaren Potentials der dominanten Horizontalen weiterhin auf dem ersten Platz. Besonders interessant ist jedoch der Platztausch von Würfel und Turm. Obwohl der Würfel trotz seiner größeren horizontalen Oberfläche am Standort Dakar über eine bessere Einstrahlungsgeometrie verfügt als der Turm, besetzt der Würfel hier doch den letzten Platz. Dies zeigt, wie durch Kompaktheit potentielle solare Ge-

winnflächen reduziert werden. Da die thermischen Verluste angesichts der überragenden solaren Gewinne an diesem Ort keine Rolle spielen, ist ein kompakter Baukörper aufgrund seiner minimierten potentiellen Empfangsflächen eine tendenziell ungünstige Form. Solare Gewinne dominieren hier somit die thermischen Verluste.

Der Vergleich zwischen dem Ranking nach absoluter Jahresenergiebilanz einerseits und relativer Energiedichte andererseits zeigt:

- Anders als bei der Berechnung der Einstrahlungsdichte pro Quadratmeter Hülloberfläche spielt bei der Energiebilanz die absolute Größe der Oberfläche eine entscheidende Rolle.
- An Standorten mit tendenziell hoher thermischer Belastung werden kompakte Formen bevorzugt, an Standorten geringer thermischer Last und gleichzeitig hohen potentiellen solaren Gewinnen sind kompakte Formen dagegen nicht empfehlenswert.
- Eine Beurteilung der optimalen Einstrahlungsgeometrie kann jedoch nur über die Analyse der eingestrahlten Energiedichte erfolgen.

17.2.4 Analyse der Rankingmatrix

Analog zu den einzelnen meteorologischen Faktoren der Standortmatrix (s. *Abschnitt 17.1.11*) können die Rankingergebnisse der jeweiligen Standorte ebenfalls miteinander verglichen und bezüglich ihrer Entwicklung nach Breitengraden und Klimazonen untersucht werden. In *Anhang J* sind hierzu einige Beispiele abgebildet, die für die Parameterkombination niedriger Belegungsgrad (25%), niedriger Dämmstandard ($1.0 \text{ W/m}^2\text{K}$) und niedriger solarer Wirkungsgrad (5%) die globalen Unterschiede und den Wandel der Entwurfsempfehlungen vom Pol zum Äquator für einige Beispiele verdeutlicht.

Als Gesamtergebnis ist zunächst festzustellen, dass sich in der Auswertung ein eindeutiger Wendepunkt abzeichnet, welcher sich im Ergebnis zu jedem untersuchten Einzelaspekt zeigt. Der Wendepunkt kann beim Übergang zwischen den Klimazonen Cb und Ca sowie beim Überschreiten des Breitengrad 40° lokalisiert werden. Die Bereiche links oberhalb dieses Wendepunktes sowie rechts unterhalb bilden zwei homogene Felder. Am Übergang ändern sich die Resultate sprunghaft. Dies kann in allen einzelnen untersuchten Aspekten beobachtet werden:

- Für Städte links oberhalb des Wendepunktes werden kleine *Oberflächen*, rechts unterhalb des Wendepunktes werden große Oberflächen empfohlen.
- Für Standorte links oberhalb des Wendepunktes gelten entsprechend kleine *A/V-Verhältnisse* – also kompakte Formen – als günstig, rechts unterhalb große. Der Wendepunkt markiert somit den Break-Even-Point, von dem an der thermisch solare Fingerabdruck eines Standortes von der Empfehlung zur Verlustminimierungsstrategie schlagartig zur Gewinnmaximierungsstrategie übergeht.

- Neigungswinkel von $0-15^\circ$ sind vor dem Wendepunkt in Polnähe aufgrund des niedrigen Sonnenstandes ungünstig, in Äquatornähe jedoch sehr günstig.
- Eine Neigung von $20-35^\circ$ ist überall gut geeignet, da viel Diffusstrahlung jedoch auch konzentrierte Direktstrahlung empfangen werden kann, nur in Polnähe gilt dieser Winkelbereich als schlecht.
- Für Oberflächenneigungen zwischen $40-50^\circ$ gilt dies ebenfalls.
- Neigungen zwischen $55-70^\circ$ sind vor dem Wendepunkt in Polnähe aufgrund der optimalen Einstrahlungsgeometrie bei niedrigem Sonnenstand sowie aufgrund der erhöhten Trefferwahrscheinlichkeit für vom vereisten Boden reflektierte Strahlung besonders günstig, jedoch in Äquatornähe ungünstig.
- Steile Winkel von $75-90^\circ$ sind nahezu überall ungünstig, außer in Polnähe aus oben beschriebenen Gründen.
- Die Untersuchung der *Gebäudehöhe* ergibt, dass hohe Formen trotz weltweitem Trend zum Hochhausbau für keinen Standort günstig sind. Vor dem Wendepunkt sind mittlere Höhen ideal, während flache Formen schlecht abschneiden. Nach dem Wendepunkt sind tendenziell flache Formen günstig, während hohe Formen nicht empfehlenswert sind. Diese Entwicklung kann mit der Präferenz der jeweiligen Neigungswinkel erklärt werden, welche der Gebäudehöhe entsprechen. So weisen hohe Formen vermehrt steile Neigungswinkel auf, welche in Äquatornähe eine ungünstige Einstrahlungsgeometrie aufweisen.
- Für alle Standorte gelten *Pyramiden* als geeigneter als *Quader*, was mit der größeren Differenzierung der Teiloberflächen bezüglich der Neigungswinkel erklärt werden kann.
- Beim direkten Vergleich von *konventionellen* und *unkonventionellen* Formen sind für ALLE Standorte unkonventionelle Formen empfehlenswert.
- Durch Analyse der Verteilung der *Formengruppen* ist zu erkennen, dass vor dem Wendepunkt die konventionelle Gruppe 4, deren Formen sich aus unterem Quader und Dachprismen zusammensetzen, bevorzugt wird. Nach dem Wendepunkt dominieren die unregelmäßigen, schiefen Pyramiden der Gruppe 6. Die Quader der Gruppe 1 und 2 hingegen schneiden überall schlecht ab.
- Die Untersuchung der *Formenreihen* zeigt folgenden Bild: Vor dem Wendepunkt sind Reihe 4 und flache Pyramiden der Gruppe 5a günstig, während hohe Quader aus 3c ungünstig sind. Nach dem Wendepunkt werden flache Pyramiden der Reihen 5a und 6a bevorzugt, während auch hier ebenfalls hohe Quader der Reihe 3c ungünstig sind.
- Die Verteilung der jeweils günstigsten und ungünstigsten *Form* ist für jeden Standort unterschiedlich, so dass sich ein sehr differenziertes Bild ergibt, in welchem jedoch bestimmte Tendenzen abzulesen sind. Dies macht erneut deutlich, dass es nicht die eine ideale Form gibt, sondern immer eine individuelle entwerfliche Reaktion auf vielfältige standortspezifische Faktoren des lokalen Klimas und Strahlungsangebotes notwendig ist.

- Für sich für die jeweils beste und schlechteste Form an einem Standort ergeben sich Werte der *Jahresenergiebilanz*, welche wieder eindeutig den oben beschriebenen Wendpunkt zeigen. Er markiert - an den Vorzeichen deutlich ablesbar - den Übergang von der Verlustminimierungs- zur Gewinnmaximierungsstrategie.

Interessant ist, dass selbst für einen Ort mit vergleichsweise geringer thermischer Belastung und gleichzeitig hohem solaren Angebot wie beispielsweise Singapore bei Missachtung der Formoptimierungskriterien auch Negativbilanzen erwirtschaftet werden können. Dies unterstreicht noch einmal deutlich das große Potential dieser Maßnahme.

Das beste Ergebnis für eine optimierte Form ergibt sich für den Standort Addis Abeba. Dort kann ein Gebäude mit 1.000 m^3 umbauten Raum bei bereits heute technisch einfach realisierbaren Parametern zur Hüllenqualität (25% Belegung, $1.0 \text{ W/m}^2\text{K}$ Dämmstandard, 5% solarer Wirkungsgrad) einen Jahresüberschuss von rund $+71.000 \text{ kWh}$ erzielt.

Die beste Form am ungünstigsten Standort Saskylah erreicht dagegen nur eine negative Jahresenergiebilanz von rund -64.000 kWh . Dies verdeutlicht die Bandbreite klimatischer Bedingungen, unter welchen Menschen auf dem Globus verteilt leben sowie den großen Einfluss des *thermisch-solaren Fingerabdruckes* eines Standortes auf die erzielbare Jahresenergiebilanz.

17.3 Rotationsstudie

17.3.1 Aufbau der Rotationsstudie

Bei der Rotationsstudie wird jede einzelne der 64 Formen an jedem der 42 Standorte in jeweils 5° -Schritten vollständig um die eigene Achse gedreht und für jede der 72 eingenommen Positionen die solare Einstrahlung jeder Teiloberflächen auf Basis ihrer geänderten Ausrichtung neu berechnet. Dieses Verfahren wird jeweils für die fünf unterschiedlichen Belegungsgrade von 25%, 33%, 50%, 75% und 100% durchgeführt.

Für jeden Belegungsgrad wird dann das Ergebnis sowohl der besten als auch der schlechtesten Orientierung notiert. Dieses Verfahren wird in *Abbildung 17.14* verdeutlicht.

Die Grafik zeigt für eine Form mit einer 200 m^2 großen Gebäudehülle, welche aus acht Teiloberflächen (T_1 - T_8) besteht, das jeweilige Einstrahlungsergebnis in zwei verschiedenen Orientierungen (O_1 , O_2).

Die Orientierung O_1 beschreibt diejenige aller möglichen Gebäudeausrichtung, bei welcher die Einstrahlungssumme auf die gesamte Gebäudeoberfläche maximal ist. Wird das Gebäude aus dieser Orientierung herausgedreht, werden grundsätzlich niedrigere Werte erzielt. Die Orientierung O_2 dagegen erzielt von allen möglichen Orientierungen die maximal mögliche

Einstrahlung auf die jeweils exponiertesten 25% der Gebäudehülle. Dieses beste Viertel bezieht je nach eingenommener Ausrichtung immer andere Teiloberflächen aus T_1 - T_8 mit ein.

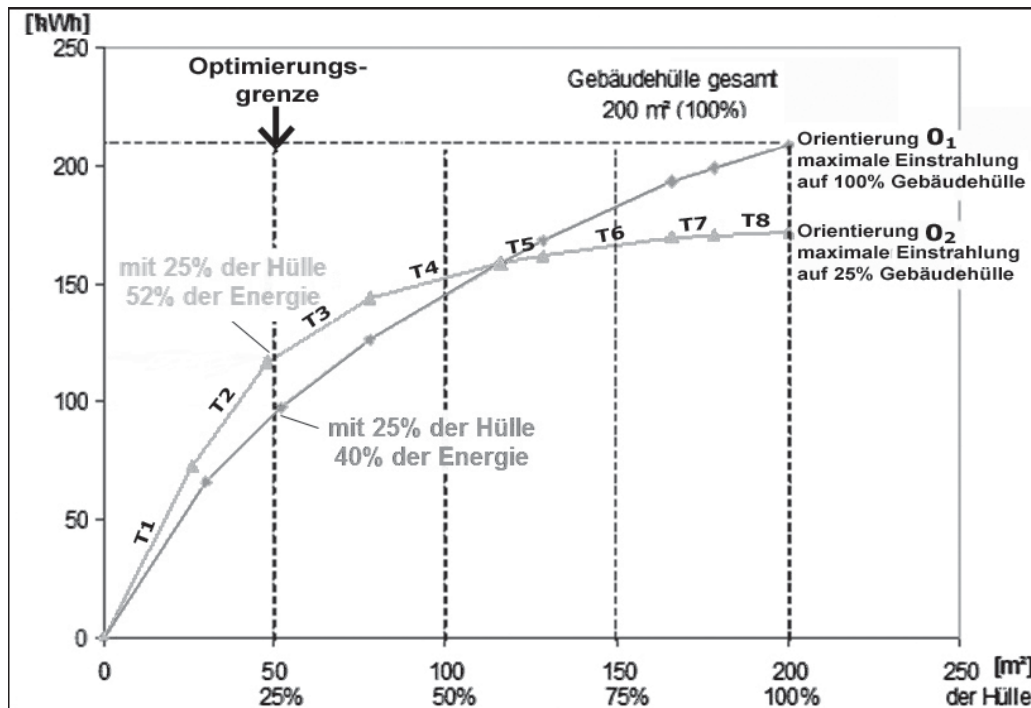


Abbildung 17.14: Flächenranking nach Einstrahlungsdichte zur Orientierungsoptimierung für eine maximale Gesamteinstrahlung auf die jeweils günstigsten 25% der Gebäudehülle

(Grafik: eigene)

Beide Kurven O_1 und O_2 starten im Ursprung mit derjenigen Teiloberfläche (hier T_1), welche von allen die größte Einstrahlungsdichte erzielt und daher die steilste Geradensteigung besitzt. In absteigender Rangfolge setzt sich die Kurve aus den weiteren sieben Flächen zusammen, deren Steigungen immer weiter abnehmen. In diesem Betrachtungsfall ist als Optimierungsziel ein Belegungsgrad von 25% angegeben, so dass die Optimierungsgrenze bei 50 m² der Gebäudehülle liegt. Die Einstrahlung auf alle weiteren Flächen wird somit zunächst nicht weiter betrachtet.

In der Grafik ist deutlich zu erkennen, dass eine der beiden Kurven (O_2) bei der Optimierungsgrenze von 25% deutlich besser abschneidet als die andere, obwohl bei dieser Orientierung (O_1) insgesamt mehr Energie auf die Gebäudehülle auftrifft.

Dies liegt daran, dass die Form in der Orientierung O_2 eine bessere solare Exposition ihrer Empfangsflächen und damit eine höhere Konzentration der Einstrahlung erzielen kann. Während sie mit den besten 25% ihrer Hülle bereits 52% der insgesamt auf die Hülle fallenden Energie einfangen kann, gelingt es im anderen Fall lediglich für 40% der Energie.

Dabei ist irrelevant, dass in der Orientierung O_1 im weiteren Kurvenverlauf bereits mit 75% der Hülle ein deutlich besseres Ergebnis erzielt wird als in der Orientierung O_2 . Dies zeigt, dass die optimale Orientierung einer Form stark vom jeweils gewählten Belegungsgrad abhängig ist.

Dieser Aspekt muß bei einer geplanten späteren Nachrüstung solaraktiver Technologien auf der Gebäudehülle immer bereits bei der Planung mit berücksichtigt werden. Als Anhaltspunkt können hierfür die zu erwartenden Preissenkungskurven für Solartechnologien dienen, da ihr zukünftiger Preis das Ausmaß ihres Einsatzes stark beeinflussen wird.

Aus der Relation von Belegungsgrad und auf dieser Fläche erzielter Einstrahlung kann die in *Abschnitt 3.7* formulierte Forschungsfrage nach dem *Wirkungsgrad einer Gebäudeform* bezüglich der geforderten *Konzentration* wie folgt beantwortet werden.

Solarer Formwirkungsgrad: $\eta_{F,s} = \frac{\text{Anteil Energie [\%]}}{\text{Anteil Hülle [\%]}}$	(hier z.B. $\frac{52\%}{25\%} = 2.08$) (17.1)
--	--

Diese neue Kennziffer beschreibt standortabhängig den Grad der mit einer Gebäudeform erzielbaren *Konzentration* solarer Einstrahlung auf die Hülle und damit die Eignung zum effizienten Einsatz der derzeit noch sehr teuren Solartechnologien – analog zum C_w -Wert eines Autos (s. *Abschnitt 3.1*).

Erst wenn $\eta_{F,s}$ -Werte >1 erreicht werden, kann durch diese Gebäudeform eine Strahlungskonzentration gegenüber der überbauten Grundfläche G und damit eine Effizienzsteigerung der Solartechnologie erreicht werden.

Eine Anpassung der Gebäudeform im Sinne der maximalen solaren Exposition eines Gebäudes zur Ermöglichung einer dadurch erzielbaren maximalen Konzentration solarer Einstrahlung auf einen definierten Anteil der Gebäudehülle ist vor dem Hintergrund der aktuell noch kostenintensiven solaren Technologien von besonders großer Bedeutung.

Ziel der Adaption der Form an solare Technologien gegenüber den heutigen undifferenzierten Gebäudeformen ist somit die eindeutige Spezialisierung der Teiloberflächen der Gebäudehülle bezüglich solarer Eignung. Die Hülle soll nicht länger aus Flächen ähnlich mittelmäßiger Eignung bestehen, sondern aus zwei Kategorien von Flächen, entweder mit besonders guter solarer Eignung oder mit Eignungsausschluss.

Nach Durchführung einer vollständigen Rotation um 360° werden für jeden Belegungsgrad das beste erzielbare Einstrahlungsergebnis sowie das schlechteste Ergebnis für jede der (64x42) 2.688 Form-Standort-Kombinationen notiert. Aus diesen werden wiederum die jeweils besten und schlechtesten Ergebnisse herausgefiltert und als Ergebnisse dieser Rotationsstudie in *Abbildung 17.15* dargestellt.

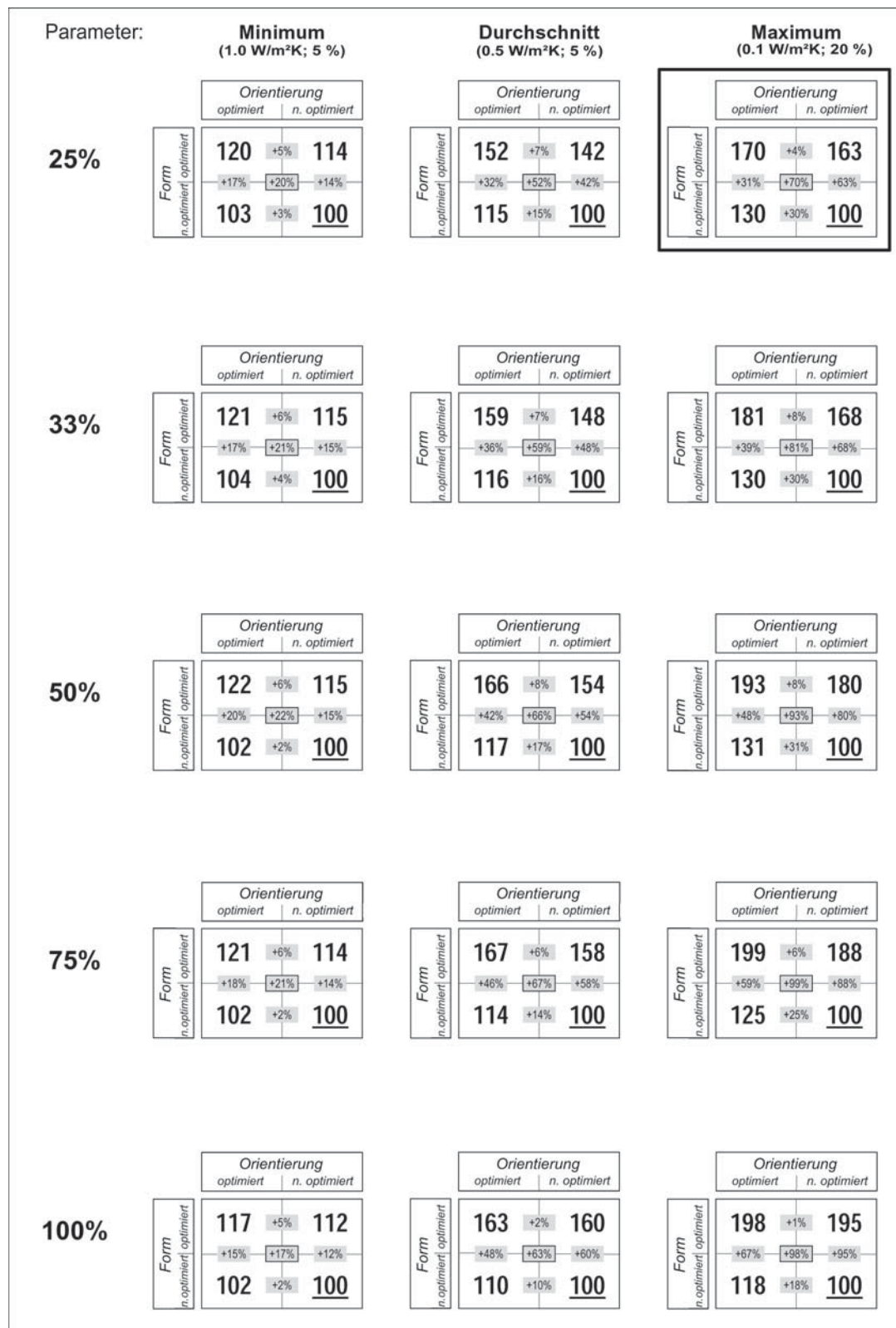


Abbildung 17.15: Ergebnisse [%] der Rotationsstudie nach Parametern und Beleuchtungsgrad, differenziert in Form- und Rotationsoptimierung

(Grafik: eigene)

Sie sind für jeden untersuchten solaren Belegungsgrad (25%, 33%, 50%, 75% und 100%) für folgende Parameterkombinationen aufgeführt:

- Minimum (Dämmstandard 1.0 W/m²K, solarer Wirkungsgrad 5%)
- Durchschnitt (Dämmstandard 0.5 W/m²K, solarer Wirkungsgrad 10%)
- Maximum (Dämmstandard 0.1 W/m²K, solarer Wirkungsgrad 20%).

Jedes Ergebnisfeld besteht aus einer 2x2-Matrix:

- Dabei stehen links die Werte bei optimierter Orientierung – oben links für die beste Form, unten links für die ungünstigste Form.

Rechts stehen die erzielten Werte bei schlechtester Orientierung - oben rechts bei optimierter Form, unten rechts für die ungünstigste Form. Es handelt sich um Prozentangaben, welche sich jeweils auf das Feld mit dem Ergebnis der ungünstigsten Form bei ungünstigster Orientierung beziehen. Dieses markiert mit 100% den Ausgangswert eines heutigen weder bezüglich Form noch Orientierung optimierten Entwurfs.

Zum Beispiel ist für die Matrix bei 25% Belegung und bestmöglichen Parametern (durch einen Rahmen hervorgehoben) abzulesen:

- Ausgehend von der Referenzangabe der schlechtesten Form bei schlechtester Orientierung (unten rechts) kann durch Optimierung der Orientierung (Schritt nach links) eine Verbesserung um 30% erzielt werden.
- Durch Optimierung der Form (Schritt nach oben) kann die solare Einstrahlung um 63% gesteigert werden.
- Die gleichzeitige Optimierung von Form und Orientierung (Schritt diagonal nach oben links) würde insgesamt zu einer Verbesserung von 70% führen.

17.3.2 Ergebnisse

Bei der Betrachtung des Gesamtergebnisses der Rotationsstudie kann abgeleitet werden:

- Das Potential der Formoptimierung liegt fallabhängig bei rund 20-70%. Es übersteigt regelhaft das der Orientierungsoptimierung von rund 5-30%.
- Die Kombination beider Optimierungspotentiale führt zu deutlichen Gewinnzuwächsen von mindestens 20%. Sie kann insgesamt jedoch zu Gewinnen von rund 60-100% führen, also maximal einer Verdopplung der Einstrahlung auf 200% gegenüber der weder form- noch rotationsoptimierten Referenzvariante.
- Die Potentiale sind bei guten Hüllenparametern deutlich höher als bei schlechten.
- Die jeweiligen Maximalwerte werden für eine 75%-Belegung bei bester Parameterkombination erreicht.

17.4 Potentialstudie

In der Potentialstudie soll abgeschätzt werden, wie groß das globale Potential im Gebäudesektor zur solaren Vollversorgung ist und welche Faktoren das Ergebnis beeinflussen. Zu diesem Zweck werden die nach Jahresenergiebilanz sortierten Rankingmatrizen für alle 45 Parameterkombinationen zusammengestellt (s. *Abbildung 17.16*). Anders als bei den vorigen Untersuchungen steht jedoch nicht die Abfolge der Formen im Fokus, sondern der Wert der von ihnen erzielten Jahresenergiebilanz. In jeder Matrix werden nun positive Jahresenergiebilanzen grün, negative gelb markiert. In den 45 Ergebnisfeldern entspricht wieder jede Zeile einem der 42 repräsentativen Standorte. Jeder Standort vertritt einen bestimmten Prozentsatz der Weltbevölkerung (s. *Tabelle 6.9*) und besitzt damit einen Bevölkerungsgewichtungsfaktor. Das jeweilige Abschneiden eines Standortes erfährt somit eine globale Gewichtung.

Da sehr unterschiedliche Formen untersucht werden, sind an jedem Standort einige Formen mehr, andere weniger geeignet. Es stellt sich somit nicht die Frage, ob alle Formen an einem Standort eine positive Bilanz zeigen, sondern ob ein bestimmter Anteil, beispielsweise das beste Drittel, Energieüberschüsse produzieren kann - unabhängig vom Ergebnis der weniger geeigneten Formen auf den hinteren Rankingplätzen. Es wird somit die Festlegung getroffen, dass nur die Ergebnisse der besten 20 Formen eines Standortes betrachtet werden. Diese Grenze ist als senkrechte, dünne schwarze Linie in jeder Matrix eingezeichnet. Zeigen alle 20 Formen in diesem Bereich einen Energieüberschuss, kann davon ausgegangen werden, dass innerhalb einer hinreichenden Formenvielfalt für diesen repräsentativen Standort Gebäude entworfen werden können, die aus eigener Kraft eine solare Vollversorgung erreichen können. Gemäß dieser Festsetzung entsprechen 20 Formen mit einer Positivbilanz 100% Formenvielfalt. Bei 10 Formen gilt demnach die solare Vollversorgung für diesen Standort aufgrund der geringeren Formenvielfalt als nur zu 50% gesichert. Erreicht nur eine Form einen Energieüberschuss, liegt die Quote dann nur noch bei 5%. Zwar wäre selbst in diesem Fall eine hundertprozentige Vollversorgung möglich, jedoch ist die Beschränkung der Zulassung auf nur eine einzige Gebäudeform weder wünschenswert noch realitätsnah. Daher wird neben der Bevölkerungsgewichtung auch ein Faktor zum gewährleisteten Variantenreichtum an wählbaren Formen eingeführt. Im Folgenden wird für jede der 45 Ergebnisfelder zeilenweise der Faktor zur standortspezifischen Bevölkerungsgewichtung mit dem sich aus den besten 20 Formen ergebenden Formenvielfaltsfaktor multipliziert und das Ergebnis aller 42 Zeilen addiert. Das Endergebnis repräsentiert das Potential einer solaren Vollversorgung im Gebäudesektor unter der jeweils gewählten Parameterkombination aus Dämmstandard, solarem Wirkungs- und Belegungsgrad.

In *Abbildung 17.16* ist beispielhaft die Matrix bei 25% Belegungsgrad sowie mittlerem Dämmstandard und solarem Wirkungsgrad mit einem Rahmen hervorgehoben und zeigt im Ergebnis ein globales Potential von 77.7%.

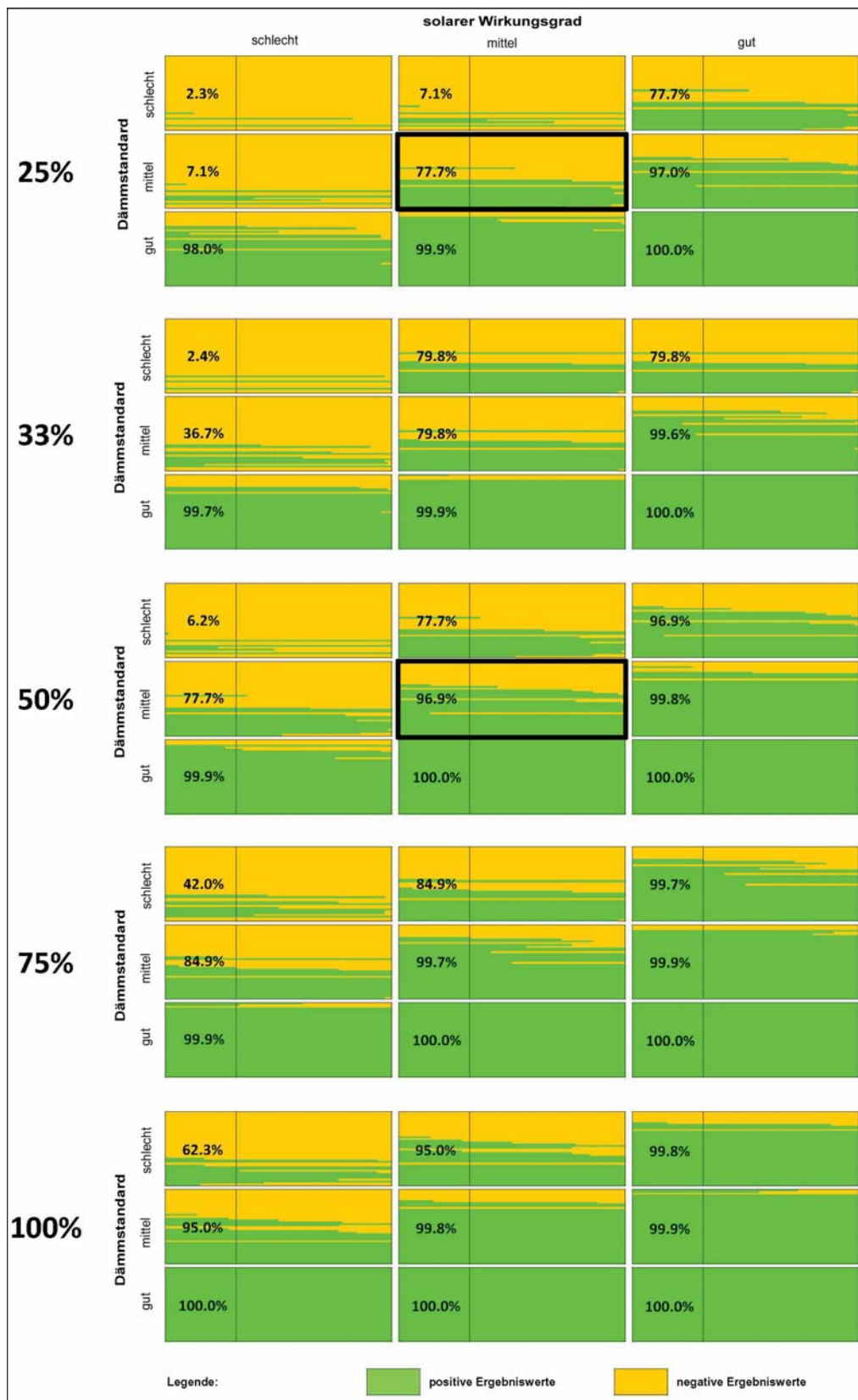


Abbildung 8.16: Ergebnisse der bevölkerungsgewichteten Potentialstudie
(Grafik: eigene)

Das bedeutet, dass heute bereits fast 80% der Weltbevölkerung unter derart günstigen klimatisch-geografischen, meteorologischen und strahlungsgeometrischen Bedingungen lebt, dass bei konsequenter Anwendung der Form- und Orientierungsoptimierung eine solare Vollversorgung bei Zugrundelegung gängiger Technologien bereits heute möglich wäre. Prämissen hierfür sind allerdings neben der Einhaltung der in dieser Arbeit vorgestellten Formoptimierungsprinzipien auch der großflächige Einsatz solarer Technologien sowie ein weitgehender Verschattungsausschluss durch angepasste Stadtplanung nach dem Konzept des *Solar Envelope* und den *Solar Rights* (vgl. Abschnitt 4.3). In den Entwicklungs- und Schwellenländern könnten somit die schlechteren Technologiewerte gegenüber den „verbauten“ Industrieländern aufgrund größerer städtebaulicher Möglichkeiten aufgewogen werden.

Die Analyse zeigt auch, dass das erzielbare Potential stark von der gewählten Parameterkombination zur Hüllenqualität abhängig ist. Bereits innerhalb der 3x3-Matrix des niedrigsten Belegungsgrades von 25% zeigt sich eine Ergebnisbandbreite von 2.3% (bei jeweils schlechtem Dämmstandard und solarem Wirkungsgrad) bis 100% (bei Kombination aus gutem Dämm- und Wirkungsgrad). Dabei ist in der Zeitachse der Verbesserung des Dämmstandards ein größeres Potential zu erkennen als entlang der Achse des solaren Wirkungsgrades. Dies liegt jedoch an der unterschiedlich gewählten Bandbreite der beiden Parameter. Während sich die Dämmwirkung auf dem Zeitstrahl von 1.0 W/m²K auf 0.1 W/m²K um den Faktor 10 verbessert, wird für den Wirkungsgrad der solaren Technologie lediglich eine Verbesserung von 5% auf 20% – also nur Faktor 4 – angenommen.

Insgesamt wird jedoch deutlich, dass sowohl in der Verbesserung der thermischen Qualität der Gebäudehülle als auch in ihrer solaren Aktivierung ein großes globales Potential liegt. Durch Kombination beider Maßnahmen können selbst 100%-Szenarien verwirklicht werden, die sogar extreme Standorte wie Station Nord einschließen – allerdings nur wenn im Entwurf auf die lokalen Einstrahlungsgeometrien und -bedingungen jeweils durch eine angepasste Gebäudeform reagiert wird.

Der Einfluss der Bevölkerungsgewichtung lässt sich besonders gut am Ergebnisfeld für 50% Belegungsgrad und mittlere Parameter ablesen. Die entsprechende Matrix ist in *Abbildung 17.16* durch einen Rahmen hervorgehoben. Obwohl der gesamte obere Bereich des betrachteten Feldes der jeweils besten 20 Formen Negativbilanzen aufweist, liegt das erzielte Potential trotzdem bei 96.9%. Dies verdeutlicht erneut die inhomogene Besiedelung des Globus. Die polnahen, kalten bis kalt-gemäßigten Klimazonen sind derart dünn besiedelt, dass die hier erzielten tendenziell schlechten Ergebnisse global betrachtet nicht ins Gewicht fallen. Die Ergebnisse der Potentialstudie führen erneut vor Augen, dass der Großteil der Menschheit in Äquatornähe zwischen den Wendekreisen in warmen und gemäßigten Klimazonen bei optimaler solarer Einstrahlung lebt. Dies führt bei globaler Betrachtung zu einem sehr großen solaren Potential im Gebäudesektor.

Da der Aspekt der Bevölkerungsgewichtung einen derart großen Einfluss auf das Ergebnis besitzt, sollte die Betrachtung entlang des Zeitstrahls um die Achse der Bevölkerungsent-

wicklung ergänzt werden. Die UN geht in ihrem *World Population Prospect* unter Annahme des wahrscheinlichsten „medium variant“-Szenarios unter konservativen Annahmen von einer Weltbevölkerungsexplosion von derzeit 6,5 Milliarden auf 9,2 Milliarden Menschen im Jahr 2050 aus. Diese rasante Bevölkerungszunahme verteilt sich jedoch nicht gleichmäßig über den Globus, sondern betrifft hauptsächlich die Entwicklungsländer, während die Bevölkerung der Industrieländer sogar zurückgeht. Da die meisten Entwicklungsländer tendenziell in Äquatornähe liegen, wird sich der oben beschriebene Effekt der Bevölkerungsgewichtung weiter verstärken. Abgesehen von den dramatischen sozialen Folgen dieser Entwicklung hätte dies auf das globale solare Potential insofern positive Auswirkungen, als dass allein durch die prozentuale Verschiebung der Weltbevölkerungsanteile auf den Breitengraden das globale Potential wächst, selbst ohne dass technologische Verbesserungen zu Dämmstandard und solaren Wirkungsgraden notwendig wären.

Abschließend muß jedoch betont werden, dass das aufgezeigte enorme globale Potential nur bei konsequenter Anwendung der in dieser Arbeit vorgestellten solaren Form- und Orientierungsoptimierungen im Gebäudesektor möglich ist. Anderenfalls werden große potentielle Gewinne, welche auch den anderen energieintensiven Sektoren Verkehr und Industrie zugute kommen könnten, vergeudet.

Kapitel 18

Zusammenfassung und Diskussion der Ergebnisse

Die zentrale Fragestellung der Arbeit lautete, ob mit dem konventionellen Formenkanon des Architekturentwurfes bereits gute Grundlagen zur solaren Energiegewinnung geschaffen wurden oder ob erst durch die Entwicklung einer neuen solaren Formensprache die Potentiale zur gebäudehüllenintegrierten Energiegewinnung deutlich gesteigert werden könnten.

Tatsächlich basiert die gebaute Umwelt des modernen Menschen weltweit auf einem orthogonalen Planungsraster, aus welchem vornehmlich Variationen des Würfels entwickelt werden wie Blöcke, Türme, Scheiben, Hallen oder Reihen. In der vorliegenden Arbeit konnte der Verdacht bestätigt werden, dass diese kubische Formensprache des rechten Winkels, welche nur senkrechte Fassaden und horizontal Dachflächen kennt, keine ideale Anpassung an die Sonnenbahn mit ihren tages- und jahreszeitlich unterschiedlichen Sonnenständen sowie stündlich wechselnden Einfallswinkeln darstellt.

Für die Beweisführung traten konventionelle und unkonventionelle Formen gegeneinander an. Die unkonventionellen Formen zeichneten sich im Gegensatz zu den Kuben durch fehlende Symmetrien und die Vermeidung rechter Winkel aus. Ihre einzelnen Teiloberflächen waren nicht mehr eindeutig den Kategorien Fassade oder Dach zuzuordnen, sondern bildeten eine undifferenzierte Gebäudehülle. Um die Vergleichbarkeit untereinander zu gewährleisten, besaßen alle untersuchten Formen das gleiche konstante Volumen.

Ihre jeweiligen Energiebilanzen aus thermischen Verlusten und solarer Einstrahlung wurden für weltweite Standorte entlang einer räumlichen Achse vom Nordpol zum Äquator unter unterschiedlichsten klimatischen und strahlungsgeometrischen Bedingungen berechnet. Die Untersuchung erfolgte zudem entlang einer zeitlichen Achse, um zukünftige technologische Entwicklungen wie beispielsweise die Verbesserung solarer Komponenten, abbilden zu können.

Die wichtigsten Ergebnisse dieser Arbeit lassen sich wie folgt thesenartig zusammenfassen:

Die geometrische Anpassung der Gebäudeform an solare Kriterien führt zu einer neuen Formensprache.

Präfossile Bauformen waren immer an die natürlichen Standorteinflüsse angepasst, insbesondere hinsichtlich der je nach Himmelsrichtungen differenzierten solaren Strahlung. Aus dem zukünftigen Anspruch an Gebäude, zu Energieerzeugern zu werden, kann jedoch nicht auf die Rückkehr zu traditionellen Bauformen geschlossen werden, da durch den gehobenen Anspruch an Komfort und individueller Regelbarkeit ein Wandel von passiver zu aktiver Nutzung solarer Energie mit der Möglichkeit der Speicherung, Umwandlung und zeitlich versetzter Abrufbarkeit resultiert. Dies stellt grundlegend andere Anforderungen an eine Gebäudeform - wie beispielsweise die der Adaption an solare Technologien. Dieses gegenseitige aufeinander eingehen von Technologie und Gebäudeform führt nicht nur zu einer neuen architektonischen Formensprache und solaren Ästhetik, sondern ist vielmehr Grundvoraussetzung für die optimale Nutzbarkeit der eingesetzten Technologie.

Die energetische Optimierung der Gebäudeform bedarf konkreter Randbedingungen.

Die Anpassung der Gebäudeform an die neue Aufgabe seiner Hülle, Umweltenergie nutzbar zu machen, kann jedoch nicht beliebig erfolgen, sondern ist an bestimmte äußere Vorgaben gekoppelt. So gibt es auch nicht pauschal die EINE optimale Gebäudeform. Diese ist immer abhängig von meteorologischen Bedingungen am konkreten Standort und den qualitativen Hüllenparametern zu Dämmstandard, solarem Wirkungsgrad und Belegungsgrad mit solaren Technologien. Erst unter diesen Festsetzungen lassen sich standortspezifische Optimierungsprinzipien beschreiben, aus denen eine unter energetischen Gesichtspunkten ideale Form mit der an diesem Standort bestmöglichen Bilanz aus thermischen Verlusten und solaren Gewinnen generiert werden kann. Die energetische Optimierung ist jedoch nur EIN Entwurfskriterium unter vielen. Sie sollte weder die Nutzbarkeit im Gebäudeinneren noch Aspekte der Statik, der Konstruktion, der architektonischen Freiheit oder übergeordnete städtebauliche Beziehungen einschränken, sondern zu einem neuen, spannenden und bereichernden Kriterium eines komplexen, ganzheitlichen Entwurfes werden.

Die solare Optimierung von Gebäudeform und –orientierung hängt sowohl von lokalen strahlungsphysikalischen als auch –strahlungsgeometrischen Faktoren ab.

Der Atmosphärenzustand und das Mikroklima eines Standortes beeinflussen die Strahlungsmenge, ihre Zusammensetzung und den Einfallswinkel oft noch stärker als die Sonnenposition. Eine wichtige Erkenntnis liegt daher in der Tatsache, dass eine konsequente Südorientierung eines Gebäudes nicht pauschal die gewinnträchtigste Ausrichtung sein muss. Die Einstrahlung auf Gebäudeoberflächen erfolgt aufgrund der tageszeitlichen Schwankungen verschiedener Einflussfaktoren nicht symmetrisch zur Sonnenbahn. Wie

groß der Einfluss von Clearness Index, Bewölkung, Atmosphärenzusammensetzung und Air Mass sind, zeigt sich nicht nur in der Quantität und Qualität der Einstrahlung, sondern insbesondere auch für die räumliche Umrechnung dieser zeitlichen Parameter. Ihre Variation im Jahres- und Tagesverlauf hat Konsequenzen für die dreidimensionale Ausgestaltung der Gebäudehülle und der auf ihr platzierten Empfangsflächen. So empfängt beispielsweise eine 40° nach Osten orientierte Fläche nicht zwingend die gleiche Strahlungsmenge wie eine 40° nach Westen orientierte Fläche, obwohl beide strahlungsgeometrisch unter gleichem Winkel beschienen werden. Daraus ist zu schließen, dass die solare Nutzung an Gebäuden nicht a priori symmetrisch erfolgen sollte und sich sogar konsequenter Weise in einer asymmetrischen Gebäudeform widerspiegeln kann.

Die jeweilige Formoptimierung bezüglich Jahresenergiebilanz oder Einstrahlungsdichte führt zu unterschiedlichen Ergebnissen.

Die Beurteilung einer Form hinsichtlich ihres energetischen Verhaltens erfolgt nach zwei unterschiedlichen Kriterien, die der Jahresenergiebilanz oder der Einstrahlungsdichte. Die Ergebnisse bei der Untersuchung von Formen unter diesen beiden Gesichtspunkten zeigen deutliche Unterschiede. Für eine Optimierung auf möglichst hohe Überschüsse in der Jahresenergiebilanz muss die zeitliche Entwicklung der Hüllenparameter einbezogen werden, da sie sich voraussichtlich während der Standzeit des Gebäudes verändern werden. Materialien und Konstruktionsmethoden zu Verbesserung des Dämmstandards werden ständig weiterentwickelt, der solarer Wirkungsgrad verbessert sich mit jedem Technologiesprung und der Belegungsgrad wird in dem Maße steigen, wie sich solare Technologien zu kostengünstigen Massenprodukten entwickeln.

Zum Zeitpunkt des Entwurfes können diese Entwicklungen jedoch nur schwer auf mehrere Jahrzehnte im Voraus einkalkuliert werden. Auch stellt sich die Frage, ob die Gebäudeform für die gerade aktuelle Hüllenqualität optimiert werden sollte oder auf eine zukünftige. So weicht beispielsweise die jeweils ideale Orientierung einer Form bei Änderung des Belegungsgrades deutlich voneinander ab. Sie kann im Nachhinein jedoch nicht verändert werden.

Sollen bei einer Optimierung auf einen zukünftigen Zeitpunkt hin schlechtere Einstrahlungsergebnisse für die ersten Betriebsjahre hingenommen werden, wenn sie von den zusätzlichen Gewinnen nach einer später erfolgenden Nachrüstung bis zum Ende der Standzeit übertroffen werden? Oder soll auf den aktuellen Zustand optimiert und damit in Kauf genommen werden, dass zukünftige positive Entwicklungen im Bereich solarer Technologien an diesem Gebäude, beispielsweise aufgrund der für einen höheren Belegungsgrad nicht idealen Orientierung, nicht im vollem Umfang realisiert werden können?

Die Optimierung hinsichtlich Jahresenergiebilanz gestaltet sich durch diese Überlegungen schwierig, zumal Entwicklungen auf der Zeitachse für ein Produkt mit einer Lebensdauer von meist über hundert Jahren prinzipiell nicht vernachlässigt werden dürfen. Umso bedenklicher

ist die Tatsache, dass dies bei der Formfindung im Entwurf von den Planern in der Regel völlig außer Acht gelassen wird.

Die zweite Strategie dagegen optimiert die Gebäudeform hinsichtlich der eingestrahnten Energiedichte. Diese hängt ausschließlich von standortspezifischen Kriterien ab und ist von der variablen Qualität der Gebäudehülle vollständig unabhängig. Die erzielbare Konzentration der Einstrahlung durch die Anpassung einer Gebäudeform ist somit ein zeitlos gültiges rein geometrisches Formkriterium. Solange zukünftige Entwicklungen zur Dämm- und Solartechnologie nicht absehbar sind, ist dieses Optimierungskriterium somit sinnvoller.

Analog zum c_w -Wert des Autos gibt es den solaren Wirkungsgrad einer Gebäudeform.

Für die Ermittlung des solaren Wirkungsgrades einer Gebäudeform kann eine allgemeingültige Kennziffer ermittelt werden, welche ein Maß für die Eignung einer Form zur solaren Energiegewinnung an einem konkreten Standort darstellt. Diese Eignung spiegelt sich im Grad der erzielbaren Konzentration der empfangenen solaren Strahlung wider, welcher mit einem bestimmten Anteil der Gesamtoberfläche eines Gebäudes erreicht werden kann.

Diese neue Kennziffer besteht aus dem relativen Verhältnis zweier Prozentsätze. Der eine beschreibt den solaren Belegungsgrad, der andere das Verhältnis von mit diesem Anteil empfangener Strahlung zur Gesamteinstrahlung auf die komplette Hülle. Eine Form mit hohem solarem Wirkungsgrad zeichnet sich dadurch aus, dass sie bereits mit einem kleinen Anteil ihrer Hülle einen Großteil der insgesamt auf ihre Hülle fallenden Solarenergie empfangen kann. Diese optimierte solare Exposition führt auf diesen Empfangsflächen zu einer hohen Energiedichte und macht den Einsatz solarer Technologien dadurch besonders effizient.

Die bislang geforderte maximale Kompaktheit der Gebäudeform ist zukünftig von Nachteil. Es lassen sich Wendepunkte identifizieren, bei denen die Strategieempfehlung schlagartig von Verlustminimierung auf Gewinnmaximierung umspringt.

Der aktuelle Entwurfsleitsatz des energieoptimierten Bauens fordert maximale Kompaktheit des Baukörpers zur Vermeidung von Transmissionswärmeverlusten. Die Untersuchung entlang der Zeitachse zeigt jedoch auf, dass diese Maxime nur so lange sinnvoll ist, wie der Dämmstandard der Außenhaut, der Wirkungsgrad solarer Technologien und der solar aktivierte Anteil der Gebäudehaut gering sind. Unter Annahme typischer Lernkurven wird die Effizienz von Dämmung und Solartechnologien jedoch zukünftig ansteigen und ihre Anwendung aufgrund durch Massenproduktion stetig sinkender Preise zudem immer großflächiger.

Es zeigt sich, dass ab einem bestimmten Zeitpunkt, dem Break-Even-Point, die Gebäudehülle nicht mehr als Verlustfläche, sondern als potentielle Gewinnfläche gesehen werden kann, da über jeden Quadratmeter Außenhaut mehr Energie gewonnen werden kann als verloren geht. Der Wendepunkt, bei dem die Empfehlung von der bislang vorherrschenden Verlustminimierungsstrategie in eine Gewinnmaximierungsstrategie umschlägt, setzt bei unkonventio-

nellen Bauformen aufgrund der höheren erzielten Einstrahlungsdichte deutlich früher ein als bei konventionellen Formen.

Diese strategieentscheidenden Wendepunkte sind für zwei Fälle – einem zeitlichen und einem räumlich-geographischen – zu beobachten. Entweder treten sie an einem bestimmten Standort beim Übergang zur nächsten Parameterkombination auf oder für eine festgelegte Parameterkombination entlang der Zeitachse beim Überschreiten eines bestimmten Breitengrades oder dem Übergang in eine andere Klimazone.

Für Standorte der klimatisch-geografischen Lage wie Europa und Nordamerika – also den großen Industrienationen – kann man für die in diesen Staaten als derzeit geltende Parameterkombinationen aus mittlerem Dämmstandard ($0.5 \text{ W/m}^2\text{K}$) und eher ungünstigem solaren Wirkungsgrad (5%) und Belegungsgrad (25%) sehen, dass unter Voraussetzung einer kontinuierlichen technologischen Weiterentwicklung ein solcher Wendepunkt bereits in naher Zukunft ansteht.

Während bei der Berücksichtigung aktueller Parameter für viele Standorte derzeit noch die Verlustminimierungsstrategie als empfehlenswert gilt, wird allein die Verbesserung des solaren Wirkungsgrades um wenige Prozent zum schlagartigen Umspringen der Strategie zur Gewinnmaximierung führen mit allen Konsequenzen bezüglich Empfehlungen zu Kompaktheit, Oberflächengröße und anderen geometrischen Parametern. Preissenkungen für solare Technologien haben den gleichen Effekt, da in diesem Fall der Anteil solar aktivierter Gebäudehülle steigt.

Unkonventionelle Formen zeigen gegenüber konventionellen signifikante Ertragssteigerungen, was die Entwicklung einer neuen, solaren Formensprache nahe legt.

Die solare Energiegewinnung profitiert deutlich, wenn bei der Gebäudeplanung das orthogonale Planungsraaster verlassen wird. Die Befreiung von konventionellen Entwurfsmustern sowie die ganzheitlich Planung von Gebäudehüllen anstatt von Fassaden- und Dachflächen führen zu signifikant höheren Energieerträgen. Die Dimension der Verbesserung beträgt in vielen Fällen sogar +100%! Das bedeutet, dass allein durch eine solar optimierte Gebäudeform gegenüber der konventionellen Referenzvariante doppelt soviel Energie gewonnen werden kann – bei Realisation des gleichen Bauvolumens.

Das Ergebnis der globalen Gegenüberstellung von konventionellen und unkonventionellen Bauformen zeigt sowohl für die Jahresenergiebilanz als auch für die Einstrahlungsdichte eine eindeutige Tendenz zur besseren Eignung der unkonventionellen Formen.

Insbesondere bei Untersuchungen zur Einstrahlungsdichte ist das Ergebnis prägnant. Nach solaren Kriterien entworfene Gebäudeformen zeigen signifikante Steigerungen gegenüber konventionellen Bauformen, insbesondere in Bezug auf die erzielbare Konzentration der einfallenden Energiedichte und damit dem kosteneffizienten Einsatz solarer Technologien.

Dies beweist, dass es vorteilhaft ist, verschiedene Kombinationen aus Orientierung und Neigung für die einzelnen Teiloberflächen der Hülle vorzuhalten. Insbesondere für die Orientierungsoptimierung bieten asymmetrische Formen ein deutlich größeres Potential als quaderförmige Strukturen, welche zudem aufgrund ihrer Rotationssymmetrien nur innerhalb eines schmalen Winkelbereichs optimiert werden können.

Dies legt die Entwicklung einer neuen solaren Architektursprache nahe, welche das bislang vorwiegend orthogonale Planungssystem verlässt, sich von den Vorgaben der Kategorisierung der Hülle in „Dach-“ und „Fassadenflächen“ löst und sich durch eine größere Diversität bezüglich Orientierung und Neigung der einzelnen Empfangsflächen ein deutlich größeres Optimierungspotential erschließt.

Es können bestimmte mathematisch-funktionale Zusammenhänge zwischen geometrischen und meteorologischen Größen identifiziert werden, welche Prognosen zur solaren Einstrahlung ohne aufwendige Berechnungen ermöglichen.

Im Verlauf der Untersuchung konnten verschiedene mathematisch-funktionale Zusammenhänge zwischen bestimmten geometrischen und meteorologischen Größen herausgearbeitet und in Formeln wiedergegeben werden. Besonders hervorzuheben sind der in dieser Arbeit entwickelte geometrische Formfaktor Oberfläche/Grundfläche O/G als Maß der erzielten Oberflächenvergrößerung (s. *Abschnitt 3.3*) und der meteorologische Kennwert Globalstrahlung/Gradtage E_{Glob}/G_t als Spiegel des *thermisch-solaren Fingerabdrucks* eines Standortes (s. *Abschnitt 3.3*).

Die bisher vernachlässigte Maßnahme der solaren Optimierung der Gebäudeform besitzt ein herausragendes globales Potential und ist bei Berücksichtigung im frühen Planungsstadium kostenneutral.

Ein wichtiges Ergebnis dieser Forschungsarbeit liegt in der Einschätzung des globalen Potentials der solaren Formoptimierung. In Abhängigkeit von der gewählten Parameterkombination liegt das Potential der Formoptimierung im Bereich von 20-70% gegenüber der nicht formoptimierten Referenzvariante (vgl. *Abschnitt 17.3*). Hinzu kommt das Potential der Rotationsoptimierung, welches im Bereich von 5-30% liegt. Bei konsequenter Anwendung der Methoden zu Anpassung von Gebäudeform und -orientierung könnte die energetische Effizienz von Gebäuden gegenüber der unoptimierten Referenzvariante leicht verdoppelt werden, was die Halbierung einer Negativbilanz bzw. die Verdopplung des Ertrages bei einer Positivbilanz bedeuten würde.

Die Optimierung von Form und Orientierung bewegt sich somit in Größenordnungen, die mit anderen Einzelmaßnahmen wie Verbesserung der Dämmung, Einbau von Lüftungsanlagen mit Wärmerückgewinnung oder Modernisierung der technischen Gebäudeausstattung durchaus vergleichbar ist. Hierbei ist jedoch hervorzuheben, dass die solare Formoptimierung anders als die konventionellen Maßnahmen nicht nur zur Reduktion von Negativbilan-

zen, sondern erstmals zu Positivbilanzen und der Erwirtschaftung von Energieüberschüssen führen kann. Als rein entwerfliche Maßnahme ist sie zudem kostenneutral.

Vor allem sollte man sich vor Augen führen, dass allein durch die Optimierung der Gebäudeorientierung deutlich höhere Effizienzsteigerungen erzielbar sind als beispielsweise durch die Wirkungsgradverbesserung von Photovoltaikzellen. Dabei ist die Orientierungsoptimierung ohne Mehrkosten realisierbar, während in die photovoltaische Wirkungsgradsteigerung Milliarden an Forschungsgelder fließen. Die Anbringung dieser teuren Technologie auf ungeeigneten Oberflächen, deren Anteil bei zunehmendem Belegungsgrad aus geometrischen Gründen zunimmt, mindert die errungenen Effizienzsteigerungen jedoch wieder. Diese Tatsache gewinnt zukünftig immer mehr an Bedeutung, da der solare Belegungsgrad von Gebäudehüllen aufgrund sinkender Preise sowie der wachsenden Notwendigkeit zur Gewinnung erneuerbarer Energien gegenüber heute stark zunehmen wird.

Die in dieser Arbeit durchgeführte globale Potentialstudie zeigt, dass diese Energieüberschüsse bereits bei einer heute technisch realisierbaren mittleren Parameterkombination (25% Belegung, 0.5 W/m²K Dämmstandard, 10% solarer Wirkungsgrad) für einen Großteil (77.7%) der Weltbevölkerung eintreffen können (vgl. Abschnitt 17.4).

Ein Grund hierfür ist, die inhomogene Verteilung der Bevölkerung auf dem Globus. Große Teile der Menschheit sind vornehmlich in den wärmeren Breitengraden angesiedelt. Hier befinden sich die meisten Entwicklungs- und Schwellenländer, die gegenüber den - meist in gemäßigten Breiten angesiedelten - Industrieländern, deutlich höhere Bevölkerungsdichten aufweisen. Äquatornahe Standorte profitieren sowohl von der vergleichsweise niedrigen thermischen Belastung durch das Außenklima als auch vom großen Strahlungsangebot.

Dies bedeutet, dass die Mehrheit der Weltbevölkerung schon bei Zugrundelegen des heutigen technologischen Standards unter derart günstigen meteorologischen und strahlungsphysikalischen Bedingungen lebt, dass bei konsequenter Anwendung von Form- und Orientierungsoptimierungsmaßnahmen in Verbindung mit einer verschattungsminimierenden und solarexponierenden Stadtplanung eine solare Vollversorgung über die Gebäudehülle möglich ist. Für die Gruppe der unkonventionellen Baukörper wäre dies bereits heute möglich.

Die Erschließung des aufgezeigten großen Potentials der Formoptimierung kann nur durch die Grundkompetenz der Berufsgruppe der Architekten und Planer erschlossen werden und liegt daher in ihrer Verantwortung.

Kapitel 19

Schlussbetrachtung

19.1 Das Werkzeug und sein Nutzen

Die in dieser Arbeit entwickelten Hilfestellungen zur energetischen Optimierung der Gebäudeform wenden sich an Architekten und Planer zur Unterstützung in der frühen Entwurfsphase. Das Formenranking kann dazu genutzt werden, um einen eigenen bestehenden Entwurf an einzelne Empfehlungen anzupassen. Es kann aber auch als Ideengeber und zur Stimulierung der eigenen Kreativität noch vor Anfertigen einer ersten groben Skizze dienen (*vgl. Abschnitt 14.2*).

Die Anwendung sowohl der Formenrankings als auch des Programms ist benutzerfreundlich. Die einzelnen Ergebnisse der Formenrankings sind graphisch übersichtlich angeordnet und die Handlungsempfehlungen direkt ablesbar. Zur Nutzung des Programms sind nur wenige Eingabedaten nötig, die in der Regel auch in sehr frühen Planungsphasen vorliegen.

Aufgrund der großen Vielfalt der untersuchten Formen unterschiedlichen Volumens und Kubatur, der verschiedenen weltweiten Standorte aller Klimate und Breitengradlagen sowie der großen Bandbreite an Parameterkombinationen zu Dämmstandard, solarem Wirkungsgrad und Belegungsgrad ist die Einordnung des eigenen Projektes für die meisten Entwurfsaufgaben möglich. Durch die gesetzten Untersuchungsgrenzen wie beispielsweise den Ausschluss von Fremd- und Eigenverschattung sowie die Reduktion der Formen auf geometrische Primärformen ist die realitätsnahe Abbildung jedoch auf allgemeine Betrachtungen beschränkt.

Für Neubauprojekte mit einer gewissen Freiheit bei der Platzierung auf dem Grundstück ist die Einhaltung der Entwurfsempfehlungen nahezu problemlos möglich – sofern in der entstehenden Form die innere Nutzung sinnvoll geregelt werden kann und keine Konflikte im städtebaulichen Umfeld oder übergeordneten Bebauungsplan entstehen. Für die Anwendung im An-, Um- und Weiterbau des Bestandes sowie unter engen städtebaulichen Vorgaben

und komplexen Verschattungssituationen ist die Anwendung der vorgestellten Optimierungsmethoden hingegen sehr erschwert.

Die Intention liegt jedoch nicht darin, dass alle gewonnenen Erkenntnisse dogmatisch und stringent bei jedem Bauprojekt, egal ob Neu- oder Altbau, angewendet werden müssen. Die theoretisch mögliche Verdopplung des Potentials ist sicher nur im Idealfall möglich. Wichtig ist jedoch, dass sich der Planer während der Entwurfsphase dieses auszuschöpfenden Potentials bewusst ist und entwerfliche Entscheidungen immer vor diesem Hintergrund und nicht aus Unwissenheit trifft.

19.2 Grenzen der Übertragbarkeit

Bei der vorliegenden Arbeit handelt es sich um eine systematische Studie, die aufgrund des großen Datenumfanges unter getroffenen Vereinfachungen, Idealisierungen und innerhalb bestimmter festgelegter Untersuchungsgrenzen erfolgt ist. Sie erhebt nicht den Anspruch, die Realität in ihrer Komplexität abbilden zu können. Insbesondere der Ausschluss der Eigen- und Fremdverschattung birgt bei unreflektierter Übertragung auf einen konkreten Bauplatz großes Fehlerpotential.

19.2.1 Realität des Entwurfsprozesses

Die Realität im Planungsablauf kennt viele Entwurfskriterien, für welche in iterativen Schleifen ein Konsens gefunden werden muss. Die architektonische Form ist ein Endprodukt, welches erst nach dem wiederholten Durchlaufen mehrerer Entscheidungsebenen gefunden wird. Sie schält sich als gemeinsamer Kern aus verschiedenen Teillösungen heraus, welche gewonnen werden aus:

- Bauvorschriften, Verordnungen und Gesetzen
- Standortanalyse zu Orientierung und Topografie
- konzeptionellen, praktischen und analytischen Design- und Entwurfsvorstellungen
- Funktions- und Ablaufschemata zu innerer Struktur, Grundrissorganisation und Raumabfolge
- geometrisch-morphologischer Organisation
- formalen, symbolischen, ästhetischen oder künstlerischen Intentionen
- gewählten Baumaterialien, Konstruktions- und Strukturprinzipien
- diversen Umweltaspekten
- eingesetzten Technologien und nicht zuletzt
- Bauherrenwünschen.

Diese Anforderungen können zu vielfältigen inneren und äußeren Konflikten bezüglich einer solaren Optimierung führen. Diese ist zwar nur ein Optimierungsaspekt unter vielen, jedoch

wird er gegenwärtig völlig vernachlässigt und sollte in der Rangfolge der Entwurfskriterien deutlich aufsteigen. Natürlich ist selbst eine solaroptimierte Form mit großen Energieüberschüssen keine gute Solararchitektur, wenn innerhalb der entstehenden Form keine sinnvollen Grundrisse organisiert werden können. Bei allem löblichen Bestreben nach energetischer Optimierung geht es in der Architektur doch primär darum, ein für Menschen lebenswertes Umfeld zu schaffen. Andererseits müssen sich Architekten bewusst werden, dass die beste Grundrissplanung hinfällig wird, wenn bei Verknappung fossiler Energieträger manche Häuser nicht mehr bewohnbar sein werden, sofern sie nicht über ausreichend Potential zur aktiven Energiegewinnung über die Gebäudehülle verfügen.

Diese Arbeit möchte einen Beitrag dazu leisten, dass der Schwerpunkt der Entwurfsarbeit wieder auf die Formfindung gelegt und Abstand von stereotypen Bauformen genommen wird. Die historische Anpassung der Gebäudeform an das lokale Klima und Strahlungsangebot muß im Sinne der aktiven Energiegewinnung hierzu ganz neu interpretiert werden. Der energetische Entwurfsaspekt ist zwar bereits bei vielen Planern ins Bewusstsein gerückt, es folgt jedoch eher selten eine entwurfliche Reaktion, sondern es wird vielmehr versucht, dieser Anforderung durch den Einsatz bestimmter Baumaterialien oder ausgeklügeltem technischen Ausbau zu begegnen. Energie als formbeeinflussendes Entwurfskriterium muß wieder ins Bewusstsein rücken und plastischen Ausdruck erhalten.

Es ist an der Zeit, architektonische Formen zu entwickeln, die innerlich UND äußerlich funktional und zukunftsfähig sind. Dies ist eine der großen und globalen Herausforderungen des 21. Jahrhunderts an die Berufsgruppe der Architekten und Planer.

19.2.2 Altbau-Neubau-Diskussion

Wie zuvor erläutert eignet sich die vorgestellte Methode primär für Neubauprojekte. Für Um-, An- und Weiterbauprojekte im Bestand kann sie jedoch beispielsweise dazu dienen, verschiedene Umbauvarianten untereinander zu vergleichen. Allerdings sind die nachträglichen Optimierungsmöglichkeiten zur Form und insbesondere der Orientierung des Gebäudes stark eingeschränkt.

Daher soll im Folgenden die Bedeutung des Neubaus umrissen werden.

Zunächst ist darauf hinzuweisen, dass der Neubau weltweit gesehen insbesondere in Entwicklungs- und Schwellenländern zukünftig den deutlich größeren Anteil ausmachen wird. Dies zeigen aktuelle Entwicklungen in China und Indien. Anstatt hier die nicht zukunftsfähigen Städte-, Siedlungs- und Gebäudeformen der Industrienationen unter zudem gänzlich anderen klimatischen Bedingungen zu kopieren, sollte die hohe Neubaurate vorausschauend dazu genutzt werden, Potentiale einer zukünftigen solaren Nutzung nicht von vornherein zu verhindern, sondern alles für eine spätere Nutzung sowie Nachrüstung vorzubereiten.

Auch die Tatsache, dass insbesondere Entwicklungsländer in Afrika und Asien aufgrund ihrer geografischen Lage und hohen Bevölkerungszahlen global betrachtet über besonders

große solare Potentiale verfügen wurde bereits in *Abschnitt 17.4* hingewiesen. Gleichzeitig haben sie auch den größten Nachholbedarf an Neubauten. Diese Länder sind im Gegensatz zu den Industrieländern noch nicht „gebaut“ und daher frei von „zementierten“ Fakten, welche aufgrund des hier geltenden a priori Prinzips die konsequente Anwendung solarer Entwurfskriterien stark behindern. Die primäre Eignung der solaren Formoptimierungskriterien ist somit für die Entwicklungs- und Schwellenländer zu erkennen. Dass aber selbst für Europa noch immer der Neubau – wenngleich mit abnehmender Tendenz – überwiegt, belegt die Übersicht zum realen Neubauvolumen in Europa in den Jahren 2001 und 2005 (s. *Tabelle 19.1*).

Land	2001	2005
Belgien	66,9	66,2
Dänemark	60,1	58,7
Deutschland	53,5	54,3
Finnland	60,7	57,6
Frankreich	50,2	48,6
Großbritannien	58,5	56,4
Irland	73,9	72,2
Italien	42,2	42,4
Niederlande	54,1	51,0
Norwegen	57,5	53,7
Österreich	92,5	90,0
Portugal	71,8	71,1
Schweden	44,5	43,5
Schweiz	60,0	61,3
Spanien	53,5	53,5
Westeuropa	56,2	55,0
Polen	65,5	65,5
Slowakei	72,1	71,2
Tschechien	76,7	77,1
Ungarn	79,7	79,5
Mittelosteuropa	73,9	73,7
Europa	56,9	55,8

Tabelle 19.1: Anteil des realen Neubauvolumens am Gesamtbauvolumen in Prozent für einzelne Länder der EU in den Jahren 2001 und 2005

(Quelle: Rußig (2003), Tabelle 3)

Das Verhältnis zwischen Neubau und Altbauerneuerung lag in Europa – gemittelt aus 15 west- und 4 mittelosteuropäischen Ländern im Jahr 2001 etwa bei 57% zu 43%, wobei die Neubaurate in Mittelosteuropa sogar bei 74% lag. Dies stützen auch die Angaben zur Ent-

wicklung des Bauvolumens in Europa 1998 bis 2008 des ifo-Instituts zur ECOCONSTRUCT-Winterkonferenz 2005 in Barcelona, welche für 2008 ein Neubauvolumen von ca. 700 Mrd. Euro (54%) gegenüber 590 Mrd. Euro (46%) für Altbauerneuerung prognostizierten. Für Europa ist somit insgesamt eine leicht abnehmende Tendenz beim Neubauvolumen zu erkennen: 57% in 2001, 56% in 2005 und 54% in 2008. Dennoch kann die Behauptung, Neubau würde nicht mehr in signifikanten Größenordnungen stattfinden, entschieden entkräftet werden. Dies bedeutet, dass die in dieser Arbeit vorgeschlagenen solaren Formoptimierungsprinzipien nicht nur für Entwicklungs- und Schwellenländer großes Potential bieten, sondern ebenfalls in nennenswertem Umfang für die Industriestaaten.

Auch bei Betrachtung der zeitlichen Dimension wird die Bedeutung des Neubaus deutlich. Nach Daten des statistischen Bundesamtes gelten für Deutschland folgende Annahmen:

- Jährlich werden durchschnittlich 0,5% des Baubestandes abgerissen.
- Rund 1% des Bestandes wird saniert – in der Regel energetische Sanierungen.
- Die Neubaurate liegt bei etwa 1%.

Aufgrund der Tatsache, dass die Neubaurate die Abrissrate übertrifft, vermehrt sich der deutsche Gebäudebestand jährlich um etwa 0,5%. Dies erscheint zunächst im Hinblick auf den stetigen Bevölkerungsrückgang nicht sinnvoll, erklärt sich jedoch durch die kontinuierliche Vergrößerung der Wohnfläche pro Einwohner sowie der sinkenden Anzahl von Personen je Haushalt.

Ausgehend von 39.550.600 deutschen Wohneinheiten im Jahr 2005 gemäß Statistischem Bundesamt ergibt sich bei Anwendung der drei oben genannten Raten zu Abriss, Sanierung und Neubau bis zum Jahr 2050 folgendes Bild (s. *Abbildung 19.1*):

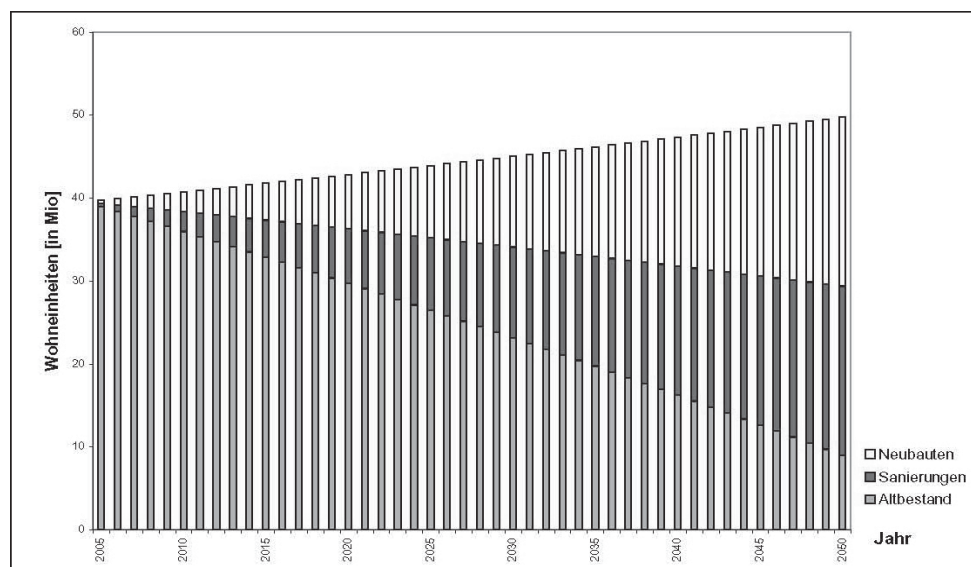


Abbildung 19.1: Entwicklungsprognose des Gebäudebestandes in Deutschland

(Grafik: eigene; Datenquelle: Statistisches Bundesamt)

Etwa im Jahr 2030 hat sich die Hälfte des Deutschen Gebäudebestandes durch Neubau oder Sanierung erneuert. Im Jahr 2050 gilt dies schon für mehr als 80% des heutigen Bestandes. Der Anteil der Neubauten, für welche die in dieser Arbeit vorgeschlagenen energetischen Formoptimierungsmaßnahmen unter Voraussetzung solarer Stadtplanung im Sinne der *Solar Rights* in vollem Umfang realisierbar sind, liegt im Jahr 2050 gegenüber 2005 bereits bei rund 40%.

Diese Grafik zur zeitlichen Dimension demonstriert, wie groß das Potential der solaren Formoptimierung selbst in einem als „gebaut“ geltenden Industriestaat wie Deutschland ist. Bei konsequenter Ausschöpfung der solarer Form- und Orientierungsoptimierungspotentiale allein im Neubau könnten im Jahr 2050 die von diesen Gebäuden erzielten Energieüberschüsse zur Deckung des restlichen Gebäudebestandes genutzt werden – insbesondere, wenn hier der Bedarf durch Verfolgung der Reduktionsziele im Bestand weiter drastisch gesenkt wird. Bedenkt man die Dimension des Energiebedarfs im Gebäudesektor von rund 40% des Jahresprimärenergiebedarfs (vgl. Fußnote 4 in Kapitel 1), wird deutlich, wie groß das sich hinter dieser kostenneutralen Optimierungsmaßnahme im Entwurfsprozess verbergende Potential auch für Deutschland ist. Das weltweite Potential kann sogar als noch deutlich höher angenommen werden.

19.3 Gesellschaftliche Bedeutung

Die gebaute Umwelt bildet die „Haut“ unserer Gesellschaft. Architektur prägt den sozialen Alltag und macht bestimmte Aspekte einer Gesellschaft sicht- und greifbar. Die Formsprache einer Architektur ist somit immer auch ein Abbild ihrer Gesellschaft. Die zukünftige Architektur sollte somit auch den in unserer Gesellschaft aufkeimenden Wunsch nach mehr Nachhaltigkeit abbilden.

Der alte Formenkanon vermag dieses nicht zu leisten, sondern bleibt hinter dem bereits in großen Gesellschaftsteilen vollzogenen geistigen Wandel zurück. Dabei könnte eine wegweisende Architektur aufgrund ihrer Omnipräsenz die Haltung einer Gesellschaft positiv beeinflussen. Durch solare Formsprache in Architektur und Stadtplanung könnte ein wichtiger Aspekt unseres gesellschaftlichen Wertesystems visualisiert werden und damit auch in anderen Bereichen als Vorbild dienen.

Das Festhalten am konventionellen Formen steht dieser Entwicklung jedoch entgegen. Die Installation auf bezüglich ihrer Ausrichtung nicht optimierten Oberflächen führt nämlich nicht nur zwangsweise zu energetischen Verlusten, sondern vor allem auch zur Infragestellung des neuen Erscheinungsbildes. Gebäudeform und energetische Nutzung harmonisieren nicht miteinander. Dieser Mangel wird vom Betrachter unterbewusst als Entwurfslüge wahrgenommen und verhindert die Akzeptanz der Integration erneuerbarer Energienutzung am Gebäude.

Ein entsprechend dem Gestaltungsleitsatz Sullivans „form follows function“ entworfenen Gebäude zeigt an, welche Energieform an ihm genutzt wird, wie beispielsweise bei einer alten Windmühle. Die aus diesen Überlegungen folgenden Entwurfsvorgaben im Sinne von „form follows energy“ können von konventionellen Formen nicht erbracht werden.

Erst die Adaption als Synthese von Technologie und Form führt zu einer neuen solaren Architektursprache. Die Solarkomponenten sind in dominanter Art in das Entwurfskonzept eingebunden und der baukörperliche Entwurf passt sich an die technologischen Vorgaben, um deren Effizienz zu steigern. Anders als bei der derzeit praktizierten Addition handelt es sich nicht um technologische, sondern um architektonische Lösungen, die neue baukörperliche Ausdrucksformen generieren. Historische Bauwerke zeigen bereits ideale Formen in perfekter Synergie von Klima, Sonne und Form – allerdings für die passive Solarnutzung. Aufgabe der heutigen Architektengeneration ist die Übersetzung dieser Prinzipien für eine aktive Energiegewinnung.

Da sich die in dieser Arbeit vorgeschlagene Methode der solaren Optimierung der Gebäudeform am besten für den Neubau eignet, ist ihre gesellschaftliche Bedeutung insbesondere im Hinblick auf die Entwicklungs- und Schwellenländer deutlich. Anders als die Industriestaaten werden sie größtenteils noch nicht durch „betonierte“ Fakten des Baubestandes für die nächsten Jahrzehnte bei der Realisierung einer solar geprägten Architektur- und Stadtplanung behindert. Das derzeit praktizierte Kopieren der westlichen von Kuben geprägten Architektursprache jedoch „verbaut“ insbesondere in den Entwicklungsländern den Weg in eine solare Zukunft. Dabei wäre hier aufgrund der geographischen Lage das auszuschöpfende Optimierungspotential solarer Formen am größten. Die unkonventionellen Formen sind hier doppelt so leistungsfähig wie die importierten konventionellen Formen! Die westliche Architektursprache, die sich durch Kompaktheit und orthogonale Planungsraster auszeichnet, erzielt in den Entwicklungsländern sogar noch schlechtere Ergebnisse als in ihren Heimatländern und erweist sich somit als nicht zukunftsfähig.

Doch gerade die armen Länder sind auf eine schnelle und großangelegte Umstellung auf ein auf erneuerbaren Energien basierendes Energieversorgungssystem angewiesen. Ihre sich nach westlichem Vorbild im Aufbau befindliche Industrie ist von einer fossilen Energieversorgung abhängig. Ohne die Ausschöpfung des gewaltigen solaren Potentials in diesen Ländern wird sich ihre Industrie jedoch voraussichtlich niemals voll entfalten können, da mit zunehmender Verknappung des Erdöls die Weltmarktpreise weiter ansteigen und nur die meistbietenden Staaten den Zuschlag erhalten werden.

Für das Festhalten am rechten Winkel – vor allem aber für seinen Export in die Entwicklungsländer – zahlen wir einen hohen Preis: er kostet uns die Chance auf eine solare Zukunft.

Ein weiteres Kriterium zum Aufbau einer wettbewerbsfähigen Industrie in den zumeist äquatornahen Entwicklungs- und Schwellenländern ist die Schaffung eines komfortablen Wohn- und Arbeitsklimas. Wie wichtig Kühlung für eine Industrialisierung ist, zeigt die Abhängigkeit

menschlicher Leistungsfähigkeit von der Temperatur: bei 20 °C ist der Mensch zu 100 % leistungsfähig, bei 28 °C werden nur noch 70 % der Leistungsfähigkeit erreicht und bei 33 °C sinkt sie auf 50 %. Der breite Einsatz konventioneller Klimaanlage führt jedoch zu einem immensen Primärenergiebedarf und häufig zum Zusammenbruch der Stromversorgung. Faktoren wie die prognostizierte Bevölkerungsexplosion in diesen Regionen, wachsender Komfortanspruch sowie die erwartete Klimaerwärmung werden diesen Trend verstärken¹⁰⁷. Vor diesem Hintergrund wird der Stellenwert der Forschung an solaren Klimatisierungskonzepten besonders deutlich, aber auch der Einfluss eines an die lokalspezifischen Klimabedingungen angepassten Gebäudeentwurfes. Hier sollte gegebenenfalls die formulierte Forderung nach einer maximalen solaren Gebäudeexposition hinter den natürlichen Klimatisierungskonzepten, wie sie anhand historischer Bauformen in *Kapitel 2* besprochen wurden, zurücktreten. Die Vermeidung von Überhitzung hat hier Priorität vor der Energiegewinnung, da diese Energie letztlich unter großem technischen Aufwand und hohen Umwandlungsverlusten wieder zur Klimatisierung eingesetzt werden müsste.

19.4 Ausblick und Schlusswort

Ziel der vorliegenden Arbeit war es, zunächst das Potential abzuschätzen, welches durch eine solare Optimierung von Gebäudeformen weltweit zur Verfügung steht. Die durchweg vielversprechenden Resultate lassen es sinnvoll erscheinen, die Untersuchung von der Studie auf die Entwicklung einer computergestützten Entwurfshilfe zu erweitern. Ein solches Tool sollte die bisherigen Lücken innerhalb der Betrachtungsgrenzen schließen – d.h. die Berücksichtigung von Fremd- und Eigenverschattung, städtebauliche Randbedingungen, baukonstruktiven Herausforderungen und Konflikten zu innerer Nutzung ermöglichen.

Nach erfolgter Eingabe aller Randbedingungen des konkreten Bauplatzes sollte das Programm eine solar optimierte, dreidimensionale Antwort liefern, welche quasi wie ein Rohling als Ausgangspunkt für weitere Planungsschritte dient. Dabei kann die an diesem konkreten Bauplatz maximal erzielbare Einstrahlung des Computerentwurfes als Referenzwert zur Überprüfung derjenigen Entwurfsvarianten genommen werden, welche nach der weiteren Überarbeitung durch den Architekten unter Berücksichtigung der übrigen Entwurfsaspekte entstanden sind.

Desweiteren werden tiefergehende Studien zu den gefundenen mathematisch-funktionalen Zusammenhängen zwischen bestimmten formgeometrischen- und standortspezifischen sowie energetischen Größen als sinnvoll erachtet. Insbesondere die Untersuchungen zum *Formfaktor der relativen Oberflächenvergrößerung O/G* , zum *thermisch-solaren Fingerab-*

¹⁰⁷ vgl. [Rullán Lemke, C. / Stein, B. (2008)]

druck E_{Glob} / G_t und zum solaren Formwirkungsgrad $\eta_{F,s}$ werden voraussichtlich zu weiteren interessanten Ergebnissen führen.

Die einzelnen Lösungsschritte zur Beantwortung der aufgestellten Forschungsfrage bestehen für diese Arbeit in

- der Ermittlung des energetischen Potentials durch solare Formoptimierung,
- der Ableitung globaler Prinzipien,
- der Ableitung genereller standortspezifischer Entwurfsempfehlungen und
- der Entwicklung von Kennzahlen und Formeln.

Die Ergebnisse der Arbeit zeigen, dass die solare Formoptimierung weltweit sehr großes Potential besitzt, um die energetische Einstrahlung auf die Gebäudehüllen in Quantität, Qualität und insbesondere der Konzentration deutlich zu erhöhen.

Diese allein durch Adaption der Gebäudeform erzielbare optimale Exposition bestimmter Obeflächenanteile ist zwingende Grundvoraussetzung für eine zukünftige effiziente Nutzung solarer Technologien am Gebäude.

Es wurde der Beweis erbracht, dass für die energetische Optimierung des Gebäudesektors, welcher in vielen Zukunftsstudien als Schlüsselsektor herausgestellt wird, weitere Werkzeuge zur Verfügung stehen, die über die üblichen Maßnahmen zur Verbesserung der Bau- und Anlagentechnik hinausgehen und das Potential besitzen, den Gebäudesektor innerhalb weniger Jahrzehnte von einem der Hauptenergieverbraucher in einen Energieerzeuger zu verwandeln. Gebäudehüllenintegrierte solare Technologien führen somit zu einer radikalen Neubewertung der Rolle des Gebäudesektors bei der Bewältigung des zentralen Problems des 21. Jahrhunderts: der Substitution des fossilen Energieversorgungssystems. Er ist offensichtlich ein wichtiges Puzzleteil im Gesamtbild eines nachhaltigen Zukunftsszenarios. Die Entwicklung einer solaren Formensprache könnte einen grundlegenden Baustein auf dem Weg in eine solare Zukunft darstellen. Vor allem kann diese Methode dazu beitragen, den Zeitpunkt energetischer und finanzieller Rentabilität deutlich vorzuverlagern und damit solare Lösungen auch in der Breite attraktiver zu machen.

In dieser Arbeit konnte gezeigt werden, dass durch entsprechende Überlegungen in der frühen Planungsphase allein durch die solare Entwurfsoptimierung der Gebäudeform Ertragssteigerungen von über 100% gegenüber der Referenzvariante 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 erkaufte werden muss, wird das Potential der solaren Formoptimierung besonders deutlich. Die vorangegangenen Anstrengungen zur Steigerung des Wirkungsgrades einer Photovoltaik-Zelle werden zudem nachträglich bedeutungslos, wenn an Gebäuden nicht durch einen optimierten Entwurf großflächig ausreichend geeignete solare Empfangsflächen zur Verfügung gestellt werden. Die der Form- und Orien-

tierungsoptimierung immanente Wirkungsgradsteigerung der energetischen Effizienz einer Gebäudeform übersteigt die der Wirkungsgradsteigerung solarer Technologien um ein Vielfaches und ist zudem sehr preiswert – denn die Entwicklung von Technologien ist immer teurer als die Gestaltung von Formen.

Somit ist 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, 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.

Die vorgestellten Ergebnisse sind daher eine Aufforderung an Architekten und Planer zur Entwicklung kreativer Zukunftslösungen im Spannungsfeld von SolarFormen & EnergieArchitektur, SolarArchitektur & EnergieFormen sowie ArchitekturForm & SolarEnergie, um Energiedesign im Sinne von „form follows energy“ zu gestalten.

*Solar Architecture is not about fashion,
it is about survival.*

(Sir Norman Foster)

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2.1:	Batak-Haus zur Mittagszeit.....	10
Abbildung 2.2:	Batak-Haus vor- und nachmittags	10
Abbildung 2.3:	Kasbah zur Mittagszeit	11
Abbildung 2.4:	Kasbah vor- und nachmittags	12
Abbildung 2.5:	Megaron im Sommer (Längsschnitt und Grundriss)	13
Abbildung 2.6:	Megaron im Winter (Längsschnitt und Grundriss)	13
Abbildung 2.7:	Rekonstruktion und Struktur der griechischen antiken Stadt Priene.....	14
Abbildung 2.8:	Griechisches Hofhaus im Winter (Schnitt)	15
Abbildung 2.9:	Griechisches Hofhaus im Sommer (Schnitt).....	15
Abbildung 2.10:	Gläsernes Hochhaus in Boston, USA.....	16
Abbildung 2.11:	Zwei gegensätzliche Formoptimierungsprinzipien solarer Architektur zur passiven oder aktiven Nutzung.....	18
Abbildung 3.1:	Formoptimierung einer Automobilkarosse im Windkanal.....	20
Abbildung 3.2:	Beispiel der Formgebung eines Gebäudes nach Vorgaben der Sonnenbahngeometrie; BP Solar Showcase, Port Talbot	23
Abbildung 3.3:	Beispiel der Formgebung eines Gebäudes nach Vorgaben der Windrichtungsgeometrie; Twin Tower (Entwurf: M. Sehmsdorf, 1999).....	24
Abbildung 3.4:	Prinzip der Oberflächenvergrößerung in Analogie: Chlorophyllanordnung im Chloroplasten / Struktur Mannhattans	25
Abbildung 3.5:	Beispiel für eine nachträgliche Addition solarer Technologien	28
Abbildung 3.6:	Bespiele für die Adaption solarer Technologien	29

Abbildung 3.7:	Schematische Darstellung der Wechselbeziehung von Gebäudeform und Gebäudeenergiebilanz.....	30
Abbildung 3.8:	Schematische Darstellung der gegenseitigen Beeinflussung von Verlustminimierungsstrategie und Gewinnmaximierungsstrategie.....	33
Abbildung 4.1:	Prozentuale Veränderungen der Hüllflächengröße bei Variation eines konstanten Volumens bzw. unterschiedlicher Anordnung einer Anzahl Wohneinheiten.....	36
Abbildung 4.2:	Formenreihe Turm – Würfel – Halle gemäß der Umformungsvorschrift „Variation der Höhe über quadratischem Grundriss bei konstantem Volumen“.....	37
Abbildung 4.3:	Diagramm für A/V-Graphen der Formenreihe Turm – Würfel – Halle für verschiedene Volumina	38
Abbildung 4.4:	Gebäudeformenstudie in verschiedenen Klimaten	39
Abbildung 4.5:	Untersuchung des Einflusses von Gebäudelänge, Gebäudetiefe und Geschossigkeit auf das A/V-Verhältnis	40
Abbildung 4.6:	Reflektion an schleifend beschienenen Gebäudeoberflächen.....	42
Abbildung 4.7:	Absorption reflektierter Strahlung durch Flächen zweiter Ordnung	43
Abbildung 4.8:	Ermittlung der wirksamen aktiven Fläche	43
Abbildung 4.9:	Entwurfsgütezahl für unterschiedliche Gebäudeformen mit gleicher BGF von 65m ²	45
Abbildung 4.10:	Diagramm für EGZ-Graphen der Formenreihe Turm – Würfel – Halle für verschiedene Volumina	46
Abbildung 4.11:	Graphische Darstellung der EGZ-Prognose (senkrechte Projektion) für verschiedene Teiloberflächen eines Gebäudes mit einem 10° geneigten Pultdach im Vergleich zum tatsächlichen Einstrahlungspotential	47
Abbildung 4.12:	Graphische Darstellung der widersprüchlichen Aussagen von A/V und EGZ (senkrechte Projektion) bei Umformung eines Würfels in einen Quader gleichen Volumens oder bei der Rotation eines Würfels	48
Abbildung 4.13:	Zwei gegensätzliche Prinzipien des Wasserrechts.....	50
Abbildung 4.14:	Die Prinzipien der Solar Rights als Analogie zum Wasserrecht	51
Abbildung 4.15:	Aus Tagesgrenzen allein erzeugte Form.....	52
Abbildung 4.16:	Aus Jahresgrenzen allein erzeugte Form	52
Abbildung 4.17:	Aus Tages- und Jahresgrenzen integrierte Form	53
Abbildung 4.18:	Ganztägliche Sommer- und Winterstrahlung.....	53
Abbildung 4.19:	Verfügbare Energie unterschiedlicher Zeitfenster (Tagessymmetrie).....	54
Abbildung 4.20:	Verfügbare Energie unterschiedlicher Zeitfenster (Jahres- und Tagesasymmetrie).....	55

Abbildung 4.21:	Einfluss der Grundstücksorientierung auf Höhe und Volumen	56
Abbildung 4.22:	Beeinflussung der relativen Sonnenposition durch Rotation des Grundstücks.....	57
Abbildung 4.23:	Zeichenmethode bei rotiertem Rechteckgrundstück	58
Abbildung 4.24:	Mit dem Programm Solvelope berechneter Solar Envelope	58
Abbildung 4.25:	Konstruktion des Solar Rights Envelopes (SRE) mit SustArc.....	59
Abbildung 4.26:	Konstruktion des Solar Collection Envelopes (SCE) mit SustArc	60
Abbildung 4.27:	Synthese des Solar Volume (SV) aus SRE und SCE mit SustArc	60
Abbildung 4.28:	Das orthogonale US Grid sowie das diagonale Spanish Grid in Los Angeles, USA.....	61
Abbildung 4.29:	US Grid.....	61
Abbildung 4.30:	Spanish Grid.....	62
Abbildung 4.31:	Solar Envelope und städtebaulicher Entwurf (orthogonales Raster)	64
Abbildung 4.32:	Solar Envelope und städtebaulicher Entwurf (freie Form)	64
Abbildung 4.33:	Parameterstudie für „Variation der Grundfläche bei konstanter Höhe“	65
Abbildung 4.34:	Parameterstudie für „Variation der Höhe bei konstanter Grundfläche“	66
Abbildung 5.1:	Übersichtsschema zum methodischen Vorgehen	72
Abbildung 6.1:	Generierung unterschiedlichster Formen aus einer konstanten Grundmasse mit 1.000m ³ Volumen	73
Abbildung 6.2:	Globale Land-Sea-Mask.....	85
Abbildung 6.3:	Globale Klimakarte der 12 temperaturrelevanten Klimazonen bestehend aus 64.800 graphisch interpretierten einzelnen Datenpunkten mit Einordnung nach Breitengradgürteln	86
Abbildung 6.4:	Die festgelegten 42 repräsentativen Standorte als Vertreter aller global identifizierten Breitengrad-Klimazonen-Kombinationen	92
Abbildung 6.5:	Die drei Dimensionen der Parametermatrix und die Zeitachse	97
Abbildung 9.1:	Sonnenspektrum mit Kurven der Extraterrestrischen und Terrestrischen Sonnenstrahlung sowie selektiver Absorption	118
Abbildung 9.2:	Schalenmodell der Erdatmosphäre	119
Abbildung 9.3:	Modellierung der Direkt- und Diffusstrahlung sowie Mehrfachreflexion in der wolkenlosen RNC-Atmosphäre	120
Abbildung 9.4:	Rayleigh-Streuung an Molekülen	121
Abbildung 9.5:	Mie-Streuung an Aerosolen.....	122
Abbildung 9.6:	Mehrfachreflexionen zwischen Erdoberfläche und Himmel.....	122

Abbildung 9.7:	Strahlungsphysikalische Vorgänge in der Atmosphäre unter verschiedenen Bedingungen	123
Abbildung 9.8:	Weglänge in Abhängigkeit vom Zenitwinkel	125
Abbildung 9.9:	Die zehn Wolkentypen nach phänomenologischer Klassifikation	132
Abbildung 9.10:	Jahreswerte der Globalstrahlung auf eine Horizontale in $\text{kJ/m}^2\text{a}$	135
Abbildung 9.11:	Die drei Hauptwinkel φ , ω und δ	137
Abbildung 9.12:	Die zusätzlich benötigten Winkel θ_z , α und a_s	137
Abbildung 9.13:	Einfallswinkel der Direktstrahlung auf eine beliebig geneigte Empfangsfläche K	141
Abbildung 11.1:	Monatliche Globalstrahlung auf die Horizontale in Hamburg.....	163
Abbildung 11.2:	Monatliche Globalstrahlung auf eine 30° bzw. 60° geneigte südorientierte Empfangsfläche in Hamburg.....	164
Abbildung 11.3:	Monatliche Globalstrahlung auf eine senkrecht stehende südorientierte Empfangsfläche in Hamburg.....	165
Abbildung 11.4:	Monatlicher Clearness Index für den Standort Hamburg.....	165
Abbildung 11.5:	Monatliche Globalstrahlung auf eine 90° geneigte nordorientierte Empfangsfläche in Hamburg.....	166
Abbildung 11.6:	Monatliche Globalstrahlung auf eine 90° geneigte Empfangsfläche mit entweder westlicher oder östlicher Orientierung in Hamburg.....	168
Abbildung 12.1:	Maske zur Eingabe der allgemeinen Gebäudecharakteristika.....	172
Abbildung 12.2:	Datenblatt zur Gebäudeeingabe.....	173
Abbildung 12.3:	Maske zur Formeingabe mit dreidimensionalem Zeichenfeld und Verwaltung der Polygonzüge.....	174
Abbildung 12.4:	Maske zur Standorteingabe mit Verknüpfung zur Ortsdatenbank des World Gazetteers....	175
Abbildung 12.5:	Verknüpfung der Ortsdatenbank des World-Gazetteers mit der Satellitendatenbank SSE der NASA; hier: Koordinatenübergabe	176
Abbildung 16.1:	Funktionaler Zusammenhang zwischen Gradtagen eines Standortes und der erzielbaren Jahresenergiebilanz für sechs verschiedene Formen unter der Parameterkombination schlechter Dämmstandard ($1.0\text{W/m}^2\text{K}$), schlechter solarer Wirkungsgrad (5%), geringer Belegungsgrad (25%).....	209
Abbildung 16.2:	Funktionaler Zusammenhang zwischen dem Quotienten aus Globalstrahlung und Heizgradtagen eines Standortes und der erzielbaren Jahresenergiebilanz für sechs verschiedene Formen unter der Parameterkombination schlechter Dämmstandard ($1.0\text{W/m}^2\text{K}$), schlechter solarer Wirkungsgrad (5%), geringer Belegungsgrad (25%).....	210

Abbildung 16.3:	Funktionaler Zusammenhang zwischen der durch das A/V-Verhältnis repräsentierten Kompaktheit einer Form und erzielbarer Gesamteinstrahlung auf die Gebäudeoberfläche für vier verschiedene Städte bei einem Belegungsgrad von 100%.....	213
Abbildung 16.4:	Funktionaler Zusammenhang zwischen der Größe der Oberfläche einer Form und der erzielbaren Jahresenergiebilanz für vier verschiedene Städte unter der Parameterkombination schlechter Dämmstandard ($1.0\text{W/m}^2\text{K}$), schlechter solarer Wirkungsgrad (5%), geringer Belegungsgrad (25%).....	214
Abbildung 16.5:	Funktionaler Zusammenhang zwischen dem Quotienten aus Oberfläche und Grundfläche einer Gebäudeform und dem Quotienten aus Einstrahlung auf die Oberfläche zur Globalstrahlung bei einem Belegungsgrad von 25%	215
Abbildung 16.6:	Funktionaler Zusammenhang zwischen der Größe der Grundrissfläche einer Form zum Quotienten aus Einstrahlung auf die Oberfläche zur Globalstrahlung bei einem Belegungsgrad von 25%	217
Abbildung 17.1:	Klimadiagramme mit Angaben zu monatsmittlerer Lufttemperatur und Monatssumme des Niederschlages für Station Nord und Dakar	219
Abbildung 17.2:	Diagramme der Monatssummen für Heiz- und Kühlgradtage für Station Nord und Dakar ..	219
Abbildung 17.3:	Diagramme der Jahreskurven der aus den monatlichen Heiz- und Kühlgradtagen berechneter Transmissionsverluste für drei verschiedene Wärmedurchgangskoeffizienten	220
Abbildung 17.4:	Diagramme der Jahreskurven für Boden-Albedo, Bewölkungsgrad und Clearness Index für Station Nord und Dakar	221
Abbildung 17.5:	Diagramme der Jahreskurven für Extraterrestrische Strahlung, Globalstrahlung, Direktstrahlung und Diffusstrahlung für Station Nord und Dakar	222
Abbildung 17.6:	Diagramme der Tageskurven für Bewölkungsgrad und Clearness Index für Station Nord und Dakar.....	223
Abbildung 17.7:	Diagramme der Tageskurven für Extraterrestrische Strahlung, Globalstrahlung, Direktstrahlung und Diffusstrahlung für Station Nord und Dakar	224
Abbildung 17.8:	Strahlungsdiagramme der Jahressumme einfallender Globalstrahlung auf Empfangsflächen beliebiger Orientierung und Neigung mit markierten orientierungsabhängigen Maximalwerten für Station Nord und Dakar.....	225
Abbildung 17.9:	Windrosendiagramme der orientierungsabhängigen optimalen Neigungswinkel potentieller Empfangsflächen für Station Nord und Dakar. Orientierungen für Empfangsflächen, die mindestens 95% des örtlichen Maximalwertes erzielen, sind mit Rauten markiert. Dieser für eine solare Entwurfsoptimierung interessante Sektor ist zudem flächig in Grau hervorgehoben	226

Abbildung 17.10:	Diagramme der Jahreskurven für Transmissionsverluste und solare Gewinne für jeweils drei verschiedene Transmissionskoeffizienten bzw. Technologiewirkungsgrade für Station Nord und Dakar.....	227
Abbildung 17.11:	3D-Diagramme als 3x3-Matrix der Jahressummenbilanzen aus Transmissionsverlusten und solaren Gewinnen für jeweils drei verschiedene Transmissionskoeffizienten bzw. Technologiewirkungsgrade für Station Nord und Dakar	228
Abbildung 17.12:	Formenranking nach erzielbarer Einstrahldichte auf die besten 33% der Gebäudehülle für Station Nord und Dakar	231
Abbildung 17.13:	Formenranking nach erzielbarer Energiebilanz auf den besten 33% der Gebäudehülle bei mittlerem Transmissionskoeffizient und Technologiewirkungsgrad für Station Nord und Dakar	232
Abbildung 17.14:	Flächenranking nach Einstrahlungsdichte zur Orientierungsoptimierung für eine maximale Gesamteinstrahlung auf die jeweils günstigsten 25% der Gebäudehülle	236
Abbildung 17.15:	Ergebnisse [%] der Rotationsstudie nach Parametern und Belegungsgrad, differenziert in Form- und Rotationsoptimierung	238
Abbildung 17.16:	Ergebnisse der bevölkerungsgewichteten Potentialstudie	241
Abbildung 19.1:	Entwicklungsprognose des Gebäudebestandes in Deutschland	255

Tabellenverzeichnis

Tabelle 3.1:	Technologische Nutzungsmöglichkeiten der verschiedenen Erscheinungsformen erneuerbarer Energiequellen mit Bezug zur Gebäudeform	22
Tabelle 4.1:	Übersicht aller Ausgangswinkel und der sich ergebenden Neigungswinkel je Fassade (hervorgehoben).....	57
Tabelle 4.2:	Anforderungen an Straßen in Abhängigkeit der Klimazone.....	63
Tabelle 6.1:	Die vier gewählten Grundvolumina mit den von ihnen repräsentierte typischen Gebäudearten	79
Tabelle 6.2:	Klassifizierung der fünf übergeordneten Klimazonen anhand typischer Verteilung monatsmittlerer Lufttemperaturen	82
Tabelle 6.3:	Klassifizierung des Klimatyps anhand der jährlichen Niederschlagsmenge und –verteilung. 83	
Tabelle 6.4:	Klassifizierung des Klimauntertyps anhand der Einordnung von Sommerwärme und Winterkälte.....	83
Tabelle 6.5:	Überblick der möglichen Kombinationen von übergeordneter <i>Klimazone</i> und niederschlagsabhängigem <i>Klimatyp</i> sowie temperaturabhängigen <i>Klimauntertyp</i>	84
Tabelle 6.6:	Auflistung der für diese Arbeit gewählten 12 temperaturrelevanten Klimazonen und ihres jeweiligen thermischen Fingerabdruckes.....	84
Tabelle 6.7:	Matrix der 42 globalen Kombinationen von Breitengradgürteln und temperaturrelevanten Klimazonen auf der Nordhalbkugel	87
Tabelle 6.8:	Matrix der globalen Bevölkerungsverteilung nach Breitengradgürtel und Klimazone (inklusive gespiegelt integrierter Südhalbkugel)	91
Tabelle 6.9:	Liste der 42 repräsentativen Städte mit Bevölkerungsgewichtung sowie Angaben zu Geo-Koordinaten für die Abfrage der meteorologischen NASA-Datensätze	93

Tabelle 6.10:	Festlegungen zu Dämmstandards als jeweils mittlerer thermische Qualität der Gebäudehülle	94
Tabelle 6.11:	Festlegungen zu Wirkungsgraden einer solaren Technologie.....	95
Tabelle 6.12:	Festlegungen zu Belegungsgraden mit solaren Technologien	96
Tabelle 9.1:	Die zehn Wolkentypen nach phänomenologischer Klassifikation	132
Tabelle 9.2:	Liste der monatsmittleren Tage jeweils mit zugehöriger Deklination	139
Tabelle 10.1:	Überblick über meteorologische Messgrößen und Messinstrumente	153
Tabelle 10.2:	Auswahl an Datenbanken für Solarstrahlung	158
Tabelle 10.3:	Systematische Abweichung der Satelliten- zu Bodenstationsmessungen.....	161
Tabelle 11.1:	Stündliche Globalstrahlung auf eine horizontale Empfangsfläche am Standort Hamburg in [kWh/m ²]	167
Tabelle 12.1:	Liste der für jeden Standort ausgelesenen meteorologischen Größen.....	177
Tabelle 14.1:	Erläuterung zu den roten Positionsnummern für Teil 1	181
Tabelle 14.2:	Erläuterung zu den roten Positionsnummern für Teil 4	182
Tabelle 14.3:	Gegenüberstellung günstiger und ungünstiger Formen für den Standort Madrid bei der gewählten Parameterkombination (33% Belegungsgrad, 0.5W/m ² K Dämmstandard, 10% solarer Wirkungsgrad) zur Verdeutlichung der Entwurfsempfehlungen bezüglich einzelner geometrischer Formkriterien.....	183
Tabelle 14.4:	Gegenüberstellung günstiger und ungünstiger Formen am Standort Madrid bei gewählter Parameterkombination (33% Belegungsgrad, 0.5W/m ² K Dämmstandard, 10% solarer Wirkungsgrad) zur Vergleichung erzielbarer Energieüberschüsse	185
Tabelle 16.1:	Übersichtstabelle untersuchter mathematisch-funktionaler Zusammenhänge zwischen standortspezifischen, formspezifischen und energetischen Größen	207
Tabelle 16.2:	Listen aller 42 Standorte, jeweils sortiert nach thermisch-solarem Fingerabdruck E_{glob}/G_t , Globalstrahlungsangebot E_{glob} und Gradtagen G_t	212
Tabelle 19.1:	Anteil des realen Neubauvolumens am Gesamtbauvolumen in Prozent für einzelne Länder der EU in den Jahren 2001 und 2005.....	254

Literaturverzeichnis

Albizzati, E. / Rosetti, G. / Alfano, O. (1997):

Measurements and predictions of solar radiation incident on horizontal surfaces at Santa Fe, Argentina, Renewable Energy, 11, 4 469, 1997

Albizzati, E. (1997):

Evaluación de la radiación solar incidente sobre la región centro-litoral de la República Argentina, Centro de Publicaciones de la Universidad Nacional de Litoral, Argentina, 1997

Albizzati, E. D. (2001):

Radiación solar diaria promedio mensual sobre superficies inclinadas calculada con modelos isotrópicos y anisotrópicos, Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente Vol. 5, Argentinien, 2001

Alnaser, W. E. / Eliagonbi, B. / Al-Kalak, A. (2004):

First solar radiation atlas for the Arab world, Renewable Energy 29, S.1085-1107, 2004

Andersen, P. (1980):

Calculation of Monthly Average Insolation on Tilted Surfaces, Solar Energy 287, 1980

Arbeitsgemeinschaft für sparsamen und umweltfreundlichen Energieverbrauch (ASUE) (Hrsg.) (2001):

EnEV Checkliste für die Neubauplanung, Verlag Rationeller Erdgaseinsatz, Kaiserslautern, 2001

Auer, G. / Dimmler, B. / Lüling, C. (Hrsg.) (2000):

Architektur unter Strom – Photovoltaik gestalten, Taschenbuch - Technische Universität Berlin, Berlin, 2000

Balcomb, J. D. / McFarland, R. D. (1978):

A simple empirical method for estimating the performance of a passive solar heating building of the thermal storage wall type, 2nd National Passive Solar Conference, Philadelphia, 1978

Beckmann, W. A. / Klein, S. A. / Duffie, J. A. (1977):

Solar heating designs, Wiley Interscience, New York, 1977

Bendt, P. / Collares-Pereira, M. / Rabl, A. (1981):

The frequency distribution of daily insolation values, Solar Energy 27, S.1-5, 1981

Bossel, U. (1979):

Kosinus-Stunden – Solartechnisches Tabellenwerk zur Optimierung von Solarsystemen und Berechnung von Kollektorleistungen und Einstrahlungen auf geneigte Flächen und Gebäude, Verlag C. F. Müller, Karlsruhe, 1979

Bourges, B. (Editor) (1992):

Climatic Data Handbook for Europe – Climatic Data for the design of solar energy systems, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 1992

Brown, G.Z. (2001):

Sun, wind & light: architectural design strategies, John Wiley & Sons, New York, ²2001

Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi) (2006):

Kurzbericht: Verfügbarkeit und Versorgung mit Energierohstoffen, (online im Internet: <http://www.bmwi.de/BMWi/Redaktion/PDF/E/energierohstoffbericht>; letzter Zugriff: 06.05.2009)

Capeluto, I. G. / Shaviv, E. (1999):

Modeling the design of urban fabric with solar rights considerations, IBPSA99, Kyoto, Japan (pp. 1341-1347), 1999

Capeluto, I. G. / Shaviv, E. (1999):

On the use of Solar Volume for determining the urban fabric, IBPSA99, Kyoto, Japan (pp. 1341-1347), 1999

Coffari, E. (1977):

The Sun and the Celestial Vault, Solar Engineering, A.A.M. Sayigh, Academic Press, New York, 1977

Collares-Pereira, M. / Rabl, A. (1979a):

The Average Distribution of Solar Radiation – Correlations between Diffuse and Hemispherical and between Daily and hourly insolation Values, Solar Energy 22(2), S.155-164, 1979

Collares-Pereira, M. / Rabl, A. (1979b):

Simple Procedure for predicting long term average energy delivery of solar collectors, Solar Energy 23, S.223-233, 1979

Collares-Pereira, M. / Rabl, A. (1979c):

Derivation of method for predicting long term average performance of nonconcentrating and concentrating solar collectors, Solar Energy 23, S.235, 1979

Daniels, K. (1999):

Technologie des ökologischen Bauens – Grundlagen und Maßnahmen, Beispiele und Ideen, Birkhäuser, Basel, ²1999

Deilmann, H. / Kirschenmann, J.C. / Pfeiffer, H. (1979):

Wohnungsbau: Nutzungstypen, Grundrisstypen, Wohnungstypen, Gebäudetypen, Dokumente der modernen Architektur 8, Krämer Verlag, Stuttgart, ³1979

Deutscher Bundestag – Enquete-Kommission (2000):

Nachhaltige Energieversorgung unter den Bedingungen der Globalisierung und der Liberalisierung, Berlin, 2000

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (Hrsg.) (2006):

Validierung und Optimierung der satellitengestützten Bestimmung solarer Direktstrahlung mit Meteosat – Abschlussbericht zum BMU-Projekt VALISAT/SOLEMI Teilprojekt AP2, Mitteilung 2006-01, als Manuskript gedruckt vom Bibliotheks- und Informationswesen des DLR, Köln, 2006

Dickinson, W. C. / Cheremisinoff, P. N. (Editors) (1980):

Solar Energy Technology Handbook – Part A: Engineering Fundamentals, Marcel Dekker, Inc. New York, 1980

Dietze, G. (1957):

Einführung in die Optik der Atmosphäre, Akademische Verlagsgesellschaft Geest und Portig K.G., 1957

Doberenz, W. / Kowalski, T. (1999):

Visual Basic 6: Grundlagen und Profiwissen, Carl Hanser Verlag, München/Wien, 1999

Duffie, J. A. / Beckmann, W. A. (1991):

Solar Engineering of Thermal Processes, John Wiley and sons, New York, 1991

Dworschak, G. / Wenke, A. (2002):

Niedrigenergiehäuser, Werner Verlag, Düsseldorf, 2002

Edwards, B. (1999):

Sustainable Architecture – European Directives & Building Design, Architectural Press, Oxford, ²1999

Eicker, U. (2001):

Solare Technologien für Gebäude, B.G. Teubner, Stuttgart/Leipzig/Wiesbaden, 2001

Energy Information Administration (EIA) (2007):

Annual Energy Review 2007, online im Internet: <http://www.eia.doe.gov/emeu/aer/pdf/aer.pdf> (letzter Zugriff: 04.05.2009)

Energy Information Administration (EIA) (2008):

International Energy Outlook 2008, online im Internet: [http://www.eia.doe.gov/oiaf/ieo/pdf/0484\(2008\).pdf](http://www.eia.doe.gov/oiaf/ieo/pdf/0484(2008).pdf) (letzter Zugriff: 04.05.2009)

Energy Policy Initiatives Center (EPIC) (2007):

California's Solar Rights Act – A Review of the Statutes and Relevant Cases, University of San Diego School of Law, San Diego, 2007 (online im Internet: http://www.sandiego.edu/epic/publications/documents/070123_RightsActPaperFINAL.pdf; letzter Zugriff: 14.05.2009)

Energy Research Group (Hrsg.) (1994):

Energy in Architecture – The european passiv solar handbook, School of Architecture, Dublin, 1992, Reprint 1994

Erbs, D. G. / Klein, S. A. / Duffie, J. A. (1982):

Estimation of the diffuse radiation fraction for hourly, daily and monthly average global radiation, Solar Energy 28(4), S.293-304, 1982

Everding, D. (Hrsg.) (2007):

Solarer Städtebau – Vom Pilotprojekt zum planerischen Leitbild, Verlag W. Kohlhammer, Stuttgart/Berlin/Köln, 2007

Feist, W. (2000):

Gestaltungsgrundlagen Passivhäuser, Verlag Das Beispiel, Darmstadt, 2000

Feist, W. (Hrsg.) (2002):

Das Niedrigenergiehaus. Neuer Standard für energiebewußtes Bauen, C.F. Müller, Heidelberg, 2002

Fisch, N. / Möws, B. / Zieger, J. (2001):

Solarstadt – Konzepte, Technologien, Projekte, W. Kohlhammer GmbH Stuttgart/Berlin/Köln, 2001

Fox, U. (1998):

Sonnenkollektoren - Thermische Solaranlagen, Kohlhammer, Stuttgart, 1998

Fraefel, R. / Humm, O. (2000):

Heizen und Lüften im Niedrigenergiehaus, Ökobuch Verlag, Staufen, 2000

Fuhrmann, P. (1998):

Bauplanung und Bauentwurf: Grundlagen und Methoden der Gebäudelehre, Kohlhammer Verlag, Stuttgart, 1998

Goetzberger, A. / Wittwer, V. (1986):

Sonnenenergie – Physikalische Grundlagen und thermische Anwendung, B.G. Teubner, Stuttgart/Leipzig/Wiesbaden, 1986

Goretzki, P. (1993):

Passive Sonnenenergienutzung in der Bauleitplanung – Entwicklung einer computerunterstützten Methode zur quantitativen solarenergetischen Bewertung und Modifizierung von Bebauungs- und Flächennutzungsplänen, BAUÖK Papiere 55, Institut für Bauökonomie der Universität Stuttgart, Stuttgart, 1993, zugl. Diss.

Graf, A. (2000):

Das Passivhaus – Wohnen ohne Heizung. Aktuelle Beispiele aus Deutschland, Österreich und der Schweiz, Callwey, München, 2000

Grallert, H. (1978):

Solarthermische Heizungssysteme – Technische Aspekte und wirtschaftliche Grenzen, R. Oldenbourg Verlag GmbH, München, ²1978

Graßl, H. (2003):

Welt im Wandel: Energiewende zur Nachhaltigkeit, Springer-Verlag, Berlin, 2003

Grobe, C. (2002):

Passivhäuser planen und bauen - Grundlagen, Bauphysik, Konstruktionsdetails, Wirtschaftlichkeit, Callwey, München, 2002

Gunßner, C. (2000):

Energiesparsiedlungen, Callwey Verlag, München, 2000

Hagemann, I. B. (2002):

Gebäudeintegrierte Photovoltaik – Architektonische Integration der Photovoltaik in die Gebäudehülle, Verlagsgesellschaft Rudolf Müller, Köln, 2002

Haller, A. / Humm, O. / Voss, K. (2000):

Renovieren mit der Sonne - Solare Komponenten im Altbau, Ökobuch, Staufien, 2000

Hamburg (Hrsg.) (2006):

Hamburgische Bauordnung (HBauO) vom 14. Dezember 2005, zuletzt geändert durch Gesetz vom 11.4.2006, HmbGVBl. 2006 (online im Internet: http://www.bauordnung.at/deutschland/hamburg_bauordnung.php; zuletzt abgerufen am 08.01.2009)

Haselhuhn, R. (2005):

Photovoltaik – Gebäude liefern Strom, TÜV Verlag, Reihe BINE-Informationspakete, Köln, 2005

Hawkes, D. / Owers, J. / Rickaby, P. / Steadman, P. (Hrsg.) (1987):

Energy and Urban Build Form, Centre for Configurational Studies, Open University / Martin Centre for Architectural and Urban Studies, Department of Architecture, University of Cambridge, Butterworths, London, 1987

Hay, J. E. (1979):

Calculation of the monthly mean solar radiation for horizontal and inclined surfaces, Solar Energy 23, S.301, 1979

Helders, S. (2005):

World Gazetteer, (online im Internet unter: www.worldgazetteer.com, zuletzt abgerufen am 30.01.2009)

Herzog, M. E. (1985):

Estimation of hourly and monthly average daily insolation on tilted surfaces, M.S. Thesis, Trinity University, 1985

Herzog, T. (1996):

Solar Charta: Europäische Charta für Solarenergie in Architektur und Stadtplanung, Prestel, München/London/New York, 1996

Herzog, T. (1996):

Solarenergie in Architektur und Stadtplanung, Prestel, München/London/New York, 1996

Herzog, T. / Krippner, R. / Lang, W. (2004):

Fassaden Atlas, Birkhäuser – Verlag für Architektur, Basel/Boston/Berlin, 2004

Heyer, E. (1984):

Witterung und Klima – Eine allgemeine Klimatologie, Teubner Verlagsgesellschaft, Leipzig, ⁷1984

Hillmann, G. / Nagel, J. / Schreck, H. (1982):

Klimagerechte und energiesparende Architektur, Verlag C.F. Müller, Karlsruhe, ²1982

Hollands, K.G.T. / Huget, R.G. (1983):

A Probability density function for the Clearness Index. With applications, Solar Energy 30, S.195-209, 1983

Hottel, H. C. (1976):

A simple model for estimating the transmittance of direct solar radiation through clean atmospheres, Solar Energy 18(3), S.129-134, 1976

Huber, J. / Müller, G. / Oberländer, S. (1997):

Das Niedrigenergiehaus - Ein Handbuch mit Planungsregeln zum Passivhaus, Kohlhammer, Stuttgart, 1997

Humm, O. / Kilchenmann, M. (2000):

Niedrigenergie- und Passivhäuser - Konzepte, Planung, Konstruktionen, Beispiele, Ökobuch Verlag, Staufen, 2000

Institut für internationale Architektur-Dokumentation (Hrsg.) (2002):

Dach-Atlas: Geneigte Dächer, Birkhäuser – Verlag für Architektur, Basel/Boston/Berlin, ⁴2002

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (2007):

IPCC Fourth Assessment Report, (online im Internet: http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar4/syr/ar4_syr.pdf; letzter Zugriff: 5.5.2009)

Iqbal, M. (1983):

An introduction to Solar Radiation, Academic Press, Toronto, 1983

Jin, Z. / Yezhen, W. / Jang, Y. (2004):

Estimation of daily diffuse solar radiation in China, Renewable Energy 29, S.1537-1548, 2004

Johnson, R. / Bhattacharyya, G. (1985):

Statistics-Principles and methods, John Wiley and sons, Inc., 1985

Jones, D. L. (1998):

Architektur und Ökologie: zeitgenössische bioklimatische Bauten, Deutsche Verlags-Anstalt, Stuttgart, 1998

Kaltschmitt, M. / Wiese, A. (Hrsg.) (1993):

Erneuerbare Energieträger in Deutschland – Potentiale und Kosten, Springer-Verlag, Berlin/Heidelberg/New York, 1993

Kaltschmitt, M. / Wiese, A. (Hrsg.) (1997):

Erneuerbare Energien – Systemtechnik, Wirtschaftlichkeit, Umweltaspekte, Springer-Verlag, Berlin/Heidelberg/New York, ²1997

Kambezidis, H. D. (1990):

Solar Position and atmospheric Refraction, Solar Energy 44, S.143-144, 1990

Keller, B. (1997):

Klimagerechtes Bauen, Teubner, Stuttgart, 1997

Keller, H. (1999):

Das Passivhaus im Vergleich, Wohnung + Gesundheit, Nr. 93, 1999

Kerschberger, A. / Platzer, W. / Weidlich, B. (1998):

Transparente Wärmedämmung - Produkte, Projekte, Planungshinweise, Vieweg, Wiesbaden, 1998

Khartchenko, N. V. (1991):

Solaranlagen, Energoatomizdat, Moskau, 1991

Khartchenko, N. V. (1995):

Thermische Solaranlagen – Grundlagen, Planung und Auslegung, Springer-Verlag, Berlin/Heidelberg/New York, 1995

Klein, S. A. (1977):

Calculation of Monthly Average Insolation on Tilted Surfaces, Solar Energy 19, S. 325, 1977

Klein, S. A. (1978):

Calculation of flat-plate collector utilizability, Solar Energy 21, S. 393, 1978

Klein, S. A. / Theilacker, J. C. (1981):

An Algorithm for Calculating Monthly-average Radiation on Inclined Surfaces, Trans. ASME, Journal of Solar Energy Engineering 103, S. 29-33, 1981

Klein, S. A. / Beckmann, W. A. (1984):

Review of solar radiation utilizability, Journal of Solar Energy Engineering 106, S. 393-402, 1984

Klein, S. A. / Beckman, W. A. / Abdulla, S. H. (2000):

A new correlation for the prediction of the frequency distribution of daily solar radiation, American Solar Energy Society, 2000

Klucher, T. M. (1979):

Evaluation of Models to predict insolation on tilted surfaces, Solar Energy 23, S. 111-114, 1979

Knowles, R. L. (1974):

Energy and Form: An Ecological Approach to Urban Growth, MIT Press, Massachusetts, 1974

Knowles, R. L. (1981):

Sun, Rhythm and Form, MIT Press, Massachusetts, 1981

Knowles, R. L. (2000):

The Solar Envelope: Its meaning for urban growth and form, Proceeding of the Millenium Conference on Passive and Low energy Architecture (PLEA), Cambridge University, Cambridge, 2000

Knowles, R. L. (2003):

The solar envelope: its meaning for energy and buildings, in: Energy and Buildings, Elsevier, S. 15-25, 2003

Kreith, F. / Kreider, J. F. (1978):

Principles of Solar Engineering, Hemisphere Publishing Corporation, 1978

Ladener, H. / Späte, F. (2003):

Solaranlagen - Handbuch der thermischen Solarenergienutzung, Ökobuch, Staufen, ⁸2003

Ladener, H. (Hrsg.) (2002):

Vom Altbau zum Niedrigenergiehaus - Energietechnische Gebäudesanierung in der Praxis, Ökobuch Verlag, Staufen, 2002

Lamm, L. O. (1981):

A new analytical expression for the equation of time, Solar Energy 26, S. 465, 1981

Lehmann, H. (Hrsg.) (2003):

Energy Rich Japan, online im Internet unter: www.energyrichjapan.info (letzter Zugriff: 27.02.2008)

Liu, B.Y.H / Jordan, R. C. (1960):

The interrelationship and characteristic distribution of direct, diffuse and total solar radiation, Solar Energy 4 (3), S. 1-19, 1960

Liu, B.Y.H. / Jordan, R. C. (1962):

Daily Insolation on Surfaces Tilted toward the Equator, ASHRAE Journal 3 (10), S.53, 1962

Liu, B.Y.H. / Jordan, R. C. (1963):

The long term average performance of flat plate solar energy collectors, Solar Energy 7, S.53, 1963

Liu, B.Y.H. / Jordan, R. C. (1977):

Availability of Solar Energy for Flat-Plate Solar Heat Collection - Applications of Solar Energy for Heating and Cooling of Buildings, ASHRAE GRP 170, 1977

LOG ID (1984):

Solararchitektur in der Stadt – LOG ID Symposium 1982, Verlag Dieter Fricke, Frankfurt/Main, 1984

Lohmann, S. (2006):

Langzeitvariabilität der globalen und direkten Solarstrahlung für Solarenergieanwendungen, Dissertation, Ludwig Maximilians Universität München, Fakultät für Physik, München, 2006

Marko, A. / Braun, P. (Hrsg.) (1997):

Thermische Solarenergienutzung an Gebäuden - Für Ingenieure und Architekten, Springer, Berlin, 1997

Michael, K. / Heitmann, G. (2000):

Wohnen im Passivhaus - Beispiele realisierter Passivhäuser in NRW, Landesinstitut für Bauwesen des Landes NRW (Hrsg.), Aachen, 2000

Münzenberg, U. (2002):

Raumluftqualität in Passivhäusern, Wohnung + Gesundheit, Nr. 105, 2002

Mürmann, H. (1999):

Wohnungslüftung. Kontrollierte Lüftung mit Wärmerückgewinnung, C.F. Müller Verlag, Heidelberg, 1999

NASA (2006):

Surface meteorology and Solar Energy (SSE) – A renewable energy resource web site (release 5.0), online im Internet: <http://eosweb.larc.nasa.gov/sse> (letzter Zugriff: 30.01.2009)

Neufert, P. et al. (2002):

Bauentwurfslehre – Grundlagen, Normen, Vorschriften über Anlagen, Bau, Gestaltung, Raumbedarf, Raumbeziehungen, Maße für Gebäude, Räume, Einrichtungen, Geräte mit dem Mensch als Maß und Ziel, Vieweg Verlag, Braunschweig/Wiesbaden, ³⁷2002

Olgay, V. (1963):

Design with Climate: Bioclimatic Approach to Architectural Regionalism, Princeton University Press, Princeton, 1963

Orgill, J. F. / Hollands, K. G. T. (1977):

Correlation equations for hourly diffuse radiation on a horizontal surface, Solar Energy 19, S. 357, 1977

Page, J. K. (1961):

The estimation of Monthly Mean Values of Daily Total Short-Wave Radiation on Vertical and Inclined Surfaces from Sunshine Records for Latitudes 40°N-40°S, Proceedings of the UN Conference on New Sources of Energy, paper no. 35/5/98, paper N°S98, Vol. 4, S.378, 1961

Page, J. K. (1986):

Prediction of solar radiation on inclined surfaces, Reidel, Dordrecht, 1986

Palz, W. (Hrsg.) (1984a):

Atlas über die Sonnenstrahlung Europas – Band 1: Globalstrahlung auf die horizontale Empfangsebene, Kommission der europäischen Gemeinschaften, Verlag TÜV Rheinland, 1984

Palz, W. (Hrsg.) (1984b):

Atlas über die Sonnenstrahlung Europas – Band 2: Geneigte Flächen, Kommission der europäischen Gemeinschaften, Verlag TÜV Rheinland, 1984

Palz, W. / Greif, J. (1996):

European Solar Radiation Atlas, Springer Verlag, Berlin, 1996

Passivhaus Institut Darmstadt (Hrsg.) (2004a):

8. Europäische Passivhaustagung, Darmstadt, 2004

Passivhaus Institut Darmstadt (Hrsg.) (2004b):

Passivhaus Projektierungspaket 2004. Anforderungen an qualitätsgeprüfte Passivhäuser, Darmstadt, 2004

Perez, R. / Steward, R. (1986):

Solar Irradiance Conversion Models, Solar Cells 18, S. 213-222, 1986

Perez, R. / Seals, R. / Ineichen, P. (1987):

A new simplified version of the Perez Diffuse Irradiance Model for tilted surfaces, Solar Energy 39, S. 221-231, 1987

Perez, R. / Seals, R. / Ineichen, P. (1990):

Modeling daylight Availability and Irradiance Components from direct and global Irradiance, Solar Energy 44, S. 271-289, 1990

Perez, R. / Seals, R. / Zelenka, A. (1997):

Comparing satellite remote sensing and ground network measurements for the prediction of site/time specific irradiance data, Solar Energy 60, S. 89-96, 1997

Pistohl, W. (1998):

Handbuch der Gebäudetechnik Band 2 – Heizung, Lüftung, Energiesparen, Werner Verlag, Düsseldorf, 1998

Pokorny, W. (1982):

Die Entwurfsgütezahl von Solarhäusern, E`80 architektur, 3. Jhg. Heft 3/Okttober, 1982

Pregizer, D. (2002):

Grundlagen und Bau eines Passivhauses, Müller, Karlsruhe, 2002

Quaschnig, V. (1999):

Regenerative Energiesysteme – Technologie, Berechnung, Simulation, Carl Hanser Verlag, München/Wien, ²1999

Quaschnig, V. (1996):

Simulation der Abschattungsverluste bei solarelektrischen Systemen, Dissertation, Verlag Dr. Köster, Berlin 1996

Quaschnig, V. (1999):

Regenerative Energiesysteme – Technologie, Berechnung, Simulation, Carl Hanser Verlag, München/Wien, ²1999

Reindl, D. T. / Beckmann, W. A. / Duffie, J. A. (1989):

Diffuse Fraction Correlations, Proceedings of ISES Solar World Conf. 1989, S.2082-2086, 1989

Rexroth, S. (2001):

Gestalten mit Solarzellen – Photovoltaik in der Gebäudehülle, C.F. Müller Verlag, 2001

Rietschel, H. / Esdorn, H. (1994):

Raumklimatechnik – 1. Grundlagen, Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York, ¹⁶1994

Rindelhardt, U. (2001):

Photovoltaische Stromerzeugung, Teubner Verlag, Stuttgart, 2001

Rodríguez, H. / González, F. (1992) :

Manual de Radiación Solar en Colombia - Radiación sobre superficies horizontales, H. Rodríguez, F. González Editores, Bogotá, 1992

Rodríguez, H. / González, F. (1994):

Radiacion solar sobre superficies horizontales y inclinadas – Manual de radiación solar en Colombia, H. Rodríguez, F. González Editores, Bogota, 1994

Rullán Lemke, C. (2008):

ArchitekturForm & SolarEnergie – Energiedesign: Eine Formenstudie zur solaren Gebäudehülle, In: Eurosolar, Europäische Vereinigung für Erneuerbare Energien e.V. (Hrsg.) (2008): 7. Europäischen Konferenz Solarenergie in Architektur und Stadtplanung: „Sun & Sense“, Berlin, 11.-14.03.2008, S. 332-397 [CD-ROM]

Rullán Lemke, C. / Stein, B.(2008):

Klima – Bevölkerung – Energie: Prognosen für 2050 / Population – Climate – Energy: Scenarios to 2050, bilinguale Onlinekonferenz „Climate 2008: Die weltweite CO₂-freundliche wissenschaftliche Klimakonferenz“, 03.-07.11.2008; online im Internet: <http://www.climate2008.net/?a1=pap&cat=1&e=58/59> (letzter Zugriff: 16.12.2008)

Rußig, V. (2003):

Baukonjunktur in Europa: Banges Warten auf den Aufschwung – Weitere Ergebnisse der 54. EUROCONSTRUCT-Winterkonferenz 2002 in München, ifo Schnelldienst 3/2003, 56. Jahrgang, München, 2003

Sattler, M.A. / Sharples, S. (1987):

Field Measurements of the transmission of solar radiation through trees, Proceedings of ISES Solar World Conference 1987, S.3846-3850, 1987

Schabbach, T. (1998):

Physikalisch-stochastisches Modell zur Simulation klimatisch beeinflusster Solarstrahlung, VDI-Verlag, Düsseldorf, 1998

Scharping, H. / Heitmann, G. / Michael, K. (1997):

Niedrigenergiehäuser in der Praxis, TÜV Verlag, Reihe BINE Informationspakete, Köln, 1997

Schiler, M. / Ueng-Fang, P. (1993):

Solvepope: An Interactive Computer Program for Defining and Drawing Solar Envelopes, 18th National Passive Solar Conference-ASES, Washington, D.C., 1993

Schiler, M. / Kristan, R. (2005):

3,000 years of passive solar architecture in a hot arid climate, University of Southern California, online im Internet: <http://www.usc.edu/dept/architecture/mbs/papers/images/ISES2005-1114Israel.pdf> (letzter Zugriff 08.04.2009)

Schittich, C. (Hrsg.) (2001):

Im Detail: Gebäudehüllen: Konzepte, Schichten, Material, Birkhäuser – Verlag für Architektur, Basel/Boston/Berlin, 2001

Schempp, D. / Krampen, M. / Möllring, F. (LOG ID) (1994):

Solares Bauen – Stadtplanung, Bauplanung, R. Müller Verlag, Köln, 1994

Schmid, J. (1999):

Photovoltaik, Strom aus Sonne – Technologie, Wirtschaftlichkeit, Marktentwicklung, C.F. Müller Verlag, Heidelberg, 1999

Schöpfer, G. (1981):

Untersuchung über die Abhängigkeit der Raumluft-Ionisation von der Heizung und Lüftung, Diplomarbeit, FH-Rosenheim, 1981

Schulze, R. (1970):

Strahlenklima der Erde, Steinkopff, Darmstadt, 1970

Schulze-Darup, B. (1997):

Energieeffiziente Wohngebäude – Einfamilienhäuser mit Zukunft, TÜV Verlag, Reihe BINE Informationspakete, Köln, 1997

Schwarz, B. (1987):

Wärme aus Beton – Systeme zur Nutzung der Sonnenenergie, Beton-Verlag, Düsseldorf, 1987

Sick, F. / Erge, T. (Editors) (1996):

Photovoltaics in Buildings – A design handbook for Architects and Engineers, International Energy Agency, James&James (Science Publishers) Ltd., London, 1996

Simonson, J. R. (1984):

Computing Methods in Solar Heating Design, The Macmillan Press LTD, 1984

Smith, P. F. (2007):

Sustainability at the Cutting Edge – Emerging technologies for low energy buildings, Elsevier Architectural Press, Oxford, ²2007

Stahl, W. (1997):

Das energieautarke Solarhaus – Mit der Sonne wohnen, C.F. Müller Verlag, Heidelberg, 1997

Stark, T. (2004):

Untersuchungen zur aktiven Nutzung erneuerbarer Energie am Beispiel eines Wohn- und eines Bürogebäudes, Fraunhofer IRB Verlag, Stuttgart, 2004, zugl. Dissertation, Universität Stuttgart (D93)

Stein, B. / Rullán Lemke, C. (2007):

Population - Climate - Energy: Scenarios to 2050, 51st World Congress International Federation for Housing and Planning: „Futures of Cities – Impacts, Indications and Implementations“ (IFHP Copenhagen), Kopenhagen/Dänemark, 23.-26.09.2007; online im Internet: <http://www.ifhp2007copenhagen.dk/Components/GetMedia.aspx?id=5ab1fd99-c3f9-43a5-8567-99b2c4003384> (letzter Zugriff: 23.11.2007)

The Group LTI (1998):

Long-Term Integration of Renewable Energy Sources into the European Energy System, Physica-Verlag Heidelberg, Heidelberg, 1998

Thekākara, M. P. (1976):

Solar radiation measurements techniques and instrumentation, Solar Energy 18, S. 309, 1976

Topaloglu, B. (2003):

Solar Envelope and Form Generation in Architecture, Master Thesis at the Middle East Technical University, Ankara, 2003

Treberspurg, M. (1999):

Neues Bauen mit der Sonne – Ansätze zu einer klimagerechten Architektur, Springer Verlag, Wien, 1999

Tuller, S. E. (1976):

The Relationship between diffuse, total and extraterrestrial Radiation, Solar Energy 18, S. 3, 1976

Twarowski, M. (1962):

Sonne und Architektur, Callwey Verlag, München, 1962

United Nations (UN) (2006):

World Population Prospects. The 2006 Revision. Population Database, (online im Internet: <http://esa.un.org/unpp/>; letzter Zugriff: 03.11.2007)

von Seidlein, P. C. / Schulz, C. (2001) :

Skelettbau - Konzepte für eine strukturelle Architektur. Projekte 1981-1996, Callwey Verlag, München, 2001

Da Veiga, J. / La Roche, P. (2002):

A computer solar analysis tool for the design and manufacturing of complex architectural envelopes: EvSurf, SIGradDI 2002 – Proceedings of the 6th Iberoamerican Congress of Digital Graphics, Caracas, Venezuela, 27.-29.11.2002, pp. 105-109, 2002; (online im Internet: <http://www.csupomona.edu/~pmlaroche/download/sigradi8a83.content%5B1%5D.pdf>; letzter Zugriff: 08.04.2009)

Waag, V. (2002):

Konstruktive Gebäudeplanung – Ein Leitfaden für Studierende, Bauwerk Verlag, Berlin, 2002

Wagner, A. (2002):

Transparente Wärmedämmung an Gebäuden, BINE Informationspaket (Fachinformationszentrum Karlsruhe), TÜV-Verlag, Köln, 2002

Walraven, R. (1978):

Calculating the position of the sun, Solar Energy 20, S. 393-397, 1978

Wilkinson, B. J. (1981):

An improved FORTRAN-Program for the rapid calculation of the solar position, Solar Energy 27, S. 67-68, 1981

Witzel, W. / Seifried, D. / Fesa (Hrsg.) (2000):

Das Solarbuch – Fakten, Argumente, Strategien, Ökobuch Politik, Freiburg, 2000

World Meteorological Organization (WMO) (1990):

Internationaler Wolkenatlas. Vorschriften und Betriebsunterlagen, Nr. 12, Teil 1; Selbstverlag des Deutschen Wetterdienstes, Offenbach am Main, 1990 (Lizenzausgabe des International Cloud Atlas, Volume II; World Meteorological Organization, Genf, ²1987)

Anhänge (A bis J)

Anhang A	Formengruppen
Anhang B	Repräsentative Standorte
Anhang C	Formenranking Madrid (nach Jahresenergiebilanz bei mittleren Parametern)
Anhang D	Übersichtsmatrix aller 42 Standorte (nach Jahresenergiebilanz bei mittleren Parametern)
Anhang E	Ergebnisfelder mit Farbfilter zur Musteranalyse des Einflusses der Kompaktheit (A/V-Verhältnis)
Anhang F	Zusammenfassende Übersicht der Ergebnisfelder
Anhang G	Standortstudie (meteorologisch)
Anhang H	Formenranking Madrid (nach Jahresenergiebilanz bei schlechten Parametern)
Anhang I	Rankingstudie – Station Nord und Dakar (nach Einstrahlungsdichte und Jahresenergiebilanz)
Anhang J	Standortstudie (Auswertung des Formenrankings)

Anhang A: Formengruppen

Reihe 1

3D-Ansicht					
Dachaufsicht N 					
Bezeichnung	Nr. 1	Nr. 2	Nr. 3	Nr. 4	Nr. 5
Gebäudeart	konventionell	konventionell	konventionell	konventionell	konventionell
Primärform	Quader	Quader	Quader	Quader	Quader
Grundriss	1:1	1:1	1:1	1:1	1:1
Gebäudehöhe	hoch	hoch	mittelhoch	flach	flach
Oberfläche O	883.09	718.42	500.00	526.33	650.60
Grundfläche G	21.53	34.22	100.00	292.41	464.40
A/V-Verhältnis	0.90	0.75	0.60	0.82	1.12
O/G-Verhältnis	41.02	20.99	5.00	1.80	1.40
Max. Breite B	4.64	5.85	10.00	17.10	21.55
Max. Tiefe T	4.64	5.85	10.00	17.10	21.55
Max. Höhe H	46.42	29.24	10.00	3.42	2.16
0-15° Neigung	2.44%	4.76%	20.00%	55.56%	71.38%
20-35° Neigung	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
40-50° Neigung	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
55-70° Neigung	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
75-90° Neigung	97.56%	95.24%	80.00%	44.44%	28.62%

Tabelle A-1: Formenreihe 1 mit geometrischen Angaben

(Quelle: eigene)

Reihe 2

3D-Ansicht					
Dachaufsicht					
	N				
Bezeichnung	Nr. 6	Nr. 7	Nr. 3	Nr. 8	Nr. 9
Gebäudeart	konventionell	konventionell	konventionell	konventionell	konventionell
Primärform	Quader	Quader	Quader	Quader	Quader
Grundriss	1:10	1:5	1:1	1:5	1:10
Gebäudehöhe	hoch	hoch	mittelhoch	flach	flach
Oberfläche O	1068.45	760.26	500.00	581.59	689.23
Grundfläche G	46.55	58.48	100.00	171.05	215.39
A/V-Verhältnis	1.12	0.82	0.60	0.75	0.90
O/G-Verhältnis	22.95	13.00	5.00	3.40	3.20
Max. Breite B	2.16	3.42	10.00	29.24	46.42
Max. Tiefe T	21.55	17.10	10.00	5.85	4.64
Max. Höhe H	21.55	17.10	10.00	5.85	4.64
0-15° Neigung	4.36%	7.69%	20.00%	29.41%	31.25%
20-35° Neigung	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
40-50° Neigung	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
55-70° Neigung	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
75-90° Neigung	95.64%	92.31%	80.00%	70.59%	68.75%

Tabelle A-2: Formenreihe 2 mit geometrischen Angaben

(Quelle: eigene)

Reihe 3a

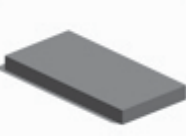
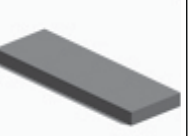
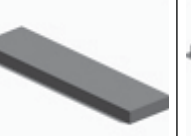
3D-Ansicht					
Dachaufsicht					
					
Bezeichnung	Nr. 10	Nr. 11	Nr. 12	Nr. 13	Nr. 14
Gebäudeart	konventionell	konventionell	konventionell	konventionell	konventionell
Primärform	Quader	Quader	Quader	Quader	Quader
Grundriss	1:1	1:2	1:3	1:4	1:5
Gebäudehöhe	flach	flach	flach	flach	flach
Oberfläche O	552.45	565.71	586.29	607.17	627.21
Grundfläche G	333.33	333.33	333.33	333.33	333.33
A/V-Verhältnis	0.89	0.90	0.92	0.94	0.96
O/G-Verhältnis	1.66	1.70	1.76	1.82	1.88
Max. Breite B	18.26	12.91	10.54	9.13	8.16
Max. Tiefe T	18.26	25.82	31.62	36.51	40.82
Max. Höhe H	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00
0-15° Neigung	60.34%	58.92%	56.85%	54.90%	53.14%
20-35° Neigung	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
40-50° Neigung	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
55-70° Neigung	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
75-90° Neigung	39.66%	41.08%	43.15%	45.10%	46.86%

Tabelle A-3: Formenreihe 3a mit geometrischen Angaben

(Quelle: eigene)

Reihe 3b

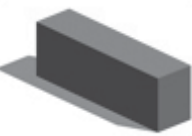
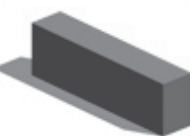
3D-Ansicht					
Dachaufsicht					
					
Bezeichnung	Nr. 15	Nr. 16	Nr. 17	Nr. 18	Nr. 19
Gebäudeart	konventionell	konventionell	konventionell	konventionell	konventionell
Primärform	Quader	Quader	Quader	Quader	Quader
Grundriss	1:1	1:2	1:3	1:4	1:5
Gebäudehöhe	mittelhoch	mittelhoch	mittelhoch	mittelhoch	mittelhoch
Oberfläche O	490.55	513.41	549.05	585.23	619.97
Grundfläche G	111.11	111.11	111.11	111.11	111.11
A/V-Verhältnis	0.60	0.62	0.66	0.70	0.73
O/G-Verhältnis	4.41	4.62	4.94	5.27	5.58
Max. Breite B	10.54	7.45	6.08	5.27	4.71
Max. Tiefe T	10.54	14.90	18.25	21.07	23.56
Max. Höhe H	9.00	9.00	9.00	9.00	9.00
0-15° Neigung	22.65%	21.64%	20.24%	18.99%	17.92%
20-35° Neigung	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
40-50° Neigung	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
55-70° Neigung	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
75-90° Neigung	77.35%	78.36%	79.76%	81.01%	82.08%

Tabelle A-4: Formenreihe 3b mit geometrischen Angaben

(Quelle: eigene)

Reihe 3c

3D-Ansicht					
Dachaufsicht					
Bezeichnung	Nr. 20	Nr. 21	Nr. 22	Nr. 23	Nr. 24
Gebäudeart	konventionell	konventionell	konventionell	konventionell	konventionell
Primärform	Quader	Quader	Quader	Quader	Quader
Grundriss	1:1	1:2	1:3	1:4	1:5
Gebäudehöhe	hoch	hoch	hoch	hoch	hoch
Oberfläche O	556.87	586.57	632.77	679.57	723.97
Grundfläche G	66.67	66.67	66.67	66.67	66.67
A/V-Verhältnis	0.62	0.65	0.70	0.75	0.79
O/G-Verhältnis	8.35	8.80	9.49	10.19	10.86
Max. Breite B	8.17	5.78	4.72	4.09	3.65
Max. Tiefe T	8.17	11.55	14.15	16.34	18.26
Max. Höhe H	15.00	15.00	15.00	15.00	15.00
0-15° Neigung	11.97%	11.37%	10.54%	9.81%	9.21%
20-35° Neigung	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
40-50° Neigung	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
55-70° Neigung	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
75-90° Neigung	88.03%	88.63%	89.46%	90.19%	90.79%

Tabelle A-5: Formenreihe 3c mit geometrischen Angaben

(Quelle: eigene)

Reihe 4

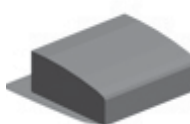
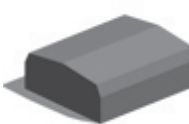
3D-Ansicht					
Dachaufsicht 					
Bezeichnung	Nr. 25	Nr. 26	Nr. 27	Nr. 28	Nr. 29
Gebäudeart	konventionell	konventionell	konventionell	konventionell	konventionell
Primärform	Satteldach	assym. Satteldach	Pultdach	Bogentonnendach	Mansarddach
Grundriss	Rechteck	Rechteck	Rechteck	Rechteck	Rechteck
Gebäudehöhe	mittelhoch	mittelhoch	mittelhoch	mittelhoch	mittelhoch
Oberfläche O	455.28	466.34	486.08	463.52	456.66
Grundfläche G	168.00	168.00	168.00	168.00	168.00
A/V-Verhältnis	0.62	0.63	0.65	0.63	0.62
O/G-Verhältnis	2.71	2.78	2.89	2.76	2.72
Max. Breite B	14.00	14.00	14.00	14.00	14.00
Max. Tiefe T	12.00	12.00	12.00	12.00	12.00
Max. Höhe H	7.90	7.90	7.90	6.40	6.50
0-15° Neigung	0.00%	0.00%	0.00%	32.62%	33.29%
20-35° Neigung	44.03%	32.21%	36.35%	3.62%	0.00%
40-50° Neigung	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
55-70° Neigung	0.00%	13.15%	0.00%	1.54%	10.91%
75-90° Neigung	55.97%	54.64%	63.65%	62.22%	55.79%

Tabelle A-6: Formenreihe 4 mit geometrischen Angaben

(Quelle: eigene)

Reihe 5a

3D-Ansicht					
Dachaufsicht					
					
Bezeichnung	Nr. 30	Nr. 31	Nr. 32	Nr. 33	Nr. 34
Gebäudeart	unkonventionell	unkonventionell	unkonventionell	unkonventionell	unkonventionell
Primärform	Pyramide	Pyramide	Pyramide	Pyramide	Pyramide
Grundriss	8-Eck	6-Eck	5-Eck	4-Eck	3-Eck
Gebäudehöhe	flach	flach	flach	flach	flach
Oberfläche O	1053.80	1066.58	1078.60	1099.18	1146.90
Grundfläche G	1000.00	1000.00	1000.00	1000.00	1000.00
A/V-Verhältnis	2.05	2.07	2.08	2.10	2.15
O/G-Verhältnis	1.05	1.07	1.08	1.10	1.15
Max. Breite B	37.61	33.98	39.01	44.72	48.06
Max. Tiefe T	37.61	39.24	37.10	44.72	41.62
Max. Höhe H	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00
0-15° Neigung	95.90%	94.48%	93.29%	91.37%	87.43%
20-35° Neigung	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
40-50° Neigung	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
55-70° Neigung	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
75-90° Neigung	4.10%	5.52%	6.71%	8.63%	12.57%

Tabelle A-7: Formenreihe 5a mit geometrischen Angaben

(Quelle: eigene)

Reihe 5b

3D-Ansicht					
Dachaufsicht					
	N				
					
Bezeichnung	Nr. 35	Nr. 36	Nr. 37	Nr. 38	Nr. 39
Gebäudeart	unkonventionell	unkonventionell	unkonventionell	unkonventionell	unkonventionell
Primärform	Pyramide	Pyramide	Pyramide	Pyramide	Pyramide
Grundriss	8-Eck	6-Eck	5-Eck	4-Eck	3-Eck
Gebäudehöhe	mittelhoch	mittelhoch	mittelhoch	mittelhoch	mittelhoch
Oberfläche O	486.40	497.38	509.83	536.06	599.89
Grundfläche G	333.33	333.33	333.33	333.33	333.33
A/V-Verhältnis	0.82	0.83	0.84	0.87	0.93
O/G-Verhältnis	1.46	1.49	1.53	1.61	1.80
Max. Breite B	21.71	19.62	22.52	25.82	27.75
Max. Tiefe T	21.71	22.65	21.42	25.82	24.03
Max. Höhe H	9.00	9.00	9.00	9.00	9.00
0-15° Neigung	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
20-35° Neigung	66.25%	49.17%	75.43%	69.34%	58.77%
40-50° Neigung	0.00%	30.33%	0.00%	0.00%	0.00%
55-70° Neigung	18.37%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
75-90° Neigung	15.38%	20.50%	24.57%	30.66%	41.23%

Tabelle A-8: Formenreihe 5b mit geometrischen Angaben

(Quelle: eigene)

Reihe 5c

3D-Ansicht					
Dachaufsicht					
					
Bezeichnung	Nr. 40	Nr. 41	Nr. 42	Nr. 43	Nr. 44
Gebäudeart	unkonventionell	unkonventionell	unkonventionell	unkonventionell	unkonventionell
Primärform	Pyramide	Pyramide	Pyramide	Pyramide	Pyramide
Grundriss	8-Eck	6-Eck	5-Eck	4-Eck	3-Eck
Gebäudehöhe	hoch	hoch	hoch	hoch	hoch
Oberfläche O	456.40	464.42	475.58	503.58	579.19
Grundfläche G	200.00	200.00	200.00	200.00	200.00
A/V-Verhältnis	0.66	0.66	0.68	0.70	0.78
O/G-Verhältnis	2.28	2.32	2.38	2.52	2.90
Max. Breite B	16.82	15.20	17.45	20.00	21.49
Max. Tiefe T	16.82	17.55	16.59	20.00	18.61
Max. Höhe H	15.00	15.00	15.00	15.00	15.00
0-15° Neigung	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
20-35° Neigung	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
40-50° Neigung	30.48%	40.10%	25.04%	57.88%	44.34%
55-70° Neigung	26.24%	31.57%	41.36%	0.00%	0.00%
75-90° Neigung	43.28%	28.33%	33.59%	42.12%	55.66%

Tabelle A-9: Formenreihe 5c mit geometrischen Angaben

(Quelle: eigene)

Reihe 6a

3D-Ansicht					
Dachaufsicht					
					
Bezeichnung	Nr. 45	Nr. 46	Nr. 47	Nr. 48	Nr. 49
Gebäudeart	unkonventionell	unkonventionell	unkonventionell	unkonventionell	unkonventionell
Primärform	Pyramide	Pyramide	Pyramide	Pyramide	Pyramide
Grundriss	unr. 5-Eck/60°	unr. 5-Eck/90°	unr. 6-Eck/30°	unr. 6-Eck/15°	unr. 6-Eck/15° sp.
Gebäudehöhe	flach	flach	flach	flach	flach
Oberfläche O	1103.26	1117.81	1099.54	1114.33	1114.33
Grundfläche G	1000.00	1000.00	1000.00	1000.00	1000.00
A/V-Verhältnis	2.10	2.12	2.10	2.11	2.11
O/G-Verhältnis	1.10	1.12	1.10	1.11	1.11
Max. Breite B	56.70	64.70	54.77	62.91	62.91
Max. Tiefe T	28.35	25.52	31.62	27.85	27.85
Max. Höhe H	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00
0-15° Neigung	91.10%	89.97%	91.37%	90.22%	90.22%
20-35° Neigung	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
40-50° Neigung	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
55-70° Neigung	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
75-90° Neigung	8.90%	10.03%	8.63%	9.78%	9.78%

Tabelle A-10: Formenreihe 6a mit geometrischen Angaben

(Quelle: eigene)

Reihe 6b

3D-Ansicht					
Dachaufsicht					
					
Bezeichnung	Nr. 50	Nr. 51	Nr. 52	Nr. 53	Nr. 54
Gebäudeart	unkonventionell	unkonventionell	unkonventionell	unkonventionell	unkonventionell
Primärform	Pyramide	Pyramide	Pyramide	Pyramide	Pyramide
Grundriss	unr. 5-Eck/60°	unr. 5-Eck/90°	unr. 6-Eck/30°	unr. 6-Eck/15°	unr. 6-Eck/15° sp.
Gebäudehöhe	mittelhoch	mittelhoch	mittelhoch	mittelhoch	mittelhoch
Oberfläche O	545.31	575.33	538.46	567.78	567.78
Grundfläche G	333.33	333.33	333.33	333.33	333.33
A/V-Verhältnis	0.88	0.91	0.87	0.90	0.90
O/G-Verhältnis	1.64	1.73	1.62	1.70	1.70
Max. Breite B	32.74	37.36	31.62	36.32	36.32
Max. Tiefe T	16.37	14.73	18.26	16.08	16.08
Max. Höhe H	9.00	9.00	9.00	9.00	9.00
0-15° Neigung	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
20-35° Neigung	0.00%	22.06%	0.00%	0.00%	0.00%
40-50° Neigung	68.81%	44.20%	69.48%	66.76%	66.76%
55-70° Neigung	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
75-90° Neigung	31.19%	33.74%	30.52%	33.24%	33.24%

Tabelle A-11: Formenreihe 6b mit geometrischen Angaben

(Quelle: eigene)

Reihe 6c

3D-Ansicht					
Dachaufsicht					
					
Bezeichnung	Nr. 55	Nr. 56	Nr. 57	Nr. 58	Nr. 59
Gebäudeart	unkonventionell	unkonventionell	unkonventionell	unkonventionell	unkonventionell
Primärform	Pyramide	Pyramide	Pyramide	Pyramide	Pyramide
Grundriss	unr. 5-Eck/60°	unr. 5-Eck/90°	unr. 6-Eck/30°	unr. 6-Eck/15°	unr. 6-Eck/15° sp.
Gebäudehöhe	hoch	hoch	hoch	hoch	hoch
Oberfläche O	519.63	560.88	509.10	550.29	550.29
Grundfläche G	200.00	200.00	200.00	200.00	200.00
A/V-Verhältnis	0.72	0.76	0.71	0.75	0.75
O/G-Verhältnis	2.60	2.80	2.55	2.75	2.75
Max. Breite B	25.36	28.94	24.49	28.14	28.14
Max. Tiefe T	12.68	11.41	14.14	12.45	12.45
Max. Höhe H	15.00	15.00	15.00	15.00	15.00
0-15° Neigung	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
20-35° Neigung	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
40-50° Neigung	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
55-70° Neigung	57.74%	55.31%	58.34%	55.73%	55.73%
75-90° Neigung	42.26%	44.69%	41.66%	44.27%	44.27%

Tabelle A-12: Formenreihe 6c mit geometrischen Angaben

(Quelle: eigene)

Reihe 7

3D-Ansicht					
Dachaufsicht					
					
Bezeichnung	Nr. 60	Nr. 61	Nr. 62	Nr. 63	Nr. 64
Gebäudeart	unkonventionell	unkonventionell	unkonventionell	unkonventionell	unkonventionell
Primärform	Nurdachhaus	Schrägfassade	Parabeltonne	geneigte Tonne	Halbkegel
Grundriss	Rechteck	Rechteck	Rechteck	Rechteck	Polygon
Gebäudehöhe	mittelhoch	mittelhoch	mittelhoch	mittelhoch	mittelhoch
Oberfläche O	510.62	479.70	464.45	459.26	459.05
Grundfläche G	186.00	150.00	166.80	158.78	308.12
A/V-Verhältnis	0.70	0.63	0.63	0.62	0.77
O/G-Verhältnis	2.75	3.20	2.78	2.89	1.49
Max. Breite B	15.50	12.00	13.80	11.50	25.74
Max. Tiefe T	12.00	12.50	12.00	13.80	16.95
Max. Höhe H	10.75	9.00	7.20	10.35	8.32
0-15° Neigung	0.00%	15.01%	17.96%	0.00%	1.27%
20-35° Neigung	0.00%	0.00%	8.98%	23.20%	0.00%
40-50° Neigung	0.00%	0.00%	8.98%	15.46%	67.93%
55-70° Neigung	74.74%	27.77%	5.99%	0.00%	30.80%
75-90° Neigung	25.26%	57.22%	58.10%	61.34%	0.00%

Tabelle A-13: Formenreihe 7 mit geometrischen Angaben

(Quelle: eigene)

Anhang B: Repräsentative Standorte

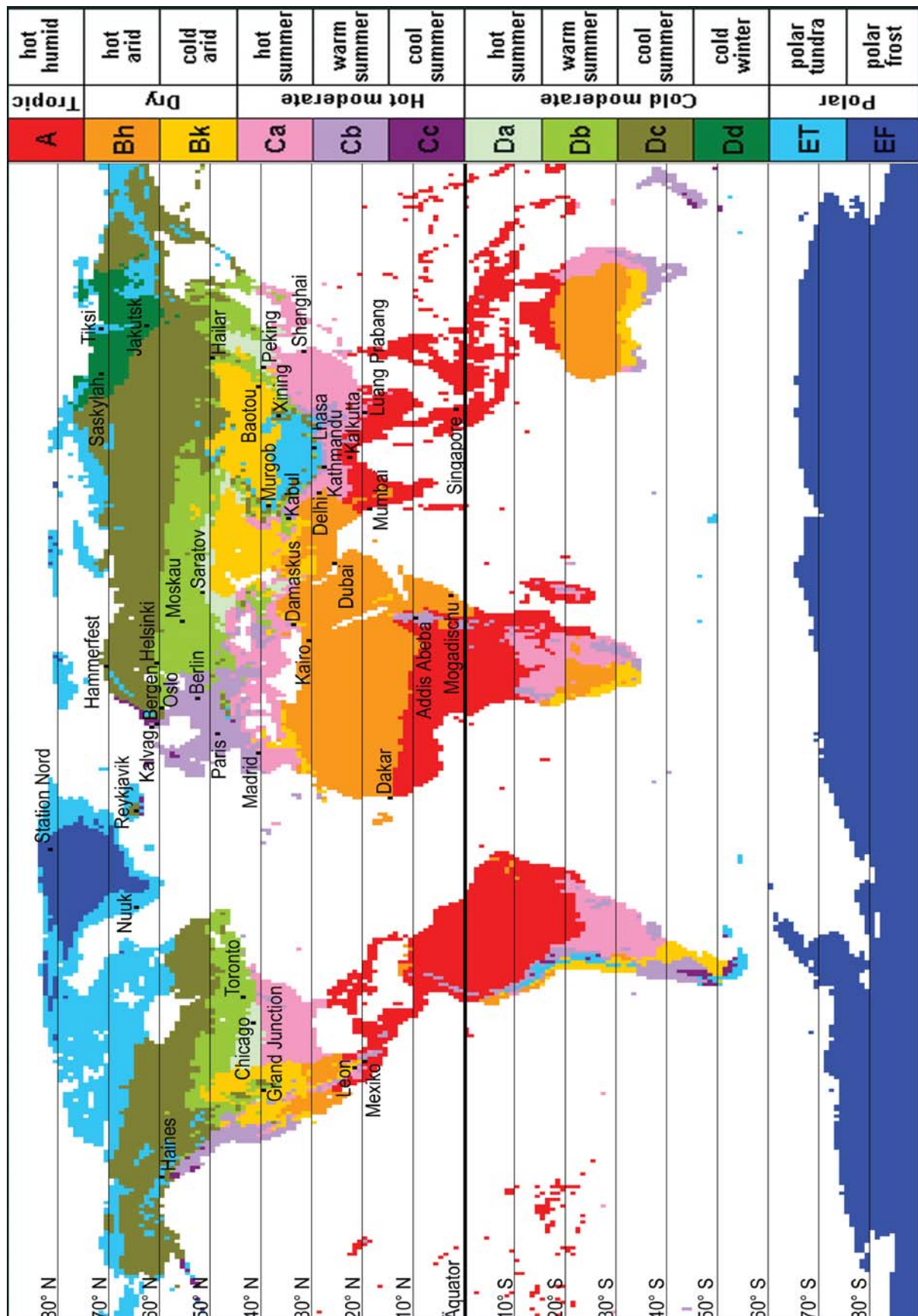


Abbildung B-1: Weltkarte mit Breitengradstreifen, Klimazonen (Effektive Klimaklassifizierung nach Köppen) und den jeweils ermittelten repräsentativen Standorten

(Grafik: eigene; Datenquelle: NASA (2006); Berechnungen: eigene)

Nr.	Zone		Name	EW 2007	Land	Breite	Länge	Repräs. Weltbev.	
1	80-90°N	EF	Station Nord	5	Grönland	81.36 N	-16.40 W	5	<0.1%
2	70-80°N	ET	Tiksi	5.681	Russland	71.63 N	128.87 O	30541	<0.1%
3		Dd	Saskylah	1.920	Russland	71.92 N	114.08 O	11335	<0.1%
4		Dc	Hammerfest	6.788	Norwegen	70.68 N	23.71 O	47623	<0.1%
5	60-70°N	ET	Nuuk	14.798	Grönland	64.18 N	-51.73 W	455775	<0.1%
6		Dd	Jakutsk	215.063	Russland	62.03 N	129.73 O	477466	<0.1%
7		Dc	Reykjavik	113.906	Island	64.14 N	-21.92 W	12453361	0.2%
8		Db	Helsinki	558.457	Finnland	60.17 N	24.94 O	3190587	<0.1%
9		Cc	Bergen	213.585	Norwegen	60.38 N	5.34 O	351001	<0.1%
10		Cb	Kalvåg	353	Norwegen	61.77 N	4.88 O	455679	<0.1%
11	50-60°N	ET	Haines	2.154	USA	59.24 N	-135.45 W	370334	<0.1%
12		Dc	Oslo	811.688	Norwegen	59.91 N	10.75 O	16941343	0.3%
13		Db	Moskau	10.381.222	Russland	55.75 N	37.62 O	141323924	2.1%
14		Da	Saratov	863.725	Russland	51.57 N	46.03 O	3746609	<0.1%
15		Cb	Berlin	3.383.782	Deutschland	52.52 N	13.38 O	194490785	3.0%
16	40-50°N	Dc	Hailar	211.066	China	49.23 N	119.71 O	12329733	0.2%
17		Db	Toronto	4.612.191	Kanada	43.65 N	-79.38 W	210510666	3.2%
18		Da	Chicago	2.841.952	USA	41.84 N	-87.68 W	217540011	3.3%
19		Cb	Paris	2.138.551	Frankreich	48.86 N	2.34 O	223159536	3.4%
20		Ca	Madrid	3.117.977	Spanien	40.42 N	-3.71 W	124639328	1.9%
21		Bk	Baotou	1.279.437	China	40.60 N	110.05 O	51731007	0.8%
22	30-40°N	ET	Murgob	10.815	Tadschikistan	38.16 N	73.94 O	95376	<0.1%
23		Dc	Xining	767.531	China	36.62 N	101.77 O	13382561	0.2%
24		Db	Grand Junction	45.938	USA	39.09 N	-108.55 W	61449328	0.9%
25		Da	Peking	7.480.601	China	39.93 N	116.40 O	217130143	3.3%
26		Cb	Kabul	3.043.532	Afghanistan	34.53 N	69.17 O	49878094	1.1%
27		Ca	Schanghai	14.608.512	China	31.23 N	121.47 O	957445293	15.2%
28		Bk	Damaskus	1.569.394	Syrien	33.50 N	36.32 O	106089590	1.9%
29		Bh	Kairo	7.734.614	Ägypten	30.06 N	31.25 O	194068072	3.0%
30	20-30°N	ET	Lhasa	118.721	China	29.65 N	91.10 O	2924515	<0.1%
31		Cb	Kathmandu	790.597	Nepal	27.71 N	85.31 O	29040837	1.0%
32		Ca	Delhi	10.927.986	Indien	28.67 N	77.21 O	778184233	13.5%
33		Bk	León	1.114.626	Mexiko	21.12 N	-101.69 W	9533902	0.2%
34		Bh	Dubai	1.137.347	Arab. Emirate	25.27 N	55.33 O	305284126	4.7%
35		A	Kalkutta	4.631.392	Indien	22.57 N	88.36 O	333044362	5.5%
36	10-20°N	Cb	Mexiko	8.657.050	Mexiko	19.43 N	-99.14 W	58332528	1.2%
37		Ca	Luang Prabang	47.378	Laos	19.89 N	102.14 O	6671515	0.8%
38		Bh	Dakar	2.352.057	Senegal	14.72 N	-17.48 W	182004154	3.0%
39		A	Mumbai	12.691.836	Indien	18.96 N	72.82 O	719412393	11.9%
40	0-10°N	Cb	Addis Abeba	2.757.729	Äthiopien	9.03 N	38.74 O	56629538	1.1%
41		Bh	Mogadischu	2.587.183	Somalia	2.05 N	45.33 O	17111448	0.4%
42		A	Singapore	3.547.809	Singapur	1.30 N	103.85 O	440215057	12.6%

Tabelle B-1: Liste der 42 repräsentativen Standorte mit Angaben zu Breitengradgürtel und Klimazone, Einwohnerzahlen, Geokoordinaten und Anteil der repräsentierten Weltbevölkerung (inkl. Südhalbkugel) als Bevölkerungsgewichtungsfaktor

(Quelle: eigene Berechnungen aus Helders (2005) und NASA (2006))

Anhang C: Formenranking Madrid nach Jahresenergiebilanz

(33% Belegung, 0.5 W/m²K Dämmstandard, 10% Wirkungsgrad)

Das Rankingblatt wurde für eine bessere Lesbarkeit vergrößert und in vier Abschnitte geteilt. Es erstreckt sich daher über die folgenden vier Seiten. Die Formen der ersten drei sowie der letzten drei Rangplätze sind durch Rahmung hervorgehoben.

1 Formenranking nach Jahresenergiebilanz (33% Hülle, U=0.5, η=10%)										20_Madrid - 1. Teil						
2 Rang	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
3 Form																
4 Orientierung																
5 Energiebilanz 100%-Monate	14377 8	14331 8	14331 8	14190 8	14074 8	13653 7	13085 7	12978 7	12840 7	12666 7	8503 8	8282 8	8015 8	8000 8	7950 8	7764 8
6 Art	unkonv.	unkonv.	unkonv.	unkonv.	unkonv.	unkonv.	unkonv.	unkonv.	unkonv.	unkonv.	unkonv.	unkonv.	unkonv.	unkonv.	unkonv.	unkonv.
7 O [m²] A/V	1118 2.12	1114 2.11	1114 2.11	1103 2.10	1100 2.10	1147 2.15	1099 2.10	1067 2.07	1079 2.08	1054 2.05	600 0.93	579 0.78	568 0.90	568 0.90	575 0.91	536 0.87
0 bis 15°	90.0%	90.2%	90.2%	91.1%	91.4%	87.4%	91.4%	94.5%	93.3%	95.9%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
20 bis 35°	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	58.8%	0.0%	0.0%	0.0%	22.1%	69.3%
40 bis 50°	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	44.3%	66.8%	66.8%	44.2%	0.0%
55 bis 70°	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
75 bis 90°	10.0%	9.8%	9.8%	8.9%	8.6%	12.6%	8.6%	5.5%	6.7%	4.1%	41.2%	55.7%	33.2%	33.2%	33.7%	30.7%
Form Grundriß	Pyramide Polygon	Pyramide Polygon	Pyramide Polygon	Pyramide Polygon	Pyramide Polygon	Pyramide 3-eck	Pyramide 4-eck	Pyramide 6-eck	Pyramide 5-eck	Pyramide 8-eck	Pyramide 3-eck	Pyramide 3-eck	Pyramide Polygon	Pyramide Polygon	Pyramide Polygon	Pyramide 4-eck
Höhe	flach	flach	flach	flach	flach	flach	flach	flach	flach	flach	kompakt	hoch	kompakt	kompakt	kompakt	kompakt
8																
Gr. 1																
Gr. 2																
Gruppe 3																
Gr. 4																
Gruppe 5																
5a																
5b																
5c																
Gruppe 6																
6a																
6b																
6c																
Gr. 7																
7																

Madrid-Teil 1: Bilanz; 33% Belegung, 0.5 W/m²K Dämmstandard, 10% Wirkungsgrad

Grafik dient ausschließlich dem visuellen Gesamteindruck, detaillierte Beschreibung und Auswertung in Kapitel 5

Madrid-Teil 2: Bilanz; 33% Belegung, 0.5 W/m²K Dämmstandard, 10% Wirkungsgrad
Grafik dient ausschließlich dem visuellen Gesamteindruck, detaillierte Beschreibung und Auswertung in Kapitel 5

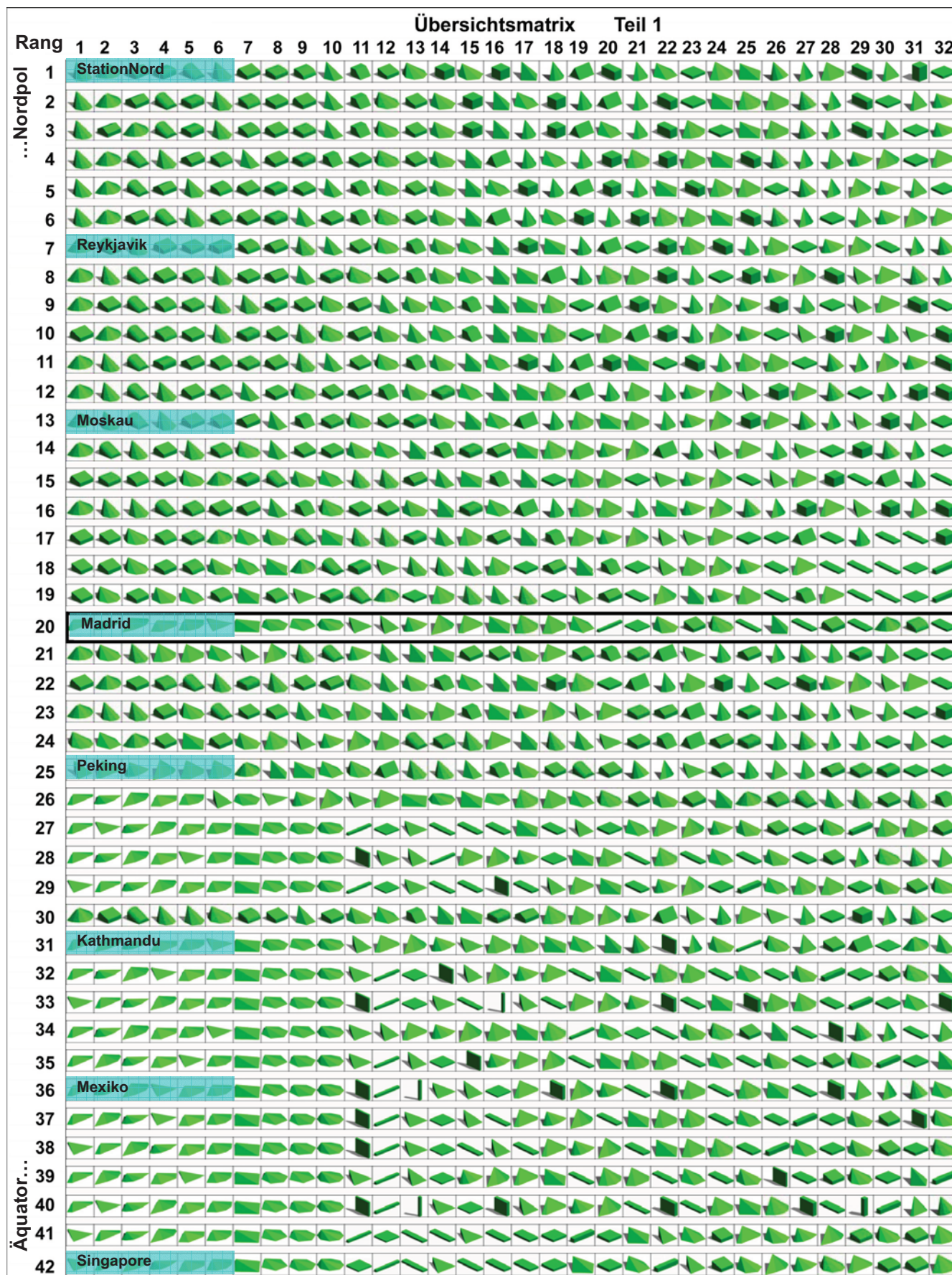
Madrid-Teil 3: Bilanz; 33% Belegung, 0.5 W/m²K Dämmstandard, 10% Wirkungsgrad
Grafik dient ausschließlich dem visuellen Gesamteindruck, detaillierte Beschreibung und Auswertung in Kapitel 5

Grafik dient ausschließlich dem visuellen Gesamteindruck, detaillierte Beschreibung und Auswertung in Kapitel 5

Anhang D: Übersichtsmatrix aller 42 Standorte bei mittleren Parametern

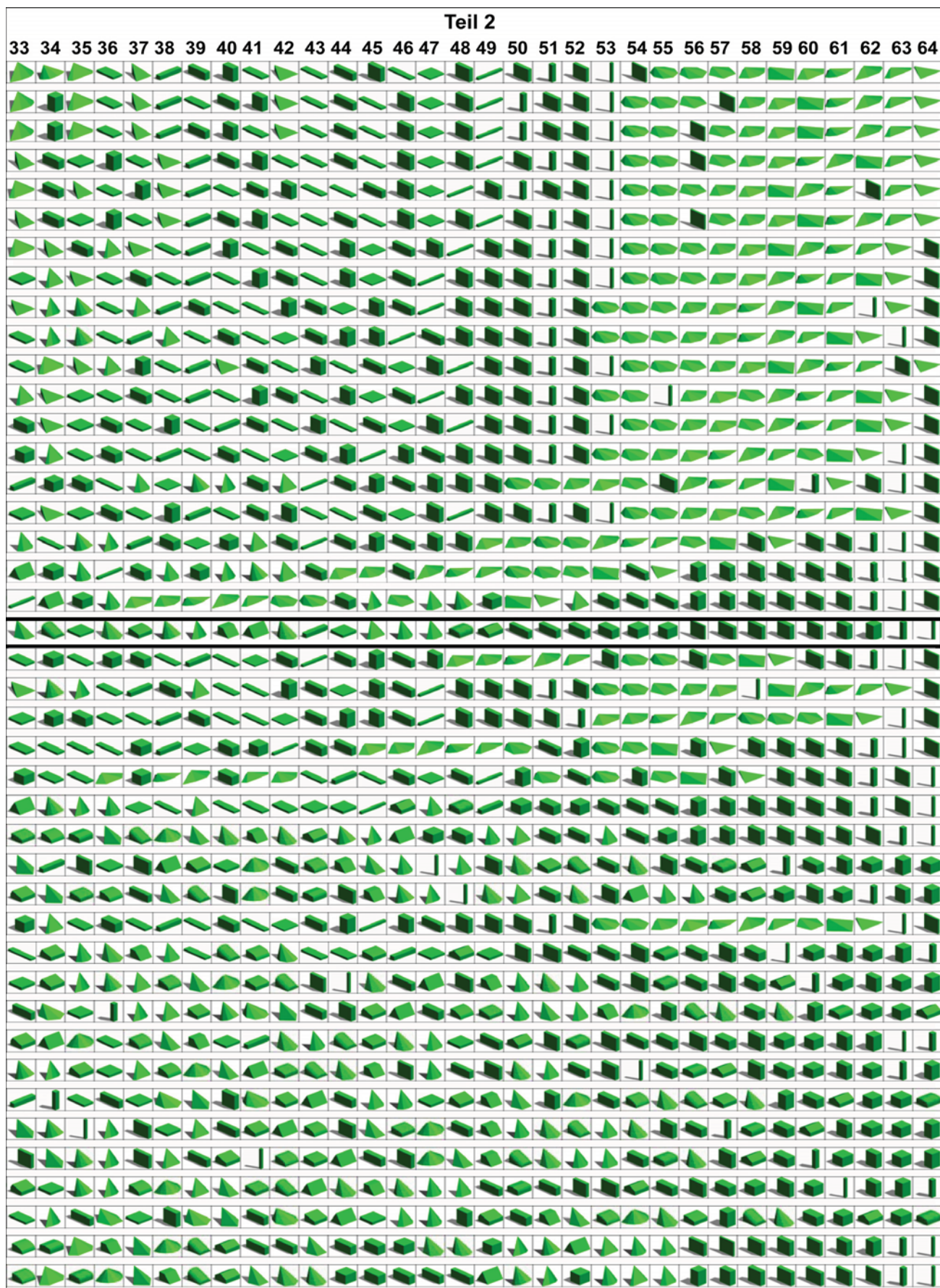
(33% Belegung, 0.5 W/m²K Dämmstandard, 10% Wirkungsgrad)

Die Übersichtsmatrix erstreckt sich in zwei Teilen über die folgende Doppelseite. Einige Standorte sind zur besseren Orientierung beispielhaft eingetragen und farblich unterlegt. Der Standort Madrid ist für die weiteren Untersuchungen durch Rahmung hervorgehoben.



Übersichtsmatrix-Teil1 aller 42 Standort-Formenrankings (bei 33%, 0.5 W/m²K, 10%)

Grafik dient ausschließlich dem visuellen Gesamteindruck, detaillierte Beschreibung und Auswertung in Kapitel 6



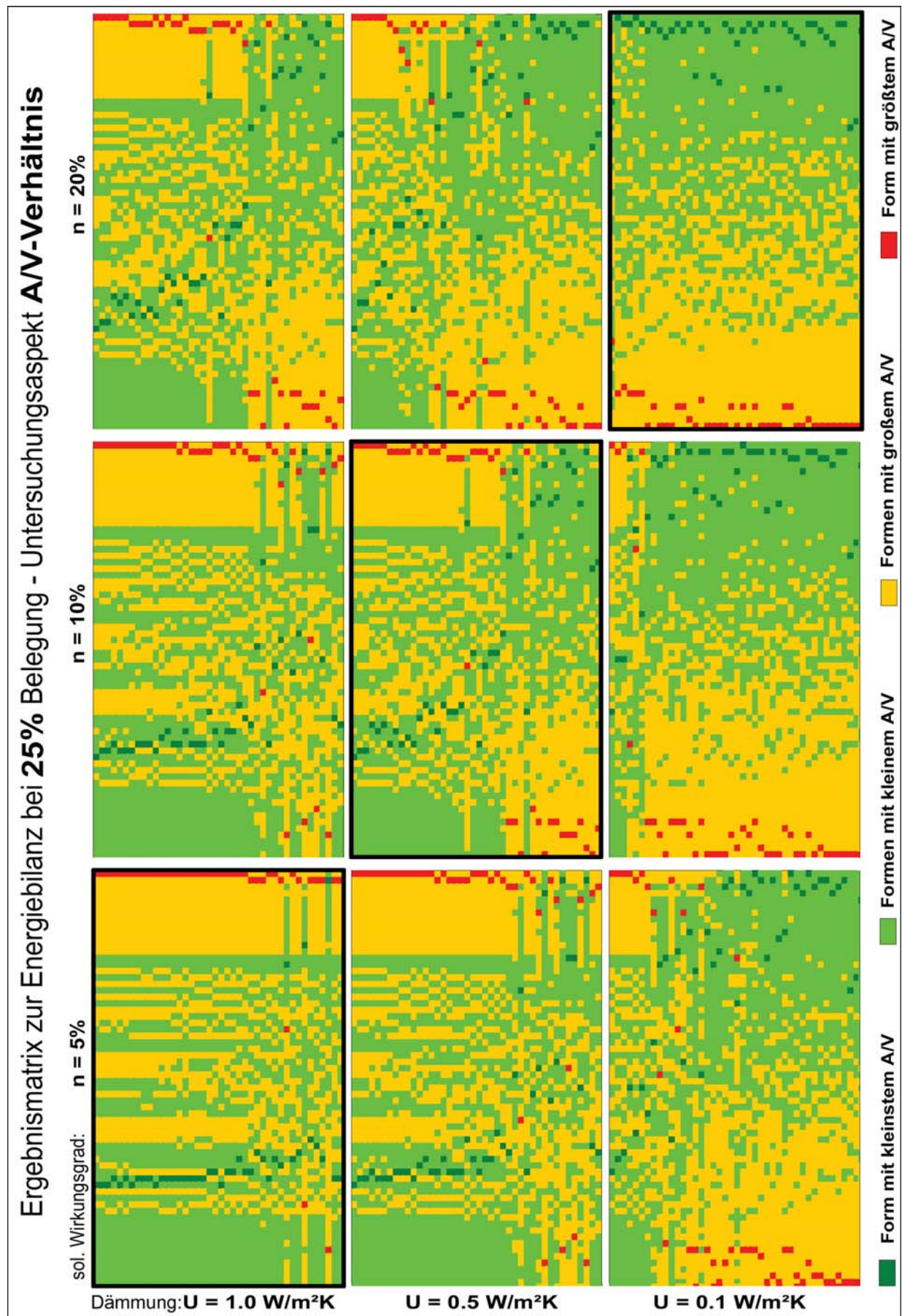
Übersichtsmatrix-Teil2 aller 42 Standort-Formenrankings (bei 33%, 0.5 W/m²K, 10%)

Grafik dient ausschließlich dem visuellen Gesamteindruck, detaillierte Beschreibung und Auswertung in Kapitel 6

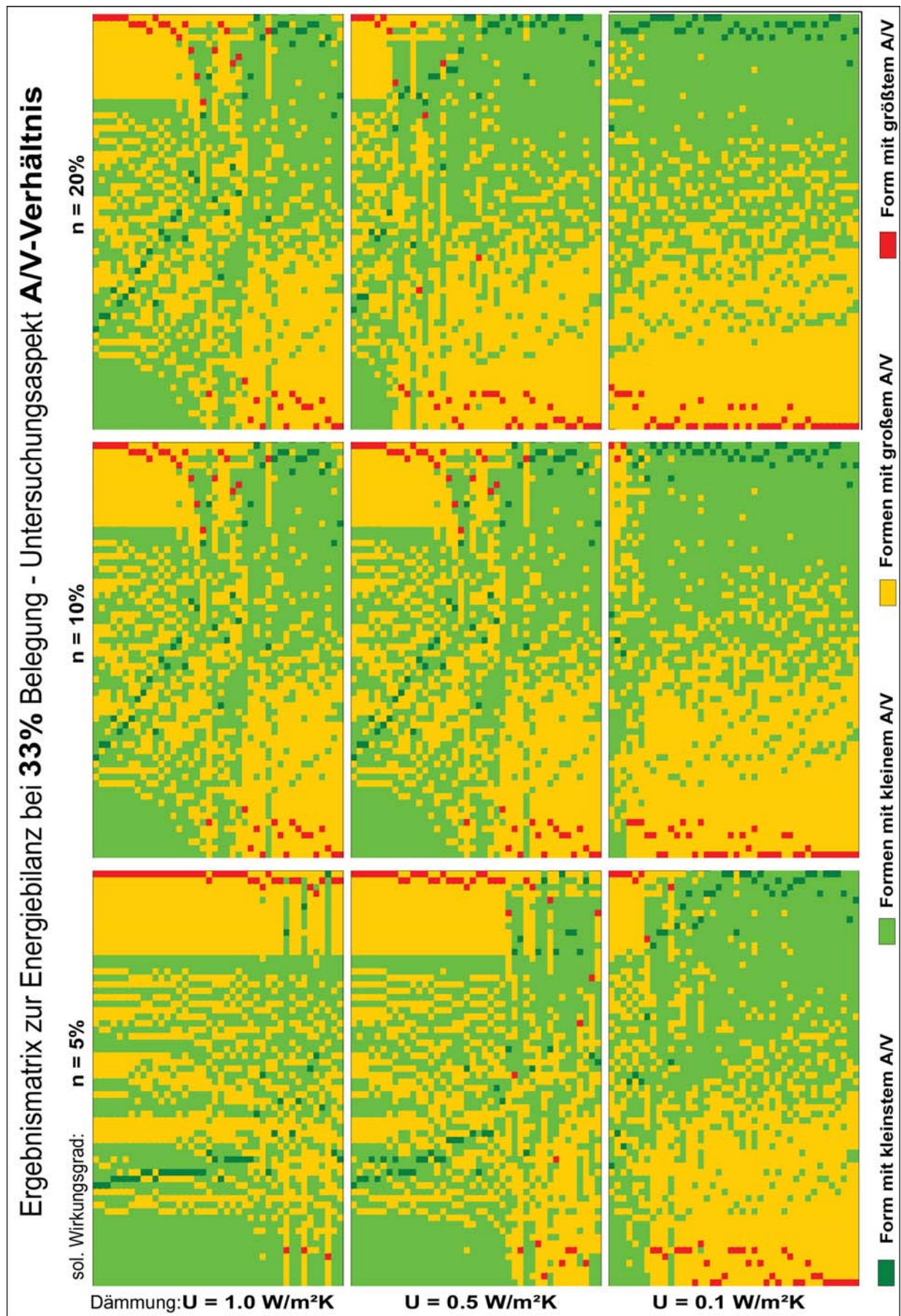
Anhang E: Ergebnisfelder mit Farbfilter zur Musteranalyse des Einflusses der Kompaktheit

Für die fünf unterschiedlichen Belegungsgrade von 25, 33, 50, 75 und 100% besteht jedes der folgenden Datenblätter aus einer 3x3-Matrix der möglichen Kombinationen aus Dämmstandard und solarem Wirkungsgrad. Jede der 9 Einzelmatrizen ist eine in *Anhang D* gezeigte Übersichtsmatrix bestehend aus den 64-zelligen Formenrankings für die in 42 Zeilen angeordneten repräsentativen Standorte. Der Zelleninhalt zeigt jedoch nicht die jeweilige Form, sondern ist der Legende entsprechend eingefärbt.

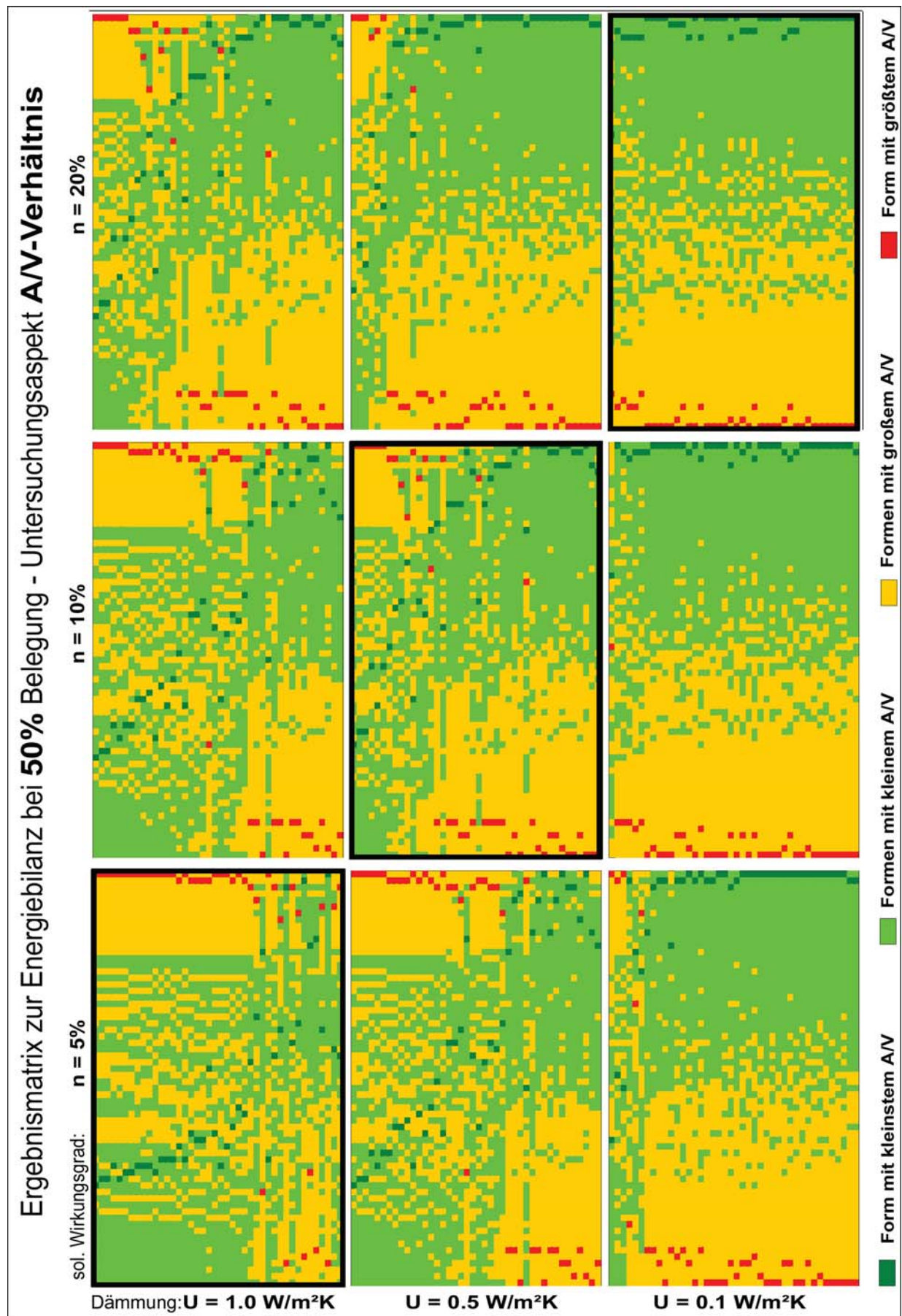
Die für eine spätere Zusammenstellung (s. *Anhang F*) ausgewählten Einzelmatrizen sind durch Rahmen hervorgehoben.



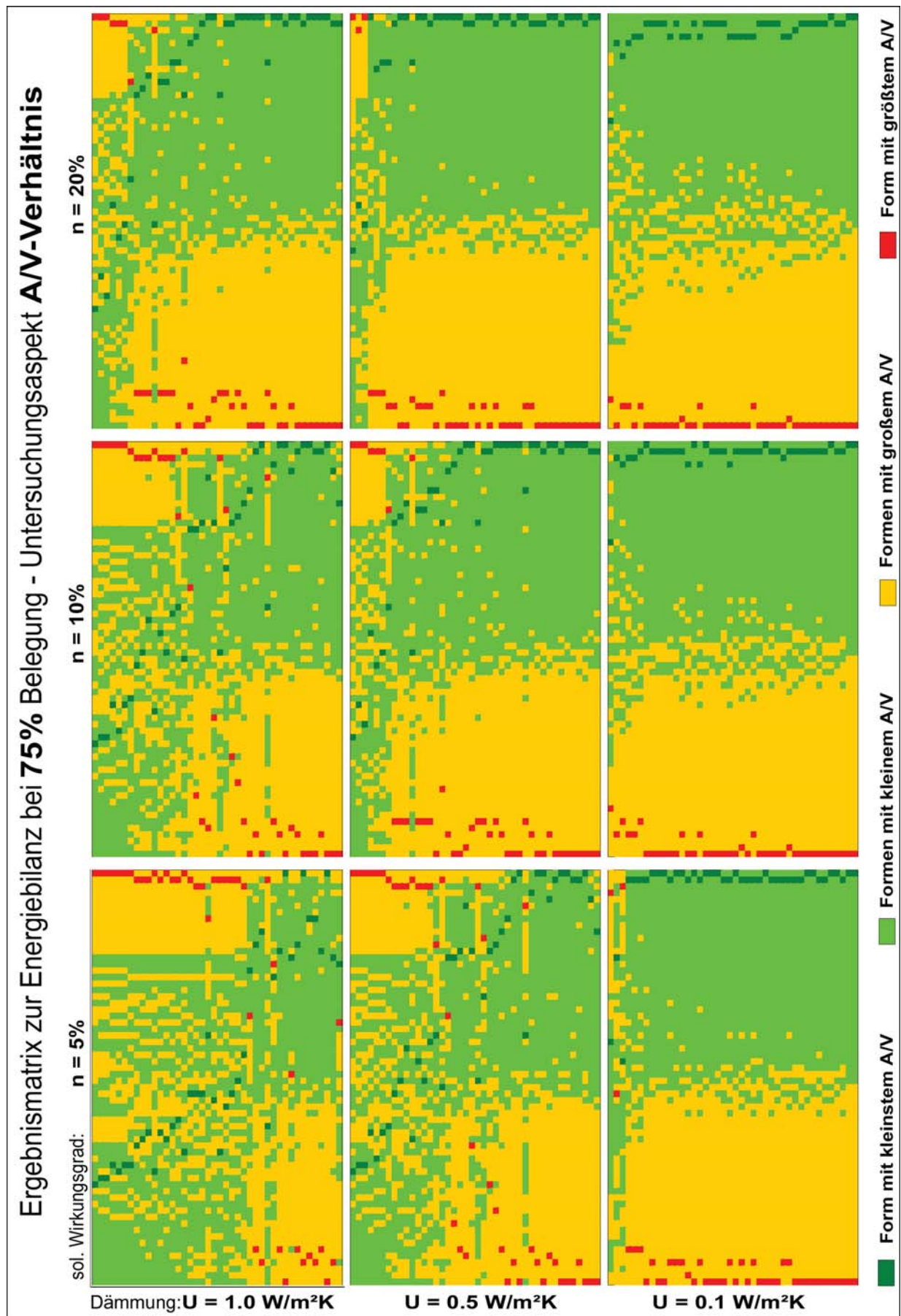
Ergebnisfeld Energiebilanz bei 25% Belegung – Untersuchungsaspekt: Kompaktheit



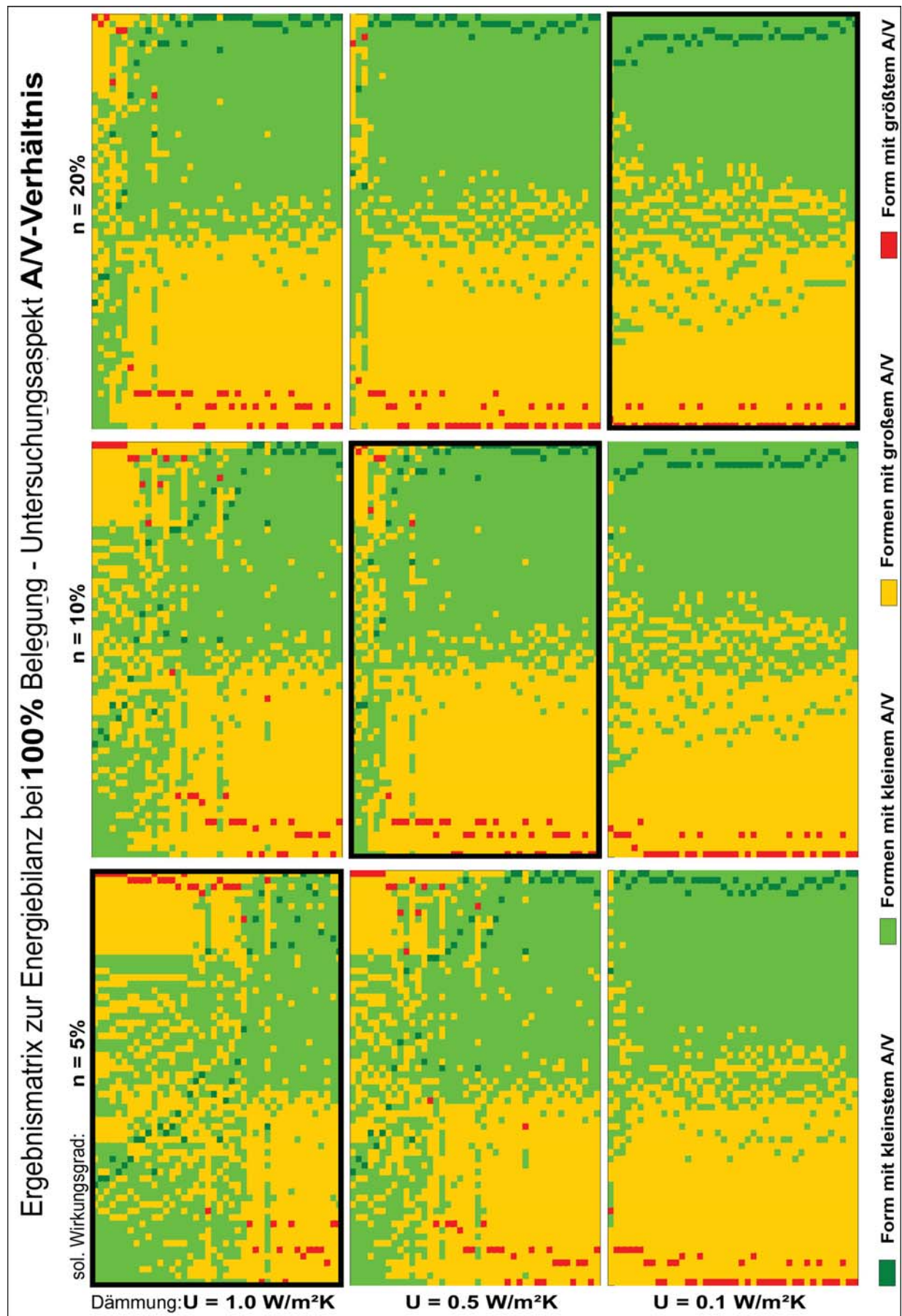
Ergebnisfeld Energiebilanz bei 33% Belegung – Untersuchungsaspekt: Kompaktheit



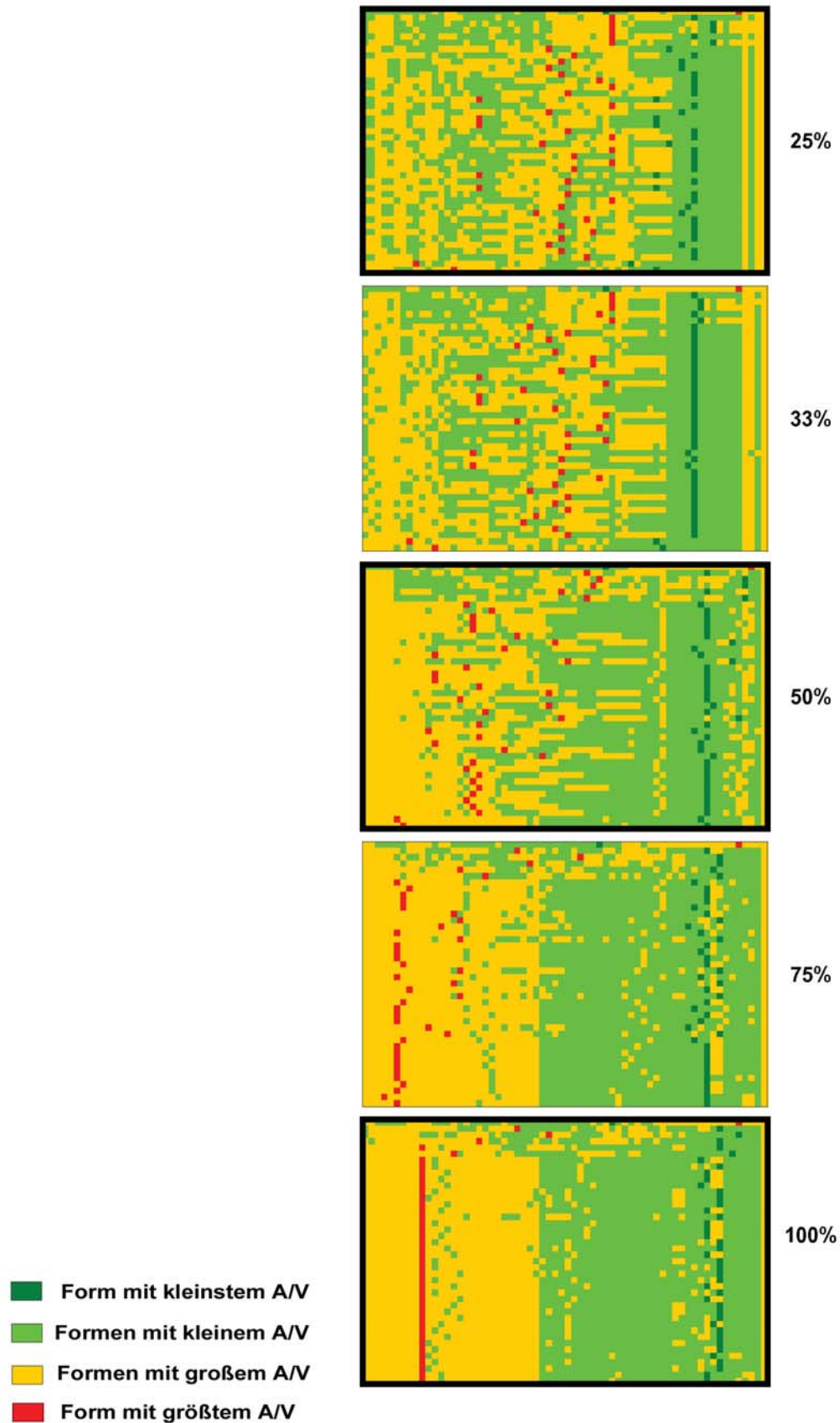
Ergebnisfeld Energiebilanz bei 50% Belegung – Untersuchungsaspekt: Kompaktheit



Ergebnisfeld Energiebilanz bei 75% Belegung – Untersuchungsaspekt: Kompaktheit



Ergebnisfeld Energiebilanz bei 100% Belegung – Untersuchungsaspekt: Kompaktheit

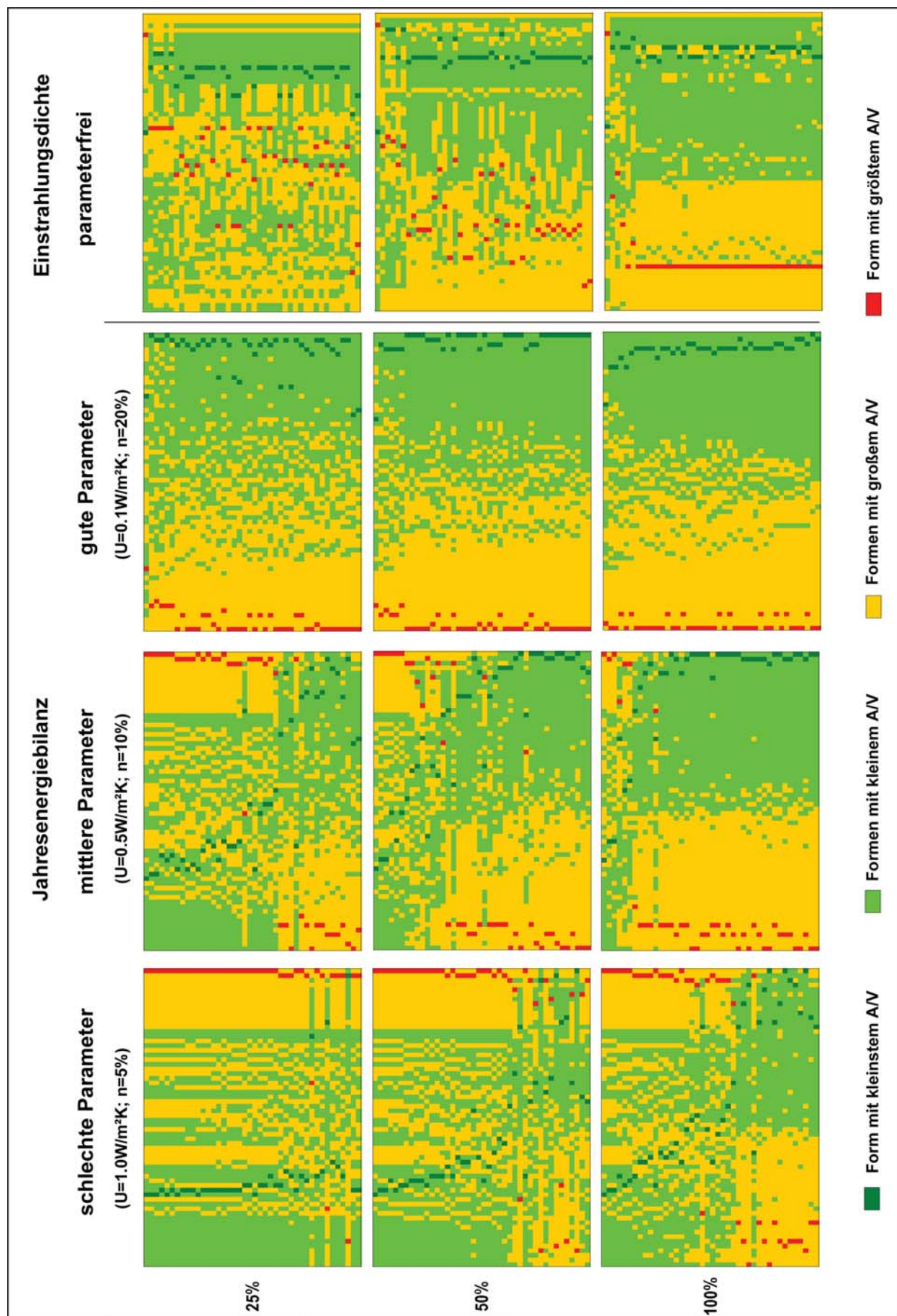
Ergebnismatrix zur **Energiedichte** - Untersuchungsaspekt **A/V**

Ergebnisfeld Energiedichte – Untersuchungsaspekt: Kompaktheit

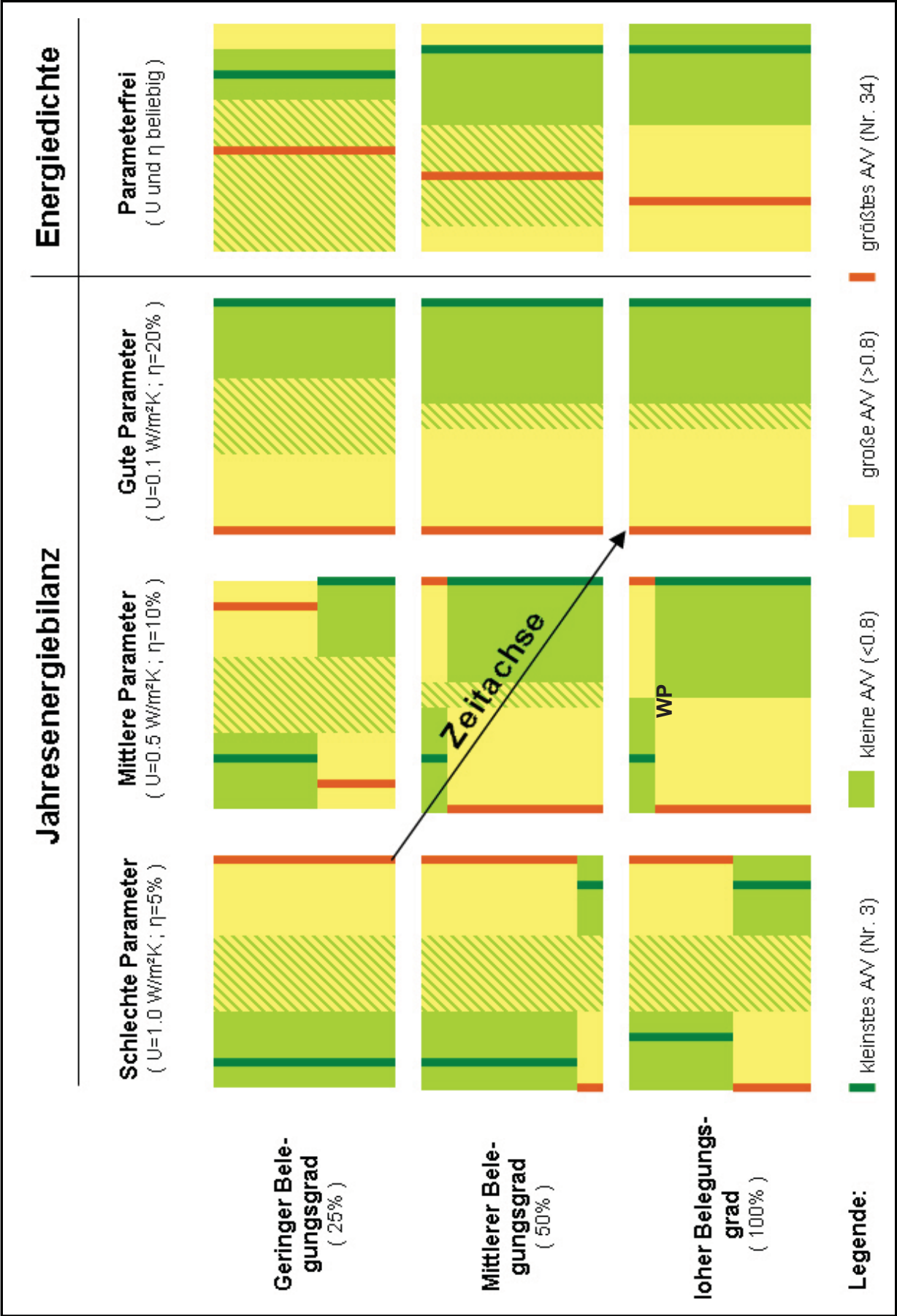
Anhang F: Zusammenfassende Übersicht der Ergebnissfelder

Zur Komprimierung der Datenfülle sind die in *Anhang E* markierten Einzelmatrizen markanter Stationen des Zeitstrahls im Folgenden überblicksartig zusammengestellt und in einem zweiten Schritt zur Vereinfachung der Interpretation verallgemeinert und abstrahiert dargestellt.

Die geographischen und zeitlichen Wendepunkte sind in dieser Darstellungsweise noch deutlicher als Schnittpunkt an den Grenzlinien zwischen den verschiedenen Formengruppenfeldern erkennbar. Ein Wendepunkt (*WP*) ist beispielhaft eingezeichnet.



Übersichtsmatrix prägnanter Stationen – Untersuchungsaspekt: Kompaktheit



Abstraktion der Überblicksmatrix – Untersuchungsaspekt: Kompaktheit

Anhang G: Standortstudie (meteorologisch)

Es folgt eine Übersicht der 42 nach Breitengraden und Klimazonen angeordneten repräsentativen Standorte sowie deren einzelne Ergebnisse zu:

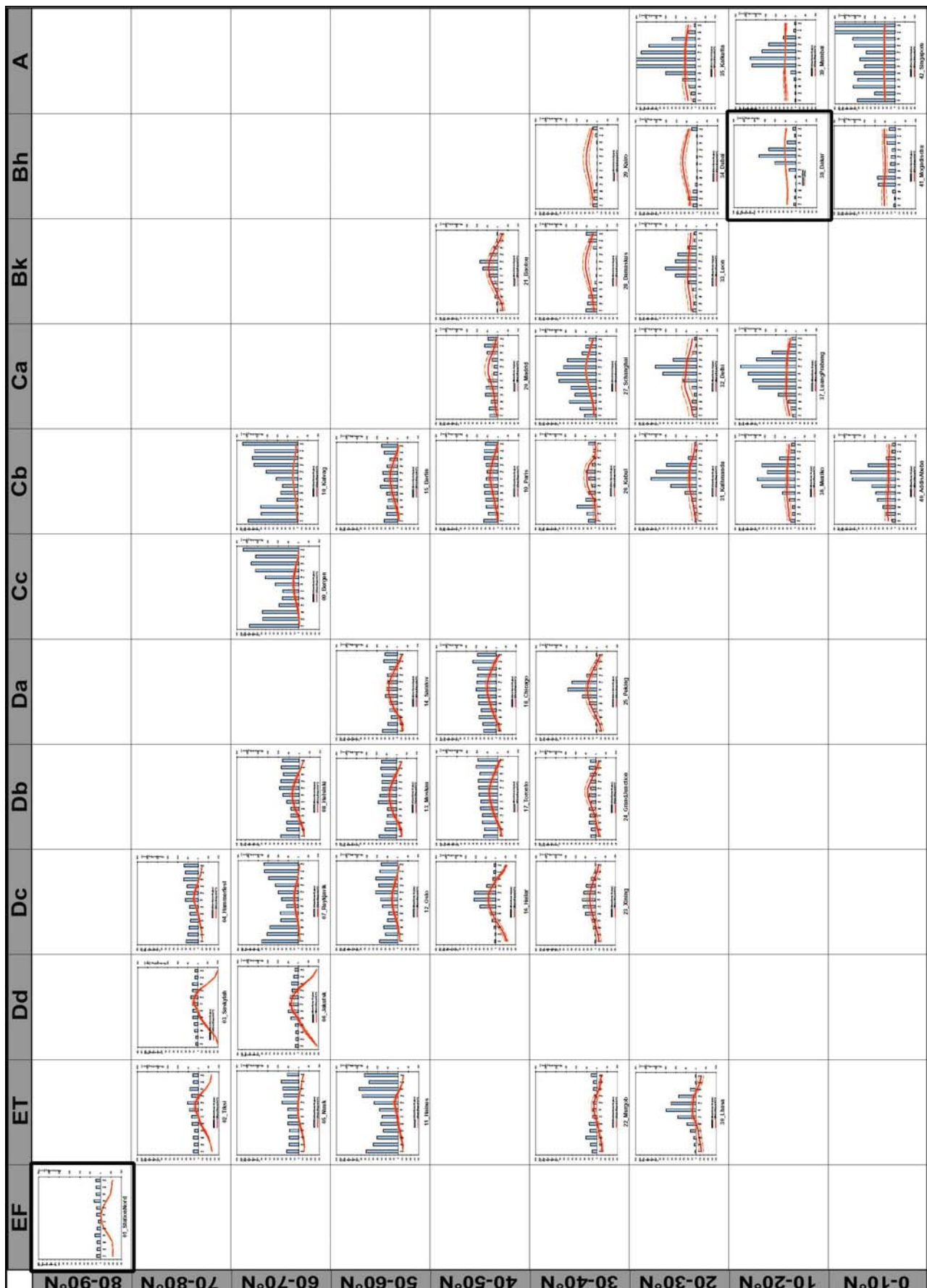
- Jahresverlauf von Lufttemperatur und Niederschlag (Klimadiagramme)
- Jahresverlauf der Heiz- und Kühlgradtage
- Jahresverlauf von Bewölkung, Clearness Index und Albedo
- Jahresverlauf von Extraterrestrischer, Global-, Direkt- und Diffusstrahlung
- Tagesverlauf von Bewölkung und Clearness Index
- Tagesverlauf von Extraterrestrischer, Global-, Direkt- und Diffusstrahlung
- Orientierungsabhängige optimale Neigungswinkel von Empfangsflächen
- Jahresverlauf der monatlichen Energiebilanzen
- Jahressumme der Energiebilanzen

Die in *Abschnitt 1.1* beispielhaft besprochenen Standorte Station Nord und Dakar sind jeweils durch Rahmen hervorgehoben.

EF	ET	Dd	Dc	Db	Da	Cc	Cb	Ca	Bk	Bh	A
01 StationNord											
02 Tiksi	03 Saskylah	04 Hammerfest									
05 Nuuk	06 Jakutsk	07 Reykjavik	08 Helsinki			09 Bergen	10 Kalvag				
11 Haines		12 Oslo	13 Moskau	14 Saratov			15 Berlin				
		16 Hailar	17 Toronto	18 Chicago			19 Paris	20 Madrid	21 Baolou		
22 Murgob		23 Xining	24 Grand Junction	25 Peking			26 Kabul	27 Schanghai	28 Damaskus	29 Kairo	
30 Lhasa							31 Kathmandu	32 Delhi	33 Leon	34 Dubai	35 Kalkutta
							36 Mexiko	37 Luang Prabang		38 Dakar	39 Mumbai
							40 Addis Abeba			41 Mogadischu	42 Singapore
0-10°N	10-20°N	20-30°N	30-40°N	40-50°N	50-60°N	60-70°N	70-80°N	80-90°N			

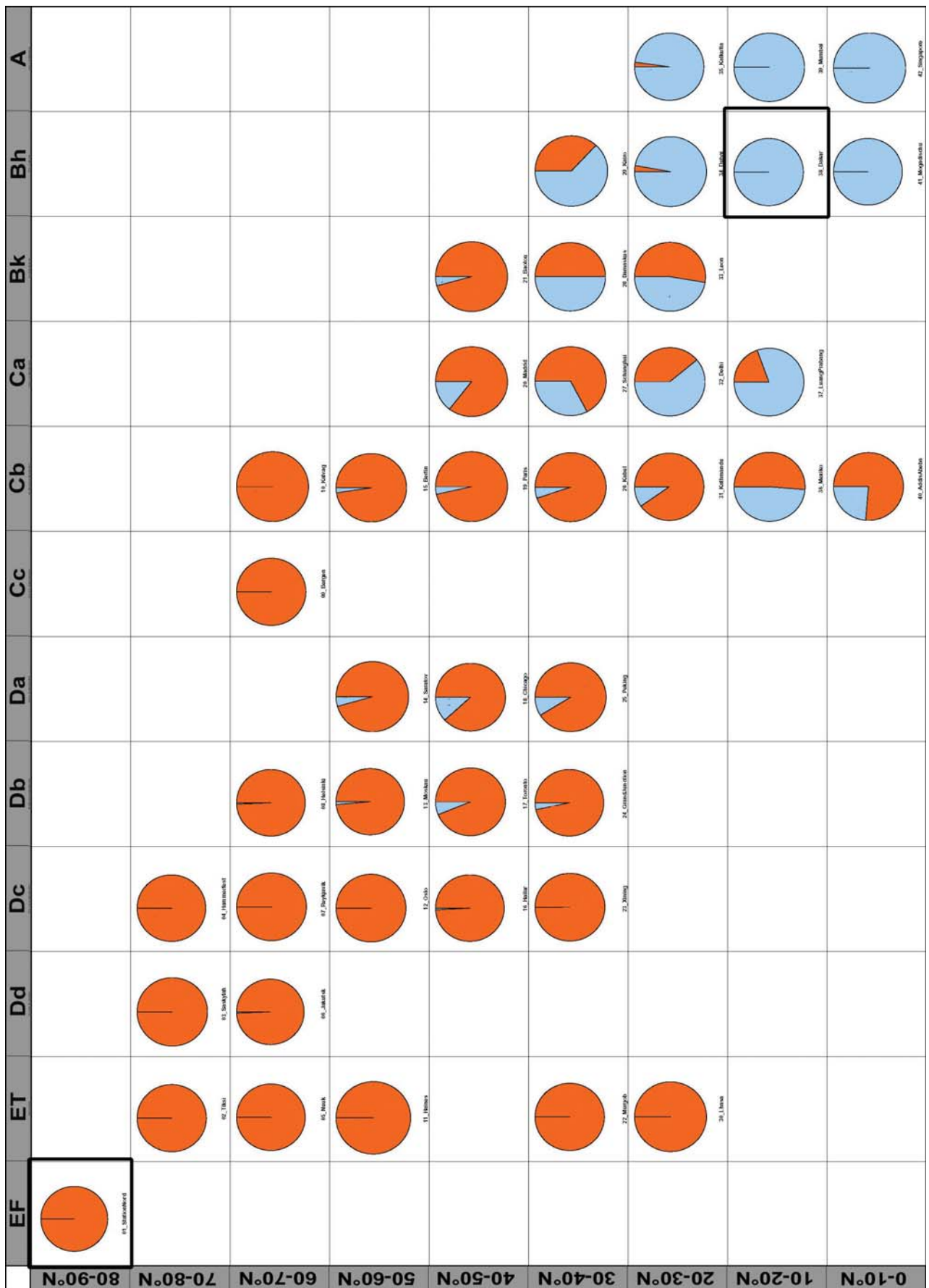
Übersichtsmatrix der 42 Standorte (Klimazonen und Breitengrade)

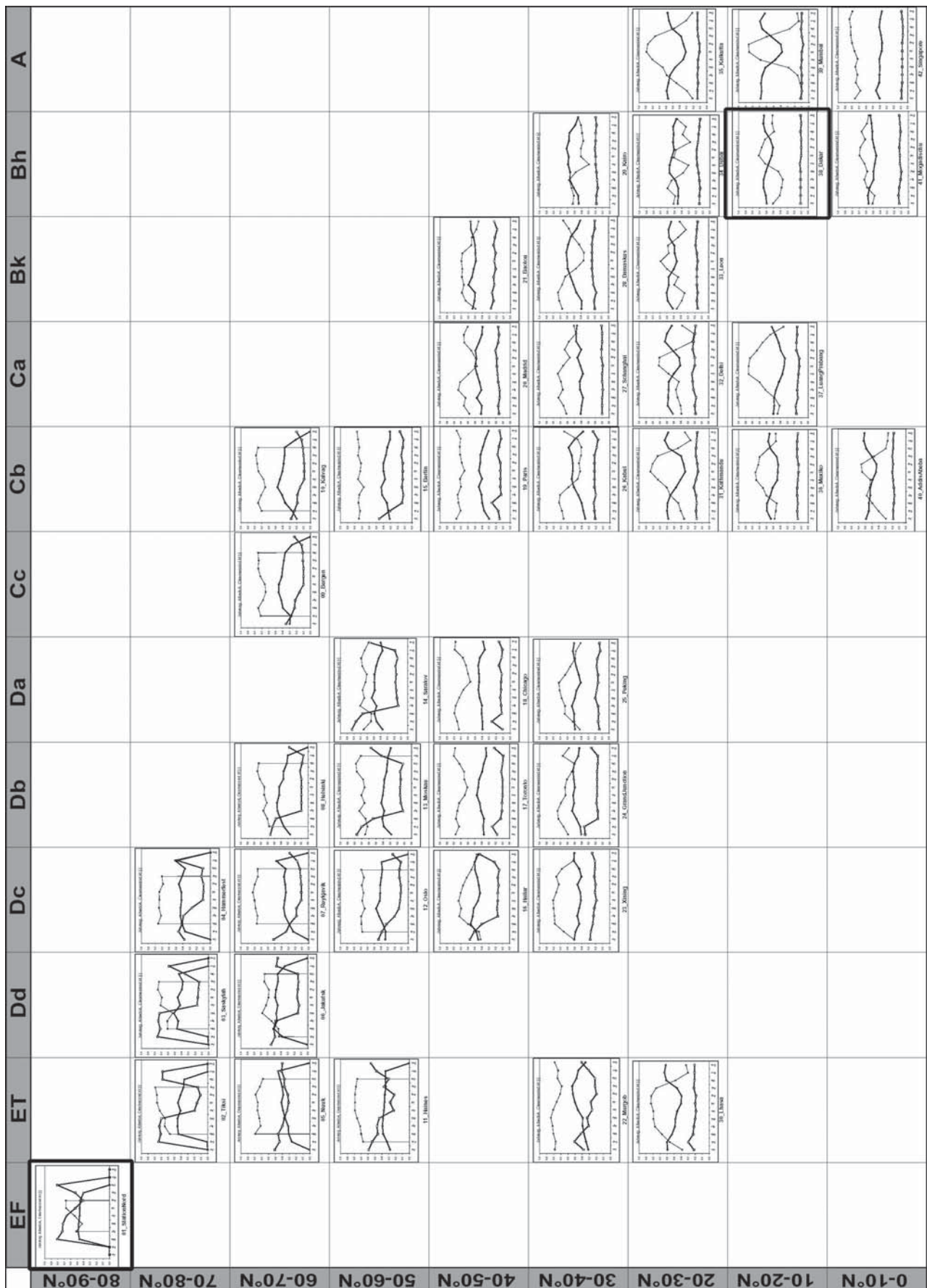
Grafik dient ausschließlich dem visuellen Gesamteindruck. Zoom und detaillierte Beschreibung s. Abschn. 1.1



Übersichtsmatrix: Klimadiagramme (Jahresverlauf Lufttemperatur und Niederschlag)

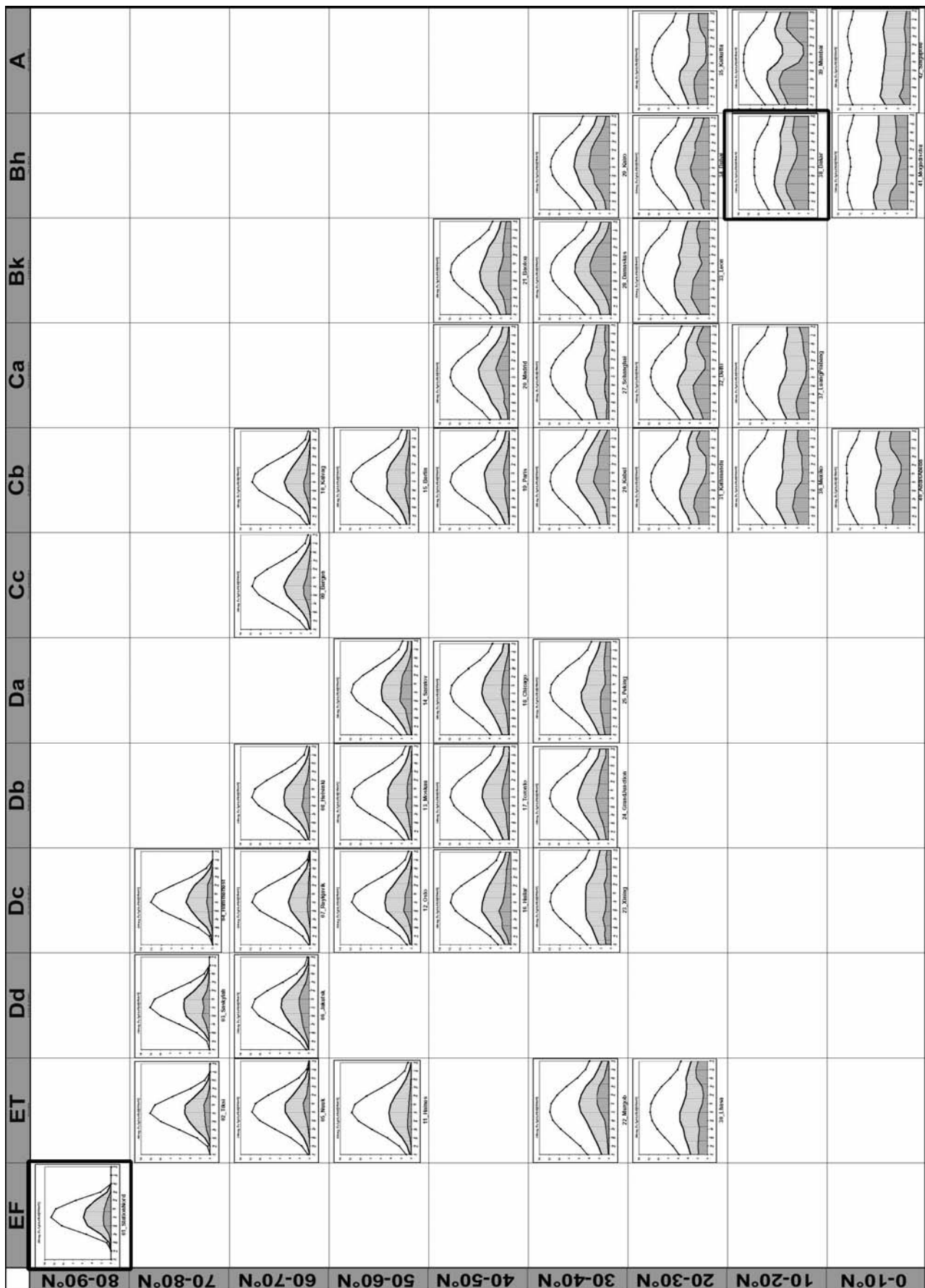
Grafik dient ausschließlich dem visuellen Gesamteindruck. Zoom und detaillierte Beschreibung s. Abschn. 1.1





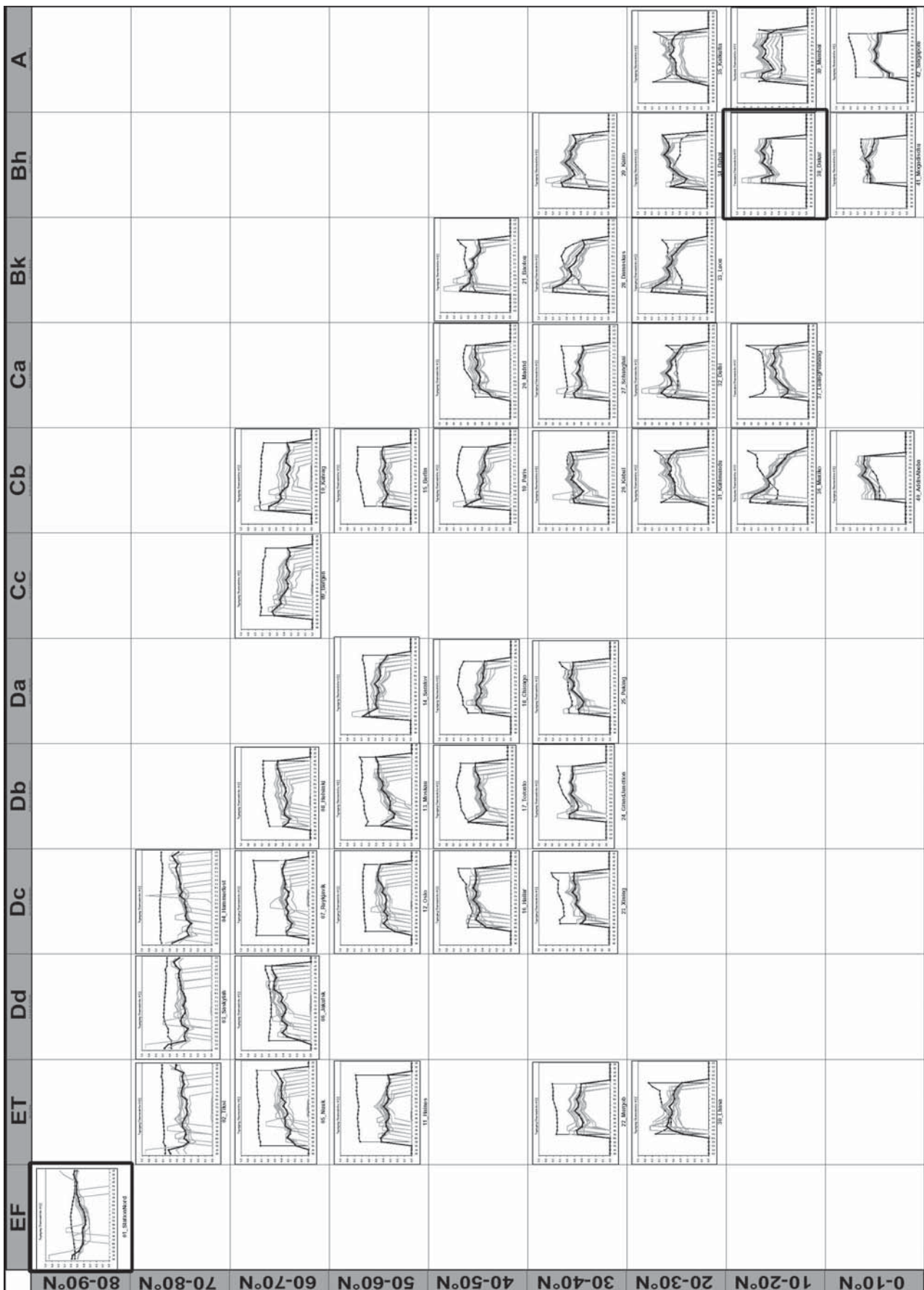
Übersichtsmatrix: Jahresverlauf Bewölkung, Clearness Index und Albedo

Grafik dient ausschließlich dem visuellen Gesamteindruck. Zoom und detaillierte Beschreibung s. Abschn. 1.1



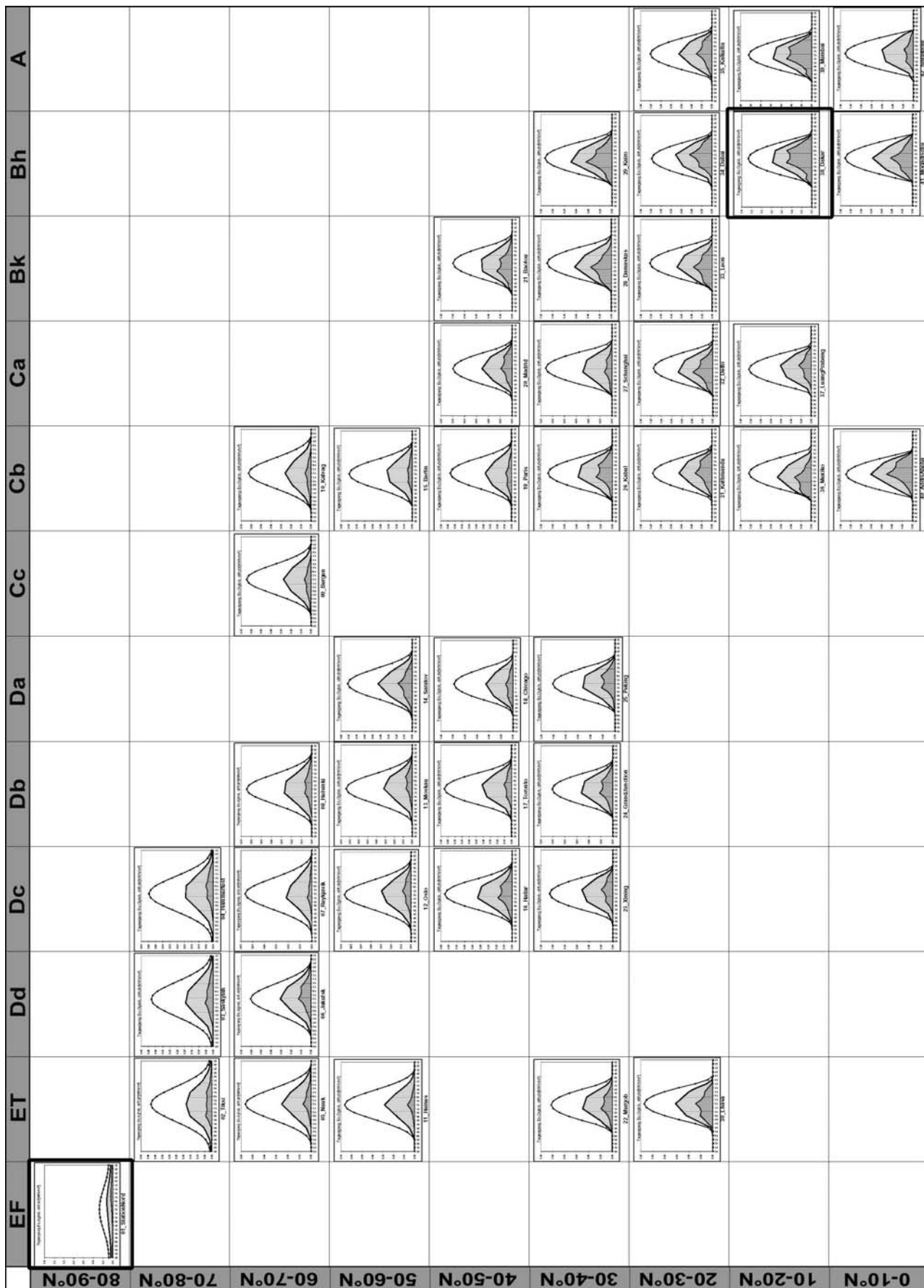
Übersichtsmatrix: Jahresverlauf Extraterrestr., Global-, Direkt- und Diffusstrahlung

Grafik dient ausschließlich dem visuellen Gesamteindruck. Zoom und detaillierte Beschreibung s. Abschn. 1.1



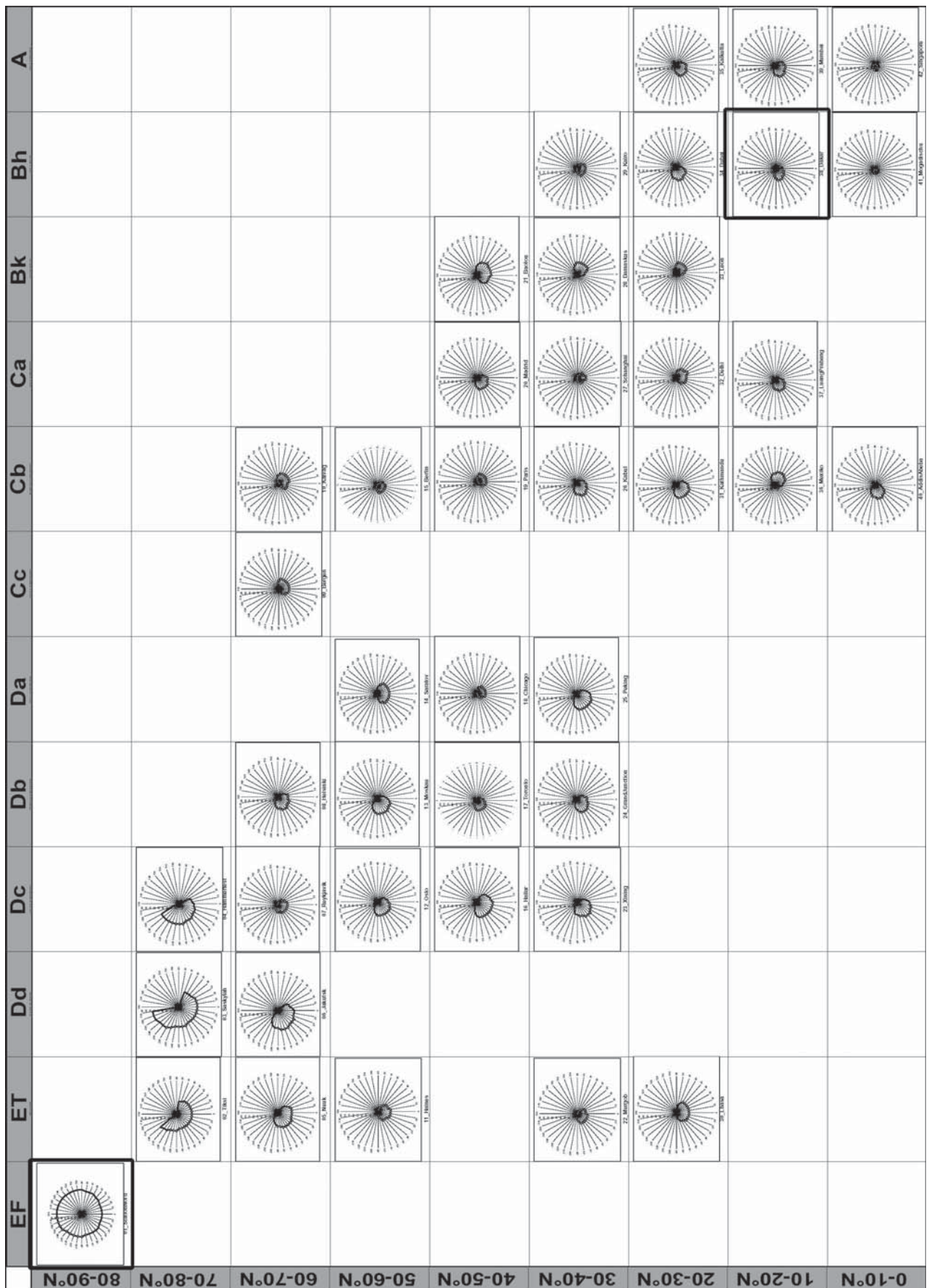
Übersichtsmatrix: Tagesverlauf Bewölkung, Clearness Index und Albedo

Grafik dient ausschließlich dem visuellen Gesamteindruck. Zoom und detaillierte Beschreibung s. Abschn. 1.1



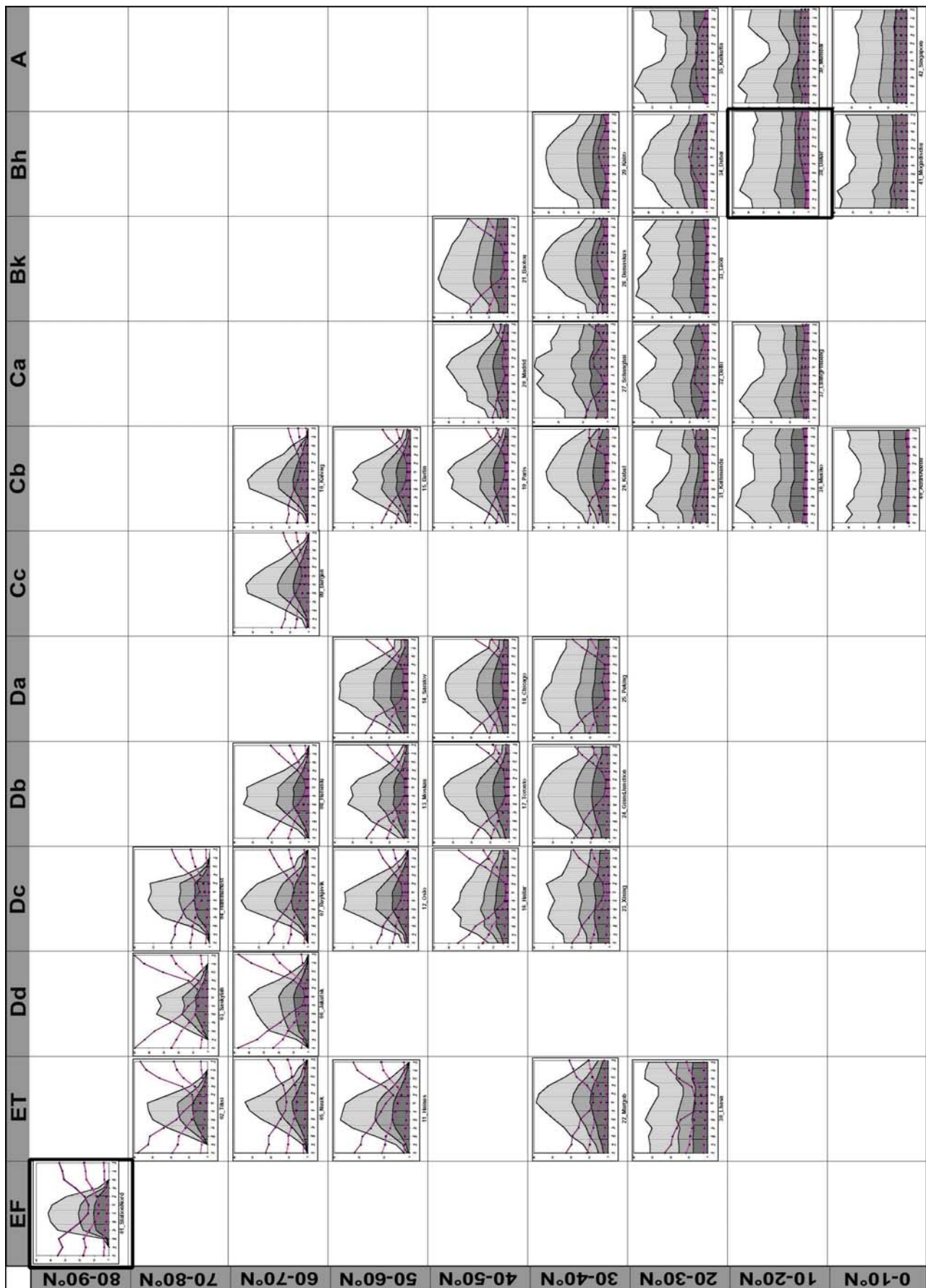
Übersichtsmatrix: Tagesverlauf Extraterrestr., Global-, Direkt- und Diffusstrahlung

Grafik dient ausschließlich dem visuellen Gesamteindruck. Zoom und detaillierte Beschreibung s. Abschn. 1.1



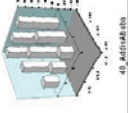
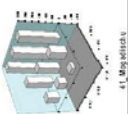
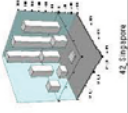
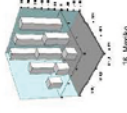
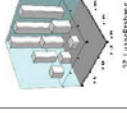
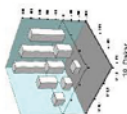
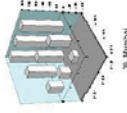
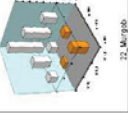
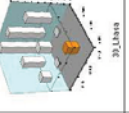
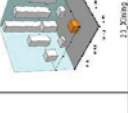
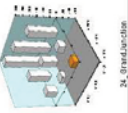
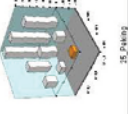
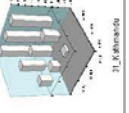
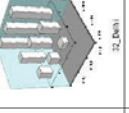
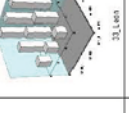
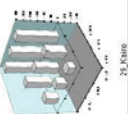
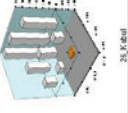
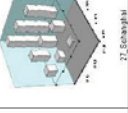
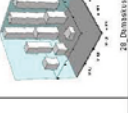
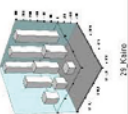
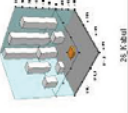
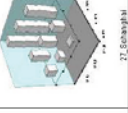
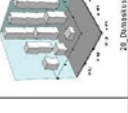
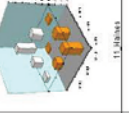
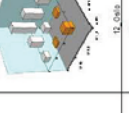
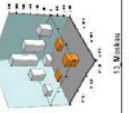
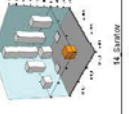
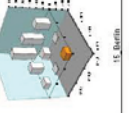
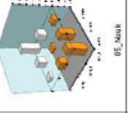
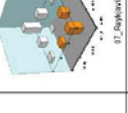
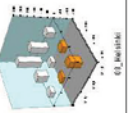
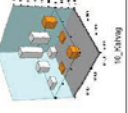
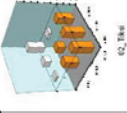
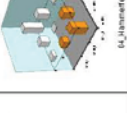
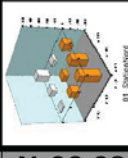
Übersichtsmatrix: Orientierungsabhängige optimale Neigungswinkel

Grafik dient ausschließlich dem visuellen Gesamteindruck. Zoom und detaillierte Beschreibung s. Abschn. 1.1



Übersichtsmatrix: Monatsbilanzen Verluste zu Gewinnen

Grafik dient ausschließlich dem visuellen Gesamteindruck. Zoom und detaillierte Beschreibung s. Abschn. 1.1

	EF	ET	DD	DC	DB	DA	CC	CB	CA	BK	Bh	A
0-10°N												
10-20°N												
20-30°N												
30-40°N												
40-50°N												
50-60°N												
60-70°N												
70-80°N												
80-90°N												

Übersichtsmatrix: Parametermatrix Jahresenergiebilanz

Grafik dient ausschließlich dem visuellen Gesamteindruck. Zoom und detaillierte Beschreibung s. Abschn. 1.1

Anhang H: Formenranking Madrid (nach Jahresenergiebilanz bei schlechten Parametern)

(25% Belegung, 1.0 W/m²K Dämmstandard, 5% Wirkungsgrad)

Das Rankingblatt wurde für eine bessere Lesbarkeit vergrößert und in vier Abschnitte geteilt.
Es erstreckt sich daher über die folgenden vier Seiten

Formenranking nach Jahresenergiebilanz (25% Hülle, $U=1.0$, $\eta=5\%$)

20 Madrid - 1. Teil

Rang	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Form																
Nr.	25	40	64	63	62	29	26	28	41	42	27	61	35	36	43	15
Orientierung																
Energiebilanz 100%-Monate	-24245 1	-24300 1	-24302 1	-24347 1	-24689 1	-24606 1	-24632 1	-24666 1	-24706 1	-25097 1	-26674 1	-26678 1	-26683 1	-26213 1	-26667 1	-26704 1
Art	konv.	unkonv.	unkonv.	unkonv.	unkonv.	konv.	konv.	konv.	unkonv.	unkonv.	konv.	unkonv.	unkonv.	unkonv.	unkonv.	konv.
O [m²] AV	466 0.62	466 0.66	469 0.77	469 0.62	464 0.63	467 0.62	466 0.63	464 0.63	464 0.66	476 0.68	486 0.66	480 0.63	486 0.62	497 0.83	604 0.70	491 0.60
0 bis 15°	0.0%	0.0%	1.3%	0.0%	18.0%	33.3%	0.0%	32.6%	0.0%	0.0%	0.0%	15.0%	0.0%	0.0%	0.0%	22.7%
20 bis 35°	44.0%	0.0%	0.0%	23.2%	9.0%	0.0%	32.2%	3.8%	0.0%	0.0%	36.3%	0.0%	66.3%	49.2%	0.0%	0.0%
40 bis 50°	0.0%	30.6%	67.9%	16.6%	9.0%	0.0%	0.0%	0.0%	40.1%	26.0%	0.0%	0.0%	0.0%	30.3%	67.9%	0.0%
55 bis 70°	0.0%	26.2%	30.8%	0.0%	6.0%	10.9%	13.1%	1.6%	31.6%	41.4%	0.0%	27.8%	18.4%	0.0%	0.0%	0.0%
75 bis 90°	66.0%	43.3%	0.0%	61.3%	66.1%	66.6%	64.6%	62.2%	28.3%	33.6%	63.7%	67.2%	16.4%	20.6%	42.1%	77.3%
Form Grundriß	Satteld. Rechteck	Pyramide 8-eck	Halbkugel Polygon	gen. Tonne Rechteck	Parabeltonne Rechteck	Zelf. Rechteck	Pultd. Rechteck	Walmd. Rechteck	Pyramide 6-eck	Pyramide 5-eck	Mansardd. Rechteck	Schrägl. Rechteck	Pyramide 8-eck	Pyramide 6-eck	Pyramide 4-eck	Quader 1:1
Höhe	kompakt	hoch	kompakt	kompakt	kompakt	kompakt	kompakt	kompakt	hoch	hoch	kompakt	kompakt	kompakt	kompakt	hoch	kompakt
Gr. 1																
Gr. 2																
Gruppe 3																
3a																
3b																
3c																
Gr. 4																
4	Nr. 25					Nr. 29	Nr. 26	Nr. 28		Nr. 27						
Gruppe 5																
5a																
5b																
5c																
40		Nr. 40							Nr. 41	Nr. 42					Nr. 43	
Gruppe 6																
6a																
6b																
6c																
Gr. 7																
64			Nr. 64	Nr. 63	Nr. 62						Nr. 61					

Madrid-Teil 1: Bilanz; 25% Belegung, 1.0 W/m²K Dämmstandard, 5 % Wirkungsgrad

Grafik dient ausschließlich dem visuellen Gesamteindruck, detaillierte Beschreibung u. Auswertung s. Kap. 1.2

Madrid-Teil 4: Bilanz; 25% Belegung, 1.0 W/m²K Dämmstandard, 5 % Wirkungsgrad
Grafik dient ausschließlich dem visuellen Gesamteindruck, detaillierte Beschreibung u. Auswertung s. Kap. 1.2

Anhang I: Rankingstudie – Station Nord / Dakar (nach Einstrahlungsdichte und Jahresenergie- bilanz)

Die folgenden Rankings erstrecken sich jeweils über vier Seiten und sollen ausschließlich dem visuellen Gesamteindruck dienen. Detaillierte Beschreibung und Auswertung *siehe Kapitel 1.2.*

Formen der Untersuchungsgruppe 1 sind durch Rahmen hervorgehoben.

a) Sortierung nach Einstrahlungsdichte:

Formenranking nach Jahresenergiedichte (33% Hülle)										01_StationNord - 1. Teil						
Rang	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Form																
	Nr. 56	Nr. 59	Nr. 58	Nr. 55	Nr. 60	Nr. 57	Nr. 64	Nr. 6	Nr. 7	Nr. 19	Nr. 22	Nr. 23	Nr. 24	Nr. 18	Nr. 9	Nr. 40

StationNord-Teil1: Dichte; 33% Belegung

Formenranking nach Jahresenergiedichte (33% Hülle)										38_Dakar - 1. Teil						
Rang	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Form																
	Nr. 38	Nr. 27	Nr. 39	Nr. 37	Nr. 35	Nr. 36	Nr. 26	Nr. 44	Nr. 54	Nr. 53	Nr. 52	Nr. 62	Nr. 45	Nr. 46	Nr. 48	Nr. 49

Dakar-Teil1: Dichte; 33% Belegung**b) Sortierung nach Jahresenergiebilanz:**

Formenranking nach Jahresenergiebilanz (33% Hülle, $U=0.5$, $\eta=10\%$)										01_StationNord - 1. Teil						
Rang	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Form																
	Nr. 40	Nr. 64	Nr. 25	Nr. 29	Nr. 63	Nr. 41	Nr. 26	Nr. 28	Nr. 62	Nr. 42	Nr. 61	Nr. 27	Nr. 35	Nr. 15	Nr. 36	Nr. 3

StationNord-Teil1: Bilanz; 33% Belegung, 0.5 W/m²K Dämmung, 10% Wirkungsgrad

Formenranking nach Jahresenergiebilanz (33% Hülle, U=0.5, η=10%)											38_Dakar - 1. Teil					
Rang	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Form																
	Nr. 34	Nr. 46	Nr. 48	Nr. 49	Nr. 45	Nr. 47	Nr. 33	Nr. 32	Nr. 31	Nr. 30	Nr. 6	Nr. 9	Nr. 39	Nr. 5	Nr. 14	Nr. 44

Dakar-Teil1: Bilanz; 33% Belegung, 0.5 W/m²K Dämmung, 10% Wirkungsgrad

01_StationNord - 2. Teil															
17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32
Nr. 61	Nr. 17	Nr. 41	Nr. 21	Nr. 8	Nr. 26	Nr. 42	Nr. 53	Nr. 54	Nr. 51	Nr. 16	Nr. 63	Nr. 44	Nr. 50	Nr. 1	Nr. 2

StationNord-Teil2: Dichte; 33% Belegung

38_Dakar - 2. Teil															
17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32
Nr. 47	Nr. 28	Nr. 51	Nr. 50	Nr. 64	Nr. 31	Nr. 30	Nr. 32	Nr. 33	Nr. 34	Nr. 43	Nr. 63	Nr. 41	Nr. 42	Nr. 5	Nr. 4

Dakar-Teil2: Dichte; 33% Belegung

01_StationNord - 2. Teil															
17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32
Nr. 43	Nr. 57	Nr. 60	Nr. 16	Nr. 55	Nr. 37	Nr. 4	Nr. 52	Nr. 38	Nr. 59	Nr. 58	Nr. 50	Nr. 17	Nr. 56	Nr. 20	Nr. 10

StationNord-Teil2: Bilanz; 33% Belegung, 0.5 W/m²K Dämmung, 10% Wirkungsgrad

38_Dakar - 2. Teil															
17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32
Nr. 13	Nr. 51	Nr. 54	Nr. 53	Nr. 12	Nr. 38	Nr. 50	Nr. 52	Nr. 11	Nr. 8	Nr. 37	Nr. 10	Nr. 36	Nr. 27	Nr. 4	Nr. 35

Dakar-Teil2: Bilanz; 33% Belegung, 0.5 W/m²K Dämmung, 10% Wirkungsgrad

01_StationNord - 3. Teil															
33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48
Nr. 43	Nr. 52	Nr. 27	Nr. 62	Nr. 20	Nr. 29	Nr. 3	Nr. 15	Nr. 28	Nr. 35	Nr. 36	Nr. 25	Nr. 38	Nr. 37	Nr. 39	Nr. 14

StationNord-Teil3: Dichte; 33% Belegung

38_Dakar - 3. Teil															
33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48
Nr. 10	Nr. 11	Nr. 12	Nr. 13	Nr. 14	Nr. 29	Nr. 40	Nr. 61	Nr. 9	Nr. 25	Nr. 8	Nr. 60	Nr. 59	Nr. 58	Nr. 57	Nr. 56

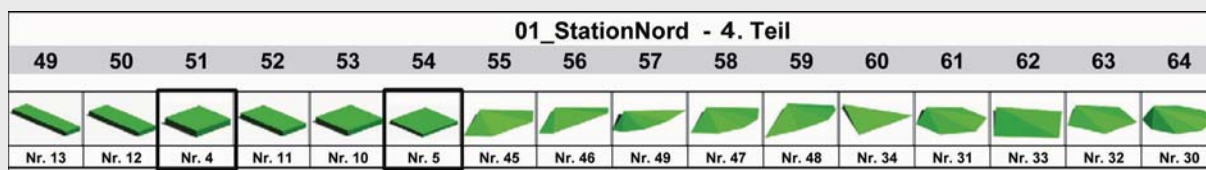
Dakar-Teil3: Dichte; 33% Belegung

01_StationNord - 3. Teil															
33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48
Nr. 53	Nr. 54	Nr. 51	Nr. 11	Nr. 44	Nr. 8	Nr. 18	Nr. 21	Nr. 12	Nr. 39	Nr. 13	Nr. 19	Nr. 22	Nr. 14	Nr. 5	Nr. 23

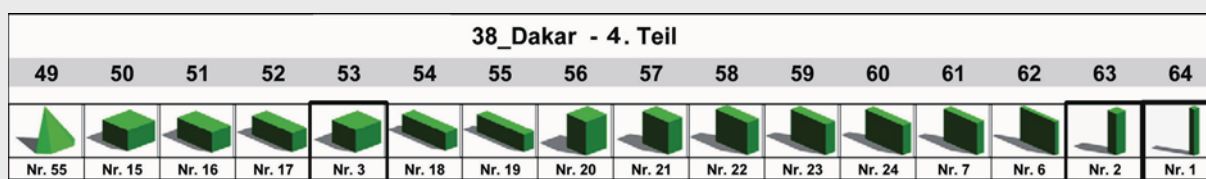
StationNord-Teil3: Bilanz; 33% Belegung, 0.5 W/m²K Dämmung, 10% Wirkungsgrad

38_Dakar - 3. Teil															
33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48
Nr. 7	Nr. 43	Nr. 59	Nr. 58	Nr. 24	Nr. 56	Nr. 19	Nr. 26	Nr. 1	Nr. 62	Nr. 28	Nr. 60	Nr. 18	Nr. 23	Nr. 64	Nr. 42

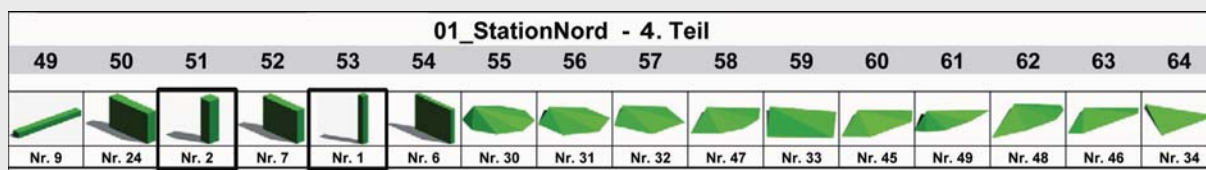
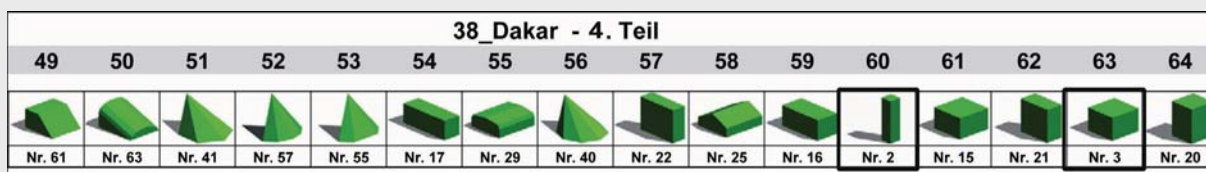
Dakar-Teil3: Bilanz; 33% Belegung, 0.5 W/m²K Dämmung, 10% Wirkungsgrad



StationNord-Teil4: Dichte; 33% Belegung



Dakar-Teil4: Dichte; 33% Belegung

StationNord-Teil4: Bilanz; 33% Belegung, 0.5 W/m²K Dämmung, 10% WirkungsgradDakar-Teil4: Bilanz; 33% Belegung, 0.5 W/m²K Dämmung, 10% Wirkungsgrad

Anhang J: Standortstudie (Auswertung des Formenrankings)

Es folgt eine Übersicht der 42 nach Breitengraden und Klimazonen angeordneten repräsentativen Standorte sowie deren einzelne Auswertungen zu den Untersuchungen zu:

- Oberfläche
- Kompaktheit
- Oberflächen mit 0-15° Neigung
- Oberflächen mit 20-35° Neigung
- Oberflächen mit 40-50° Neigung
- Oberflächen mit 55-70° Neigung
- Oberflächen mit 75-90° Neigung
- Gebäudehöhe (flach, mittelhoch, hoch)
- Primärform (Quader/Pyramide)
- Art (konventionell/unkonventionell)
- Gruppe (1 bis 7)
- Reihe (1 bis 7 / a, b, c)
- Form (1 bis 42)
- Jahresenergiebilanz (in kWh)

Den Berechnungen liegt die ungünstigste Parameterkombination (25% solarer Belegungsgrad, 1.0W/m²K Dämmstandard und 5% solarer Wirkungsgrad) zugrunde. Je Zelle ist für den jeweiligen Standort das energetisch günstigste und ungünstigste Ergebnis aufgeführt.

Legende:



besonders günstig an diesem Standort / empfehlenswert

besonders ungünstig an diesem Standort / n. empfehlenswert

	EF	ET	Dd	Dc	Db	Da	Cc	Cb	Ca	Bk	Bh	A
0-10° N												
10-20° N												
20-30° N		30 Lhasa						31 Kathmandu	32 Delhi	33 Leon	34 Dubai	35 Kalkutta
30-40° N		22 Murgob		23 Xining	24 Grand Junction	25 Peking		26 Kabul	27 Schanghai	28 Damaskus	29 Kairo	
40-50° N				16 Hailar	17 Toronto	18 Chicago		19 Paris	20 Madrid	21 Bactou		
50-60° N		11 Haines		12 Oslo	13 Moskau	14 Saratov		15 Berlin				
60-70° N		05 Nuuk	06 Jakutsk	07 Reykjavik	08 Helsinki		09 Bergen	10 Kalvag				
70-80° N		02 Tiksi	03 Saskylah	04 Hammerfest								
80-90° N	01 StationNord											

Übersichtsmatrix der 42 Standorte (Klimazonen und Breitengrade)

Grafik dient ausschließlich dem visuellen Gesamteindruck. Zoom und detaillierte Beschreibung s. Abschn. 1.1

	EF	ET	Dd	Dc	Db	Da	Cc	Cb	Ca	Bk	Bh	A
0-10°N												
10-20°N												
20-30°N												
30-40°N												
40-50°N												
50-60°N												
60-70°N												
70-80°N												
80-90°N												

Auswertung Oberfläche (25% Belegung, 1.0W/m²K Dämmstandard, 5% Wirkungsgrad)

Grafik dient ausschließlich dem visuellen Gesamteindruck, detaillierte Beschreibung u. Auswertung s. Kap. 1.2

	EF	ET	Dd	Dc	Db	Da	Cc	Cb	Ca	Bk	Bh	A
0-10° N								unkomp.	unkomp.		unkomp.	unkomp.
10-20° N								unkomp.	unkomp.		unkomp.	unkomp.
20-30° N	komp.	unkomp.						unkomp.	unkomp.	unkomp.	unkomp.	unkomp.
30-40° N	komp.	unkomp.		komp.	unkomp.	komp.	unkomp.	unkomp.	unkomp.	unkomp.	unkomp.	unkomp.
40-50° N				komp.	unkomp.	komp.	unkomp.	unkomp.	unkomp.	unkomp.	unkomp.	unkomp.
50-60° N		komp.		komp.	unkomp.	komp.	unkomp.	unkomp.	unkomp.	unkomp.	unkomp.	unkomp.
60-70° N		komp.	komp.	komp.	unkomp.	komp.	unkomp.	unkomp.	unkomp.	unkomp.	unkomp.	unkomp.
70-80° N		komp.	komp.	komp.	unkomp.	komp.	unkomp.	unkomp.	unkomp.	unkomp.	unkomp.	unkomp.
80-90° N	komp.	unkomp.										

Ausw. Kompaktheit (25% Belegung, 1.0W/m²K Dämmstandard, 5% Wirkungsgrad)

Grafik dient ausschließlich dem visuellen Gesamteindruck, detaillierte Beschreibung u. Auswertung s. Kap. 1.2

	EF	ET	Dd	Dc	Db	Da	Cc	Cb	Ca	Bk	Bh	A
0-10° N								0-15°	-		0-15°	0-15°
10-20° N								0-15°	0-15°		0-15°	0-15°
20-30° N		0-15°						0-15°	0-15°	0-15°	0-15°	0-15°
30-40° N	0-15°	0-15°		0-15°	0-15°	0-15°		0-15°	0-15°	0-15°	0-15°	0-15°
40-50° N				0-15°	0-15°	0-15°		0-15°	0-15°	0-15°	0-15°	0-15°
50-60° N		0-15°		0-15°	0-15°	0-15°		0-15°	0-15°			
60-70° N		0-15°	0-15°	0-15°	0-15°	0-15°	0-15°	0-15°	0-15°			
70-80° N		0-15°	0-15°	0-15°	0-15°	0-15°	0-15°	0-15°	0-15°			
80-90° N	0-15°											

Ausw. 0-15° Neigung (25% Belegung, 1.0W/m²K Dämmstandard, 5% Wirkungsgrad)

Grafik dient ausschließlich dem visuellen Gesamteindruck, detaillierte Beschreibung u. Auswertung s. Kap. 1.2

	EF	ET	Dd	Dc	Db	Da	Cc	Cb	Ca	Bk	Bh	A
0-10° N												
10-20° N												
20-30° N		40-50° -							40-50° -	40-50° -	40-50° -	40-50° -
30-40° N		40-50° -				40-50° -			40-50° -	40-50° -	40-50° -	
40-50° N				40-50° -	40-50° -	40-50° -			40-50° -	40-50° -		
50-60° N		40-50° -		40-50° -	40-50° -	40-50° -						
60-70° N		40-50° -	40-50° -	40-50° -	40-50° -		40-50° -	40-50° -				
70-80° N		40-50° -	40-50° -	40-50° -								
80-90° N	40-50° -											

Ausw. 40-50° Neigung (25% Belegung, 1.0W/m²K Dämmstandard, 5% Wirkungsgrad)

Grafik dient ausschließlich dem visuellen Gesamteindruck, detaillierte Beschreibung u. Auswertung s. Kap. 1.2

	EF	ET	Dd	Dc	Db	Da	Cc	Cb	Ca	Bk	Bh	A
0-10° N												
10-20° N												
20-30° N		55-70° -										
30-40° N		55-70° -										
40-50° N												
50-60° N		55-70° -										
60-70° N		55-70° -										
70-80° N		55-70° -										
80-90° N	55-70° -											

Ausw. 55-70° Neigung (25% Belegung, 1.0W/m²K Dämmstandard, 5% Wirkungsgrad)

Grafik dient ausschließlich dem visuellen Gesamteindruck, detaillierte Beschreibung u. Auswertung s. Kap. 1.2

	EF	ET	Dd	Dc	Db	Da	Cc	Cb	Ca	Bk	Bh	A
0-10°N								mittelhoch flach				
10-20°N												
20-30°N		mittelhoch flach										flach hoch
30-40°N		mittelhoch flach									flach hoch	
40-50°N									flach hoch	mittelhoch flach		
50-60°N		mittelhoch flach										
60-70°N		mittelhoch flach										
70-80°N		mittelhoch flach	mittelhoch flach	mittelhoch flach	mittelhoch flach							
80-90°N	mittelhoch flach											

Ausw. Gebäudehöhe (25% Belegung, 1.0W/m²K Dämmstandard, 5% Wirkungsgrad)

Grafik dient ausschließlich dem visuellen Gesamteindruck, detaillierte Beschreibung u. Auswertung s. Kap. 1.2

	EF	ET	Dd	Dc	Db	Da	Cc	Cb	Ca	Bk	Bh	A
0-10° N								Pyramide Quader				
10-20° N								Pyramide Quader				
20-30° N								Pyramide Quader				
30-40° N								Pyramide Quader				
40-50° N								Pyramide Quader				
50-60° N								Pyramide Quader				
60-70° N								Pyramide Quader				
70-80° N								Pyramide Quader				
80-90° N								Pyramide Quader				

Auswertung Primärform (25% Belegung, 1.0W/m²K Dämmstandard, 5% Wirkungsgrad)

Grafik dient ausschließlich dem visuellen Gesamteindruck, detaillierte Beschreibung u. Auswertung s. Kap. 1.2

	EF	ET	Dd	Dc	Db	Da	Cc	Cb	Ca	Bk	Bh	A
0-10° N								unkonv. konv.			unkonv. konv.	unkonv. konv.
10-20° N								unkonv. konv.	unkonv. konv.		unkonv. konv.	unkonv. konv.
20-30° N		unkonv. konv.						unkonv. konv.	unkonv. konv.	unkonv. konv.	unkonv. konv.	unkonv. konv.
30-40° N		unkonv. konv.		unkonv. konv.	unkonv. konv.	unkonv. konv.		unkonv. konv.	unkonv. konv.	unkonv. konv.	unkonv. konv.	unkonv. konv.
40-50° N				unkonv. konv.	unkonv. konv.	unkonv. konv.		unkonv. konv.	unkonv. konv.	unkonv. konv.	unkonv. konv.	unkonv. konv.
50-60° N		unkonv. konv.		unkonv. konv.	unkonv. konv.	unkonv. konv.		unkonv. konv.	unkonv. konv.			
60-70° N		unkonv. konv.	unkonv. konv.	unkonv. konv.	unkonv. konv.		unkonv. konv.	unkonv. konv.				
70-80° N		unkonv. konv.	unkonv. konv.	unkonv. konv.								
80-90° N	unkonv. konv.											

Auswertung Art (25% Belegung, 1.0W/m²K Dämmstandard, 5% Wirkungsgrad)

Grafik dient ausschließlich dem visuellen Gesamteindruck, detaillierte Beschreibung u. Auswertung s. Kap. 1.2

	EF	ET	Dd	Dc	Db	Da	Cc	Cb	Ca	Bk	Bh	A
0-10°N								Gruppe 6 Gruppe 4				Gruppe 5 Gruppe 1
10-20°N								Gruppe 6 Gruppe 4	Gruppe 6 Gruppe 4		Gruppe 6 Gruppe 4	Gruppe 6 Gruppe 1
20-30°N		Gruppe 4 Gruppe 2						Gruppe 6 Gruppe 1	Gruppe 6 Gruppe 3	Gruppe 6 Gruppe 4	Gruppe 6 Gruppe 1	Gruppe 6 Gruppe 1
30-40°N		Gruppe 4 Gruppe 2		Gruppe 4 Gruppe 2	Gruppe 4 Gruppe 2	Gruppe 7 Gruppe 2		Gruppe 6 Gruppe 2	Gruppe 5 Gruppe 1	Gruppe 6 Gruppe 4	Gruppe 5 Gruppe 7	
40-50°N				Gruppe 4 Gruppe 2	Gruppe 4 Gruppe 2	Gruppe 4 Gruppe 2		Gruppe 4 Gruppe 2	Gruppe 5 Gruppe 1	Gruppe 7 Gruppe 2		
50-60°N		Gruppe 4 Gruppe 2		Gruppe 4 Gruppe 2	Gruppe 4 Gruppe 2	Gruppe 4 Gruppe 2		Gruppe 4 Gruppe 2				
60-70°N		Gruppe 4 Gruppe 2	Gruppe 4 Gruppe 2	Gruppe 4 Gruppe 2	Gruppe 4 Gruppe 2		Gruppe 4 Gruppe 2	Gruppe 4 Gruppe 2				
70-80°N		Gruppe 4 Gruppe 2	Gruppe 4 Gruppe 2	Gruppe 4 Gruppe 2								
80-90°N	Gruppe 4 Gruppe 2											

Auswertung Gruppe (25% Belegung, 1.0W/m²K Dämmstandard, 5% Wirkungsgrad)

Grafik dient ausschließlich dem visuellen Gesamteindruck, detaillierte Beschreibung u. Auswertung s. Kap. 1.2

	EF	ET	Dd	Dc	Db	Da	Cc	Cb	Ca	Bk	Bh	A
N.00-08	Reihe 4 Reihe 5a											
70-80°N	Reihe 4 Reihe 5a	Reihe 4 Reihe 5a	Reihe 4 Reihe 5a	Reihe 4 Reihe 5a								
60-70°N	Reihe 4 Reihe 5a	Reihe 4 Reihe 5a	Reihe 4 Reihe 5a	Reihe 4 Reihe 5a	Reihe 4 Reihe 5a		Reihe 4 Reihe 5a	Reihe 4 Reihe 5a				
50-60°N	Reihe 4 Reihe 5a	Reihe 4 Reihe 5a	Reihe 4 Reihe 5a	Reihe 4 Reihe 5a	Reihe 4 Reihe 5a	Reihe 4 Reihe 5a		Reihe 4 Reihe 5a				
40-50°N				Reihe 4 Reihe 5a	Reihe 4 Reihe 5a	Reihe 4 Reihe 3c		Reihe 5b Reihe 3c	Reihe 6a Reihe 3c	Reihe 5c Reihe 5a		
30-40°N	Reihe 4 Reihe 5a	Reihe 4 Reihe 5a		Reihe 5c Reihe 5a	Reihe 5b Reihe 3c	Reihe 6b Reihe 3c		Reihe 6a Reihe 3c	Reihe 6a Reihe 3c	Reihe 6a Reihe 3b Reihe 3c	Reihe 5a Reihe 3c	
20-30°N	Reihe 4 Reihe 5a	Reihe 4 Reihe 5a						Reihe 6a Reihe 3c	Reihe 6a Reihe 3c	Reihe 6a Reihe 4	Reihe 6a Reihe 3c	Reihe 6a Reihe 3c
10-20°N								Reihe 6a Reihe 4	Reihe 6a Reihe 3b		Reihe 6a Reihe 3c	Reihe 6a Reihe 3c
0-10°N								Reihe 6a Reihe 4			Reihe 5a Reihe 3c	Reihe 5a Reihe 3c

Auswertung Reihe (25% Belegung, 1.0W/m²K Dämmstandard, 5% Wirkungsgrad)

Grafik dient ausschließlich dem visuellen Gesamteindruck, detaillierte Beschreibung u. Auswertung s. Kap. 1.2

	EF	ET	Dd	Dc	Db	Da	Cc	Cb	Ca	Bk	Bh	A
80-90°N	Nr. 40 Nr. 34											
70-80°N	Nr. 40 Nr. 34	Nr. 40 Nr. 34	Nr. 40 Nr. 34	Nr. 40 Nr. 34								
60-70°N	Nr. 40 Nr. 34	Nr. 40 Nr. 34	Nr. 40 Nr. 34	Nr. 64 Nr. 6	Nr. 64 Nr. 6		Nr. 64 Nr. 6	Nr. 26 Nr. 6				
50-60°N	Nr. 64 Nr. 34	Nr. 64 Nr. 34		Nr. 64 Nr. 6	Nr. 64 Nr. 6	Nr. 64 Nr. 6		Nr. 26 Nr. 6				
40-50°N				Nr. 64 Nr. 6	Nr. 26 Nr. 6	Nr. 27 Nr. 6		Nr. 27 Nr. 6	Nr. 46 Nr. 1	Nr. 64 Nr. 6		
30-40°N	Nr. 26 Nr. 6	Nr. 26 Nr. 6		Nr. 64 Nr. 6	Nr. 35 Nr. 6	Nr. 44 Nr. 1		Nr. 46 Nr. 1	Nr. 46 Nr. 1	Nr. 46 Nr. 3	Nr. 34 Nr. 20	
20-30°N	Nr. 64 Nr. 6	Nr. 64 Nr. 6						Nr. 46 Nr. 2	Nr. 46 Nr. 20	Nr. 34 Nr. 25	Nr. 46 Nr. 2	Nr. 46 Nr. 20
10-20°N								Nr. 46 Nr. 29	Nr. 46 Nr. 20		Nr. 34 Nr. 20	Nr. 46 Nr. 2
0-10°N								Nr. 46 Nr. 29			Nr. 34 Nr. 1	Nr. 34 Nr. 1

Auswertung Form (25% Belegung, 1.0W/m²K Dämmstandard, 5% Wirkungsgrad)

Grafik dient ausschließlich dem visuellen Gesamteindruck, detaillierte Beschreibung u. Auswertung s. Kap. 1.2

	EF	ET	Dd	Dc	Db	Da	Cc	Cb	Ca	Bk	Bh	A
80-90°N	-57385 -150771											
70-80°N	-52825 -134763	-64150 -164424	-25671 -68468									
60-70°N	-33928 -87219	-44778 -118264	-19926 -52640	-16370 -45386			-12220 -35615	-9473 -28624				
50-60°N	-29963 -75460		-12382 -36175	-14745 -40734	-10290 -34363			-6601 -24640				
40-50°N			-21813 -60018	-5027 -22462	-3201 -19936			-1435 -13159	14377 922	-2978 -18732		
30-40°N	-21550 -61052		-6505 -25699	-2534 -17778	617 -11788			4760 -7607	17539 237	32712 11459	43720 13818	
20-30°N	-13992 -47597							23307 6782	37451 12226	57690 21643	27844 7201	34082 11001
10-20°N								56124 21601	38413 13579		53816 18595	39647 11544
0-10°N								71001 27453			32230 4154	20205 -1686

Ausw. Energiebilanz (25% Belegung, 1.0W/m²K Dämmstandard, 5% Wirkungsgrad)

Grafik dient ausschließlich dem visuellen Gesamteindruck, detaillierte Beschreibung u. Auswertung s. Kap. 1.2

Lebenslauf



Name *Dipl.-Ing. Architektin Christina Rullán Lemke*
Adresse *Ritterstrasse 47, D-22089 Hamburg*
Persönliche Daten *geb. 12.12.1977 in Hamburg, verheiratet, ein Kind*

08/1988–06/1997 Europaschule Gymnasium Schwarzenbek
06/1997 Schulabschluss: Abitur; Note: „sehr gut“ (1.0)
10/1997–09/1998 Technische Universität Hamburg-Harburg (TUHH)
Studiengänge: Bauingenieurwesen, Verfahrenstechnik
10/1998–12/2003 Hochschule für Bildende Künste Hamburg (HfbK)
Studiengang: Architektur und Stadtplanung
10/2000 Vordiplom; Note: „sehr gut“ (1.0)
12/2003 Studienabschluss: Diplom-Ingenieurin für Architektur und Stadtplanung
Diplomnote: „sehr gut“ (1.0)
seit 01/2004 freischaffende Architektin mit Projekten in Deutschland und Spanien
Bürogründung „Lemke&Lemke Architektinnen“
03/2004 – 10/2006 Fernstudium Baubiologie&Ökologie, Institut f. Baubiologie und Ökologie (IBN)
Studienabschluss: Baubiologin; Abschlussnote: „gut“ (1.7)
01/2004 – 08/2008 Promotion als externe Doktorandin am Institut für Angewandte Bautechnik der
Technischen Universität Hamburg-Harburg (TUHH)
10/2005 – 09/2007 Promotionsstipendium des Bremer Energiekonsens
09/2007– 08/2008 Promotionsstipendium der Technische Universität Hamburg-Harburg
seit 09/2008 Wissenschaftliche Mitarbeiterin am Institut für Angewandte Bautechnik
11/2009 Annahme der Dissertationsschrift und mündliche Doktor-Prüfung
Promotionsnote: „sehr gut“

Mitgliedschaften Vollmitglied der Architekten- und Ingenieurskammer Schleswig-Holstein
Stellv. Sektionsvorsitzende der Dt. Gesellschaft für Sonnenenergie/Hamburg
Mitglied im Doktorandennetzwerk Nachhaltige Stadtentwicklung

Auszeichnungen Stipendium des Bremer Energie-Konsens
Stipendium der Technischen Universität Hamburg-Harburg
Best-Paper Award der Climate2008

