TECHNISCHE UNIVERSITÄT MÜNCHEN

FAKULTÄT FÜR ARCHITEKTUR

LEHRSTUHL FÜR INTEGRIERTES BAUEN

PROFESSOR DIETRICH FINK

PLUS-ENERGIE-HOCHHÄUSER IN DER SUBTROPISCHEN KLIMAREGION

Entwicklung eines Planungs- und Optimierungswerkzeugs

zur Konzeptionierung von energiegenerierenden Bürohochhäusern

Mohannad Maher Bayoumi

Vollständiger Abdruck der von der Fakultät für Architektur der Technischen Universität München zur Erlangung des akademischen Grades eines

Doktor-Ingenieurs

genehmigten Dissertation.

Vorsitzender:	Univ.-Prof. Dr.-Ing. Werner Lang
Prüfer der Dissertation:	1. Univ.-Prof. Dietrich Fink 2. Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. Gerhard Hausladen

Die Dissertation wurde am 02.10.2012 bei der Technischen Universität München eingereicht und durch die Fakultät für Architektur am 03.05.2013 angenommen.

The earth is like a spaceship that didn't come with an operating manual!

R. Buckminster Fuller

Gliederung

1. Einleitung 1

1.1 Überblick 1

1.2 Grundlagen 4

1.2.1 Definition Plus-Energie-Hochhaus 4

1.2.2 Vielschichtigkeit der Konzeptionierung energieeffizienter Gebäude bzw. Hochhäuser 7

1.3 Abgrenzung der Forschungsfrage 12

1.4 Stand der Forschung 12

1.4.1 Performanceorientiertes Entwerfen 13

1.4.2 Planungswerkzeuge unter Berücksichtigung der Planung von Plus-Energie-Hochhäusern 17

1.4.3 Hochhausintegrierte Energiegewinnung 24

1.4.4 Technische Potenziale zur Effizienzsteigerung 38

1.5 Problemstellung 46

1.6 Hypothese 46

1.7 Zielsetzung 51

2. Ausgangspunkte 53

2.1 Globale Notwendigkeit einer Energiewende 53

2.1.1 Krisenszenarien 53

2.1.2 Energiewirtschaft ausgewählter Regionen und Länder 68

2.1.3 Umstieg auf erneuerbare Energien 72

2.1.4 Handlungsbedarf im Bauwesen 78

2.2 Wachstum und mangelndes Umweltbewusstsein in der subtropischen Klimaregion 80

2.2.1 Lage und allgemeine Klimaeigenschaften 80

2.2.2 Bevölkerungszunahme und Megacities 82

2.2.3 Energieverbrauch pro Kopf 87

2.2.4 Anteil fossiler Brennstoffe und erneuerbarer Energien 88

2.2.5 CO_2-Emission 89

2.2.6 Natürliche Angebote an erneuerbaren Energien 91

2.3 Potenziale und Grenzen des Hochhauses im Kontext des umweltbewussten Bauens 93

2.3.1 Das Hochhaus als Feld für Innovation 93

2.3.2 Kriterien zur Definition des Hochhauses 93

2.3.3 Form der Stadtverdichtung 96

2.3.4 Die Aufgabe der Hochhausfassade 100

2.3.5 Ökologischer Lebenszyklus 102

2.3.6 Energiebilanz von Hochhäusern 103

2.3.7 Nachfrage nach Hochhäusern 104

2.3.8 Heutige Tendenzen im Hochhausbau 106

2.4 Optimierung als Ansatz zur Erhöhung der Gebäudeperformance 113

2.4.1 Notwendigkeit der konsequenten Zusammenführung im Entwurf 113

2.4.2 Modellierung und Lösung eines Optimierungsproblems 115

2.4.3 Frühe Optimierung durch Integration von quantitativen und qualitativen Kriterien 117

3. Materialien und Methodik – Das Optimierungswerkzeug als Ansatz zum Erreichen der Plus-Energiebilanz im Hochhaus 121

3.1 Aufbau des Systems und dessen Randbedingungen 121
3.1.1 Hervorhebung der optimierbaren Parameter 122
3.1.2 Struktur und Anwendungspfad 125
3.1.3 Optimierung mittels Sensitivitätsanalyse 130
3.1.4 Ermittlung des Energiebedarfs durch Livesimulationen im Hintergrund 131
3.1.5 Inneneinflüsse: menschliche Behaglichkeitsanforderungen am Arbeitsplatz 133
3.1.6 Außeneinflüsse: Klimabedingungen der ausgewählten Standorte 145
3.1.7 Unterscheidung der untersuchten Standorte im Hinblick auf den zur Raumkonditionierung benötigten Energieaufwand 161

3.2 Solarenergieoptimierungstool 168
3.2.1 Notwendigkeit der Fassadenoptimierung 168
3.2.2 Rückblick auf die erste Version des Tools 185
3.2.3 Optimierungsmodelle und deren Wirkungen 190
3.2.4 Optimierungsprozess auf der Ebene einer Fassade 192

3.3 Windenergieoptimierungstool 200
3.3.1 Grundlagen und Rahmenbedingungen 200
3.3.2 Potenzial von fassaden- und dachintegrierten Windrotoren 209
3.3.3 Effektivität des gebäudeintegrierten Winddurchlasses 213
3.3.4 Aufbau der Optimierungsmodelle 220

4. Validierung des entwickelten Systems 224

4.1 Optimierung auf der Ebene einer Hochhausfassade 225
4.1.1 Optimierungsmodell-1: Optimierung des Verglasungsanteils 226
4.1.2 Optimierungsmodell-4: Optimierung von Verglasungsanteil und Energiedurchlassgrad 230
4.1.3 Optimierungsmodell-6: Optimierung von Verglasungsanteil und Verminderungsfaktor des Sonnenschutzes 234

4.2 Optimierung der Integration von Windrotoren in das Hochhaus 238
4.2.1 Optimierungsmodell-1: Ermittlung der optimalen Positionen 239
4.2.2 Optimierungsmodell-4: Ermittlung der minimalen Anzahl an Rotoren in den optimalen Positionen 244
4.2.3 Optimierungsmodell-6: Ermittlung der optimalen Rotorenflächen in den optimalen Positionen 247

4.3 Anwendung der Werkzeuge auf verschiedene Hochhausformen an den unterschiedlichen Standorten 250
4.3.1 Jeddah 253
4.3.2 Miami 256
4.3.3 Sydney 259
4.3.4 Durban 262

5. Zusammenfassung und Ausblick 265

5.1 Aggregation der wissenschaftlichen Arbeit 265
5.1.1 Zum einführenden Teil 265
5.1.2 Beschreibung der Ausgangslage 266
5.1.3 Das Optimierungswerkzeug als Ansatz 267

5.1.4 Wirksamkeit des Werkzeugs 268

5.2 Offene Fragen und Potenziale für weitere Forschung 269

5.2.1 Verwendungsformen des Werkzeugs 269
5.2.2 Künftige technische Potenziale 269
5.2.3 Umgebung des Hochhauses 270

6. Literaturverzeichnis 272

7. Anhang 286

7.1 Benutzeroberflächen 286

7.1.1 Eingabe von Hochhausdaten 286
7.1.2 Solarenergieoptimierungstool 288
7.1.3 Windenergieoptimierungstool 292

7.2 Erläuterung des Aufbaus der Optimierungsmodelle 294

7.2.1 Solarenergieoptimierungstool 294
7.2.2 Windenergieoptimierungstool 296

7.3 Begriffserklärung 298

7.4 Abbildungsverzeichnis 302

7.5 Tabellenverzeichnis 311

Dank

Die vorliegende Arbeit entstand in den Jahren 2008–2012, gefördert durch ein Promotionsstipendium der King Abdulaziz University in Saudi-Arabien, während meines Aufenthaltes am Lehrstuhl für Integriertes Bauen am Institut für Entwerfen und Bautechnik der Fakultät für Architektur der Technischen Universität München.

Ich möchte mich an dieser Stelle bei den vielen Personen bedanken, die mich bei der Erstellung dieser Arbeit sehr unterstützt haben.

Bedanken möchte ich mich für den Zuspruch und die Übernahme des Hauptreferates bei meinem Doktorvater Herrn Professor Dietrich Fink, der mich über die Jahre fachlich gefördert und menschlich motiviert hat. Durch seine Unterstützung konnte ich das Masterstudium *ClimaDesign* in den Jahren 2009–2011 parallel zur Dissertation abschließen.

Herrn Professor Gerhard Hausladen danke ich für die engagierte Begleitung der Arbeit als Zweitprüfer. Seine Anregungen und Kommentare haben zum guten Gelingen dieser Arbeit beigetragen. Ich muss auch seinen Mitarbeitern am Lehrstuhl für Bauklimatik und Haustechnik, Dipl.-Ing. Timm Rössel und Dipl.-Ing. Klaus Klimke, für ihre fachliche Beratung danken.

Ein besonderes Wort des Dankes möchte ich an Herrn Professor Klaus Daniels und sein Büro für die kritischen Korrekturen der technischen Aspekte aus Sicht der Praxis richten.

Mein Dank gilt ebenfalls meinen Kollegen, den Mitarbeitern des Lehrstuhls für Integriertes Bauen, für ihre Hilfsbereitschaft und die harmonische und fröhliche Stimmung während meiner Promotionszeit. Des Weiteren danke ich Dipl.-Ing. Martin Lackner, Dipl.-Ing. Barbara Hausmann und John Anderson für die stets angenehme Zusammenarbeit und für den jederzeit verfügbaren, wertvollen Rat.

Abschließend ein großer Dank an meine Frau und meine Eltern für ihre Motivation und Unterstützung.

Abstract

(Deutsch)

In Zeiten akuten Klimawandels sind energieeffiziente Hochhäuser v. a. in wirtschaftlich wachsenden Regionen dringend notwendig. Das Hochhaus als Maßnahme zur Verdichtung bietet zahlreiche Potenziale zur Nachhaltigkeit, die u. a. die Nutzung der vor Ort verfügbaren erneuerbaren Energien einschließen. Man geht davon aus, dass nach dem heutigen Stand der Technik Hochhäuser in der Zukunft nicht nur Energie sparen, sondern dem Verbrauchernetz sogar Energie spenden können. Sie werden deshalb einen Teil der virtuellen Kraftwerkslandschaft darstellen. Mit Hilfe der im Rahmen dieser wissenschaftlichen Arbeit entwickelten Optimierungsalgorithmen können Architekten in der frühen Planungsphase Entscheidungen über die Maximierung der energetischen Performance des Hochhauses treffen. Der Schwerpunkt liegt dabei auf der optimalen Integration von Solar- und Wind-energieerzeugung sowie der Energieeinsparung.

(English)

The need for energy efficient high-rise buildings is becoming imperative, especially in rapidly growing economies. This building type, a key for the densification of cities, offers potentials for sustainability that include the exploitation of on-site renewable energy. It is suggested that the high-rise building of the future should not only consume less energy, but rather provide energy to the grid. Building integrated energy generating devices are becoming essential components of many low- and high-rise buildings today. However, achieving net-zero or plus-energy balance in high-rise buildings postulates meticulous adjustments on many levels to achieve a successful synergy and to overcome technical insufficiencies. This research focuses on optimising the incorporation of building integrated photovoltaic and vertical-axis wind turbines in building façade and the building body, respectively. The algorithms developed within the scope of this dissertation enable architects to make early decisions on the energy performance of high-rise buildings with regard to energy savings and energy generation strategies. The embedded simulation and evaluation programmes in the optimisation process consider the impact of the optimised criteria on user comfort and formal quality.

Hinweise zum Aufbau der Arbeit

Folgende Grafik gibt einen Überblick über die Struktur der Arbeit:

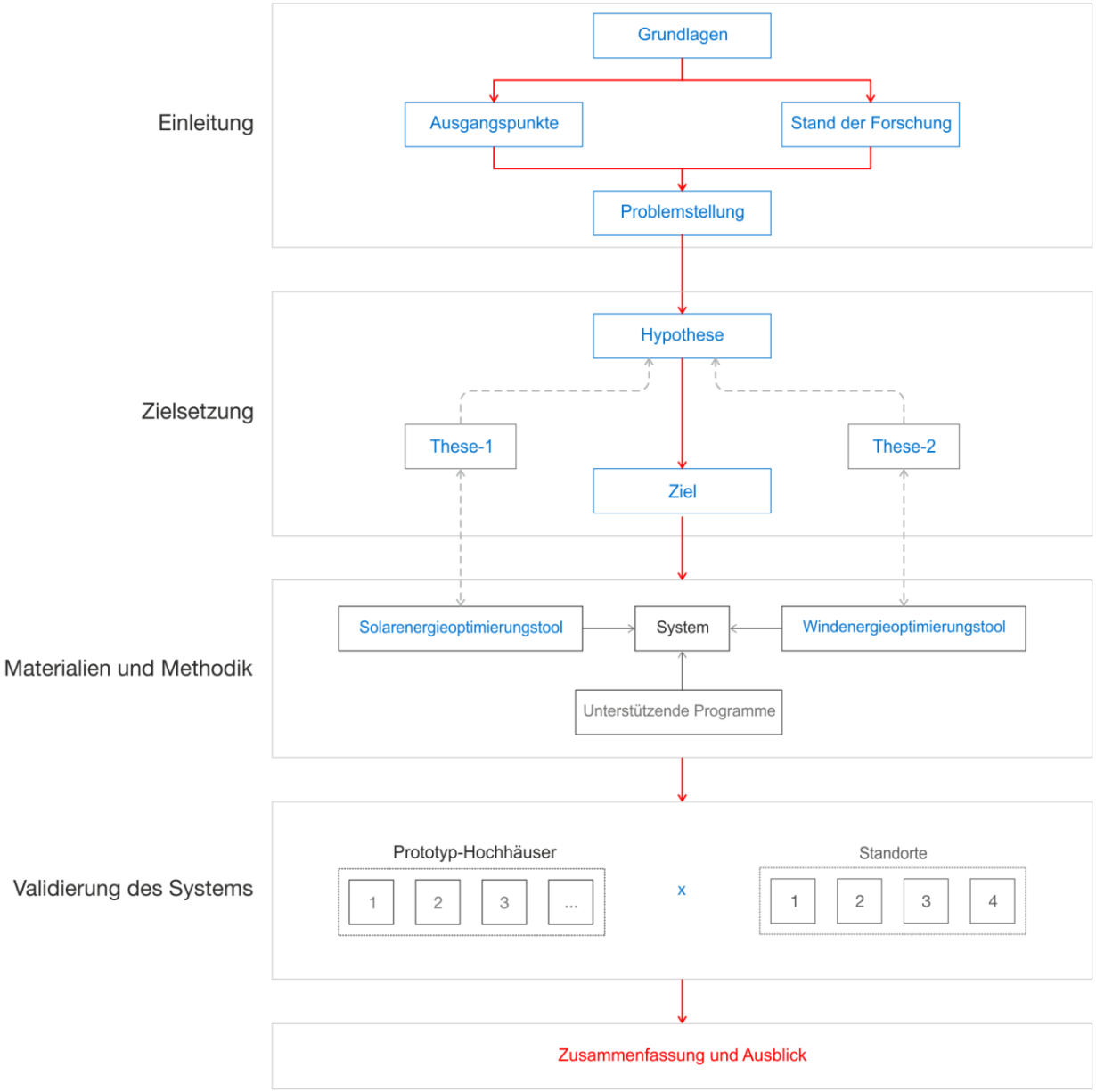


Abbildung 01.1 Struktur der Arbeit

Die Arbeit beginnt mit einer Einführung in die Thematik des Plus-Energie-Hochhauses und untersucht diesbezüglich die Zusammenhänge und Abhängigkeiten, um die wesentlichen Einflussgrößen abzugrenzen. Danach wird der Stand der Forschung analysiert und festgestellt, wo die Forschungslücke im Bereich Planungsvorgehensweise im Hinblick auf Performance sowie Planungswerkzeuge liegt. Dazu werden in einem Überblick über das technische Potenzial im Bereich gebäudeintegrierter Energieerzeugungstechnik die Konzepte ausgewählter Ansätze aus der Praxis diskutiert.

Aufbauend auf dem Stand der Forschung sowie den Grundlagen wird daraufhin die Hypothese aufgestellt. In einem weiteren Schritt wird das Ziel definiert und die Forschungsfrage formuliert. Ausgegangen wird dabei von allgemeinen globalen Themen in Bezug auf die Notwendigkeit einer Energiewende und des Umstiegs auf erneuerbare Energien. Es folgt ein Überblick über die Region der Studie, die subtropische Klimaregion, wobei auf deren Eigenschaften und Energiewirtschaft eingegangen wird. Da das Thema Optimierung ursprünglich aus der Mathematik kommt, wird eine entsprechende Einführung dazu gegeben, verbunden mit einer Diskussion über das Potenzial der frühen Optimierung beim Gebäudeentwurf.

Im nächsten Kapitel wird der Ansatz der Arbeit vorgestellt. Es beginnt mit der Einführung in die Systematik des Werkzeugs und seine Grenzen. Dann folgen die physikalischen Rahmenbedingungen der klimatischen Standorteigenschaften sowie der Behaglichkeitsanforderungen, die den Energiebedarf bestimmen.

Um das Ziel zu erreichen, werden zwei grundsätzliche Thesen gebildet, die mittels Algorithmen die Hypothese belegen sollen. Nach der Analyse der ausgewählten Standorte werden die Komponenten des Gesamttools separat entwickelt und geprüft. Schließlich werden sie in ein allgemeines Tool integriert.

Im Fall der ersten These, eines Solarenergieoptimierungstools, wird ein Programm zur Durchführung von thermischen Echtzeitsimulationen aufgebaut, das das Optimierungstool im Hintergrund bei der Prüfung der Fassadenperformance sowie der Abschätzung des Ertrags aus der Solarenergie unterstützt. Da es im Zeitrahmen dieser Arbeit zu aufwendig wäre, ein Programm zur Durchführung von (Live-)CFD-Simulationen zu entwickeln, werden separate Simulationen von Ausgangsformen durchgeführt und deren Daten mittels Algorithmen zur Projizierung des Windverhaltens der jeweiligen Standorte in ein Windenergieoptimierungstool integriert. Der Algorithmus jeder der Thesen wird sich mit der Modellierung von Optimierungsproblemen und der Durchführung von Lösungen beschäftigen.

Zur Auswertung und kritischen Beleuchtung des Tools werden Konzepte von vier Hochhäusern verschiedener Qualitäten eingestellt. Das Gesamttool wird durch die Anwendung auf die vier Konzepte und die vier ausgewählten Standorte geprüft. Als Resultat soll durch die Nutzung des entwickelten Tools festgestellt werden, wo und unter welchen Bedingungen ein Plus-Energie-Hochhaus entstehen kann.

1. Einleitung

1.1 Überblick

In derzeitigen Gefahr des Klimawandels, Land- bzw. Ressourcenverbrauchs und drohender Bevölkerungsexplosion nimmt in den sich entwickelnden Ländern der Welt die Anzahl der Hochhäuser zu, die jedoch trotz ihrer Potenziale nicht unter Gesichtspunkten der Land- und Energieeffizienz gebaut werden. Aufgrund des hohen Aufwands beim Bauen, Betreiben und eventuell Abreißen muss man davon ausgehen, dass Hochhäuser in der Zukunft eine große Umweltbelastung darstellen, wenn sie weiter nach der konventionellen Art und Weise gebaut werden.

Seit dem Industriezeitalter steigen zudem die menschlichen Ansprüche an die Behaglichkeit in Innenräumen. Darüber hinaus steht die Leistungsfähigkeit des Menschen im Arbeitsraum in einem direkten Zusammenhang mit dem Binnenklima. Diese Tatsache stellt einen wesentlichen Teil des wissenschaftlichen Forschungsgegenstands dar. Nach der Festlegung von Normen und Klimatisierungsrichtlinien im Zusammenhang mit der Revolution der modernen Architektur zu Beginn des 20. Jahrhunderts hat sich ein globaler Standard an Komfort entwickelt, der einen hohen technischen Aufwand bzw. Energieverbrauch erfordert, um Arbeitsplätze unabhängig von Klimazonen auf das gewünschte Niveau aufzurüsten [1]. Die für ein Gebäude benötigte Energie ist dabei vergleichbar mit der Nahrung für einen Menschen!

Es ist anzunehmen, dass Hochhäuser, die als aufgestapelte Räume auf einer kleinen Standfläche bezeichnet werden können, besonders viel Energie verbrauchen. Unter anderem hat der energetische Aspekt erheblich zum Widerstand gegen diesen Bautypus beigetragen. Mit dem wirtschaftlichen Aufschwung steigt die Nachfrage nach Hochhäusern jedoch gerade in den Ländern, die in durch hohe Temperatur und meistens hohe Luftfeuchte geprägten Klimazonen liegen, wo das Erreichen eines angenehmen Raumklimas technisch und energetisch sehr aufwendig ist. Diese Problematik ergibt sich aufgrund der hohen Sonneneinstrahlung, die jedoch auch als Ressource betrachtet werden kann! Es stellt sich die Frage, ob diese Wechselbeziehung Chancen bzw. Potenziale birgt.

Die Entwicklung des Bedarfs und der Bereitstellung von Stromenergie im städtebaulichen Kontext wird in Abbildung 1.1 dargestellt. Der Blick in die Vergangenheit vor der Industrialisierung zeigt, dass die menschliche Behaglichkeit damals ohne technischen Aufwand und mit fast null Energieverbrauch erreicht wurde. Ein Grund dafür liegt in der zu dieser Zeit eingeschränkten Energieverfügbarkeit. Die ersten Behausungen besaßen einen Innenraum, der so klein war (Iglu, Zelt, Höhle), dass die menschliche Abwärme genügte, um die Innen- gegenüber der Außentemperatur auf einem deutlich höheren Niveau zu halten. Dem im Innern durch die Bewohner produzierten Wärmestrom steht der Wärmestrom gegenüber, der infolge der Temperaturdifferenz zwischen innen und außen durch die Hülle der Behausung fließt. Die Hüllfläche und der Widerstand gegen den Wärmefluss sind bauliche Parameter [1]. Bei hoher Außentemperatur erfolgt der Wärmeabführungsprozess durch Lüftung oder durch Vermeiden von Solarstrahlung mittels Sonnenschutz. In jeder Klimaregion haben die Menschen gute Beispiele für bauliche Anpassungen gezeigt.

Nachdem der Mensch die Befeuerung von stromerzeugenden Kraftwerken entdeckt hatte, erhöhte sich weltweit der Stromverbrauch sowie der Verbrauch fossiler Energie drastisch. Dabei wurde die Behaglichkeit entweder nicht oder nur mit hohem Aufwand und Energieverbrauch erreicht. In diesen Zeiten legte der Mensch aufgrund der hohen Verfügbarkeit im Grunde genommen keinen hohen Wert auf Energiefragen. Dieses Verhalten blieb bis zur Energiekrise erhalten, nach der ein Umdenken im Hinblick auf das Thema Energiebereitstellung stattfand.

Heutzutage wird in vielen Ländern durch politische Unterstützung und technischen Fortschritt eine erhebliche Reduzierung des Energieverbrauchs erzielt. Null- und Plus-Energie-Häuser werden langsam zu einem Energiestandard. Es kann davon ausgegangen werden, dass das Bauen energiegenerierender Häuser der nächste konsequente Schritt bei der Evolution der Energienutzung in Gebäuden ist. Als Vision könnte man sich vorstellen, dass aufgrund von Niedrigenergie- und energieerzeugenden Gebäuden fossilbetriebene Kraftwerke abgeschaltet werden können. Hochhäuser werden in diesem Kontext in der Zukunft einen Teil der virtuellen Kraftwerklandschaft der Stadt darstellen.

Viele der rasant wachsenden Städte bzw. künftigen Hochhausstädte liegen in der subtropischen Region, also im Sonnengürtel der Erde, wo Energie am effektivsten und preiswertesten gewonnen werden kann. Darüber hinaus bietet das Hochhaus zahlreiche Potenziale zur Nachhaltigkeit, z. B. durch Nachverdichtung von Städten und eine effiziente Nutzung von Infrastrukturen. Die große exponierte Fläche der Gebäudehülle ermöglicht die Ausnutzung von erneuerbaren Energien wie Solar- und Windenergie. Trotz der Maßnahmen zur Verringerung des Energiebedarfs bzw. Integration der Solar- und Windenergietechnik hat die Praxis gezeigt, dass bisher, im Gegensatz zu ein- oder zweigeschossigen Gebäuden, kein energieautarkes Hochhaus errichtet wurde.

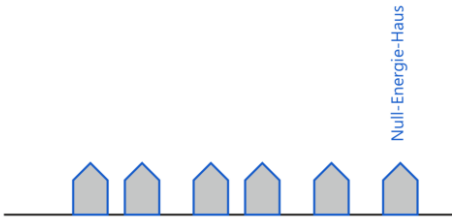
Zum Erreichen einer neutralen bzw. sogar positiven Energiebilanz im Hochhaus muss eine Vielzahl von Parametern optimal eingestellt werden, um möglichst große Einsparungen einerseits und hohe Erträge andererseits zu ermöglichen. Das menschliche Wohlbefinden sollte dabei mit möglichst geringem technischen Aufwand gewährleistet werden.

Entwicklung des Bedarfs und der Bereitstellung von Stromenergie im städtischen Kontext

Vor Industrialisierung

Optimierte Gebäudehülle und Starke Anpassung an die klimatischen Bedingungen

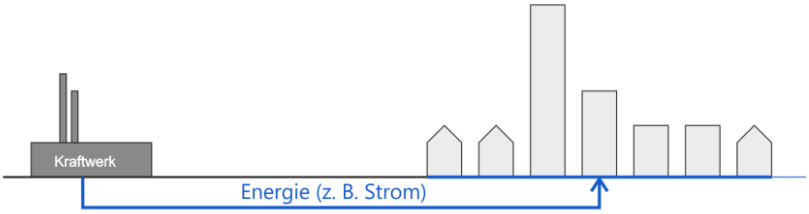
- Eingeschränkte Energieverfügbarkeit
- Dezentrale Lösungen
- Geringe Anforderungen an Behaglichkeit
- Fast null Energie-/StromstromBedarf
- Kein technischer Aufwand
- Behaglichkeitserwartungen Erfüllt



Bis zur Energiekrise

Energie wird aus fossilen Brennstoffen im Kraftwerk erzeugt und wird übers Netz geliefert.

- Hohe Energieverfügbarkeit
- Kein Streben nach Energieeinsparung
- Hoher Energiebedarf
- Behaglichkeit nicht oder mit hohem technischen Aufwand erreicht



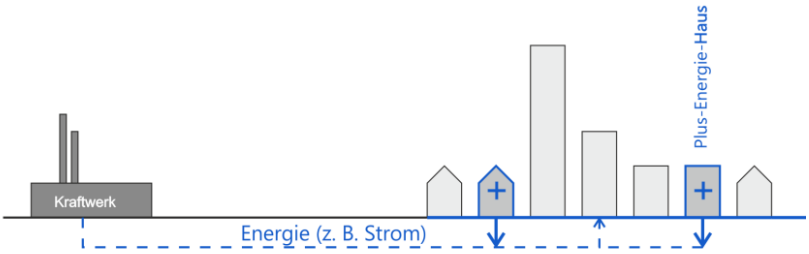
Heute

Lokale Energieerzeugung bei manchen Niedrig- oder Plus-Energie-Gebäuden. Überschuss wird ins Netz eingespeist

Häuser werden saubere Kraftwerke

Das bisherige Kraftwerk wird weniger belastet

- Geringer Energiebedarf.
- Immer noch hoher technischer Aufwand
- Behaglichkeit erreicht



Vision

Hochhäuser sollten in der Zukunft so viel Energie an ihrem Baukörper erzeugen wie sie verbrauchen. Sie werden deshalb als Teil der virtuellen Kraftwerkslandschaft der Stadt funktionieren.

- Geringer Energiebedarf
- Geringer technischer Aufwand
- Behaglichkeit erreicht
- Umwelt gerettet

Der einzige wahre realist ist der Visionär! Federico Fellini

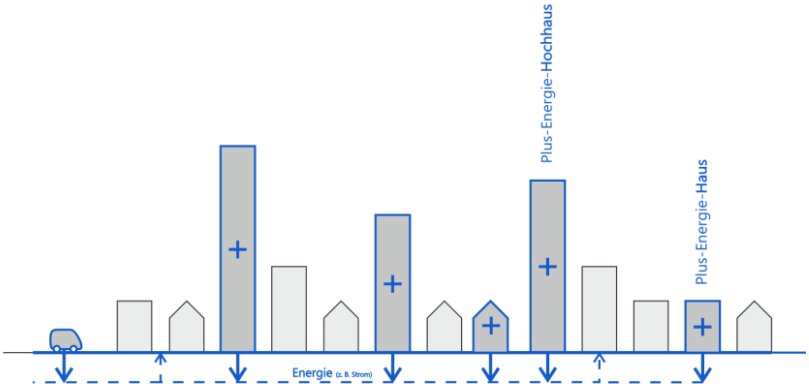


Abbildung 1.1 Entwicklung des Bedarfs und der Bereitstellung von Stromenergie (eigene Darstellung)

1.2 Grundlagen

1.2.1 Definition Plus-Energie-Hochhaus

Ein Plus-Energie-Haus (gelegentliche Schreibweisen auch „Plusenergiehaus" oder „Plusenergie-Haus") wird allgemein wie folgt definiert: Ein Haus, dessen jährliche Bilanz positiv ist: es erzeugt mehr Energie, als es von außen bezieht [2].

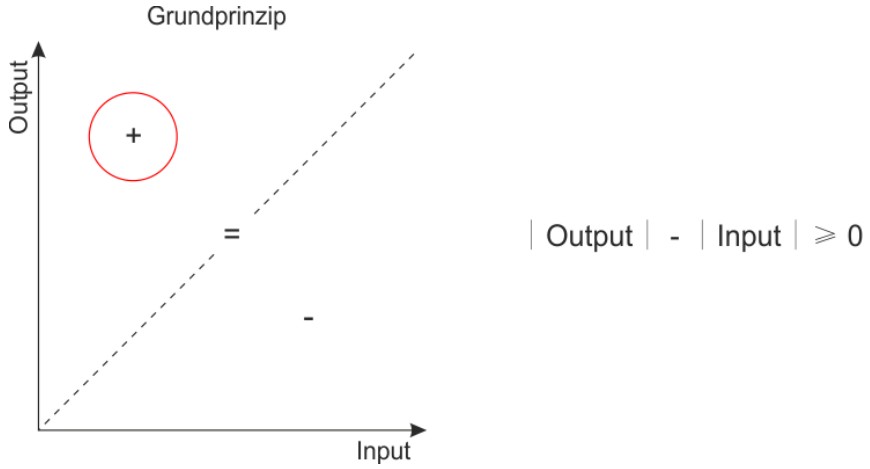


Abbildung 1.2 Definition der Plus-Energiebilanz [3]

Eine weitere Definition der Plus-Energiebilanz nach Voss wird in Abbildung 1.2 dargestellt [3]. In seiner Publikation „Nullenergiegebäude“ wird ein Null-Energie-Haus als ein energieeffizientes Haus definiert, das in Verbindung mit dem Stromnetz und ggf. weiteren Netzen seinen gesamten Jahresprimärenergiebedarf auf der Basis einer monatlichen Bilanzierung durch die Primärenergiegutschrift für den eingespeisten Energieüberschuss in der Jahressumme deckt. Die Energiebereitstellung vor Ort deckt dabei vorrangig den Energiebedarf [3].

Der Verbrauch des Gebäudes wird negativ gezählt, die Energieerzeugung positiv. Das bedeutet, herkömmliche Gebäude haben eine negative Bilanz, d. h., sie benötigen mehr Energie, als sie erzeugen. Nach dem allgemeinen Verständnis des Plus-Energie-Hauses müssen jedoch die folgenden Punkte nach Grobe beachtet werden [4]:

- Die Bilanzierung erfolgt für ein Jahr und es muss zwischen Primär- und Endenergieebene unterschieden werden.
- In der Primärenergiebilanz ist das Niveau eines Plus-Energie-Hauses leichter zu erreichen als in der Endenergiebilanz.
- Ist das Ergebnis der Bilanz null, spricht man von einem Null-Energie-Haus.
- Bilanzraum ist das Gebäude selbst, inklusive Gebäudetechnik und evtl. zugehöriger Technikgebäude zur Energieerzeugung. Bei mehreren Nutzgebäuden und einem Technikgebäude zur Energieerzeugung sind sämtliche Gebäude als Ganzes zu bilanzieren.
- Die erzeugte Energie wird mit dem Primärenergiefaktor der „verdrängten“ Energie bewertet. Bei Stromeinspeisung also z. B. mit 2,6 (für Deutschland) – dem Primärenergiefaktor des durchschnittlichen Strommixes.

- Die Energie zur Erstellung des Gebäudes und der technischen Ausstattung wird in der Berechnung nicht berücksichtigt.

Nach dem ersten Hauptsatz der Thermodynamik ist die Energie, die in ein Gebäude zufließt, gleich der Energie, die aus dem Gebäude abfließt. Eine vereinfachte Darstellung folgt in Abbildung 1.3. Der Energiestrom Q'_{Zu}, der in die Wärmekraftmaschine eingebracht wird, ist genauso groß wie die Summe der Energieströme ($W + Q'_{Ab}$):

$Q'_1 = W + Q'_2$ (1. Hauptsatz der Thermodynamik)

Q‘: Energiefluss

W: Wärme

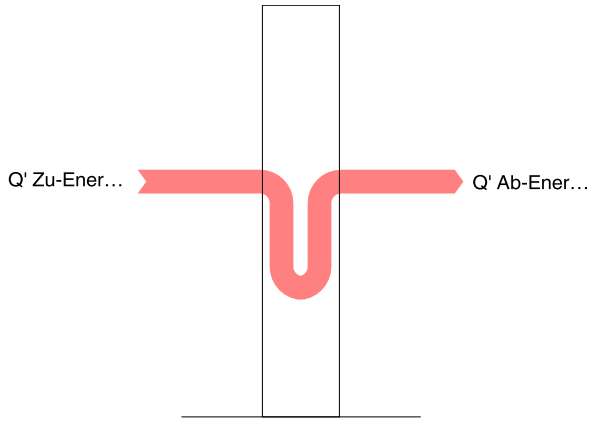


Abbildung 1.3 Grundprinzip des Energiestroms über ein Gebäude (eigene Darstellung)

Bei der Kühlung wird nach diesem Grundprinzip und der Wärmelehre des französischen Physikers Carnot die Wärme durch einen Zustandsänderungsprozess von Volumen-, Druck- und Temperaturverhältnissen im Gebäude an die Umgebung abgegeben. Auch zum Betreiben von Elektrogeräten (z. B. Ventilatoren, Aufzüge, EDV) wird Energie in verschiedene Formen umgewandelt und eventuell als Wärme das Gebäude verlassen.

In Bezug auf Energieerzeugung und -verbrauch im Hochhaus wird in der Abbildung 1.4 ein grober Vergleich zwischen dem Ist-Zustand und dem Soll-Zustand gezeigt. Der wesentliche Unterschied liegt dabei nicht nur in den unterschiedlichen Energiequellen, sondern auch in den reduzierten Energiesenken bzw. Energieverbräuchen.

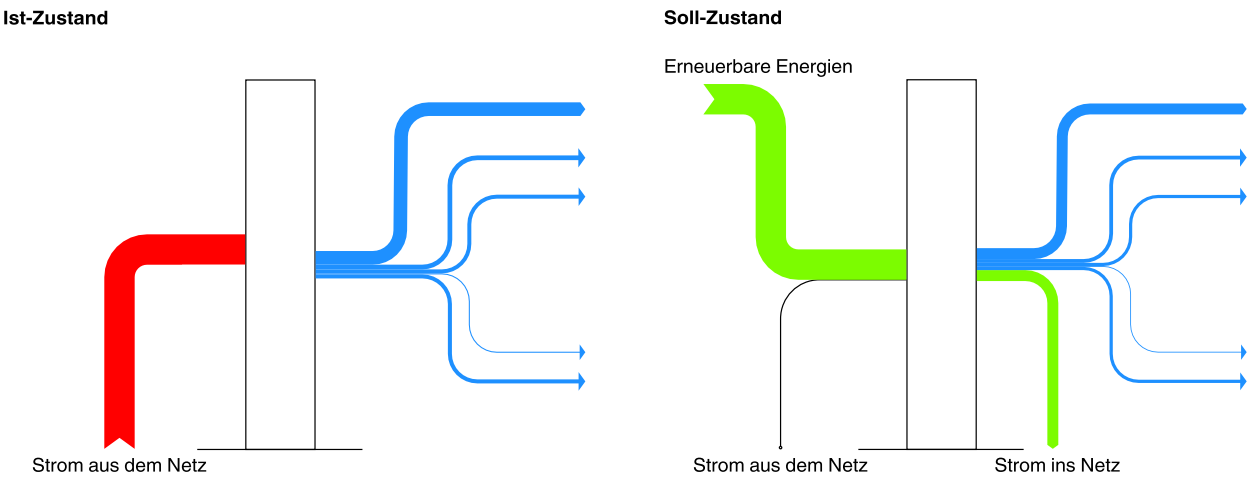


Abbildung 1.4 Schematische Darstellung des Unterschieds zwischen dem herkömmlichen Hochhaus und dem angestrebten (eigene Darstellung)

Im herkömmlichen Hochhaus wird aus dem Verbrauchernetz Strom zum Betreiben der Elektrogeräte gezogen, die zum Teil der Erreichung der menschlichen Behaglichkeit dienen. Idealerweise sollte ein Hochhaus seinen Energiebedarf mit erneuerbaren Ressourcen decken und das Netz, anstatt es zu beanspruchen, mit aus erneuerbarer Energie erzeugtem Strom unterstützen.

Im Rahmen dieser wissenschaftlichen Arbeit wird das Plus-Energie-Hochhaus wie folgt definiert: Ein Plus-Energie-Hochhaus ist ein energieeffizientes Gebäude, das durch die Nutzung erneuerbarer Energien mit möglichst geringem technischen Aufwand seinen Jahresendenergiebedarf abdeckt und überschüssige Energie in das Netz einspeist.

Das Erreichen einer Plus-Energiebilanz in Gebäuden bzw. Hochhäusern setzt Energieeffizienz durch eine erhebliche Reduzierung des Energiebedarfs, gepaart mit der Nutzung der vor Ort zur Verfügung stehenden erneuerbaren Energien voraus. Dies erfordert eine grundlegende Auseinandersetzung mit dem vernünftigen Einstellen der entscheidenden Parameter, was aufgrund der interdisziplinären Anforderungen und der Vielfalt an Abhängigkeiten üblicherweise sehr komplex ist.

1.2.2 Vielschichtigkeit der Konzeptionierung energieeffizienter Gebäude bzw. Hochhäuser

Soll das Bauen von Gebäuden wie Hochhäusern einen Beitrag zu einer nachhaltigen Strategie liefern, ist deren Energieeffizienz ein zentrales Thema, wobei das konkrete Ziel die Minimierung des Bedarfs und die Maximierung des Ertrags ist. Dieser Aspekt darf nicht nur energetisch betrachtet werden, sondern muss im Zusammenhang mit dem erforderlichen technischen Aufwand zum Herstellen und Betreiben des Gebäudes sowie dem Wohlbefinden des Menschen gesehen werden. Zentral ist dabei ganzheitliches Denken, das die drei Hauptsäulen der Nachhaltigkeit verknüpft: Umwelt/Ökologie, Gesellschaft und Wirtschaft.

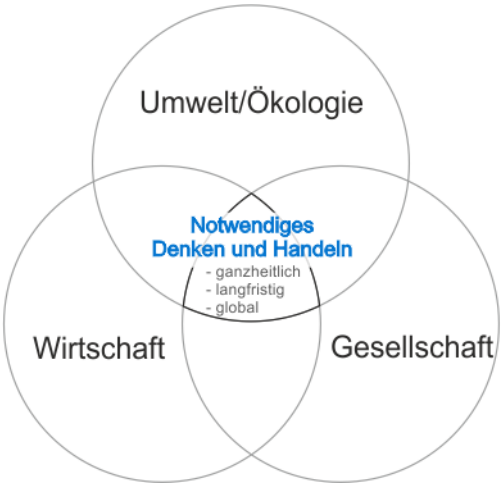


Abbildung 1.5 Hauptsäulen der Nachhaltigkeit [5]

Die Deckung des Energiebedarfs durch erneuerbare Ressourcen hängt grundsätzlich nicht nur von der Technologie der energieerzeugenden bzw. -wandelnden Geräte ab, sondern es spielen weitere Dimensionen eine wichtige Rolle. Nach Voss werden einige der wesentlichen Herausforderungen aufgeführt [3]:

- die grundsätzlich begrenzte Verfügbarkeit vieler erneuerbarer Energieträger
- die vielfach schwankende zeitliche Verfügbarkeit (Sonne, Wind, Wasser)
- der Aufwand zur Herstellung der Energiewandler
- wirtschaftliche Erwägungen

Die Nutzer erwarten trotz Energieeffizienz ein schadstofffreies Raumklima, gute Belichtungs- und Belüftungskonzepte, einen angemessenen Außenraumbezug sowie anpassungsfähige und flexible Grundrisse bei gleichzeitig niedrigen Betriebskosten. Dazu ist es erforderlich, nicht wie bisher üblich „nur“ das Objekt, sondern verstärkt auch den Prozess zu planen [6].

Um die Energieautarkie zu erreichen, muss der Energiebedarf durch gebäudeintegrierte Systeme zur Energiegewinnung aus erneuerbaren Ressourcen abgedeckt werden. Idealerweise werden Hochhäuser in Städten als Maßnahmen zur Nachverdichtung gebaut. Meistens stehen kaum übrige Flächen auf dem Grundstück zur Verfügung, um sie mit Energieerzeugungstechnik

zu belegen. Das heißt, diese muss in den Gebäudekörper integriert werden, was Koordination mit der Bauform und den opaken Bauteilen erfordert. Aufgrund dessen soll auch geprüft werden, ob die zu integrierenden Techniken den Außenbezug verhindern oder von der Nachbarbebauung benachteiligt werden.

Dazu kommt der kritische Aspekt einer Integration von Lösungen der Energieeffizienz im Hinblick auf die gestalterischen Qualitäten des Hauses. Dies kann beim Hochhaus im bebauten Kontext aufgrund der natürlichen Präsenz, die sich aus seiner Größe ergibt, besonders problematisch sein. Dies stellt neue Ansprüche an die Planer, weshalb die Anforderungen an Gebäude mit der Zeit an Komplexität zunehmen. Auf der anderen Seite ist die Planung von Hochhäusern grundsätzlich vielschichtig und erfordert ein hohes Maß an Koordination und Kooperation.

Die Komplexität von Planungsinhalten in Bezug auf Hochhäuser wurde von Hornung behandelt [7]. Er stellt fest, dass die Wechselwirkungen und Verknüpfungen einzelner Planungsinhalte untereinander einer ganzheitlichen Betrachtung bedürfen, um die optimalen Voraussetzungen für Bewertungs- und Entscheidungsprozesse schaffen zu können. Hier ist der Architekt in seiner Funktion als schöpferisch wirkendes Mitglied im Planungsteam am stärksten gefordert. Er navigiert durch die Planungsdisziplinen und filtert die Abhängigkeiten. Er leitet den Koordinationsprozess der interdisziplinären Kommunikation, deren Zeitverlauf und Dauer beim komplexen Themenkreis des Hochhauses schwer zu berechnen sind. Bestimmte zeitintensive Regelkreise der Planungsauseinandersetzung sind bei Hochhäusern unausweichlich. Als typisches Beispiel hierfür gilt der Komplex Fassade/TGA/Behaglichkeit/Facility Management.

Mit der Zeit wird sich die Art und Weise der Gebäudekonzeptionierung durch neu entwickelte Vorschriften wesentlich ändern, da viele Regeln weltweit das Erreichen von energieautarken Gebäuden fordern werden [8], [9]. Es muss an dieser Stelle darauf hingewiesen werden, dass mit Autarkie im Rahmen dieser Arbeit nicht gemeint ist, dass das Haus nicht an das Stromnetz angeschlossen ist. Die Praxis hat gezeigt, dass die Modellierung energieautarker Gebäude eine extrem komplexe Herausforderung ist [10]. Der Prozess ist aufwendig, zeitintensiv und erfordert die Beteiligung von Fachplanern, um die erforderliche Integration von passiven und aktiven Techniken sowie gleichzeitig ein angemessenes Raumklima zur Gewährleistung der menschlichen Behaglichkeit zu erzielen. In der frühen Entwurfsphase sind die Architekten im Grunde genommen auf der Suche nach Kriterien bzw. Bedingungen, die ihre Konzepte definieren und sie zur Erfüllung Performanceanforderungen orientieren.

Der Prozess der Konzeptionierung eines effizienten bzw. energieautarken Gebäudes kann als sukzessive Schichtung von Einschränkungen in Bezug auf das Gebäude bezeichnet werden. Die Fähigkeit, mit dieser Herausforderung umzugehen, stellt eine der Schlüsselqualifikationen für Planer dar [10]. Das Erarbeiten eines entsprechenden Konzepts ist ein kreativer Prozess und analog zum komplexen Vorgang der Formfindung in der Gestaltung zu verstehen [6]. Jeder neu nachgetragene Parameter stellt eine neue Einschränkung dar. Am Anfang des Prozesses verfügt der Architekt bzw. der Planer über ein relativ breites Spektrum an Möglichkeiten und Zielen. Am Ende ist das Gebäude durch Beschränkungen klar definiert. Energieautarke Gebäude und v. a. Hochhäuser sind in ihrer Performance hochkomplex, da viele kleine Details in Bezug auf Klimabedingungen und Behaglichkeit berücksichtigt werden müssen, um eine

Maximierung von Einsparung und Gewinnung zu erreichen. Die Einschränkungen stellen im Endeffekt Fixpunkte für Ideen dar.

Zur Kühlung, Beleuchtung und Bereitstellung von Haushaltsstrom dominiert in Nichtwohngebäuden der elektrische Energieanteil den Energieverbrauch. Vor allem für die Klimatisierung wird ein großer Teil der Energie benötigt. An Standorten mit feuchtwarmem Klima ist der Energiebedarf zur Luftkonditionierung erheblich höher als an Standorten mit günstigeren Klimaeigenschaften, da die Entfeuchtung höhere Enthalpie benötigt als die Kühlung. Nach Daniels und Hammann besteht das Problem bei der Konzeptionierung eines energieautarken Gebäudes nicht unbedingt im Heizen oder Kühlen, sondern primär im elektrischen Energiebedarf für „stromfressende“ Maschinen und Geräte. Die eigentliche Herausforderung liegt darin, ausreichend Energie durch die natürlichen Ressourcen zu erzeugen [11].

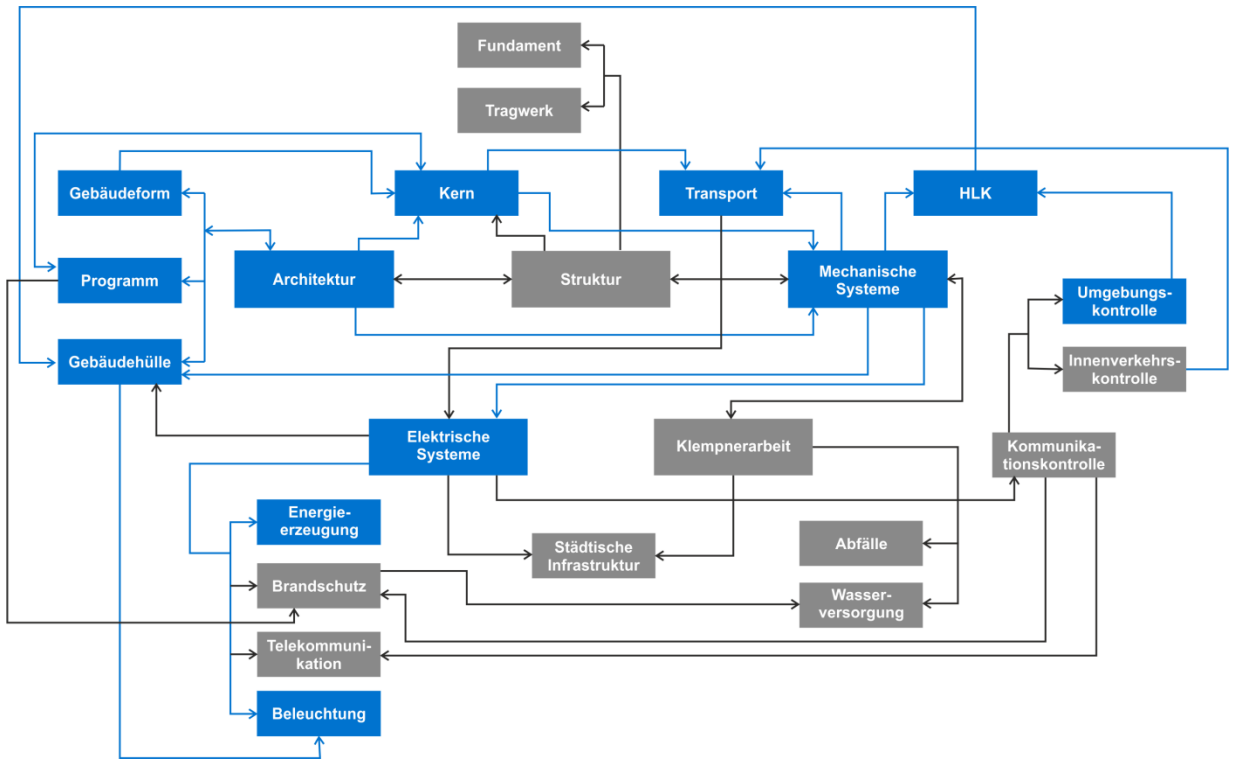


Abbildung 1.6 Haupteinflussfaktoren und Zusammenhänge des Lebenszyklus eines nachhaltigen Hochhauses [12] (und eigene Darstellung)

Ein Überblick über die Haupteinflussfaktoren des Lebenszyklus eines nachhaltigen Hochhauses wird nach Ali [12] in Abbildung 1.6 dargestellt. Die für die Konzeptionierung eines energieautarken Hauses relevanten Parameter wurden blau hervorgehoben. Die Komplexität der interagierenden Aspekte wird deutlich. Daher ist die Erhöhung der Energieeffizienz eines Gebäudes ein Teil der Verbesserung seiner Performance, bei der weitere Aspekte wie Erscheinung und Behaglichkeit relevant sind. Ein Gebäude mit hoher Performance verfügt über hohe Leistungsfähigkeit. Es soll prinzipiell in einem möglichst langen Zeitraum ohne aufwendige Wartungsarbeiten seine Funktionen erfüllen. Die Erfahrung mit *Post-Occupancy Evaluation* (dt.: Bewertung nach der Nutzung) von energieautarken Gebäuden hat gezeigt, dass der gestalterische Entwurf hier kein intuitiver Prozess ist [13]. Um energieautarke Gebäude zu

entwerfen, werden Architekten gezwungen, sich nicht nur mit der Funktion und Ästhetik zu beschäftigen, sondern früh in die Auseinandersetzung mit der Technik bzw. dem Energiekonzept einzusteigen.

Die Haupteinflussgrößen zum Erreichen einer hohen Performance werden in Abbildung 1.7 nach Hegger gezeigt. Bei der Entwicklung von Energiekonzepten bilden die lokal verfügbaren Umweltenergiepotenziale – und somit die vielfältigen Wechselbeziehungen zwischen dem Gebäude und seiner unmittelbaren Umgebung – wesentliche gestalterische Rahmenbedingungen. Aus dem jeweiligen solaren Strahlungsangebot unterschiedlicher Himmelsrichtungen resultieren z. B. spezifische Anforderungen an transparente Außenwandflächen oder an Sonnenschutzvorrichtungen, v. a. an warmen Standorten. Zudem sind geometrische Aspekte wie z. B. Bauform, Bauhöhe und exponierte Flächen beim Entwurf des Konzepts zu bedenken [6].

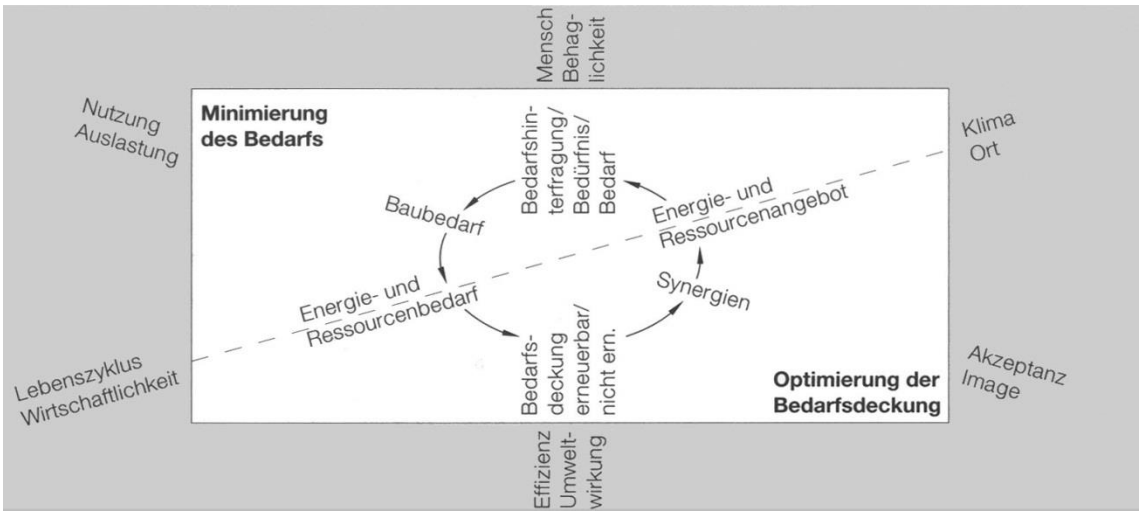


Abbildung 1.7 Prozessschema zur Entwicklung von Energiekonzepten [6]

Aus der Grafik resultieren die zwei Hauptmaßnahmen:

- Minimierung des Bedarfs
- Optimierung der Bedarfsdeckung

Im Rahmen dieser Arbeit wird die Tatsache untersucht, dass diese beiden Aspekte nicht getrennt voneinander betrachtet werden können. Es wird analysiert, wie die Optimierung der Bedarfsdeckung im Zusammenhang mit der Minimierung des Bedarfs erfolgt. Bei der Planung eines energieeffizienten Hochhauses entstehen zahlreiche Zielkonflikte, mit denen der Planer umgehen muss. Interessanterweise bieten solche Zielkonflikte Potenziale zur Optimierung, die unterschiedlich gestaltet sein können. Die Nutzung des Sonnenschutzes kann beispielsweise in Konflikt mit der Verfügbarkeit von Tageslicht und dem Bezug nach außen stehen. Einige Zielkonflikte hinsichtlich der Energieerzeugung entstehen durch den Typus des Hochhauses selbst, das mehr Fläche zur Energieerzeugung durch vertikale Fassaden aufweist als horizontale Dachfläche. Daher nimmt das Verhältnis zwischen dem Energiebedarf der Nutz-/Geschossflächen und der über die fassaden- und dachintegrierten PV-Elemente (gängige Abkürzung nach der alten Schreibweise „Photovoltaik“) erzeugten Energie ab. Die Grafiken in

Abbildung 1.8, Abbildung 1.9 und Abbildung 1.10 stellen einen Überblick über die für diese Arbeit relevanten Zielkonflikte dar.

In der rechten Grafik der Abbildung 1.8 zeigt sich, dass die Globalstrahlung auf die Südfassade 40 % geringer ist als bei der horizontalen Fassade bzw. der Dachfläche. Daher liegen die Grenzen im Typus des Hochhauses selbst, das mehr Fläche zur Energieerzeugung durch vertikale Fassaden anbietet als horizontale Dachfläche. Daher nimmt gemäß Abbildung 1.9 das Verhältnis zwischen dem Energiebedarf der Nutz-/Geschossflächen und der durch die fassaden- und dachintegrierten PV-Elemente erzeugten Energie ab. Trotz der mit der Höhe zunehmenden Windgeschwindigkeit verschlechtert sich wiederum die Energiebilanz mit zunehmender Geschosszahl. Daher können die Potenziale der Windenergie durch eine Erhöhung der Anzahl der eingesetzten Rotoren besser ausgeschöpft werden. Dies erfordert jedoch eine Integration mit der Bauform sowie eine optimale Positionierung von Rotoren an günstigen Stellen.

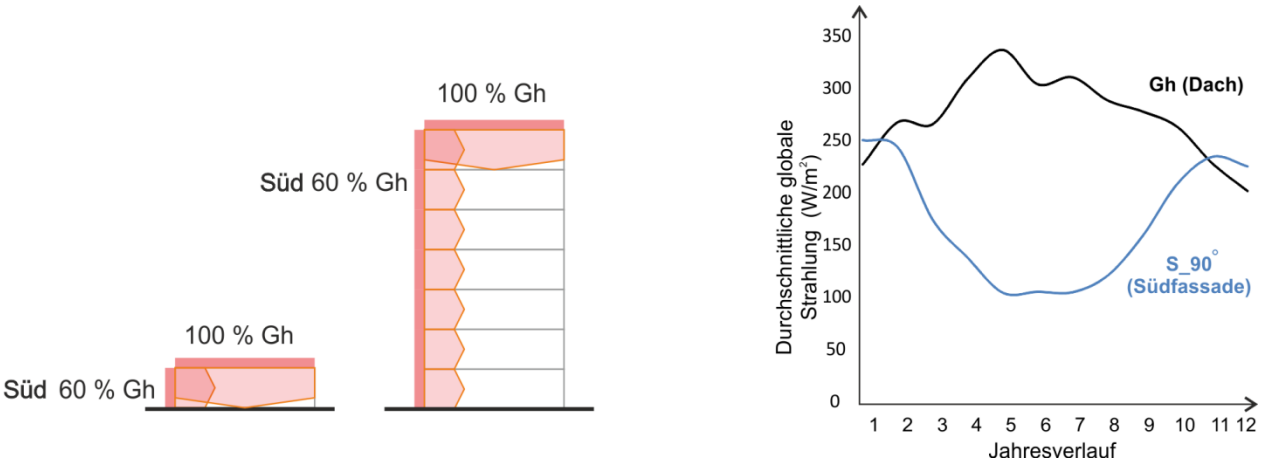


Abbildung 1.8 Unterschied zwischen der horizontalen und der vertikalen Fläche in Bezug auf Einstrahlung (eigene Darstellung)

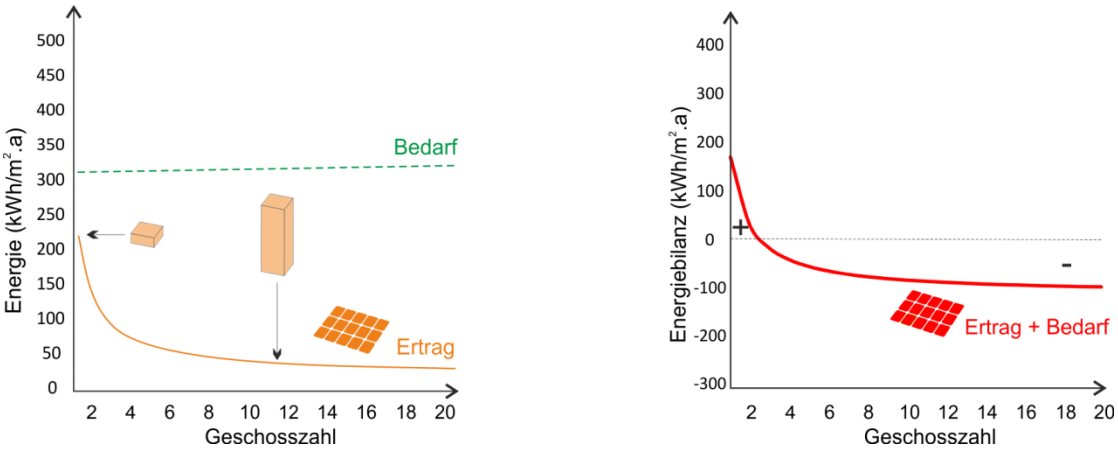


Abbildung 1.9 Abnahme der Energiebilanz bei der Nutzung von Solarenergie im Hochhaus mit zunehmender Geschosszahl (eigene Darstellung)

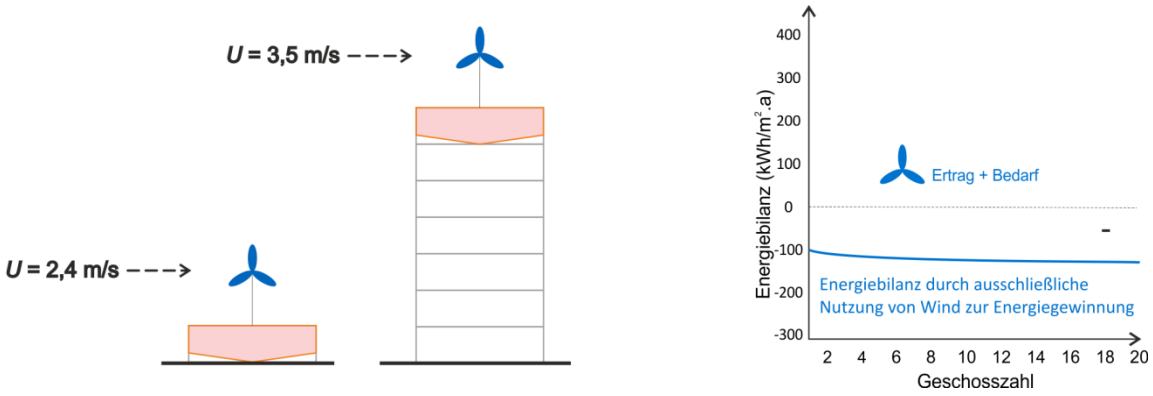


Abbildung 1.10 Abnahme der Energiebilanz bei der Nutzung von Windenergie im Hochhaus mit zunehmender Geschosszahl trotz zunehmender Windgeschwindigkeit (eigene Darstellung)

1.3 Abgrenzung der Forschungsfrage

Ausgehend von der Notwendigkeit des frühen Einstiegs in die integrale Planung und die Entwicklung des Planungs- und Optimierungswerkzeugs umfasst die vorliegende wissenschaftliche Arbeit folgende Themenbereiche:

- Konzeptentwicklung hinsichtlich der energetischen Performance des Hochhauses
- Klimaeigenschaften der ausgewählten Standorte
- Planungshilfe im Sinne von Rechenwerkzeugen und Simulationstechniken
- Softwareentwicklung und Schreiben von Algorithmen
- Optimierung in der Mathematik und ihre Anwendungen
- passive und aktive Maßnahmen zur Reduzierung des Energiebedarfs
- Behaglichkeitsanforderungen des Menschen in Arbeitsräumen
- technisches Potenzial der gebäudeintegrierten Energieerzeugung

Aufgrund der an den ausgewählten Standorten hauptsächlich verfügbaren Ressourcen an erneuerbaren Energien beschäftigt sich die Arbeit vorrangig mit Solar- und Windenergie. Das zentrale Thema der Arbeit ist die Plus-Energiebilanz im Hochhaus. Mit der Energiebilanz ist hierbei die Jahresendenergiebilanz gemeint, wobei sich die Berechnungen auf die Bruttofläche in Quadratmeter beziehen. Die Ökobilanz und die Wirtschaftlichkeit sind dabei relevante Themen, die teilweise und indirekt berücksichtigt werden.

1.4 Stand der Forschung

Der Stand der Forschung umfasst wissenschaftliche Arbeiten, technische Potenziale, tatsächlich gebaute und konzeptionelle Hochhäuser, in denen Solar- und Windenergietechnik berücksichtigt worden sind, sowie Planungswerkzeuge. Der folgende Abschnitt beschäftigt sich nicht nur mit den Berichten über relevante Forschungsaktivitäten bzw. -resultate, sondern soll durch eine analytische Diskussion zur Begründung der Zielsetzung dieser Arbeit beitragen.

Nach dem Stand der Technik und einem Blick auf neu gebaute bzw. neu konzeptionierte Gebäude wird die energiegenerierende Fassade immer mehr zu einem Hauptbestandteil moderner Gebäude. Es werden heute Null- und Plus-Energie-Gebäude gebaut, in deren Dächer

und Fassaden Photovoltaikzellen zur Stromerzeugung integriert sind. Sie sind nicht höher als zwei Stockwerke und stellen häufig Beiträge zum Wettbewerb *Solar Decathlon* in Amerika und Europa dar [14]. Im Folgenden soll festgestellt werden, wie weit sich der Entwurfsprozess, das Entwurfswerkzeug und die Energietechnik integrieren lassen, um Gebäude mit einer hohen energetischen Performance zu entwickeln.

1.4.1 Performanceorientiertes Entwerfen

„*Entwerfen ist Denken. Konstruieren ist das Umsetzen dieser Gedanken.*“ Grohmann [15]

Die Entwurfs- bzw. Planungsphase eines Objekts ist eine kritische Denkphase. Je integrativer die Denkweise in dieser Phase ist, desto einfacher ist das Umsetzen und desto besser das Endergebnis. Egal, welche Funktionen der Gegenstand hat, steht deshalb seine Leistungsfähigkeit in Abhängigkeit zu dem konzeptionellen Planungsvorgehen. Es stellt sich automatisch die Frage, wie heute der Denkprozess von den digitalen Potenzialen profitieren kann.

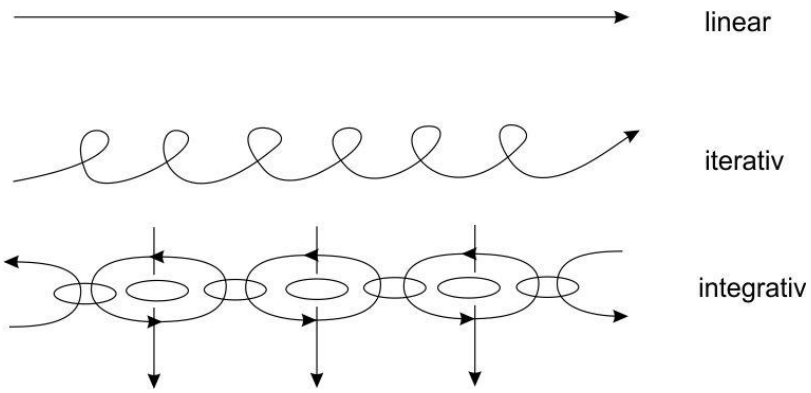


Abbildung 1.11 Lineare, iterative und integrative Planungsabläufe [16]

Notwendigkeit der integralen Planung

Das Interesse an der Erforschung der Methodik des Entwerfens in Bezug auf die Strukturierung bzw. Verwaltung des Entwurfsprozesses hat seit 1960 zugenommen. Ein Überblick kann durch die Referenz [17] verschafft werden. Die Erforschung der integralen Planung von Gebäuden in der frühen Entwurfsphase stellt einen wesentlichen Teil des gegenwärtigen Wissensstands dar. Ein energieoptimiertes Gebäudekonzept zu entwickeln heißt, die Performance des Gebäudes in Bezug auf Energie so weit wie möglich zu steigern. Eine aktuelle Diskussion läuft über *Performance-based Design* (dt.: Performancebasiertes Entwerfen). Der Begriff wurde von Kalay [18] geprägt, der die Behauptung zur Diskussion gestellt hat, dass der Entwurf von Gebäuden ein iterativer Prozess der Entdeckung sei, bei dem alternative Formen zur Erfüllung vorgegebener Bedingungen vorgeschlagen und im gegebenen Kontext geprüft werden.

Integrale Planung (lat. integer: ein Ganzes bildend, vollständig) ist im Zusammenhang mit Performancesteigerung bzw. -optimierung besonders bedeutsam. Sie zielt auf eine ganzheitliche Betrachtung einzelner, für sich stehender Planungsaspekte. Architekt Niklaus Kohler äußert sich dazu folgendermaßen: *„Integrale Planung erlaubt sowohl eine horizontale (fachübergreifende)*

als auch eine vertikale (lebenszyklusbezogene) Integration. Es wird dadurch möglich, neue Kenntnisse und Anforderungen von Anfang an in den Planungsprozess einzubringen und leistungsfähige Optimierungstechniken (Rückkopplungen, Simulation von Varianten etc. einzusetzen).“ [16]

Dieser integrative Ansatz von Kohler, der in Abbildung 1.11 dargestellt ist, wird eigentlich vom Architekten in der herkömmlichen Praxis ausschließlich an den von ihm betrachteten Aspekten angewendet. Der Prozess ist somit nur lokal integrativ und nicht global, da die Fachplaner nicht miteinbezogen sind.

Heutiger Zustand und idealer Ansatz

Der gestiegene Komplexitätsgrad sowie die Spezialisierung in allen technischen Sparten des Bauwesens erfordern heute die Einbindung von Experten verschiedener Fachrichtungen in den Entwurfsprozess. Diese findet normalerweise auf zwei Ebenen statt: auf einer ziemlich passiven Ebene in der konzeptionellen Phase und auf einer aktiven Ebene in der Ausführungsplanungsphase, in der sich die Fachplaner mit dem vom Architekten entwickelten Konzept beschäftigen.

In der herkömmlichen Konzeptionierungsphase beschäftigen sich Architekten mehr oder weniger mit den qualitativen Eigenschaften des Entwurfs. Bei der Ausführungsplanung beginnt die Koordination mit den Fachplanern, die sich ausschließlich mit den quantitativen Aspekten beschäftigen. Integrale Planung zwischen Architektur und Technik findet folglich selten statt. Dies bedeutet im Endeffekt nichts anders als eine Fortsetzung der kritisierten Entwurfsvorgehensweise des 20. Jahrhunderts, bei der Architektur- und Technikplanung völlig getrennt, also kollektiv und nicht integrativ gedacht waren.

Im Grunde genommen bereitet die die Ausführungsplanungsphase den Entwurf für den Verwirklichungsprozess vor. Daher ist der Innovationsrahmen relativ beschränkt. In der Praxis wird aber der Entwurf meist an die aus der quantitativen Analyse resultierenden Empfehlungen angepasst!

Um Synergien einzelner Anforderungen und Planungsaspekte frühzeitig zu erkennen und aufeinander abzustimmen, reicht es nach Hegger künftig nicht aus, Raumklima, Energie und Masse als rein physikalische Größen zu betrachten. Sie stellen vielmehr Dimensionen dar, die im Zusammenhang mit den klassischen Mitteln der Architektur (z. B. Form, Textur, Transparenz etc.) zu gestalten sind und bei geschickter Nutzung eben dieser Mittel Technik einsparen können. Quantifizierbare Größen wie z. B. Energiebedarf, Temperaturniveau oder Investitionskosten können eindeutig definiert werden. Sie sind jedoch eng verknüpft mit qualitativen Aspekten wie etwa Gestaltung, Wohlbefinden oder Imagewert. Der integrale Planungsprozess soll sicherstellen, dass quantitative wie qualitative Aspekte, die Beiträge verschiedener Fachdisziplinen sowie die Betrachtung des Gebäudes und seiner Eigenschaften über die gesamte Lebensdauer gleichermaßen einbezogen werden [6].

Nach der Grafik in Abbildung 1.12 sollten Architekten in der Konzeptphase die Möglichkeit zum Quantifizieren haben, da nach einer Untersuchung von Bogenstatter festgestellt wurde, dass 20

% der Entscheidungen in der frühen Entwurfsphase 80 % der Entscheidungen in der Ausführungsphase beeinflussen [19].

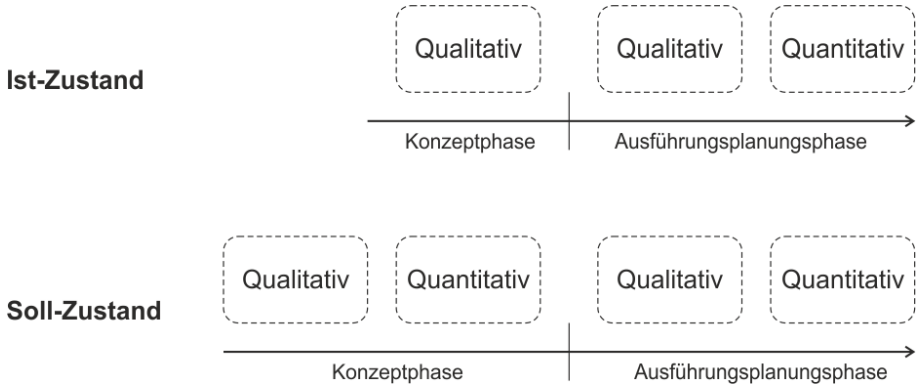


Abbildung 1.12 Betrachtete Aspekte in der gewohnten und der besseren Vorgehensweise (eigene Darstellung)

Die frühe Entwicklung und Integration eines Energiekonzepts ist ein zentraler Baustein für eine zukunftsfähige Entwurfsplanung von Gebäuden. Wie Abbildung 1.13 nach Hegger zeigt, lässt sich das Vorgehen in einen analytischen Teil, der meistens qualitative Kriterien umfasst, und einen quantitativen Teil (Bewertung) gliedern [6]. Wenn der Prozess in Abbildung 1.13 mit dem zweiten Prozess in Abbildung 1.12 kombiniert werden könnte, würden sich Architekten mit den gezeigten Themen sehr früh sowohl qualitativ als quantitativ auseinandersetzen. Dies wäre sowohl für den restlichen Entwurfsprozess als auch für die Performance des Gebäudes von entscheidendem Vorteil.

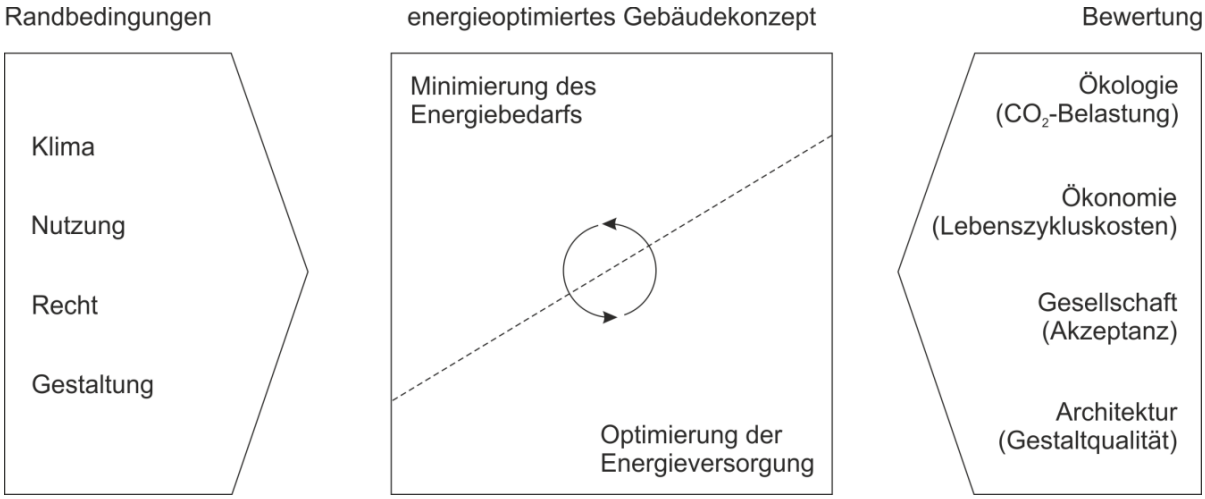


Abbildung 1.13 Einflüsse auf die Entwicklung von energieoptimierten Gebäudekonzepten [6]

In dieser Grafik wurde der Begriff Optimierung verwendet: Unter einem Optimum versteht man das bestmögliche Resultat im Sinne eines Kompromisses zwischen verschiedenen Parametern oder Eigenschaften unter dem Aspekt einer Anwendung, einer Nutzung oder eines Zieles [20]. Daher soll die Optimierung der Energieversorgung im Zusammenhang mit der Minimierung des Bedarfs stehen – also Minimierung des Bedarfs und Maximierung des Angebots bzw. der Energieversorgung. Das Endresultat ist das energieoptimierte Gebäudekonzept. Die an der Entwicklung eines Energiekonzepts für ein Gebäude Beteiligten beschäftigen sich mit der Suche

nach einer effizienten Energieversorgung und nicht z. B. mit der Optimierung der technischen Funktionsweise von Photovoltaikzellen. Die Anwendung des Begriffs ist in diesem Zusammenhang relativ zu verstehen. Damit die Bedeutung der Grafik präziser zu dem Kernkonzept der Arbeit passt, wird der Begriff „Maximierung des Angebots“ vorgeschlagen. Weiteres zur Definition der Optimierung wird in Abschnitt 2.4 geklärt.

Nachfolgend sind ausgewählte Potenziale der frühen integralen Planung zwischen den Entwurfsphasen nach Löhnert aufgeführt [21]:

- **Integration**: Ingenieurwissen und Spezialistenerfahrung fließen bereits mit Planungsbeginn in das Projekt ein.
- **Komplexität**: Aspekte des nachhaltigen Bauens werden umfassend berücksichtigt.
- **Iteration**: Entwurfsoptionen bleiben so lange offen, bis die optimale Lösung durch interdisziplinäre Entwicklung und Bewertung von Alternativen gefunden ist.
- **Optionen**: Die Bauherren treffen Entscheidungen nicht nur aufgrund primär visueller Lösungsvorschläge.
- **Lernendes System**: Fachplaner erhalten Einblick in die Komplexität des architektonischen Entwurfs. Architekten gewinnen zusätzliche Anregungen für den Gebäudeentwurf aus wachsenden Kompetenzen in technischen Planungsdisziplinen.

1.4.2 Planungswerkzeuge unter Berücksichtigung der Planung von Plus-Energie-Hochhäusern

Die Suche nach Werkzeugen hat für den Menschen seit der Urzeit zur Vereinfachung seines Lebens beigetragen. Der Gebrauch von Werkzeugen beeinflusste später die Ernährung des Menschen wesentlich und veränderte in der Folge auch die Gestalt der Knochenplatten des Kopfes, der Kiefer und der Zähne [22]. Interessanterweise kann eine Wechselbeziehung zwischen der Entwicklung der Werkzeuge und der Evolution des Menschen angenommen werden. Das Eine beeinflusste das Andere! Die Hände waren für den Gebrauch von Werkzeugen sehr wichtig. Im Laufe der Evolution haben sich die Finger so entwickelt, dass sie nicht mehr zum Klettern geeignet waren: Sie wurden gerade. Beim Homo erectus wurden der Daumenknochen und die Sehne stärker, was ihm ermöglichte, einen Gegenstand mit dem Daumen und den anderen Fingern zu halten. Das heißt, dass er zum Beispiel einen Strohhalm nicht wie ein Schimpanse mit der ganzen Handfläche hielt, sondern ihn zwischen Daumen und Zeigefinger greifen konnte. Diese Funktion ermöglichte es unseren Vorfahren, ein Objekt mit kontrollierter Kraft zu bearbeiten und daraus ein Werkzeug herzustellen [23].

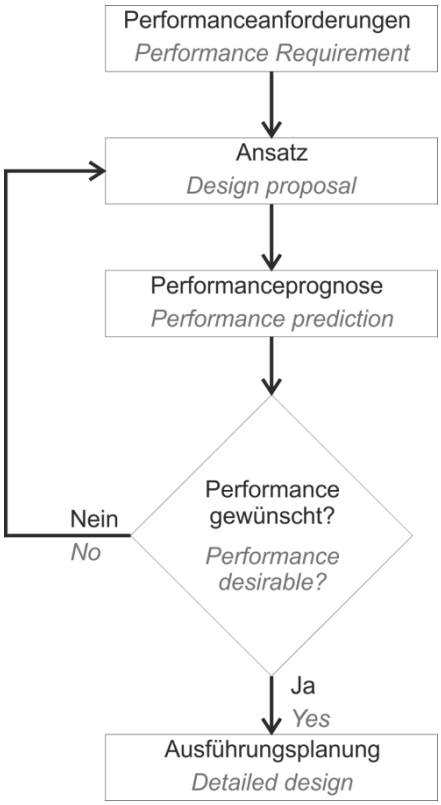


Abbildung 1.14 Typischer Entwurfsprozess, in dem die Fachplaner den Ansatz mittels Simulationstools prüfen [24]

Im Zusammenhang mit der Thematik der Nachhaltigkeit beschäftigt sich eine Reihe von Wissenschaftlern mit der Entwicklung von Planungswerkzeugen. Es wird immer wieder nach Werkzeugen gesucht, die Architekten durch eine Darstellung der Einflussgrößen und Abhängigkeiten der beeinflussenden Parameter in der Konzeptionierung energieeffizienter Gebäude unterstützen [25].

Die Nutzung von Planungswerkzeugen muss im Zusammenhang mit der Gesamtbetrachtung des Entwurfsprozesses untersucht werden: In der Vorgehensweise der integralen Planung werden zunächst Performanceanforderungen festgelegt. Danach wird ein Ansatz bzw. ein Konzept entwickelt und eventuell mittels Simulationstools durch Fachplaner bewertet. Das heißt, die Performance des Konzepts wird prognostiziert. Der Nutzer entscheidet dann, ob der Entwurf die gesetzten Anforderungen erfüllt oder nicht. Falls ja, macht der Planer weiter und fängt mit dem detaillierten Entwurf an. Falls nein, kehrt er wieder zurück zum zweiten Schritt und bearbeitet den Ansatz. Dieser Prozess ist iterativ, das heißt er wiederholt sich, bis der Planer mit der Bewertung seines Konzepts zufrieden ist. Dieser Vorgang ist besonders gut zu beobachten, wenn der Entwurf die gesetzten Normen nicht erfüllt.

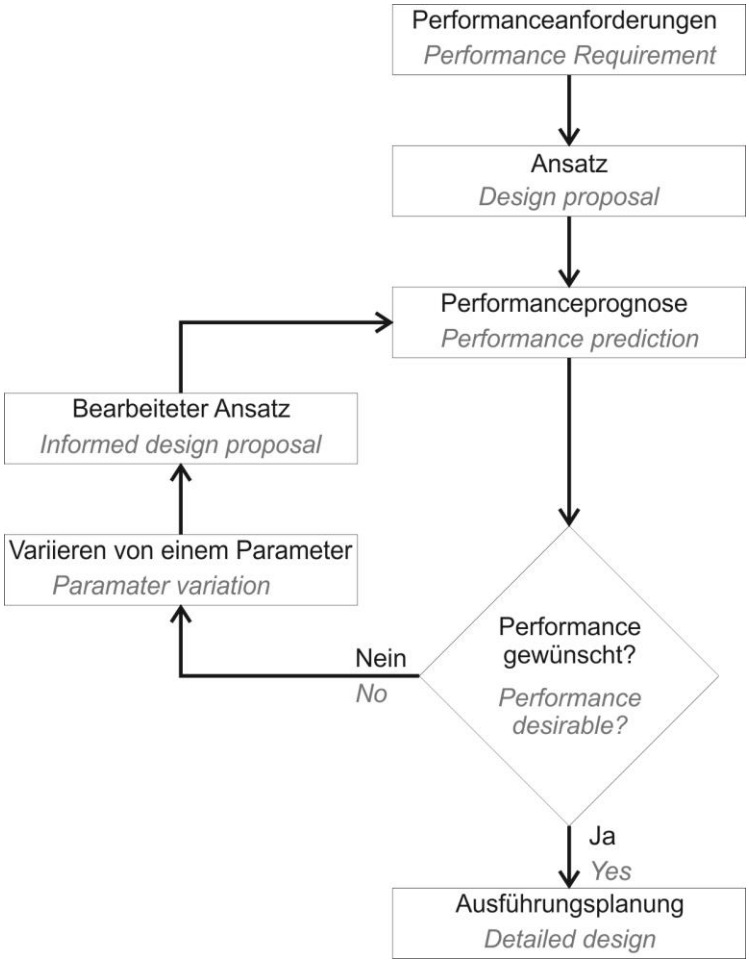


Abbildung 1.15 Vorgeschlagener Ansatz von Petersen [24]

Kritik an dieser Vorgehensweise übt Petersen. Er bemängelt, dass dieser iterative Prozess keine Empfehlungen in Bezug auf die Performance anbietet und daher die vollen Potenziale des Simulationstools nicht ausschöpft [24]. Petersen regt an, dass das Simulationstool zu einem aktiven Manipulator im Entwicklungsprozess werden und nicht nur die übliche passive Funktion der Performanceprognose übernehmen sollte. Er geht davon aus, dass eine Erweiterung des Prozesses möglich ist: So werden nach der Ablehnung zwei neue Punkte auf dem Weg zur

Performanceprognose ergänzt, nämlich das Variieren von Parametern und der bearbeitete Ansatz.

Im Prozess des Variierens von Parametern werden die Parameter des abgelehnten Ansatzes mittels Algorithmus bearbeitet und wieder zur Performanceprognose geschickt. In jeder Iteration ist vorgesehen, nur einen Parameter zu ändern, während die restlichen Parameter erhalten bleiben. Dieser Ansatz verhält sich sehr ähnlich zur Sensibilitätsanalyse [26]. Der Schwerpunkt im neuen Prozess besteht darin, dass das Programm Ratschläge bezüglich der Performance liefert, die vom Nutzer angewendet werden können.

Nach den wissenschaftlichen Untersuchungen [13], [27] und [28] wurde festgestellt, dass das Anwendungsgebiet der Simulationsprogramme eingeschränkt ist, da sie erst in späteren Konzeptionierungsphasen zum Einsatz kommen. Heutzutage wird die Kopplung des Simulationsprozesses mit dem Durchdringen des Entwurfs erforscht. Dies erfolgt durch eine Integration von Analyse- und Optimierungsmethoden. Ein Grund dafür ist die Herausforderung beim Umgang mit der Vielzahl von Parametern und der Komplexität von Einflussgrößen wie Nichtlinearität, Unbeständigkeit und Unsicherheit. Es wurde bewiesen, dass die Integration von Sensitivitätsanalyse und Optimierung im Konzeptionierungsprozess nicht nur vorteilhaft ist, sondern nach einer Umfrage unter Architekten und Fachplanern ausdrücklich gewünscht ist [27]!

Wird der integrative Ansatz aus Abbildung 1.11 vom Architekten angewendet, bereitet er ein Konzept vor und prüft es [16]. Wenn die Anforderungen nicht erfüllt sind, kehrt er zum Zweck der Verbesserung des Ansatzes zum ursprünglichen Konzept zurück. Dies kann als analoger Planungsablauf bezeichnet werden und wird in Abbildung 1.44 veranschaulicht. Grundsätzlich ist dieser Ansatz nicht falsch, aber begrenzt, da er mithilfe der konventionellen Werkzeuge nach der *Trial-and-Error-Methode* (dt.: Versuch-und-Irrtums-Methode*)* abläuft, die auf einer schrittweisen Verbesserung der Eigenschaften und nicht auf Optimierung basiert.

Heute stehen verschiedene kommerzielle Planungswerkzeuge zur Verfügung, die Funktionen wie Design, Modellbau oder Analyse erfüllen [28]. Die Entwicklung von Planungswerkzeugen für den Ingenieurbereich in Bezug auf Gebäudeperformance hat in den vergangenen Jahren drastisch zugenommen.

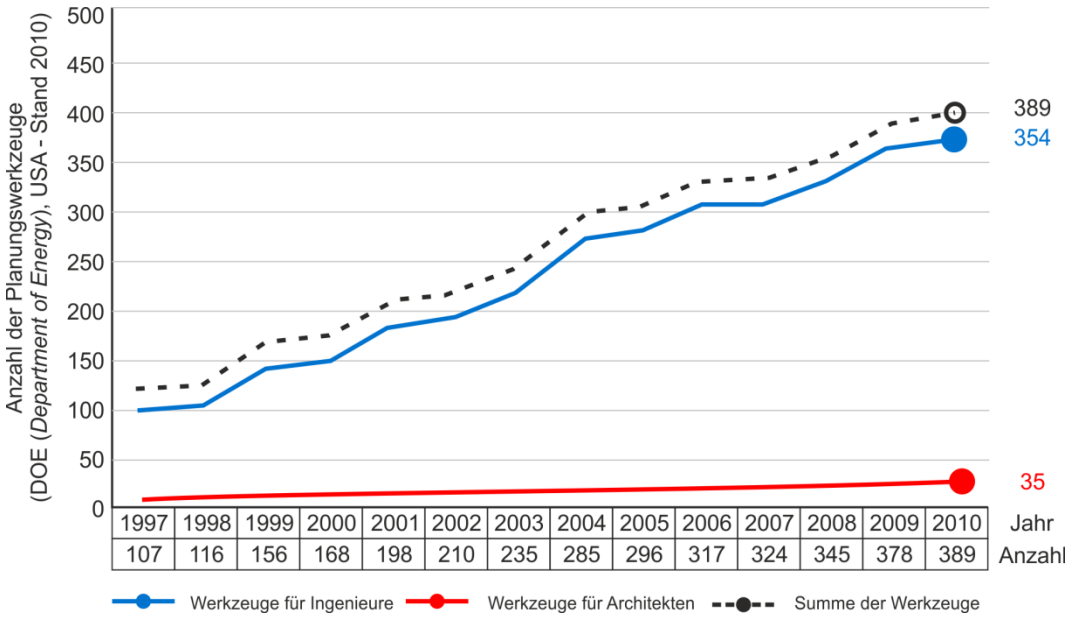


Abbildung 1.16 Entwicklung der Anzahl der Planungswerkzeuge [13]

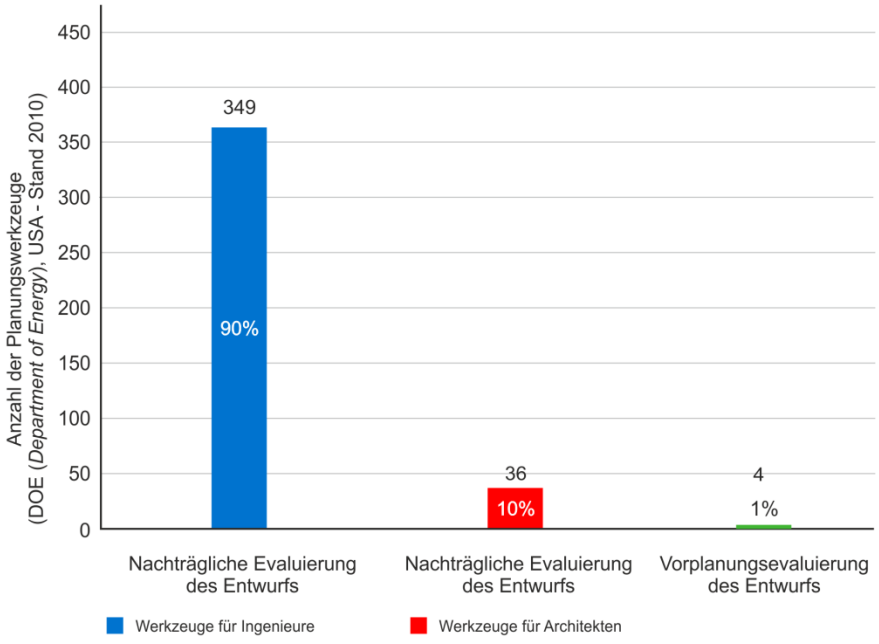


Abbildung 1.17 Klassifizierung von Simulationstools für Gebäudeperformance [10]

Gemäß der Grafik in Abbildung 1.17 lässt sich feststellen, dass es sehr wenige Planungswerkzeuge gibt, die den Architekten in der konzeptionellen und der Vorentwurfsphase in Bezug auf die Performance des Konzepts unterstützen. Es gibt bereits welche, die für die Evaluierung verwendet werden können. Diese sind zwar hilfreich, aber nicht anders als die Expertentools, die während der Ausführungsplanung verwendet werden. Der blaue Balken in Abbildung 1.17 stellt Simulationsprogramme dar, die von den Experten bzw. Fachplanern in der Ausführungsplanungsphase zur nachträglichen Evaluierung und zur genauen Berechnung und

Auslegung der technischen Anlagen eingesetzt werden. Auf der anderen Seite werden durch den roten Balken Programme repräsentiert, die an Architekten gerichtet sind und nachträglich zur Evaluierung des Entwurfs verwendet werden können. Der kleine grüne Balken gibt an, dass nur 1 % der heute verfügbaren Programme zur Nutzung vor dem detaillierten Entwurf vorgesehen ist.

Verschiedene Planungswerkzeuge wurden grob unter Berücksichtigung der Planung von Plus-Energie-Hochhäusern verglichen und bewertet. Die Evaluierung wurde im Licht anderer Bewertungen und kritischer Betrachtungen im Rahmen wissenschaftlicher Arbeiten vorbereitet [29]. Es wurden Programme ausgewählt, die kommerziell verfügbar sind oder im Rahmen wissenschaftlicher Arbeiten entwickelt worden sind. Die Ergebnisse werden in Abbildung 1.18 dargestellt.

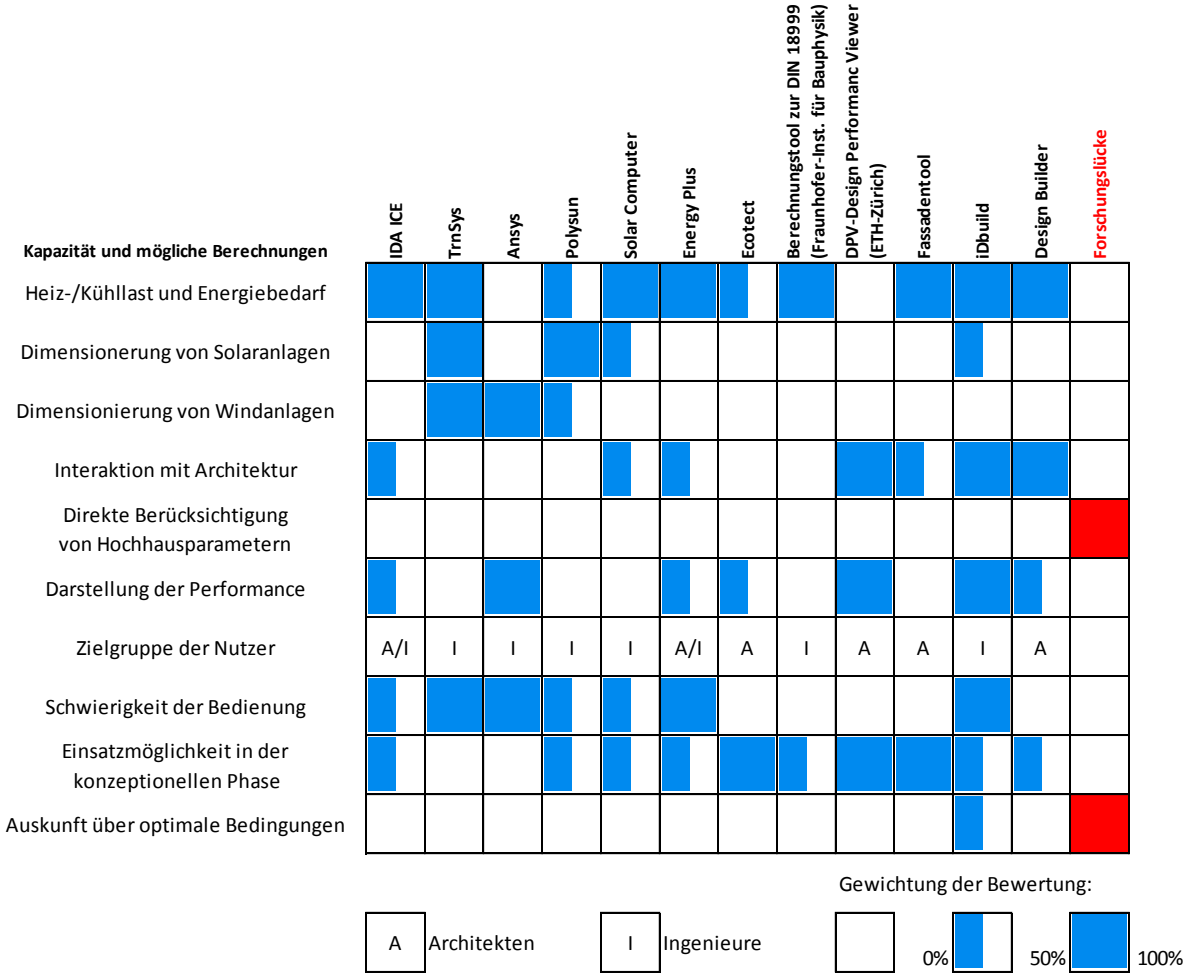


Abbildung 1.18 Vergleich und Bewertung von Planungswerkzeugen

Die Bewertungskriterien werden auf der linken Seite der Tabelle beschrieben, die bewerteten Programme werden auf der oberen Seite genannt. Im unteren Bereich wird die Legende der Gewichtung gezeigt. Eine weitere, ausführlichere Untersuchung kann bei [30] eingesehen werden. Einen Überblick über den Stand der Entwicklung der Planungswerkzeuge verschafft die Webseite der *Building Energy Software Tools Directory* des *U.S. Department of Energy*. Die

ersten sechs Programme von links wurden für Ingenieure entwickelt, um durch Berechnungen und Simulationen die Performance des Ansatzes zu bewerten. Das Programm *IDA-ICE* könnte auch von interessierten Architekten verwendet werden, da es eine einfache grafische Benutzeroberfläche (*eng.: User Interface*) bietet. Trotzdem ist es kein informatives Tool für den Entwurf, das heißt, es gibt keine Auskünfte über Änderungen an, die vorgenommen werden können, um die Performance des Ansatzes zu verbessern. Es wird deswegen oft nur für Bewertungszwecke durch thermische Simulationen in der Ausführungsplanungsphase verwendet und als Expertentool bezeichnet. Dieses Programm wurde bei der Entwicklung der neuen *Monte-Rosa-Hütte SAC* verwendet [31].

Das Programm *Ecotect* von *Autodesk* wurde ausschließlich für Architekten entwickelt. Seine Stärke liegt in der grafischen Benutzeroberfläche [29]. Seine Nachteile sind der Mangel an Genauigkeit sowie die ab und zu auftauchenden Fehler. Das Programm kann den Architekten zudem grundsätzlich nicht beim Planen energieautarker Gebäude unterstützen, da es die Auslegung gebäudeintegrierter Energieerzeugung aus erneuerbaren Ressourcen nicht anbietet.

Die Umsetzungsverordnung der EU-Richtlinie zur Gesamtenergieeffizienz von Gebäuden wird im Bereich des Nichtwohnungsbaus auf die technischen Regeln der DIN V 18599 zurückgreifen. Im Auftrag des Verordnungsgebers wurde ein elektronisches Rechentool entwickelt, das als Prototyp die Methodik der DIN V 18599 abbildet und exemplarische Anwendungsfälle bewerten kann. Dieses Programm kann kostenlos von der Webseite des Fraunhofer-Instituts für Bauphysik heruntergeladen werden. Die Benutzeroberfläche des Programms ist grafisch jedoch nicht freundlich. Es muss eine Vielzahl von Parametern in Bezug auf Gebäudetechnik angegeben werden. Demzufolge gehört es zu den Expertentools und muss von Haustechnikern bedient werden, da sich der Architekt in der Konzeptphase oft keine Gedanken über die Details der Gebäudetechnik machen will.

DPV-Design Performance Viewer wurde im Rahmen eines Forschungsprojekts an der ETH Zürich entwickelt. Es funktioniert als Plug-in zum parametrischen Zeichenprogramm *Revit*. Dieses einfache Tool für Nichtexperten liefert schnelle Aussagen zu energetischem/exergetischem Gebäudeverhalten in frühen Planungsphasen bei möglichst wenig zusätzlichen Parametereingaben [25]. Es ist aber im Endeffekt ein Darstellungstool und kann nicht für die Auslegung der Energieerzeugungstechnik genutzt werden. Auch im Rahmen einer Dissertation an der TU München wurde für ausgewählte Standorte eine umfangreiche Parameterstudie durchgeführt und ein interaktives *Fassadentool* entwickelt. Das Tool beschäftigt sich mit der Darstellung von Wechselwirkungen, die sich zwischen dem Klima eines Standorts und der Fassade in Bezug auf das Raumklima und den Energieverbrauch ergeben. Der Nutzer erhält in einer frühen Planungsphase eine schnelle Hilfestellung bei der Bewertung seiner Entwurfsüberlegungen. Dabei ist nicht das exakte Quantifizieren, sondern die Auswahl der relevanten Varianten für die Weiterbearbeitung und Optimierung von Bedeutung. Denn in der Konzeptphase, in der viele Parameter noch nicht feststehen, wird die Grundlage für weitere Planungsentscheidungen gelegt [32]. Die Festlegung von Kriterien sowie die Auswahl von Alternativen werden vom Nutzer und nicht vom Programm vorgenommen. Außerdem beschäftigt sich das Programm hauptsächlich mit dem Energiebedarf und nicht mit der fassadenintegrierten Energieerzeugung.

iDbuild ist ein Beispiel eines Programms, das nach dem in Abbildung 1.15 dargestellten Arbeitsfluss nach Petersen [24] entwickelt worden ist. Es bietet die Möglichkeit, den Nutzern schrittweise Vorschläge zu geben, um den Entwurf zu verbessern. In jeder Anlaufrunde optimiert das Programm einen Aspekt durch die Auswahl einer Variante aus vorgegebenen Lösungsmöglichkeiten [24]. Der Nachteil an diesem Programm ist, dass es von Energieexperten im Team verwendet werden soll und unter Betrieb eines speziellen Programms laufen muss.

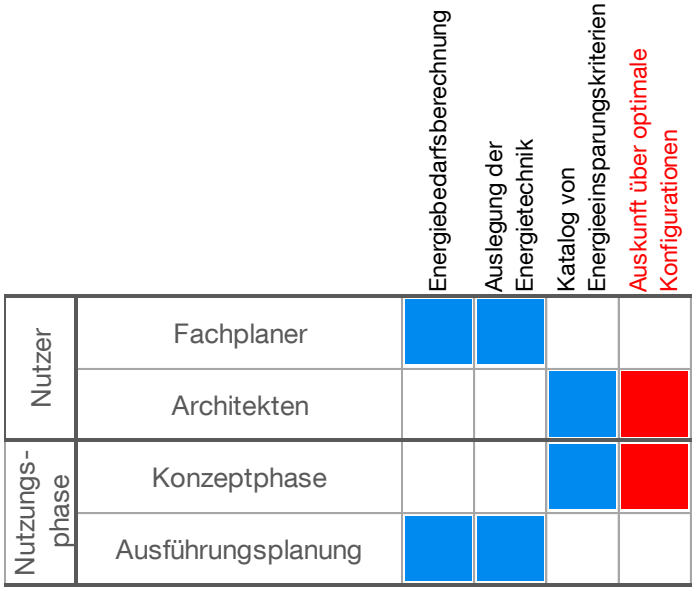


Abbildung 1.19 Zusammenfassung des Vergleichs und der Bewertung von Planungswerkzeugen

Die heute verfügbaren Planungswerkzeuge zur Simulation der Energieeffizienz sind in der Funktion ähnlich und beschränken sich auf die Ausführungsphase, um die Übereinstimmung des Entwurfs mit den Energienormen zu überprüfen. Hopfe behauptet, dass die fehlende Anwendung der Optimierung mithilfe dieser Werkzeuge in der Praxis eine Folge des Kosten- und Zeitaufwands ist. De Wilde stellt fest, dass die Tools weder zur Erzeugung von Entwurfsalternativen noch als Entscheidungshilfe zwischen Alternativen verwendet werden. Sie werden weder zur Gebäude- noch zur Systemoptimierung eingesetzt [27], [28]. Auf Basis des in der Abbildung 1.19 dargestellten Überblicks über die verschiedenen Planungswerkzeuge kann festgestellt werden, dass es kein Programm gibt, das unter Einbezug von architektonischen Parametern Auskunft über optimale Bedingungen der Energieeffizienz und Integration von Energieerzeugungstechnik gibt. Dies kann als Forschungslücke bezeichnet werden.

1.4.3 Hochhausintegrierte Energiegewinnung

Der erste Hauptsatz der Thermodynamik ist aus dem Satz der Energieerhaltung abgeleitet: Der Energieerhaltungssatz sagt aus, dass die Gesamtenergie eines abgeschlossenen Systems sich mit der Zeit nicht ändert. Energie kann lediglich in verschiedene Energieformen umgewandelt werden. Die Hauptphasen der Energiebereitstellungskette lassen sich wie folgt definieren und werden in der Abbildung 1.20 dargestellt [6]:

- *Primärenergie*: rechnerisch nutzbarer Energiegehalt in Energieträgern (z. B. fossile, nukleare oder erneuerbare Energien), die in der Natur vorkommen und noch nicht umgewandelt oder aufbereitet wurden
- *Sekundärenergie*: Ergebnis von Umwandlungsprozessen – demzufolge mit entsprechenden Energieverlusten aus der Primärenergie gewonnen –, wozu beispielsweise Benzine, Briketts und Heizöl zählen
- *Endenergie*: Anteil der Sekundärenergie, der nach Transport- und Leitungs- bzw. Transformationsverlusten vom Verbraucher bezogen wird
- *Nutzenergie*: die tatsächlich für die Energiedienstleistung (z. B. Strom für Beleuchtung) verwendete Energiemenge

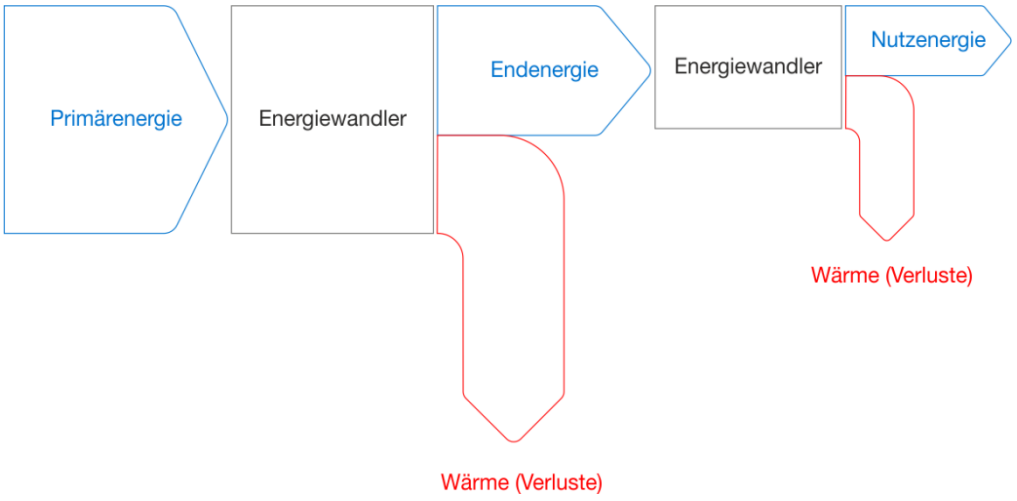


Abbildung 1.20 Allgemeines Energieflussdiagramm für Primär-, End- und Nutzenergie (eigene Darstellung) [33]

Die lokale Energieerzeugung vor Ort ist von wesentlichem Vorteil, wenn die Verluste zwischen der Energiequelle in der Primärenergieform bis zur Energiesenke in der Nutzenergieform (z. B. Strom) betrachtet werden. Der „Primärenergiefaktor“ (mit dem Kurzzeichen „fp“) gibt das Verhältnis von eingesetzter Primärenergie zu abgegebener Endenergie wieder, wobei nicht nur die Energieumwandlung in diesen Faktor einfließt, sondern auch der Transport und die Leitungsverluste [34]. Dieser Faktor unterscheidet sich von Land zu Land, z. B. 2,6 für Deutschland nach EnEV, für die Schweiz nach MINERGIE 2,0. Es darf nicht erwartet werden, dass der Primärenergiefaktor in den ölreichen Ländern geringer ist. So liegt dieser z. B. in den Vereinigten Emiraten bei 3,0 für Strom [35]. Daher steht die Minimierung von Verlusten auch dort im Vordergrund.

Das Energieflussdiagramm zeigt, wie groß die Differenz zwischen der eingespeisten Primärenergie und der Nutzenergie ist. Wenn die im Prozessverlauf entstehenden Verluste reduziert würden, würde auch der CO_2-Ausstoß durch die Reduzierung der eingespeisten Brennstoffe reduziert. Neben der Energieeffizienz bietet die Dezentralisierung der Energieerzeugung andere umwelttechnische, urbane, wirtschaftliche und politische Vorteile. Dieser Ansatz dient nicht nur der Verkleinerung des zur Energieversorgung benötigten Stromnetzes, sondern minimiert auch die drastischen Folgen im Notfall eines Stromausfalls und eliminiert die typische große Sicherungskapazität der zentralisierten Energieerzeugung.

Wenn z. B. jedes Gebäude die benötigte Wärme- oder Stromenergie vor Ort erzeugen würde, wäre es kein passiver Energiekonsument, sondern könnte zur Entlastung der bestehenden Infrastruktur beitragen. Eine Voraussetzung für den Erfolg des dezentralen Modells der Energieerzeugung ist die Minimierung des Energiebedarfs einerseits und die Maximierung des Ertrags aus erneuerbaren Ressourcen andererseits. Die Erhöhung der Effizienz (geringerer Verbrauch bei deutlich höheren Wirkungsgraden) wäre gemäß aktuellen Studien der kürzeste, billigste und sinnvollste Weg, um beim Wechsel zu erneuerbaren Energien zu einem Erfolg zu gelangen.

Die Klimapolitik sollte in diesem Kontext eine bedeutsame Rolle spielen. In Deutschland zum Beispiel wird die Förderung der Weiterentwicklung von Technologien zur Erzeugung von Strom aus erneuerbaren Energien sehr ernst genommen. Das deutsche *Erneuerbare-Energien-Gesetz* garantiert den Erzeugern feste Vergütungen für die Einspeisung von Strom aus erneuerbaren Quellen ins Stromnetz. Dies stellt einen wesentlichen Schritt in der Erhöhung der Effizienz des Primärenergiefaktors im Energiefluss dar. Aufgrund des steigenden Anteils an erneuerbaren Energien wurde der Primärenergiefaktor für elektrischen Strom in der deutschen *EnEV 2009-Energieeinsparverordnung* von 3,0 über 2,7 auf 2,6 gesenkt [36].

Wissenschaftlich initiierte Pilotprojekte stellten die ersten Null-Energie-Gebäude des Industriezeitalters dar. In den 1990er-Jahren entstanden die ersten autarken Gebäude ohne Netzanschluss. Danach erschienen die ersten Wohngebäude, in denen die Deckung des Heizwärmebedarfs zum großen Teil aus erneuerbaren Energien erfolgte. Aufgrund der heutigen technischen Möglichkeiten und politischen Maßnahmen wird v. a. in Europa kontinuierlich versucht, Null- und Plus-Energie-Häuser zu realisieren. Der studentische Wettbewerb *Solar Decathlon* in den USA und Europa bereitet künftige Architekten und Techniker sowie die Gesellschaft auf das Bauen von Plus-Energie-Häusern für Wohnzwecke im Jahr 2015 vor.

Nach Angaben des Wettbewerbs muss die Gebäudetechnik des *Year 2015 Prototype Home*komplett auf der Nutzung von Solarenergie basieren. Eine weitere Forderung des Wettbewerbs ist, dass neben einer hohen Architekturqualität ein behaglicher Wohnraum entstehen sollte, der innovative Wohnqualitäten ausweist [11]. Einen Eindruck einiger konkurrierender Objekte auf der National Mall in Washington, D.C., vermittelt Abbildung 1.21.

Abbildung 1.21 National Mall in Washington, D.C., während des Wettbewerbs *Solar Decathlon* 2009 [37]

Es wurden bereits mehrere Projekte in Europa realisiert, die als Null- oder Plus-Energie-Gebäude bezeichnet werden können. Die Bilanzierung der meisten Beispiele bezieht sich dabei auf die Primärenergie. Ausführliche Analysen von Projekten und deren Merkmalen können im Buch „Nullenergiegebäude“ von Voss nachgelesen werden [3]. Auf der Ebene des Hochhauses werden Solar- und Windenergietechnik immer mehr zu einem Hauptthema. Der Ansatz, das Hochhaus als Kraftwerk zu betrachten, der im Rahmen der Projektstudie *Power Tower* eingeführt wurde, ändert die Wahrnehmung des Bautyps und stellt neue Fragen zur Integration von Nutzungs- und gestalterischen Qualitäten des Hauses. Im Rahmen des Projekts wurde untersucht, wie bestimmte Qualitäten, die sich durch die Größe des Gebäudes ergeben, v. a. die besondere Höhe, Fassadenfläche oder Tiefgründung, synergetisch genutzt werden können. Ein weiterer Vorteil dieses Konzepts liegt an der Beteiligung der Nutzer und der Erhöhung des Umweltbewusstseins, da in einer solchen Struktur die Erzeugung von Energie für jeden einzelnen Verbraucher sichtbar ist [38]. Ein Beispielprojekt wird in Abbildung 1.22 gezeigt.

Abbildung 1.22 Windenergienutzung im Rahmen der Projektstudie *Power Tower* von Tessa Kölnberger [38]

Neben dem Netz kann Energie im Hochhaus grundsätzlich aus zwei Bereichen gewonnen werden: Dach und Fassade.

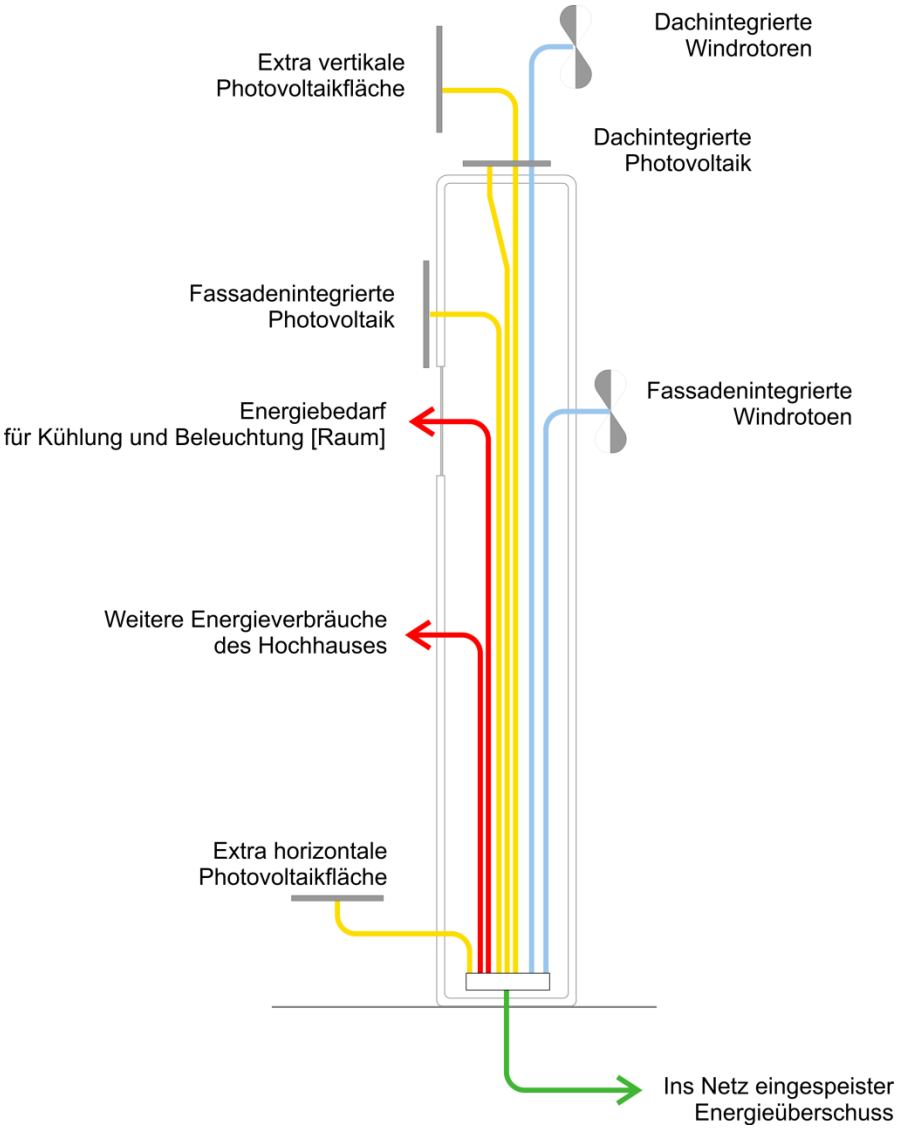


Abbildung 1.23 Möglichkeiten zur Energieerzeugung im Hochhaus

Zur Nutzung solarer Energie ist die Integration der Anlagen in die Fassade besonders wichtig, um die große exponierte Fläche auszunutzen. Die Größe und Ausrichtung der zur Verfügung stehenden Hüllflächen definieren den am Standort maximal zulässigen Energiebedarf eines Gebäudes, damit die Bilanz gerade noch ausgeglichen werden kann. Mit zunehmender Anzahl von Geschossen ist der Bilanzausgleich mit Solartechnologie allein aber nicht mehr erreichbar, da der Energiebedarf des Gebäudes stärker zunimmt als die für Solarenergienutzung geeignete Hüllfläche. Daher erweist sich ein hohes und kompaktes Gebäude mit großem A/V-Verhältnis als Nachteil [3]. Dies wurde in der Abbildung 1.9 beschrieben. Man kann davon ausgehen, dass es dann notwendig ist, weitere Möglichkeiten zur Energieerzeugung zu nutzen.

Bei der Solarenergie können Extraflächen zum Einbau von Photovoltaikzellen miteinbezogen werden. Dies kann horizontal oder vertikal zur Ausnutzung des freien Raums rund um das Hochhaus erfolgen. Bei der Windenergie ist es fast umgekehrt, da Windrotoren auf dem Dach aufgrund der mit der Höhe steigenden Windgeschwindigkeiten einen höheren Ertrag erzeugen als an der Fassade. Aufgrund von mit Gebäudeform und Standort zusammenhängenden Kriterien gibt es dennoch Stellen an der Fassade mit hohen Windgeschwindigkeiten, deren Potenzial ausgenutzt werden kann. Möglichkeiten zur Energieerzeugung im Hochhaus werden in der Abbildung 1.23 schematisch dargestellt.

Gebäudeintegrierte Solarkollektoren und Photovoltaikzellen

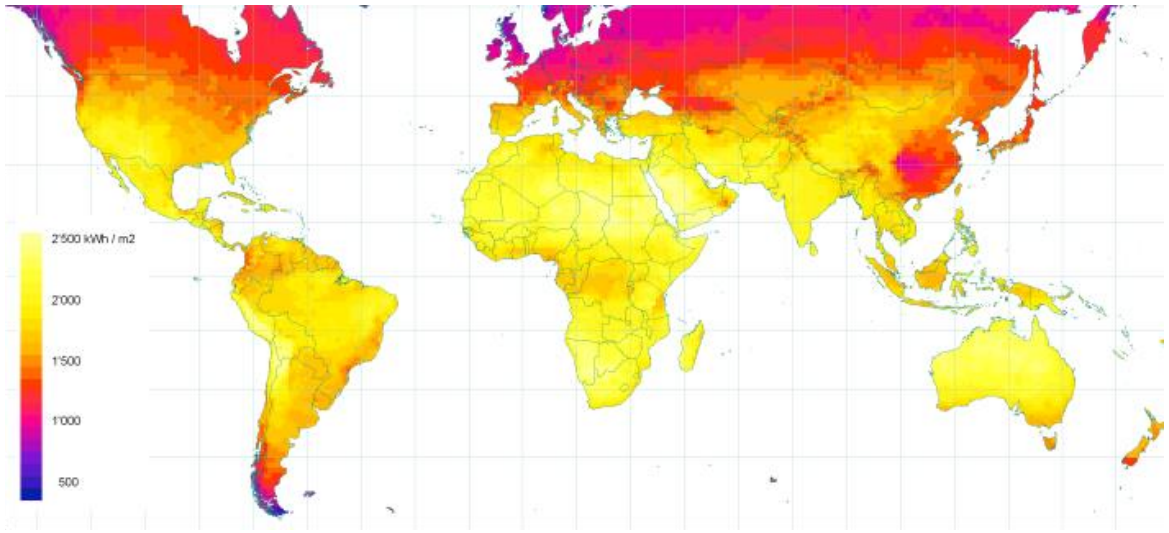


Abbildung 1.24 Summe der jährlichen globalen Einstrahlung auf der Welt [39]

Um die Globalstrahlung aktiv verwenden zu können, gibt es generell zwei Möglichkeiten: die Umwandlung in Wärme oder Strom. Die Kollektoren beider Systeme können frei aufgestellt oder in die Gebäudehülle integriert werden. Es wird deutlich, wie sehr sich die Intensität der globalen Solarstrahlung von Ort zu Ort unterscheidet. Um z. B. die Region um das Mittelmeer mit Nordafrika, Südeuropa und zum Teil Vorderem Orient mit elektrischer Energie auf Solarthermiebasis zu versorgen, würde es nach Daniels ausreichen, ca. 0,15 % der Sahara mit entsprechenden solarthermischen Systemen zu überziehen. Gerade Australien und Neuseeland könnten bei entsprechender Politik sehr schnell aus dem Energieverteilungskampf aussteigen, da sie in ihren eigenen Ländern über ausreichend Sonnenenergie verfügen [11].

Unter Photovoltaik versteht man die direkte Umwandlung von Lichtenergie in elektrische Energie mittels Solarzellen. Die Systemtechnik basiert auf ersten Entwicklungen Mitte der 20er-Jahre und befindet sich heute auf hohem technischen Niveau. Neben der Stromgewinnung zur Einspeisung in das Netz wird die Photovoltaik auch für mobile Anwendungen eingesetzt, beispielsweise bei Solarfahrzeugen, Solarflugzeugen und Solarluftschiffen.

Die in Abbildung 1.25 dargestellten Daten aus FTD nach Berichten des Fraunhofer-Instituts für solare Energiesysteme (ISE) in Freiburg zeigen die heute erreichbare Effizienz verschiedener PV-Module.

	erreichbare Effizienz [%] (maximal)	erreichte Effizienz [%] (der Industrie)	
III-V	40	36.5	Zellen auf der Basis von Elementen der 3. und 4. Hauptgruppe des Periodensystems
c-Si	20	19.3	Monokristallines Silizium
mc-SI	18	16.1	Monokristallines Silizium
CdTe	18	11.1	Cadmiumtellrid
CIS	18	11	Kupfer-Indium-(Gallium-) Diselenid
TFSi	15	9.5	Dünnschichtsilizium

Abbildung 1.25 Effizienz bzw. Kostenpotenzial der Photovoltaiktechnologie (eigene Darstellung) [40]

Im Folgenden werden ausgewählte Ansätze diskutiert. Fassadenintegrierte Solartechnik im Hochhaus findet immer mehr Beachtung. Ausgehend von der attraktiven Energieeinspeisevergütung in Südkorea hat das Büro *Adrian Smith + Gordon Gill Architecture* ein Hochhauskonzept entwickelt, bei dem Photovoltaikzellen zur Stromerzeugung integriert sind. Die installierten Anlagen sollten ca. 725 MWh pro Jahr erzeugen. Mit der hohen Energieeinspeisevergütung vom Elektrizitätsversorgungsunternehmen (EPCO), die das 5-Fache des aktuellen Strompreises beträgt, sollte sich die Investition nach 7 Jahren amortisieren, anstatt wie üblich nach 30 bis 35 Jahren [41].

Abbildung 1.26 Links: Hochhauskonzept der Federation of Korean Industries Headquarters [41]; rechts: Großaufnahme der fassadenintegrierten Photovoltaikzellen

Im 240 Meter hohen Hochhaus wurden die Photovoltaikpaneele schräg nach oben geneigt, um einen höheren Ertrag zu erzielen. Auf der anderen Seite wurden die Glaspaneele schräg nach unten geneigt, um die Kühllast aufgrund der Einstrahlung zu verringern. Diese Neigung der transparenten Fläche hat aufgrund der verringerten Wärmeaufnahme jedoch einen negativen Einfluss auf die Heizlast sowie natürlich auf die visuelle Behaglichkeit.

Anhand des Beispiels eines Raums zeigen die Diagramme in Abbildung 1.27 die korrelierenden Parameter im Zusammenhang mit dem Neigungswinkel. Der optimale Bereich ist grün gekennzeichnet. Die veröffentlichten Daten haben weder Indikatoren noch optimierte Bedingungen der visuellen Behaglichkeit gezeigt, da die Neigung der Glasfläche auf die gezeigte Art und Weise den Tageslichtquotienten erheblich beeinträchtigt.

Selbstverständlich verbessert sich der Energieertrag, wenn die Einstrahlung auf die Photovoltaikzellen zunimmt. Umgekehrt verringert sich die Kühllast bei geneigter Glasfläche. Die geringe Last muss aber nicht unbedingt zu einem geringeren Jahresenergiebedarf führen, weil sie stationär betrachtet wird. Es stellt sich die Frage, ob die Neigung die verfügbare Fläche für weitere Optimierung durch Vergrößerung oder Verkleinerung begrenzt. Daher können weitere Parameter eingebaut werden, um optimale Ergebnisse zu ermitteln.

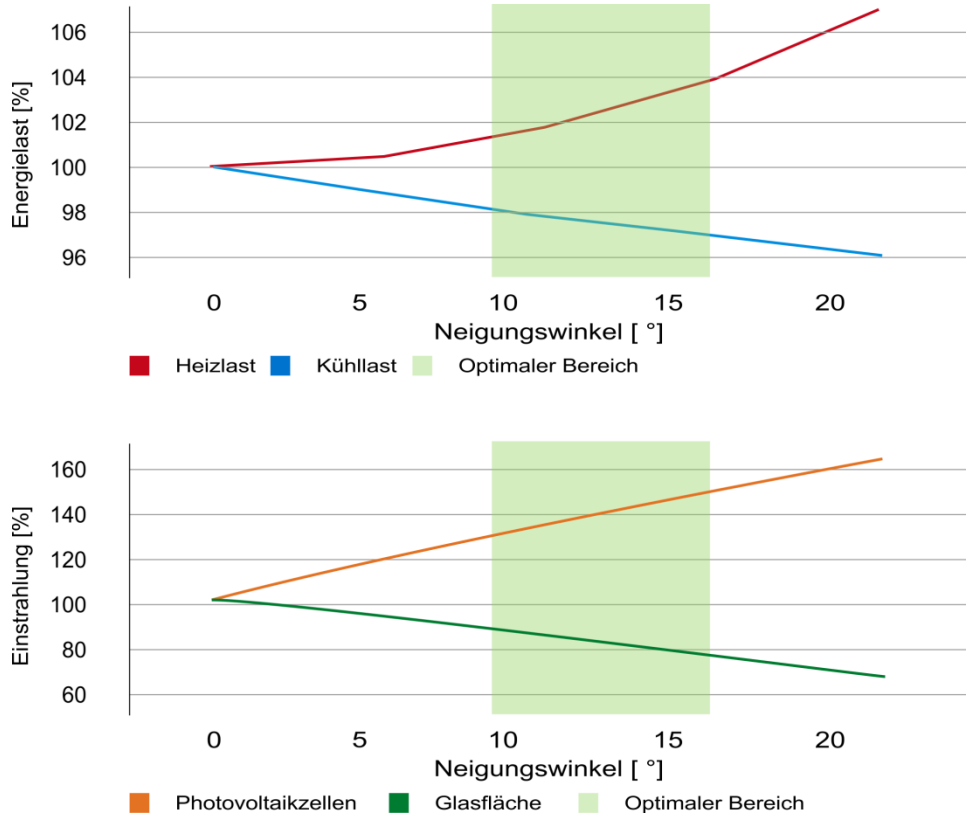


Abbildung 1.27 Einfluss des Neigungswinkels; oben: auf die Energielasten; unten: auf die Einstrahlung (eigene Darstellung) [41]

Das obere Diagramm in Abbildung 1.28 zeigt das Beispiel eines Wettbewerbsbeitrags, bei dem Module der Photovoltaikzellen und Solarkollektoren in die Fassade eingebaut sind. Dazu wurden transluzente Flächen und Lichtlenkungselemente integriert. Auch ein frühes Konzept eines Hochhauses wird unten gezeigt. Die blauen Flächen stellen die Abschnitte mit integrierten Photovoltaikzellen dar.

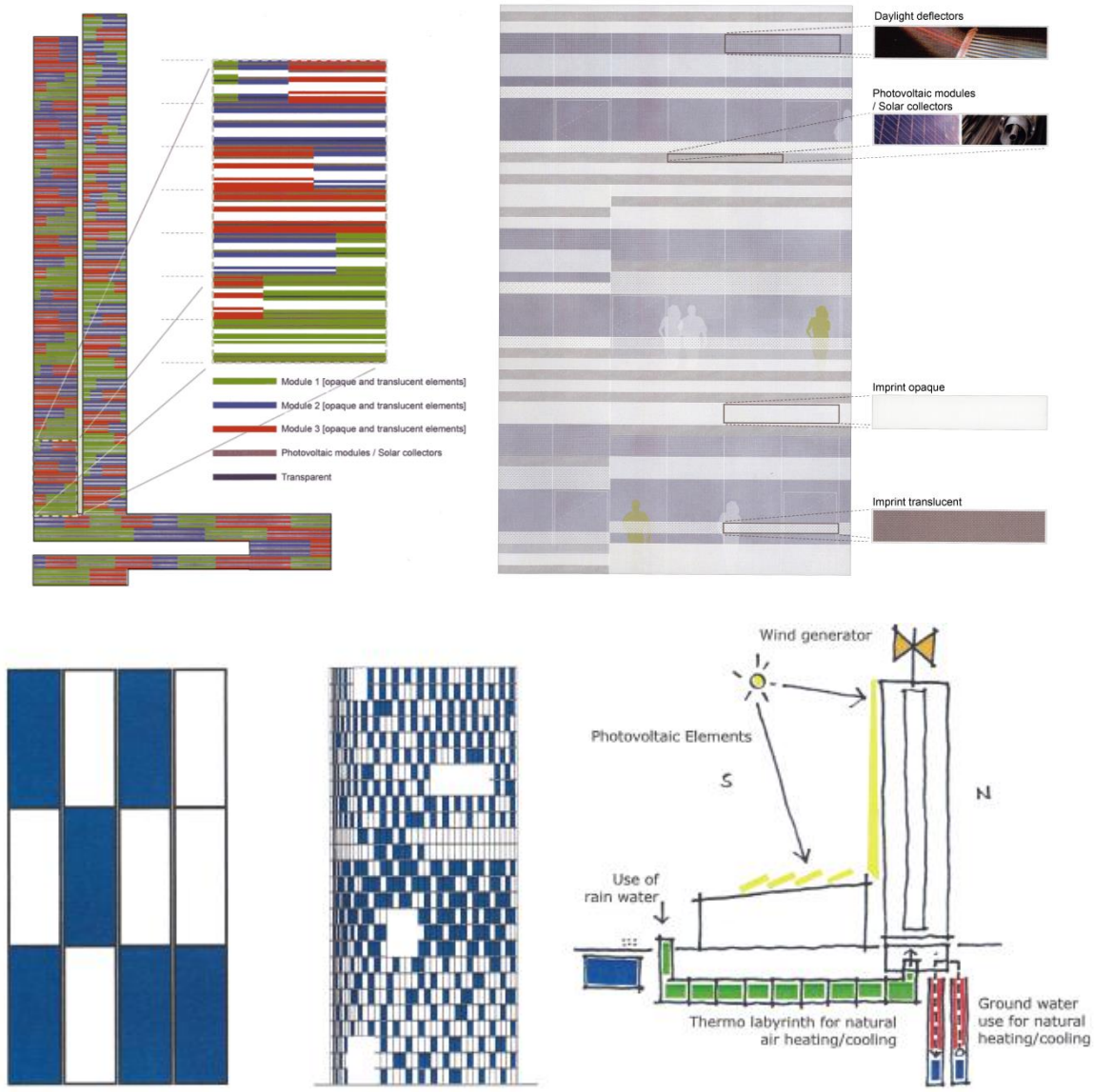


Abbildung 1.28 Oben: Gebäudekomplex über Shenzehn University von Auer Weber und Assoziierte; unten: Icade Tower, Berlin [11]

Die Fläche der integrierten Photovoltaik im ersten Beispiel ändert sich nach bestimmten gestalterischen Regeln. Das gilt vermutlich auch für das zweite Beispiel, in dem die Dichte der Photovoltaik in der Mitte höher ist. Hier stellt sich die Frage, ob diese Parameter quantitativ optimiert werden können, um die Verwirklichung der qualitativen und gestalterischen Kriterien durch eine frühe Beantwortung von vielen Fragen zu unterstützen. Daher wäre ein speziell an Architekten gerichtetes Werkzeug sinnvoll.

An der Uni Stuttgart, Lehrstuhl Stefan Behling, wurden mit Unterstützung der Firma *Schüco* vor Jahren Entwicklungen begonnen, um eine Fassade zu konzipieren, die funktional notwendige Baukomponenten mit Energieertragselementen kombiniert, sodass eine Energiefassade entsteht [11].

Abbildung 1.29 Schüco E² Fassade [42]

Das integrale Fassadenkonzept erfüllt dabei folgende Forderungen:

- Die unsichtbare Integration von Fensterflügeln in die Pfosten-Riegelfassade sorgt für natürliche Lüftung. Die Automation aller Öffnungsarten erfolgt über verdeckt liegende, in Pfostenbreiten von ca. 8,5 cm integrierte Systemantriebe, die zentral, dezentral oder individuell am Fassadenelement betrieben werden können.
- Der außen liegende Sonnenschutz besteht aus einer Mikrolamelle, die bei Windgeschwindigkeiten bis ca. 100 km/h bzw. 27,8 m/s zuverlässig verschattet. Die Mikrolamelle wird seitlich in den Pfosten geführt und ist im eingefahrenen Zustand nicht sichtbar.
- Photovoltaikzellen, die variabel als Teilflächen oder in Geschosshöhe einsetzbar sind.

Gebäudeintegrierte Windrotoren

Die Nutzung der Windenergie reicht historisch betrachtet weit zurück. Im 17. und 18. Jahrhundert gab es beispielsweise in den Niederlanden etwa 9000 Windmühlen. An besonders ertragreichen Standorten mit hohen mittleren Windgeschwindigkeiten ab ca. 3 m/s kommen Windkraftanlagen im Leistungsbereich bis 5 MW zum Einsatz [6].

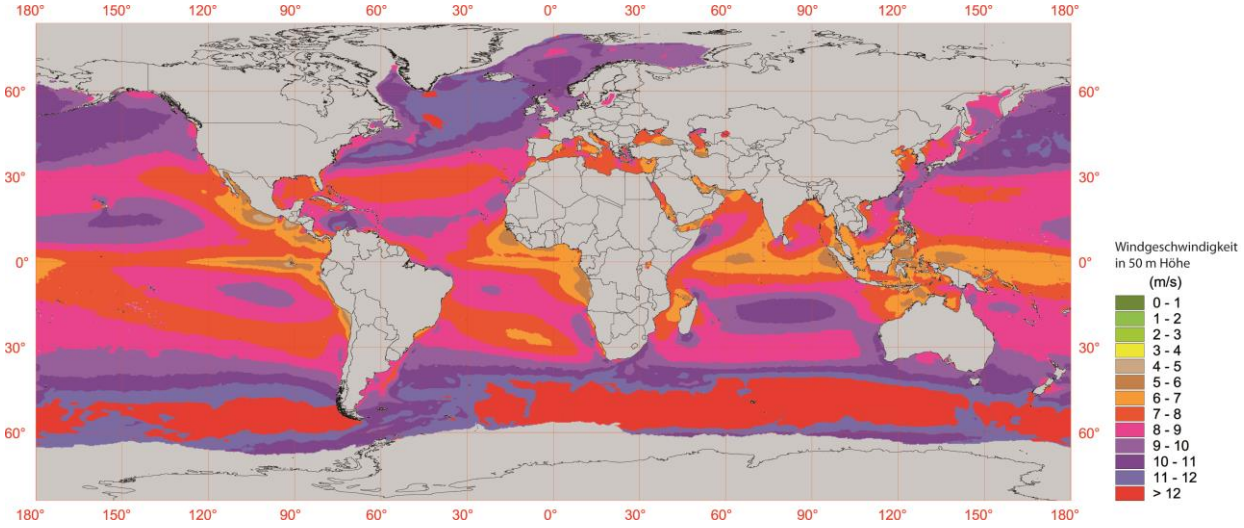


Abbildung 1.30 Jährliche Windgeschwindigkeiten in 50 m Höhe [43]

Windturbinen können entweder *onshore* (dt.: Festland) oder *offshore* (dt.: auf hoher See) installiert werden. Derzeit existieren erste planerische Ansätze zur Integration von Windkraftsystemen in Gebäude [6].

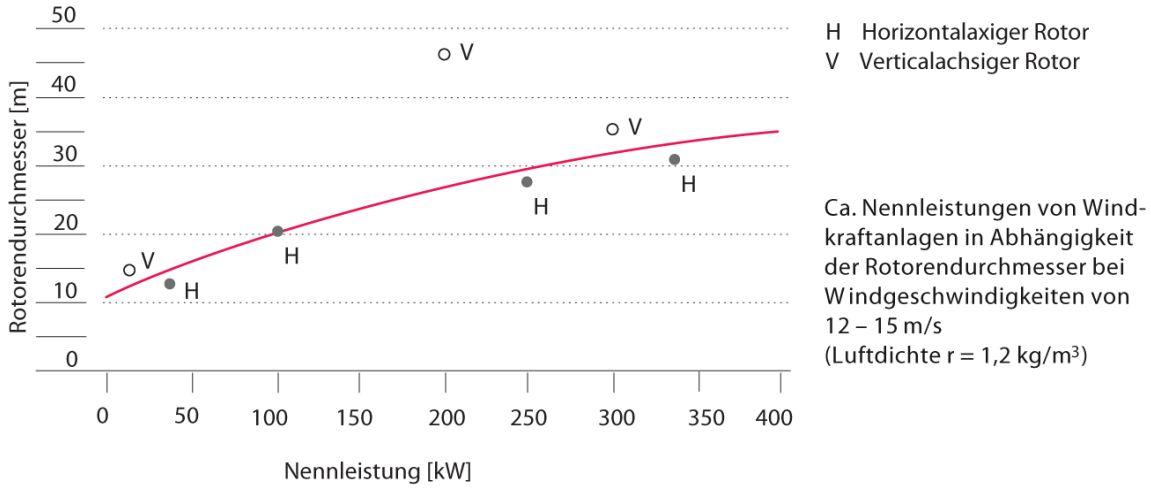


Abbildung 1.31 Nennleistungen von Windkraftanlagen in Abhängigkeit vom Rotorendurchmesser [11]

Eine effiziente Windkraftnutzung am Gebäude kann erst bei Windgeschwindigkeiten von mindestens 4 m/s im Jahresmittel erfolgen. Allmählich entwickeln sich Lösungen zur

Geräuschemission der Windräder. Abbildung 1.31 zeigt geschätzte Nennleistungen von Windkraftanlagen in Abhängigkeit vom Rotorendurchmesser bei Windgeschwindigkeiten von 12–15 m/s. Auffällig ist, dass die vertikalen Rotoren größere Flächen brauchen als die horizontalen, um auf dieselbe Nennleistung zu kommen. Der Vorteil der vertikalachsigen Rotoren ist, dass diese bei jeder Windrichtung funktionieren.

Das in Abbildung 1.32 gezeigte, von Helmut Jahn gebaute fünfgeschossige Wohnhaus in Chicago, USA, stellt ein Beispiel für effiziente Windnutzung dar. Aufgrund der hohen Windgeschwindigkeiten am Standort sind acht Windturbinen mit horizontalen Achsen in das Dach integriert, die über eine Gesamtleistung von 12 KW_p verfügen, was einer Solarstromanlage von rund 100 m^2 entspricht.

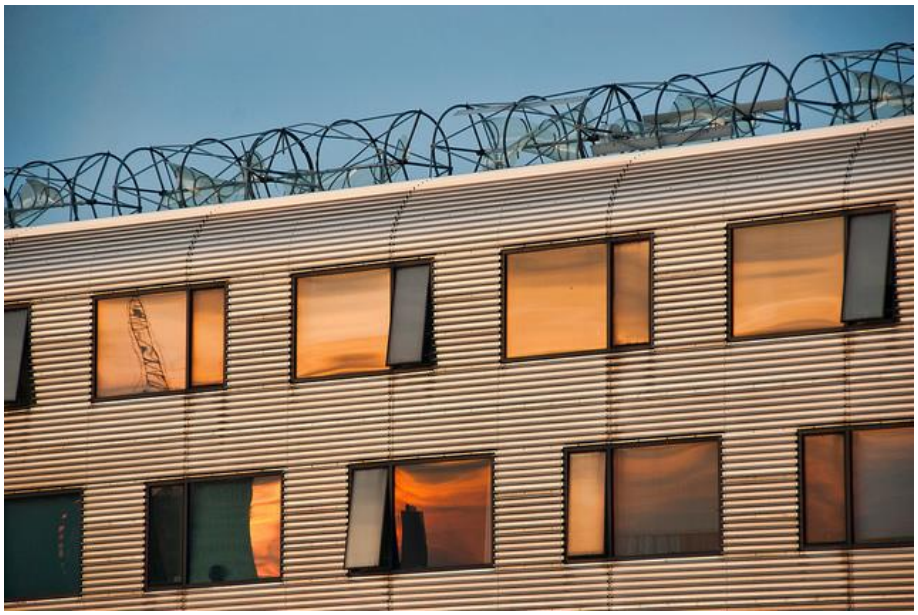


Abbildung 1.32 Windturbinen auf dem Dach des Hauses Near North Apartments in Chicago, USA [44]

Um die Potenziale der gebäudeintegrierten Windenergie zu erhöhen, werden Untersuchungen im städtebaulichen Kontext durchgeführt, um günstige Positionen für Windrotoren herauszufinden. Nach wissenschaftlichen Untersuchungen [45] wurden bei dem in China 2011 von S.O.M. fertiggebauten Turm *Pearl River Tower* neben fassadenintegrierten Photovoltaikzellen auf jeweils einem Drittel der Fassadenhöhe Windrotoren in den Gebäudekörper integriert. Durch Umformung des Gebäudekörpers soll an den Rotoren die Windgeschwindigkeit erhöht werden, um mehr Energie zu erzeugen als bei frei stehenden Windrotoren. Unter anderem aufgrund der nicht genehmigten Integration von Wasserstoff-Mikroturbinen (s. u.) konnte die angestrebte Plus-Energiebilanz aber nicht erreicht werden.

Eine wissenschaftliche Arbeit hat sich mit der Untersuchung des energetischen Potenzials des Hauses beschäftigt [46]. Der Energieertrag des Hauses beträgt bei 50-prozentiger Belegung der Ost- und Westfassade mit Photovoltaikelementen rund 420 MWh/a und bei vollflächiger Belegung das Doppelte. Die Windgeneratoren mit je einer Leistung von ca. 13 kW (Nennleistung bei ca. 9,9 m/s mittlerer Anströmgeschwindigkeit über alle Geschosse) erzeugen bei einer

geschätzten Stundenanzahl von 3.330 per anno ca. 173 MWh/a. Somit liegt der Gesamtenergieertrag aus Solarenergie und Windenergie bei ca. 600 MWh/a.

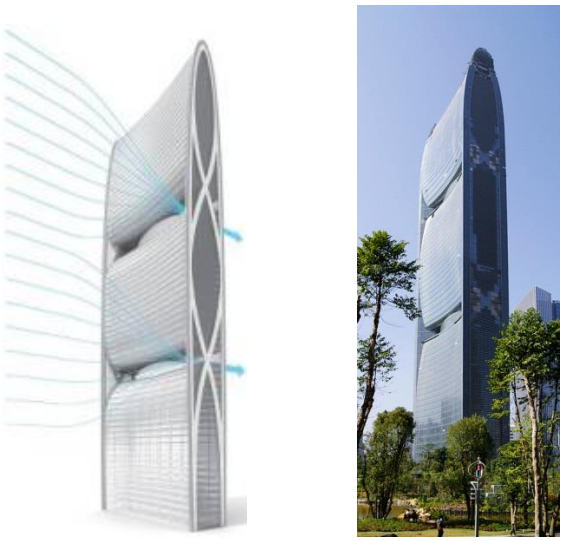


Abbildung 1.33 Pearl River Tower, Guangzhou, von S.O.M. [47]

Alle zuvor angegebenen Kenndaten sind jeweils bezogen auf einen Quadratmeter Bruttogeschossfläche. Selbst wenn man davon ausgeht, dass sowohl die Photovoltaikelemente (angenommener Wirkungsgrad ca. 15 Prozent) in der vertikalen Fassade optimal positioniert sind als auch die Windkraftanlagen optimal angeströmt werden, kann jedoch eine Jahresversorgung ausschließlich durch erneuerbare Energien nicht festgestellt werden. Diese dürften lediglich einen Beitrag von ca. 2,5 bis 4 Prozent erbringen [46]. Eine weitere Untersuchung des Potenzials der Integration von Winddurchlässen in Hochhäuser wird in Abschnitt 3.3.2 durchgeführt.

Abbildung 1.34 Strata Tower, London [48]

Der *Strata Tower* in London ist eines der ersten Hochhäuser mit dachintegrierten Windturbinen. Die riesigen Turbinen decken aber lediglich acht Prozent des vom Haus verbrauchten Stroms ab. Das schwarze, in Abbildung 1.34 gezeigte Hochhaus wird im Hinblick auf die Ästhetik kritisiert. Dies ist allerdings ein subjektiver Aspekt und es handelt sich immerhin um eine Bewegung in Richtung umweltfreundlicher Hochhäuser [49]. Es ist unklar, aus welchem Grund die Energiebilanz zu gering ist. Es kann davon ausgegangen werden, dass die Anzahl der Rotoren im Verhältnis zum vermuteten Energiebedarf zu klein ist. Daher wäre ein integraler Ansatz mit Solarenergie sinnvoll, der von dem Potenzial der großen Fassadenfläche profitiert, die sich aus dem exponierten Körper des Hochhauses ergibt.

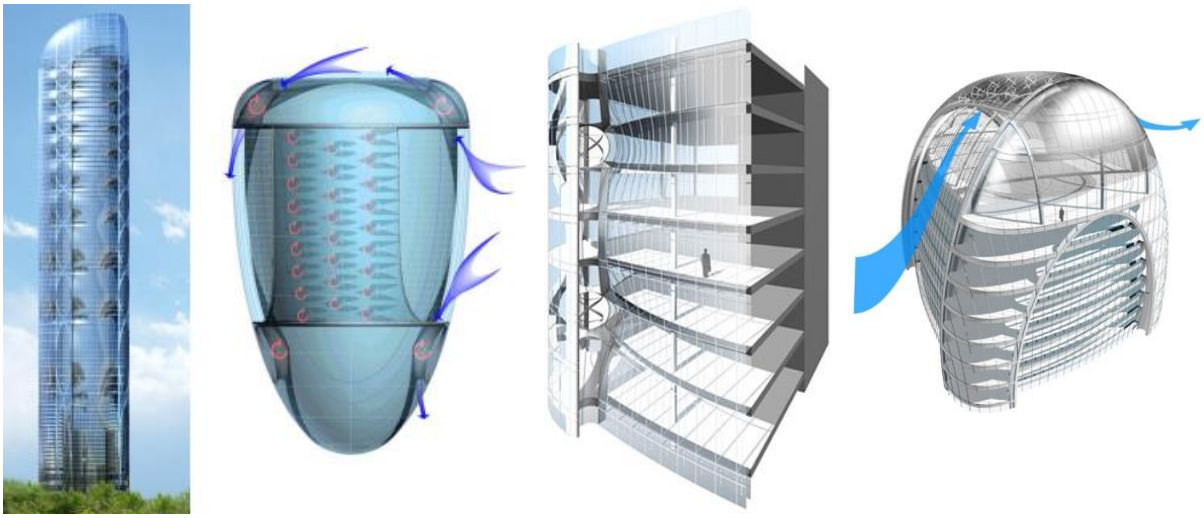


Abbildung 1.35 Ansichten und Schnitte vom Projekt Clean Technology Tower [50]

Im konzeptionellen Projekt *Clean Technology Tower* in Chicago wird eine vernünftige Integration von Bauform und fassaden- und dachintegrierten vertikalachsigen Windrotoren angestrebt. Im Gegensatz zum Strata Tower ist die Rotorenanzahl sehr groß, aber die Fläche relativ klein. In diesem Projekt profitiert das Gebäude vom gebäudenahen Wind, dessen Geschwindigkeit sich an Fassaden erheblich erhöht. Es konnten keine quantitativen Daten über die Leistung der Rotoren in Erfahrung gebracht werden. Es stellt sich die Frage, ob die Anzahl sowie die Fläche und Position jedes Rotors für den Standort mit seinem Windverhalten wirtschaftlich sind.

Die Forschungsgruppe um Prof. Stefan Behling an der Uni Stuttgart hat mit weiteren Fachleuten verschiedenste Hochhausformen, die über Windkraftwerke elektrische Energie erzeugen sollten, in Windkanalversuchen und CFD-Simulationen untersucht. Einige Beispiele werden in Abbildung 1.36 gezeigt. Venturiflügel oder andere Verbindungselemente verhindern Verwirbelungen und damit Verlust an Durchströmungsgeschwindigkeit. Die erzielbare Leistung ist proportional zur Erhöhung der Windgeschwindigkeit (Steigerung in der 2. Potenz). Im dritten Bild von links hat sich die Windgeschwindigkeit aufgrund der düsenförmigen Konfiguration um 1 m/s erhöht und hierdurch mehr Energie erzeugt als eine frei stehende Anlage [45]. Wie die Forschungsgruppe herausfand, bleibt die maximal zu erreichende Kraftverstärkung kleiner als Faktor 2 [45].

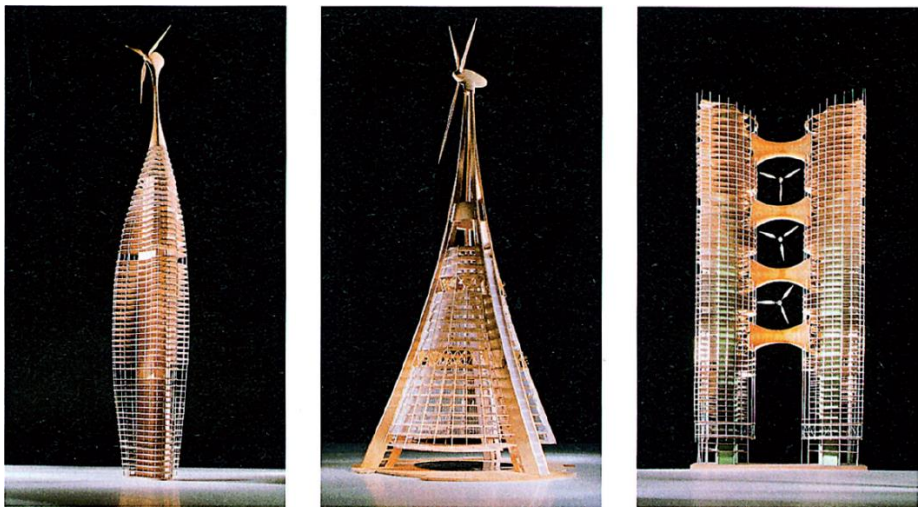


Abbildung 1.36 Forschungsmodelle gebäudeintegrierter Windkraftanlagen BIWP [45]

Nach Daniels und Hammann [11] lässt sich feststellen, dass die Entwicklung fassadenintegrierter, energiegewinnender Solarelemente zu deutlich höheren Erträgen führen dürfte als der Einsatz von Windkraftanlagen am und im Gebäude. Es stellt sich somit die Frage, ob die Integration von Windelementen in anderen Formen erfolgen kann bzw. weiter optimiert werden kann.

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass bisher keine energieautarken bzw. -generierenden Hochhäuser gebaut wurden und diese Vision nach den heutigen technischen Möglichkeiten als Illusion bezeichnet wird [11].

Einige wissenschaftliche Arbeiten haben die Energieerzeugungspotenziale der *Jetstreams* untersucht, die in großen Höhen (über einem Kilometer) in der Atmosphäre auftreten. Diese geostrophischen Winde sind im Vergleich zu anderen Wetterphänomenen sehr verlässlich und stabil in ihrem Auftreten und können Geschwindigkeiten von ca. 150 m/s erreichen. Freie oder in ein Heliumluftschiff eingebaute Windrotoren könnten mit einer Mutterstation auf der Erde verbunden werden und theoretisch enorme elektrische Energie erzeugen [51], [52]. Diese Vorstellungen sind zwar vielversprechend, befinden sich aber noch in frühen Entwicklungsphasen und entsprechen nicht dem heutigen Stand der Technik, da die starken Winde die Rotoren aufbrechen können. Daher werden moderne Rotoren bei bestimmten Windgeschwindigkeiten ausgeschaltet.

1.4.4 Technische Potenziale zur Effizienzsteigerung

Effektivität (von lat. effectivus: bewirkend) bezeichnet das Verhältnis von erreichtem Ziel und definiertem Ziel (Zielerreichungsgrad). Das Kriterium für Effektivität ist das Ausmaß, in dem beabsichtigte Wirkungen erreicht werden. Effizienz kann als Verhältnis von Input zu Output, von Leistung zu Kosten und/oder anderen Nachteilen/Opfern definiert werden. Damit entspricht Effizienz in vielen Fällen der Wirtschaftlichkeit [53].

Nach Voss ist der Weg zum Null- oder Plus-Energie-Haus ohne konsequente Effizienzstrategie nicht realisierbar [3]. Dies erfordert vernünftige Ansätze zur Reduzierung des Energiebedarfs sowie zur Nutzung des vorhandenen Angebots. Im Hinblick auf die Effizienz des Gesamtsystems eines Null- oder Plus-Energie-Hauses spielen neben der effizienten Energieerzeugungstechnik weitere Aspekte eine wesentliche Rolle. Themen, die im Zusammenhang mit der Steigerung der Energieeffizienz im Haus oder dessen Kontext stehen, werden im Folgenden kurz diskutiert.

Stromenergiespeicherung

Nicht die Vor-Ort-Stromerzeugung durch Sonne oder Wind ist die große Herausforderung elektrisch autarker Gebäude, sondern die Langzeitspeicherung elektrischer Energie angesichts des stark schwankenden Energieangebots. Energiespeicher nehmen in Versorgungssystemen eine Schlüsselstellung ein, indem sie es ermöglichen bzw. erleichtern, das Energieangebot auf die zeitlich variable Nachfrage abzustimmen, was die Wirtschaftlichkeit des Systems erhöht. Daher dient die Energiespeicherung zur Überbrückung der Zeiten mit geringer Verfügbarkeit von erneuerbaren Energien. So ist die Solaranlage z. B. nachts, an bewölkten Tagen oder bei Sandstürmen fast nicht in Betrieb. Im Fall der Windenergie ist mit Windflaute oder Sturmabschaltungen zu rechnen. Auf der anderen Seite kommt es oft zu Überangeboten , z. B. an Wochenenden, wenn der Energiebedarf erheblich geringer ist als an Arbeitstagen. Es ist deshalb von größter Bedeutung, die erzeugte Energie auszunutzen.

Der Prozess der Energiespeicherung hängt normalerweise mit Umwandlungsprozessen zusammen, d. h., die erzeugte Energie wird von ihrer ursprünglichen Form in eine andere, speicherbare Form umgewandelt und dann wieder zurückgewandelt. Dieses Verfahren ist immer mit großen Verlusten verbunden, was natürlich den Gesamtwirkungsgrad des Systems bestimmt. Durchbrüche auf dem Gebiet der Stromenergiespeicherung sind aber in den letzten Jahrzehnten ausgeblieben, sodass sich nicht viel Spektakuläres getan hat. Diese Wahrnehmung soll aber nicht eine Vielzahl von Entwicklungsschritten verdecken, die – teilweise unter Nutzung nanoskaliger Effekte – in den letzten Jahren durchaus zu Fortschritten bei Energiespeichern geführt haben [54].

Gemäß einer Studie der *Forschungsstelle für Energiewirtschaft e.V.* weist die Grafik in Abbildung 1.37 darauf hin, dass die effizientesten Speicher im Bereich der Systeme mit großem Volumen und ausladenden Maßen – z. B. Pumpspeicherkraftwerke (PSW) -– liegen. Diese brauchen lange Entladungszeiten und verursachen einen dramatischen Eingriff in die Umwelt [55].

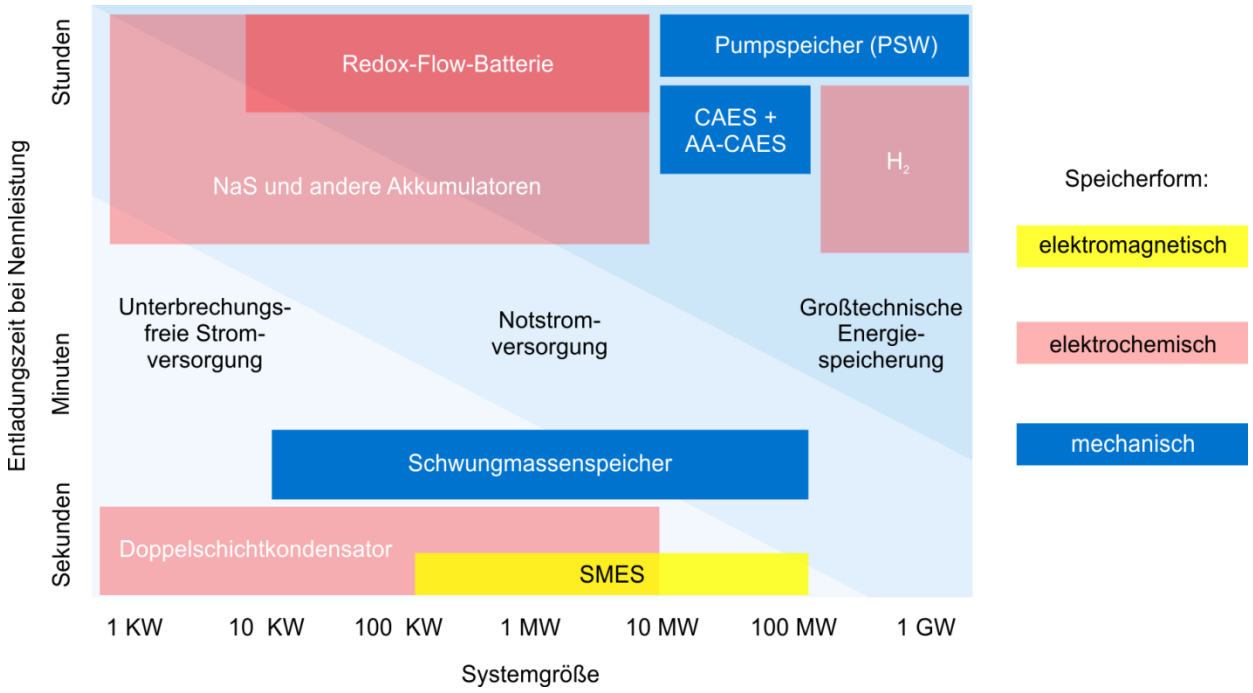


Abbildung 1.37 Überblick über den Stand der einzelnen Speichersysteme hinsichtlich üblicher Systemgröße und Entladungszeit [55] (Eigene Darstellung)

Eines der zentralen Probleme von Batterien ist ihre Selbstentladung. Ähnlich einem Wärmespeicher verlieren sie je nach Technologie mehr oder weniger schnell die gespeicherte Energie. Zwar gibt es mittlerweile im Kontext von Forschungsarbeiten zur Elektromobilität Batterien hoher Kapazität und Leistungsfähigkeit, sie erscheinen jedoch im Hinblick auf Lebensdauer, Kosten, Umweltverträglichkeit und Herstellungsenergie für die saisonale Speicherung von Strom in Gebäuden nach wie vor nicht geeignet [3].

Nach einem Bericht des *Büros für Technikfolgen-Abschätzung beim deutschen Bundestag* beschränken sich die praktischen Erfahrungen mit kleineren Speichertechnologien als (PSW) bislang meist auf geringere Dimensionen, z. B. zur Absicherung der unterbrechungsfreien Stromversorgung (USV) bei sensiblen Verbrauchern wie Krankenhäusern [54]. Batterien, Schwungräder und Doppelschichtkondensatoren haben prinzipiell den gemeinsamen Nachteil, dass sie relativ teuer sind und über geringe Speicherkapazität und Speicherzeit verfügen. Sie sind deshalb nur bedingt und für kleine Anlagengrößen geeignet. Im Rahmen eines Hochhauses sind sie aufgrund des hohen Gewichts und der benötigten Fläche kritisch zu betrachten.

Nach dem Überblick über die technischen Möglichkeiten kann man feststellen, wie technisch aufwendig die Stromenergiespeicherung immer noch ist. Die Variierung der Energiequellen ist deshalb eine schlüssige Methode im Umgang mit den zeitlichen Schwankungen der Angebote. Dazu ist die detaillierte Auseinandersetzung mit den Angeboten des Standorts und deren Häufigkeiten erforderlich. Praktisch ist die sofortige Verwendung der erzeugten Energie. Dafür ist Büronutzung z. B. sehr geeignet, da diese normalerweise während des Sonnenscheins stattfindet. Eine sinnvolle Methode zur Energiespeicherung ist die Nutzung des Verbrauchernetzes als Energiespeicher. Dies nennt sich Netzunterstützung: Erzeugte und nicht gebrauchte Energie wird ins Netz eingespeist. Zu einem anderen Zeitpunkt kann die

Stromenergie bei hoher Last vom Netz abgezogen werden. Wiederaufladbare Batterien speichern zunächst einmal nur Gleichstrom, nicht den in Gebäuden heute üblichen Wechselstrom. Ihre Einbindung in eine Hausstromversorgung erfordert die Ein- und Auskopplung des Gleichstroms über Gleich- bzw. Wechselrichter [3]. Ein Energiemanagementsystem wie *Smart Grid* spielt eine wichtige Rolle beim effizienten Umgang mit der verfügbaren Energie. Gibt es am Standort eine Möglichkeit zur Einspeisevergütung, deren Betrag höher ist als der normale Preis, wie beispielsweise in Deutschland, wäre die ständige Einspeisung ins Netz wirtschaftlicher als die direkte Nutzung. Das heißt, man verkauft den lokal generierten Strom zu einem höheren Preis und kauft den öffentlichen Strom zu einem billigen Preis. Der Preisunterschied stellt den Umsatz dar. Das Plus-Energie-Hochhaus wäre folglich ein wirtschaftliches Modell für die deutschen Städte, in denen Nachverdichtung infrage kommt.

Wasserstoffwirtschaft

Die Wasserstoffwirtschaft ist das Konzept einer Energiewirtschaft, in der auf allen Ebenen mit Wasserstoff gehandelt und gewirtschaftet wird. Grundelemente der Wasserstoffwirtschaft sind [56]:

- die Herstellung von Wasserstoff
- die Speicherung und Verteilung von Wasserstoff
- die energetische Nutzung des Wasserstoffs

Wichtigstes Element der Nutzung von Wasserstoff ist die Brennstoffzelle. Sie wandelt die im Wasserstoff enthaltene Energie in Wärme und Elektrizität um. Eine Brennstoffzelle ist eine galvanische Zelle, die die chemische Reaktionsenergie eines kontinuierlich zugeführten Brennstoffes und eines Oxidationsmittels in elektrische Energie wandelt. Sie ist kein Energiespeicher, sondern ein Wandler.

Die Wasserstoffwirtschaft ist zurzeit nirgends im großen Stil verwirklicht und die Umsetzbarkeit ist umstritten [57]. Die Brennstoffzellentechnologie zur Erzeugung von elektrischer und Wärmenergie ist mit einer Reihe von Versuchsanlagen bis ca. 200 kW elektrischer Leistung im Einsatz. Darüber hinaus werden Brennstoffzellen für die Versorgung von Wohnobjekten mit einer elektrischen Leistung bis ca. 5 kW angeboten. Im Bereich der Gebäudetechnik bieten sich Hochtemperatur-Brennstoffzellen an, die Erdgas – später Wasserstoff – mit einem Wirkungsgrad von mehr als 50 % in elektrischen Strom umwandeln und dabei Abgastemperaturen liefern, die im Bereich von 80–180 °C und höher liegen. Brennstoffzellen verstehen sich als Alternative zu Blockheizkraftwerken, wobei bei diesen keine Stickoxide im Betrieb freigesetzt werden [11].

Eine dezentrale Wasserstoffwirtschaft wurde 1992 als Lösungsversuch im Siedlungsprojekt *Energieautarkes Solarhaus* in Freiburg getestet. Hierbei wurde während der Sommermonate Wasser über einen Elektrolyseur in Wasser- und Sauerstoff zerlegt. Beide Gase wurden in Drucktanks nahezu verlustfrei gelagert und in einer Brennstoffzelle für die winterliche Stromerzeugung unter Erzeugung von Wasser wieder zusammengeführt. Die dabei frei werdende Abwärme ist als Zusatzwärmequelle für die Wassererwärmung eingebunden. Eine Brennstoffzelle ist ähnlich einer wiederaufladbaren Batterie ein elektrochemischer

Energiewandler, nur wird sie bei der Stromerzeugung kontinuierlich mit dem „Brennstoff“ Wasserstoff versorgt. Der Wasserstoff dient neben der Verstromung auch zum Kochen (Gasherd) und Heizen (Luftheizregister in der Lüftungsanlage) [3].

Interessant ist der Einsatz von Brennstoffzellen allemal dort, wo hohe und langfristige Potenziale von Solarenergie bestehen. Durch die Nutzung von photovoltaischem Strom kann die Herstellung von Wasserstoff durch Elektrolyseure kostengünstig betrieben werden [11]. Junge Projekte beruhen stark auf der Wasserstoffwirtschaft. Das zeigt sich z. B. bei der 2010 vorgestellten experimentellen Wohnbox *SELF* der schweizerischen Forschungsinstitute EMPA [58]. Die Raumzelle ist als Wohn- und Arbeitsort für zwei Personen konzipiert. Sie hat die Größe eines Schifffrachtcontainers und versorgt sich selbst mit Energie – und auch mit Wasser. Da *SELF* einfach transportiert und praktisch überall aufgestellt werden kann, eignet sie sich für den temporären Einsatz an den verschiedensten Standorten, etwa als mobile Forschungsstation, als (Eventlocation), als bewohnbarer Werbeträger und vieles mehr [59].

Abbildung 1.38 Die Wohnzelle SELF [59].

Neben dem hohen technischen Aufwand kann die Wasserstoffwirtschaft bzw. Solarwasserstoffwirtschaft jedoch auch gefährlich sein. Wasserstoff ist wie z. B. Benzin oder Erdgas entzündlich. Eine häusliche Stromerzeugung mittels Brennstoffzelle muss aus Brandsicherheitsgründen kritisch betrachtet werden. Wie bereits oben erwähnt, wurde der Einsatz von Brennstoffzellen im Hochhaus *Pearl River Tower* aus Sicherheitsgründen von den chinesischen Baubehörden abgelehnt [60].

Energierückgewinnung

Bei der Erhöhung der Energieeffizienz eines Systems zählt die Energierückgewinnung zu den wesentlichen Methoden. Dieses Konzept stammt aus dem Bereich Antriebstechnik und Kraftfahrzeuge und entwickelt sich schnell weiter. Für das Beschleunigen wird bekanntlich Energie benötigt, die beim Bremsen häufig nutzlos als Wärme verpufft. Intelligente Antriebssysteme gewinnen die eingespeiste Power beim Bremsen zurück. Forscher des Fraunhofer-Instituts beschäftigen sich mit Konzepten zur Stromerzeugung aus Abwärme. Laut dem Abteilungsleiter Thermoelektrik und integrierte Sensorsysteme TES am Fraunhofer-Institut IPM gilt der Markt der Energierückgewinnung als der Markt mit den höchsten Zuwachsraten [61].

Energierückgewinnung wird heute in verschiedenen Kontexten angewandt. In Gebäuden wird sie meistens als Wärmerückgewinnung bezeichnet und lässt sich bei Gasen, Flüssigkeiten oder festen Stoffen für Wärme- oder Kälteprozesse einsetzen. Die Rückgewinnung wird häufig beim Luftwechsel und Abwasser eingesetzt und bietet viele Vorteile sowohl für die Energieeinsparung als auch die Verringerung der Investitions- und Betriebskosten. Für den Luftwechsel in Gebäuden stehen heute Anlagen mit 90 % Wirkungsgrad auf dem Markt zur Verfügung. In der Industrie ist das Konzept vorteilhaft für die Bereitstellung der hohen Temperatur der benötigten Prozesswärme.

In diesem Zusammenhang ist auch die Stromrückgewinnung bei Aufzügen in Hochhäusern interessant. Eine beladene Aufzugskabine besitzt bei der Abwärtsfahrt potenzielle Energie. Diese Energie gewinnt der regenerative Aufzugsantrieb zurück. Dabei wird kinetische Energie aus den Abwärtsbewegungen und Bremsvorgängen gewonnen. Diese kann entweder ins Versorgungsnetz eingespeist oder gespeichert werden. Für Bürogebäude gibt es zurzeit Aufzüge auf dem Markt, die 90 % der Bremsenergie ins Netz einspeisen [62].

Insellösungen

Im Kontext der dezentralisierten Energieversorgung gibt es bereits die sogenannten „Inselnetze“, die nicht an das öffentliche Stromnetz angeschlossen sind. Der heutige Stand der Technik ist allerdings nicht so weit, dass diese Systeme Ausfallsicherheit bieten könnten. Darüber hinaus können diese Lösungen aufgrund von Schwierigkeiten bei der Energiespeicherung noch nicht in absehbarer Zeit für große Verbraucher angewandt werden, v. a. während Zeiten ohne verfügbare erneuerbare Ressourcen (z. B. in der Nacht oder wenn die Sonne nicht scheint). Ein zeitgenössisches Beispiel einer Insellösung ist die *Neue Monte-Rosa-Hütte*, eine energieautarke Berghütte, die oberhalb von Zermatt (CH) konzipiert und 2009 gebaut wurde. Ein Autarkiegrad von 90 % war der Zielwert, den sich die ETH Zürich bei der Planung setzte. Diese Vorgabe beschränkt sich auf die größtmögliche Unabhängigkeit von Netzen wie Elektrizität, Warmwasser oder Abwasser. Um den Heizwärmebedarf sowie die Dimensionierung externer Wärmespeicher zu reduzieren, hat die Hütte übliche Öffnungszeiten zwischen Mitte März und Mitte September festgesetzt [63].

Man geht davon aus, dass ein nicht an eine Energieinfrastruktur angebundenes Gebäude meist eine Überdimensionierung der hauseigenen Energieversorgung zur Folge hat. Diese umfasst oft solare Energiesysteme und spezielle bzw. aufwendige Energiespeicher, die die Versorgung zu

jeder Zeit und ohne Rückgriff auf weitere externe Ressourcen sicherstellen. Im europäischen Klima verursacht dabei speziell der saisonale Ausgleich zwischen Energieangebot und -nachfrage den hohen technischen Aufwand in der Energiespeicherung. In Klimaten ohne ausgeprägte Jahreszeiten sind wesentlich einfachere Konzepte möglich.

Abbildung 1.39 Neue Monte-Rosa-Hütte SAC, Luftaufnahme Winter [64]

Daher basieren praxisnahe Konzepte für klimaneutrale Gebäude mindestens auf einer Kopplung an das Stromnetz. Die Einspeisung ins Netz während Zeiten geringer Auslastung ist eine Methode zum Ausgleich der zur Deckung der Spitzenlasten vom Netz genommenen Energie, ohne extrem dimensionierte technische Anlagen zu benötigen. Dadurch wird die Technologielücke im Bereich Energiespeicherung überbrückt [3].

Smart Grid

Wie bereits diskutiert, ist Energiespeicherung eine große Herausforderung. Vor allem bei großen Energiemengen sind die Speichermöglichkeiten verhältnismäßig teuer und aufwendig. Das System *Smart Grid* ist ein praktischer und effizienter Ansatz im Umgang mit den technologischen Grenzen der Energiespeicherung, der auf einem intelligenten, sich selbst überwachenden, automatisierten Stromversorgungsnetz basiert. *Smart Grid* (dt.: intelligentes Stromnetz) ist ein neues System, das das Konzept von Energiespeicherung erweitert bzw. optimiert. Es umfasst die kommunikative Vernetzung und Steuerung von Stromerzeugern, Speichern, elektrischen Verbrauchern und Netzbetriebsmitteln in Energieübertragungs- und -verteilungsnetzen der Elektrizitätsversorgung.

Dies ermöglicht eine Optimierung und Überwachung der miteinander verbundenen Bestandteile. Ziel ist die Sicherstellung der Energieversorgung auf Basis eines effizienten und zuverlässigen Systembetriebs [65]. Durch die Integration von Batteriespeichern in die Elektromobilität erhöht sich die Effizienz des Systems, da diese die Speicherkapazität des Systems erweitern. Sie können Energie ins Netz zurückspeisen und helfen so, die Schwankungen bei erneuerbaren Energiequellen auszugleichen [66].

Abbildung 1.40 Darstellung eines Smart-Grid-Netzwerks [66]

In der Abbildung 1.40 wird ein schematisches Bild eines *Smart-Grid*-Netzwerks mit den Hauptkomponenten gezeigt. Das Konzept unterstützt die Dezentralisierung der Energieversorgung sowie das Netz- bzw. Lastenmanagement, was großes Einsparpotenzial bietet. In der Schweiz wird das System bereits mit Erfolg angewandt. So waren dort beispielsweise im Jahr 2009 die Stromnetze im Jahresdurchschnitt nur zwischen 30 bis 40 % ausgelastet [65].

Nach einem Bericht über den Stand der Entwicklung von *Smart Grid* existieren drei Hauptwachstumstreiber [67]:

- **Veraltete, überlastete Netzinfrastruktur** (die mit *Smart Grid* gleichmäßiger ausgelastet wird) – z. B. Nordamerika
- **Hohe Wachstumsraten beim Strombedarf** (wo ein gleichmäßigerer Verbrauch Netz- und Kraftwerksinvestitionen spart) – z. B. Asien
- **Hoher Anteil an erneuerbarer Energie** (die nicht kontinuierlich erzeugt wird) – z. B. Europa

Strom-, Wärme- und Kältenetze können von zentralen Heizkraftwerken versorgt werden, die zu 100 % mit erneuerbarer Energie versorgt werden. Dies nennt sich ein grünes Netz. Der Trend der grünen Netze gewinnt in den europäischen Städten immer mehr an Bedeutung. Gleichzeitig muss bedacht werden, dass die zur Befeuerung der grünen Netze benötigten Materialien wie Holz, Biomasse, Biogas etc. nicht in dem Umfang nachhaltig zur Verfügung stehen, der nötig wäre, um die heute üblichen hohen Gebäudeverbräuche langfristig zu decken. Einen beispielhaften Ansatz für Stromnetze, die vollständig auf erneuerbarer Energie aufgebaut sind, liefert die Situation in Norwegen: Standard ist dort das „Nur-Strom-Gebäude“. Nahezu die gesamte Stromerzeugung basiert dabei auf Wasserkraft. Das heißt, sie ist frei von fossiler oder nuklearer Energie und verursacht keine Treibhausgasemissionen. Man kann davon ausgehen, dass alle Gebäude dort als klimaneutrale Gebäude beschrieben werden können [3]. Durch die

effiziente Steuerung mehrerer energiegenerierender Gebäude im *Smart Grid* kann der grüne Anteil am Netz erhöht werden. Das Plus-Energie-Hochhaus ist für den Anschluss an den Kontext des *Smart Grids* geeignet, da es sowohl als Energiequelle als auch als Energiesenke im System betrachtet werden kann. So kann die abends nach der Arbeitszeit aus hochhausintegrierten Windrotoren erzeugte Energie noch für vier Stunden zur Beleuchtung von Wohneinheiten verwendet werden.

.

1.5 Problemstellung

Trotz der Potenziale eines bestimmten Standorts zur Nutzung erneuerbarer Energien reicht das Einbauen von Energieerzeugungstechnik in eine hochgedämmte Hülle eines Hochhauses alleine nicht aus, um energieautark zu werden.

Um ein Plus-Energie-Hochhaus mit möglichst geringem technischen Aufwand zu erreichen, muss die Effizienz des vorhandenen Systems erhöht werden und die Steigerung des Energiezuflusses wirtschaftlich erfolgen. Richtungsweisende Entscheidungen über die Performance eines Gebäudes werden dabei in der Konzeptphase vom Architekten getroffen. Die heute verfügbaren Planungswerkzeuge zur Simulation der Gebäudeperformance in Bezug auf Energieeffizienz beschränken sich aber auf die Ausführungsphase. Trotz ihrer Vielzahl und Vielfalt funktionieren sie mehr oder weniger auf dieselbe Art und Weise und dienen der Überprüfung der Übereinstimmung des Entwurfs mit den Energienormen. Vernünftige integrale Entwurfsmethodik kann die Effizienz des Einsatzes entsprechender Programme erhöhen [27].

1.6 Hypothese

Es wird angenommen, dass das Erreichen der Plus-Energiebilanz in einem Hochhaus in der subtropischen Klimaregion mittels eines Optimierungswerkzeugs so möglich ist, dass eine positive Energiebilanz unter Berücksichtigung von Gestaltungs- und Behaglichkeitsaspekten erzielt wird.

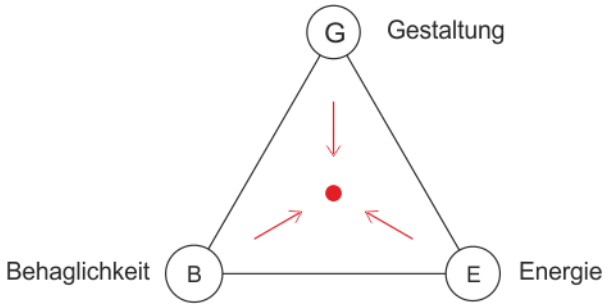


Abbildung 1.41 Grundsätzliches Optimierungsmodell (eigene Darstellung)

Die Optimierung umfasst dabei die Integration von den drei Aspekten, die zur Maximierung der Leistungsfähigkeit (Performance) des Gebäudes beitragen. Um diese Hypothese zu belegen, lassen sich zwei Thesen aufstellen:

These-1

Maximierung der Effizienz des bestehenden Systems durch Optimierung der fassadenintegrierten Solarenergiegewinnung bei gleichzeitiger Energieeinsparung.

These-2

Integrale Steigerung des Energiezuflusses durch optimale Positionierung und Dimensionierung der gebäudeintegrierten Solar- und Windenergiegewinnung.

Die neue Betrachtung des Hochhauses als Kraftwerk rückt bestimmte Aspekte in den Fokus, die miteinander interagieren können. An einem Standort mit einem relativ hohen Angebot an erneuerbaren Energien lässt sich das Plus-Energie-Hochhaus mit dem heutigen Stand der Technik realisieren, indem mithilfe der digitalen Planung eine maximale Integration bzw. Optimierung der beeinflussenden Parameter, d. h. der architektonischen, Energieeinsparungs- und Energieerzeugungsparameter des Hochhauses, angestrebt wird. Die betrachteten Parameter bilden die grundsätzlichen Eigenschaften eines Hochhauses mit hoher Performance ab.

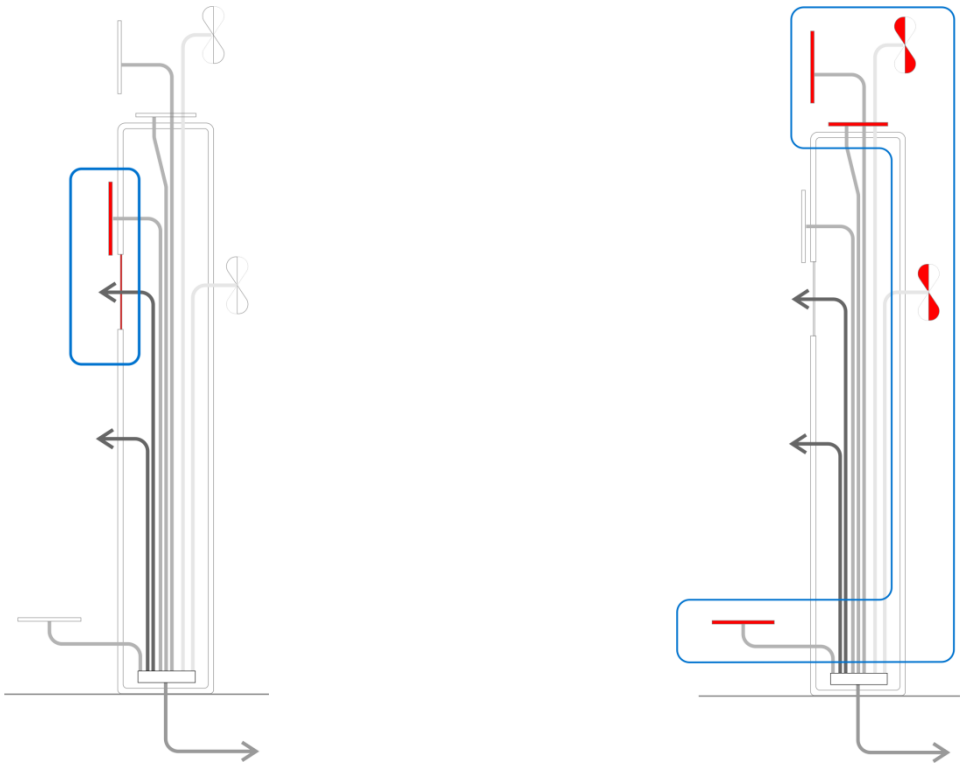


Abbildung 1.42 Links: Anwendungsgebiet der These-1; rechts: Anwendungsgebiet der These-2

Die Berücksichtigung der genannten Parameter in der konzeptionellen Phase bedeutet, dass viele Fragen hinsichtlich der Parameter in den Entwurfs- und Ausführungsplanungsphasen schon vorher beantwortet werden können. Es handelt sich im Endeffekt um eine Verschiebung dieser Auseinandersetzung in die Konzeptphase, damit in den weiteren Phasen an fast ausgereiften Konzepten gearbeitet werden kann.

Die oben aufgestellte Hypothese baut auf dem Arbeitsfluss von Kalay und Petersen auf [18], [24]. Dazu wird ein Optimierungsmodell integriert, das den Nutzer quantitativ und qualitativ über optimale Kriterien informiert, die seinen konzeptionellen Entwurf beeinflussen können. Es ist sinnvoll, einen Optimierungsalgorithmus zu entwickeln, der mithilfe von Sensitivitätsanalysen das Variieren von Parametern, die Prognose von deren Performance sowie die Prüfung der Übereinstimmung mit den ursprünglichen Performanceanforderungen in einem Prozess kombiniert.

Es wird nach der optimalen Lösung für gesetzte Optimierungsziele gesucht, wobei in diesem Fall mehrere optimale Varianten erzeugt werden, die unterschiedliche Anforderungen erfüllen. Diese könnten eine Entscheidungsmatrix füttern, mit deren Hilfe der Nutzer die am besten geeignete Lösung bestimmt. Der Entwurfsablauf auf Basis der im Hinblick auf die gestellte Hypothese zu entwickelnden Tools wird in Abbildung 1.43 dargestellt.

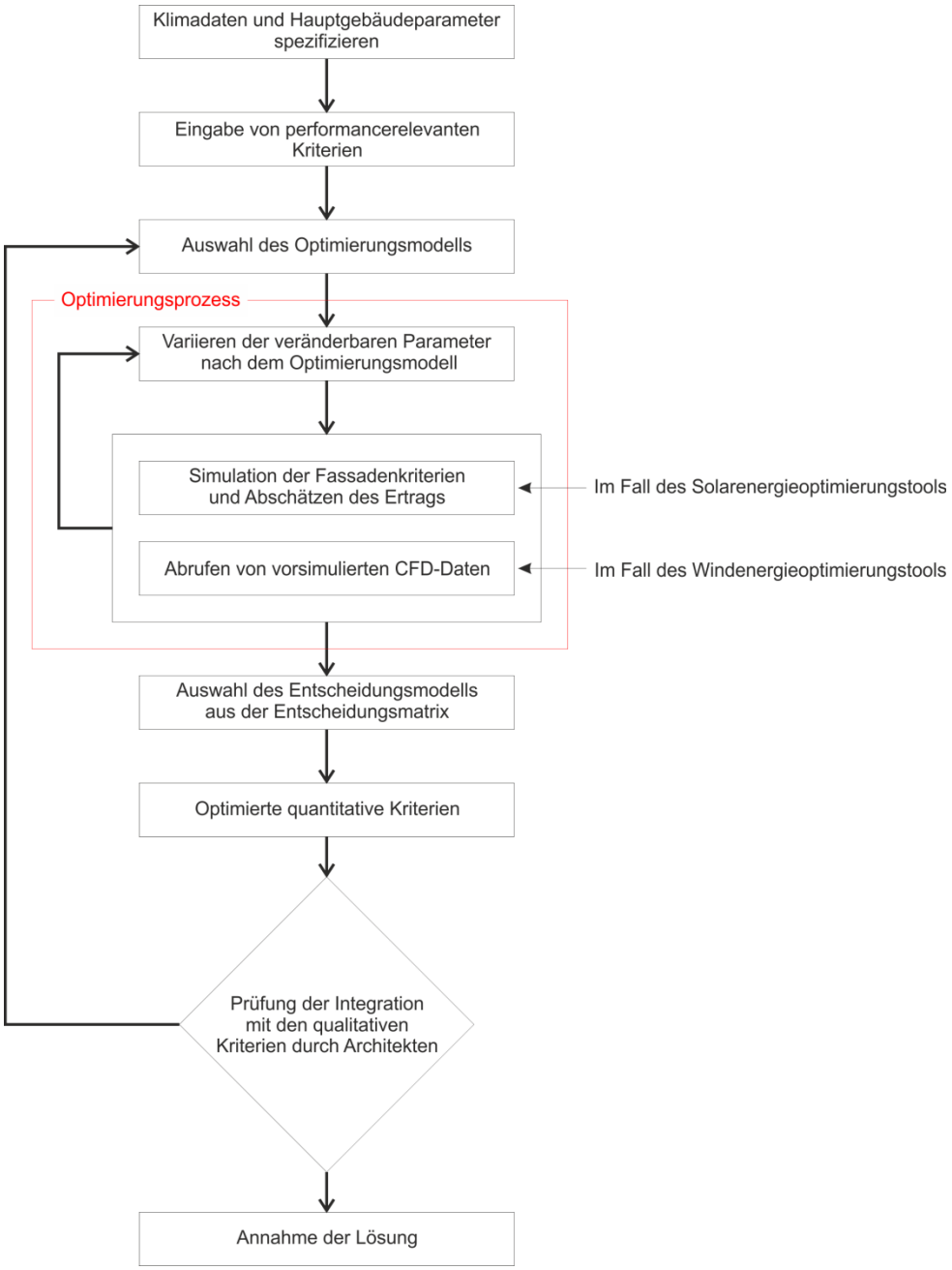


Abbildung 1.43 Entwurfsablauf gemäß der Hypothese

Grundsätzlich soll das Programm auf der Basis von *Excel* verwendet werden, das fast jedem zugänglich ist. Somit vereinfachen sich die Bearbeitung von Daten und Parametern im Programm sowie die Integration von anderen Excel-basierten Rechentools. Nach der

Untersuchung des Forschungsstands war festgestellt worden, dass es keine Planungswerkzeuge für Architekten gibt, die ihre Angaben optimieren.

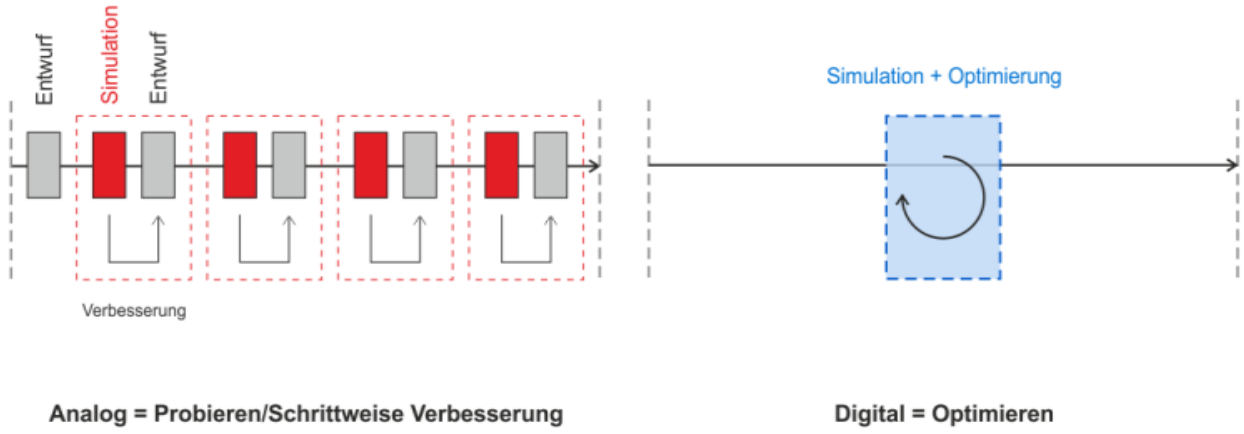


Abbildung 1.44 Analoge und digitale Planungsabläufe (eigene Darstellung)

In einer Planungsvorgehensweise, in die ein Optimierungsalgorithmus integriert ist, findet die Prüfung der Ergebnisse und die Auswahl der besten Lösungen im integrierten Simulations- und Optimierungsprozess statt, wobei die rechnerischen Potenziale des Computers mittels Optimierungsalgorithmen genutzt werden. In diesem Ansatz werden die Simulationen laufend durchgeführt, wodurch die Verbindung mit dem architektonischen Konzept besonders stark wird. Diese Möglichkeit zur Integration bietet zahlreiche Potenziale zur Optimierung. Der Ansatz kann als digital bezeichnet werden und wird in Abbildung 1.44 dargestellt.

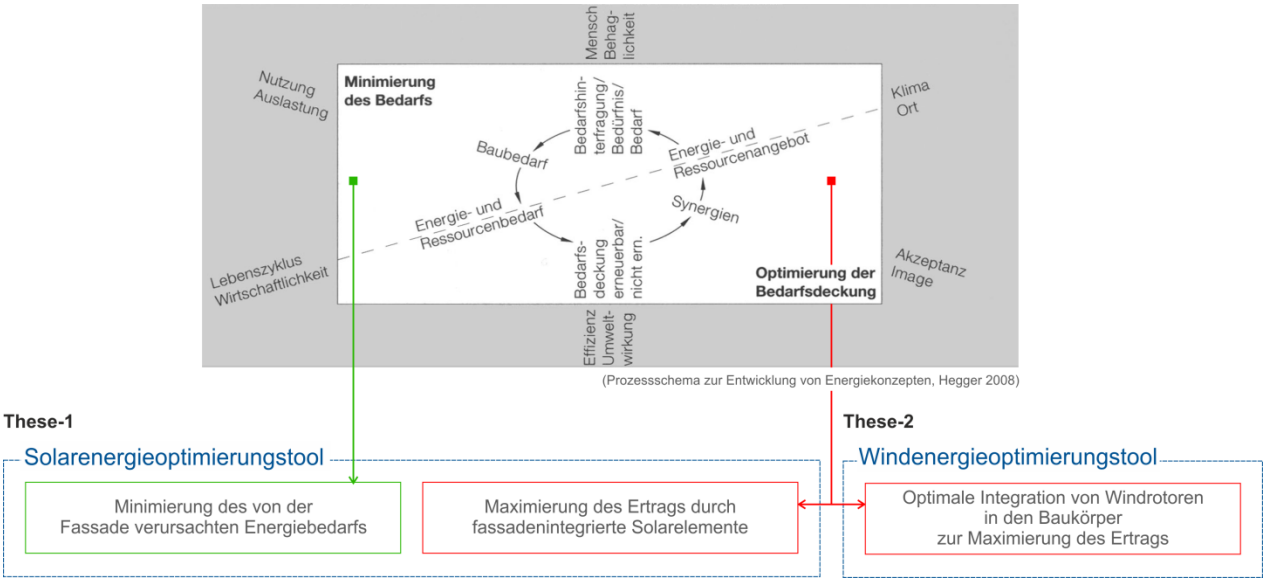


Abbildung 1.45 Darstellung der zwei Thesen der Arbeit (eigene Darstellung)

Die zwei Thesen der Arbeit basieren auf der von Hegger empfohlenen Denkstruktur [6]. Der Prozess der Minimierung des Bedarfs ist gekoppelt mit der Energieerzeugung durch fassadenintegrierte Photovoltaikzellen im Solarenergieoptimierungstool. Das

Windenergieoptimierungstool beschäftigt sich dagegen nur mit der Abdeckung des Bedarfs und der Erhöhung des Ertrags.

Daraus ergibt sich folgende Forschungsfrage: Wie muss ein Optimierungswerkzeug aufgebaut sein, das grundsätzlich folgende Funktionen erfüllen soll:

- Berücksichtigung der Klimaeigenschaften des Standorts
- Integration der relevanten gestalterischen Randbedingungen
- Optimierung der wesentlichen Einflussgrößen der Fassade zur Energieeinsparung bzw. -erzeugung über Solarenergie
- Optimierung der gebäudeintegrierten Windenergieerzeugung
- Erreichung der Plus-Energiebilanz durch den Architekten

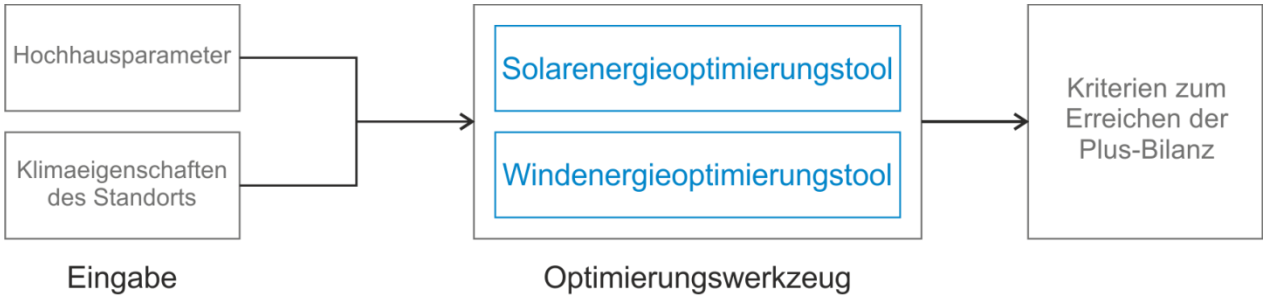


Abbildung 1.46 Darstellung der Hauptbestandteile des Werkzeugs nach der Forschungsfrage (eigene Darstellung)

Diese Planungshilfe soll dem Nutzer die beeinflussenden Parameter und Einflussgrößen aufzeigen, ersetzt dabei aber nicht die Fachplaner, sondern ermöglicht eine erste Annäherung an denkbare Lösungen zur Energieeinsparung und Energieerzeugung im Hochhaus. Es soll für den Architekten im Endeffekt folgende Funktionen nach Anregung von De Wilde [28] erfüllen:

- Hindeuten auf Lösungen mithilfe von Diagrammen und Grafiken
- Orientierung mithilfe von Sensibilitätsanalysen
- Hilfe bei der Entscheidung zwischen verschiedenen Lösungen
- Gebäude- und/oder Systemoptimierung

1.7 Zielsetzung

Das Ziel dieser Arbeit besteht in der Entwicklung und Validierung einer Optimierungsmethode, die im Rahmen eines Planungswerkzeugs zur Problemlösung im Kontext des Plus-Energie-Hochhauses beitragen soll.

Das angestrebte Werkzeug unterteilt sich in zwei Tools, ein Solarenergieoptimierungstool und ein Windenergieoptimierungstool. Die beiden Tools interagieren miteinander, wobei jedes für sich bestimmte Funktionen erfüllt.

Das Werkzeug im Allgemeinen soll die Anwendung der zwei genannten Zielprozesse auf einen Standort und eine Bauform ermöglichen, um einen Kriterienbericht zu erzeugen, der zum Erreichen der Plus-Energiebilanz im Hochhaus führt. Einen Überblick über die grundsätzlichen Planungspfade unter Einsatz der entwickelten Werkzeuge liefert Abbildung 1.47.

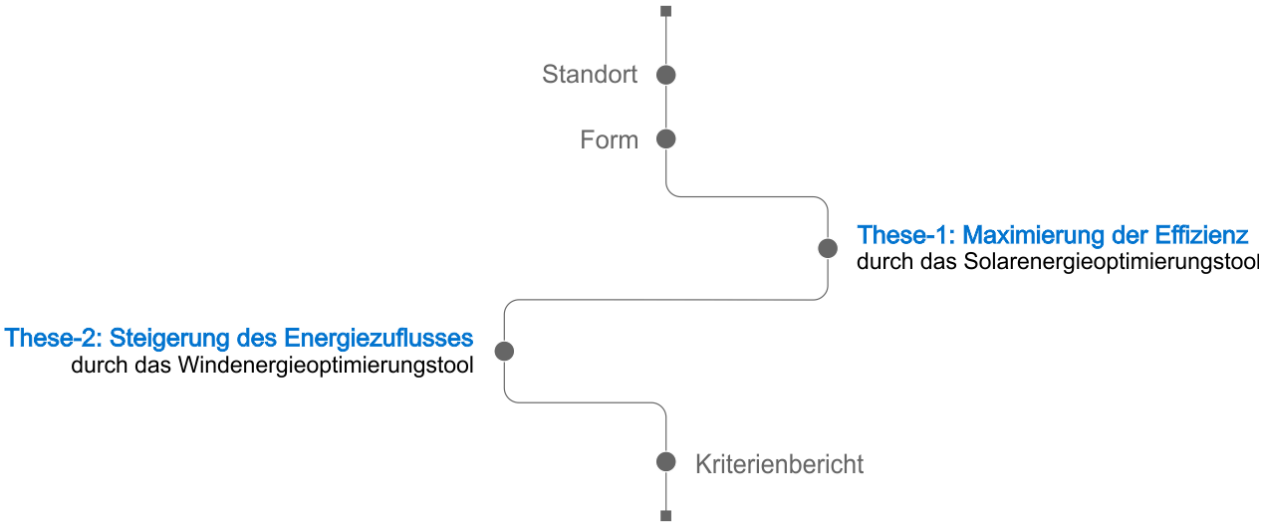


Abbildung 1.47 Typischer Planungspfad unter Einsatz des Werkzeugs (eigene Darstellung)

Es stellt sich automatisch die Frage, ob man mit dem Solarenergieoptimierungstool anfangen muss oder ob man ebenso mit dem anderen anfangen kann. Der Vorteil beim dargestellten Vorgehen ist, dass die Minimierung des Energiebedarfs zuerst erfolgt und dann die Deckung und die weitere Erzeugung fokussiert werden. Eine umgekehrte Vorgehensweise würde ebenfalls funktionieren, widerspricht aber einer ganzheitlichen Denkweise. Im Rahmen dieser wissenschaftlichen Arbeit wird deshalb nach dem aufgezeigten Pfad gearbeitet.

2. Ausgangspunkte

2.1 Globale Notwendigkeit einer Energiewende

2.1.1 Krisenszenarien

Seit Beginn der industriellen Revolution hat sich die Lebensweise auf der Erde schnell und radikal verändert. Der steigende Wohlstand in den entwickelten sowie sich entwickelnden Ländern basierte dabei auf dem unbegrenzten Verbrauch von nicht erneuerbaren fossilen Energieträgern. Die unkontrollierte Nutzung dieser Ressourcen führte zu dramatischen Veränderungen vieler Bilanzen der Erde. Diese Entwicklungen verschärfen sich weiter und werden die Gesundheit und Lebensqualität des Menschen beeinträchtigen, sollten nicht entschiedene Gegenmaßnahmen ergriffen werden.

Die nachfolgenden Ausführungen, die mit der Untersuchung des Bauens von Plus-Energie-Hochhäusern im Zusammenhang stehen, werden auf folgende Krisenszenarien eingehen:

- Bevölkerungsexplosion
- Landverbrauch und Ressourcenverschwendung
- Energieknappheit
- CO_2-Emission und Erderwärmung

Bevölkerungsexplosion

Im 1972 vom *Club of Rome* veröffentlichen Bericht „Grenzen des Wachstums“ wurden Prognosen für die zukünftige Weiterentwicklung der Welt erstellt. Dennis Meadows und Jørgen Randers haben mit anderen Kollegen auf der Basis von Computerprogrammen gezeigt, wie ein Wachstumsmodell beim derzeitigen Zustand der Welt aussehen kann. Die entworfenen Szenarien zeigen die Wechselwirkungen von Bevölkerungsentwicklung, Industrieproduktion, Ressourcenverbrauch und Umweltverschmutzung. Der Bericht war und ist ein Weckruf für die Menschheit. Zwar sind die pessimistischen Prognosen noch nicht eingetreten, aber trotzdem werden sich die Zusammenbruchszenarien irgendwann bewahrheiten.

Die Weltbevölkerung umfasste zum Jahreswechsel 2011/12 rund 7,01 Milliarden Menschen [68]. Im Jahr 1927 lebten nur rund 2 Milliarden Menschen auf der Erde [69]. Das heißt, in weniger als 100 Jahren hat sich die Weltbevölkerung um 5 Milliarden Menschen erhöht. Durch diesen explosionsartigen Anstieg verbraucht der Mensch mehr Ressourcen und verursacht mehr Umweltverschmutzung. Abbildung 2.1 fasst eine Simulation der Konsequenzen der Bevölkerungsexplosion zusammen. Es wird deutlich, dass zwischen 2000 und 2050 mehr oder weniger die Höhepunkte der dargestellten Parameter erreicht werden. Danach fangen die Kurven an, abzunehmen. Im Grunde genommen beinhaltet dieser Abnahmeprozess katastrophale Folgen bzw. einen Trend zu krisenhaften Zuständen ab dem Jahr 2020.

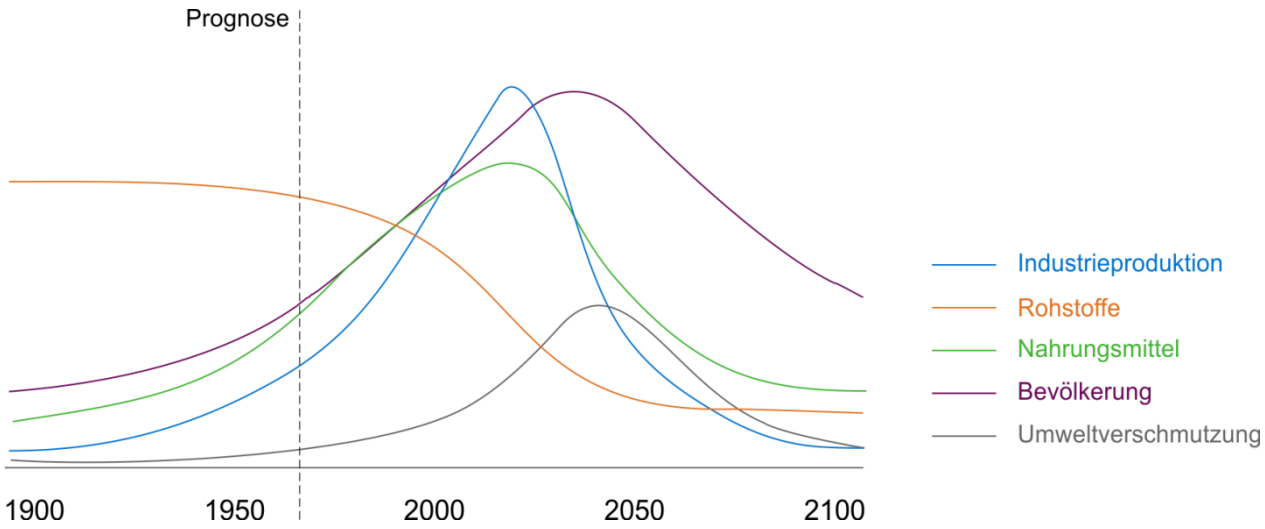


Abbildung 2.1 Systemanalytische Studie des Club of Rome zur Zukunft der Weltwirtschaft (eigene Darstellung) [6]

Die zentralen Schlussfolgerungen des Berichts „Grenzen des Wachstums“ lauteten folgendermaßen:

„*Wenn die gegenwärtige Zunahme der Weltbevölkerung, der Industrialisierung, der Umweltverschmutzung, der Nahrungsmittelproduktion und der Ausbeutung von natürlichen Rohstoffen unverändert anhält, werden die absoluten Wachstumsgrenzen auf der Erde im Laufe der nächsten hundert Jahre erreicht.“*

Die Herausforderungen des 21. Jahrhunderts durch Bevölkerungsexplosion in den verschiedenen Regionen der Welt, wachsende Instabilität infolge asymmetrisch verteilten Wohlstands, Rohstoffverknappung, Verteilungskämpfe sowie die Zerstörung der natürlichen Lebensgrundlagen dämmern uns mehr und mehr durch die klimatischen Konsequenzen, vor denen bereits in den 70er- und 80er-Jahren des letzten Jahrhunderts gewarnt wurde [11]. Mit den Modellen von Meadows und Randers ist klar geworden, dass die Zunahme der Bevölkerungszahl mit ihren Folgen wie Umweltverschmutzung und Rohstoffverbrauch eine Grenze und offensichtlich ein Ende hat. Das Ende des Wachstums kann in vielerlei Formen auftreten. Es kann beispielsweise zu einem Zusammenbruch kommen, zu einem unkontrollierten Rückgang der Bevölkerung und des menschlichen Lebensstandards [70].

Die Aspekte einer globalen Sicherung der Energieversorgung und die Konsequenzen einer veränderten Grundanschauung im Hinblick auf energiewirtschaftliche Fragen stehen in einem direkten Bezug zum genannten Zuwachs der globalen Population, v. a. hinsichtlich einer prognostizierten Weltbevölkerung von 10 Milliarden Menschen [11]. Ein wesentlicher Grund für das Wachstum der Städte ist das heutige globale Nomadentum. Menschen ziehen aus verschiedenen Gründen in die Städte. Neben politischer Sicherheit ist die Suche nach Arbeit am wichtigsten, was die globale Wirtschaft in unerwarteter Weise von internationalen Ein- und Auswanderern abhängig macht.

Das Erreichen der Wachstumsgrenzen ist eine Katastrophe, die das Leben auf der Erde bedroht. Die Zukunft ist vom menschlichen Verhalten abhängig und jeder sollte sich im Rahmen seiner Möglichkeiten bemühen, einen positiven Beitrag zur Rettung der Erde zu leisten.

Landverbrauch und Ressourcenverschwendung

Die Erdoberfläche ist eine wertvolle Ressource, die mit der Zeit durch menschliches Verhalten verschwendet wird. Landverbrauch umfasst auch die natürliche Vegetation, die durch horizontales Bauen bedroht ist. Die zur Ermöglichung des Lebens eines Menschen unter den heutigen Bedingungen und Standards benötigte Fläche wird als ökologischer Fußabdruck bezeichnet. Dieser schließt die Flächen ein, die zur Produktion seiner Kleidung und Nahrung sowie zur Bereitstellung von Energie, aber z. B. auch zum Abbau des von ihm erzeugten Mülls oder zum Binden des durch seine Aktivitäten freigesetzten Kohlendioxids benötigt werden.

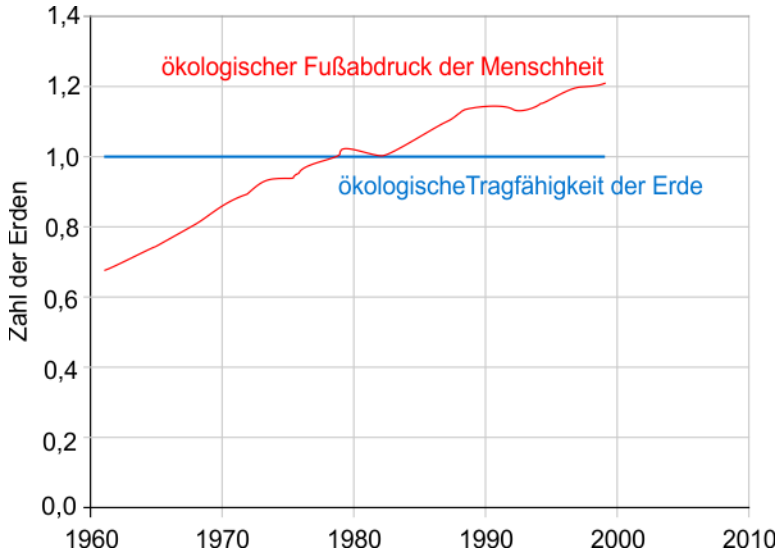


Abbildung 2.2 Der ökologische Fußabdruck der Menschheit im Vergleich zur ökologischen Tragfähigkeit der Erde [71]

Die Grafik in Abbildung 2.2 zeigt nach Meadows für jedes Jahr seit 1960, wie viele Erden erforderlich wären, um die von der Menschheit benötigten Ressourcen zu liefern und die von ihr abgegebenen Umweltbelastungen aufzunehmen. Dieser Bedarf wird dem vorhandenen Angebot gegenübergestellt: unserem Planeten Erde. Seit den 1980er-Jahren übersteigt der Bedarf der Menschheit das Angebot der Natur, bis zu einer Grenzüberschreitung von etwa 20 % im Jahr 1999 [71]. Die Betrachtung des ökologischen Fußabdrucks findet häufig im Zusammenhang mit der nachhaltigen Entwicklung auf gesellschaftlicher und individueller Ebene sowie Nachhaltigkeitsdefiziten statt. Nach aktuellen Angaben der *European Environment Agency* wurde die weltweit verfügbare Fläche zur Erfüllung der menschlichen Bedürfnisse bereits um 23 % überschritten [72]. Im *Living Planet Report* schlägt der WWF Alarm: Wenn die Menschheit den Planeten weiterhin in dem Maß ausbeutet wie bisher, wird sie schon bis zum Jahr 2035 die Ressourcen von zwei Erden brauchen.

Bedingt durch den negativen Einfluss des Menschen auf die begrenzte Tragfähigkeit der Erde, die als ökologischer Fußabdruck bezeichnet wird, sowie seine Multiplikatorfunktion im Hinblick auf alle einer nachhaltigen Entwicklung entgegenstehenden Aktivitäten ist das

Bevölkerungswachstum eines der zentralen Probleme und mitverantwortlich für die globale Erwärmung [73].

Abbildung 2.3 zeigt den ökologischen Fußabdruck pro Kopf in verschiedenen Ländern. Schwellenländer in der Golfregion haben aufgrund des hohen Lebensstandards einen relativ starken Fußabdruck. In den industriellen Ländern entsteht der große ökologische Fußabdruck aufgrund des benötigten Energieverbrauchs und der notwendigen Nutzung der Rohstoffe. Trotz der noch mittleren Farbe bei China haben Forschungen bewiesen, dass es eine direkte Verbindung zwischen Energieverbrauch und Bruttoinlandsprodukt bzw. Wohlstand gibt. Wenn jeder Chinese ein Auto fahren würde, wären die derzeit bekannten Weltölreserven innerhalb eines halben Jahres erschöpft [6]. Dieses Beispiel zeigt eine Auswirkung des unbegrenzten Wachstums.

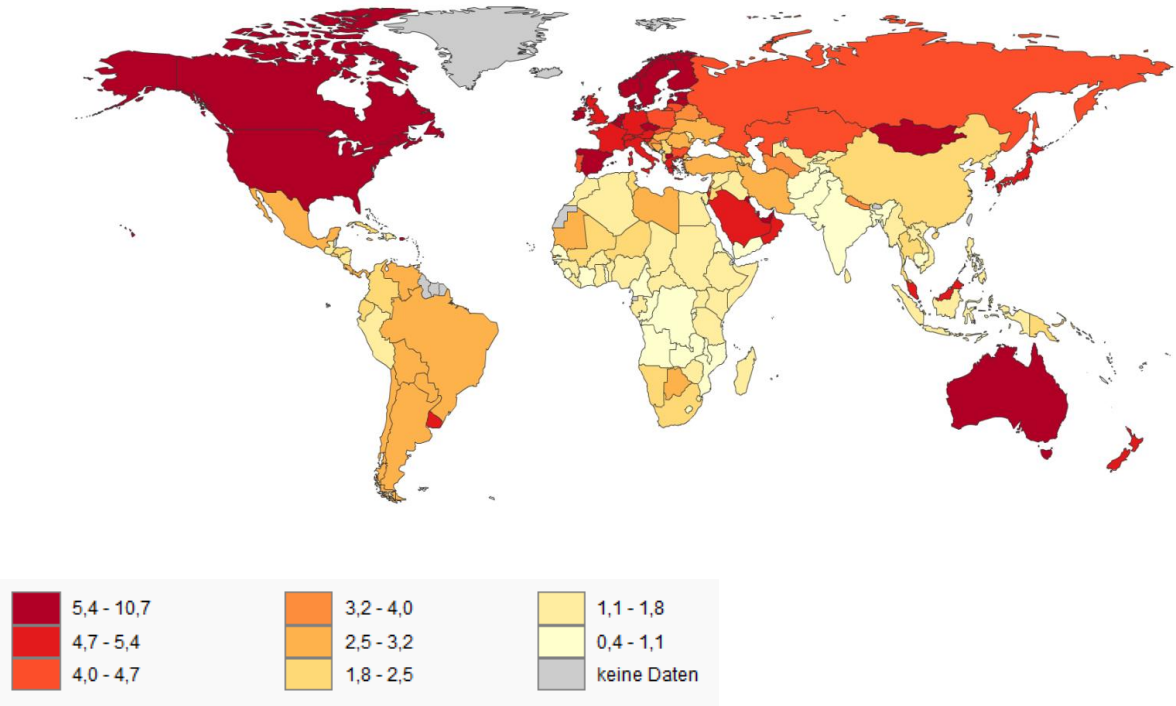


Abbildung 2.3 Ökologischer Fußabdruck weltweit, 2007 [72]

Die Bedürfnisse zukünftiger Generationen sind durch verbrauchte Energie und Rohstoffe nicht unwesentlich bedroht. Infolge des raschen Wachstums der asiatischen Länder steigert sich der Verbrauch von Rohstoffen weiter, als würden diese ewig zur Verfügung stehen. Leider ist der ökologische Fußabdruck der menschlichen Gesellschaft umso bedenklicher, weil die Menschheit sich bereits jetzt in einem nicht nachhaltigen Bereich befindet. Trotz der dramatischen Lage ist sich die Allgemeinheit dieser misslichen Lage nur in hoffnungslos begrenztem Maße bewusst. Es wird noch dauern, bis die Veränderungen der persönlichen Werteeinstellungen in der Politik zu einer Umkehr der gegenwärtigen Trends führen und den ökologischen Fußabdruck wieder auf eine der langfristigen Tragfähigkeit des Planeten angemessene Größe reduzieren [70].

Es liegt auf der Hand, dass der Verbrauch fossiler Brennstoffe und anderer nicht erneuerbarer Ressourcen wie Uran zur Energiebereitstellung dazu führt, dass sie eines Tages erschöpft sind. Eine weitere Krise, die als Wirkung des Wachstums bezeichnet werden kann und das Leben der Menschheit auf der Erde bedroht, ist folglich die Verschwendung von wertvollen Ressourcen. Unbestreitbar ist, dass wir als Menschen radikale Veränderungen der Umwelt bzw. der Erde verursacht haben. Jeden Tag verschwenden wir wertvolle Ressourcen und produzieren aus ihnen Abfälle, die nie wieder in den ursprünglichen Zustand zurückgeführt werden können. Trotzdem werden immer noch viele Edelmaterialien in der Industrie verwendet, in neue Zustände umgewandelt und eventuell nicht wiederverwendbar sein. Die Reserven für diese Materialien gehen langsam zur Neige. Bereits jetzt existieren einige Materialien nicht mehr, die zur Herstellung von Computern verwendet werden. Selbst in der Solarindustrie, die zur Umweltrettung beitragen soll, werden einige Materialien wie Indium, Gallium und Tellur nur begrenzt zur Verfügung stehen. So sollte Indium bis zum Ende des Jahres 2010 als Ressource aufgebraucht worden sein [11]. Als Fazit kann festgestellt werden, dass der Fußabdruck der Menschheit einfach zu groß für den Planeten ist. Die Betrachtung des Landverbrauchs lenkt den Blick im Bereich des Urbanismus auf die Notwendigkeit der Verdichtung der Städte, was das Bauen hoher Gebäude sinnvoll macht.

Energieknappheit – historischer und prognostizierter Energieverbrauch

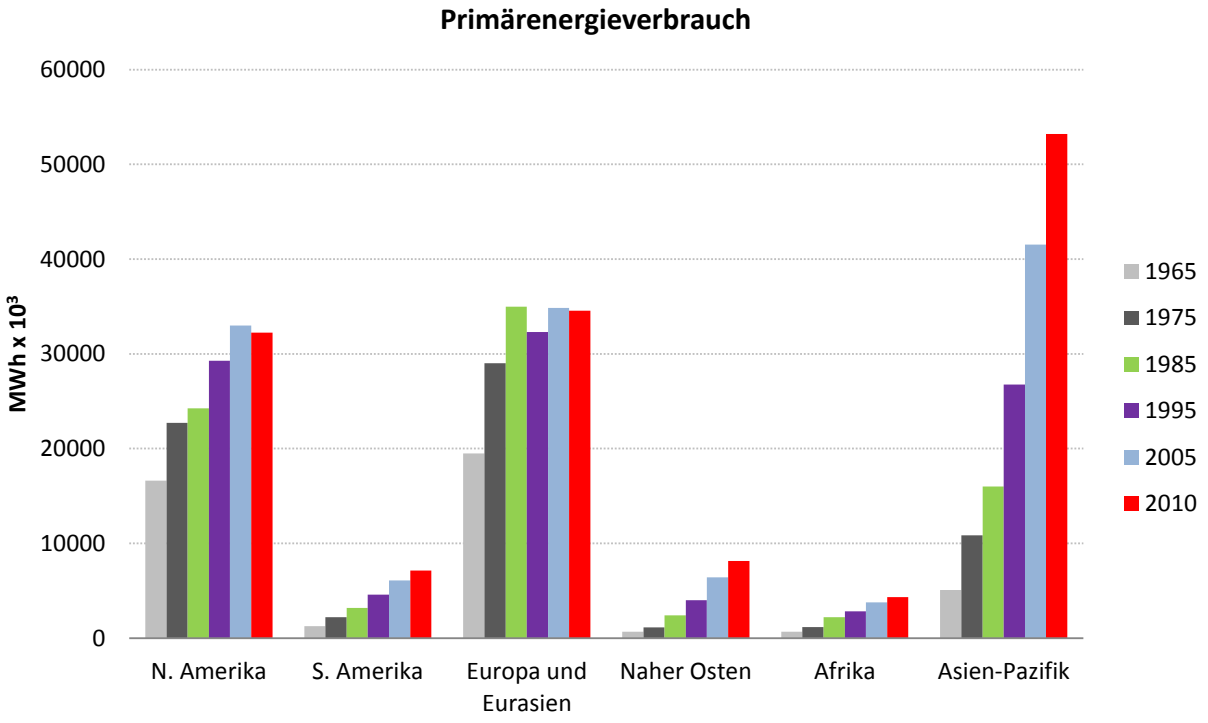


Abbildung 2.4 Primärenergieverbrauch ausgewählter Regionen der Welt [74]

Die in der Abbildung 2.4 dargestellten Daten zum Primärverbrauch ausgewählter Regionen bestätigen den zunehmenden Verbrauch. Da es in den meisten wachsenden Gebieten kaum Maßnahmen zur Reduzierung des Verbrauchs gibt, geht man davon aus, dass sich der Verbrauch in der Zukunft weiter erhöht und die Chancen, Klimawandel und Energiekrise zu

vermeiden, sehr gering sind. Trotz des gestiegenen Einsatzes erneuerbarer Ressourcen nimmt auch der Verbrauch fossiler Energieträger zu.

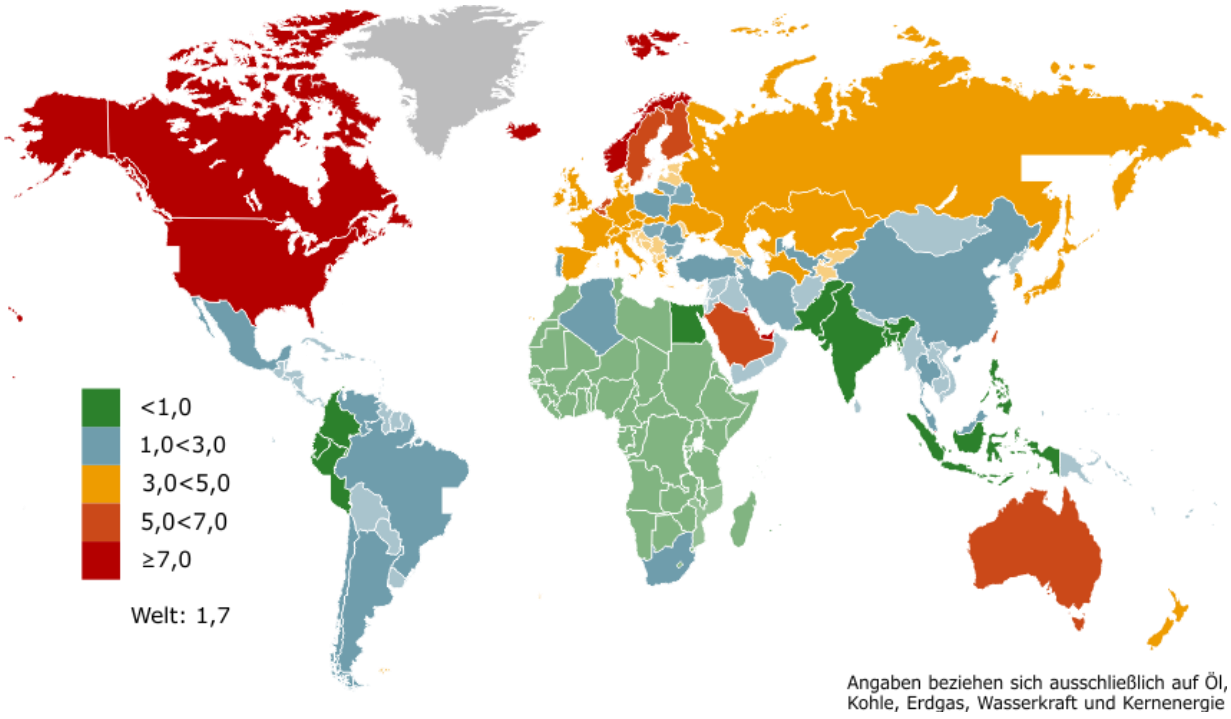


Abbildung 2.5 Weltweiter Verbrauch von Primärenergie pro Kopf in Tonnen Öläquivalent, nach Regionen und ausgewählten Staaten, 2007 [75]

Auf der Weltkarte in Abbildung 2.5 ist klar die Auswirkung des Wohlstands auf den Energieverbrauch pro Kopf zu erkennen. In Nordamerika und der Golfregion ist der Primärenergieverbrauch pro Kopf und Jahr viel höher als in anderen Regionen. Die Menschen in der stetig wachsenden Golfregion zählen zu den großen Verbrauchern, obwohl keines der Länder zu den Industrienationen gehört.

Energierohstoffe bilden eine Voraussetzung für Industriegesellschaften. In Deutschland beträgt der Anteil des nicht erneuerbaren Primärenergieverbrauchs 95 %. Auch für Nichtindustriegesellschaften in Schwellenländern ist Energie sehr wichtig, um ein Leben in Wohlstand zu führen. Weltweit liegt der Verbrauch von Primärenergie aus nicht erneuerbaren Ressourcen bei 86 %. Aufgrund der raschen Entwicklung in den Schwellenländern wird eine Steigerung des weltweiten Energieverbrauchs um 60 % prognostiziert [6].

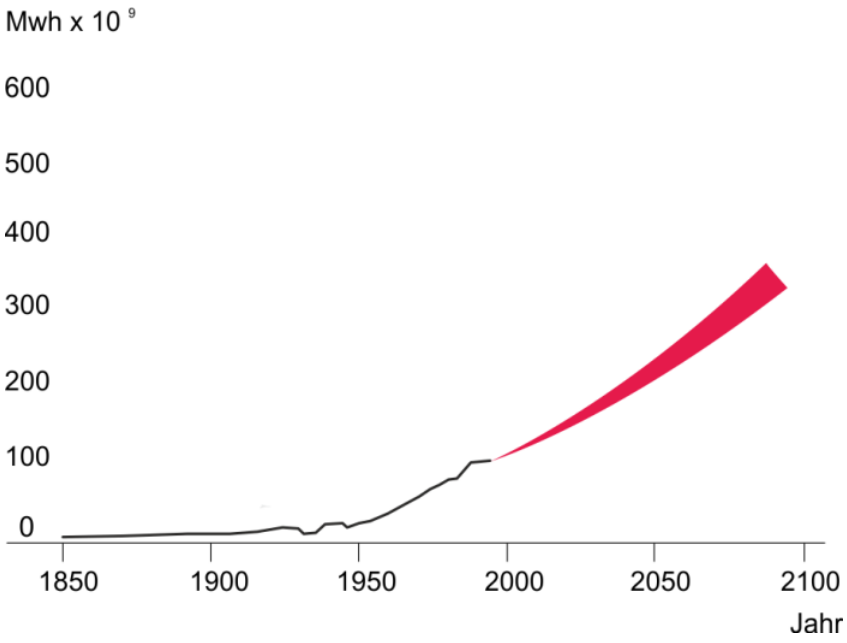


Abbildung 2.6 Geschätzter globaler Primärenergieverbrauch bis 2100 [11]

Der prognostizierte weltweite Energieverbrauch wird in Abbildung 2.6 veranschaulicht. Diese Prognose basiert auf Erkenntnissen, dass in der menschlichen Geschichte immer eine unmittelbare Wechselbeziehung zwischen Energieverbrauch und Bevölkerungswachstum sowie CO_2-Emission bestand. Statistische Schätzungen gehen davon aus, dass die Weltbevölkerung von zurzeit 6,9 Milliarden auf 10 Milliarden steigen wird, was zahlreiche negative Auswirkungen auf die Ressourcen mit sich bringen wird. Daher ist es auf jeden Fall sinnvoll, die Energieverbräuche zu reduzieren und minimieren, damit der Fortschritt im Bereich der erneuerbaren Energien leichter und schneller erfolgt.

Die Betrachtung des prognostizierten weltweiten Primärenergieverbrauchs weist auf eine Zunahme hin, die sich ohne strenge Maßnahmen nicht bremsen lassen wird. Die Darstellung in Abbildung 2.7 zeigt das Verhältnis zwischen dem Verbrauch und den verfügbaren Ölreserven. Die zurzeit bekannten und vermuteten Reserven in den verschiedenen Regionen der Welt werden wahrscheinlich bald zu Ende gehen. Diese Annahme ergibt sich einerseits aus den geschätzten Verbräuchen und andererseits aus den geschätzten und bekannten Reserven. Die jährliche Förderung von Öl geht seit ca. 30 Jahren kontinuierlich zurück. Der aktuelle Verbrauch wird durch in den 80er-Jahren entdeckte Reserven abgedeckt [11].

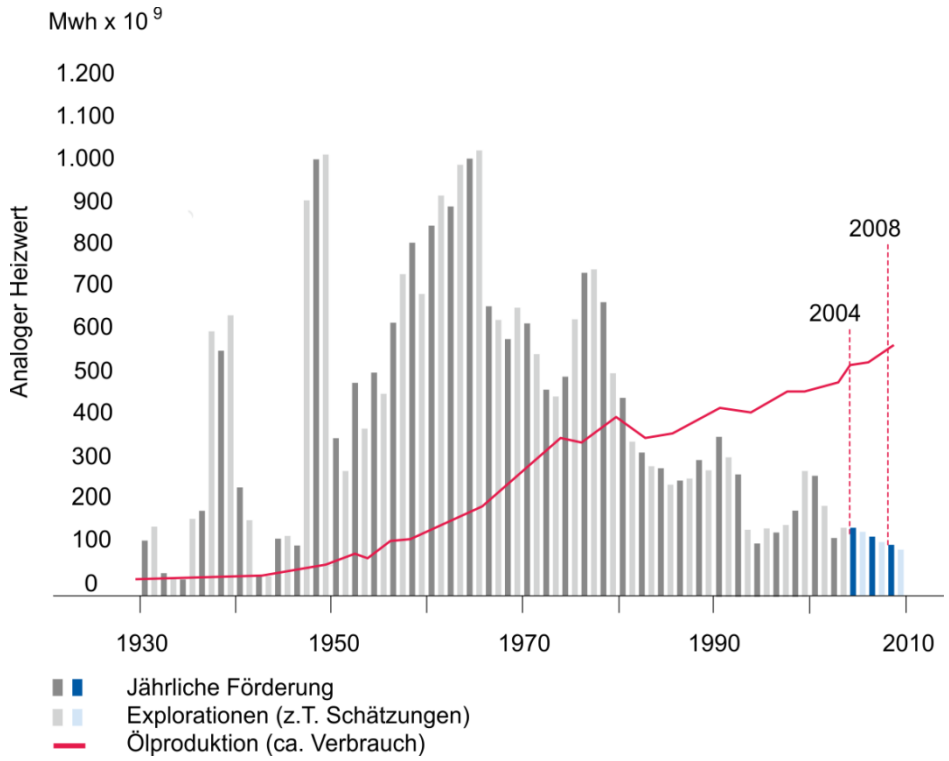


Abbildung 2.7 Weltweite fossile Brennstoffreserven [76]

Gemäß den Darstellungen ergibt sich für Gas eine Verfügbarkeit von 29 bis 53 Jahren, für Öl von ca. 37 bis 32 Jahren und für Kohle von ca. 330 bis 410 Jahren. Nach den Statistiken der BP ergeben sich folgende Verfügbarkeiten: Gas ca. 66 Jahre, Öl ca. 45 Jahre und Kohle ca. 180 Jahre. Uran wird noch über einen Zeitraum von ca. 30 bis 40 Jahren verfügbar sein [11].

Die Daten zu den weltweiten Ölreserven in Abbildung 2.8 zeigen, dass das verfügbare Angebot im mittleren Osten im Vergleich zu anderen Regionen relativ hoch ist. Trotzdem werden diese Reserven den Weltverbrauch in der nahen Zukunft nicht abdecken können. Öl bildet das Hauptbruttoinlandsprodukt der meisten Öl-Exporteure (z. B. Saudi-Arabien). Daher stellt die Endlichkeit des Öls ein großes wirtschaftliches Risiko für diese Länder dar, vor allem, wenn der Verbrauch schon enorm ist und kontinuierlich zunimmt.

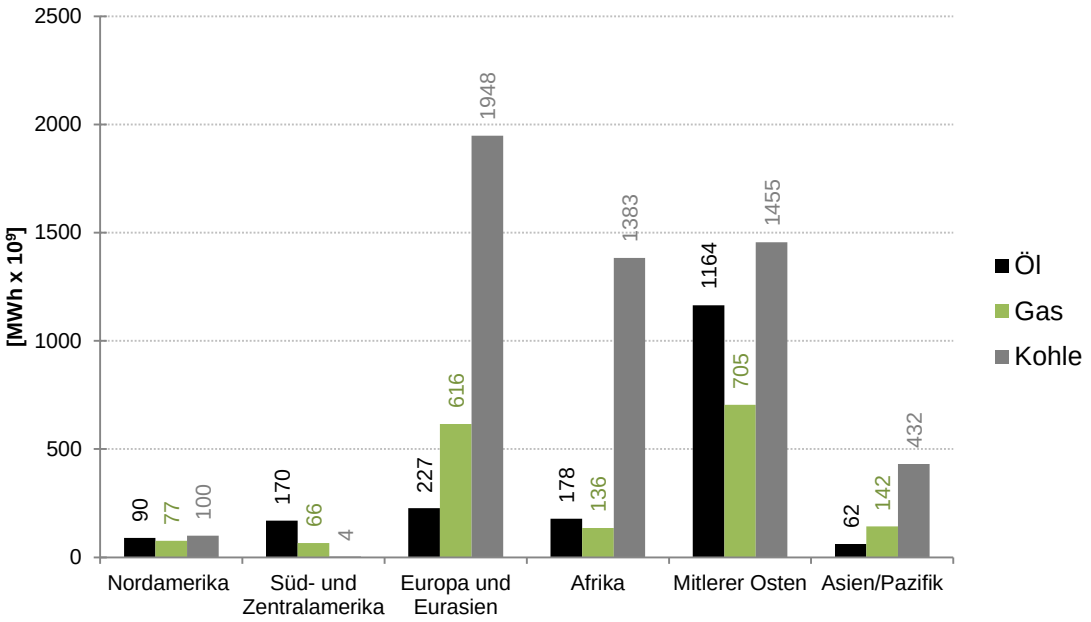


Abbildung 2.8 Zurzeit bekannte und vermutete Reserven von Öl, Gas und Kohle (Energiemenge) [74]

Trotz der im Vergleich zu Öl besseren Verfügbarkeit von Gasreserven in Europa und Euroasien ist es wichtig festzustellen, dass auch dieser wertvolle Energierohstoff einen Lebenszyklus hat und seinem Ende entgegengeht. Es ist klar, dass die Verfügbarkeit von Kohle die von Öl und Gas um ein Mehrfaches übersteigt. Allerdings müssen hier die umweltschädlichen Nachteile ernst genommen werden. Der Abbau von Kohle wirkt sich sehr negativ auf die Landschaft aus. Der CO_2-Außstoß ist zudem sehr hoch: Kohlekraftwerke stoßen bis zu 1,3 Kilogramm aus. Da die Kohle porös ist und eine relativ geringe Dichte hat, muss anders als bei Öl oder Gas viel Material eingesetzt werden, um dieselbe Energiemenge zu erzeugen [77].

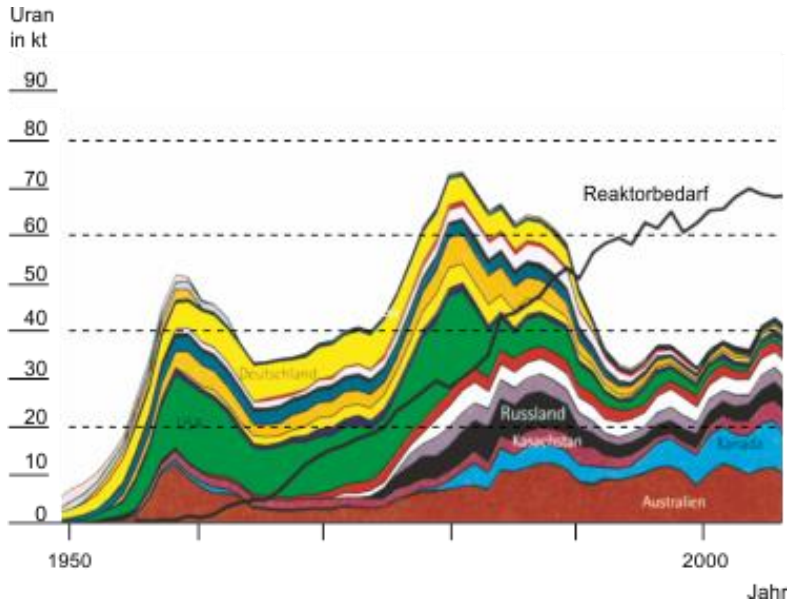


Abbildung 2.9 Uranförderung der einzelnen Länder 1950–2006 sowie Uranbedarf der Kernreaktoren [78]

Trotz ihrer großen Risiken war Atomkraft bis vor wenigen Jahren eine gute Möglichkeit zur Energiebereitstellung. Heutzutage werden bis zu 14 % des Weltstrombedarfs durch Kernenergie abgedeckt. Uran, das wichtigste Material für die Gewinnung von Kernenergie, ist jedoch nicht mehr in großen Mengen verfügbar. Zum heutigen Zeitpunkt werden viele Atomwerke mit den Uranreserven betrieben, die 1990 entdeckt wurden. In Abbildung 2.9 wird gezeigt, dass der Verbrauch die verfügbaren Reserven schon ca. 1960 überschnitten hat. Die vermutete verfügbare Menge an Uran sollte der Welt maximal 200 Jahre reichen. Der Großteil der Vorkommen liegt in Australien (40 %), gefolgt von Kanada (15 %), Kasachstan (13 %), Brasilien (8 %) und Südafrika (6,5 %) [79].

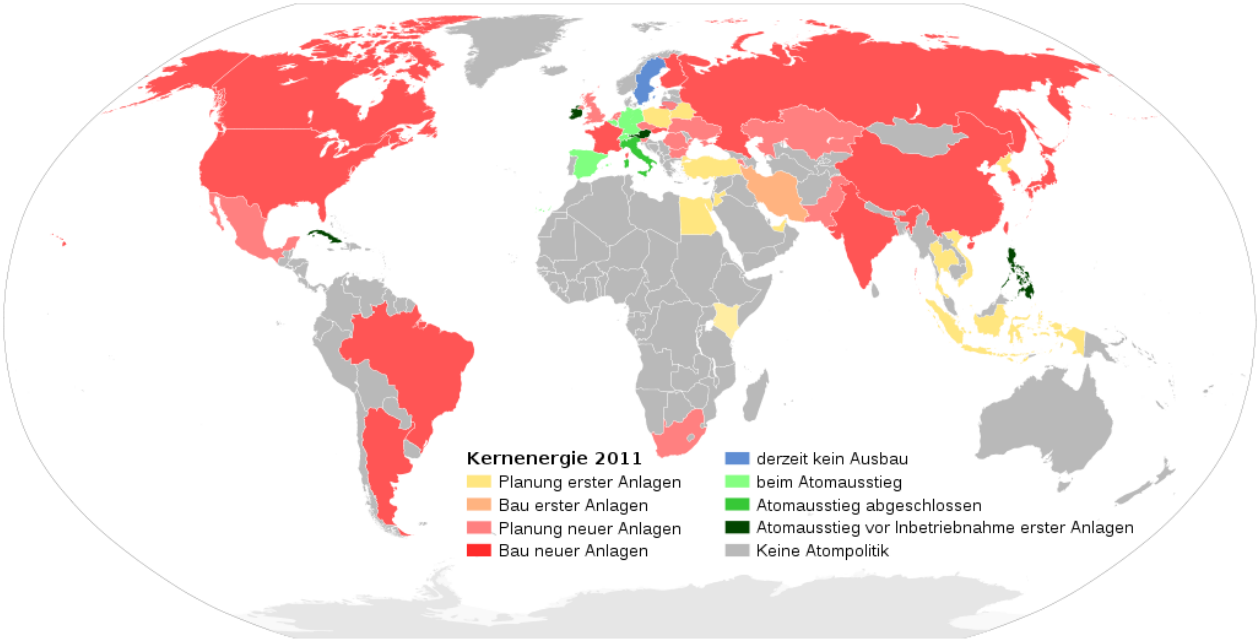


Abbildung 2.10 Stand der wirtschaftlichen Kernenergienutzung weltweit [80]

Der in Abbildung 2.10 gezeigte Stand der weltweiten wirtschaftlichen Kernenergienutzung macht deutlich, wohin der Trend geht. Allerdings werden keine Angaben zu Saudi-Arabien gemacht. Nach Pressemitteilungen sollen dort bis 2030 16 Atomkraftwerke aufgebaut werden, wodurch ein Fünftel des Strombedarfs abgedeckt würde [81]. Aufgrund der Knappheit der verfügbaren Menge an Uran kann der Einstieg in die Atomkraft als kurzfristige Lösung betrachtet werden. Es sollten andere Alternativen entwickelt werden, um den steigenden Bedarf abzudecken. In einem Land, das über verschiedene erneuerbare Energieressourcen verfügt, ist es sinnvoller, den Ausstieg aus nicht erneuerbaren Energieträgern wie Öl und Uran zu fördern.

Der Blick auf die verfügbaren Reserven an Energierohstoffen verdeutlicht ernst zu nehmende Risiken für das Leben der Menschheit. Es ist äußerst wichtig, den Wechsel zu erneuerbaren Energien zu beschleunigen und die geplante Atomenergieversorgung in Schwellenländern zu beenden. In den Industrieländern ist es notwendig, die Nutzung erneuerbarer Energien schneller voranzutreiben sowie klare Pläne vorzulegen und zu verwirklichen.

Grundsätzlich ist die Senkung des Primärenergieverbrauchs sowohl für europäische Länder als auch für andere Industrieländer auch aus der wirtschaftlichen Perspektive sehr interessant. Das

gilt ebenso für den Einstieg in die erneuerbaren Energien, die lokal erzeugt werden. Es gilt: Wenn die Ware teurer wird, wird der Preis höher. Der Preis für den Import von Energie ist bereits zu hoch und wird noch höher werden, vor allem, wenn die großen Verluste berücksichtigt werden, die beim Umwandlungsprozess der Primärenergie zur eigentlichen Energiedienstleistung wie etwa Licht entstehen.

Kohlendioxidemission und deren Folgen

Gegen Ende des 19. Jahrhunderts sagte der schwedische Chemiker und Nobelpreisträger von 1903, Svante Arrhenius, eine Verdoppelung des CO_2-Gehalts in der Erdatmosphäre innerhalb relativ kurzer Zeit voraus. Er schätzte einen Temperaturanstieg der Erdoberflächentemperatur um 4 K (Kelvin). Eine derartige Entwicklung wurde von Arrhenius jedoch nicht als Problem gesehen, sondern als Chance, um Probleme wie eine weitere Eiszeit oder die Zunahme des Bevölkerungswachstums zu vermeiden.

Die Problematik der begrenzten Verfügbarkeit fossiler Brennstoffe wird zurzeit überlagert von der Diskussion des Klimawandels. Die Temperatur der Erdoberfläche stieg in den vergangenen 100 Jahren aufgrund der CO_2-Konzentration in der Atmosphäre um etwa 0,8 K [6]. Das Jahrzehnt von 2000 bis 2009 war mit Abstand das wärmste, das je gemessen wurde, gefolgt von den 1990er-Jahren, die wiederum wärmer waren als die 1980er-Jahre. Eine der Hauptursachen des Temperaturanstiegs ist der Treibhauseffekt, der aufgrund von vielen weiteren Faktoren entsteht.

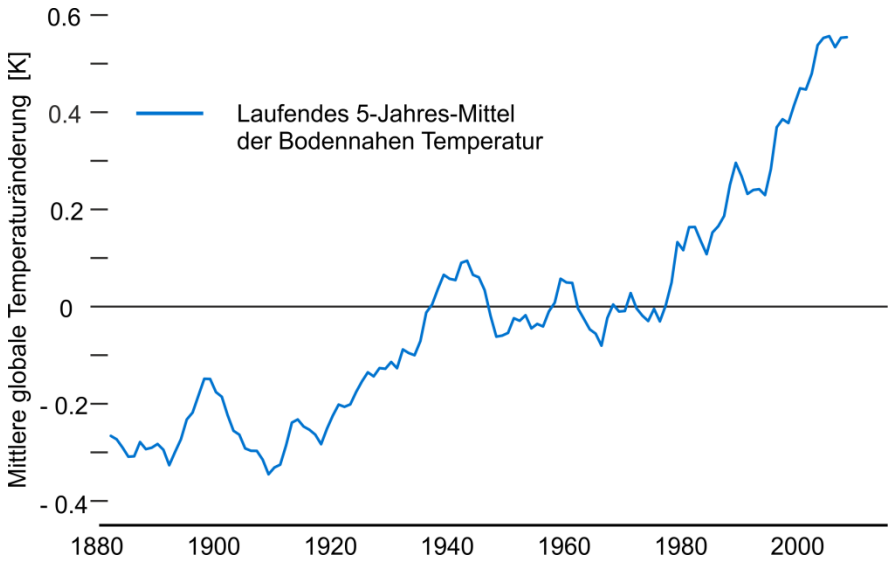


Abbildung 2.11 Mittlere Erdoberflächentemperatur [82]

Abbildung 2.11 zeigt die Tendenz der Temperaturänderung in den letzten 130 Jahren. Wissenschaftler gehen davon aus, dass sich der Anstieg noch weiter dramatisch erhöht, sollten keine effektiven Gegenmaßnahmen ergriffen werden. Nach gegenwärtigem wissenschaftlichen Verständnis, vor allem laut dem 2007 veröffentlichten Sachstandsbericht des IPCC (*Intergovernmental Panel on Climate Change,* dt.: UN-Weltklimarat), ist es zu 90 % sicher, dass der Temperaturanstieg auf der Erde durch die Menschen verursacht ist. Dieses Faktum ist eine

der wichtigsten Aussagen des Berichts. Seit 1750 ist die CO_2-Konzentration in der Atmosphäre um 36 % auf mittlerweile 383 ppm (*parts per million*) gestiegen und hat vermutlich das höchste Niveau innerhalb der letzten 20 Millionen Jahre erreicht. Aktuell steigt die Kohlendioxidkonzentration jedes Jahr um weitere 2,5 ppm an [6]. Vor 1800 lag die Konzentration bei ca. 280 ppm [11].

Die von Menschen verursachte CO_2-Emission entsteht durch das Verbrennen fossiler Brennstoffe, durch weltumfassende Entwaldung sowie Land- und Viehwirtschaft. Dadurch werden das Treibhausgas Kohlendioxid (CO_2) sowie weitere Treibhausgase wie Methan und Lachgas in der Erdatmosphäre angereichert, sodass weniger Wärmestrahlung von der Erdoberfläche in das Weltall abgegeben werden kann [83]. Die ständig wachsende Weltbevölkerung führt zu einem weiter steigenden Energiebedarf, der einen weiteren Anstieg der Konzentration von CO_2 zur Folge haben kann.

Bei dieser Diskussion stehen sich zwei Lager von Wissenschaftlern und Klimaforschern gegenüber, wobei die eine Gruppe – angeführt von IPCC – die Meinung vertritt, dass der Klimawandel durch die CO_2-Erhöhung ausgelöst wurde, während die zweite Gruppe dies bestreitet und die Meinung vertritt, dass die Klimaveränderungen auf erhöhte Sonnenaktivitäten zurückführen sind [11].

Abbildung 2.12 Links eine Aufnahme aus dem Jahr 1948, rechts eine aus dem Jahr 2006 [84]

Der globale Klimawandel – lange wegen der komplexen Wechselbeziehungen von Einzelfaktoren bezweifelt – ist inzwischen anerkannte Realität. Die Veränderungen wurden zunächst eher subjektiv wahrgenommen, vor allem durch die Häufung extremer Klimaphänomene in jüngster Vergangenheit. Natürlich geht der Streit über die Ursachen des Temperaturanstiegs unter den Fachwissenschaftler weiter, trotzdem haben sich bereits bei der durchschnittlichen Temperaturerhöhung der Erdoberfläche im 20. Jahrhundert um ca. 0,6 K (Fehlertoleranz ± 0,2 K) die Meerspiegel um jährlich ca. 1–2 mm erhöht [11]. Ein Beispiel für die Konsequenzen des Klimawandels zeigen die Bilder der Gletscherschmelzen im Berner Oberland in Abbildung 2.12.

Die wissenschaftlichen Voraussagen hinsichtlich des zu erwartenden Temperaturanstiegs bis zum Jahr 2100 (gegenüber 1990) schwanken aufgrund der Komplexität des Klimasystems zwischen 1,5 und 5,8 °C. Das Potsdam-Institut für Klimaforschung bemerkt in diesem Zusammenhang: *„1,5 °C sind schon sicher. Damit ist das System bereits geladen. Auch in diesem Fall werden die Auswirkungen massiv sein. Wenn die 6-°C–Prognose eintritt, wird unsere Welt eine andere Welt.*“ [85]

Die Folgen der globalen Erwärmung sind zahlreiche zwangsläufige Veränderungen, die den Menschen und seine Umwelt weltweit betreffen. Die grundsätzlichen Veränderungen umfassen dabei: steigende Meeresspiegel, schmelzende Gletscher, Verschiebung von Klimazonen, Vegetationszonen und Lebensräumen, verändertes Auftreten von Niederschlägen, stärkere oder häufigere Wetterextreme wie Überschwemmungen und Dürren, Ausbreitung von Parasiten und tropischen Krankheiten sowie mehr Umweltflüchtlinge [86].

Das Diagramm in Abbildung 2.13 zeigt die Veränderung der CO_2-Konzentration in der Atmosphäre bis 2100. Die blaue Kurve zur linken Achse veranschaulicht die Temperaturerhöhung als Folge der CO_2-Konzentration. Die Simulation wurde 1995 veröffentlicht und stellt den Temperaturanstieg in einen direkten Zusammenhang mit der CO_2-Konzentration. Gemäß Dr. E. U. von Weizsäcker und der letzten Aussagen des IPCC muss die CO_2-Konzentration gesenkt werden, um den Temperaturanstieg der Erdoberfläche bis 2100 aufzuhalten [87].

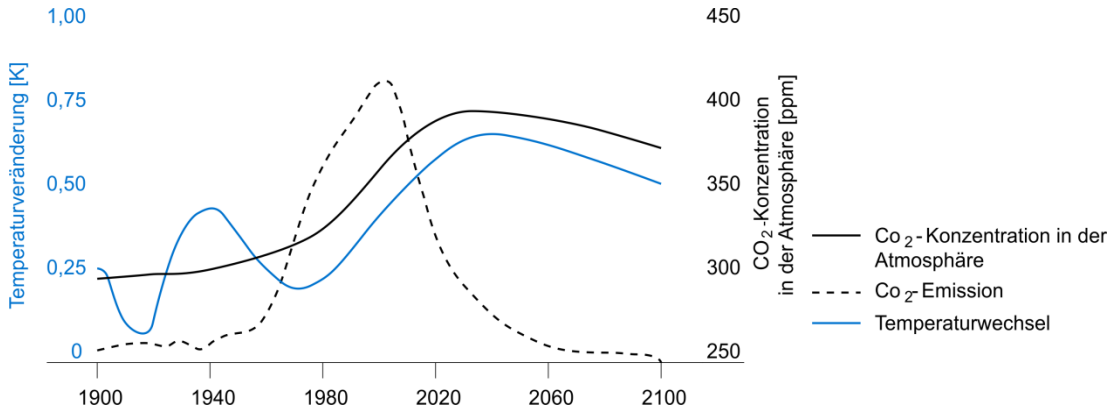


Abbildung 2.13 Simulationen des CO_2-Effektes bei einem Energieverbrauch von 300 x 10^9 MWh/a mit Solar- und Nukleareanwendung, Stand 1995 [11], [87]

Nach den Ergebnissen des IPCC hat sich eine Reihe von europäischen Ländern auf den Konsens geeinigt, dass die Erhöhung der mittleren Temperatur der Erdoberfläche 2 K nicht überschreiten soll. Dieses Ziel nennt sich 2-K-Szenario. Das heißt, die CO_2-Konzentration in der Erdatmosphäre darf nur bis ca. 450 ppm zunehmen. Dies entspricht einer Reduktion der derzeitigen Emission um ca. 60 Prozent. Abbildung 2.14 zeigt die CO_2-Emissionen pro Kopf und Jahr und macht deutlich, dass einzelne Länder eine herausragende Rolle bei der Senkung der Emissionen spielen müssen [11]. Die Grafik zeigt auch die erforderliche Grenze der Emission pro Kopf im Vergleich zu der jetzigen Emission.

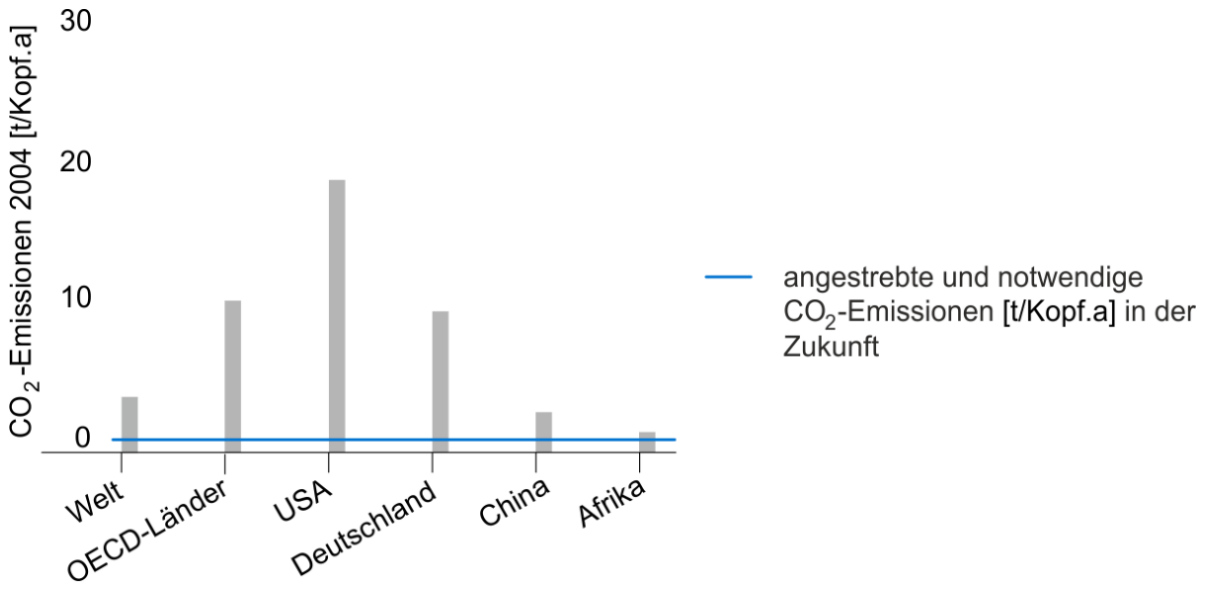


Abbildung 2.14 CO_2-Emissionen in t pro Kopf und Jahr [11], [88]

Die aktuelle internationale Klimaschutzpolitik basiert auf dem *Erdgipfel* 1992. Damals wurden jedoch von den 150 teilnehmenden Ländern keine konkreten Ziele und Schritte zum Klimaschutz festgeschrieben. Die ersten Zielwerte für die Treibhausgase wurden erst 1997 beim Unterzeichnen des Kyoto-Protokolls beschlossen, in dem sich die Industrieländer zur Reduzierung ihres CO_2-Austoßes bis 2012 von 5,2 % gegenüber 1990 verpflichteten. Die EU verpflichtete sich zu 8 % Reduzierung, wobei für einzelne Länder unterschiedliche Ziele gelten. Um das angestrebte Ziel zu erreichen, die Emission weltweit bis 2050 um 50 % zu senken, müssen die Industrienationen ihre Emission um 60-80 % vermindern [6].

Um das Ziel des 2-K-Szenarios zu erreichen, sollten insbesondere die großen Verursacher der Erderwärmung Beiträge zur Energiewende leisten. Das Diagramm der Abbildung 2.15 fasst den empfohlenen Entwicklungsprozess zwischen 2003 und 2050 zusammen. Es zeigt sich, dass die technischen Fortschritte in Bezug auf die Erhöhung der Effizienz im Vordergrund stehen. Darüber hinaus sollte sich die Nutzung erneuerbarer Energien erhöhen und bis 2020 der Ausstieg aus der Nuklearenergie vollzogen werden.

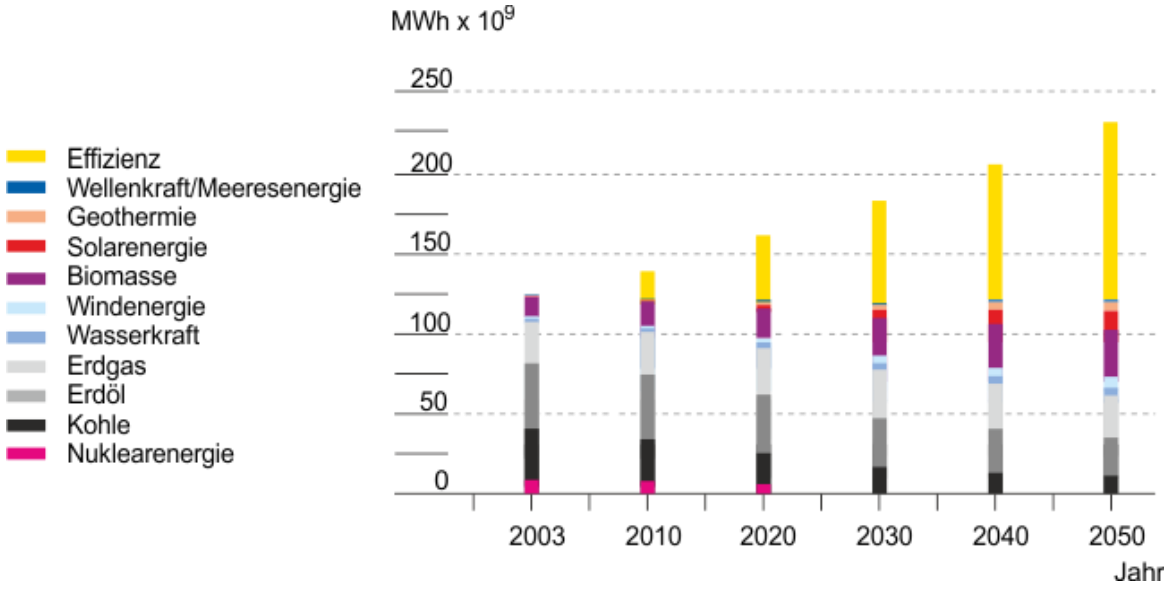


Abbildung 2.15 Entwicklung der globalen Primärenergieversorgung im 2-K-Szenario [11]

Idealerweise sollte es eine globale Klimapolitik geben, auf die sich alle Länder einigen. Natürlich müssen die großen Verursacher sich mehr um das Problem kümmern, aber auch die sich rasch entwickelnden Länder werden bald hohe Emissionen produzieren. Eine grundsätzliche Maßnahme zum Erreichen des Ziels ist die Nutzung erneuerbarer Ressourcen zur Energiebereitstellung. Deutschland bemüht sich, den Anteil der eingesetzten erneuerbaren Energie bis 2030 zu erhöhen [89].

Energie ist eine wertvolle Ressource, die für das Überleben der Menschheit nötig ist. Sie ist deshalb eng verbunden mit den oben genannten Faktoren. Mit der stetig steigenden Bevölkerungszahl steigt auch der Bedarf nach Lebens- bzw. Arbeitsräumen, woraufhin Land und Ressourcen zum Bauen benötigt werden. Energie wird dabei nicht nur für diese Prozesse benötigt, sondern auch für den Betrieb der Gebäude sowie für Industrie und Transport. Der heutige unbedachte Umgang mit Energie sowie die Nutzung von fossilen Brennstoffen und Kernenergie führen zu Umweltverschmutzung, CO_2-Emission und eventuell Klimawandel.

2.1.2 Energiewirtschaft ausgewählter Regionen und Länder

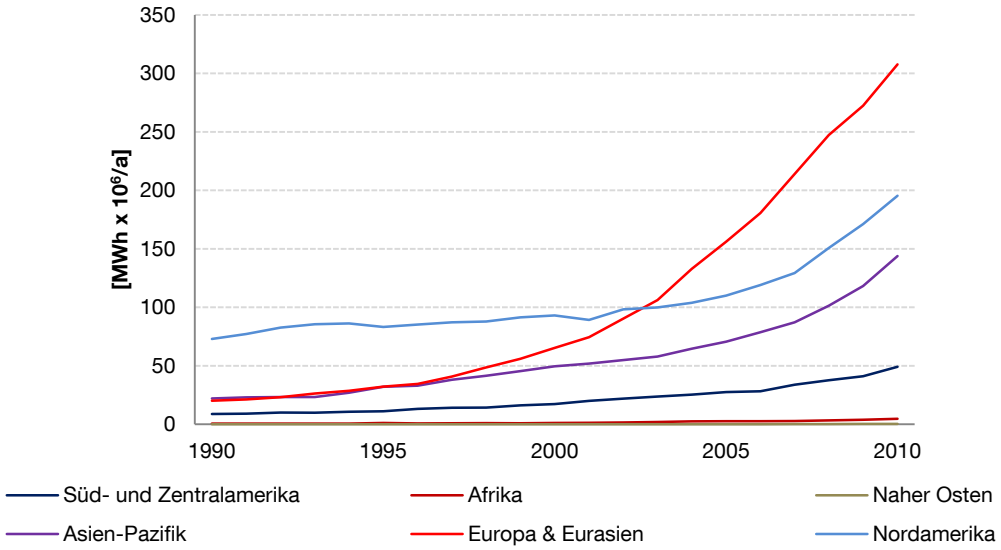


Abbildung 2.16 Entwicklung der Nutzung erneuerbarer Energien in den verschiedenen Regionen der Welt (ohne Wasserkraft) [74]

Die Grafik in Abbildung 2.16 gibt Auskunft über die Entwicklung der Nutzung erneuerbarer Energien in den verschiedenen Regionen der Welt. In den europäischen Ländern ist nach den ersten Energiekrisen in den 70er-Jahren das Bemühen entstanden, sich von fossilen Brennstoffen unabhängig zu machen und auf erneuerbare Energien umzusteigen. Aufgrund der politischen Unterstützung der EU steigt der Einsatz erneuerbarer Energien schneller und höher als in den anderen Regionen. Unter den dargestellten Regionen entwickelt sich die Nutzung erneuerbarer Energien im Nahen Osten und in Afrika relativ langsam. Im Nahen Osten ist dies aufgrund des derzeitigen wirtschaftlichen Wachstums, das mit rasch zunehmendem Wohlstand verbunden ist, noch kritischer zu bewerten.

Ein detaillierter Überblick über die Verteilung der Energieträger je nach Region folgt in Abbildung 2.17. Die Grafiken zeigen, wie hoch der heutige Anteil an fossilen bzw. umweltschädlichen Brennstoffen ist. Im Nahen Osten wird der Anteil der Atomkraft mit den angekündigten Plänen zum Einstieg in die Atomenergie eventuell zunehmen. In Asien wird zum großen Teil Kohle verwendet. China ist einer der größten Verbraucher von Kohle in der Welt und ein wichtiger Verursacher der CO_2-Emission und Umweltverschmutzung.

Die aufgezeigten Anteile an nicht erneuerbaren Energien im Nahen Osten und in Afrika stehen im Widerspruch zu den dort verfügbaren Nutzungspotenzialen der Sonnenenergie, vor allem im Nahen Osten, wo die Investition in erneuerbare Energien relativ bezahlbar ist. Für die wachsenden Länder im Nahen Osten ist es von großer Bedeutung, die Anteile an nicht erneuerbaren Energien zu reduzieren und statt zur Atomkraft zu den erneuerbaren Energien zu wechseln, deren Sektor eventuell durch Erträge des Exports nicht erneuerbarer Energieträger gefördert werden kann.

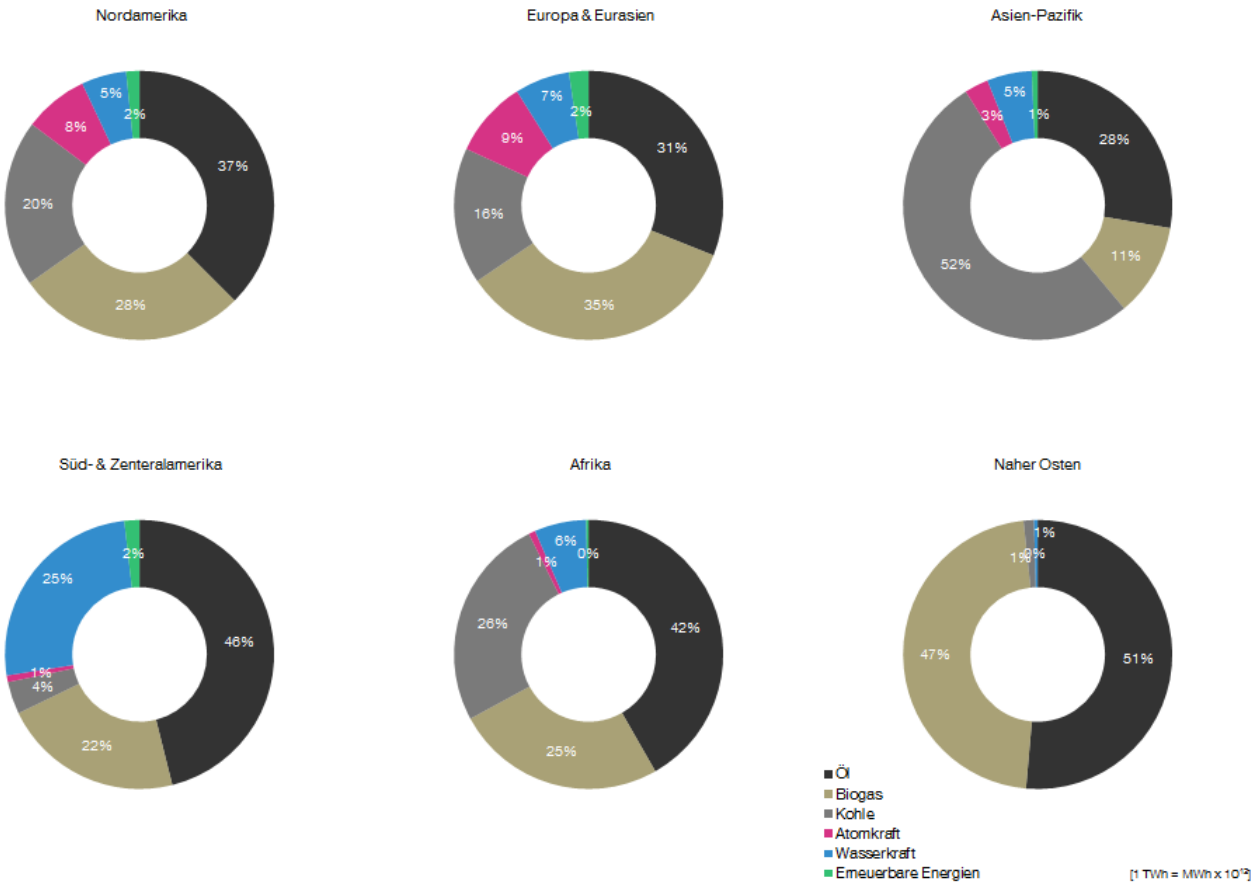


Abbildung 2.17 Verteilung der Primärenergieverbräuche nach Regionen und Energieträgern, Stand 2010

Eine Einsparung der heute verfügbaren fossilen Energie ist entscheidend für die Entwicklung der künftigen Generationen in ölreichen Ländern. Projekte wie *DESERTTEC* sollen als Vorbilder für wachsende Länder in Afrika und im Nahen Osten dienen. Neben der verfügbaren Sonnenenergie treten insbesondere an den südlichen afrikanischen Küsten starke Winde auf, die zur Stromerzeugung bzw. Wasserförderung verwendet werden können.

Energieexport ist im Regelfall wirtschaftlicher als Eigene Energieversorgung. Dies stellt eine Chance für die heutigen energieexportierenden Länder dar, von ihrer Erfahrung in diesem Bereich zu profitieren und in den Export erneuerbarer Energie einzusteigen. Gleichzeitig ist eine extrem hohe Energieeffizienz der Gebäude erforderlich, um die begrenzte Ressource grüner Energie nicht lokal überzustrapazieren, sondern global zu vermarkten. Für den eigenen Verbrauch kann dieser Ansatz neben Forschungs- und Entwicklungsbereichen Potenziale zur Schaffung einer neuen Art von Industrie bieten, was unter anderem auch Arbeitsplätze schafft. Ein besonderes Potenzial liegt im Sand der Wüstengebiete, der für die Photovoltaik- und Glasindustrie von großem Vorteil ist.

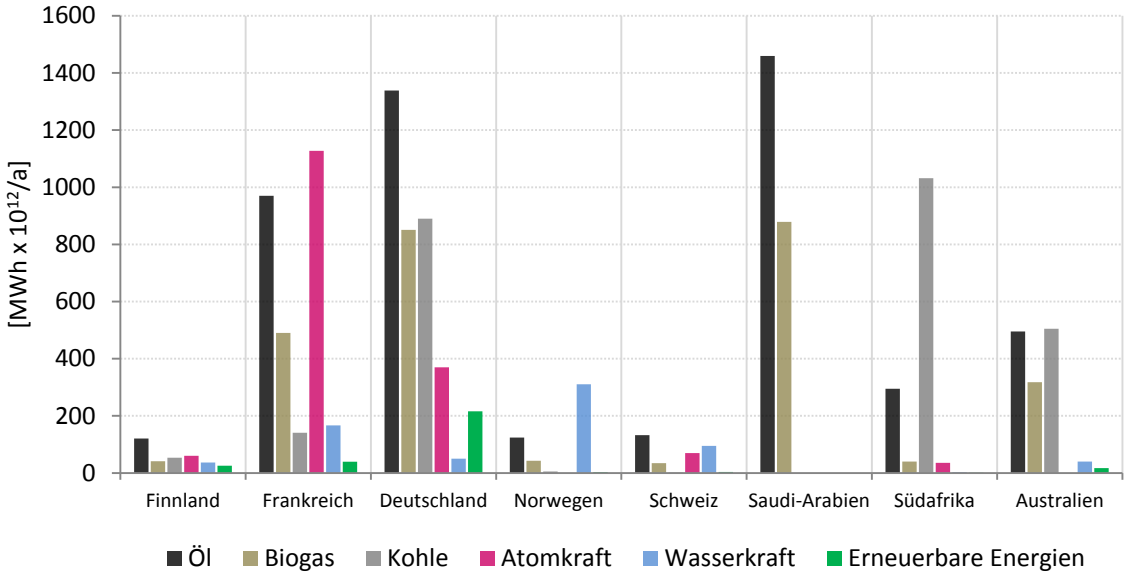


Abbildung 2.18 Vergleich der Energiewirtschaft ausgewählter Länder [74]

Die Balken in Abbildung 2.18 veranschaulichen Daten zum Primärenergieverbrauch einzelner Länder aus verschiedenen Energieträgern. Finnland setzt z. B. verschiedene Energieträger zur Deckung seines relativ niedrigen Energiebedarfs ein. Insgesamt wird Öl am meisten für Energieerzeugung verwendet.

Kernenergie deckt einen wesentlichen Teil des Bedarfs in Frankreich (ca. 85 % der elektrischen Energie stammen aus Kernkraftwerken), womit das Land in einigen Jahrzehnten vor einem erheblichen Umbau seiner Elektroenergieerzeugung stehen wird. Die Nutzung erneuerbarer Energien ist in Frankreich noch gering ausgeprägt und ergibt sich im Wesentlichen aus der Nutzung von Wasserkraft.

In Deutschland werden neben Kernenergie fossile Energien zur Deckung des hohen Bedarfs eingesetzt. Allerdings ist der Anteil erneuerbarer Energien relativ hoch und nimmt mit der Zeit zu. Die größten Verbrauchen liegen in den Bereichen Industrie, Wohnen und Gewerbe [11]. Trotz des relativ niedrigen Gesamtbedarfs stellen Öl und Kernenergie in der Schweiz wichtige Quellen dar. Aufgrund der Topografie wird aber auch Wasserkraft dort intensiv genutzt.

In Norwegen wird in hohem Maße Wasserkraft für die Stromenergieerzeugung verwendet. Der Anteil erneuerbarer Energien am gesamten Verbrauch ist außerordentlich hoch (Wasserkraft), was letztlich dazu geführt hat, dass die elektrische Energie sehr kostengünstig angeboten und daher traditionell umfänglich eingesetzt wird (hoher elektrischer Energiebedarf pro Kopf) [11].

Es liegt auf der Hand, dass Saudi-Arabien als wichtigstes öl- und gasexportierendes Land der Welt seinen Bedarf durch Öl und Gas deckt. Ein Grund dafür ist auch der relativ niedrige Preis von Energietransport bzw. Energieversorgung. Ein wesentlicher Anteil des Energieverbrauchs wird zur Kühlung von Wohnobjekten sowie Handels- und Gewerbeimmobilien genutzt.

Südafrika ist ein wachsendes Land und deckt einen Großteil seines Verbrauchs mit Kohle ab, gefolgt von Öl. Der Energieverbrauch wird dominiert durch den Verbrauch der Industrie, der doppelt so groß ist wie der aller anderen Energieverbraucher zusammen. In geringem Umfang wird elektrische Energie in benachbarte Regionen exportiert [11].

In Australien wird neben Kohle und Öl Biogas verwendet. Wasserkraft bzw. erneuerbare Energien werden nur zu einem kleinen Teil genutzt. In Zukunft sollte Australien seine menschenleeren und sonnenreichen Regionen im Norden zur Energieerzeugung durch Sonnenenergie nutzen.

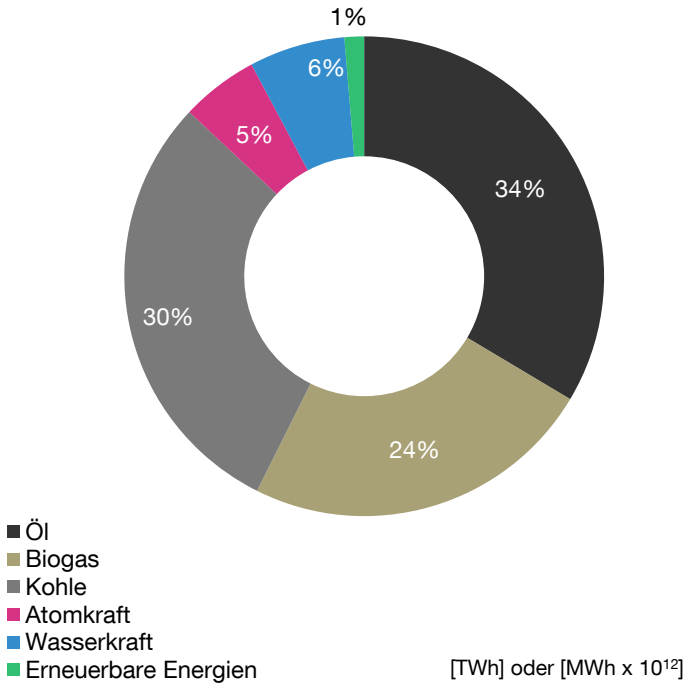


Abbildung 2.19 Verteilung der verschiedenen Energieträger beim Weltprimärenergieverbrauch [74]

Nach dieser ersten Analyse lässt sich feststellen, dass der Einsatz erneuerbarer Energien, insbesondere der Solarenergie, weltweit noch unterentwickelt ist [11]. Abbildung 2.19 zeigt, dass der Anteil der verwendeten erneuerbaren Energien lediglich 1 % beträgt. Zusammen mit Wasserkraft beträgt er 7 %.

2.1.3 Umstieg auf erneuerbare Energien

Ein Blick auf die Prognosen zum steigenden weltweiten Energieverbrauch sowie die Verfügbarkeit der Reserven fossiler Energieträger und Kernbrennstoffe führt die Notwendigkeit einer intensiven Suche nach Lösungen und der Realisierung nachhaltiger Energieversorgung drastisch vor Augen. Dieser angestrebte Paradigmenwechsel wird als Energiewende bezeichnet. Der Begriff war Titel einer wissenschaftlichen Arbeit zur vollständigen Abkehr von nicht erneuerbaren Energieträgern, die 1980 vom Öko-Institut veröffentlicht worden war [90].

Die Einhaltung globaler CO2-Emissionsreduktionsziele erfordert lediglich einen sorgsamen und rationellen Umgang mit Energie. Der Wechsel zu erneuerbaren Energien ist jedoch ein absolutes Muss, um künftige Krisen zu minimieren und vielleicht zu vermeiden.

Das Problem der künftigen Energiebereitstellung hängt mit dem Risiko eines Klimawandels sowie anderer Umweltschäden zusammen. Auch politische und wirtschaftliche Risiken sind immer entscheidende Faktoren. Während die Kosten für fossile Energie und Atomkraft immer teurer werden, nehmen die Kosten für die technischen Einrichtungen erneuerbarer Energien ab. Laut Marktberichten sind die Kosten erneuerbarer Energien in Deutschland in den letzten 15 Jahren um 50 % gesunken. Bis 2020 strebt die Branche eine weitere Kostensenkung von 40 % an, ermöglicht durch Massenfertigung und Technologiefortschritte [91].

Die Energiewende bietet viele Vorteile [92]:

- Vermeidung von Umweltschädigung bzw. Umweltverschmutzung beim Fördern nicht erneuerbarer Energieträger
- Vermeidung von Atommüll und von Risiken und Nebenwirkungen, die Kernenergie kurz- bzw. langfristig hat
- Verringerung der Treibhausgas- und Schadstoffemissionen
- Schonung von begrenzten Primärenergieressourcen
- Wirtschaftliche und politische Unabhängigkeit von Energieexporteuren, was auch politische Energiekrisen (z. B. Ölkrise) reduziert
- Vermeidung von Ressourcenkonflikten, z. B. Ressourcenkriegen
- Volkswirtschaftliche Vorteile durch eine langfristig betrachtet günstigere Energieversorgung
- Erhöhung der inländischen Wertschöpfung durch Verringerung von Energieimporten sowie durch das Angebot an neuen Arbeitsplätzen

Die politischen und technischen Herausforderungen beim Einstieg in die neuen Energieressourcen sollten nicht als Nachteile betrachtet werden, sondern als aktuelle Grenzen, die eventuell überwunden werden müssen.

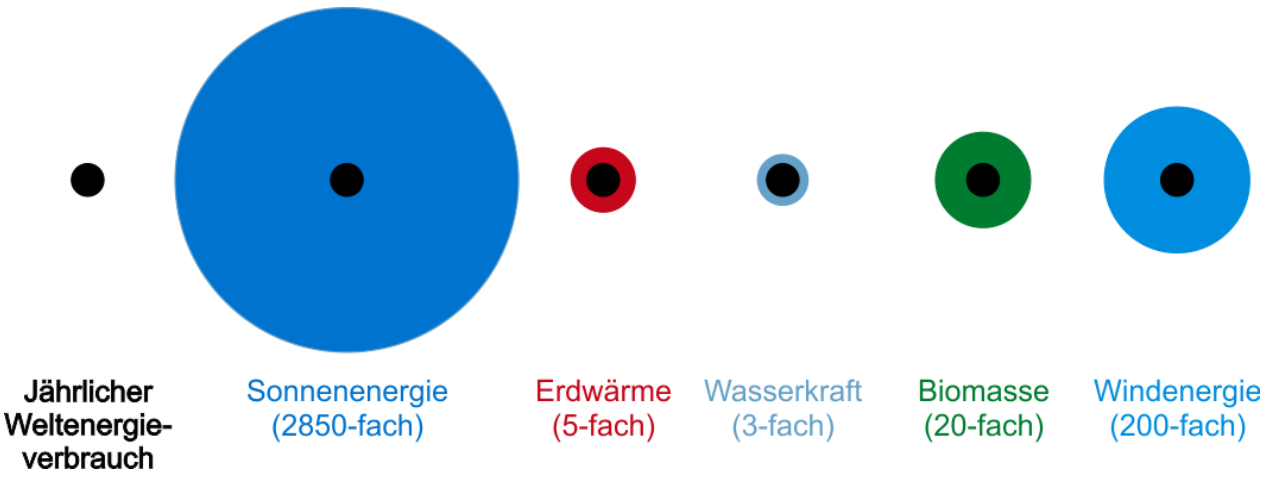


Abbildung 2.20 Natürliches Angebot erneuerbarer Energien [93]

Die Summe der verfügbaren erneuerbaren Energien ist vorrangig abhängig von den Phänomenen der Sonnentätigkeit, der Erdrotation und der radioaktiven Zerfallserscheinungen im Erdinneren. Physikalische Ableitungen wie Sonnenlicht, Wetter, Gezeiten und Temperaturen unterhalb der Erdoberfläche basieren auf diesen Systemen. Ein Überblick über das Angebot verschiedener Energieträger im Vergleich zum heutigen jährlichen Verbrauch wird in Abbildung 2.20 gezeigt. In dieser Studie wurde ein theoretisches Angebot an Solarenergie angenommen, das 2850-mal größer ist als der prognostizierte Primärenergiebedarf der Erde.

Selbst unter Berücksichtigung eines lediglich mittleren Wirkungsgrades von ca. 15 % überschreitet das Angebot der Sonne den Verbrauch um das 5-Fache. Wasserkraft hat zurzeit einen geringen Wirkungsgrad und kann nur ca. 10 % des weltweiten Bedarfs decken. Deutlich größer ist aufgrund der hoch angesetzten Wirkungsgrade bei der Umwandlung der Anteil der Energieerzeugung auf Basis von Biomasse. Bei konsequenter Anwendung kann der Weltenergiebedarf auch durch Wellen- und Meeresenergie gedeckt werden. Im Hinblick auf Windkraft wurde festgestellt, dass das Potenzial dem 200-Fachen des Verbrauchs entspricht.

Der Trend zum Umstieg auf erneuerbare Energien zeigt sich unter anderem im Projekt *DESERTEC*. Diese Initiative der Industrie hat zum Ökostromenergiehandel der *EUMENA*-Region (Europa, Naher Osten und Nordafrika) folgende Vision: Strom wird in Ländern mit hohem Angebot an erneuerbaren Energien erzeugt und in Länder geschickt, wo der Bedarf oder ein großer Teil davon nicht über das zur Verfügung stehende Angebot gedeckt werden kann. Die Entwickler der *DESERTEC Foundation* gehen davon aus, dass die 2- bis 3-fache Sonneneinstrahlung in Nordafrika die Transportkosten nach Europa mehr als ausgleicht. DLR-Studien (Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt) kommen zu der Einschätzung, dass die Kosten der Erzeugung inklusive Übertragung bei solarthermischen Kraftwerken zwischen 2020 und 2030 niedriger sein werden als die Kosten konventioneller Stromerzeugungstechnologien in Europa, die sich durch den Anstieg von Brennstoffpreisen und Umweltkosten immer weiter erhöhen. Planungs- und Genehmigungszeiten liegen im Ermessen der beteiligten Länder und könnten durch entsprechende Vorgaben der EU beschleunigt werden [94].

Das *DESERTEC*-Konzept integriert alle erneuerbaren Energien in ein transnationales Super-Grid, das heißt einen intelligenten Energiemix aus erneuerbaren Energien, die an den jeweils besten Standorten gewonnen werden:

- Solarthermie in Wüstenregionen
- Windkraft in Küstenregionen
- Wasserkraft in Bergen
- Photovoltaik in sonnigen Regionen
- Biomasse und Geothermie je nach geografischen Gegebenheiten

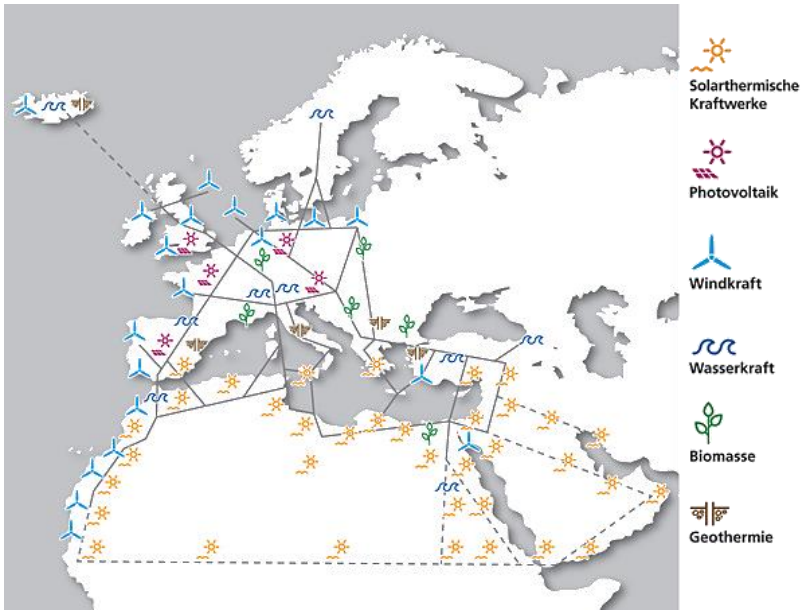


Abbildung 2.21 Potenzielles transmediterranes Verteilungsnetz [95]

Die Abbildung 2.21 zeigt zwei Phasen des potenziellen transmediterranen Verteilungsnetzes. Diese Vision bietet Lösungen zur Nutzung des zur Verfügung stehenden Angebots an Solarenergie in der MENA-Region, die in wirtschaftlich unterstützender und friedlicher Zusammenarbeit realisiert werden können. In Zeiten, in denen Gefahren von Klimawandel und Ressourcenknappheit jeden betreffen, ist es sinnvoll, gemeinsam über Lösungen nachzudenken, von denen alle profitieren können. Dieser Ansatz ist auch für die Golfstaaten eine große Chance: So können diese Länder ihre führende Position beim Energieexport behalten und ihre Weiterentwicklung sichern.

Angesichts steigender Preise fossiler Brennstoffe und politischer Instabilität in den Exportregionen hat der Umstieg auf erneuerbare Energien in Europa und den USA ab Mitte der 70er-Jahre begonnen. Eine Intensivierung der Nutzung wurde nach dem Unglück des Atomreaktors Tschernobyl 1980 mit erhöhter Motivation in Angriff genommen. Bis 1990 haben messbare Auswirkungen gezeigt, wie günstig und vorteilhaft die kontinuierliche Entwicklung war. Die Atomkatastrophe im japanischen Fukushima 2011 hat zur weiteren Kursänderung in der Atompolitik vieler Länder geführt. Ein Jahr danach hat z. B. auch Deutschland einen baldigen Ausstieg aus der Atomenergie beschlossen. Dies stellt eine gute Chance für Projekte dar, die sich auf den Export erneuerbarer Energien konzentrieren.

Der globale Überblick über den Energiemarkt zeigt, dass im Jahr 2009 erneuerbare Energien etwa 16 % des weltweiten Endenergieverbrauchs lieferten – dazu zählen Biomasse, Wasserkraft, Wind, Sonne, Erdwärme und Biokraftstoffe. Wasserkraft wächst mit einem Anteil von 3,4 % relativ langsam, aber auf einer breiten Basis. Alle anderen erneuerbaren Energien haben 2009 einen Anteil von rund 2,8 % erzielt und wachsen in vielen entwickelten Ländern sowie in einigen Entwicklungsländern sehr schnell [96].

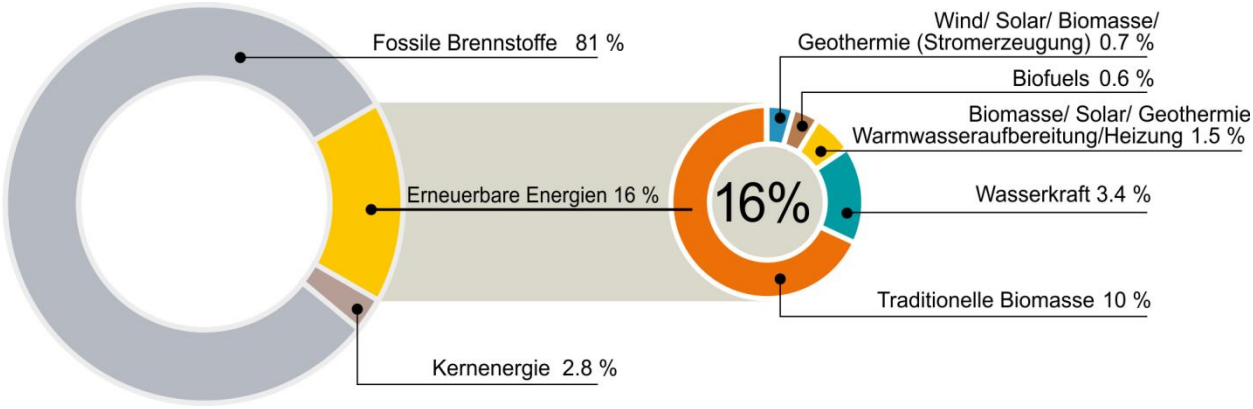


Abbildung 2.22 Anteil der verbrauchten erneuerbaren Energien weltweit 2009 (Endenergieverbrauch)

In mehreren Ländern stellen erneuerbare Energien einen schnell wachsenden Anteil an der gesamten Energieversorgung, einschließlich Wärme und Verkehr. Daten aus dem *REN21-Renewables Global Status Report* (GSR) geben Auskünfte über den Stand der Entwicklung im Bereich erneuerbarer Energien [96]. Zum Beispiel:

- In den Vereinigten Staaten betrug der Einsatz erneuerbarer Energien etwa 10,9 % der inländischen Primärenergie (verglichen mit 11,3 % Kernenergie), was einer Steigerung von 5,6 % gegenüber 2009 entspricht.
- China erweitert schätzungsweise die Kapazität für netzgekoppelte erneuerbare Energien um 29 GW auf insgesamt 263 GW, was einen Anstieg um 12 % gegenüber 2009 darstellt. Auf erneuerbare Energien entfielen rund 26 % der gesamten installierten elektrischen Leistung Chinas, 18 % der Generierung und mehr als 9 % des Endenergieverbrauchs in 2010.
- In Deutschland wurden 11 % des gesamten Endenergieverbrauchs aus erneuerbaren Quellen gedeckt: 16,8 % des Stromverbrauchs und 9,8 % der Wärmeerzeugung (meist aus Biomasse). Dabei entfielen 5,8 % des Kraftstoffverbrauchs auf den Transport. Windenergie bildete einen Anteil von fast 36 % der Stromerzeugung, gefolgt von Biomasse, Wasserkraft und Photovoltaik (PV).
- Mehrere Länder deckten im Jahr 2010 höhere Anteile ihres Strombedarfs mit Windkraft, darunter Dänemark (22 %), Portugal (21 %), Spanien (15,4 %) und Irland (10,1 %).

Ein Überblick über die Verteilung von weltweit installierten Leistungen im Jahr 2008 wird in Abbildung 2.23 dargestellt.

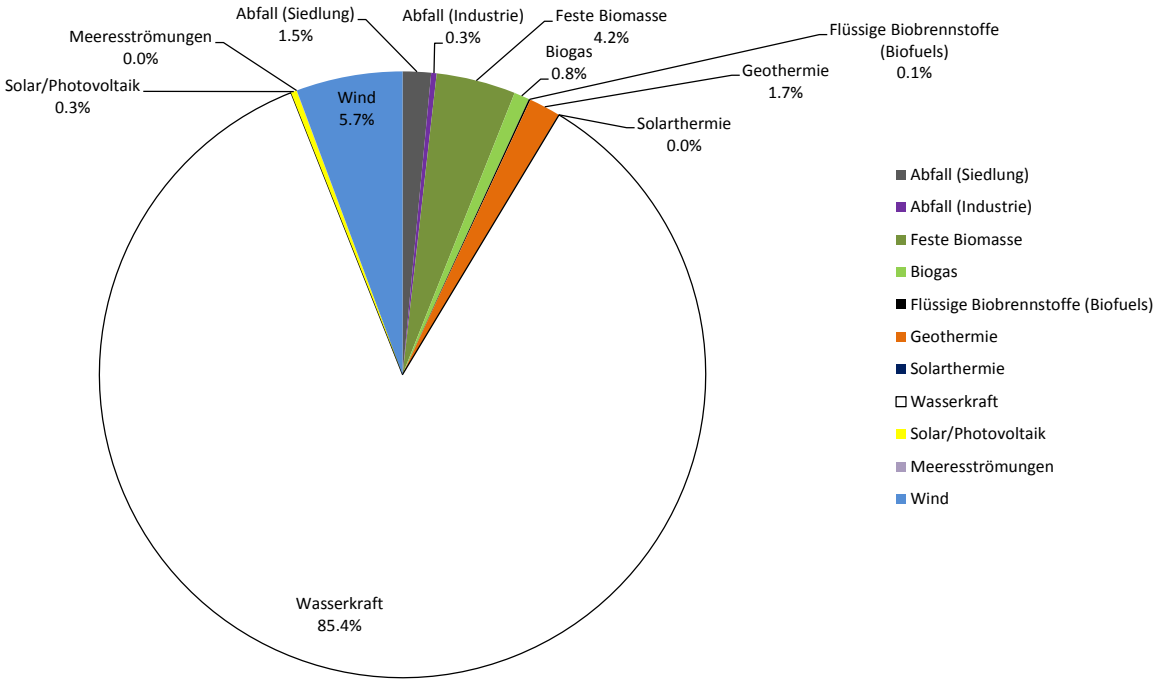


Abbildung 2.23 Verteilung der installierten Leistungen erneuerbarer Energien weltweit, Stand 2008 (Datenquelle: IEA Internationale Energieagentur)

Energieexperten des *Wissenschaftlichen Beirates der Bundesregierung* räumen der Solarenergie großes Potenzial ein. Der weltweite Energiebedarf in 100 Jahren könnte zum Großteil durch die Sonne abdeckt werden. Die Prognose wird in Abbildung 2.24 gezeigt.

In der oberen Grafik der Abbildung 2.24 wird die Deckung des geschätzten Primärenergiebedarfs durch verschiedene Energieträger für den Zeitraum 2000–2050 dargestellt. Im unteren Bild sieht man klar, wie sich der Anteil erneuerbarer Energien v. a. bis 2100 erhöht.

Die Kosten von fossilen Brennstoffen, Verzinsung, Abschreibungsdauer und betriebs- oder volkswirtschaftlichen Betrachtungen beeinflussen unter anderen wirtschaftlichen Faktoren die Rentabilität der Energieerzeugung erheblich. Das wirtschaftliche Potenzial erneuerbarer Energien hängt zudem auch zum großen Teil vom technischen Stand ab, der von Faktoren wie Herstellungskapazitäten, vorhandenen Konkurrenzsystemen, mangelnder Information sowie rechtlichen oder administrativen Hemmnissen teilweise stark eingeschränkt wird [6].

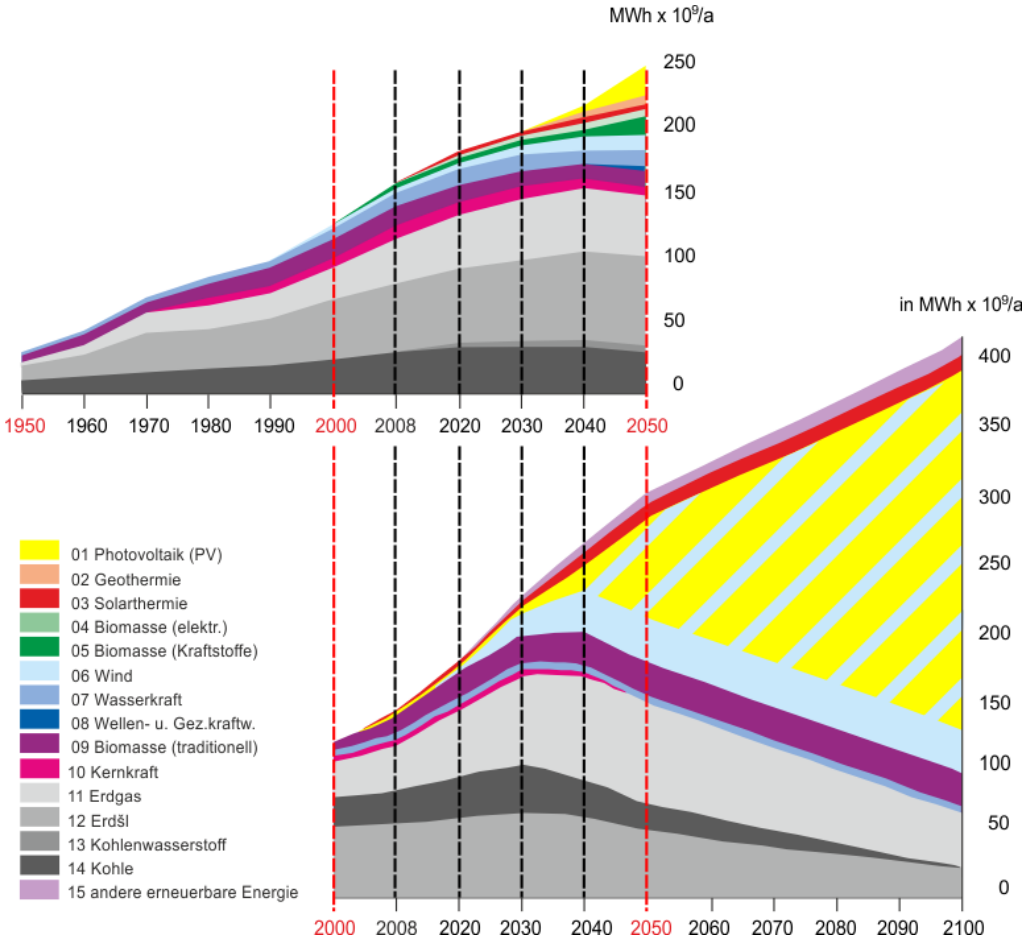


Abbildung 2.24 Oben: geschätzter Primärenergiebedarf und -deckung durch verschiedene Energieträger [97]; unten: Veränderung des weltweiten Energiemixes [98]

Um einen erfolgreichen Wechsel zu erneuerbaren Energien zu realisieren, ist es wichtig, die Entwicklung der Kosten der zukünftigen Energieproduktion zu betrachten. Die für die Erzeugung von Energie zu erwartenden Werte in €/kWh zeigen, dass die Energieerzeugung durch fossile Brennstoffe noch deutlich billiger ist. Die Steigerung der Effizienz ist der schnellste Weg, die Investition wirtschaftlich zu gestalten [11].

2.1.4 Handlungsbedarf im Bauwesen

Die bereits beschriebenen Krisenszenarien sind nicht länger abstrakte Phänomene, die irgendwann in der Zukunft stattfinden. Bereits heute sind die ersten Folgen zu spüren. Eine wissenschaftliche Arbeit hat sich in diesem Zusammenhang damit beschäftigt, inwiefern der Mensch Verantwortung für sein Handeln im Umgang mit der Natur trägt. Dabei wurde nach Ethik im ökologischen Sinne und Verantwortung gefragt. Es wurde festgestellt, dass der Mensch, sofern er in der Lage ist, Entscheidungsmöglichkeiten bei seinen Handlungen wahrzunehmen, zur Rechenschaft gezogen werden kann, wenn er sich wider besseren Wissens für eine nachteilige bzw. falsche Handlung entscheidet [99]. Unter Verantwortung wurde dabei nach Schubert in erster Linie die Zurechnung begangener Taten verstanden, sodass zunächst die Rechenschaft für etwas Getanes bzw. etwas Unterlassenes im Fokus steht [100].

Die Verhinderung von Krisen v. a. zum Schutz der nächsten Generationen gehört zum ethischen Verhalten eines Menschen bzw. einer Gesellschaft. Dies verlangt nicht nur ökonomischen Sachverstand, sondern auch gewissenhafte ethische Betrachtungen [101]. Insofern ist unter Berücksichtigung des Lebenszyklus eines Objektes immer wieder die Frage zu stellen, ob und inwieweit dieses Objekt krisenfest ist: Welche Rolle spielt das Objekt in einer zukünftigen Welt, die von vielen Krisen bedroht ist?

Im Baubereich ist das energieautarke Gebäude, das in Herstellungs-, Betriebs- und Abrissphase keine Umweltbelastung verursacht, ein ideales Objekt. Ein energiespendendes Gebäude stellt sogar einen noch wertvolleren Beitrag zur Schonung der Umwelt dar. Diese Korrekturarbeit im Bauwesen verwirklicht zwei der Grundnormen der Ethik, wonach man Anderen keine Schmerzen verursachen und niemanden unfähig machen soll. Ethische Überlegungen sollten im Bausektor auf allen Entwicklungsebenen erfolgen. Neben Architekten sind auch Bautechniker und Investoren zu beteiligen. Vielen Investoren ist es heute nicht mehr gleichgültig, mit welchen Anlageformen sie ihr Kaptal mehren: Neben reinen Renditegesichtspunkten sollen zunehmend auch Ethik und Ökologie eine besondere Rolle spielen [102].

Es ist unbestreitbar, dass der Bausektor heute ein großer Verursacher des Klimawandels ist. In den Industrienationen gilt, dass ca. 40 % der Gesamtenergie für den Betrieb von Gebäuden verbraucht werden. Klimatechnik zur Raumkonditionierung im Gebäude trägt dabei mit ca. 40–55 % zum Gesamtenergieverbrauch eines Gebäudes bei [103]. Wissenschaftler, die sich mit der Ökobilanz von Gebäuden beschäftigen, behaupten, dass rund 40 % der Treibhausgase aus Gebäudeerstellung und -nutzung resultieren. Hinzu kommen etwa 10 % Energieverbrauch für Materialherstellung, Bauprozesse sowie Transport von Baumaterialien. Der Bausektor verbraucht ca. 50 % aller von der Erde entnommenen Materialen. Hoch- und Tiefbau sind außerdem zu etwa 60 % am Abfallaufkommen beteiligt. Dadurch bietet der Baubereich ein enormes Einsparungspotenzial. Die Sicherung des heute erreichten Lebensstandards und die weitere wirtschaftliche, technische sowie gesellschaftliche Entfaltung sind in hohem Maße von einer verbesserten Energieeffizienz aller Gebäude und technischen Systemen sowie von einer dauerhaften klimaschonenden Energieversorgung abhängig [6].

Der Umgang mit den Materialien ist auch für den Lebenszyklus des Gebäudes entscheidend. Daher sollte zur Abfallreduzierung in der Bauphase eine intelligente Materialwirtschaft entwickelt werden, mit der Materialien eingespart und wiederverwendet werden.

Klimagerechte Bauten sind daran zu erkennen, dass das Gebäude mit verhältnismäßig geringer Technik ein zufriedenstellendes Raumklima erzeugt. Im Allgemeinen sind diese Gebäude relativ unauffällig und nicht an bestimmte Formen gebunden – Glashäuser sind es jedoch sicher nicht [104]. Grundlegende Voraussetzung für klimagerechtes Bauen ist die Anpassung an die Umweltbedingungen am Standort. Kriterien wie Standortwahl, Materialwahl, Wärmeschutz, technische Ausrüstung u. a. sollten sorgfältig geprüft werden. Daher ist es sehr wichtig, die Planung von Architektur und Technik nicht zu trennen. Die Auseinandersetzung mit dem Standort und seinen Gegebenheiten bietet viele Potenziale zur Optimierung, wobei die Nutzung der vor Ort verfügbaren erneuerbaren Energien besonders bedeutsam ist. Neben der Nutzung passiver Lösungen ist eine Synergie aus den verschiedenen beeinflussenden Parametern erforderlich, um integrale Lösungen zu erzielen. Die Herausforderung liegt im Erreichen von bestimmten Zielen wie menschlicher Behaglichkeit mit möglichst geringem technischen Aufwand.

Als Situationsbeschreibung lässt sich feststellen, dass Null- und Plus-Energie-Gebäude in Europa und weltweit mit steigender Tendenz als Gebäude oder Siedlungsprojekte realisiert und betrieben werden. In Europa gelten Null-Energie-Gebäude als die logische Fortsetzung einer langen Entwicklungskette vom Niedrig-Energie-Haus bis zum Passivhaus. Null-Energie-Gebäude erheben den Anspruch, den eigenen Energiebezug sowie die damit verbundenen CO_2-Emissionen in der Jahresbilanz vollständig auszugleichen. Ihr technologischer Vorteil gegenüber Autos besteht darin, dass Gebäude mit dem Stromnetz verbunden sind. In der Golfregion wird das ambitionierte Pilotprojekt der CO_2-neutralen Stadt Masdar verwirklicht. Die Funktionäre der Fußball-WM 2022 im arabischen Katar planen CO_2-neutrale Stadien. Ein Musterstadion mit 500 Sitzplätzen wurde bereits entwickelt und 2010 fertiggestellt. Die Basis sind Solarzellen und Parabolrinnenkollektoren neben dem Stadion, die die Energie für die solare Kühlung bereitstellen. Ohne Spielbetrieb speist das Solarkraftwerk Energie in das Netz ein, um bei Spielbetrieb den Spitzenbedarf des Stadions aus dem Netz zu decken [3]. Falls solarthermische Kühlung verwendet wird, stellt sich jedoch die Frage, wie mit der hohen Umgebungstemperatur zur Rückkühlung umgegangen wird.

Der Einsatz moderner Planungswerkzeuge ist eine wesentliche Maßnahme zum wirkungsvollen klimagerechten Bauen. Da die Planung kein linearer Prozess ist, ermöglicht integrale Planung durch Zusammenarbeit von verschiedenen Fachkräften eine Minimierung der Kosten, des technischen Aufwands und eventuell des Energieverbrauchs.

2.2 Wachstum und mangelndes Umweltbewusstsein in der subtropischen Klimaregion

Dieser Abschnitt beschäftigt sich mit der Klimazone, auf die sich die vorliegende Arbeit konzentriert: In der subtropischen Klimaregion können die Nebenwirkungen des unkontrollierten Wachstums sehr deutlich beobachtet werden. Mit dem Wachstum nimmt die Anzahl der Megacities zu, deren Folgen eine große Bedrohung für das Leben in der subtropischen Region darstellen. Der drastische Fortschritt in verschiedenen Ländern ist stark von nicht nachhaltigen Energieträgern abhängig. Die Pläne bezüglich einer Energiewende sind im Gegensatz zu den Wachstumsplänen relativ schwach ausgeprägt. Aufgrund des herrschenden heißen Klimas werden Gebäude mit hohem technischen und energetischen Aufwand klimatisiert. Sehr wenige Beispiele weisen eine Nutzung der verfügbaren erneuerbaren Energien auf. Obwohl Hochhäuser als Maßnahme zur Entlastung der Umweltressourcen betrachtet werden sollten, werden sie ohne Berücksichtigung der standörtlichen Gegebenheiten gebaut und nach den klassischen Prototypen in anderen Klimazonen gestaltet.

Daher ist es sinnvoll, Lösungsvorgaben für Beispielstandorte zu entwickeln. Im folgenden Abschnitt wird ein Überblick über die wesentlichen situationsbeschreibenden Themen gegeben, die im Zusammenhang mit dieser Arbeit stehen.

2.2.1 Lage und allgemeine Klimaeigenschaften

Infolge der Kugelform der Erde ergeben sich unterschiedliche Einfallswinkel der Solarstrahlung. Die geneigte Erdachse hat eine große Auswirkung auf die Temperaturen, was auch die unterschiedlichen Jahreszeiten verursacht. Diese Faktoren sowie die Erdrotation bestimmen zusammen mit der Wetterdynamik der Atmosphäre die klimatischen Bedingungen und Klimazonen auf der Erde.

Es gibt verschiedene Klimaklassifikationsmethoden. Eine davon ist die „ökophysiologische Klimaklassifikation“, die die erste integrative Klimaklassifikation darstellt. Sie vereint sowohl genetische Elemente des Klimas (genetische Klimaklassifikation) als auch effektive Elemente wie die aktuelle Bodenbedeckung (effektive Klimaklassifikation). Diese Klimaklassifikation wird oft für die Modellierung des Klimas und der globalen Erwärmung verwendet. Es können künftige Änderungen wie „Klima-Erdoberfläche-Vegetation" prognostiziert werden, die durch Grenzverschiebungen passieren [105]. Nach der ökophysiologischen Klimaklassifikation werden die Klimazonen in Tropen, Subtropen, Mittelbreiten und Polarregion differenziert.

Die subtropische Klimaregion liegt in der geografischen Breite zwischen den Tropen in Äquatorrichtung und den gemäßigten Zonen in Richtung der Pole, ungefähr zwischen 20° und 40° nördlicher bzw. südlicher Breite. Diese Gebiete haben typischerweise tropische Sommer und nichttropische Winter. Man kann sie in trockene, winterfeuchte und immerfeuchte Subtropen unterteilen. Nach einer weitverbreiteten Definition gilt das Klima dort als subtropisch, wo die Mitteltemperatur im Jahr über 20 °C liegt, die Mitteltemperatur des kältesten Monats jedoch unter der Marke von 20 °C bleibt [106].

Abbildung 2.25 Subtropische Klimazone der Erde [106]

Nach der Klimaklassifikation von Köppen und Geiger wird die subtropische Klimazone wiederum in vier Klimazonen unterteilt [107]:

- subtropisches Hochland (*Cwb*)
- mediterrane Klimazone
- feuchte subtropische Klimazone
- Halbwüsten-/Wüstenklimazone

Die prägenden Klimaelemente sind in den folgenden Punkten beschrieben:

- intensive direkte Sonnenstrahlung
- niedrige relative Luftfeuchte (ca. 10–50 %)
- sehr geringe durchschnittliche Niederschlagsmengen (ca. 0–250 mm pro Jahr), jedoch seltene Regenfälle mit kurzzeitig hohen Niederschlagsmengen
- hohe Lufttemperaturen am Tage (Maximaltemperaturen im Jahresdurchschnitt ca. 35–38 °C, Einzeltemperaturen in kontinentalen Wüstengebieten über 50 °C)
- mittlere, teilweise niedrige Lufttemperaturen bis zur Frostgrenze möglich
- hohe tägliche Temperaturschwankungen (durchschnittlich 20 K)
- unterschiedliche, teilweise starke Luftbewegungen, in Wüstengebieten als Sand- und Staubstürme
- geringe Bewölkungsdichte, meist klarer Himmel, zeitweise hoher Staubanteil der Luft

2.2.2 Bevölkerungszunahme und Megacities

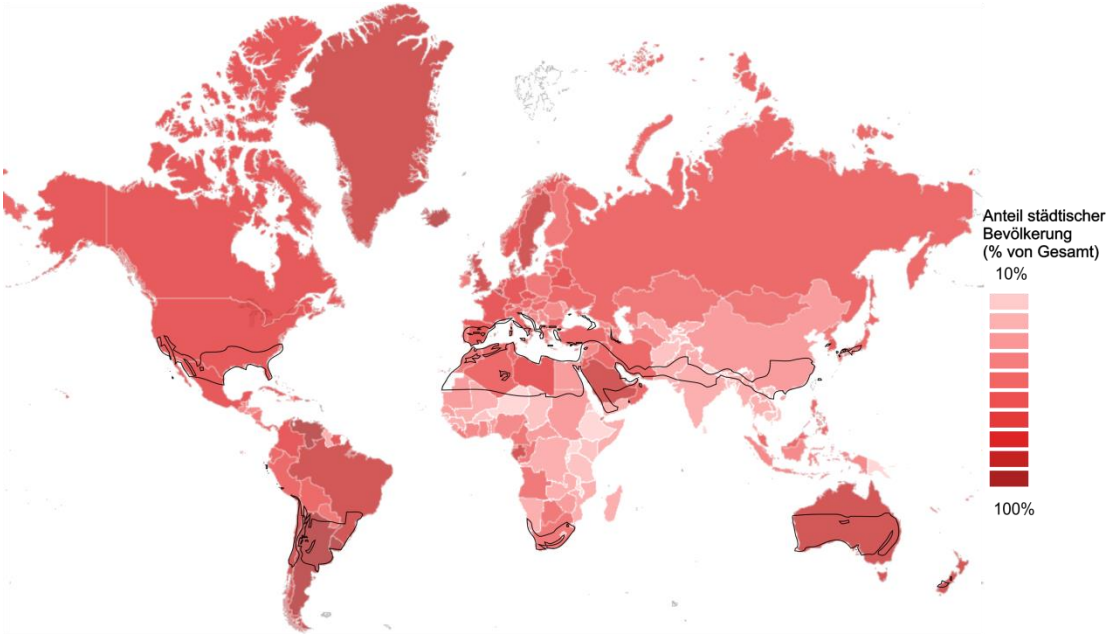


Abbildung 2.26 Anteil städtischer an gesamter Bevölkerung für die Periode 2006–2010 [108]; Die subtropische Region wird durch schwarze Linie hervorgehoben

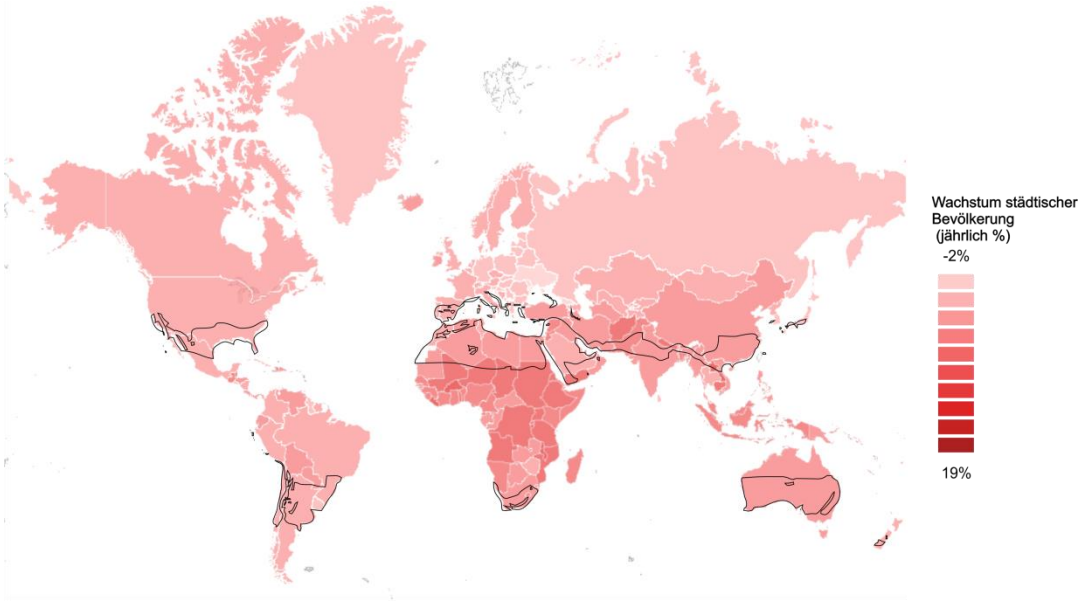


Abbildung 2.27 Jährliches Wachstum städtischer Bevölkerung in Prozent für die Periode 2006–2010 [108]; Die subtropische Region wird durch schwarze Linie hervorgehoben

Der in der Abbildung 2.26 dargestellte Anteil der städtischen Bevölkerung an der Gesamtbevölkerung ist für die subtropische Zone relativ hoch. Die Karte in Abbildung 2.27 zeigt das jährliche Wachstum städtischer Bevölkerung für jedes Land. Die beiden Grafiken machen deutlich, dass die Länder in der subtropischen Zone eine weitere Zunahme der städtischen

Bevölkerung erwarten. Nach den afrikanischen Ländern wächst die urbane Bevölkerung in den Ländern in den Subtropen am schnellsten.

Neben der Belastung der vorhandenen Infrastruktur hat dieses Wachstum offensichtliche Auswirkungen auf den Energiebedarf bzw. CO_2-Austoß, da in Städten grundsätzlich mehr Energie verbraucht wird als auf dem Land.

Als Megacity/Megastadt werden im Allgemeinen Städte bezeichnet, die mehr als drei (beziehungsweise je nach Definition mehr als fünf, acht oder zehn) Millionen Einwohner haben. Schon heute zeigen sich die Gefahren des Wachstums, wenn man eine der aktuell 30 Megastädte der Welt betrachtet. Die hohe Bevölkerungskonzentration in diesen Städten führt zu Problemen bezüglich Nahrung, Sicherheit sowie medizinischer und Energieversorgung. Im Katastrophenfall zum Beispiel ist die Evakuierung der Stadt beziehungsweise die Notversorgung der Bevölkerung ausgesprochen schwierig, da die Verkehrsinfrastruktur im Regelfall schon im Normalzustand überlastet ist und zudem oft noch nicht einmal genaue Zahlen über den Bedarf vorliegen, da die in einem Gebiet befindliche Bevölkerung meist nur grob geschätzt werden kann [109].

Megastädte befinden sich am häufigsten im asiatischen Raum und in Lateinamerika. Durch das enorme Wachstum in China sind 300 Millionen Menschen in Städte umgesiedelt. Ein Zuwachs um 500 Millionen wird bis 2050 erwartet. Chongqing ist mit 32 Millionen Einwohnern die größte Stadt der Welt. Die Fläche des Verwaltungsgebietes der Stadt ist mit 82.403 Quadratkilometern allerdings so groß wie der Staat Österreich (83.871 Quadratkilometer) [109].

Die Städte der Entwicklungsländer wachsen schneller als in den Industrieländern. Gemäß der Karte in Abbildung 2.27 sind die meisten Länder mit hohem Wachstum arme Länder, mit Ausnahme der Golfländer. Allerdings betreffen die Gefahren der Megastädte alle Länder unabhängig von ihrer wirtschaftlichen Lage.

1975 lebten etwa 37 % der Weltbevölkerung in Städten, bis zum Jahr 2009 nahm der Anteil auf 50 % zu. Schätzungen gehen davon aus, dass sich die Weltbevölkerungszahl bis 2030 voraussichtlich von 3,3 Milliarden vor ca. 35 Jahren auf rund 8 Milliarden erhöhen wird. Für das Jahr 2050 wird sogar eine Bevölkerungszahl von 9 Milliarden erwartet. In Asien, Afrika und Lateinamerika wird sich die städtische Bevölkerung dann innerhalb von 30 Jahren verdoppelt haben [73], [110].

Natürlich ist die Verstädterung nicht nur ein quantitatives, sondern auch ein qualitatives Phänomen. Ein urbaner Lebensstil kann sich nur entfalten, wenn es auch eine entsprechende politische, ökonomische und kulturelle Entwicklung gibt. Nur prosperierende Städte werden in der Lage sein, bis 2030 genügend Arbeit, Wohnraum und Infrastruktur für 1,8 Mrd. neue Stadtbewohner zu schaffen. Wo diese Voraussetzung nicht gegeben ist, werden riesige „Slumcities" entstehen, in denen es kaum mehr um Entwicklung, sondern nur noch um das bloße Überleben geht [111].

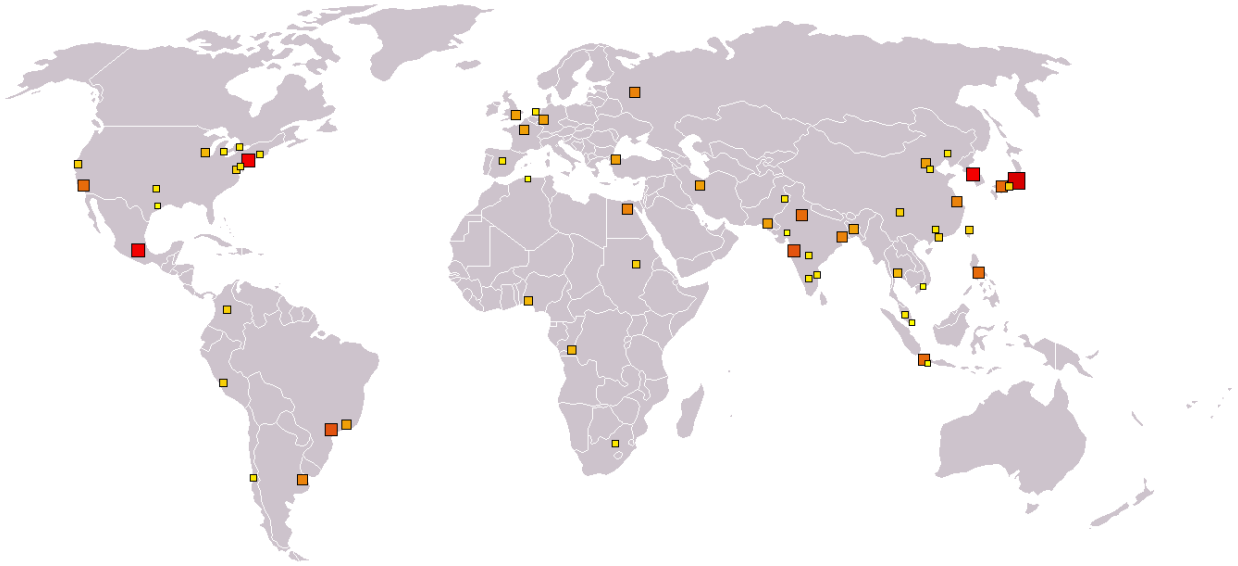


Abbildung 2.28 Verteilung der Megastädte weltweit [73]

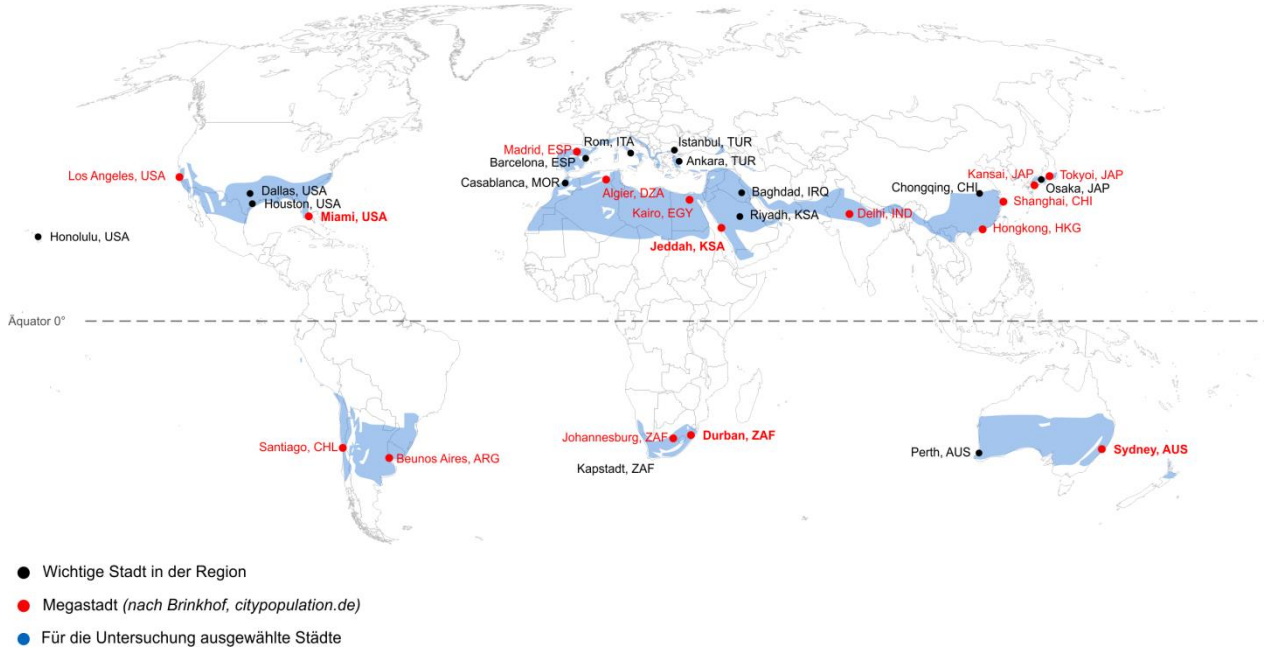


Abbildung 2.29 Wichtige Städte in der subtropischen Region

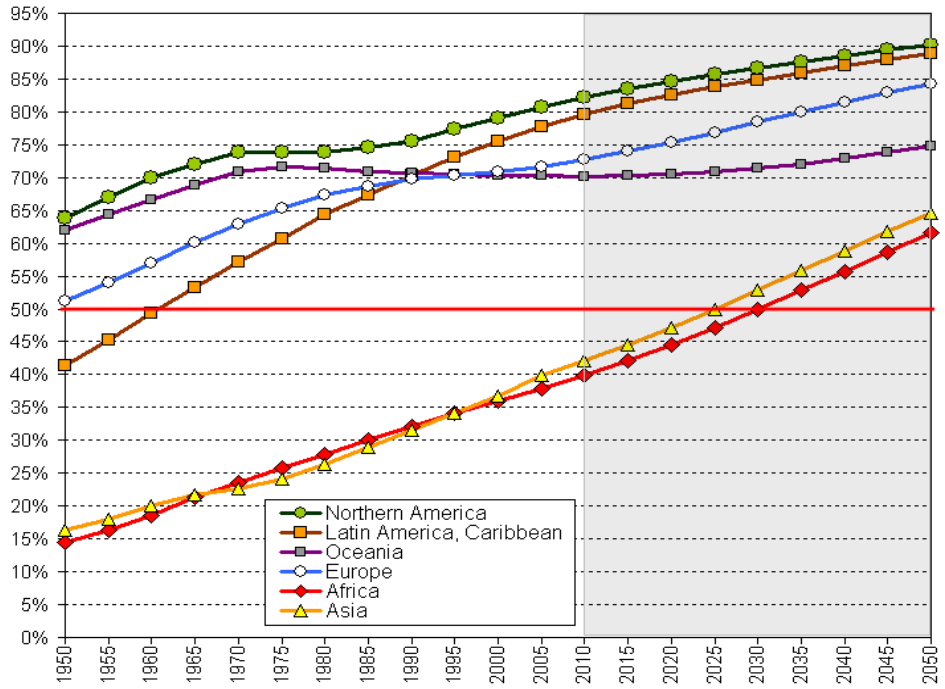


Abbildung 2.30 Städtische Bevölkerung nach Regionen (Anteil an der Gesamtbevölkerung in %)

Für 2050 gehen die UN-Statistiker von einer weitgehend städtischen Bevölkerung in den entwickelten Ländern und einer kontinuierlichen Zunahme in Asien und Afrika aus. Die subtropische Region ist stark verstädtert und weist eine Vielzahl an Verdichtungsräumen auf. Es gibt große Metropolen, die als Megastädte bezeichnet werden. Alle in Abbildung 2.30 erfassten Städte sind dann Millionenstädte bzw. wachsende Städte, deren geschätzte Einwohnerzahlen in der folgenden Tabelle aufgelistet werden.

Stadt	Land	Einwohner
Algier	Algerien	3.500.000
Ankara	Türkei	4.431.719
Baghdad	Iraq	11.786.000
Barcelona	Spanien	1.619.337
Buenos Aires	Argentinien	14.598.000
Casablanca	Marokko	3.672.900
Chongqing	China	28.846.170
Dallas	USA	6.477.315
Delhi	Indien	18.917.000
Jeddah	Saudi-Arabien	3.232.834
Durban	Südafrika	3.468.086
Hong Kong	Hong Kong	7.013.832
Houston	USA	2.099.451
Istanbul	Türkei	14.350.000

Stadt	Land	Einwohner
Kairo	Ägypten	16.429.000
Kansai	Japan	17.410.000
Kapstadt	Südafrika	3.497.101
Los Angeles	USA	18.014.000
Madrid	Spanien	3.273.049
Miami	USA	5.413.212
Osaka	Japan	2.670.726
Perth	Australien	1.658.992
Riyadh	Saudi-Arabien	6.800.000
Rom	Italien	2.761.477
Santiago	Chile	5.392.395
Shanghai	China	18.573.000
Sydney	Australien	3.641.422
Tokyo	Japan	37.730.000

Tabelle 2.1 Liste von Megacities in der subtropischen Klimaregion

Vertikales Bauen ist eine Maßnahme zur Verringerung des Fußabdrucks eines Gebäudes. Durch das große Flächenangebot verringert sich die horizontale Ausbreitung der Bebauung bzw. Infrastruktur, die zur Beeinträchtigung oder blanken Zerstörung lebenswichtiger natürlicher Grundlagen führt. Daher ist Verdichtung eine Maßnahme zur Erhöhung der Effizienz in Städten und v. a. in Megacities. Idealerweise sollte eine weitere Ausbreitung der Megacities verhindert und die Verdichtung der bestehenden Städte in den Fokus gerückt werden. In diesem Kontext spielen energieeffiziente und -generierende Hochhäuser eine entscheidende Rolle.

2.2.3 Energieverbrauch pro Kopf

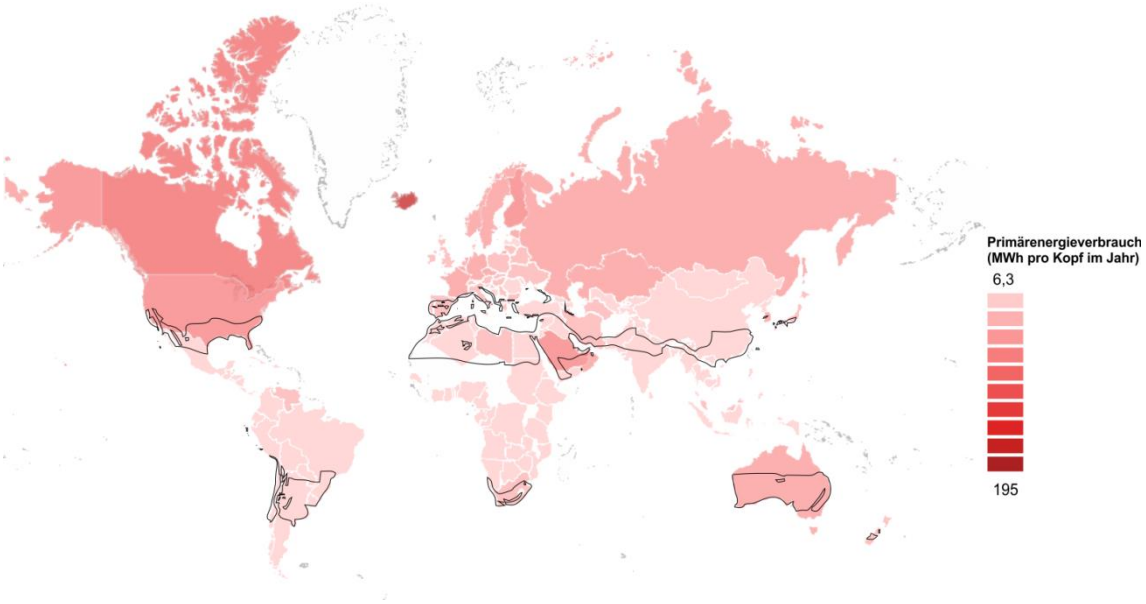


Abbildung 2.31 Primärenergieverbrauch (MWh pro Kopf) für die Periode 2007–2011 [108]; Die subtropische Region wird durch schwarze Linie hervorgehoben

Die oben stehende Grafik zeigt den Primärenergieverbrauch pro Kopf weltweit. Die Grenzen der subtropischen Klimaregion sind schwarz markiert. Die dargestellten Daten stammen aus der Forschungsabteilung der Weltbank und der *IEA (Internationale Energieagentur*).

Gemäß der Grafik ist der Energieverbrauch pro Kopf in der subtropischen Region relativ groß. Der anhaltende Wirtschaftsboom in Asien und der Golfregion führt zu einem wachsenden Energiebedarf. In der Golfregion liegt der Energieverbrauch bei 70 MWh pro Kopf und Jahr, was im Vergleich zu den anderen Gebieten relativ viel ist. In einem Industrieland wie Deutschland liegt der Wert bei 47.

Der Verbrauch wird mit der wachsenden Bevölkerungszahl enorm steigen. Der sich entwickelnde Wohlstand und die wachsende Wirtschaft werden ebenfalls dafür sorgen, dass der Energieverbrauch in den kommenden Jahren noch stärker zunimmt. Im Zusammenhang mit dem Klimawandel sind diese Prognosen extrem alarmierend.

2.2.4 Anteil fossiler Brennstoffe und erneuerbarer Energien

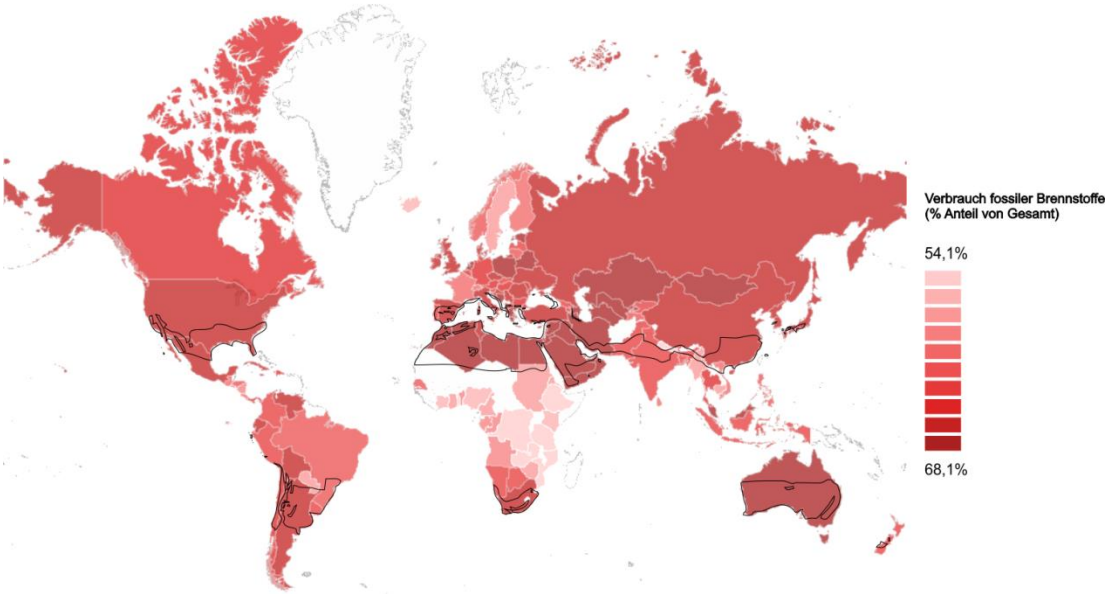


Abbildung 2.32 Anteil der verbrauchten fossilen Brennstoffe für die Periode 2006–2010 [108]; Die subtropische Region wird durch schwarze Linie hervorgehoben

Im Hinblick auf das Umweltrisiko und den künftigen Mangel an Ressourcen ist es wichtig zu wissen, wie groß jeweils der Anteil an fossilen Energien (Öl, Gas, Kohle, usw.) ist. Die Verteilung wird in Abbildung 2.32 veranschaulicht. Es wird deutlich, dass die Länder in den Subtropen einen sehr hohen Anteil an fossilen Brennstoffen aufweisen. Das heißt im Umkehrschluss, dass der Anteil der eingesetzten erneuerbaren Energien im Vergleich zu anderen Gebieten (z. B. Europa), sehr gering ist, was auch aufgrund der Knappheit der fossilen Ressourcen dringend geändert werden muss.

Bei fast allen Ländern in der betrachteten Region liegt der Anteil nicht erneuerbarer Energien bei ca. 100 %. Da viele dieser Länder Schwellenländer mit einer sich rasch entwickelnden Wirtschaft sind, ist es sinnvoll, konkrete Pläne für den Umstieg auf erneuerbare Energien zu entwickeln bzw. zu beschleunigen. Es ist äußerst wichtig, mit der vorhandenen Energie sorgfältiger umzugehen, d. h., die Energieeffizienz muss stark erhöht werden. Die Verhaltensweisen in den entsprechenden Gebieten müssen sich ändern, um Energie einsparen zu können. Die meisten Ölländer befinden sich auf dem sogenannten solaren Gürtel der Erde, wo die solare Einstrahlung am höchsten ist. Rein wirtschaftlich betrachtet ist es hier sinnvoll, das Öl zu exportieren und den eigenen Bedarf durch erneuerbare Energien abzudecken.

2.2.5 CO_2-Emission

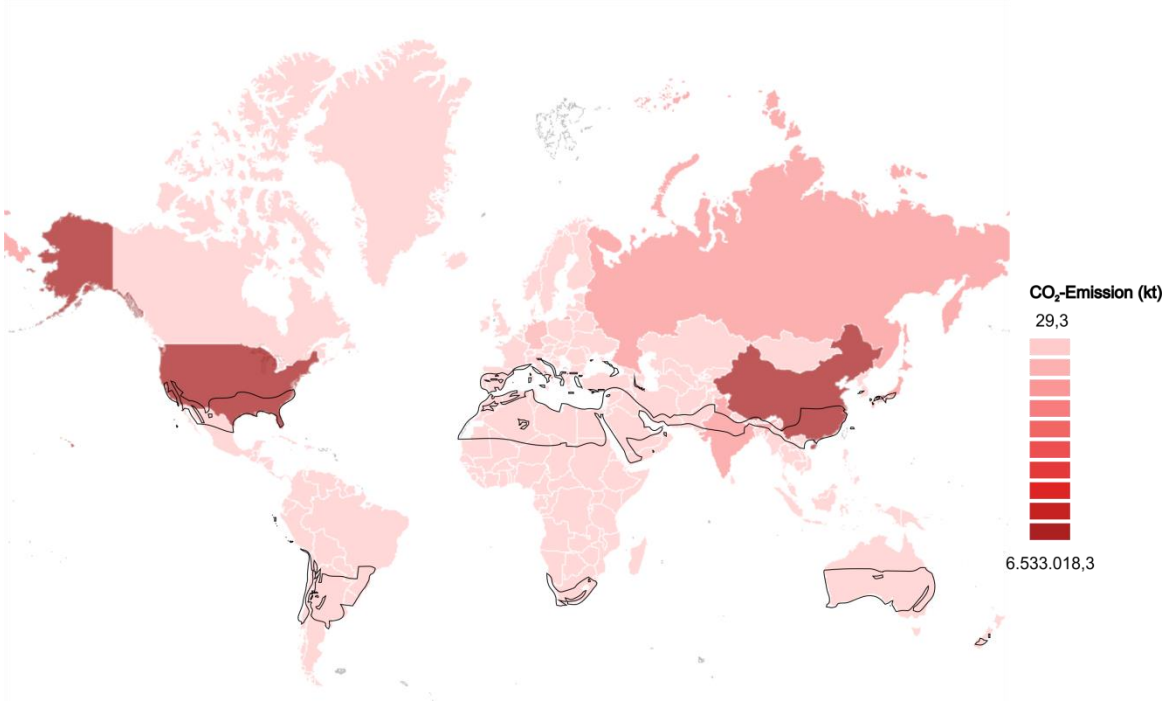


Abbildung 2.33 Jährliche CO_2-Emission (kt) der verschiedenen Länder für die Periode 2006–2010; Die subtropische Region wird durch schwarze Linie hervorgehoben

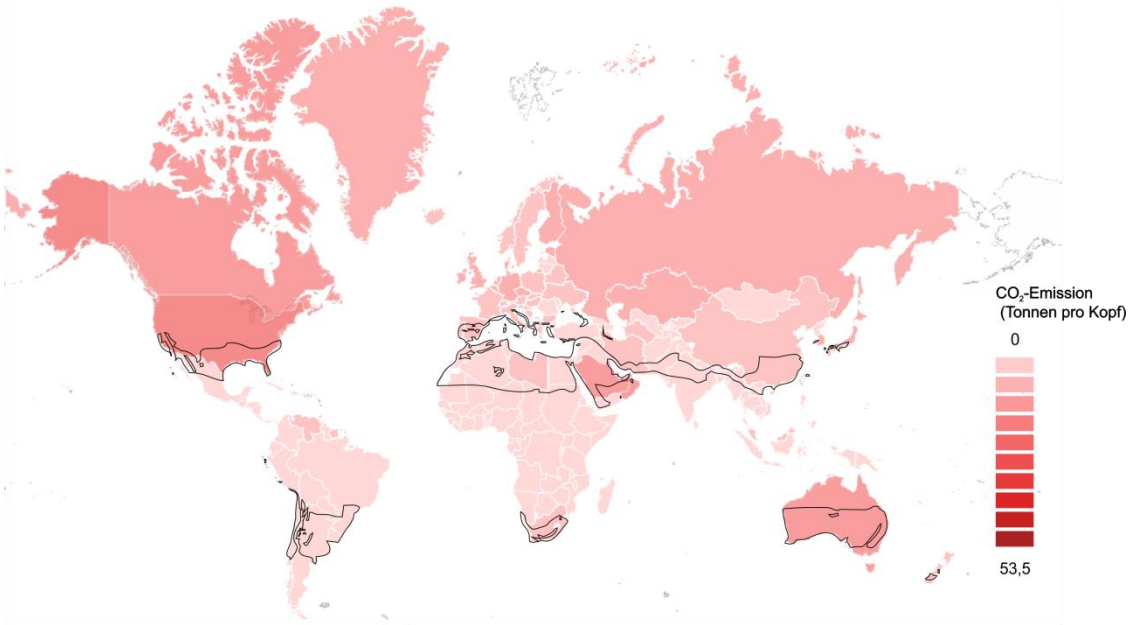


Abbildung 2.34 CO_2-Emission (Tonnen pro Kopf) für die Periode 2006–2010 [108]; Die subtropische Region wird durch schwarze Linie hervorgehoben

Bei der Verbrennung von fossilen Energien entsteht zwangsläufig das Treibhausgas Kohlenstoffdioxid (CO_2), dessen hohe Emissionen die Hauptursache für den gegenwärtigen Klimawandel sind. Obwohl nach Abbildung 2.33 viele Länder in den Subtropen aktuell keinen besonders hohen CO_2-Ausstoß verursachen, werden diese rasch wachsenden Länder aufgrund der in Abbildung 2.34 dargestellten hohen Pro-Kopf-Emissionen in der Zukunft höhere Emissionen produzieren.

Da der CO_2-Ausstoß mit dem fossilen Energieverbrauch eines Landes zusammenhängt, entspricht die Grafik in Abbildung 2.31 fast der aus Abbildung 2.34. Der CO_2-Ausstoß in den Golfländern, den USA und Australien liegt zwischen 20 und 25 Tonnen pro Kopf und Jahr. Zur Lösung des Klimawandels muss der Anteil an fossiler Energie möglichst stark und möglichst rasch verringert und der Energieverbrauch ganz allgemein reduziert werden.

Die Darstellung des CO_2-Ausstoßes pro Kopf ist nicht ganz exakt und sollte immer mit der gesamten Emission des Landes verglichen werden, da beispielsweise mit der schnell wachsenden Bevölkerungszahl in China der Ausstoß pro Kopf abnimmt. In China geht z. B. alle zwei Wochen ein neues Kohlekraftwerk ans Netz und lässt die CO_2-Rate steigen. Die Reduktion der CO_2-Emission in der subtropischen Region ist entscheidend, um die globalen Ziele der IPCC zu erreichen. Fast die Hälfte der weltweiten Kohleproduktion wird inzwischen in China gefördert und auch dort verbraucht [112]. Das Land hat seinen rasanten ökonomischen Aufschwung bislang vor allem mit Kohle befeuert: Fast 70 % der Primärenergie und 80 % der Elektrizität werden aus Kohle gewonnen [113]. Im Rahmen den ernsten Maßnahmen, die ergriffen werden müssen, sollte China einen Großteil seines Bedarfs für Gebäude durch erneuerbare Energien abdecken, da die meiste Kohle für Heizung genutzt wird.

Prinzipiell sollten die Länder in der subtropischen Region die Nutzung erneuerbarer Energie fördern, wobei energieeffiziente Gebäude im Vordergrund stehen sollten.

2.2.6 Natürliche Angebote an erneuerbaren Energien

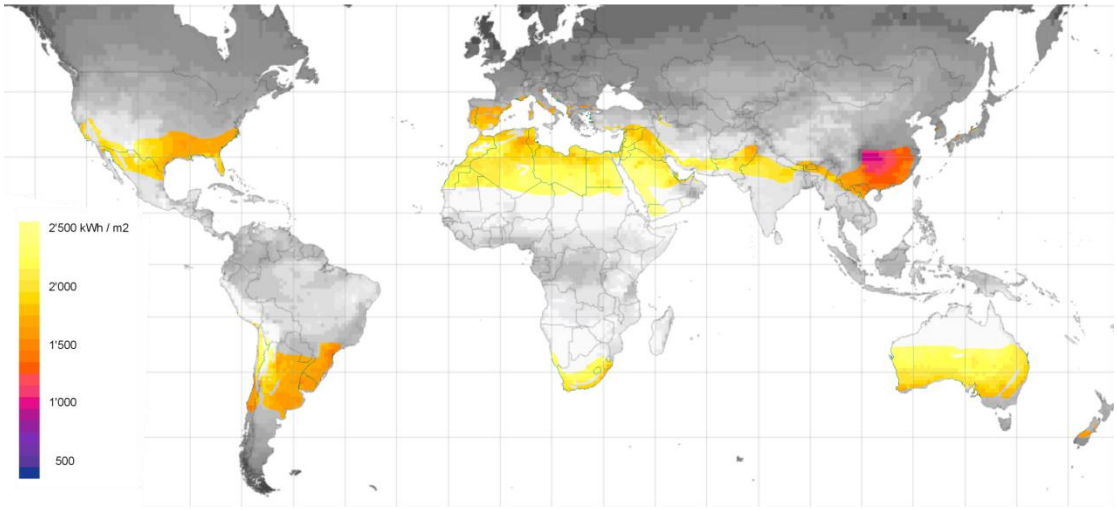


Abbildung 2.35 Globale Einstrahlung in der subtropischen Zone [39]

Die in Abbildung 2.35 dargestellten Einstrahlungsdaten geben Auskünfte zu der jährlichen Einstrahlung auf die horizontale Fläche in der subtropischen Zone. Die vorhandene Strahlung ist sehr vielversprechend und sollte zur Energieerzeugung durch solare Technologien ausgenutzt werden. In vielen Gebieten in den Subtropen liegt die globale Einstrahlung zwischen 2000 und 2500 kWh/m^2 pro Jahr. Darüber hinaus sollte der Strombedarf für Beleuchtung in diesem Gebiet relativ gering sein, was Einsparpotenziale bietet.

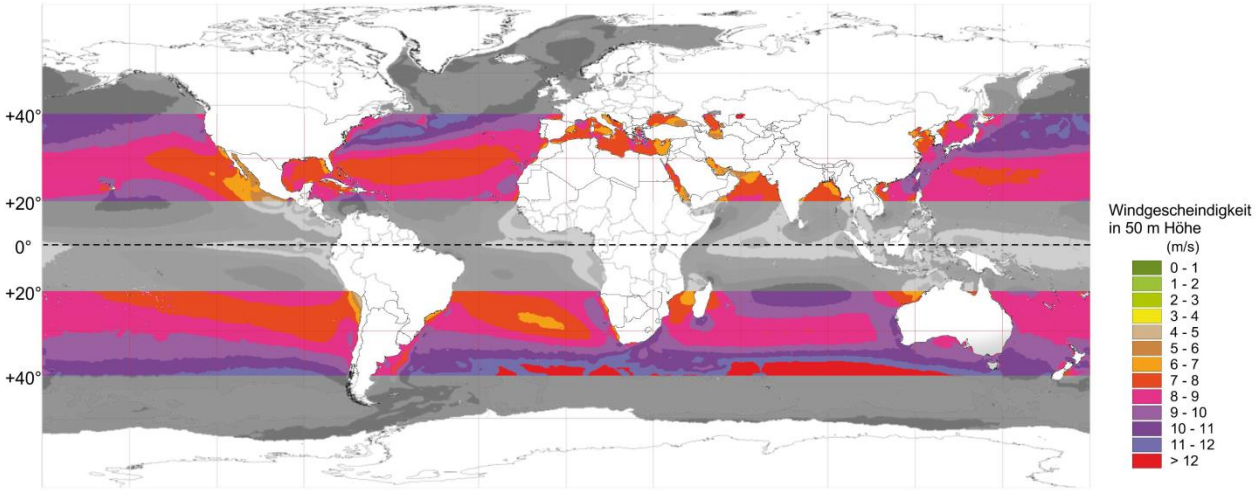


Abbildung 2.36 Durchschnittliche jährliche Windgeschwindigkeiten in 50 m Höhe [43]

Abbildung 2.36 zeigt die durchschnittlichen jährlichen Windgeschwindigkeiten an den Wasserflächen im subtropischen Gebiet in 50 Metern Höhe. Es zeigt sich, dass fast überall an den kontinentalen Küsten der subtropischen Region mittlere jährliche Windgeschwindigkeiten zwischen 6 und 10 m/s herrschen. Dies bietet große Potenziale zur Nutzung der Windenergie für

die Stromerzeugung. Offshorewindanlagen können an den Küsten sowie an hohen Gebäuden, die in den Küstenstädten stehen, installiert werden.

Anhand der beschriebenen Daten kann festgestellt werden, dass die Potenziale der Solar- und Windenergie in der subtropischen Klimazone hoch sind. Allerdings muss der Energiebedarf erheblich reduziert werden, um die Wirtschaftlichkeit der zu integrierenden Systeme zu erhöhen.

Es gibt noch andere Energieressourcen, wie Geothermie und Wellenenergie, die ausgenutzt werden können. Diese Arbeit beschränkt sich jedoch auf die zwei Energiequellen, deren Integration in das Hochhaus mehr oder weniger zur üblichen Praxis geworden ist. Die mögliche Energieerzeugung über die Hochhausfassade steht mit der Geschosszahl in Verbindung. Das gilt auch für Windenergie, deren Potenziale von der Körperhöhe bzw. -form bestimmt werden.

2.3 Potenziale und Grenzen des Hochhauses im Kontext des umweltbewussten Bauens

2.3.1 Das Hochhaus als Feld für Innovation

Bauen in die vertikale Achse war und ist ein Feld für technische Innovationen. Neben Strukturinnovationen hat die Entwicklung und Optimierung der Aufzugtechnologie viel zum Hochhausbau beigetragen. Wichtig waren auch finanzielle Lösungen, die die Ausdehnung der industriellen Kapazitäten in vielen Projekten ermöglicht haben.

Heute, in Zeiten von akuten Umweltproblemen, stellt sich die Frage, welche Aufgaben das Hochhaus der Zukunft neben Stadtverdichtung erfüllen sollte und wie es entwickelt werden sollte, um diese Aufgaben zu erfüllen. Angesichts der Hochhauskontroverse gibt die Betrachtung der Potenziale für effiziente Stadtentwicklung dem Bautyp Hochhaus neue Chancen, zu überleben. Raum für Innovationen ist im Lebenszyklus des Hochhauses noch in vielen Phasen gegeben. Ein Beispiel ist der *Bank of America Tower* in New York, dessen Tragwerk aus wiederverwendeten Stahlaschen ehemaliger Gebäude gegossen worden ist.

Nach Eisele gilt: je höher das Bauwerk, desto geringer die Spielräume in Form und Gestalt. Ab einer bestimmten Höhe dominieren vor allem Tragwerk und Brandschutzaspekte den Grund- und Aufriss sowie die Auswahl der Materialien. Es kann festgestellt werden, dass die Europäer heute an erster Stelle nach umweltfreundlichen Hochhäusern suchen [114]. Der Rahmen für Innovation sollte mit Bezug zu den Grundproblemen gesetzt werden, nämlich Bevölkerungswachstum, Land- und Ressourcenverschwendung und Energieversorgung. Das Hochhaus der Zukunft sollte zur Lösung dieser drei Grundprobleme beitragen.

2.3.2 Kriterien zur Definition des Hochhauses

Höhe – Wann ist ein Gebäude ein Hochhaus?

Der Begriff „Hochhaus“ ist eine im allgemeinen Sprachgebrauch übliche Bezeichnung für ein hohes Gebäude. Es gibt verschiedene Methoden zur Definition eines Hochhauses. Trotzdem wird oft behauptet, dass eine eindeutige und absolute Definition kaum möglich sei [114].

In Deutschland hat man sich darauf geeignet, dass sicherheitstechnische Aspekte ein Gebäude bauaufsichtlich als Hochhaus definieren [114]. Es ist der Aspekt des notwendigen Brandschutzes, und zwar der wirksame Einsatz von Drehleitern, der zu der folgenden Festlegung in der Musterbauordnung der *ARGE-BAU* und demzufolge in den einzelnen Länderbauordnungen (z. B. der hessischen Länderbauordnung, § 2) führte:

„*Hochhäuser sind Gebäude, in denen der Fußboden mindestens eines Aufenthaltsraums mehr als 22 m über der natürlichen oder festgelegten Geländeoberfläche liegt*.“

Forscher des *CTBH (Council on Tall Buildings and Urban Habitat)* versuchen ebenfalls, auf die Frage zu antworten, ab wann ist ein Gebäude ein Hochhaus ist. Sie haben festgestellt, dass die Höhe als Hauptkriterium verwendet werden kann, das sich wiederum in folgende Unterkriterien gliedern lässt [115]:

- Höhe relativ zum Kontext

Es geht nicht nur um die Höhe eines Gebäudes, sondern um den Kontext, in dem es existiert. Das heißt, während ein 14-stöckiges Gebäude in einer Hochhausstadt wie Chicago oder Hongkong nicht als Hochhaus bezeichnet wird, wird es in einer europäischen Stadt oder am Stadtrand Hochhaus genannt.

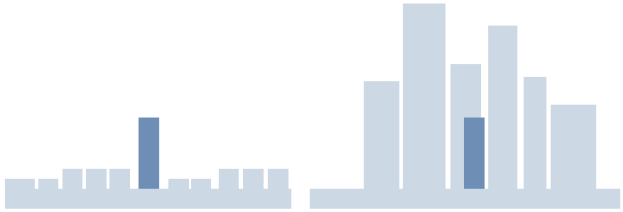


Abbildung 2.37 Höhe relativ zum Kontext [115]

- Proportionen

Auch die Proportion ist entscheidend bei der Definition des Hochhauses. Es gibt zahlreiche Gebäude, die nicht besonders hoch sind, aber schlank genug, um den Eindruck eines großen Gebäudes, vor allem gegen einen niedrigen städtischen Hintergrund, zu prägen.

Umgekehrt gibt es zahlreiche Gebäude mit großer Grundfläche, die ziemlich hoch sind, aber aufgrund ihrer Größe/Fläche nicht als Hochhaus eingestuft werden.

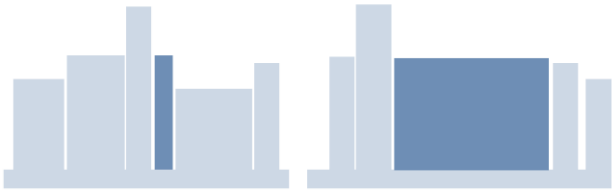


Abbildung 2.38 Proportionen [115]

- Im Hochhaus aufgrund seiner Höhe angewandte Technologie (z. B. Aussteifungssystem, Sondertransportkonzept, etc.)

Wenn ein Gebäude Technologien enthält, die zur Lösung eines von der Höhe verursachten Problems dienen (z. B. spezifische vertikale Transporttechnologien, Aussteifungssystem gegen Windlasten), wird dieses Gebäude als Hochhaus eingestuft.

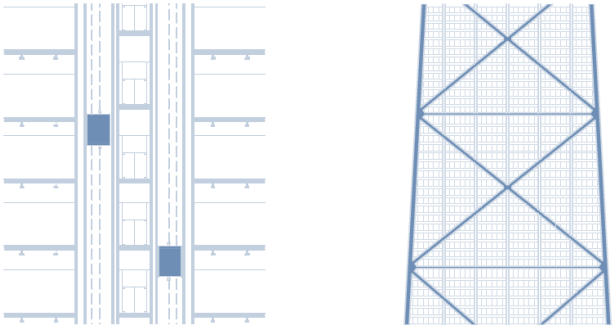


Abbildung 2.39 Technologie im Hochhaus aufgrund der Höhe [115]

- Anzahl der Geschosse (ab 14 Geschosse)

Obwohl die Anzahl der Stockwerke aufgrund der je nach Gebäude und Funktion unterschiedlichen Höhe (z. B. Büro gegenüber Wohnnutzung) ein schlechter Indikator für die Definition eines hohen Gebäudes ist, könnte ein Gebäude, das 14 oder mehr Geschosse aufweist oder über 50 Meter (165 Fuß) hoch ist, vielleicht als Hochhaus bezeichnet werden.

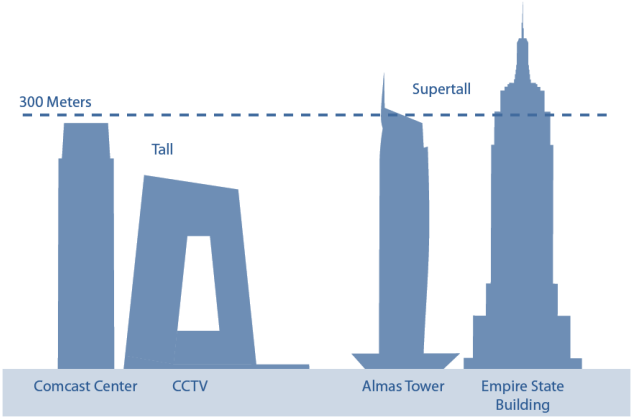


Abbildung 2.40 Super-Hochhaus [115]

- Super-Hochhaus/Super Tall Building

Der CTBUH definiert Gebäude, deren Höhe 300 Meter überschreitet, als Super-Hochhäuser. Im Rahmen dieser wissenschaftlichen Arbeit werden Super-Hochhäuser nicht berücksichtigt.

2.3.3 Form der Stadtverdichtung

Es ist bewiesen, dass Gebäude und Verkehr mehr als ein Drittel des weltweiten CO_2-Ausstoßes verursachen. Neben Ressourcenerschöpfung erhöhen die sich horizontal ausdehnenden Städte nicht nur den Landverbrauch und den Bedarf an Infrastruktur, sondern den Energieverbrauch für die Mobilität in der Betriebsphase. Daher stellt sich die Frage, ob sich in Zeiten akuten Klimawandels und Ressourcenmangels die Erhöhung der Dichte als vernünftige Lösung anbietet.

Die Potenziale der Stadtverdichtung wurden im Rahmen der Bebauungsstudie *Wachstum Nach Innen – Beispiel München* untersucht. Dabei wurde festgestellt, dass die dichte Stadt eine gute Möglichkeit ist, vorhandene Ressourcen bestmöglich zu nutzen [116].

Die Mischung der Funktionen im engen Stadtkreis ist ein wichtiger Ansatz zur erfolgreichen Stadtverdichtung. Die Funktionsmischung sollte sich dabei in die baulichen Strukturen einbinden lassen. Ein grundsätzlicher Vorteil der Verdichtung ist, dass die Distanzen zu den verschiedenen Einrichtungen kurz genug für Fußgänger sind, was zu einer erheblichen Verringerung des motorisierten Verkehrs führt. Ein weiterer Effekt sind Einsparungen in der Infrastruktur im Hinblick auf Investitionskosten und Instandhaltungsaufwand [117].

Die heutige und künftig rasant steigende Bevölkerungsentwicklung bedeutet auch schnelle Entwicklungen in den Siedlungs- bzw. Arbeitsflächen und v. a. Verkehrs- und Infrastrukturflächen. Im Kontext der Schonung von Ressourcen und des effizienten Landverbrauchs eröffnet die Verdichtung große Potenziale. Allerdings muss sie auch qualitativ betrachtet werden. Das heißt, die Verdichtung muss insbesondere darauf hinauslaufen, Grün- und Waldflächen zu schonen, besser gar zu gewinnen. Nutzungsmischungen, Gebrauchswert, Attraktivität des Wohn- und Arbeitsumfelds und v. a. anspruchsvolle Architektur sollten der Ausgleich für die Beschränkungen in der Grundfläche sein [118].

Das Hochhaus als Bautyp ist prinzipiell nichts anderes als eine Form der Stadtverdichtung. Es handelt sich im Endeffekt um eine Vielzahl von gestapelten Räumen, die die Ressourcen eines Grundstücks konzentriert nutzen. Das Konzept der Funktionsmischung als Weg zur Verdichtung begann im 20. Jahrhundert in New York. Heute kann auch im asiatischen Raum festgestellt werden, dass Hochhäuser Kinos und Restaurants enthalten, damit die Stadtquartiere nachts nicht leer bleiben. Durch die Nutzungsmischung tauchen für die Planer neben Tragwerk und technischen Problemen weitere Probleme auf, nämlich soziale Aspekte, die sie berücksichtigen sollten.

An Hochhäuser werden im verdichteten urbanen Raum besondere Anforderungen bezüglich der Beschattung benachbarter Gebäude gestellt. Mögliche Beeinträchtigungen der angrenzenden Bebauung in ihrer passiven und aktiven Nutzung der Solarenergie müssen bei der Planung ebenso berücksichtigt werden wie die solare Optimierung des Hochhauses selbst [119]. In warmen Regionen kann die Beschattung als Vorteil betrachtet werden, da sie zur Verminderung des solaren Eintrags über die Fenster beiträgt.

Aus konstruktiver Sicht erfordern Hochhäuser einen erheblichen Aufwand für die Erstellung der Baugrube und des Fundaments. Die Kernfläche für die Gebäudeinfrastruktur beeinflusst das Verhältnis zwischen Netto- und Bruttogeschossfläche negativ. Daher sind rein rechnerisch zur Optimierung der urbanen Dichte mehrere niedrige Hochhäuser effizienter als ein einziges besonders hohes [119]. Diese Tatsache steht mit einigen Parametern der Energieerzeugung (z. B. über Wind) im Zielkonflikt, was Potenziale zur Optimierung eröffnet.

Ursprünglich war die Nähe zu Gott der Hauptgrund für den Bau des Turms zu Babel 562 v. Chr. Verdichtung war der wesentliche Antrieb für den Bau von Hochhäusern in Chicago gegen Ende des 19. Jahrhunderts. Die rasante Zunahme der Bevölkerung (1850: 30.000 Einwohner, 1890: 1 Million, Ende des 19. Jahrhunderts: 1,7 Millionen) übte einen enormen Druck auf das Baugeschehen aus. Wegen Bodenknappheit und -spekulation war das Bauen in die Höhe eine logische Konsequenz. Nicht Machtdemonstration, sondern ökonomische Zwänge beeinflussten die Höhenentwicklung auf kleinstem Grund. Dies zog die Erfindung des Aufzugs durch Otis nach sich. Erst später und speziell in New York entstehen Hochhäuser auch mit dem Anspruch der Bauherren, ihren wirtschaftlichen Erfolg und die damit verbundene Macht zu demonstrieren [114]. Allerdings ist die Frage nach den wirklichen Entscheidungsimpulsen für die vertikale Dimension des Bauens noch offen. Im Endeffekt entsteht dieser Bautyp aus einer komplexen Mischung aus Soziologie, Technik- und Innovationsgeschichte, Bauästhetik und Ökonomie [120].

Das Hochhaus ist heute umstritten und es finden Debatten über seine Notwendigkeit statt. Die kontroversen Meinungen über Hochhäuser werden in der folgenden Tabelle zusammengefasst. In einer Forschungsarbeit stellt Wood einige Potenziale des Hochhauses den kritischen Nachteilen gegenüber, die von Roaf zusammengestellt worden waren [121], [122].

Kontra Hochhaus	**Pro Hochhaus**
Hoher körperverbundener Energieaufwand durch Tragwerk, Materialen etc.	Dichtere Städte = **reduzierter Transport**, was Potenziale für die Umwelt bietet
Hoher Energieverbrauch im Betrieb durch Aufzüge (15 % der Energie), Technik etc.	**Effiziente Bodennutzung durch Konzentration der Bevölkerung** = reduzierte vorstädtische Ausbreitung bzw. Verluste von Landschaft
Hoher Energieverbrauch für Instandhaltung und Reinigung (z. B. Ersatz von Fassadenteil)	**Dichte Städte** = Verkleinerung der Infrastrukturnetze (Stadt/Vorstadt, Strom, Abfall etc.)
Nachteile auf der städtebaulichen Ebene durch Wind, Zugluft, Sonnenrechte, Windrechte, Nachbarschaftsbeschattung etc.	Nähe von Wohn- und Arbeitsplatz = weniger Fahrzeit (weniger Zeitverschwendung)
Überbevölkerung in einigen Orten/ größere Nachfrage nach den bestehenden öffentlichen städtischen Infrastrukturnetzen	Mehrere Möglichkeiten für gemischte Nutzung = weniger Reisen
Antisoziale interne Umwelt – Fehlen von offenen, Erholungs- und kommunalen Räumen (vor allem im Wohnungsbau)	Standardisierung der Geschossdecken und der Verwendung von Materialien = **Materialeffizienz** (Vorfertigung)
Große Windlasten in der Höhe (Auswirkungen auf das Tragwerk, Fassadengestaltung, etc.)	**Hohe Windgeschwindigkeiten in der Höhe** = größeres Potenzial zur Nutzung der Windenergie
„Luftdichte Umgebung" in der Höhe; Bedarf an Klimaanlage, künstlicher Beleuchtung etc.	**Hohe Atrien/Volumen des Raumes** = Potenzial für eine natürliche Belüftung durch verstärkten Kamineffekt etc.

Wenig Netto-Nutzfläche auf Bruttofläche und begrenzte Innenplanung, vertikaler Transport, Kern etc.	**Hohe „thermische Speichermasse"** = Potenzial für Kühlung und Lüftung
Sicherheit und Gefahrenabwehr/Ängste (vor allem nach 9/11), einschließlich der Sicherheit während der Bauphase	**Lange, schmale Geschossdecken** = Potenzial für gutes internes Tageslicht (und damit wenig Energieverbrauch)
Niedriges Verhältnis von externer Gebäudefläche pro Wohnraum – Auswirkungen auf das Potenzial für Solarmodule etc.	**Raum im Himmel** = Potenzial für die Schaffung sicherer kommunaler Freizeiträume, abseits von Verkehr, Umweltverschmutzung usw.
Folgen eines Stromausfalls (Auswirkungen auf den Strom, Sicherheit etc.)	Potenzial für eine **effizientere Energieerzeugung** und -verteilung
Erhöhte Fahrzeit (verlorene Zeit)	Städtische Verdichtung erhöht den Wert der Grundstücke bzw. der Städte
Die Menschen leiden an Schwindel/Bereich der **Menschenrechte**	**Urbane Beschilderung**/Wegfindung durch Landmarks
Potenziale für die Wiederverwertung/ **Städtische Auswirkungen des Abreißens**/ Entsorgung von Materialien nach dem Abriss	Verbesserung des Überblicks, Licht und Luft in der Höhe

Tabelle 2.2 Meinungen für und gegen Hochhäuser (eigene Erarbeitung) [121], [122]

Selbstverständlich sind die Kosten für den Bau eines Hochhauses höher als bei einem Flachbau. Laut einer Studie des *CTBUH Journal* spielt die Bauform eine wesentliche Rolle für die Kosten, da viele andere Parameter von dieser abhängig sind. Tragwerk, Fassade und Haustechnik für Lüftung, Kühlung und Heizung sind die teuersten Elemente im Hochhaus. Nachfolgend sind die Hauptparameter, die die Baukosten beeinflussen, aufgeführt [123]:

- Höhe, Form bzw. Geometrie
- Größe und Flächeneffizienz der Geschosse
- Tragwerkkonzept
- Fassadeneigenschaften
- Integration von umweltfreundlichen Strategien
- Eigenschaften und Grenzen des Standorts

- Finanzielle Marktbedingungen
- Strategie des vertikalen Transports: Anzahl der Aufzüge, Geschwindigkeit, Anordnung im Gebäude

2.3.4 Die Aufgabe der Hochhausfassade

Egal ob es sich um ein Hochhaus oder einen Flachbau handelt, die Gebäudehülle spielt eine entscheidende Rolle bei der Erfüllung der menschlichen Behaglichkeitsansprüche, vor allem bezüglich der operativen bzw. empfundenen Temperatur im Innenraum. Die Fassade dient zum Wärmeschutz im Winter und im Sommer zum Schutz vor der Wärmeaufnahme durch solare Einstrahlung. Sie ist auch für die Tageslichtversorgung wichtig, die neben der visuellen Behaglichkeit den Strombedarf für Kunstlicht erheblich beeinflusst.

Trotz der modernen Entwicklungen in der LED-Lichttechnik, die das Erreichen einer hohen Lichtausbeute ermöglicht und minimale Wärme abgibt, ist der Bedarf an Tageslicht für den Menschen essenziell. Ein Fenster, das den Raum mit Tageslicht versorgt, ist auch für die Aussicht und den Außenbezug sehr wichtig. Es wurde bestätigt, dass Arbeiten mit Kunstlicht langfristig Stress und Schäden für die Gesundheit verursacht [124].

Eine sorgfältige Fassadenkonzeption und Detailplanung kann große ökologische und ökonomische Einsparpotenziale aktivieren. Ideal ist es, wenn durch eine optimierte Fassade bei vermindertem Energie- und Technikaufwand der Nutzerkomfort steigt [125].

Die Möglichkeit der natürlichen Lüftung ist ein grundlegender Aspekt bei der Fassadenplanung. Dies erfordert die Auseinandersetzung mit den Windverhältnissen am Standort des Hochhauses. Dieser Parameter ändert sich mit zunehmender Höhe und bietet Chancen für Innovationen.

Prinzipiell führen die Anforderungen an die Fassade zu Zielkonflikten. Der im Sommer erforderliche Sonnenschutz bewirkt in der Regel auch eine Verminderung des Tageslichteintrags. Eine optimale Tageslichtnutzung sowie der im Winter erwünschte Strahlungseintrag werden wiederum oftmals von Blendungseffekten begleitet. Eine überwiegend natürliche Lüftung ist an verkehrsreichen Standorten mit unerwünschtem Lärmeintrag verbunden. Ziel bei der Fassadenkonzeption ist es daher, für den jeweiligen Standort und die vorgesehene Nutzung einen optimalen Kompromiss aus den verschiedenen Anforderungen zu finden. Mit der Integration von technischen Systemen in die Fassadenebene kann die Flexibilität von Gebäuden erhöht werden. Der Platzbedarf für Schächte und Kanäle im Inneren entfällt [125].

Die Kosten für die Fassade des Hochhauses tragen mit 15–40 % zu den Gebäudekosten bei [126]. Die Kosten der mechanischen Systeme für Raumlufttechnik betragen mehr als 30–50 % der Gesamtkosten eines gut gewarteten Bürohochhauses. Forscher gehen davon aus, dass 5–13 % von den genannten Kosten auf die Gebäudeautomation entfallen, die zur Kontrolle von Temperatur und Raumlüftung eingesetzt wird [127]. Daher sind die Kosten und der Energieverbrauch eines Hochhauses von den klimatischen Bedingungen des Standorts und

dem Konzept der Fassade abhängig. Nach einem Bericht der *IEA* werden 19 % der weltweiten CO_2-Emission durch Beleuchtung verursacht [103].

Die Haut eines Hochhauses ist sehr kritisch, besonders wenn es um Wetter, Schallschutz, Sicherheit und Privatsphäre geht. Kühllasten und Wärmeaufnahme durch solare Strahlung finden gleichzeitig statt. Daher ist es sinnvoll, die schützende Hülle des Gebäudes für Kühlung sowie Stromerzeugung zu verwenden. In diesem Zusammenhang bietet sich die Hochhausfassade als große verfügbare Fläche zur Energiegewinnung an: Photovoltaikzellen können nicht nur auf dem Dach eingesetzt, sondern in die riesigen Fassadenflächen integriert werden.

Darüber hinaus bietet sich aufgrund der großen Höhe und der dort herrschenden Windgeschwindigkeiten eine Nutzung der Windenergie an. Hierzu liegen bisher allerdings lediglich Grundlagenuntersuchungen und konzeptionelle Betrachtungen vor. Die Überlegungen beschränken sich dabei nicht einfach auf Windräder, die auf das Dach eines Hochhauses gesetzt werden. Es stellt sich vielmehr die Frage, ob Windrotoren an der Fassade eingesetzt werden können, wobei mit der Optimierung der Bauform eine bessere Leistungsfähigkeit erzielt werden kann.

Kühlung mit der über die Fassade generierten Energie kann in zwei Formen erfolgen: entweder durch elektrische Klimatisierung/*Electric Cooling* mittels Photovoltaik (PV) oder durch solare Klimatisierung/*Solar Cooling* mittels solarer thermischer Kollektoren und Absorptions- oder Desorptionskältemaschinen.

In diesem Kontext stellt sich die Frage, wie groß z. B. der Fensterflächenanteil zur Gewinnung des Tageslichts sein sollte. Ebenso die Frage, wie groß der opake Anteil sein sollte, wenn der Kühl- und Strombedarf über solare Energie abgedeckt wird, sowie die Frage, wo die Kollektoren – unabhängig vom Kühlsystem – eingebaut werden sollen.

2.3.5 Ökologischer Lebenszyklus

Die ökologische Lebenszyklusanalyse eines Hochhauses im Vergleich zu einem Riegelbau wurde in einem wissenschaftlichen Fachaufsatz veröffentlicht. Die Studie bezieht sich auf den Gebäuderohbau und hat die Diskussion über Vor- und Nachteile der beiden Gebäudetypen ergänzt. Die Auswertung der Ökobilanz zeigt, dass das Hochhaus im betrachteten Fall bei einer ungünstigen Bodenbeschaffenheit einen deutlich geringeren kumulierten Energieaufwand sowie nach den verwendeten Ökoindikatoren niedrigere Umweltwirkungen aufweist als das Riegelgebäude. Der Vergleich wird in Abbildung 2.41 dargestellt. Bei optimierten Bodenverhältnissen dagegen ist der kumulierte Energieaufwand für beide Gebäudetypen nahezu identisch, während die Umweltwirkungen des Hochhauses höher ausfallen als die des Riegelgebäudes [119].

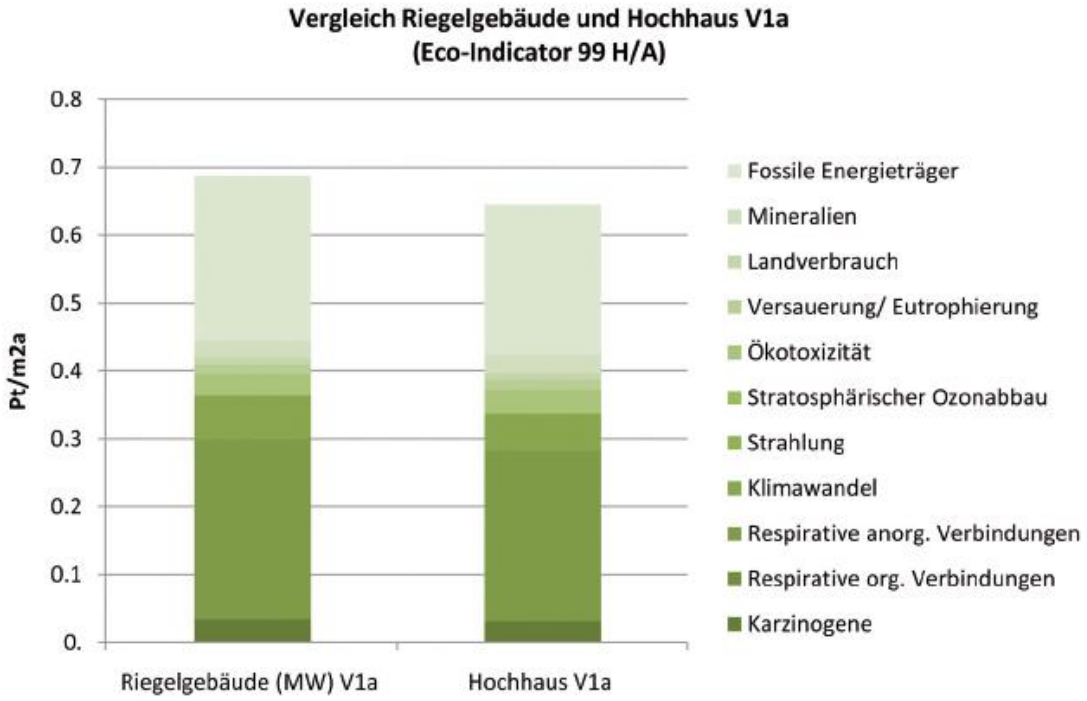


Abbildung 2.41 Wirkungsabschätzung durch Eco-Indicator 99, Gebäudevergleich [119]

Im *Hearst Tower* in New York wurde ein Ansatz zur Verringerung des Stahlverbrauchs in der Konstruktion des Tragwerks im Hochhaus verfolgt. In den Fassaden zeichnet sich das Stahltragwerk mit seiner äußeren Diagonalstruktur aus hohen, jeweils über vier Geschosse reichenden Dreiecksrahmen ab – ein effizientes System, das eine Einsparung von etwa 20 % Stahl gegenüber einer Standardkonstruktion ermöglichte [128]. Durch die Anwendung von *Diagrid* wurden ca. 2000 Tonnen Stahl eingespart. Etwa 90 % des im Tragwerk verwendeten Stahls wurden zudem aus wiederverwendetem Stahl hergestellt [129].

Abbildung 2.42 Hearst Tower, New York [129]

2.3.6 Energiebilanz von Hochhäusern

Hochhäuser sind als massive Energieverbraucher bekannt. Dies liegt auf der Hand, vor allem, wenn man sie mit Gebäuden niedriger Höhe vergleicht. Zwar findet man bei vielen Hochhäusern tatsächlich einen hohen Energieverbrauch vor, doch ist v. a. in Amerika, Asien oder im Nahen Osten generell ein inakzeptabel „großzügiger“ Umgang mit Energie zu beobachten. In Deutschland zeigen moderne Hochhäuser, dass Bürogebäude ohne zentrale Klimaanlage auskommen können und so – zusätzlich zu höherem Nutzerkomfort – auch noch die Vorgaben der Energieeinsparverordnung deutlich unterschreiten [120]. Um hohen Kühlenergieeinsatz an Tagen mit extrem hohen Außentemperaturen zu vermeiden, wird dem Nutzer in modernen Hochhäusern – zumindest in Europa – meist keine über das ganze Jahr konstante Raumtemperatur garantiert. An einem heißen Sommertag sind dann beispielsweise durchaus auch Raumtemperaturen von 26 °C möglich.

Der Hauptunterschied zwischen einem Hochhaus und einem Gebäude geringer Höhe liegt im benötigten Aufwand zum vertikalen Transport von Menschen, Wasser und Luft. Die Druckerhöhungsstationen der Frischwasserversorgung nutzen ein erhebliches Maß an elektrischer Energie. Einige Planer gehen davon aus, dass 14–15 % des Gesamtenergiebedarfs für Aufzüge nötig sind. Dieses Thema wird heute intensiv erforscht, vor allem hinsichtlich der Energierückgewinnung bei den abwärtsfahrenden Aufzügen, wie beim Stand der Technik erwähnt. Die aktuellen Herausforderungen bei der Raumkonditionierung im Flachbau treten auch im Hochhaus auf. Bei gleicher Funktion wie z. B. Büronutzung gibt es keine grundsätzlichen Unterschiede, da sich die Ansprüche der Nutzer nicht unterscheiden. In großen Höhen ab ca. 1000 Meter sollten jedoch spezielle Lösungen für den Druckausgleich entwickelt werden.

2.3.7 Nachfrage nach Hochhäusern

Die Nachfrage nach Hochhäusern steigt weltweit. Abbildung 2.43 zeigt die Zahl der pro Jahr abgeschlossenen Hochhausbauprojekte. Gemäß der Grafik wurden zwischen 2000 und 2010 im Jahr durchschnittlich ca. 140 Hochhäuser verwirklicht. Die Entwicklung ist enorm im Vergleich zu der Periode zwischen 1990 und 2000, als die jährliche Zahl bei 60 Hochhäusern pro Jahr lag [130].

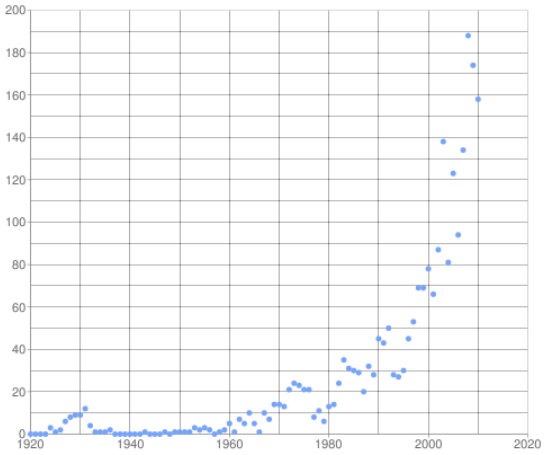


Abbildung 2.43 Zahl der abgeschlossenen Hochhausbauprojekte pro Jahr [130]

Der Bautyp kommt immer mehr in asiatischen und in den sich entwickelnden Ländern zum Einsatz. Laut einer Studie des *CTBUH* steigt die Anzahl der Hochhäuser weltweit mit der Bevölkerungszahl. Die orangefarbene Kurve in Abbildung 2.44 gibt Auskunft darüber, dass die zunehmende Hochhäuserzahl in direkter Verbindung mit der zunehmenden Bevölkerungszahl steht. In der Grafik werden nur Daten von Gebäuden gezeigt, die höher als 200 Meter sind [131]. Seit 2000 hat sich die Proportion verschoben. Vermutlich ist dies auf die neuen Märkte im Nahen Osten wie Dubai zurückzuführen, wo trotz geringer Bevölkerungszahl Hochhäuser aus Prestigegründen gebaut werden.

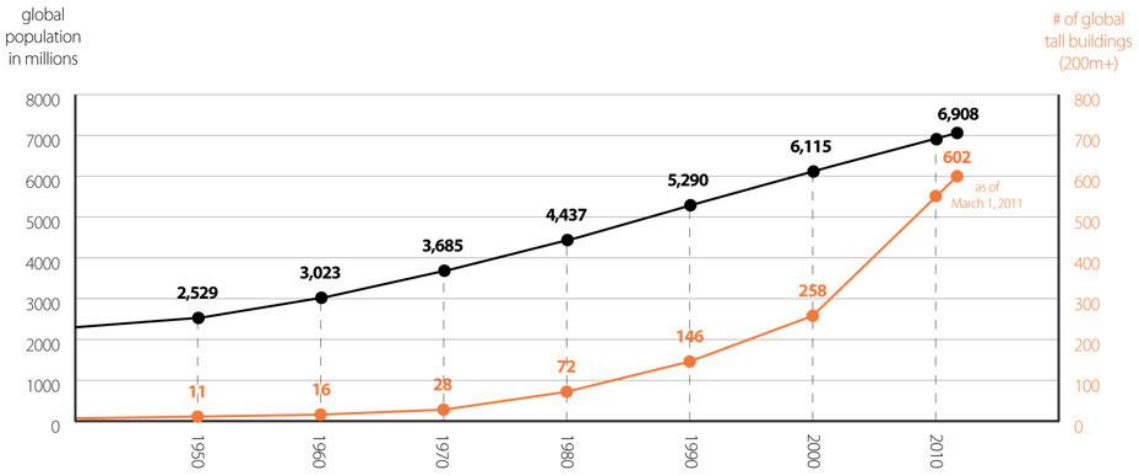


Abbildung 2.44 Zunahme der Bevölkerungs- und Hochhauszahl [132]

Die Balken in Abbildung 2.45 zeigen, wo die 100 höchsten Hochhäuser der Welt stehen. In Asien und im Nahen Osten stehen schon zahlreiche extrem hohe Hochhäuser und es werden noch sehr viele weitere gebaut [130].

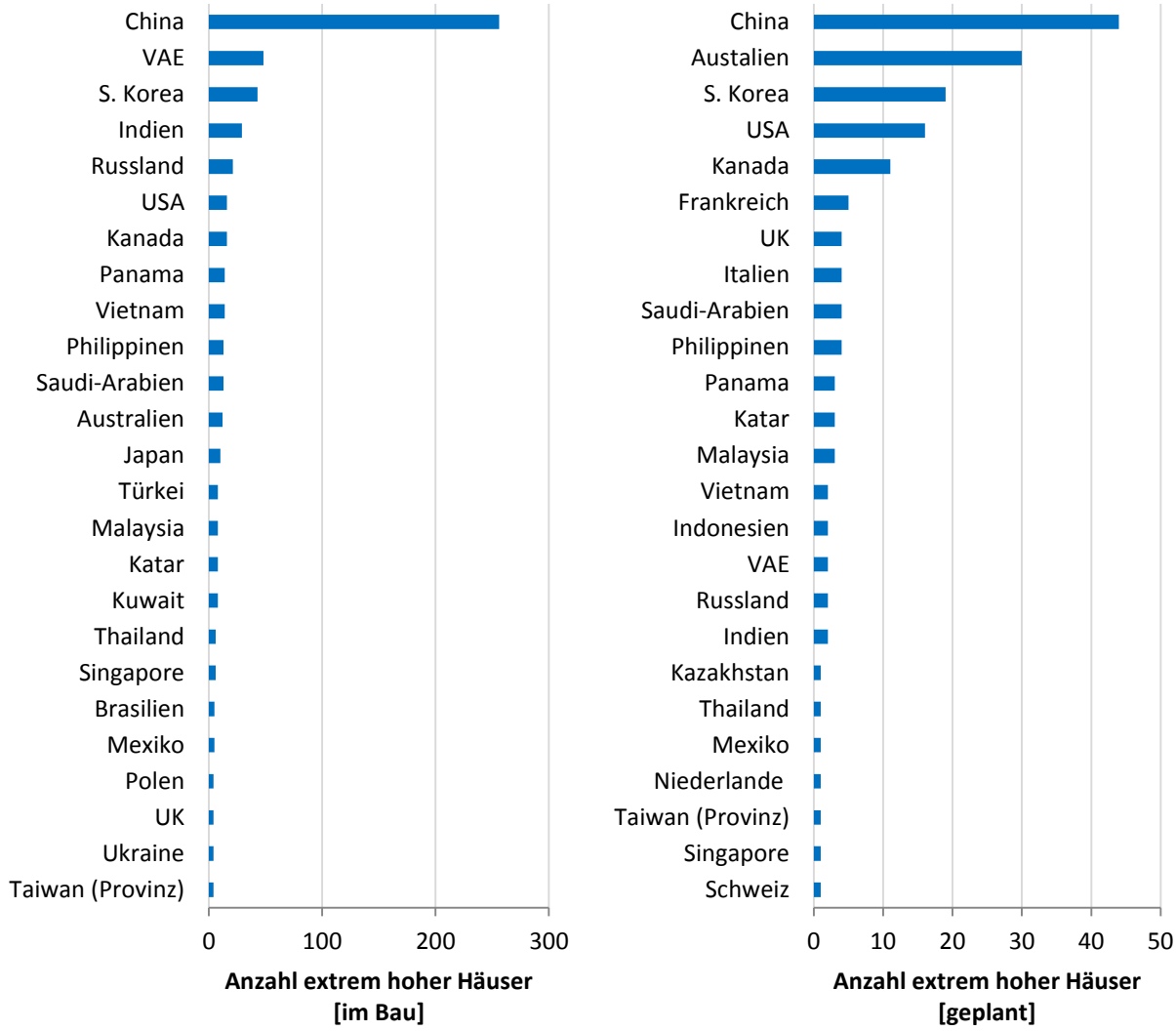


Abbildung 2.45 Links: besonders aktive Länder beim Bau von Hochhäusern; rechts: zum Hochhausbau ambitionierte Länder [130]

Wenn Hochhäuser in der Zukunft weiter so gebaut werden, wie sie heute gebaut werden, werden sie erhebliche Umweltprobleme verursachen. Es wird zudem aufgrund der Ressourcenverschwendung unmöglich werden, diese Gebäude auf unbestimmte Zeit weiter zu betreiben.

2.3.8 Heutige Tendenzen im Hochhausbau

Wie bereits erläutert, ist die Nachfrage nach Hochhäusern seit den 90er-Jahren rasch gestiegen. Die meisten gebauten und geplanten Hochhäuser liegen heute im asiatischen Kontext und im Nahen Osten. Die Höhe und die gestalterische Qualität des Hochhauses sind dort die Hauptbewertungsfaktoren. In vielen Städten stehen 200 Meter hohe Hochhäuser im Kontext von sehr kleinen Gebäuden. Sie werden gebaut, um den Bauherren als Statussymbol zu dienen. Die Belegungsdichte ist manchmal nur gering. Das kann in Dubai sehr gut beobachtet werden, wo viele Hochhäuser nach der Finanzkrise 2009 leer stehen. An diesen Standorten muss sich das Bewusstsein bezüglich des Hochhausbaus ändern. Im Rahmen der vorliegenden wissenschaftlichen Arbeit steht die Energiebilanz von Hochhäusern im Vordergrund, egal aus welchem Grund sie gebaut werden.

Im Kontext der europäischen Stadt ist weniger die bloße Höhenentwicklung von Interesse, sondern die Suche nach einer für die Umwelt und den Menschen verträglichen Bauweise [114]. Weltweit scheint die Hochhausentwicklung dagegen weniger systematisch zu verlaufen. Ein Überblick über die heutigen Tendenzen im Hochhausbau wird in den kommenden drei Punkten zusammengefasst.

Streben nach extremer Höhe

„Es muss hoch sein – jeder Zoll an ihm muss hoch sein. Die Kraft und Gewalt der Höhe müssen in ihm sein – der Glanz und der Stolz der Begeisterung.“ Louis Sullivan, 1896 [133]

Dies ist die Antwort von Louis Sullivan auf die Frage nach dem Hauptmerkmal eines hohen Gebäudes.

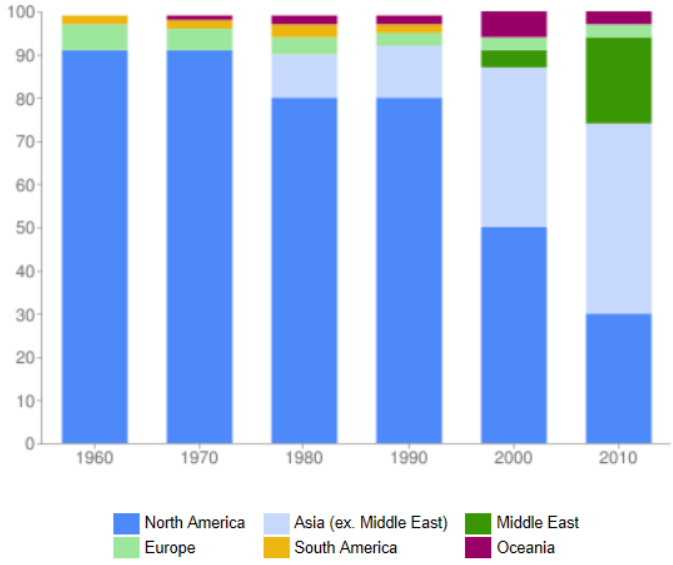


Abbildung 2.46 Standorte der höchsten Gebäude der Welt [130]

Die Grafik in Abbildung 2.46 zeigt noch einmal die Standorte der 100 höchsten Hochhäuser der Welt. Rem Koolhaas stellt fest, dass dieser Bautyp vom Westen in den Osten abgewandert ist

[134]. Es ist sehr deutlich, dass sich nicht nur der Bautyp, sondern auch das Streben nach dem höchsten Bauwerk von Nordamerika nach Asien und in den Nahen Osten verlagert hat.

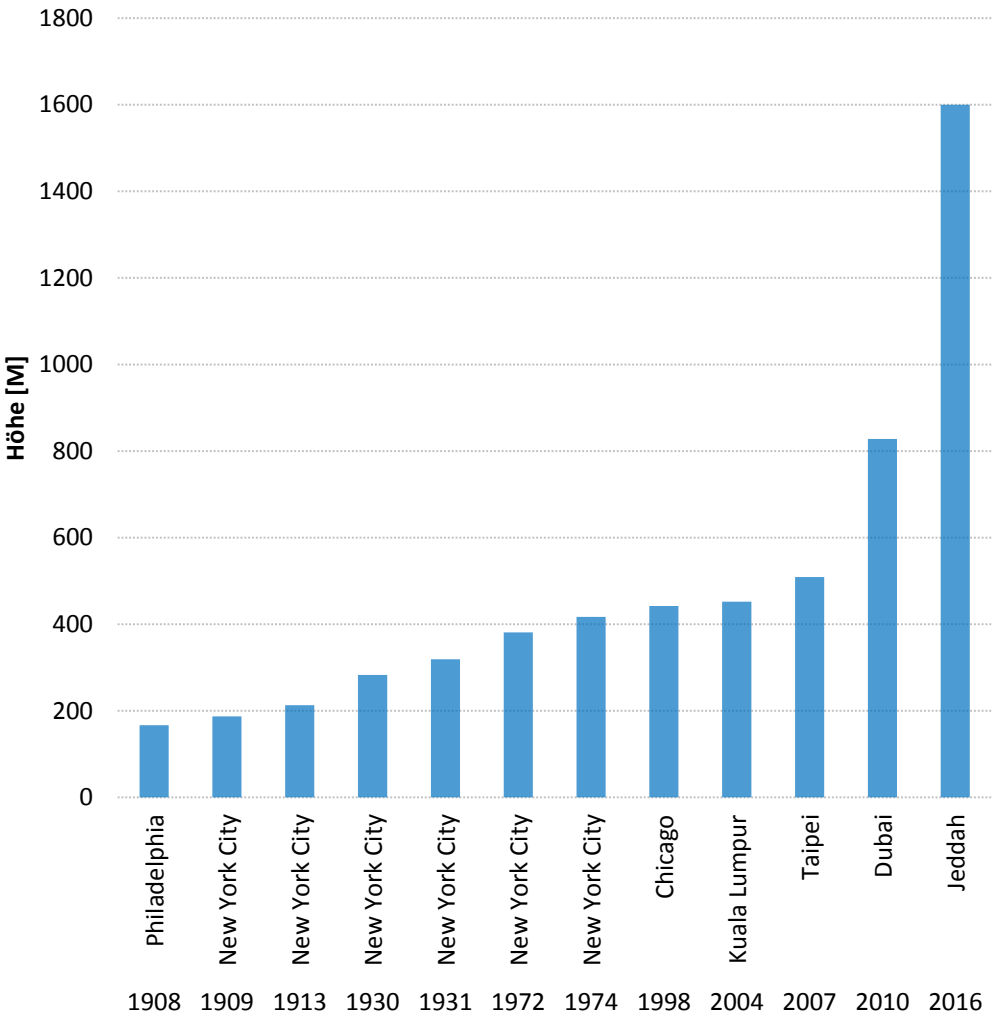


Abbildung 2.47 Geschichte der höchsten Gebäude der Welt [135]

Abbildung 2.47 liefert einen Überblick über die höchsten Gebäude der Welt seit dem Beginn des 20. Jahrhunderts. Der Wettbewerb um das höchste Hochhaus wird seit 2004 auch in den subtropischen Städten ausgetragen. Der Höhenunterschied zwischen den letzten drei Hochhäusern ist dabei enorm.

Hochhäuser entstehen folglich nicht wegen Flächeneffizienz oder Flächennachfrage, sondern werden gezielt zur Imagesteigerung der Städte oder der Wirtschaftlichkeit eingesetzt. Nach dem Bau des derzeit höchsten Gebäudes der Welt, des *Burj Khalifa* in Dubai, wird gerade ein anderer Kilometer-Tower in Jeddah, Saudi-Arabien gebaut. Der extrem hohe Turm wird mindestens 173 Meter (568 Fuß) höher sein als der *Burj Khalifa*.

Abbildung 2.48 Links: Kindom Tower, Jeddah; rechts: Burj Khalifa, Dubai

Der Entwurf für den *Kingdom Tower* stammt von Designern des Architektenbüros *Adrian Smith + Gordon Gill* aus Chicago. Die ehemaligen Mitarbeiter von S.O.M. haben auch bereits *Burj Khalifa* entworfen. Neben Büros werden Hotels und Luxusappartements im Gebäude bezogen. Die Infrastruktur dieses Super-Hochhauses ist gigantisch: Vorgesehen sind 59 Aufzüge, fünf davon „Doppeldecker“, die zwei Stockwerke gleichzeitig bedienen und mit einer Geschwindigkeit von zehn Metern pro Sekunde fahren. Um vom ersten bis ins oberste Stockwerk zu kommen, sollen nur eine Minute und 40 Sekunden nötig sein. Geplant ist außerdem die höchste Aussichtsplattform der Welt in der 157. Etage [136].

Die Innovationen der Planer solcher hohen Türme liegen in der Tragwerksplanung und dem Konstruktionsprozess. Aussteifungssysteme für Windschutz sind in den großen Höhen sehr wichtig. Dazu ist der Transport der Materialien kritisch. Das Tragwerk des *Burj Khalife* wurde komplett aus Beton gebaut, was eine Herausforderung bei der Betonierung der oberen Geschosse darstellte. Auf der anderen Seite wurde eine konventionelle Lochfassade eingesetzt.

Gestalterische Erscheinung

Seit dem Turm zu Babel wird das Hochhaus als Monument betrachtet. Die Bewegung der modernen Architektur Anfang und Mitte des 20. Jahrhunderts hat nach dem Spruch *„Form follows function“* Maßstäbe für die Beurteilung der Gebäudeform gesetzt, wonach der formale Ausdruck des Gebäudes seiner Funktionalität entsprechen sollte. Diese Denkweise wurde in der Epoche der postmodernen Architektur kritisiert, für die die Autonomie der Gebäudeform einen der grundliegenden Ansätze bildete.

Dies kann anhand vieler Beispiele von Hochhäusern veranschaulicht werden, deren Formen bildhafte Konzepte darstellen. Die Suche nach neuen Bauformen, unabhängig von der Funktionalität und städtebaulichen Einbindung, prägt heute viele gebaute und geplante Hochhäuser in Asien und im Nahen Osten.

Abbildung 2.49 Links: Dancing Towers, Dubai; rechts: drehender Turm, Dubai.

Der Name des in Abbildung 2.49 links gezeigten Turms gibt Auskunft über eines der Ziele der Formgebung, nämlich *Dancing Towers* (dt.: Tanzende Türme). Im rechten Bild wird der drehende Turm gezeigt, dessen sich drehende Etagen in keinerlei Abhängigkeit zu performativen Aspekten stehen. Vermutlich besteht das Ziel darin, bestimmte bildhafte Effekte zu schaffen.

Wachsende Umweltbelange

Nach der Ölkrise hat sich die allgemeine Meinung zum Energiebedarf in Gebäuden bzw. Hochhäusern stark geändert. Anfang der 90er-Jahre wurde das Gebäude der *National Commercial Bank* in Jeddah von S.O.M. gebaut. Die Form des Gebäudes wurde an die klimatischen Bedingungen angepasst, sodass die Büroräume wie in der traditionellen Architektur vor Ort introvertiert sind und direkt auf drei Höfe schauen (Abbildung 2.50). Zwei Seiten des dreieckigen Grundrisses sind geschlossen, was als Sonnenschutz gedacht ist. Die dritte Seite ist zum Zweck der Tageslichtversorgung geöffnet.

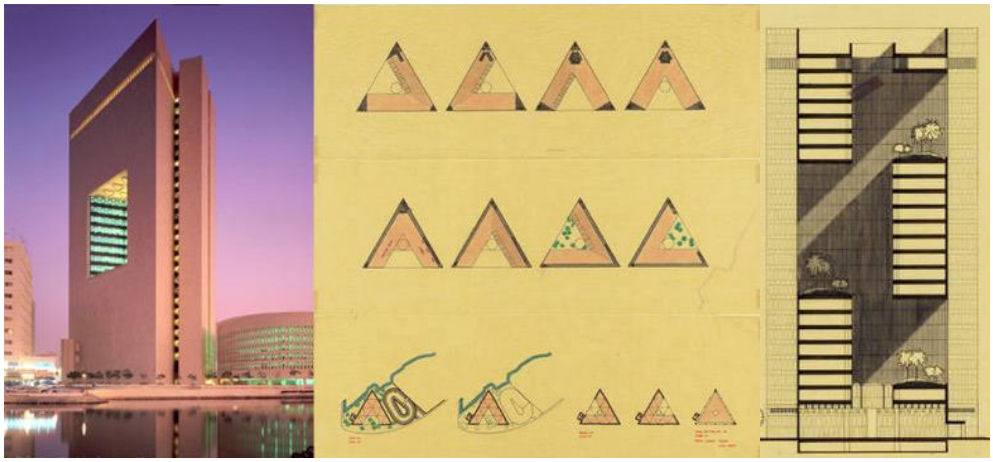


Abbildung 2.50 National Commercial Bank, Jeddah

Das Konzept der Ökohochhäuser wurde in den 1980er-Jahren von dem Architekten Ken Yeang eingeführt. Seine Herangehensweise maximiert die Integration von Bauform und Betriebssystemen mit der Natur durch das Imitieren von Strukturen, Prozessen und Eigenschaften des Ökosystems.

Der Ansatz eröffnet Potenziale für eine neue Arbeits- und Wohnatmosphäre. Es gibt bereits realisierte energiesparende Hochhäuser von Ken Yeang, aber keine Beispiele, in denen die Begrünung das Hochhaus prägt (Abbildung 2.51). In den Veröffentlichungen, in denen über diese Konzepte diskutiert wird, werden keine Daten zur Auswirkung auf den Energiebedarf bzw. die Energiebilanz des Gebäudes angeführt.

Abbildung 2.51 EDITT Tower, Singapur [137]

Ein ähnliches Konzept kommt im Hochhaus der Commerzbank in Frankfurt zum Einsatz, das 1997 gebaut worden ist. Im Tower hängen neun Gärten, die nicht nur als Lichthöfe funktionieren, sondern auch als Erholungsräume für die Mitarbeiter. Die Gärten umhüllen das 160 m hohe Atrium. Bilder zum Turm und zu einem der Gärten werden in Abbildung 2.52 gezeigt.

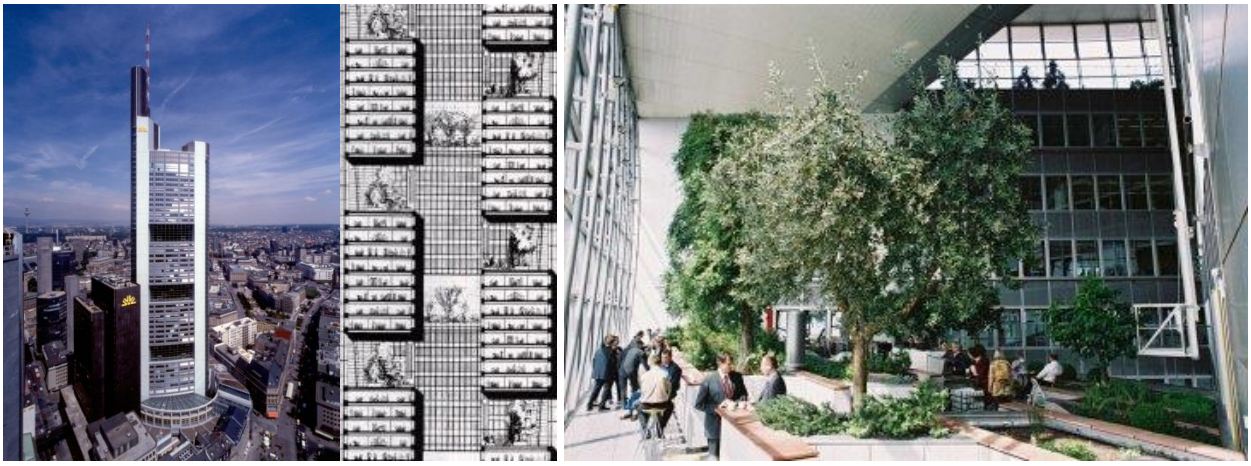


Abbildung 2.52 Commerzbank, Frankfurt [138]

Der vom Architekten Jean Novel in Doha gebaute Turm zeigt eine Anwendung von islamischer Ornamentik zur funktionalen Formgebung des Sonnenschutzes. Dieses Konzept hatte er bereits in der Fassade des *Institut du Monde Arabe* in Paris umgesetzt, wo die Größe der Öffnungen durch mechanische Systeme gesteuert wird, um bestimmte Beleuchtungseffekte zu erzielen (Abbildung 2.53).

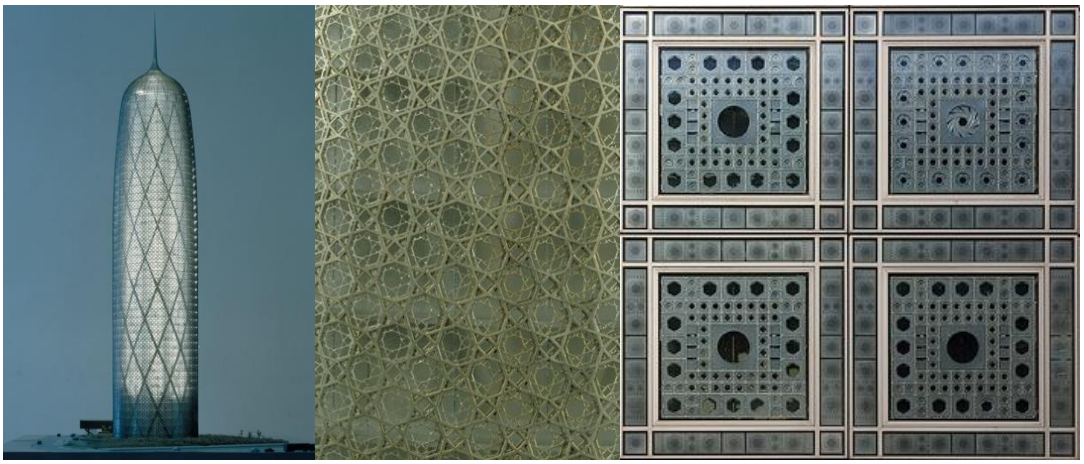


Abbildung 2.53 Links: Doha Tower, Doha [139]; Mitte: Sonnenschutzhülle im Doha Tower [139]; rechts: Teil der Fassade des Institut du Monde Arabe (IMA) [140]

Die Auswirkung des Sonnenschutzelementes auf den Beleuchtungsbedarf muss bei der Entwicklung der Fassade berücksichtigt werden. Der technische Aufwand in der Fassade des *Institut du Monde Arabe* kann als Nachteil betrachtet werden, vor allem, wenn die erzielten Effekte nicht zur energetischen Performanz der Fassade beitragen.

Abbildung 2.54 Links: O-14 Tower, Dubai [141]; rechts: Innenaussicht einer Etage des O-14 Tower, Dubai [142]

Ein Ansatz zum Sonnenschutz durch Verringerung des Fensterflächenanteils in der äußeren Fassade kann im Rahmen des Projekts *O-14* in Dubai betrachtet werden. Dieses Konzept denkt die Hochhausfassade neu und zeigt ein Überdenken der volltransparenten Fassade.

2.4 Optimierung als Ansatz zur Erhöhung der Gebäudeperformance

2.4.1 Notwendigkeit der konsequenten Zusammenführung im Entwurf

Die Planung eines Hochhauses ist ähnlich komplex wie das Hochhaus mit allen seinen Einzelsystemen selbst. Der Architekt ist die zentrale Person im Planungsteam: Er legt einerseits das prinzipielle Konzept des Gebäudes fest, trifft andererseits aber auch die wesentlichen Entscheidungen von der städtebaulichen Einbindung über die Gebäudeform und Gebäudematerialität bis hin zu den Detailausbildungen. Um diese äußerst komplexe Aufgabe bewältigen zu können, benötigt er bereits in einem frühen Planungsstadium die Mitarbeit und die Zuarbeit von Ingenieuren unterschiedlicher Fachrichtungen: von Fachleuten für die Bauausführung, für den Brandschutz, für Reinigungs- und Sicherheitskonzepte oder auch für das Gebäudemanagement. Ergänzt wird das Team durch Experten für Bauphysik und Gebäudeenergie, die das Klimakonzept in den Entwurf integrieren. Weitere Sachverständige und Experten werden beispielsweise für Fragen zu den Bereichen Geologie und Baugrund, Aufzugsystem und Gebäudeaerodynamik hinzugezogen. Die Koordination eines derart großen Planerteams ist an sich schon eine schwierige Aufgabe, der Kern der Planung und der Tätigkeit des Architekten besteht aber darin, das Wissen und die Konzepte der einzelnen Planerfachleute in einen ganzheitlichen Entwurf für das Gebäude zu integrieren [120]. Zum ruhigen Zielen, Einschießen oder Probieren ist dabei keine Zeit. Entscheidungen müssen trotz immer komplexer werdender Einflussfaktoren immer schneller getroffen werden. Die Komplexität der beeinflussenden Parameter in der Planung sowie die Zielkonflikte bieten interessante Potenziale zur Optimierung. Diese wird umso wirtschaftlicher und wirkungsvoller ausfallen, je früher in den Entwurfsphasen sie ausgeführt wird.

Ein Haus besteht in der Regel aus mehreren Räumen, also auch Energieeinheiten. Das Erreichen der Null- oder Plus-Energiebilanz in einem typischen Haus erfordert eine konsequente Zusammenführung von Architektur, Energieeffizienz und erneuerbaren Energien, um durch die Einstellung von vielen Parametern Verluste möglichst zu minimieren. Je höher die Anzahl der Energieeinheiten ist, desto schwieriger ist es, die Energieeffizienz manuell im Griff zu haben. Im Fall des Hochhauses ist es durch die hohe Zahl der Energieeinheiten besonders schwierig, dieses Ziel zu erreichen.

Es wurde schon festgestellt, dass das Einbauen von Energieerzeugungstechnik in das Gebäude bzw. das Hochhaus alleine nicht ausreichend ist, um energieautark zu werden bzw. eine Plus-Energiebilanz zu erzielen. Grundsätzlich muss die Reduzierung des Energiebedarfs parallel zu der Abdeckung des Bedarfs berücksichtigt werden. Die Wandfläche in der Fassade, auf der die Photovoltaikzellen installiert werden, wird z. B. vom Fensterflächenanteil bestimmt. Dieser bestimmt zusammen mit dem Energiedurchlassgrad und dem Verminderungsfaktor der Verglasung den Energiebedarf für Kühlung und Beleuchtung des dahinterliegenden Raums. Daher müssen für jeden Standort Fassadenausrichtung und Raumnutzung nach den optimalen Fassadenparametern erfolgen, wenn der Bedarf durch fassadenintegrierte Photovoltaikzellen abgedeckt werden soll.

Auch wenn die Energieerzeugungsflächen vermehrt werden sollen, muss dies mit der Performance der anderen Elemente abgestimmt werden, damit die Integration wirtschaftlich

erfolgt. Dies gilt insbesondere für den Einbau von Extraflächen für Photovoltaikzellen oder Windrotoren.

In diesem Zusammenhang müssen viele korrelierende Parameter integriert und optimiert werden. Die Optimierung in der konzeptionellen Phase bietet folgende Vorteile an:

- Maximierung der Energiebilanz (Ertrag gegen Bedarf)
- Erhöhung der Wirtschaftlichkeit des Gesamtsystems
- Hohe Anpassungsfähigkeit an die Klimabedingungen des Standorts
- Möglichkeit zur Integration der Energieerzeugungselemente in die Gestaltung des Gebäudes

Mit den heute verfügbaren Rechenmöglichkeiten hat eine Reihe von Architekten angefangen, das Gebiet der Optimierung zu entdecken und deren Potenziale für die Architektur zu erforschen. Sie stellen die Frage, ob schon während der Entwurfsphase einige Entscheidungen getroffen werden können, die für die Performance des Gebäudes von Vorteil sind.

Die Integration verschiedenster Aspekte ist Grundlage einer erfolgreichen Planung bzw. Hochhausplanung. Die Beteiligung von verschiedenen Fachplanern an der frühen Planungsphase ist dabei immer von Vorteil. So wird sichergestellt, dass die Planung der Technik parallel zur Planung der Architektur läuft, was der üblichen Gebäudeplanung im 20. Jahrhundert fehlte. Dies war auf den Entwicklungsstand der technischen Möglichkeiten zurückzuführen, der einen hohen technischen bzw. energetischen Aufwand im Lebenszyklus des Gebäudes zur Folge hatte.

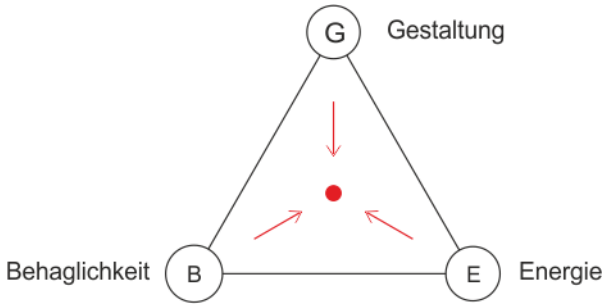


Abbildung 2.55 die drei betrachteten Hauptaspekte im Grundmodell

Im Rahmen des umweltbewussten Bauens bzw. der Energieeffizienz von Hochhäusern hängen viele Parameter voneinander und v. a. von den architektonischen Parametern ab. In der konzeptionellen Planungsphase eines Objekts wird idealerweise eine Vielzahl an Alternativen und Möglichkeiten untersucht. Der Architekt beschäftigt sich mit der Suche nach der passenden Gebäudeform und vor allem mit der Erfüllung der funktionalen Anforderungen an das Gebäude. Er ist auch für die Performanz des Gebäudes verantwortlich, welche eine sorgfältige Koordination erfordert.

In der konzeptionellen bzw. Vorentwurfsphase werden viele Parameter gesetzt und geändert. Viele davon sind so kritisch, dass sie eventuell entscheidende Auswirkungen auf die Gebäudeform bzw. -erscheinung haben. Im Kontext des Hochhauses ist die Erscheinung

kritischer als bei anderen Gebäudearten, da jedes Hochhaus für eine sehr lange Zeit eine Position in der Skyline bzw. im Stadtbild innehat.

In einer Studie über klimagerechtes Bauen beschreibt Prof. Sick den nicht integralen Entwurfsablauf, der nicht nur zu technischem und energetischem Aufwand führte, sondern auch zu menschlicher Unbehaglichkeit und Krankheit [143]. Daher ist es sinnvoll, die Grenzen des menschlichen Wohlbefindens festzulegen und in den Optimierungsprozess zu integrieren.

Mit den zunehmenden Möglichkeiten der Klimatechnik wurde im 20. Jahrhundert eine vollkommene Trennung der Arbeit von Architekten und Haustechnikern ermöglicht. Dies hat dazu geführt, dass Gebäude jedweder Architektur in jeder Klimaregion dieser Erde unabhängig vom Außenklima gebaut werden konnten. Der Architekt entwarf und anschließend installierte der Haustechniker so viel Technik, wie benötigt wurde, um ein angeblich angenehmes Klima im Innern zu schaffen. Der Segen wurde zum Fluch, als sich herausstellte, dass

- die Technik häufig doch überfordert war (Beispiel: *State of Illinois-Center*, Chicago),
- die Investitionskosten drastisch anstiegen,
- die Betriebskosten in die Höhe schnellten und
- ein neues Krankheitsbild auftauchte, das *Sick-Building-Syndrom* [143].

Trotz der Teilnahme verschiedener Fachkräfte an der frühen Entwicklungsphase eines Projektes erfolgt die Synergie in den meisten Fällen immer noch nicht. In dieser Phase wird ausführlich diskutiert, aber tatsächlichen Zugriff auf das Projekt hat nur der Architekt, der sich mit dem Entwurf beschäftigt. Die Fachplaner bekommen erst in der Ausführungsplanungsphase Zugriff auf das Konzept, wenn keine wesentlichen Änderungen mehr vorgenommen werden können. Wenn eine Änderung ein Muss ist, kostet dies Zeit, Geld und Aufwand.

Das Thema Optimierung ist relativ neu im Architekturbereich. Es wird oft mit dem Ingenieurwesen verbunden, wo beispielsweise nach der optimalen Stahlmenge eines Trägers unter Berücksichtigung von Gewicht und Tragfähigkeit gesucht wird.

2.4.2 Modellierung und Lösung eines Optimierungsproblems

„Optimieren statt Probieren...“ [144]

Die Begriffe *minimal, maximal, optimales Minimum, Maximum und Optimum* trifft man im täglichen Sprachgebrauch häufig an, ohne sich Gedanken über ihre exakte Bedeutung zu machen. Man verwendet sie, wenn es sich um besonders kleine oder große Werte handelt. So findet man in Reden und Zeitungsartikeln auch Steigerungen der Begriffe minimal, maximal und optimal, die jedoch keinen Sinn ergeben. Eine exakte Definition dieser Begriffe wird in der mathematischen Optimierung gegeben. Bei Problemen in Technik-, Natur- und Wirtschaftswissenschaften werden häufig maximale Ergebnisse unter minimalem Aufwand gesucht. Deshalb gewinnt die Optimierung sowohl für Wirtschaftswissenschaftler als auch für Ingenieure und Naturwissenschaftler zunehmend an Bedeutung [145].

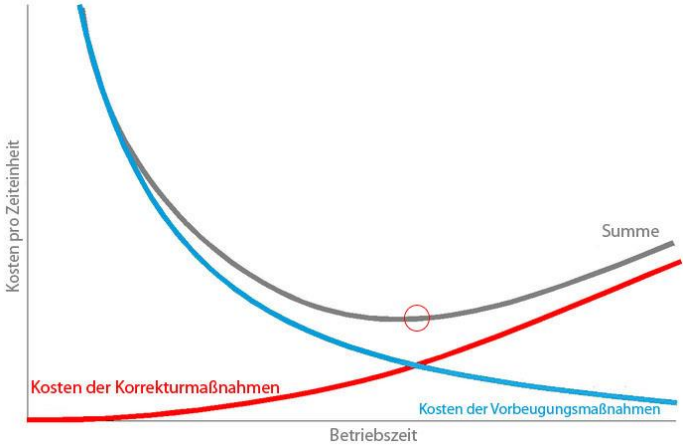


Abbildung 2.56 Beispiel eines Absolutminimums [146]

Viele Probleme aus Industrie und Wirtschaft sind Optimierungsprobleme. Beispielsweise:

- möglichst billige Herstellung
- möglichst schnelle/sparsame/robuste Autos

Solche Probleme werden „Anwendungsprobleme“ oder „Optimierungsaufgaben“ genannt. Die Lösung eines Anwendungsproblems lässt sich in zwei Arbeitsschritte gliedern [145]:

- **Modellierung bzw. Aufstellung des Problems in mathematischer Form:** Dies ist die Aufgabe des betreffenden Fachgebiets, das die Variablen und die Zielfunktion festlegt und die Gleichungen und Ungleichungen der Nebenbedingungen aufstellt.
- **Lösung des mathematischen Problems:** Dies ist ein komplexes mathematisches Verfahren, das sich heutzutage durch die Anwendung von speziellen Computerprogrammen lösen lässt. Beispiele sind: Maple, Mathematica, Mathcad, Matlab oder Excel.

In Abbildung 2.57 werden die allgemeinen Bestandteile eines Optimierungsmodells dargestellt.

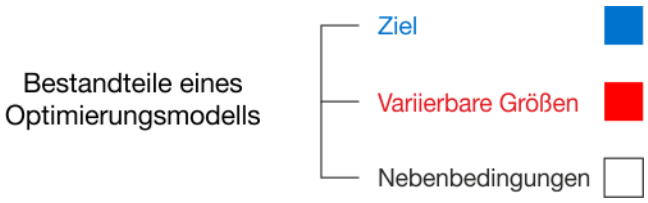


Abbildung 2.57 Allgemeine Bestandteile eines Optimierungsmodells (eigene Darstellung) [145]

Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich hauptsächlich mit der Modellierung der Probleme und ihrer Lösung mit einem der genannten Optimierungssysteme. Beide Prozesse werden im Rahmen einer Software durch Algorithmen des VB-Scripts integriert.

Die Grafik in Abbildung 2.56 stellt ein typisches Optimierungsproblem im Bereich Betriebswirtschaft dar. Das Optimum liegt offensichtlich dort, wo die Summe der Kosten am geringsten ist.

In der angewandten Mathematik beschäftigt sich das Gebiet der Optimierung damit, optimale Parameter eines – meist komplexen – Systems zu finden. „Optimal“ bedeutet dabei, dass eine Zielfunktion minimiert oder maximiert wird. Optimierungsprobleme stellen sich in der Wirtschaftsmathematik, der Statistik, bei *Operations Research* und generell in allen wissenschaftlichen Disziplinen, in denen mit unbekannten Parametern gearbeitet wird, wie beispielsweise in der Physik, der Chemie sowie der Meteorologie. Das einfachste Optimierungsproblem ist das Auffinden eines Minimums oder Maximums einer analytischen eindimensionalen Funktion f(x), was in der Regel durch die Feststellung der Nullstellen der ersten Ableitung gelingt [20].

Eine Modellierung ist fast immer mit Idealisierung verknüpft, das heißt, durch die mathematische Formulierung erfolgt in der Regel nur eine Annäherung an das Anwendungsproblem. Eine Lösung des mathematischen Problems ist daher entsprechend vorsichtig zu interpretieren. Oft gibt es für die mathematischen Probleme keine Optimallösung oder keine eindeutige Optimallösung oder die Optimallösung kann nur näherungsweise ermittelt werden, was die Interpretation zusätzlich erschwert. Die vorangehende Modellbildung wird oft von Anwendern wie Ingenieuren, Physikern oder Unternehmern durchgeführt. Sie ist mindestens ebenso wichtig und schwierig wie die Lösung des mathematischen Problems [147].

2.4.3 Frühe Optimierung durch Integration von quantitativen und qualitativen Kriterien

Egal ob ein eingeschossiges Haus oder ein Hochhaus, das nicht integrale Einbauen von Energieerzeugungstechnik reicht nicht aus, um eine Plus-Bilanz zu erzielen. Mit dem integralen Ansatz wird der Aspekt der Energieeinsparung in der Planung berücksichtigt. Des Weiteren ist die Integration der beiden Aspekte mit dem Aspekt der Gestaltung notwendig, um das Haus in seinem städtebaulichen Kontext aufzunehmen. Um die Wirtschaftlichkeit der gebäudeintegrierten Energieerzeugungstechnik zu erhöhen, muss der Energiebedarf so weit wie möglich gesenkt werden. Somit erhöht sich die Energiebilanz, die das Verhältnis von Energiezufuhr (Ertrag) zu Energiesenke (Bedarf) angibt. Dies sollte so früh wie möglich eingeplant werden.

In der Ausführungsplanungsphase übernehmen die Fachplaner das Konzept und versuchen Schritt für Schritt, die wesentlichen Einflussgrößen zu verbessern, um das energetische Ziel des Projekts unter Berücksichtigung des vom Architekten vorgegebenen Gestaltungskonzepts sowie der Wirtschaftlichkeit zu erreichen.

Da die Fassade eine wesentliche Rolle bei der Reduzierung des Energiebedarfs spielt, werden deren physikalische Eigenschaften verbessert und dann mithilfe von Simulationsprogrammen geprüft. Parallel dazu oder danach wird die zur Deckung des Bedarfs benötigte Energieerzeugungstechnik ebenfalls mithilfe spezieller Simulationsprogramme ausgelegt. Bei diesem Planungsprozess wird so gut wie möglich versucht, das gestalterische Konzept einzuhalten, um Zeit und Aufwand im Fall von Änderungen zu vermeiden.

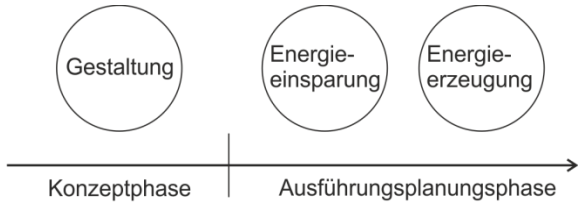


Abbildung 2.58 Hauptaufgaben der jeweiligen Planungsphasen (eigene Darstellung)

Da die Verbesserung der Fassade und die Auslegung der Energieerzeugungstechnik in einem anderen Zeitraum stattfinden als die Planung des Gestaltungskonzepts, ist es schwierig, eine maximale Integration der drei Aspekte zu erzielen und gleichzeitig das energetische Ziel mit geringem Aufwand und innerhalb kurzer Planungszeit zu erreichen. Das ist grundsätzlich deshalb der Fall, weil das Gestaltungskonzept eine Einschränkung darstellt und nicht von den Menschen entwickelt wurde, die sich mit dem Erreichen des energetischen Ziels beschäftigen.

Entscheidungen über die energetische Performance des Gebäudes erfordern die Verwaltung einer großen Datenmenge auf verschiedenen Ebenen. Die Verwendung von Simulationsprogrammen durch die Fachplaner ist natürlich wichtig, um Informationen zu erzeugen, die einen Entwurf bewerten helfen. Nach Radford und Gero sind die resultierenden Daten evaluativ und nicht vorschreibend [148]. Die Forscher argumentieren daher, dass die Verwendung solcher Werkzeuge in der konzeptionellen Phase für die Suche nach Alternativen ineffizient ist. Sie sind lediglich dazu geeignet, in späteren Phasen von den Fachplanern genutzt zu werden.

Auch unter den Fachplanern ist die Suche nach der besten Lösung sehr zeitintensiv und aufwendig. Die innerhalb eines vorgegebenen Zeitraums gefundene beste Lösung ist nicht unbedingt die optimale Lösung, die alle Bedingungen erfüllt und die Minimierung des Energiebedarfs sowie die Maximierung des Energieertrags gewährleistet. Dies ist auf die Art und Weise der Untersuchungen zurückzuführen, da der Rechenaufwand der Überprüfung von Ideen groß ist. Das heißt, es werden Lösungen für die zwei jeweils zu untersuchenden Aspekte, Energieeinsparung und Energieerzeugung, vorgeschlagen und dann geprüft. Danach werden die beiden Lösungen miteinander abgestimmt, bevor sie in die Gestaltung des Architekten integriert werden.

Die effizientere Vorgehensweise wäre, die Lösungen der genannten Aspekte zusammen mit den relevanten Parametern der Gestaltung in ein Optimierungsmodell einfließen zu lassen und so die bestmögliche Lösung zu erzielen, die die maximale Integration der drei Aspekte gewährleistet.

Für Entscheidungen hinsichtlich gestalterischer Aspekte sind qualitative Informationen ausreichend, aber für Entscheidungen im Zusammenhang mit Energieeffizienz und Performance des Gebäudes sind quantitative Informationen am besten, auch wenn sie nicht sehr genau sind. Nur so können objektive Beurteilungen getroffen werden [148]. Dies erfordert eine Person, die sich während der Gestaltung in der konzeptionellen Phase nicht nur qualitativ, sondern quantitativ mit der Energieeinsparung bzw. -erzeugung beschäftigt. Trotz der Spezialisierung der letzten beiden Themen ist der frühe Einstieg in die Thematik sinnvoll und beantwortet viele

Fragen, die den zeitlichen Aufwand der Fachplaner in der Phase der Ausführungsplanung verringern. Daher ist die frühzeitige Optimierung der wesentlichen Aspekte sehr wichtig, auch wenn es nur um eine erste Annäherung geht und sie die Fachplaner nicht ersetzt. Man geht davon aus, dass ein Instrument notwendig ist, das der Architekt in der konzeptionellen Phase nutzen kann und das mithilfe bereits integrierter Modelle zu optimalen Lösungen führt.

Die Optimierung in der konzeptionellen Phase soll die quantitativen und die qualitativen Aspekte zusammenführen. Daher müssen Simulationen durchgeführt werden, deren Ergebnisse das Optimierungsmodell füttern. Diese Daten können mittels externer Programme erzeugt werden, die einfach zu bedienen sind und keine großen Vorkenntnisse erfordern. Ein Fortschritt ist die Integration eines Programms zur groben Ermittlung des Energiebedarfs und der erforderlichen Auslegung der Energieerzeugungstechnik in das Optimierungsmodell.

Optimierung ist auch notwendig bei korrelierenden Parametern. Die Vergrößerung der Fensterfläche zum Beispiel erhöht die Einstrahlung und somit die Wärmeaufnahme im dahinterliegenden Raum. Umgekehrt reduziert die Verkleinerung des Fensters den Tageslichtquotienten, was den Bedarf an Kunstlicht erhöht und Nachteile für den Nutzer verursacht. Die opake Fläche der Fassade wiederum wird für die Integration der Photovoltaikzellen verwendet. Dieses einfache Beispiel zeigt, wie Multikriterien miteinander interagieren und Einfluss auf die Gestaltung haben können. Es gibt dabei nur eine Lösung bzw. Zusammensetzung von Kriterien, die eine bessere Performance erreicht als alle anderen Lösungen.

3. Materialien und Methodik – Das Optimierungswerkzeug als Ansatz zum Erreichen der Plus-Energiebilanz im Hochhaus

In diesem Abschnitt wird gezeigt, wie das Ziel der Arbeit erreicht wird, d. h., es wird das System beschrieben, mit dessen Hilfe die Plus-Energiebilanz unter Berücksichtigung der drei Aspekte der Hypothese, nämlich Energie, Behaglichkeit und Gestaltung, erzielt werden soll.

Am Anfang wird der Aufbau des Systems diskutiert. Der erste Schritt ist, die wesentlichen Parameter in einem System abzugrenzen. Der Ansatz basiert auf der Nutzung von Solar- und Windenergie. Daher werden zwei Teilwerkzeuge entwickelt: ein Solarenergieoptimierungstool und ein Windenergieoptimierungstool.

3.1 Aufbau des Systems und dessen Randbedingungen

„Ein System ist eine Menge von miteinander verknüpften Einzelteilen, deren Zusammenspiel so organisiert ist, dass damit etwas Bestimmtes erreicht wird.“ Donella Meadows

Wenn man diese Definition genauer betrachtet, erkennt man, dass ein System aus drei Dingen bestehen muss: aus *Systemelementen*, *Verknüpfungen* und einer *Funktion* oder einem *Zweck* [149]. Die Systemelemente sind die Parameter, die durch die Optimierungsfunktion eingestellt werden. Die Optimierungsfunktion stellt die Verknüpfungen zwischen den Parametern, deren Nebenbedingungen und dem Optimierungsziel her.

Nach der Beschreibung der Struktur des Systems werden die Potenziale der Optimierung mittels Sensitivitätsanalyse vorgestellt. Ein wesentlicher Teil des Systems ist das Energiebilanztool, das Simulationen im Hintergrund durchführt. Der Aufbau dieses Tools wird ebenfalls kurz dargestellt.

Sehr wichtig sind die inneren und äußeren Einflüsse auf das System, die sowohl den Energiebedarf als auch das Angebot bestimmen. Die inhaltlichen Grenzen des Systems werden beschrieben, gefolgt vom Anwendungspfad, der die Reihenfolge der Berechnung aufzeigt.

3.1.1 Hervorhebung der optimierbaren Parameter

Prinzipiell erzeugt das Plus-Energie-Hochhaus Energie aus Photovoltaikzellen und Windrotoren. Diese Energie muss nicht sofort verwendet werden und kann gespeichert werden. Das Hochhaus kann aber während der Unterdeckungszeiten auch Energie aus dem Netz holen. Falls eingespeiste Energie im Vergleich zur aus dem Netz bezogenen Energie zu einem höheren Preis verkauft werden kann, ist es wirtschaftlicher, den Stromenergiebedarf über das Netz abzudecken und die erzeugte Energie einzuspeisen. Ein grobes Energieschema wird in Abbildung 3.1 dargestellt.

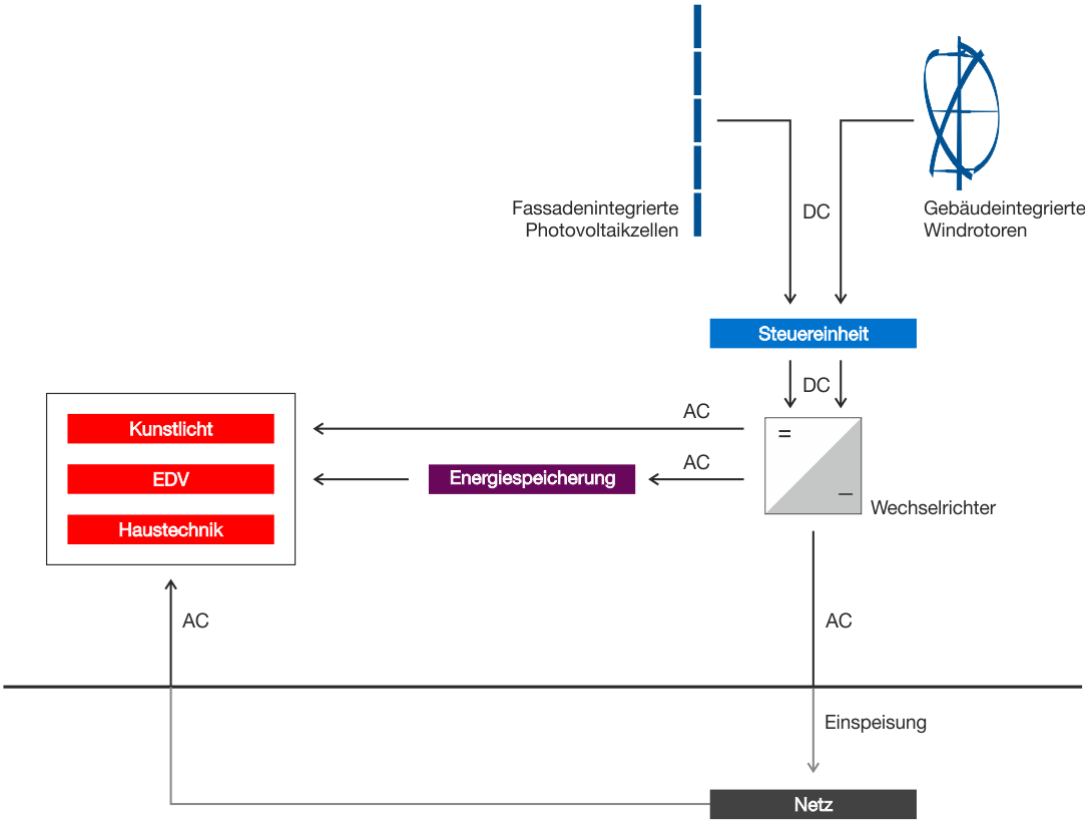


Abbildung 3.1 Allgemeines Energieschema des Plus-Energie-Hochhauses (eigene Darstellung)

In einem weiteren Schritt wurden die Parameter eines Hochhauses dem Grundmodell der Hypothese gegenübergestellt. Das bedeutet, es wurde festgestellt, ob eine Beziehung zwischen einem Parameter und einem der drei Aspekte besteht. Das Ergebnis kann aus den ersten drei Spalten der Abbildung 3.2 abgelesen werden. In den folgenden zwei Spalten wurde die Art des jeweiligen Parameters ermittelt: qualitativ oder quantitativ.

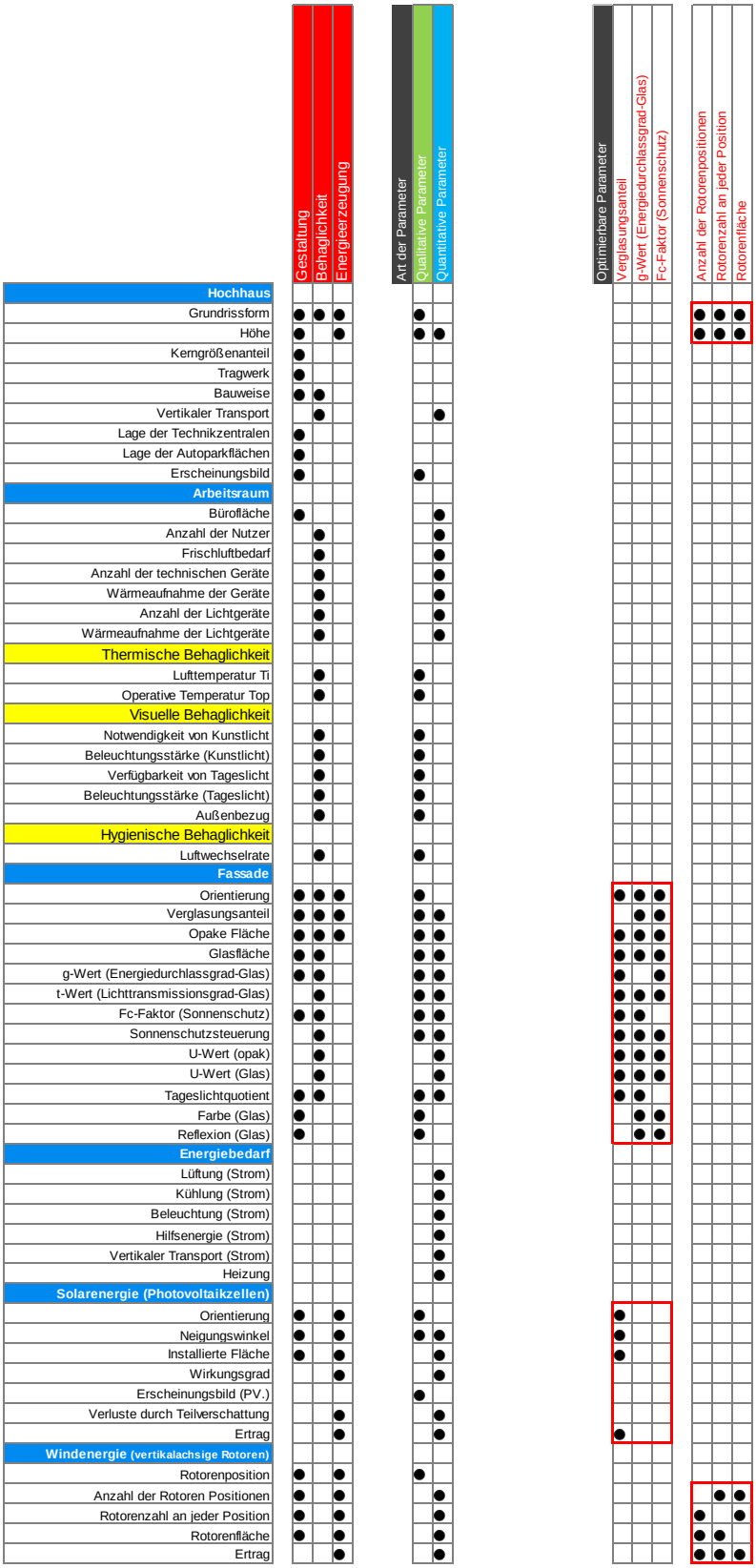


Abbildung 3.2 Zusammenhänge in einem generischen energieeffizienten Hochhaus (eigene Darstellung)

Nach der Analyse der Abhängigkeiten und Zusammenhänge wurden für das Solarenergieoptimierungstool drei Parameter ausgewählt, die besonders relevant für Energiebilanz, Gestaltung und Behaglichkeit sind. Dieser Schritt hilft dabei, die Komplexität des Systems auf das Wesentliche zu reduzieren und möglichst viele Parameter durch Einstellung der drei ausgewählten zu beeinflussen. Beim Windenergieoptimierungstool ist Behaglichkeit irrelevant, da dieses sich in erster Linie mit dem Ertrag beschäftigt. Einen Überblick über die Abhängigkeiten verschafft Abbildung 3.3 Die Beziehung der ausgewählten Parameter zu den anderen Parametern wird in Abbildung 3.2bab der sechsten Spalte dargestellt.

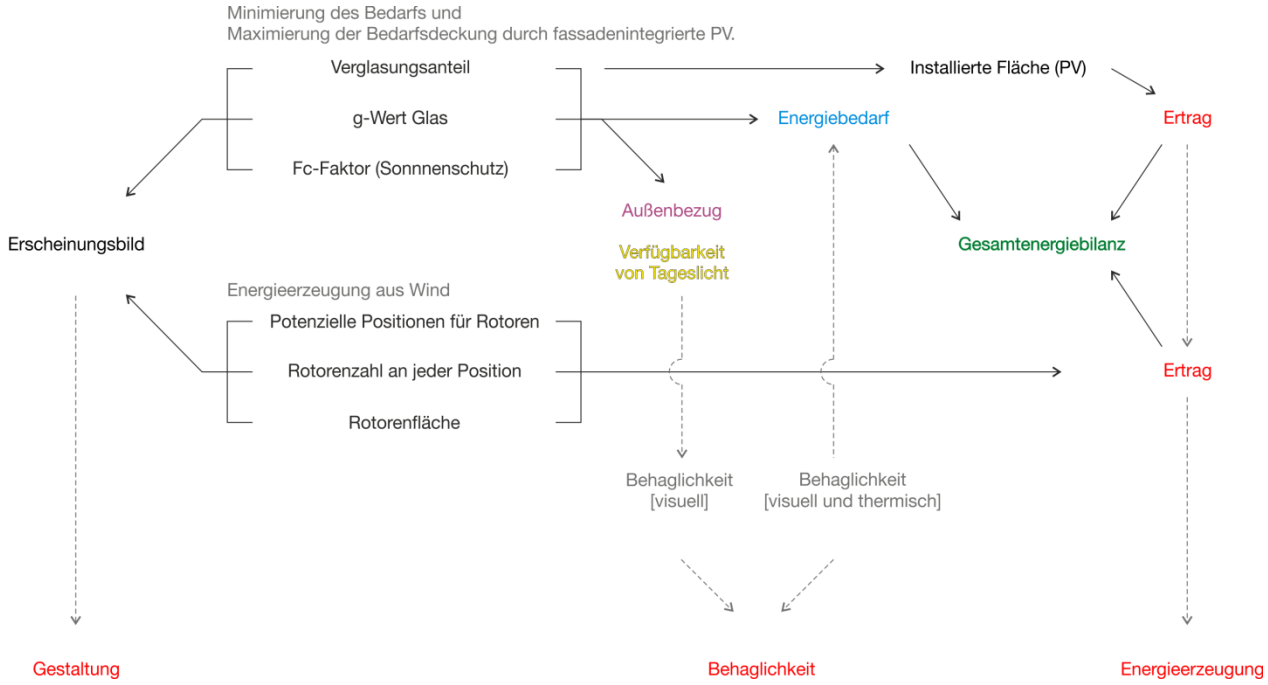


Abbildung 3.3 Abhängigkeiten und Zusammenhänge im Hinblick auf das Grundmodell (eigene Darstellung)

Es muss erwähnt werden, dass die thermische Behaglichkeit in diesem Zusammenhang immer erreicht wird. Der zu ermittelnde Energiebedarf bedenkt also immer das Erreichen der Mindestgrenzen der thermischen Behaglichkeit. Die visuelle Behaglichkeit dagegen ist kritischer und abhängig von den bauphysikalischen Eigenschaften der Fassade und deren Geometrie. Diese Faktoren beeinflussen auch den Energiebedarf für die künstliche Beleuchtung. Daher wird mit der Behaglichkeit hauptsächlich die visuelle Behaglichkeit gemeint.

3.1.2 Struktur und Anwendungspfad

Aus dem Stand der Forschung und dem Überblick über die üblichen Planungsabläufe kann gefolgert werden, dass die Planung eines Plus-Energie-Hochhauses mehr oder weniger nach folgendem Prozess abläuft, der in Abbildung 3.4 dargestellt ist. An Orten mit Verfügbarkeit von erneuerbaren Energieressourcen führen die Optimierung und Integration von energiesparenden bzw. Energieerzeugungsparametern in das Hochhaus zum Erreichen der Plus-Energiebilanz. Die folgenden Parameter werden in der Regel für eine überschlägige Berechnung benötigt:

- **Äußere Einflüsse:** Klimaeigenschaften des Standorts
- **Innere Einflüsse:** Raumkonditionierungskonzept hinsichtlich der menschlichen Behaglichkeit.
- **Schnittstelle:** bauphysikalische Eigenschaften der Fassade zur Energieeinsparung
- **Schnittstelle:** Energieerzeugung über fassaden- und/oder dachintegrierte Photovoltaikzellen und/oder Windturbinen
- **Baukörper:** Form und Höhe

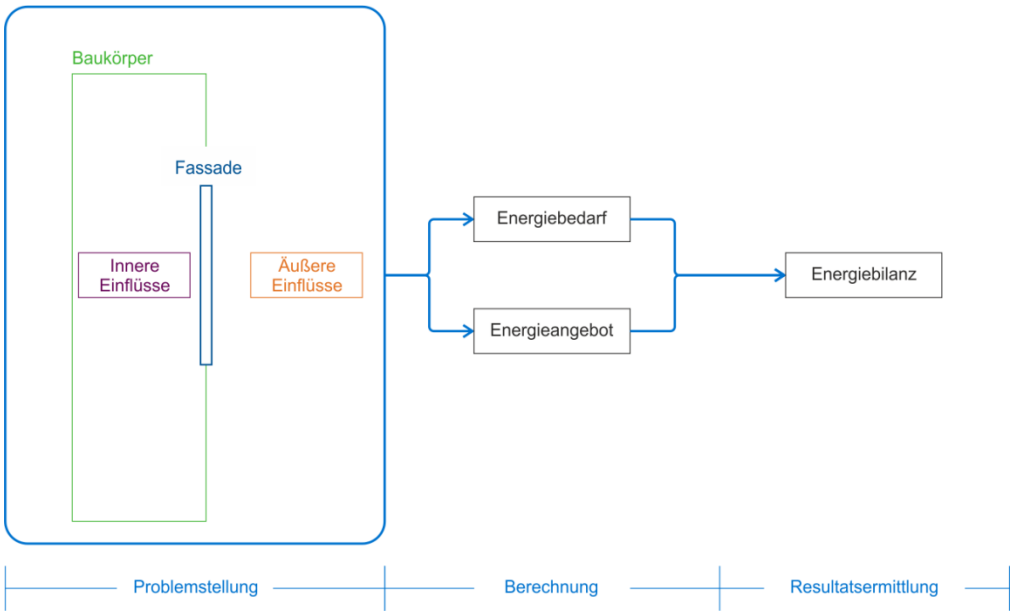


Abbildung 3.4 Herkömmliche und typische Planungsmethode (eigene Darstellung)

Prinzipiell fließen die Daten der oben genannten Parameter in zwei Rechen- oder Simulationsprogramme ein. Einmal zur Ermittlung des Energiebedarfs und einmal zur Abschätzung des Energieangebots. Die Energiebilanz ist das Resultat aus den beiden Ergebnissen. Diese Methode funktioniert mehr oder weniger nach dem analogen Ablauf, der in Abschnitt 1.6 diskutiert wurde. Wie erläutert müssen dabei sehr viele Simulationen und Verbesserungsversuche vom Architekten und dem Fachplaner durchgeführt werden, bis die gewünschte Energiebilanz erreicht wird. Das muss trotzdem nicht bedeuten, dass alle potenziellen Möglichkeiten zur Maximierung der Performance durchgespielt wurden.

Die vorliegende Arbeit stellt eine andere Methode vor, die in Abbildung 3.5 dargestellt ist. Grundsätzlich werden die Fassade und der Baukörper in der gezeigten Organisation entkoppelt.

Die hinsichtlich der Fassade relevanten äußeren Einflüsse zur Energieeinsparung und -erzeugung (z. B. Solardaten) werden in das sogenannte (SOPT) Solarenergieoptimierungstool integriert. Die Winddaten des Standorts werden zusammen mit Aspekten des Baukörpers im (WOPT) Windenergieoptimierungstool zusammengestellt. Die inneren und weiteren äußeren Einflüsse fließen zur Ermittlung des Energiebedarfs in ein Energiebilanztool (EBIT) ein.

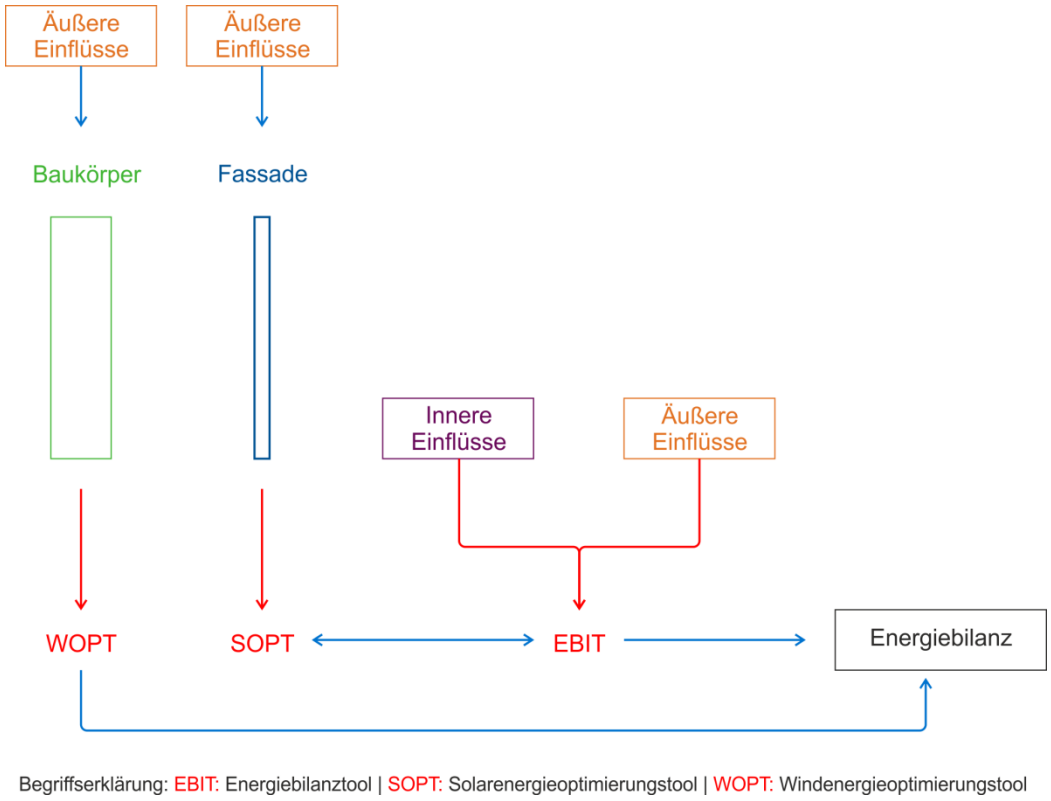


Abbildung 3.5 Vorgeschlagene Methode (eigene Darstellung)

Das Solarenergieoptimierungstool beschäftigt sich mit der Ermittlung der optimalen Fassadenparameter hinsichtlich Energieeinsparung und -erzeugung. Daher interagiert der Optimierungsalgorithmus ständig mit dem Energiebilanztool und tauscht zur Prüfung der vorgeschlagenen Ansätze Daten in Bezug auf den Bedarf und das Angebot aus. Das Windenergieoptimierungstool dient als Unterstützung der Energieversorgung zur Erhöhung der Energiebilanz, durch Abdeckung eines Defizits oder eine Steigerung der ins Netz eingespeisten Energie. Die drei Tools zusammen führen am Ende zur Energiebilanz oder Plus-Energiebilanz.

Eine ausführliche Beschreibung der Funktionalität der beiden Tools folgt in den Abschnitten 3.2 und 3.3. Diese Entkopplung erlaubt eine detailliertere Auseinandersetzung mit den wesentlichen Parametern. Die Optimierungsalgorithmen im jeweiligen Tool erfüllen die Aufgabe, die Performance unter angegebenen Parametern zu maximieren.

Die Grafik der Abbildung 3.6 gibt Auskunft über die Hauptstruktur des entwickelten Werkzeugs. Das System besteht aus zwei grundsätzlichen Teilen. Das Programm ist so flexibel entwickelt, dass der Nutzer es entweder im einfachen Modus oder im Expertenmodus bearbeiten und eventuell mit anderen Rechenprogrammen oder Zeichentools verknüpfen kann.

Das System besteht aus folgenden Teilsystemen:

- Benutzeroberflächen (gekennzeichnet mit rotem Rahmen)
- Optimierungsmodelle
- Unterstützende Programme im Hintergrund (gekennzeichnet mit grauem Rahmen)
- Bewertungsmatrix
- Kriterienbericht

Danach folgt der Anwendungspfad in Abbildung 3.7. Dieser zeigt, welche Schritte nacheinander bis zur Erstellung des Kriterienberichts ausgeführt werden. Die Aufstellung fängt bei der Eingabe der grundsätzlichen Rahmenbedingungen an und endet bei der Erstellung des Kriterienberichts oder der Zusammenfassung der Kriterien.

Der Pfad ist so gestaltet, dass man zunächst mit dem Solarenergieoptimierungstool anfängt und danach das Windenergieoptimierungstool zur Erhöhung des Ertrags bzw. zur Abdeckung eines Defizits verwendet.

Wesentlich bei der Nutzung der entwickelten Tools ist der Zeitpunkt. Die Tools sind für den Einsatz bei der Konzeptionierung gedacht, sie sollten also in der frühen Entwurfsphase angewendet werden. Somit wird die aktive Beteiligung von Fachplanern auf die weiteren Phasen verschoben, was sich kosten- und zeitsparend auswirkt. Dies ist auch für den Architekten von Vorteil, der möglichst viele Konzepte ausprobieren möchte.

Die Programme sind an Architekten gerichtet, die Interesse an der Thematik haben. Der Nutzer des Tools sollte sich einigermaßen mit Klimatechnik auskennen. Allerdings erfordert der Umgang mit den Parametern keine tiefen Fachkenntnisse, weshalb die erzeugten Daten die Fachplaner nicht ersetzen. Vielmehr geht es um eine erste Annäherung.

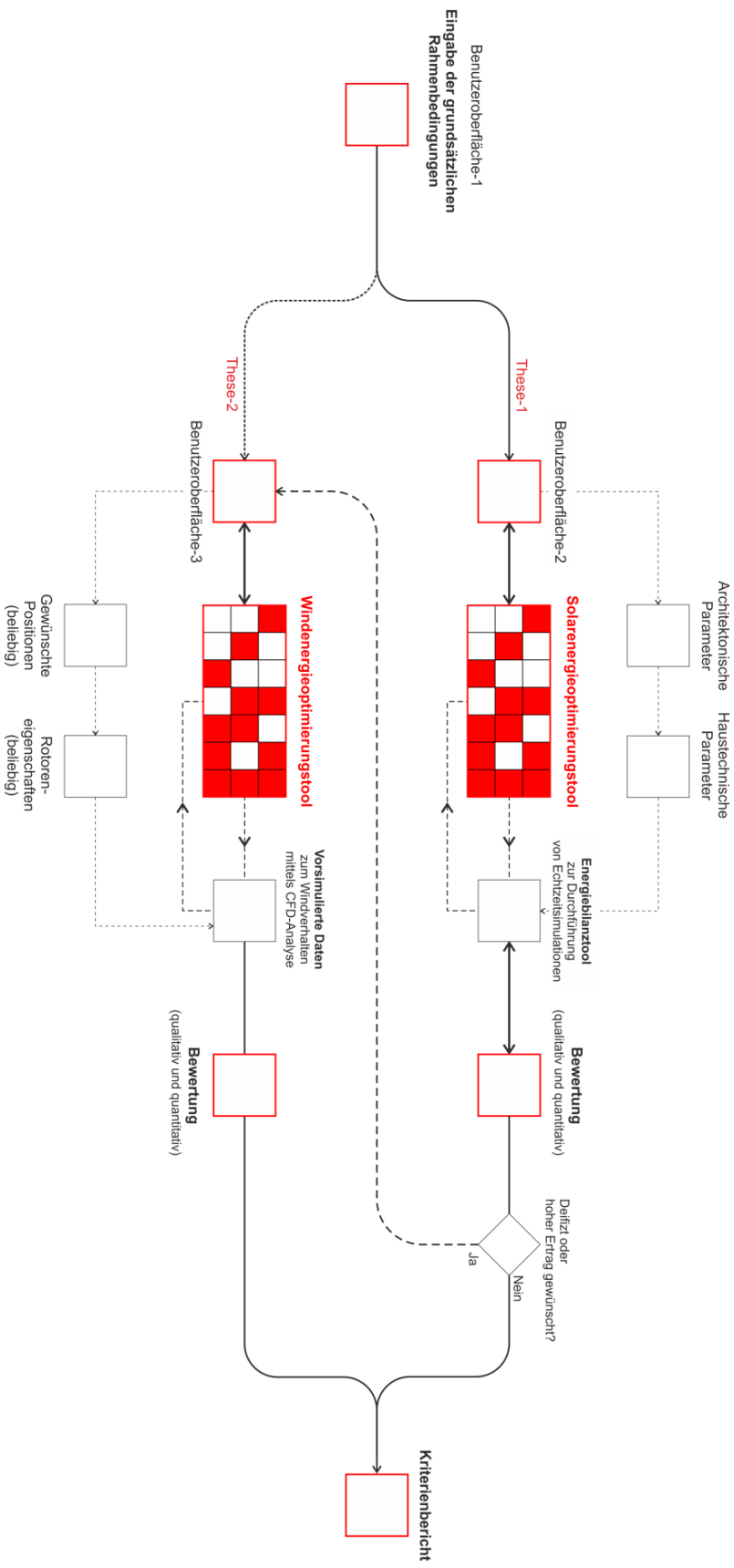


Abbildung 3.6 Hauptkomponenten des Hochhausoptimierungstools (eigene Darstellung)

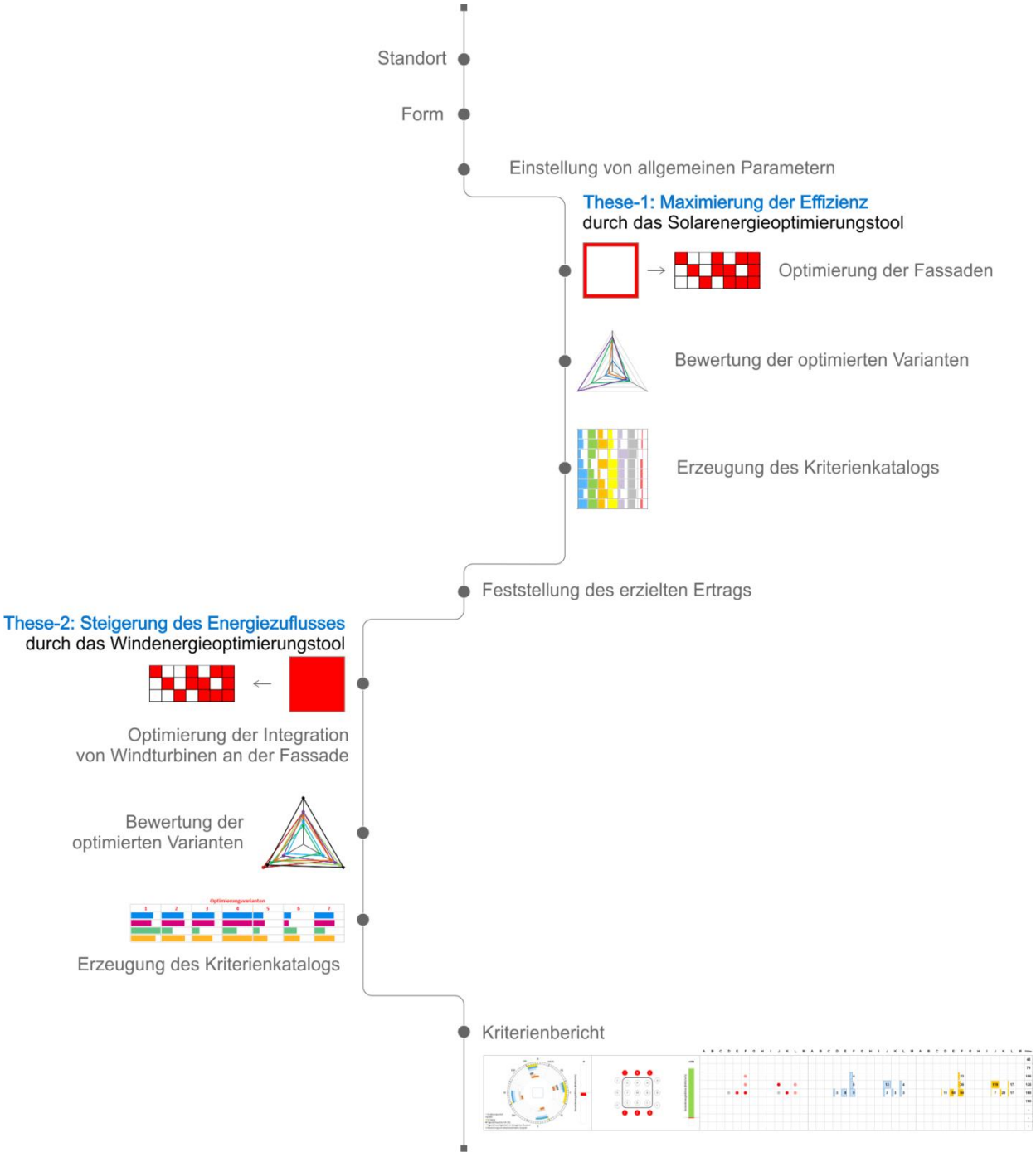


Abbildung 3.7 Anwendungspfad des Systems (eigene Darstellung)

3.1.3 Optimierung mittels Sensitivitätsanalyse

Die Nutzung der Sensitivitätsanalyse stellt einen nützlichen Optimierungsansatz dar. Entscheidungen über die relevanten Parameter eines Konzepts werden auf der Basis der Ergebnisse getroffen. Die mathematischen Grundlagen für diese Methode wurden in den 1980er-Jahren, insbesondere im Rahmen der Nuklearforschung erarbeitet [150].

Die Sensitivitätsanalyse, auch als Empfindlichkeitsanalyse bekannt, ist eine Analyseform für komplexe Systeme und Probleme, bei der einfache Wirkungsbeziehungen zwischen Systemvariablen zu einem Wirkungsnetz verbunden werden und mit dessen Hilfe Rollen für die Systemvariablen festgelegt werden können. Bei einer Sensitivitätsanalyse findet eine Grenzbetrachtung der Ergebnisse statt. Dabei werden entweder ein Parameter oder auch mehrere Parameter gemeinsam verändert. Es wird geprüft, ab welchem Zeitpunkt der Zielwert unter- oder überschritten wird (z. B. die Opportunität). In der Sensitivitätsanalyse wird der Einfluss von Inputfaktoren (einzeln oder gemeinsam) auf bestimmte Ergebnisgrößen untersucht. Die Analyse kann mathematisch durch das Analysieren von Modellgleichungen erfolgen oder durch die Verwendung von einzelnen variierten Inputfaktoren (Iterationsverfahren), d. h. den Vergleich der Ergebnisse mit dem Ergebnis des Standardinputs [151].

Bei der Sensitivitätsanalyse werden folglich Größen des Ausgangsproblems variiert, um zu untersuchen, welche Auswirkung eine derartige Modifikation auf die Lösung des Problems hat [152]. Man kann diese Frage auch etwas anders stellen:

In welchem Maß kann man eine Größe ändern, ohne dass sich die Änderung auf die wesentlichen Eigenschaften der Lösung auswirkt?

Grundsätzlich wird zwischen lokaler und globaler Sensitivitätsanalyse unterschieden. Das wesentliche Merkmal lokaler Sensitivitätstechniken ist die Betrachtung örtlich begrenzter Antwortgrößen eines Systems bei geringer Veränderung einzelner Eingangsgrößen (*One-At-a-Time-Versuche, OAT*) [150]. Die restlichen Parameter bleiben unverändert (*base-case)*. Diese Methode kann bei linearer Korrelation der Einflussgrößen angewendet werden [26]. Es fehlt die Möglichkeit, Wechselwirkungen zwischen mehreren Einflussparametern zu identifizieren [150], wobei die Durchführung mehrerer Berechnungen mit unterschiedlichen Inputfaktoren einen Gesamtüberblick über das Modell und seine Sensitivität geben kann [27]. Ein wesentlicher Vorteil dieser Technik ist, dass sie rechnerisch schneller ausgeführt werden kann.

Beim globalen Verfahren der Sensitivitätsanalyse gibt es bei den Inputfaktoren keine Einschränkung der berücksichtigten Parameter. Mehrere Parameter können gleichzeitig abgetastet werden. Diese Technik benötigt einerseits weniger Simulationen, anderseits aber mehr Zeit. Ein Vergleich zwischen den beiden Methoden wird in [27] angestellt. Im Rahmen dieser Arbeit werden in den Werkzeugen Optimierungsmodelle nach beiden Verfahren aufgebaut, um möglichst mehrere optimale Varianten zu erzeugen und dem Nutzer die Möglichkeit zur Auswahl zu bieten, was sich positiv auf die qualitative Analyse auswirkt. Im Optimierungsmodell werden Inputfaktoren, Ziel und Nebenbedingungen festgesetzt. Je nach Modell wird/werden der/die Inputfaktor/-en unter Einhaltung der Nebenbedingungen variiert, bis das Ziel erreicht ist oder man ihm so nah wie möglich gekommen ist.

3.1.4 Ermittlung des Energiebedarfs durch Livesimulationen im Hintergrund

Da im Optimierungsprozess Daten bearbeitet werden, um eine bestimmte Zielfunktion zu maximieren oder minimieren oder um einen bestimmten Zielwert zu erreichen, werden Simulationsdaten zum Energiebedarf bzw. -angebot benötigt. Um nicht mehr in einem externen Programm viele Fälle simulieren zu müssen und so Zeit und Aufwand zu sparen, sollte ein Programm zur Ermittlung des Energiebedarfs durch Eingabe bzw. Änderung der Fassadeneigenschaften entwickelt werden, das im Hintergrund läuft. Der Nutzer hat mit dem Energiebedarfstool keinen Kontakt, kann aber einige Rahmenbedingungen einstellen.

Im Rahmen des Masterkurses *ClimaDesign* an der TU München wurde für die Abschätzung des Energiebedarfs ein Excel-basiertes Tool entwickelt. Dieses sogenannte Energiebilanztool ist eine Zusammensetzung von Wetterdaten, die mit Excelfunktionen manipuliert werden [153]. Um eine genauere Abschätzung der zur Luftkonditionierung erforderlichen Leistung zu ermöglichen, wurde das Energiebilanztool durch die Integration von anderen Programmen erweitert. Eine von der ILK Dresden entwickelte und zur Verfügung gestellte Freeware, mit der der Energiebedarf zur Be- und Entfeuchtung ermittelt wird, wurde in das Energiebilanztool eingebettet. Die Bedarfsermittlung erfolgt durch Berechnung der erforderlichen Enthalpie nach den klimatechnischen Prozessen im *Mollier-h-x-Diagramm* unter Vorgabe des gewünschten Luftdrucks [154].

Der Vorteil des Energiebilanztools besteht darin, dass sich die Parameter und die Berechnungsverfahren dem Nutzer leicht erschließen, was zum Ausbildungsprozess beiträgt. Die Studenten waren zum Teil an der Entwicklung beteiligt. Zur Prüfung des Tools und Regulierung der Speicherfähigkeit wurden durch den Autor der vorliegenden Arbeit parallele Simulationen mittels eines Programms für dynamische Simulation (*IDA-ICE 4)* durchgeführt. Auf Basis der Ergebnisse wurden die Speicherkapazitäten kalibriert.

Da diese Arbeit sich hauptsächlich mit Bürohochhäusern beschäftigt, kann man davon ausgehen, dass für die elektronische Datenverarbeitung (EDV) pro Jahr ungefähr 6,9 kWh/Person Stromenergie benötigt werden. Bleiben noch die Berechnung des Energiebedarfs für die Beleuchtung und die Ermittlung des Tageslichtquotienten. Es gibt bereits externe Programme zur Lichtsimulation, die diese Funktionen erfüllen. Um auch das Energiebilanztool entsprechend auszustatten, wurde der *AL-Kreis* integriert. Der *AL-Kreis* ist ein grafisches Werkzeug zur Bestimmung von Tageslichtquotienten in Räumen. Das Verfahren wurde im Rahmen der Dissertation von Andreas Lahme an der TU Braunschweig entwickelt. Mit dem *AL-Kreis* kann für einen beliebigen Punkt im Gebäude der Anteil des gleichmäßig bedeckten Himmels bestimmt werden, der durch die verschiedenen rechteckigen Öffnungen sichtbar ist. Unter Berücksichtigung der üblichen Reduktionsfaktoren der Fenster für die Lichttransmission, z. B. Versprossung und Verschmutzung, kann hiermit der Tageslichtquotient bestimmt werden [155].

Die Benutzeroberfläche ist leider nicht anwenderfreundlich, aber die wichtigste Grenze dieses Tools ist ganz klar darin zu sehen, dass es ausschließlich stationäre Energiebilanzen für jede Stunde des Jahres ermittelt. Dies reicht allerdings für grobe Abschätzungen in konzeptionellen

Phasen. Die zur Ermittlung der Energiebilanz verwendeten Schritte wurden nach DIN 18599 geordnet.

3.1.5 Inneneinflüsse: menschliche Behaglichkeitsanforderungen am Arbeitsplatz

Das Bedürfnis nach einer Unterkunft/Wohnung/Schutzhülle wird neben Gesundheit zu den menschlichen Grundbedürfnissen nach Maslow gezählt [156]. Die Ermittlung des Energiebedarfs eines Gebäudes erfolgt nach Feststellung der zur Erfüllung der menschlichen Behaglichkeitsanforderungen benötigten Energie. Diese Anforderungen können als die grundlegenden inneren Einflüsse auf die Energiebilanz bezeichnet werden. Ziel eines vernünftigen Klimakonzepts im Hinblick auf den Menschen im Arbeitsraum ist, mit möglichst geringem technischen Aufwand und Energieverbrauch folgende Aspekte zu erreichen:

- Wohlbefinden des Menschen
- Gesundheit
- Arbeitsfreude
- Hohe Leistungsfähigkeit

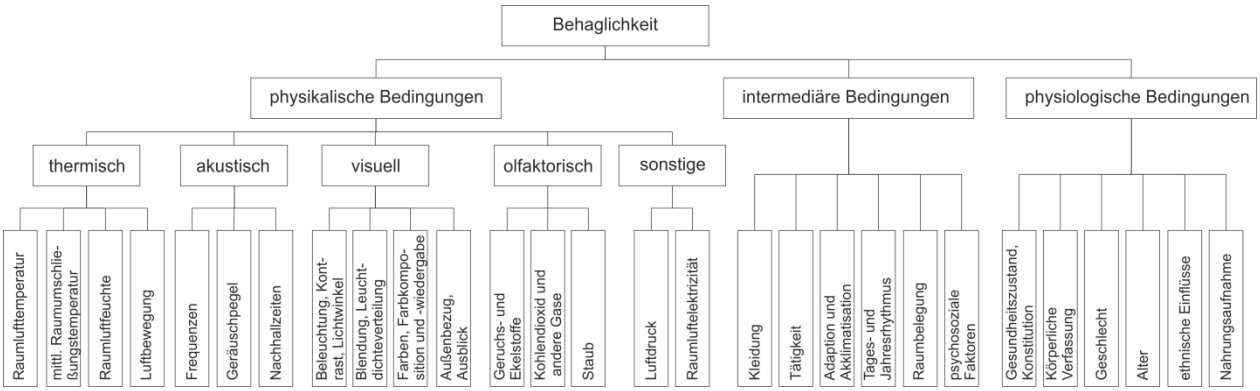


Abbildung 3.8 Systematische Darstellung von Behaglichkeitsfaktoren [6]

Unter Behaglichkeit versteht man den Zustand des Wohlbefindens eines Menschen, bedingt durch äußere Einflüsse seiner Umgebung [157]. Eine systematische Darstellung von Behaglichkeitsfaktoren nach Hegger wird in Abbildung 3.8 gezeigt [6]. Hier wird ein Überblick über die Behaglichkeitsaspekte von einzelnen Faktoren gegeben, die mehr oder weniger stark mit der Thematik dieser Arbeit verknüpft sind bzw. in einem Zusammenhang mit den entwickelten Werkzeugen stehen.

Thermische Behaglichkeit

Der menschliche Körper ist in der Lage, seinen Wärmehaushalt für eine gewisse Zeit auch unter ungünstigen Umweltbedingungen selbst zu regulieren. Darüber hinaus ist er aber auf die Anpassung des Raumklimas angewiesen. Ein behagliches Raumklima ist dann erreicht, wenn die Wärmebilanz zwischen Körper und Umgebung ausgeglichen ist [158].

Der Begriff Behaglichkeit gilt heute als Qualitätskriterium für Heizungs- bzw. Klimatisierungssysteme. Dabei sind für die Behaglichkeit mehrere Parameter relevant, die alle unabhängig voneinander existieren und verändert werden können [157]:

- Temperaturniveau und Temperaturunterschiede im Raum
- Strahlungsintensität und Strahlungsunterschiede der Umschließungsflächen
- Thermische Strömungen und thermische Spannungen
- Schmelzen und Flüsse, Dampfbildungen, Sublimation

Behaglichkeit ist zu einem gewissen Grad auch subjektiv und es gibt diesbezüglich keinen einheitlichen Maßstab. Dazu kommen regionale Unterschiede, die den Behaglichkeitsbereich bestimmen. Beispielsweise kann die Solltemperatur der Klimaanlagen bei 20 °C liegen, wohingegen in den asiatischen Ländern die Klimaanlagen auf 17 °C Solltemperatur eingestellt werden.

Tätigkeit	Aktivitätsgrad DIN 1946 T.2	Metabolic Rate = Wärmeabgabe		
		W/m²	met	W
ruhend		46	0,8	80
sitzend, entspannt	I	58	1	100
stehend, entspannt		70	1,2	125
sitzende leichte Tätigkeit		70	1,2	125
(Büro, Wohnung, Schule, Labor)				
stehende leichte Tätigkeit				
(Zeichenbrett-Tätigkeit)		81	1,4	145
(Shopping, Labor, leichte Industrie	II	93	1,6	170
mäßige körperliche Tätigkeit	III	116	2	200
(Haus-, Maschinenarbeit)				
schwere körperliche Tätigkeit	IV	165	2,8	300
(schwere Maschinenarbeit)				

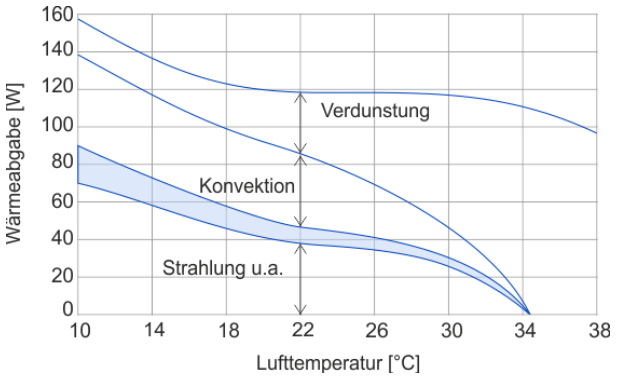


Tabelle 3.1 Gesamtwärmeabgabe des Menschen bei verschiedenen Tätigkeiten (1 met = 58 W/m^2), nach (*ISO 7730*);

Abbildung 3.9 Gesamtwärmeabgabe eines normal bekleideten Menschen ohne körperliche Tätigkeit bei ruhender Luft [159]

Der Mensch kann als eine Wärmekraftmaschine bezeichnet werden. Bei vollkommener Ruhe und ohne Arbeit gibt der Mensch ca. 80 Watt Wärme ab. Es liegt ein Gleichgewicht vor zwischen der aktivitätsbedingten Wärmeproduktion des menschlichen Körpers und der jeweiligen Wärmeabgabe an die Umgebung, ohne dass der Körper eigens dafür besondere Anpassungsleistungen („Thermo-Stress") erbringen müsste [160].

Die Gesamtwärmeabgabe von Menschen beträgt zwischen 18 und 30 °C Lufttemperatur rund 118 W, ohne große Abweichung. Unter 18 °C Lufttemperatur steigt die Wärmeabgabe deutlich an. Während die fühlbare Wärmeabgabe durch Strahlung und Konvektion mit sinkender Temperatur weiter steigt, bleibt die latente Wärmeabgabe durch Feuchtigkeitsabgabe konstant. Bei Temperaturen über 30 °C sinkt die fühlbare Wärmeabgabe und die latente Wärmeabgabe steigt. Bei einer Temperatur höher als 34 °C ist die fühlbare Wärmeabgabe null. Bei dieser Temperatur findet nur noch latente Wärmeabgabe statt [159]. Dieser Prozess ist im Endeffekt ein künstlicher Kühlprozess, der im Vergleich zur Heizung viel Energie benötigt. Tabelle 3.1 liefert einen Überblick über die Gesamtwärmeabgabe des Menschen bei verschiedenen Tätigkeiten.

Die Länder, in denen die für diese Arbeit ausgewählten Standorte liegen, sind Mitglieder der *ISO-International Organization for Standardization*, die Normen für viele Bereiche erarbeitet. Die internationale Norm *ISO 7730* beschäftigt sich mit der Bewertung der thermischen Behaglichkeit

des Menschen. Es kann davon ausgegangen werden, dass die Behaglichkeitsgrenzen, v. a. hinsichtlich der thermischen Behaglichkeit, für die Beispielländer gleich eingestellt werden können.

Raumlufttemperatur und relative Feuchte

Die thermische Behaglichkeit ist zwar für jeden Einzelnen verschieden, man hat jedoch ein Behaglichkeitsfeld aus Temperatur und Luftfeuchtigkeit ermittelt, in dem sich die Mehrheit der Menschen wohlfühlt. Dieses Feld wird in Abbildung 3.10 gezeigt.

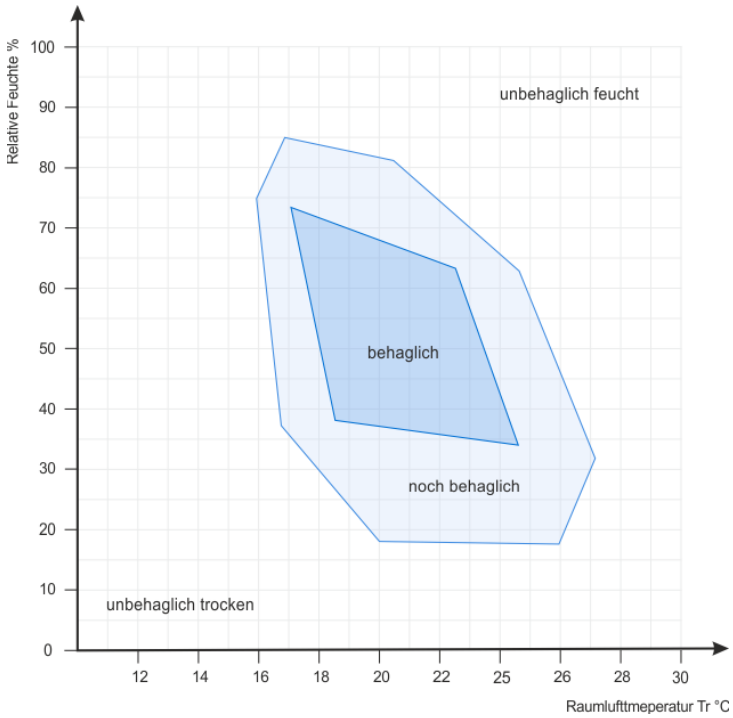


Abbildung 3.10 Behaglichkeitszone in Abhängigkeit von der Raumlufttemperatur und der relativen Feuchte

Bei Lufttemperaturen um 26 °C werden 18 % bis 45 % relative Feuchte als noch behaglich empfunden. Bei Lufttemperaturen unter 20 °C sind höhere Feuchtigkeitsgrade möglich, weil über die Körperoberfläche weniger verdunstet. Bei hohen Temperaturen und relativen Feuchten wird die Verdunstungswärmeabgabe vermindert, was zum unangenehmen Schwülegefühl führt. Das ist an den ausgewählten Standorten der Studie typischerweise der Fall.

Bei einer relativen Feuchte unter 30 % kommt es zur Vermehrung von flugfähigen Staubteilchen, welche die Atmungsorgane reizen. Eine geringe relative Feuchte führt außerdem zu verstärkter Austrocknung der Atemwege [158].

Raumumschließungstemperatur

Die Temperatur der Umschließungsflächen sollte so beschaffen sein, dass es nur zur physiologisch notwendigen Wärmeabgabe kommt. Die Wärmeabgabe sollte dabei nach allen Seiten (Wand, Fußboden, Decke) des Raumes möglichst gleichmäßig erfolgen. Optimale Temperaturbedingungen wären theoretisch dann gegeben, wenn auch noch die Temperaturen

der Luft und der Umschließungsflächen gleich wären [158]. Die Darstellung in Abbildung 3.11 gibt Auskunft über die Behaglichkeit in Abhängigkeit von Raumlufttemperatur und mittlerer Raumumschließungstemperatur. Bei einer relativen Luftfeuchte (Rh) zwischen 30 und 70 % sowie einer Luftbewegung (v) zwischen 0 und 20 cm/s gilt weitgehende Temperaturgleichheit aller raumbegrenzenden Flächen [161].

Die von einem Menschen empfundene Temperatur (auch operative Temperatur genannt) hängt neben der Lufttemperatur auch von den Temperaturen der Umschließungsflächen des Raumes (Wände, Fenster und auch Heizkörper) ab. Der Mensch steht mit diesen Flächen in einem Strahlungsaustausch, der die Behaglichkeit in bedeutendem Maße beeinflusst. Die Bewertung des Strahlungsaustauschs erfolgt über die mittlere Strahlungstemperatur. Diese bildet sich aus den Temperaturen der einzelnen Umschließungsflächen, gewichtet mit deren Flächenanteil. Die mittlere Strahlungstemperatur lässt sich gezielt beeinflussen, z. B. durch Heizkörper oder Kühldecken. Der Einfluss der Strahlungstemperatur auf die empfundene Temperatur ist in Abbildung 3.11 dargestellt. Demnach setzt sich die empfundene Temperatur zu gleichen Teilen aus der Luft- und der Strahlungstemperatur zusammen. Je mehr sich beide Temperaturen angleichen, desto gleichmäßiger erfolgt die Erwärmung des Menschen [162].

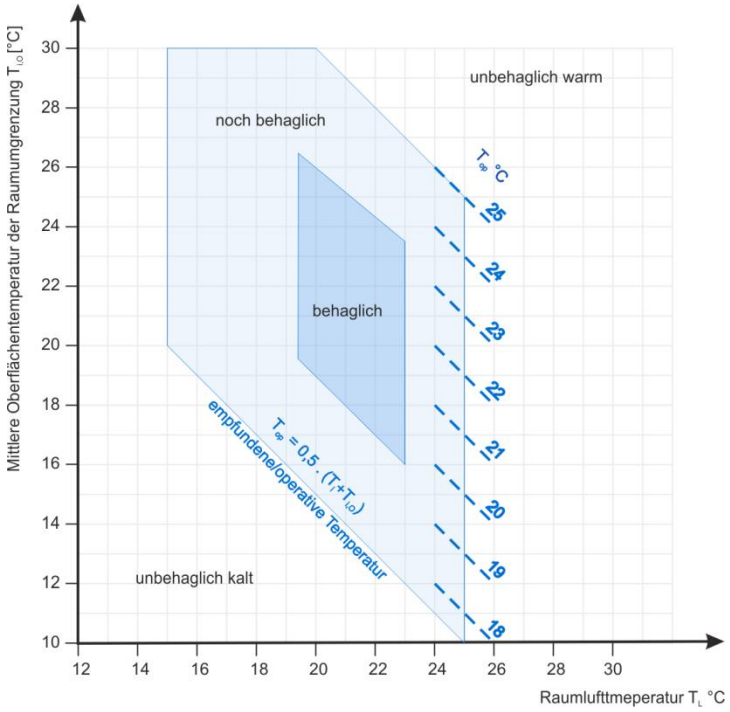


Abbildung 3.11 Behaglichkeitszone in Abhängigkeit von Raumlufttemperatur und mittlerer Raumumschließungstemperatur [161]

Nach der *VDI-Richtlinie 6030* wird ein Raum als behaglich empfunden, wenn die Temperaturdifferenz zwischen:

- Wandoberfläche und Raumluft weniger als 4 K,
- Fuß- bis Kopfhöhe weniger als 3 K,
- verschiedenen Wandoberflächen (Strahlungsasymmetrie) weniger als 5 K

beträgt und wenn die Luftgeschwindigkeit und ihre Turbulenz klein ist (keine Zugerscheinungen).

Die Auswirkung der operativen Temperatur auf die Leistungsfähigkeit des Menschen wird in Abbildung 3.13 dargestellt. Diese Darstellung setzt eine mittlere Luftgeschwindigkeit von 0,15 m/s und eine mittlere relative Feuchte von 50 % voraus. Man kann davon ausgehen, dass eine operative Temperatur von ungefähr 23 °C den Kern des optimalen Bereichs darstellt.

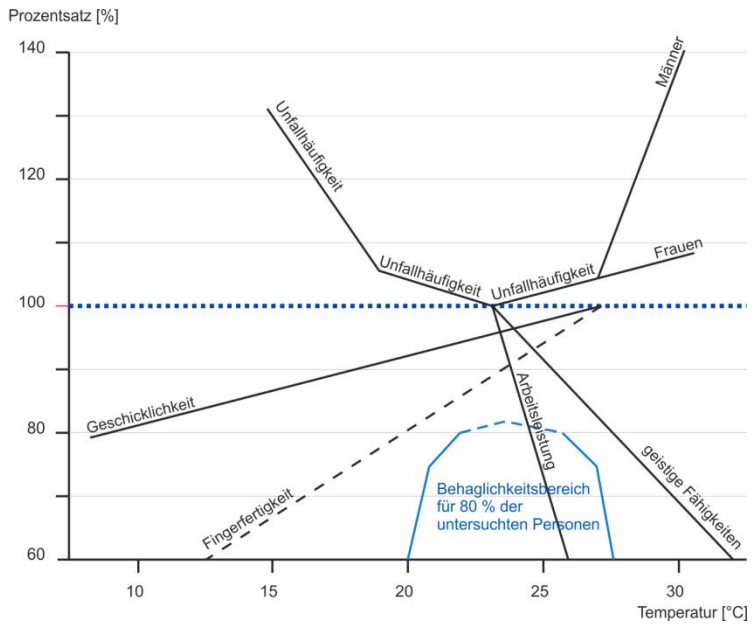


Abbildung 3.12 Zusammenhang zwischen Temperatur und Leistung nach Wyon [159]

Die aufgezeigten Grenzen wurden in das Energiebilanztool integriert. Die technischen Anlagen werden bei der Ermittlung des Energiebedarfs entsprechend dimensioniert, d. h., während des Variierens der Parameter zwecks Optimierung ist die thermische Behaglichkeit der Nutzer im Arbeitsraum im ermittelten Energiebedarf immer berücksichtigt.

Visuelle Behaglichkeit

Visuelle Behaglichkeit ist gegeben, wenn der Mensch seine optische Wahrnehmung als angenehm empfindet. Die Wahrnehmungen der Augen werden an das Gehirn geleitet und dort zu einem Bild zusammengesetzt. Dieser Prozess sollte möglichst ungehindert und ohne große Anstrengungen ablaufen. Blendungen, zu starke Kontraste, Farbverfälschung, ungenügend Licht, ungünstige Raumgestaltung usw. stören den Wahrnehmungsprozess und beeinträchtigen somit die visuelle Behaglichkeit [163]. Durch die visuelle Behaglichkeit erhöhen sich Wohlbefinden, Orientierungsfähigkeit, Sicherheitsgefühl und Produktivität des Menschen.

Empfohlene Beleuchtungsstärke

Die Beleuchtungsstärke bezeichnet den Lichtstrom (s. u.) pro Flächeneinheit. Dabei gilt: 1 lm/m^2 = 1 lx. Die Beleuchtungsstärke gibt an, wie hell ein Gegenstand beleuchtet ist. Ob die

Lichtmenge ausreicht, hängt allerdings nicht von der Beleuchtungsstärke, sondern von der Leuchtdichte ab, also von der Lichtmenge, die der Gegenstand zu den Augen zurückwirft [164].

Die Beleuchtungsstärke nimmt mit dem Quadrat der Entfernung zur Lichtquelle ab (also bei doppelter Entfernung 4-fach geringere Beleuchtungsstärke). Die Beleuchtungsstärke von Tageslicht (mittags) schwankt zwischen 100.000 lx an einem schönen Sommertag und 400 lx an einem trüben Wintertag. In den Arbeitsstättenrichtlinien ASR 7/3 und DIN 5035 sind für die Beleuchtung Nennbeleuchtungsstärken festgelegt. Diese stellen für die Planung und Ausführung von Beleuchtungsanlagen vorgeschriebene Mindestwerte dar. In der Tabelle 3.2 sind die Richtwerte für Büroräume zusammengefasst.

Bezeichnung bzw. Zweck des Raumes	**Nennbeleuchtungsstärke *E* in [lx]**
Büroräume mit tageslichtorientierten Arbeitsplätzen (ausschließlich in unmittelbarer Fensternähe)	300
Büroräume allgemein	500
Großraumbüros mit hoher Reflexion	750
Grossraumbüros mit mittlerer Reflexion	1000
Büro für technisches Zeichnen	750
Sitzungs- und Besprechungsräume	300
Empfangsräume	100
Räume mit Publikumsverkehr	200
Räume für EDV und PC-Anwendung	500

Tabelle 3.2 Richtwerte für Beleuchtungsstärke nach DIN 5035

Bedürfnis nach Tageslicht und erforderlicher Tageslichtquotient in Arbeitsräumen

Die Sonne ist die Energiequelle für alles Leben auf der Erde. Sonnen-/Tageslicht zählt zu den körperlichen Grundbedürfnissen des Menschen in der Bedürfnispyramide nach Maslow. Vor allem in Arbeitsräumen ist das Wohlbefinden des Menschen bzw. seine Leistungsfähigkeit neben anderen Parametern stark vom Tageslicht abhängig. Die Berücksichtigung des Tageslichts in der Planung von Arbeitsräumen ist entscheidend, da es den Energiebedarf für Kunstlicht und Kühlung direkt beeinflusst. Tageslicht in Innenräumen kann nach DIN 5034 unter verschiedenen Aspekten betrachtet werden [165]:

- Psychische Wirkung: Hierunter fallen der subjektive Helligkeitseindruck und die Sichtverbindung nach außen.
- Sehbedingungen: Sie betreffen z. B. eine zur Erfüllung der Sehaufgabe angemessene Beleuchtungsstärke und die Begrenzung von Blendung.
- Biologische Wirkung: Hiervon sind Gesundheit, Wohlbefinden und die Leistungsfähigkeit betroffen.
- Thermische Behaglichkeit: Sie betrifft die Begrenzung von unzuträglicher Strahlungs- und Wärmebelastung.
- Energieeffizienz: Sie betrifft die Verringerung des Energiebedarfs in Gebäuden durch Tageslichtnutzung.

Das Verhältnis zwischen der Beleuchtungsstärke an einem gegebenen Punkt (normalerweise auf der Arbeitsebene) im Innenraum zur unverschatteten Beleuchtungsstärke im Freien, unter einem gleichmäßig bedeckten Himmel, wird Tageslichtquotient genannt. Der Tageslichtquotient ist einer der Schlüsselwerte in der quantitativen Analyse des Tageslichts für ein Gebäude. Da die Beleuchtungsstärken im Freien mit den meteorologischen Bedingungen stark schwanken, hat die absolute Innenbeleuchtungsstärke zu einem bestimmten Zeitpunkt nur eine beschränkte Aussagekraft. Ob die Menge an Tageslicht, welche einen für eine bestimmte Aufgabe genutzten Innenraum erreicht, akzeptabel ist, kann nur mit Bezug auf die jeweilige Außensituation festgestellt werden [166].

Für Räume mit Seitenlicht sollte laut DIN 5034 z. B. ein Tageslichtquotient von 0,95 % in halber Raumtiefe erreicht werden [167]. Tabelle 3.3 gibt Richtwerte für Tageslichtquotienten nach Zürcher an.

	Mittelwert Dp_{mittel}	Minimum Dp_{min}
Verkehrszonen, Garderoben	≥ 2 %	= 1-2 %
Restaurants	≥ 3-4 %	= 2-3 %
Allgemeine Büros, Wohnräume, Schulen, Lesen und Schreiben	≥ 5-7 %	= 4 %
Labors, Feinmontage	≥ 7-12 %	= 5-7 %
Spezielle Tätigkeiten	≥ 12 %	= 10 %

Tabelle 3.3 Richtwerte für Tageslichtquotienten [168]

Bei der Berechnung des Tageslichtquotienten werden der Tageslichtanteil für die Rohbaumaße bestimmt und Verluste durch Verglasung, Versprossung, Rahmen und Mittelpfosten und Verschmutzung sowie Korrekturen infolge nicht senkrechten Lichteinfalls berücksichtigt [168].

Verschiedene Sonnenschutzgewebe zur Verschattung haben unterschiedliche Lichttransmissionsgrade und somit verschiedene Fc-Verminderungsfaktoren. Der Lichttransmissionsgrad beeinflusst den Fc-Verminderungsfaktor und damit den Gesamtenergiedurchlassgrad der Verglasung. Grob kann die Wirkung des Sonnenschutzes z. B analog zu Verschmutzung berechnet werden. Man geht davon aus, dass der Raum zwei Tageslichtquotienten haben kann: einmal ohne Sonnenschutz, einmal mit Sonnenschutz.

Angenommen, ein Raum hat ein bewegliches Sonnenschutzgewebe, das die Verschattungsfläche im Verhältnis zur transparenten Fläche des Glases nach dem Lichteinfall automatisch verstellt. Diese Anpassungsfähigkeit ergibt am Ende ein großes Spektrum von Lichttransmissionsgraden. Diese stehen in direktem Zusammenhang mit dem Tageslichtquotienten, womit der Raum einen dynamischen Tageslichtquotienten bekommt.

Über den Tageslichtquotienten kann die Beleuchtungsstärke durch Tageslicht am Arbeitsplatz bestimmt werden. Ein Beispiel zur Erklärung:

Beleuchtungsstärke (außen): 100.000 lx (heller Sommertag)

Tageslichtquotient eines Raums: 0,95 % (angenommen!)

Beleuchtungsstärke (innen) : (100.000 x 0,95)/100 = 950 lx

Ein gesunder Arbeitsplatz verfügt über Tageslichtbeleuchtung, deren Beleuchtungsstärke im Behaglichkeitsbereich liegt, also nach Tabelle 3.2 zwischen 300 und 500 lx. Das heißt, dass der im Beispiel angenommene Tageslichquotient zu groß ist, da 950 lx außerhalb des Komfortbereichs liegen. Viel besser wäre ein Tageslichtquotient von 0,04 %, um auf 450 lx zu kommen.

Diese Komplexität bietet Potenziale zur Optimierung, v. a. wenn die jährliche Stundenzahl der hellen Sommertage berücksichtigt wird. So stellt sich die Frage, ob es sich lohnt, für im Endeffekt nur wenige Tage des Jahres eine dunkle Verglasung einzusetzen, die zu einem hohen jährlichen Strombedarf für die Beleuchtung führen kann. Daher ist es bei der Planung sinnvoll, herauszufinden, welche Fassadenkriterien zum höchsten Anteil der Arbeitszeit bei angenehmer Tageslichtbeleuchtung führen.

Außenbezug und Ausblick

Wesentlich bei der Entwicklung der Fassadenstruktur ist, dass Sichtbeziehungen in die unteren Stadt- und Landschaftsräume bestehen müssen, an denen man sich „festmachen“ kann. Ein Versperren dieser Sichtbeziehungen hätte gravierende Nachteile bezüglich der Akzeptanz, da es bei mittleren und höheren Brüstungen dazu kommen kann, dass u. U. tagelang nur eine graue Fläche als Umgebung wahrgenommen wird (an trüben oder regenreichen Tagen) [114].

Für die Tagesbelichtung ist eine möglichst hohe Fensterposition günstig. Deshalb kann es bei sehr geringen Fensterflächenanteilen sinnvoll sein, ein Fenster für den Ausblick und ein Oberlicht zur Tageslichtversorgung der Bereiche in der Raumtiefe vorzusehen [169]. Ein Mangel an Tageslicht führt bei empfindlichen Menschen zur Depression, dem sogenannten *Winterblues* [170].

Sonstige indirekt relevante Behaglichkeitsparameter

Hygienische Behaglichkeit

Jeder Mensch produziert 10 bis >50 l/h CO_2. Bei zu hohem CO_2-Gehalt in der Luft kommt es zu Ermüdungserscheinungen und Bewusstlosigkeit. Der Kohlensäuremaßstab nach Pettenkofer gibt die Zunahme an ausgeatmetem CO_2 an, was an sich ohne wesentliche Bedeutung wäre, wenn nicht der Kohlensäuregehalt für die Verschlechterung der Raumluft durch Geruchsstoffe und Ausdünstungen verantwortlich wäre, wovon insbesondere kleine und stark besetzte Räume betroffen sind.

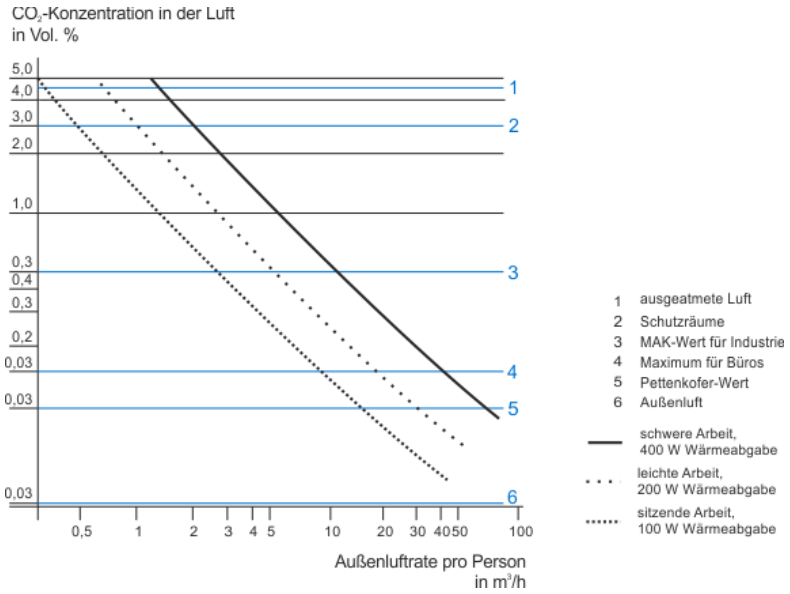


Abbildung 3.13 Außenluftrate pro Person bei verschiedenen zulässigen CO2-Konzentrationen

Steigt der CO_2-Gehalt über 0,1 % an, so spricht man bereits von schlechter Luft (0,1 % = 1.000 ppm). Schädliche Auswirkungen des CO_2 treten bei Werten von mehr als 0,25 % auf. Bei stark besetzten und schlecht gelüfteten Räumen kann dieser Gehalt, wie der Kohlensäuremaßstab zeigt, bereits nach relativ kurzer Zeit erreicht werden und es ist eine Durchlüftung mit möglichst hohem Luftwechsel durchzuführen. Bei vierfachem Dauerluftwechsel pendelt sich der CO_2-Gehalt bei 0,14 % ein, was subjektiv zwar als Luftverschlechterung empfunden wird, objektiv aber zu keiner echten Beeinträchtigung führt. Nach dem Pettenkofer-Wert braucht der Mensch bei leichter Arbeit (z. B. Bürotätigkeit) ca. 30 m^3 frische Luft pro Stunde. Die erforderlichen Luftwechselraten in Büroräumen werden in Tabelle 3.4 beschrieben:

	[m^3/h]
Einzelbüro	40
Großraumbüro	60
Konferenzraum	20

Tabelle 3.4 Erforderliche Luftwechselraten in Büroräumen

Grundsätzlich benötigt das Zu- und Abführen von frischer Luft Energie für Ventilatoren, um die notwendigen Druckunterschiede zu erreichen. Noch aufwendiger ist die Vorkonditionierung der Zuluft, also Kühlung, Erwärmung, Be- oder Entfeuchtung. In feuchten Klimaregionen ist das energetisch besonders aufwendig, da die Entfeuchtung viel Energie benötigt, bis die Luft durch Kühlung ihren Sättigungspunkt erreicht. Je nach Luftvolumen wird eine bestimmte Wassermenge ausgeschieden. Die getrocknete Luft wird in manchen Fällen danach wieder erwärmt, bevor sie in den Raum zugeführt wird. Natürlich muss auch das ausgeschiedene Wasser abgeführt werden. Heute gibt es Techniken zur Wärme- bzw. Kälterückgewinnung, die bei der Vorkonditionierung viel Energie sparen. Trotzdem bleibt die Behandlung der Luft einer der aufwendigsten Prozesse in der Klimatechnik. Daher ist es sinnvoll, die zugeführte Luftmenge auf das je nach Raumnutzung und Nutzeranzahl zur Sicherstellung der hygienischen Behaglichkeit notwendige Maß zu reduzieren.

Da die Luftvorkonditionierung nicht im direkten Zusammenhang mit den Fassadeneigenschaften steht, wird sie in den später gezeigten Beispielen im Untersuchungsmodell vorgegeben. Allerdings erlaubt das Energiebilanztool das Einstellen von Parametern, die die hygienische Behaglichkeit beeinflussen.

Akustische Behaglichkeit

Akustische Behaglichkeit ist die Basis für menschliche Motivation und Leistungsfähigkeit. So wird konzentriertes, effektives Arbeiten ganz selbstverständlich. Der Schalldruckpegel stellt ein logarithmisches Maß zur Beschreibung von Schallereignissen dar [Lp] und wird in Dezibel angegeben [dB]. Die akustischen Eigenschaften eines Raumes werden durch Nachhallzeiten beschrieben. In einem Büroraum wird eine Nachhallzeit von 35 ms empfohlen.

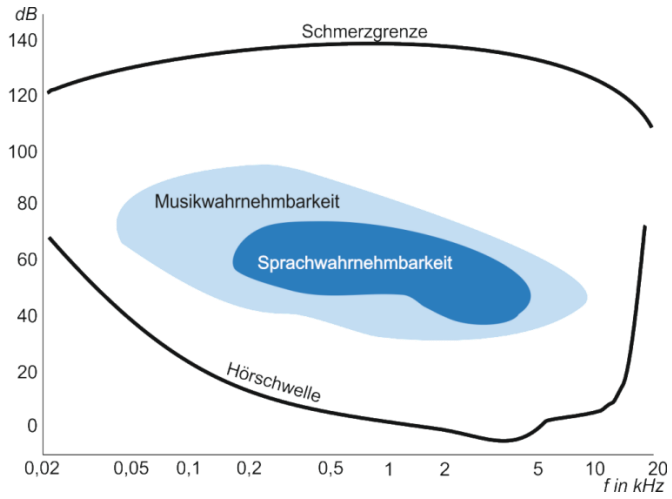


Abbildung 3.14 Hörfläche des menschlichen Ohrs [171]

Die Hörfläche, auch Hörbereich oder Hörfeld, ist jener Frequenz- und Pegelbereich von Schall, der vom menschlichen Gehör wahrgenommen werden kann. Sie wird nach unten (d. h. für niedrige Pegel) von der Hörschwelle, also dem gerade noch hörbaren Schalldruckpegel, und nach oben von der Schmerzschwelle begrenzt. Dies wird in Abbildung 3.14 dargestellt.

Generell ist die Akustik eines Raumes meistens dann zufriedenstellend, wenn ein ausgewogenes Verhältnis zwischen schallabsorbierenden und schallreflektierenden Materialien vorliegt. Das gilt für Konzerthallen ebenso wie für Büroräume.

Eine mangelhafte Raumakustik führt zu psychischen Fehlbeanspruchungen, Stress und herabgesetzter Konzentrationsfähigkeit. In Büroräumen liegen die empfohlenen maximalen Werte für Störgeräusche bei 35 dB.

Elektromagnetische Umweltverträglichkeit

Die elektromagnetische Verträglichkeit (EMV) bezeichnet den üblicherweise erwünschten Zustand, dass technische Geräte einander nicht wechselseitig mittels ungewollter elektrischer oder elektromagnetischer Effekte störend beeinflussen. Sie behandelt technische und rechtliche Fragen der ungewollten wechselseitigen Beeinflussung in der Elektrotechnik [172].

Körperstromdichte in mA/m^2	Symptome
>1000	deutliche Schädigungen möglich, zusätzliche Herzkontraktion, Herzkammerfimmern
100-1000	Gesundheitsgefahren mögl., Veränderungen der Erregbarkeit des zentralen Nervensystems bestätigt, Reizschwellen
10-100	gut bestätigte Effekte, nicht gesundheitsgefährlich, optische Sinneseindrücke, Berichte über beschleunigte Knochenheilung
1-10	keine bestätigten Wirkungen, nicht gesicherte Berichte über individuelles Unbehagen
2	Grenzwert Strahlenschutzkommission
<1	keine gesicherten biologischen Effekte

Tabelle 3.5 Mögliche Schäden durch Signale der Elektrogeräte [159]

Unter elektromagnetischer Verträglichkeit versteht man zum einen die Eigenschaft eines elektrischen Geräts, andere Geräte nicht durch eigene Aussendungen zu stören, zum anderen aber auch die Fähigkeit, trotz der Anwesenheit fremder Störsignale zufriedenstellend zu funktionieren. Der Schwerpunkt in diesem Bereich liegt auf der Störsicherheit von Geräten im Frequenzbereich des Mobilfunks. Menschen haben keine Sinnesorgane für elektromagnetische Felder und können diese somit nicht wahrnehmen. Deswegen sind auch Vergleiche von gepulsten Hochfrequenzsignalen mit dem unangenehmen Flackern von Stroboskoplampen völliger Unsinn. In der Tierwelt dagegen gibt es einzelne Gattungen, welche spezielle Sinnesorgane für Frequenzen elektromagnetischer Felder besitzen [173].

Die Darstellung der Körperstromdichten (in Milliampere pro Quadratmeter) zeigt, welche gesundheitlichen Auswirkungen entstehen können bzw. welche Grenzwerte unbedingt zu beachten sind.

Sick-Building-Syndrom

Das *Sick-Building-Syndrom* wird seit Mitte der 70er-Jahre erforscht. Es steht im Zusammenhang mit der zunehmenden Innenraumabdichtung, dem Einbau raumlufttechnischer Anlagen und dem Einsatz neuartiger Bau- und Einrichtungsmaterialien. Da es bisher aber keine repräsentativen epidemiologischen Studien zum SBS gibt, liegen keine zuverlässigen Daten zur Prävalenz vor [174].

Die gebäudebezogene Krankheit soll sich bei Betroffenen, die in Gebäuden wohnen oder arbeiten, die nicht gesundheitlichen Standards entsprechen, unter anderem in Allergien, Infektionen und Verschlechterung einer bestehenden Asthmaerkrankung äußern. Die Betroffenen berichten von Kopfschmerzen, Schleimhautreizungen, Müdigkeit, allergischen Reaktionen, Abwehrschwäche, häufigen Infektionskrankheiten, Verschlechterung von Asthma, akuten Atembeschwerden, depressiven Zuständen, allgemeinem Unwohlsein und verminderter Leistungsfähigkeit [175]. Das *Sick-Building-Syndrom* tritt vor allem in Büros, gelegentlich auch in Schulen, Kitas, Labors oder Krankenhäusern auf. Als Ursachen werden nach Eis folgende Aspekte angesehen [176]:

- mangelnde Lüftung
- Innenraumbelastung durch Gase, Staub, flüchtige organische Verbindungen (die z. B. aus Farben und Teppichen stammen) und Biozide
- Schimmelpilze, Milben, Bakterien und deren Ausscheidungen, die oft aus schlecht gewarteten oder falsch dimensionierten Klimaanlagen stammen (verkeimtes Befeuchter- oder Entfeuchterwasser, Filterüberladung)

Dazu kommen bürotypische Expositionen wie Bildschirmtätigkeit, Lärm, falsche raumklimatische Bedingungen oder Passivrauchen am Arbeitsplatz. Einige Betroffene berichten über sogenannten Elektrosmog durch Computer, Fax- und Kopiergeräte als Auslöser. Da es sich bei dem *Sick-Building-Syndrom* nicht um ein klar definiertes Krankheitsbild handelt, gibt es keine spezifische Behandlung. Neben der Linderung der Symptome besteht die einzige Therapie darin, die Ursachen der Beschwerden zu beseitigen, zum Beispiel indem eine bessere Belüftung oder ein Luftfilter eingebaut wird. Da die Psyche ebenfalls einen Einfluss auf die Krankheit hat, kann manchen Betroffenen eine Psychotherapie helfen. Kurse zur Stressbewältigung können für manche Betroffenen ebenfalls sinnvoll sein [174].

3.1.6 Außeneinflüsse: Klimabedingungen der ausgewählten Standorte

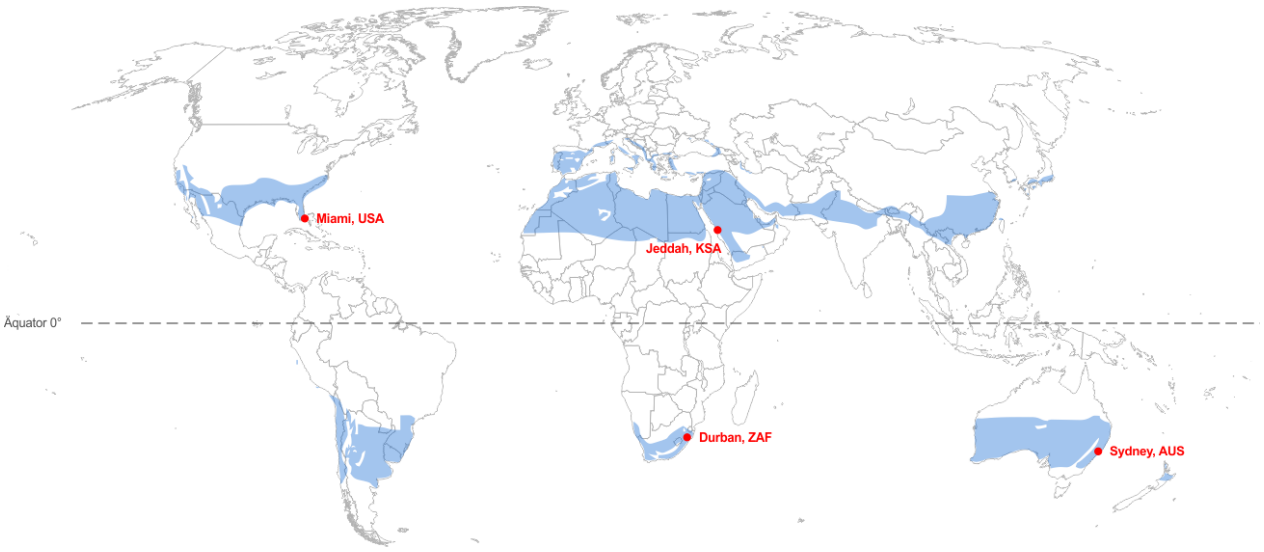


Abbildung 3.15 Überblick über die Lage der ausgewählten Städte (eigene Darstellung)

Von Hausladen wurde behauptet, je weniger ein Gebäude an das Klima und die Nutzung angepasst sei, umso größer sei der technische Aufwand [169]. Der Energiebedarf eines Gebäudes ist nicht nur von seinen bauphysikalischen Eigenschaften abhängig, sondern ebenso sehr von seinem Standort und den jeweiligen klimatischen Gegebenheiten. Diese Tatsache kann festgestellt werden, seit die Menschen Gebäude zu ihrem Schutz errichten. Auch zur Abdeckung des Bedarfs über natürliche Angebote ist die Auseinandersetzung mit dem Standort von größter Bedeutung. Die nachfolgenden Abbildungen zeigen die relevanten Klimabedingungen der vier ausgewählten Standorte. Diese bilden die Grundlage für die Überlegungen zum Aufbau des Optimierungsmodells.

Die Stundenwerte der Klimadaten wurden von der Datenbank *Meteonorm* erzeugt [39]. Im Folgenden werden sie nach eigener Verarbeitung und Darstellung zusammengefasst. Die Globalstrahlung ist entscheidend für die thermische Behaglichkeit und den erforderlichen Energiebedarf zur Wärmeabführung. Sie ist auch im Zusammenhang mit den Glaseigenschaften, insbesondere Lichtdurchlassgrad, zur Berechnung der Beleuchtungsstärke und eventueller Blendungseffekte am Arbeitsplatz erforderlich. Die Globalstrahlung besteht aus der auftreffenden Direktstrahlung und der Diffusstrahlung. Besonders wichtig ist die Betrachtung des Windverhaltens, da dieses nicht nur zur Energieerzeugung wichtig ist, sondern im Zusammenhang mit der Gebäudeform Über- und Unterdruckgebiete bestimmt. Diese sind wichtig für die Führung der natürlichen Durchlüftung des Baukörpers und zur Bestimmung der Spaltenbreiten der Fensterelemente. Sie dienen auch zur Vermeidung von Winddruck innerhalb des Gebäudes, dessen Folgen bei offenen Türen und Zugerscheinungen wahrgenommen werden können. Außerdem beeinflussen sie die Zu- und Abführung von Schad- und Geruchsstoffen im Raum [177]. Eine Analyse hinsichtlich des Winddrucks auf den Baukörper und die Fassade wird im Rahmen dieser Arbeit nicht durchgeführt.

Standort: Jeddah

Abbildung 3.16 Satellitenbilder des Standorts Jeddah; links: regionale Betrachtung [178]; rechts: Großaufnahme der Stadt [179]

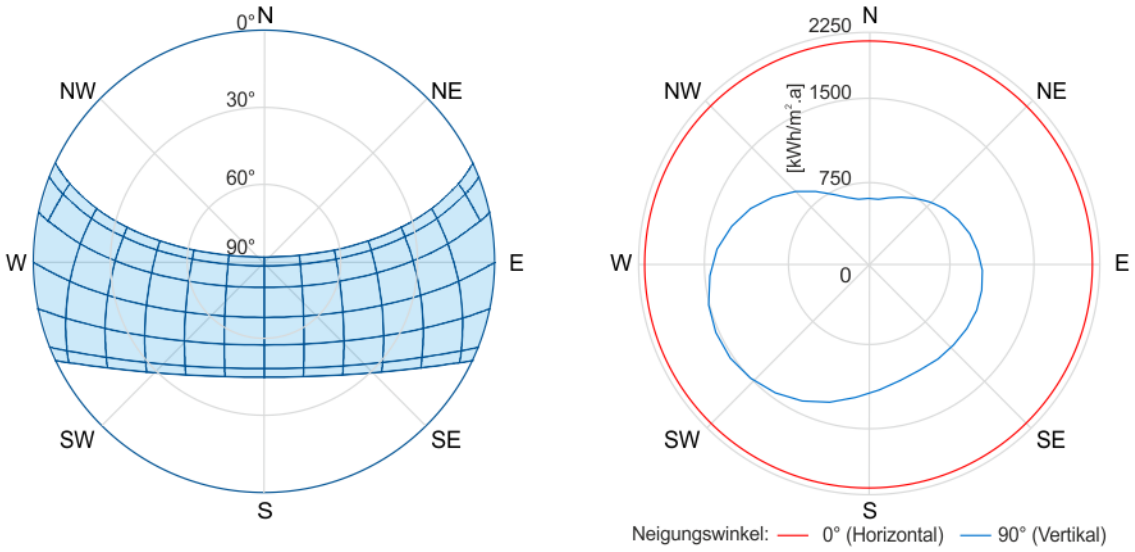


Abbildung 3.17 Links: Sonnenstandsdiagramm; rechts: Globalstrahlung auf die Gebäudehülle (eigene Darstellung)

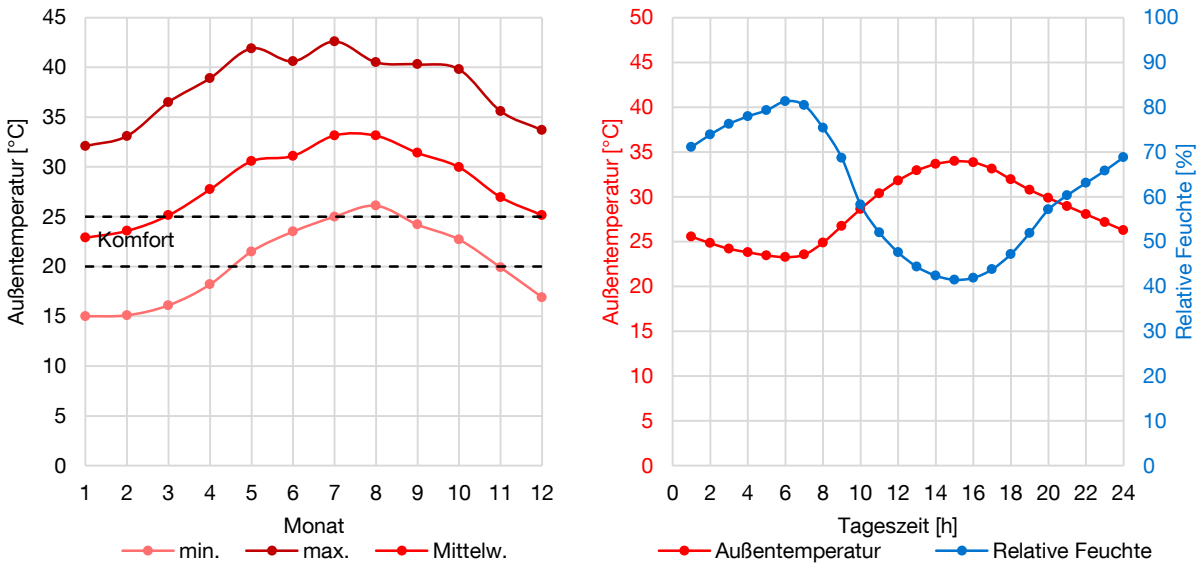


Abbildung 3.18 Links: monatliche durchschnittliche Außentemperatur; rechts: monatliche durchschnittliche relative Feuchte

Abbildung 3.19 Links: Windrichtungshäufigkeit; rechts: Windgeschwindigkeitshäufigkeit in Abhängigkeit von der Windrichtung

Lage		
Länge	39,2	[°]
Breite	21,5	[°]

Außenlufttemperatur		
Mittelw.	28,4	[°C]
Min.	15,0	[°C]
Max.	42,6	[°C]
Hitzestunden (Ta>26°C)	5769,0	[h/a]

Luftfeuchte		
Min. absolute Feuchte	6,7	[g/kg]
Max. absolute Feuchte	26,9	[g/kg]
Min. Luftfeuchtigkeit	25	[%]
Max. Luftfeuchtigkeit	100	[%]

Globalstrahlung		
Mittelw. Strahlung auf horizontale Fläche	250,8	[W/m^2]
Max. Strahlung auf horizontale Fläche	1040,0	[W/m^2]
Anteil Diffusstrahlung	0,2	[%]
Total im Jahr	2193,0	[kWh/m^2.a]

Windgeschwindigkeit 10 [m/Höhe]		
Mittelw. der Windgeschwindigkeit	2,5	[m/s]
Max. der Windgeschwindigkeit	11,0	[m/s]
Totale kinetische Energie	215,4	[kWh/m^2.a]

Übertemperaturstunden			
	>26°	5769	[h/a]
	>28°	4556	[h/a]
	>30°	3331	[h/a]

Tabelle 3.6 Überblick über die klimatischen Eigenschaften des Standorts

Jeddah ist die wichtigste Hafenstadt Saudi-Arabiens am Roten Meer. Sie liegt in der Provinz Hedschas und erstreckt sich über eine Fläche von 1.320 km² [180]. Bei der Volkszählung 2004 hatte Jeddah 2.801.481 Einwohner, 2007 waren es bereits 3.002.839 [181]. 2011 wurde ein milliardenschwerer Vertrag zum Bau des mehr als 1.000 Meter hohen *Kingdom Tower* verkündet. Die Summe des Bauvertrags beläuft sich auf über 1,2 Milliarden US-Dollar [182].

Abbildung 3.17 gibt Auskunft über das Sonnenstandsdiagramm am Standort Jeddah. Die Auswirkung auf die Fassade und das Dach wird im rechten Diagramm dargestellt. Anhand des linken Diagramms kann festgestellt werden, dass die Gefahr der Überhitzung für acht Fassadenausrichtungen besteht, da im Sommer der Sonnenaufgang und -untergang nördlich stattfinden. Der Sonnenuntergang ist kritischer als der Sonnenaufgang, da dieser nach langen sonnigen Tagen stattfindet, an denen Luft, Gebäude und Speichermassen schon Wärme aufgenommen haben. Daher ist eine eingehende Betrachtung des Sonnenschutzes zum Wärmeschutz und zum Schutz gegen Blendung im Sommer sehr sinnvoll. Die blaue Kurve im rechten Diagramm zeigt, wie intensiv die globale Einstrahlung von der südwestlichen und westlichen Seite ist. Diese Werte beschreiben die Energiemenge und sind nützlich für Überlegungen hinsichtlich der zu erwartenden Leistung aus fassadenintegrierten Photovoltaikzellen. Gleichzeitig kann daraus die Gefahr der Überhitzung abgelesen werden. Obwohl die anderen Ausrichtungen auch Potenziale anbieten, verfügt die horizontale Fläche über die höchste Strahlungssumme im ganzen Jahr.

Die Grafiken in Abbildung 3.18 machen deutlich, dass Jeddah eine heiße und feuchte Stadt ist. Die Betrachtung der Komfortzone zeigt, dass es trotz der hohen Temperatur am Tag abends angenehm sein kann, da die minimale Temperatur in der Komfortzone liegt. Man kann davon ausgehen, dass die aufwendige Kühlung nur acht Monate des Jahres benötigt wird. In den restlichen vier Monaten reicht die Entfeuchtung für einen großen Teil der Tageszeit völlig aus. Bei den Spitzenlasten muss intensiv gekühlt werden. Dies ergibt sich aus einer zunächst allgemeinen Betrachtung, die unabhängig von der Nutzung ist.

Der Verlauf von Außentemperatur und relativer Feuchte an einem typischen Tag wird im rechten Diagramm dargestellt. Trotz der geringeren relativen Feuchte gegen Mitte des Tages wird die Kühlung aufgrund der sehr hohen Außentemperatur weiter benötigt. In den Büroräumen kann aufgrund der hohen Innenlasten nicht ohne aktive Kühlung klimatisiert werden. Die Berechnung der zur Kühlung und Entfeuchtung erforderlichen Leistung erfolgt mittels des h-x-Diagramms, da es sich im Endeffekt um nichts anderes als den Wassergehalt handelt. Da die Entfeuchtung der zugeführten Luft sehr hohen technischen Aufwand erfordert, sollte die zugeführte Luftmenge auf die minimale von den Normen geforderte Menge reduziert werden.

Die Nutzung von Kühldecken mit einer Fensterlüftung ist an diesem Standort kritisch, da der hohe Wassergehalt in der Luft zur Tauwasserabbildung führt. Es gibt bereits Lösungen für Kühlflächen, die vertikal ausgerichtet sind. Das unten aufgefangene Tauwasser kann einfach abgeführt werden. Es muss aber darauf geachtet werden, dass das Wasser sofort abgeführt wird, um Probleme mit der Hygiene im Raum zu vermeiden.

Die Windrose im linken Diagramm der Abbildung 3.19 gibt Auskunft über die Hauptwindrichtungen und deren Häufigkeit. Zur Auslegung von Windrotoren müssen zusätzlich die Daten im rechten Diagramm analysiert werden. Die Windrose weist aus, dass der Raum Jeddah im Wesentlichen von Nordwest- bzw. Nordströmungen durchzogen wird. Die höchsten Windgeschwindigkeiten kommen aus allen Richtungen und erreichen einen Mittelwert von 2,5 m/s.

Standort: Miami

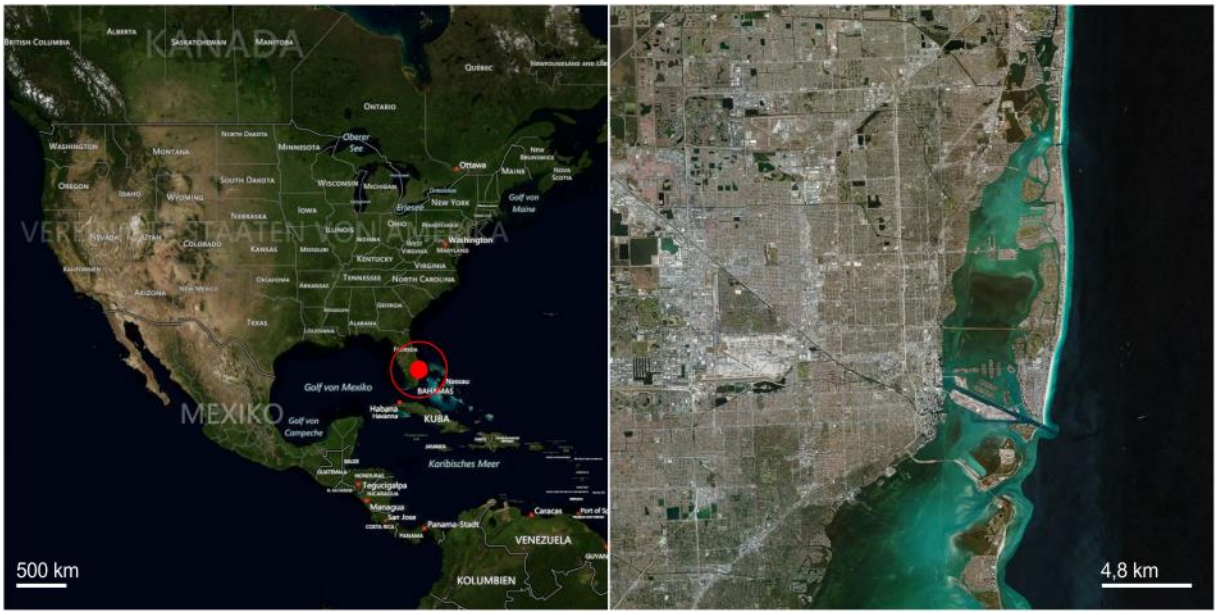


Abbildung 3.20 Satellitenbilder des Standorts Miami; links: regionale Betrachtung [183]; rechts: Großaufnahme der Stadt [184]

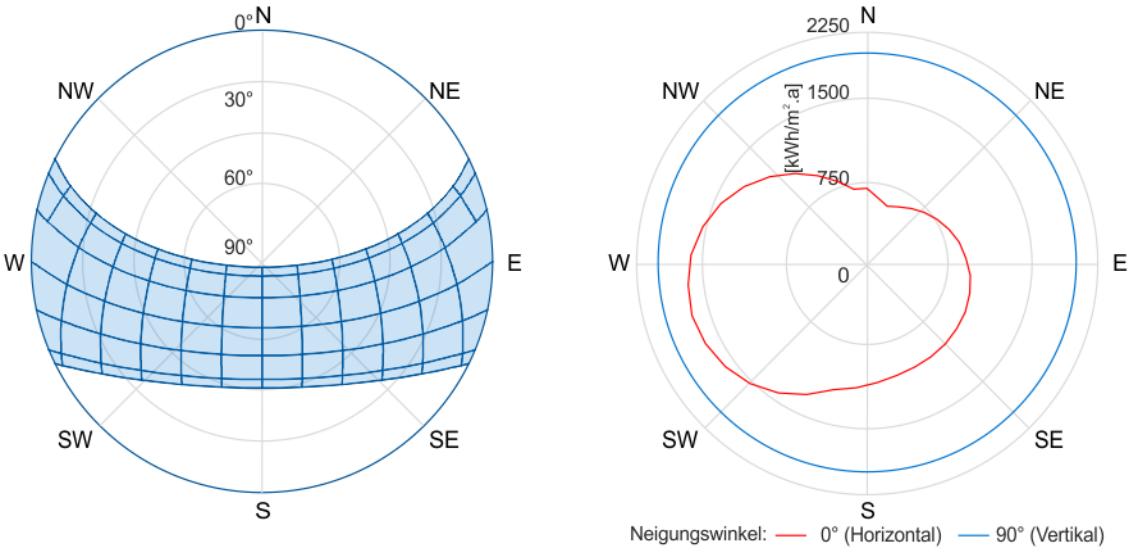


Abbildung 3.21 Links: Sonnenstandsdiagramm; rechts: Globalstrahlung auf die Gebäudehülle (eigene Darstellung)

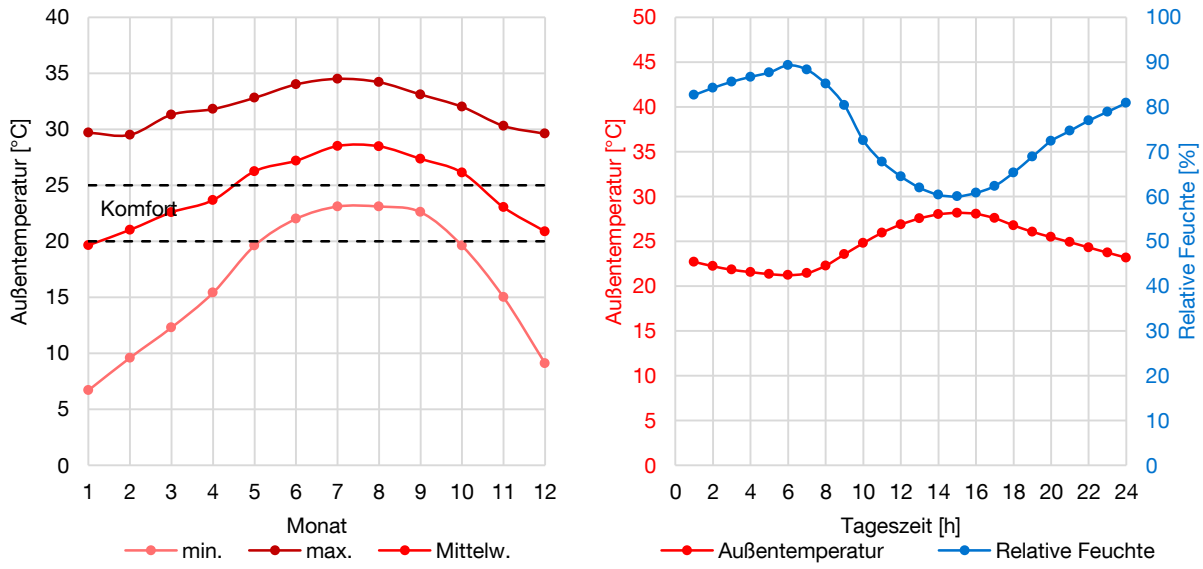


Abbildung 3.22 Links: monatliche durchschnittliche Außentemperatur; rechts: monatliche durchschnittliche relative Feuchte

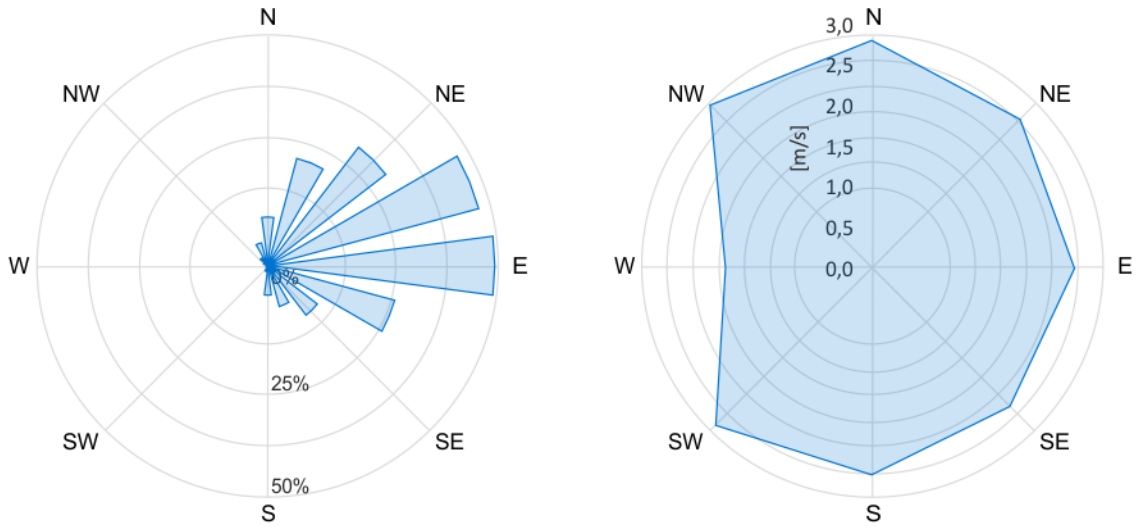


Abbildung 3.23 Links: Windrichtungshäufigkeit; rechts: Windgeschwindigkeitshäufigkeit in Abhängigkeit von der Windrichtung

Lage		
Länge	-80,3	[°]
Breite	25,9	[°]

Außenlufttemperatur		
Mittelw.	24,6	[°C]
Min.	6,7	[°C]
Max.	34,5	[°C]
Hitzestunden (Ta>26°C)	3557,0	[h/a]

Luftfeuchte		
Min. absolute Feuchte	5,3	[g/kg]
Max. absolute Feuchte	24,1	[g/kg]
Min. Luftfeuchtigkeit	36	[%]
Max. Luftfeuchtigkeit	100	[%]

Globalstrahlung		
Mittelw. Strahlung auf horizontale Fläche	201,5	[W/m^2]
Max. Strahlung auf horizontale Fläche	1038,0	[W/m^2]
Anteil Diffusstrahlung	0,3	[%]
Total im Jahr	1761,8	[kWh/m^2.a]

Windgeschwindigkeit 10 [m/Höhe]		
Mittelw. der Windgeschwindigkeit	2,7	[m/s]
Max. der Windgeschwindigkeit	11,0	[m/s]
Totale kinetische Energie	251,4	[kWh/m^2.a]

Übertemperaturstunden			
	>26°	3557	[h/a]
	>28°	2002	[h/a]
	>30°	879	[h/a]

Tabelle 3.7 Überblick über die klimatischen Eigenschaften des Standorts

Miami liegt im Bundesstaat Florida und ist 254 km Luftlinie von Tallahassee, der Hauptstadt Floridas entfernt. Die Stadt umfasst ein Gebiet von 21 km², mit den Stränden zusammen 1250 km². Der Name Miami stammt vermutlich vom indianischen Wort „Mayaime" ab, das so viel bedeutet wie „sehr großer See". Damit waren wohl die Everglades, das Sumpfgebiet um Miami gemeint. In der Stadt Miami leben 360.000 Einwohner. Zusammen mit den äußeren Bezirken hat Miami mehr als 2.000.000 Einwohner [185].

Der Überblick über das Sonnenstandsdiagramm in Abbildung 3.21 lässt feststellen, dass es keinen großen Unterschied zum Standort Jeddah gibt. Miami liegt nur vier Breitengrade weiter nördlich. Auf der rechten Seite sieht man jedoch einen deutlichen Unterschied in der Intensität der auf die Gebäudehülle auftreffenden Globalstrahlung. Die höchste Jahresmenge an Globalstrahlung herrscht bei nordwestlichen und westlichen Fassadenausrichtungen. Das gibt einen Hinweis für die beste Orientierung fassadenintegrierter Solarzellen. Als Anpassung an die hohe Sonneneinstrahlung auf die Südfassade im Sommer kann ein um 80° geneigtes Fenster einigermaßen vor der Einstrahlung schützen. Diese Maßnahme muss jedoch mit dem Tageslichtquotienten und dem Ausblick abgestimmt werden.

Gemäß der Diagramme in Abbildung 3.22 kann festgestellt werden, dass die Außentemperatur in Miami relativ angenehm ist, da diese im schlimmsten Fall nur 34,5 °C erreicht. Entfeuchtung und mechanische Lüftung über das ganze Jahr kommen infrage. Auf den ersten Blick glaubt man, dass im Winter aufgrund der niedrigen Temperatur Heizung benötigt wird. Das muss für Bürogebäude aber nicht unbedingt stimmen, da die starken Rückgänge einerseits meistens abends nach der Arbeitszeit stattfinden und andererseits durch die Innenlasten im Arbeitsraum kompensiert werden. Mit Blick auf die durchschnittliche Temperatur kann man davon ausgehen, dass sechs Monate lang die Lufttemperatur angenehm ist. An einem typischen Tag liegt die Außentemperatur zwischen 20:00 Uhr und 10:00 Uhr in der Komfortzone.

Miami liegt an der südöstlichen Küste der USA. Daher wird die Stadt gemäß der Windrose in Abbildung 3.23 meistens von Osten her durchgeströmt. Bis auf die westliche Seite haben alle Seiten ähnliche mittlere Windgeschwindigkeiten von ca. 2,5 m/s.

Standort: Sydney

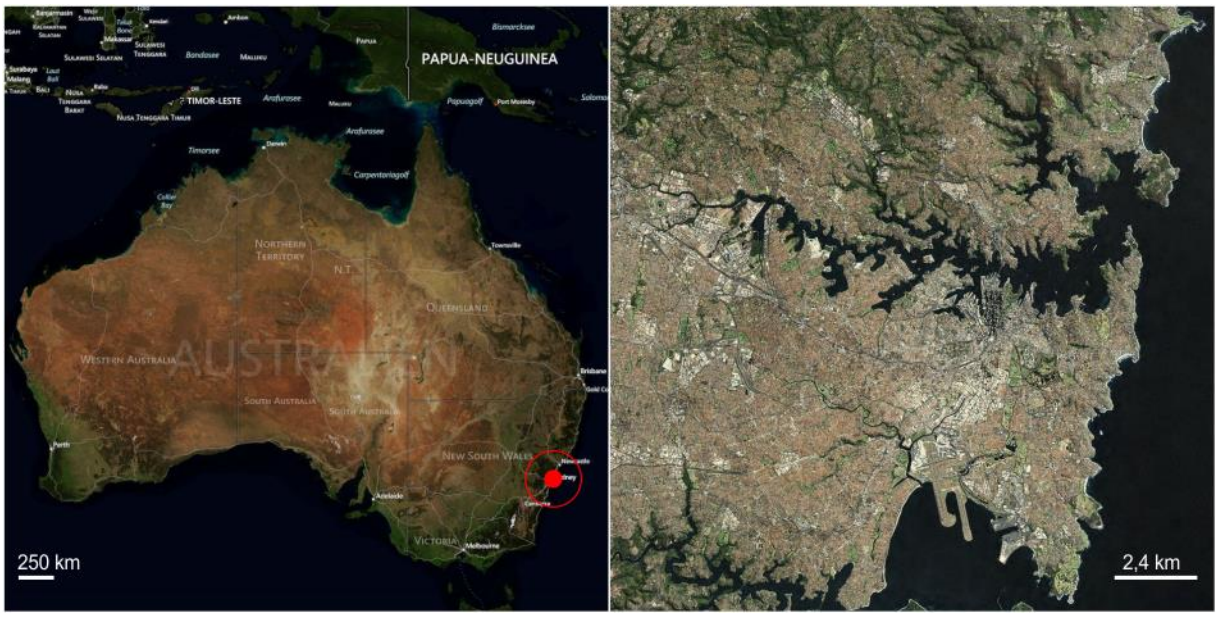


Abbildung 3.24 Satellitenbilder des Standorts Sydney; links: regionale Betrachtung [186]; rechts: Großaufnahme der Stadt [187]

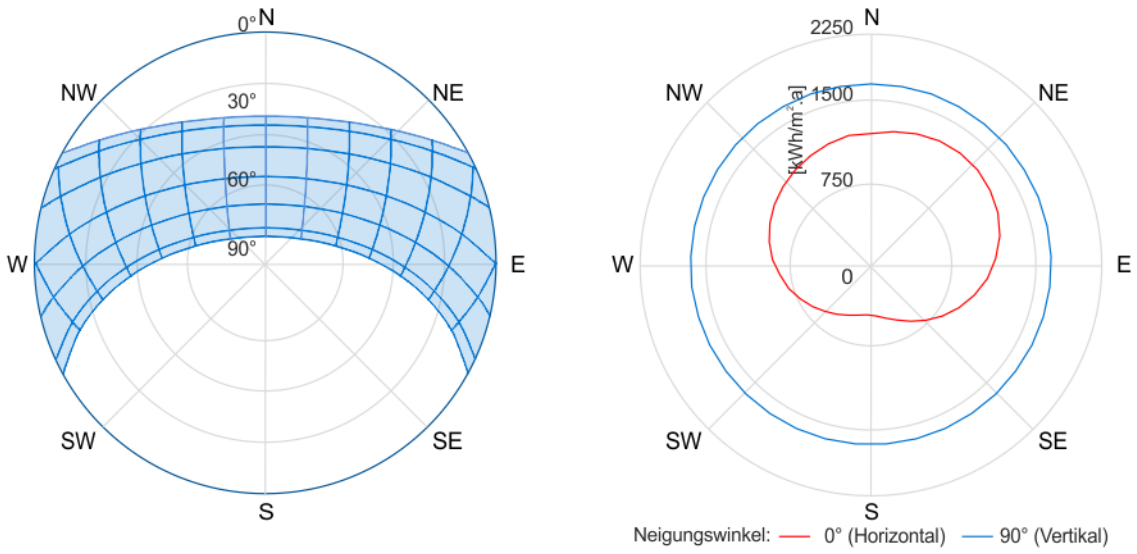


Abbildung 3.25 Links: Sonnenstandsdiagramm; rechts: Globalstrahlung auf die Gebäudehülle (eigene Darstellung)

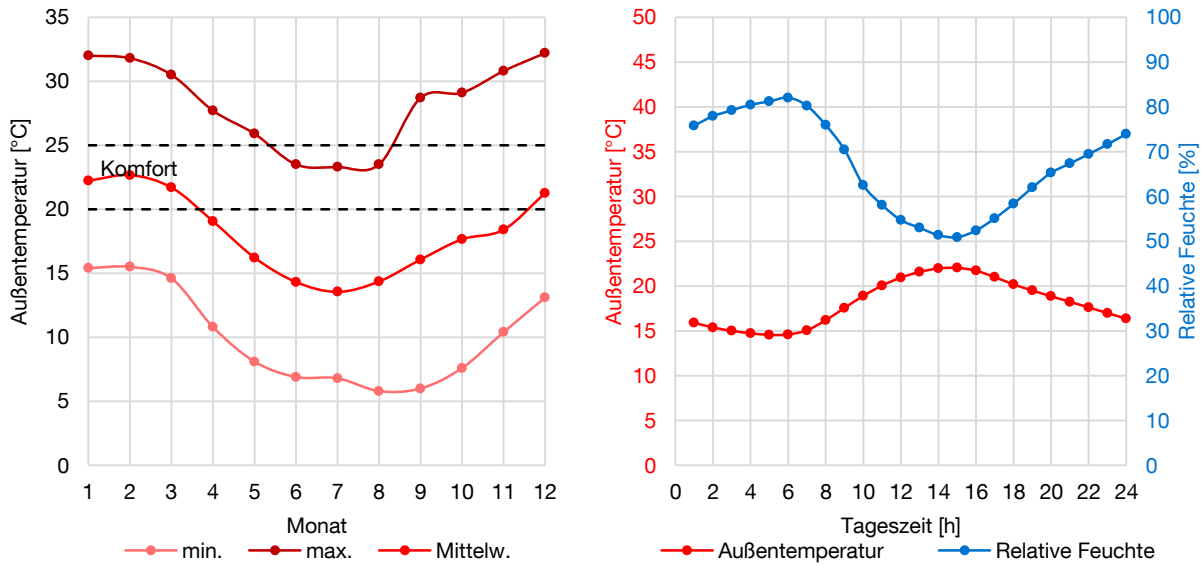


Abbildung 3.26 Links: monatliche durchschnittliche Außentemperatur; rechts: monatliche durchschnittliche relative Feuchte

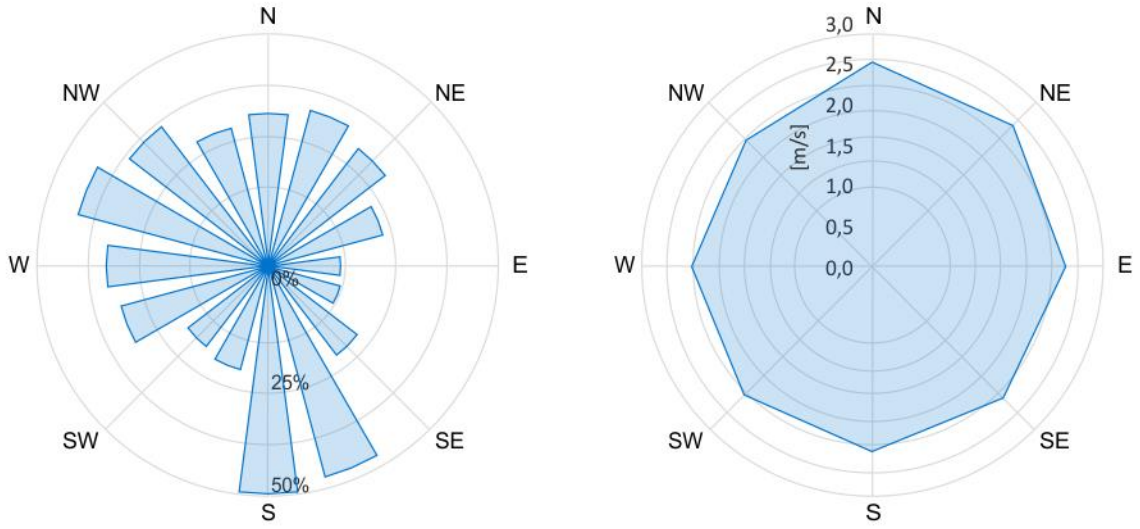


Abbildung 3.27 Links: Windrichtungshäufigkeit; rechts: Windgeschwindigkeitshäufigkeit in Abhängigkeit von der Windrichtung

Lage		
Länge	151,2	[°]
Breite	-33,9	[°]

Außenlufttemperatur		
Mittelw.	18,1	[°C]
Min.	5,8	[°C]
Max.	32,2	[°C]
Hitzestunden (Ta>26°C)	379,0	[h/a]

Luftfeuchte		
Min. absolute Feuchte	3,5	[g/kg]
Max. absolute Feuchte	19,7	[g/kg]
Min. Luftfeuchtigkeit	24	[%]
Max. Luftfeuchtigkeit	100	[%]

Globalstrahlung		
Mittelw. Strahlung auf horizontale Fläche	190,8	[W/m^2]
Max. Strahlung auf horizontale Fläche	1154,0	[W/m^2]
Anteil Diffusstrahlung	0,3	[%]
Total im Jahr	1668,1	[kWh/m^2.a]

Windgeschwindigkeit 10 [m/Höhe]		
Mittelw. der Windgeschwindigkeit	4,8	[m/s]
Max. der Windgeschwindigkeit	15,1	[m/s]
Totale kinetische Energie	1063,5	[kWh/m^2.a]

Übertemperaturstunden			
	>26°	379	[h/a]
	>28°	110	[h/a]
	>30°	27	[h/a]

Tabelle 3.8 Überblick über die klimatischen Eigenschaften des Standorts

Die australische Großstadt Sydney ist die größte Stadt des Landes und ein beliebtes Ziel für Besucher aus aller Welt. Das Wahrzeichen der Stadt ist das imposante Bauwerk der Oper von Sydney, das segelförmig erbaut wurde und die Skyline der Stadt vom Meer aus prägt [188]. Sydney wurde am 26. Januar 1788 gegründet und ist mit 3,64 Millionen Einwohnern [189] im städtischen Gebiet die größte Stadt des australischen Kontinents. In der Metropolregion leben 4,12 Millionen Menschen [190] .

Das Sonnenstandsdiagramm in Abbildung 3.25 ist im Vergleich zu Durban etwas nach Norden verschoben und die Südfassade ist weniger belastet. Die höchste Summe jährlicher Globalstrahlung ergibt sich in den Richtungen Nordwesten, Norden, Nordosten und Osten. Sydney weist ein Ostseitenklima auf, wobei das Klima aufgrund der Nähe zur Küste abgemildert wird. Die durchschnittliche Jahrestemperatur liegt bei 18,1 °C. Die wärmsten Monate sind Januar und Februar, deren Durchschnittstemperatur bei rund 22,0 °C liegt, also in der Komfortzone. Der kälteste Monat ist der August mit 5,8 °C im Mittel.

An einem typischen Tag ist die Außentemperatur angenehm. Abends kann es kalt werden. Im Büro können die Innenlasten die benötigte Wärme mehr oder weniger erzeugen. Aufgrund der niedrigen relativen Feuchte bietet sich Fensterlüftung an. Die tieferen Temperaturen (im linken Diagramm der Abbildung 3.26) können zur Nachtauskühlung genutzt werden. Sydney hat fast keine Hauptwindrichtung und eine mittlere Windgeschwindigkeit von 2,5 m/s.

Standort: Durban

Abbildung 3.28 Satellitenbilder des Standorts Durban; links: regionale Betrachtung [191]; rechts: Großaufnahme der Stadt [192]

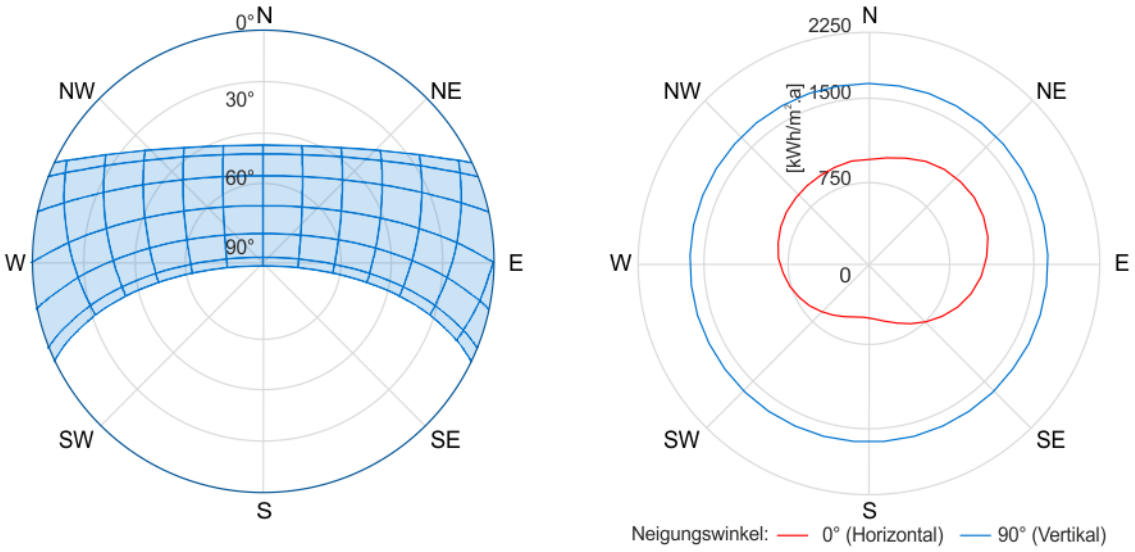


Abbildung .3.29 Links: Sonnenstandsdiagramm; rechts: Globalstrahlung auf die Gebäudehülle (eigene Darstellung)

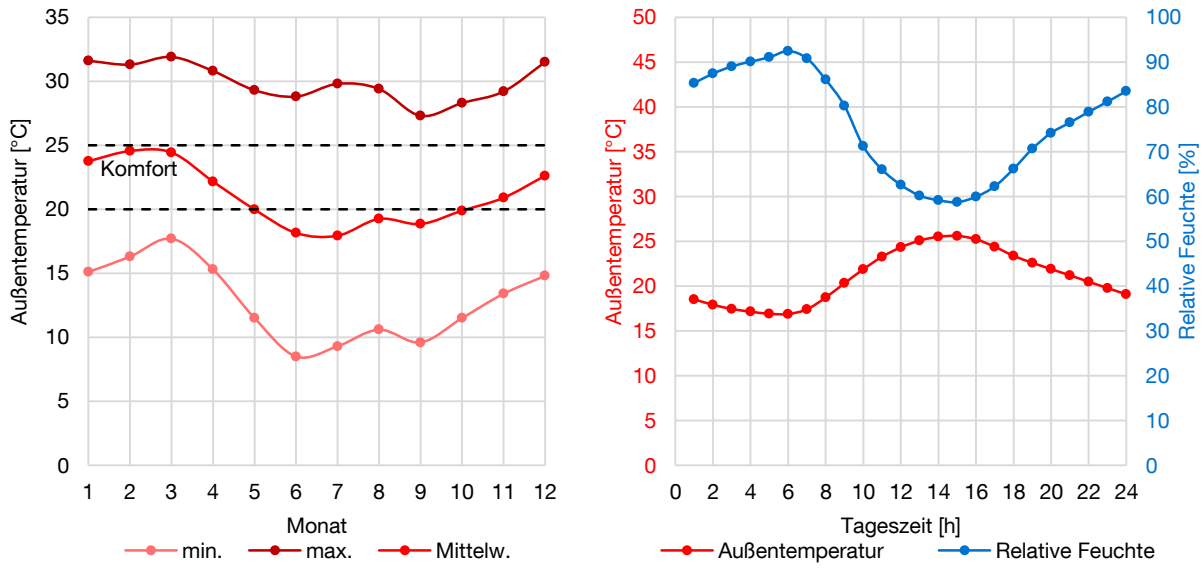


Abbildung 3.30 Links: monatliche durchschnittliche Außentemperatur; rechts: monatliche durchschnittliche relative Feuchte

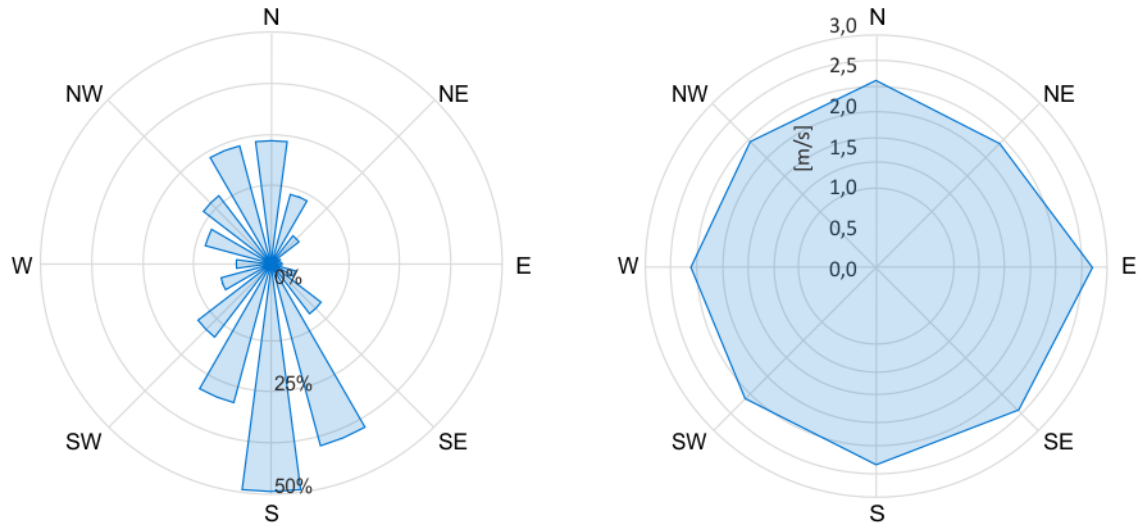


Abbildung 3.31 Links: Windrichtungshäufigkeit; rechts: Windgeschwindigkeitshäufigkeit in Abhängigkeit von der Windrichtung

Lage		
Länge	31,0	[°]
Breite	-21,9	[°]

Außenlufttemperatur		
Mittelw.	21,0	[°C]
Min.	8,5	[°C]
Max.	31,9	[°C]
Hitzestunden (Ta>26°C)	1120,0	[h/a]

Luftfeuchte		
Min. absolute Feuchte	5,3	[g/kg]
Max. absolute Feuchte	21,9	[g/kg]
Min. Luftfeuchtigkeit	25	[%]
Max. Luftfeuchtigkeit	100	[%]

Globalstrahlung		
Mittelw. Strahlung auf horizontale Fläche	189,6	[W/m^2]
Max. Strahlung auf horizontale Fläche	1117,0	[W/m^2]
Anteil Diffusstrahlung	0,3	[%]
Total im Jahr	1657,9	[kWh/m^2.a]

Windgeschwindigkeit 10 [m/Höhe]		
Mittelw. der Windgeschwindigkeit	4,1	[m/s]
Max. der Windgeschwindigkeit	14,4	[m/s]
Totale kinetische Energie	725,1	[kWh/m^2.a]

Übertemperaturstunden			
	>26°	1120	[h/a]
	>28°	393	[h/a]
	>30°	46	[h/a]

Tabelle 3.9 Überblick über die klimatischen Eigenschaften des Standorts

Die Hafenstadt Durban – eThekwini in der Sprache der Zulu – ist nach Johannesburg die zweitgrößte Stadt Südafrikas und wichtigster Industriehafen des Landes. In der Metropole am Indischen Ozean wohnen drei Millionen Einwohner [193]. Eine umfangreiche Wirtschaft prägt Durban: Industrie, Handel, Logistik, Finanz- und Regierungsinstitutionen sowie Tourismus sind sehr aktiv. Gegenüber anderen Ballungsräumen in Südafrika verschaffen die Küstenlage und der Hafen Durban einen Vorteil. Das milde Klima, die warme Meeresströmung sowie die Drakensberge im Hinterland sind vorteilhaft für die Tourismusindustrie [194]. Im Jahr 2011 fand in Durban der Weltklimagipfel statt. Dort wurde mit der Umsetzung der Arbeitsaufträge aus Cancún angefangen. Außerdem wurde an der Frage gearbeitet, welche Form ein künftiges Klimaschutzübereinkommen haben soll [195].

Durban liegt in der südlichen Hemisphäre der Erde. Daher zeigt Abbildung .3.29 im Vergleich zu Jeddah oder Miami ein fast gespiegeltes Sonnenstandsdiagramm. Die globale Einstrahlung auf das Dach scheint geringer zu sein, die Jahressumme liegt bei 1700 kWh/m^2. Im Hinblick auf die Fassaden ist die Einstrahlung auf die Nordwest-, Nordost- und Ostfassade mehr oder weniger ähnlich. In Durban herrscht ein feuchtes, subtropisches Klima vor. Der Sommer ist relativ warm, da das Klima der Küstenstadt vom warmen Wasser des Agulhas-Stromes beeinflusst wird, der von Mosambik die Küste entlang nach Süden verläuft [194].

Das rechte Diagramm der Abbildung 3.30 zeigt, dass an einem typischen Tag die Außentemperatur im Komfortbereich liegt. In den Sommermonaten sinkt die Außentemperatur erheblich, was Potenziale zur Nachtauskühlung eröffnet. Nord-Süd ist die Hauptwindrichtung in Durban mit einer mittleren Geschwindigkeit von 2,4 m/s.

3.1.7 Unterscheidung der untersuchten Standorte im Hinblick auf den zur Raumkonditionierung benötigten Energieaufwand

In diesem Abschnitt werden die Außeneinflüsse jedes Standorts zusammen mit den Inneneinflüssen betrachtet, um herauszufinden, wie hoch jeweils der zur Sicherstellung der Nutzerbehaglichkeit erforderliche Aufwand ist.

Die unteren Grafiken zeigen auf der linken Seite die erforderlichen Betriebsstunden zum Kühlen der Lufttemperatur. Dieser Vorgang ist unabhängig von der Entfeuchtung der dem Raum zugeführten Luft. Der Bedarf errechnet sich nach der Überschreitung der für die menschliche Behaglichkeit maximal zulässigen Temperatur von 26 °C.

Die gelben Zonen in den Grafiken auf der rechten Seite zeigen die Anzahl der Betriebsstunden mit einer im Behaglichkeitsbereich liegenden Beleuchtungsstärke des Tageslichts. Da die Beleuchtungsstärke von der Raumtiefe bzw. Fenstergeometrie beeinflusst wird, beziehen sich die folgenden Daten auf einen südorientierten Raum, der durch das entwickelte Werkzeug simuliert wurde. Angenommen wurde ein Tageslichtquotient von 0,9 %. Die Grenzen für einen Büroraum sind wie bereits erläutert nach DIN 5035 definiert (300-500 lx).

Unterhalb dieser Werte wird Kunstlicht benötigt. Ein höherer Wert wird von den Nutzern als unangenehm empfunden, sodass das Tageslicht gesteuert werden muss. Wenn der solare Eintrag einen hohen Anteil an Wärme enthält, muss der Sonnenschutz aktiviert werden, was wiederum den Bedarf an Kunstlicht erhöhen kann. Integrale Lösungen wie Tageslichtlenkungssysteme bieten zahlreiche Möglichkeiten, bei der Lichtversorgung vom Tageslicht zu profitieren.

Ein Blick auf die Diagramme zur Beleuchtung zeigt, dass die Beleuchtungsstärke des Tageslichts in der Regel ca. 25 % der Arbeitszeit des Jahres im Komfortbereich des Menschen liegt. Nur in Durban ist der Anteil geringer.

Gefolgt von Miami ist die Kühlzeit in Jeddah im Vergleich am höchsten. Auf dem dritten Platz steht Durban und danach kommt Sydney mit einer Kühlzeit von 0,05 %. Diese Aussagen stimmen jedoch nicht ganz, weil die Kühlung der Luft aufgrund der hohen relativen Feuchte nicht ausreichend ist, um die menschlichen Anforderungen an Behaglichkeit gemäß Abbildung 3.10 zu erfüllen.

Die geringe Wärmekapazität der Luft gegenüber Wasser erfordert einen höheren Energieeinsatz bei der Aufbereitung. Die konventionellen Klimaanlagen konditionieren Räume durch Luft. Die günstigere Lösung ist aber die Kühlung durch Wasser. Daher wird empfohlen, nur die für die menschlichen hygienischen Anforderungen erforderliche Frischluftmenge zu konditionieren. Diese ergibt sich aus der Pettenkofer-Kurve in Abbildung 3.13.

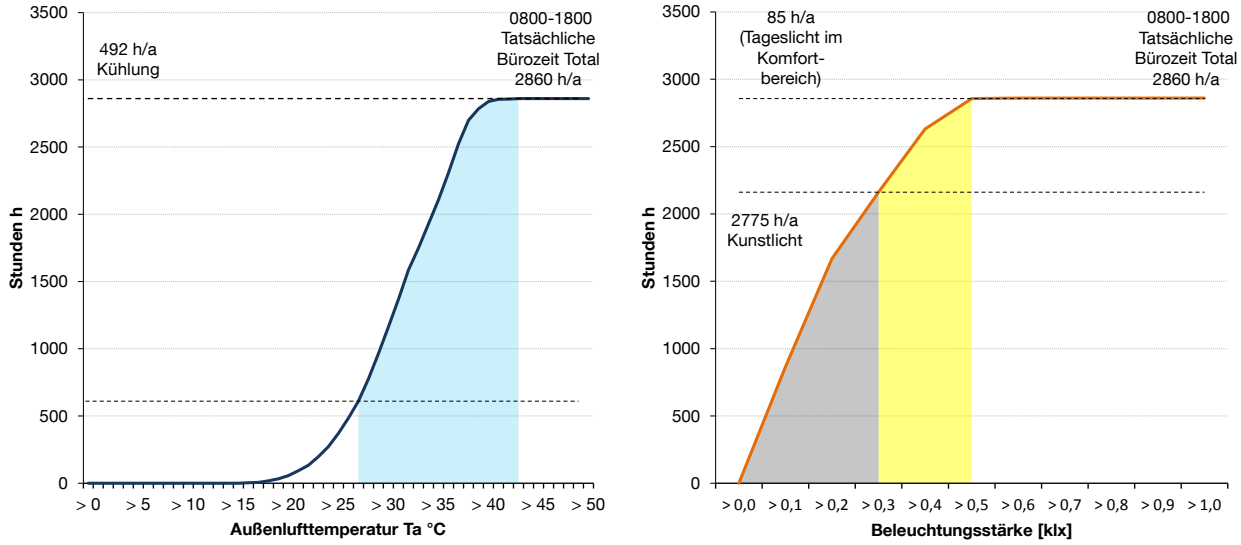


Abbildung 3.32 Betriebsstunden mit erforderlicher aktiver Kühlung und Verfügbarkeit von Tageslicht im Komfortbereich (angenommener Tageslichtquotient: 0,9 %) – Standort: Jeddah

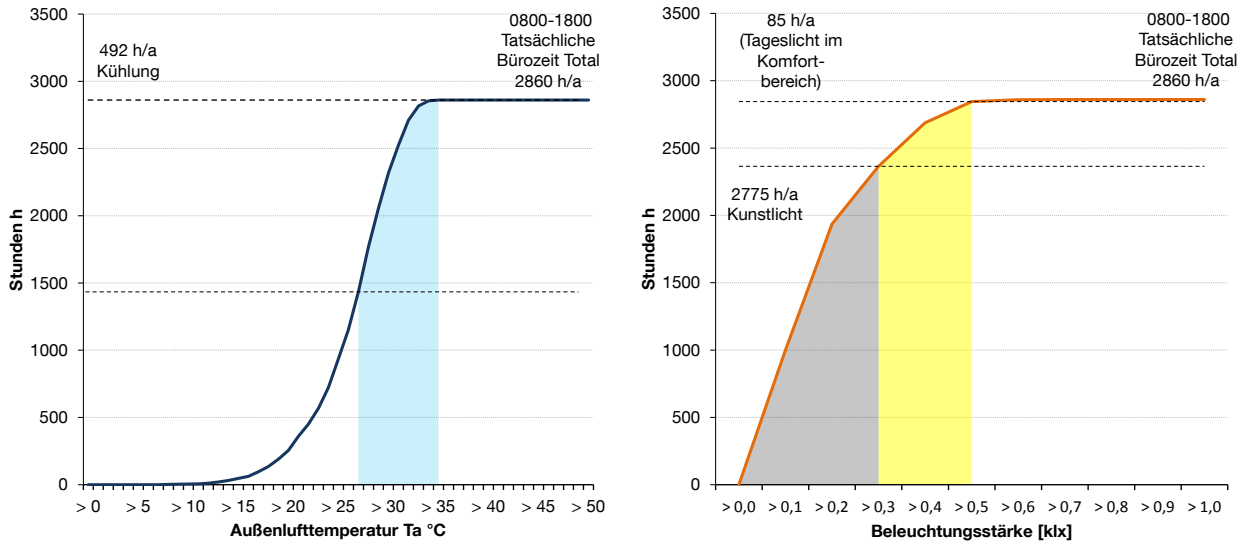


Abbildung 3.33 Betriebsstunden mit erforderlicher aktiver Kühlung und Verfügbarkeit von Tageslicht im Komfortbereich (angenommener Tageslichtquotient: 0,9 %) – Standort: Miami

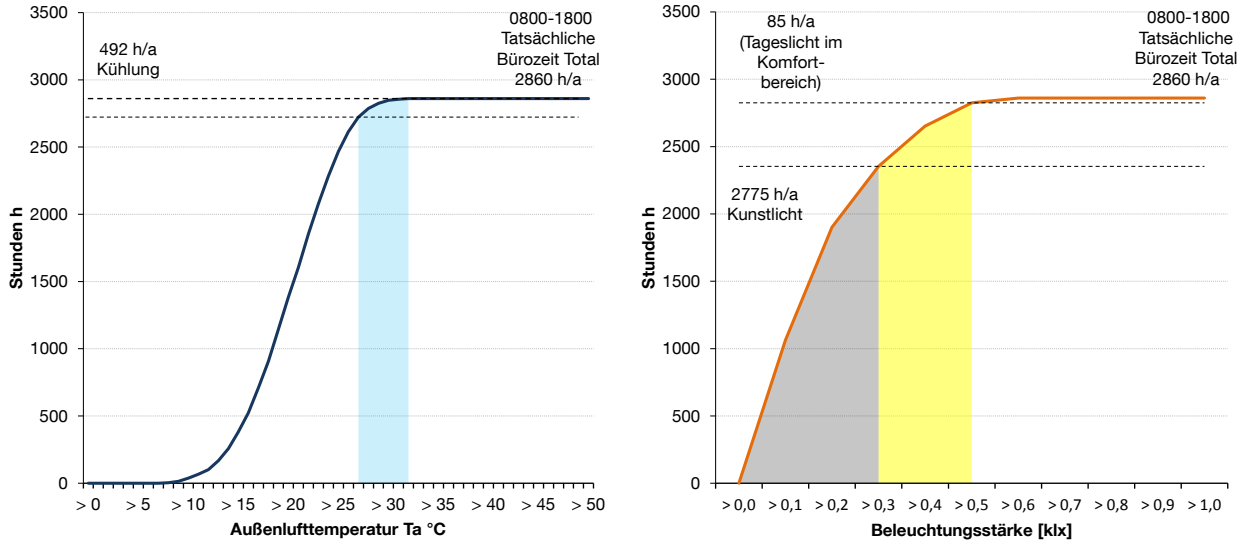


Abbildung 3.34 Betriebsstunden mit erforderlicher aktiver Kühlung und Verfügbarkeit von Tageslicht im Komfortbereich (angenommener Tageslichtquotient: 0,9 %) – Standort: Sydney

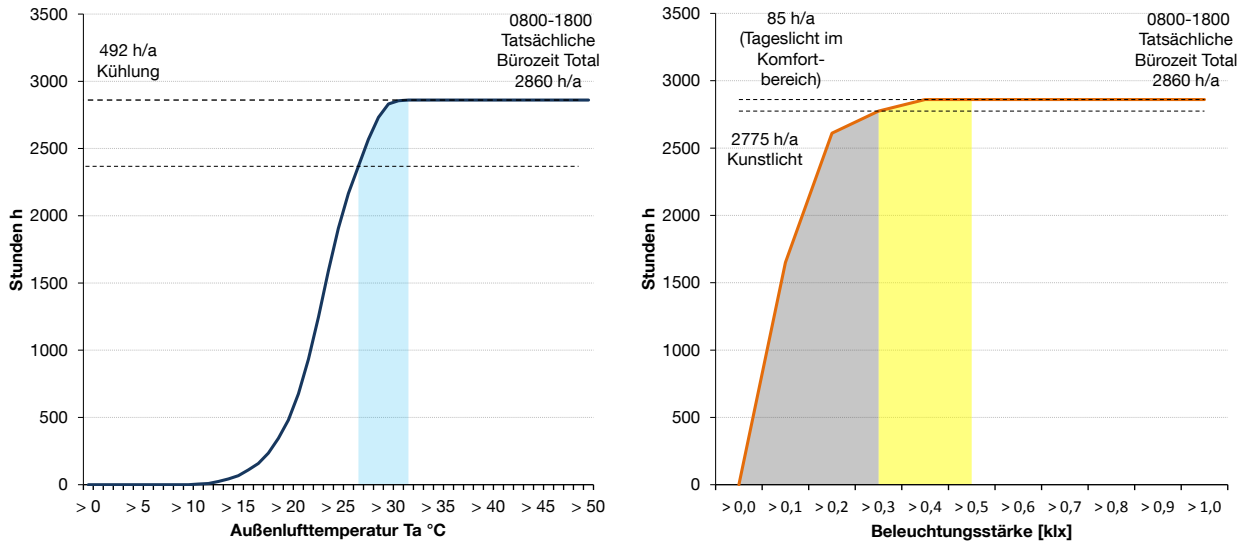


Abbildung 3.35 Betriebsstunden mit erforderlicher aktiver Kühlung und Verfügbarkeit von Tageslicht im Komfortbereich (angenommener Tageslichtquotient: 0,9 %) – Standort: Durban

Das beste Instrument zum Analysieren des Zusammenhangs zwischen Lufttemperatur und Luftfeuchte bzw. Wassergehalt in der Luft ist das Mollier-h-x-Diagramm. Es ermöglicht die Ermittlung von Zustandsänderungen feuchter Luft durch Erwärmung, Befeuchtung, Entfeuchtung, Kühlung und Mischung verschiedener Luftmengen, was für die Auslegung der Kälteanlagen benötigt wird. Auf der Abszisse (x-Achse) wird im typischen h-x-Diagramm die Wassermenge x in Gramm (oder kg) pro kg trockener Luft abgetragen. Auf der Ordinate (y-Achse) befindet sich die spezifische Enthalpie h der Luft in kJ/kg, und zwar so, dass die Verdampfungsenthalpie des Wassers nach unten und die fühlbare Enthalpie (Wärme) des Luft-Wasserdampf-Gemisches nach oben aufgetragen ist. Daher verlaufen die Linien gleicher Enthalpie (Isenthalpen bzw. Adiabaten) schiefwinklig [196].

Zur Darstellung der Klimaeigenschaften der ausgewählten Standorte wurde im Rahmen dieser Arbeit ein zusätzliches Excel-Tool entwickelt, das Aussagen zu der Anzahl der Stunden im Behaglichkeitsbereich ermöglicht. Die Stundenanzahl für mögliche Maßnahmen zur Luftkonditionierung wie zum Beispiel Befeuchtung wird ebenfalls ermittelt. Das Programm nutzt die eingegebenen Klimadaten als Datenbank und gibt für jede Stunde des Jahres einen Punkt aus, das heißt 8760 Punkte. Die folgenden Darstellungen beschränken sich auf die Arbeitsstundenzahl des Jahres. Da sich die vorliegende Untersuchung ausschließlich mit Bürogebäuden beschäftigt, wurde das Programm entsprechend eingestellt, um nur die Stunden der Arbeitszeit zu berücksichtigen.

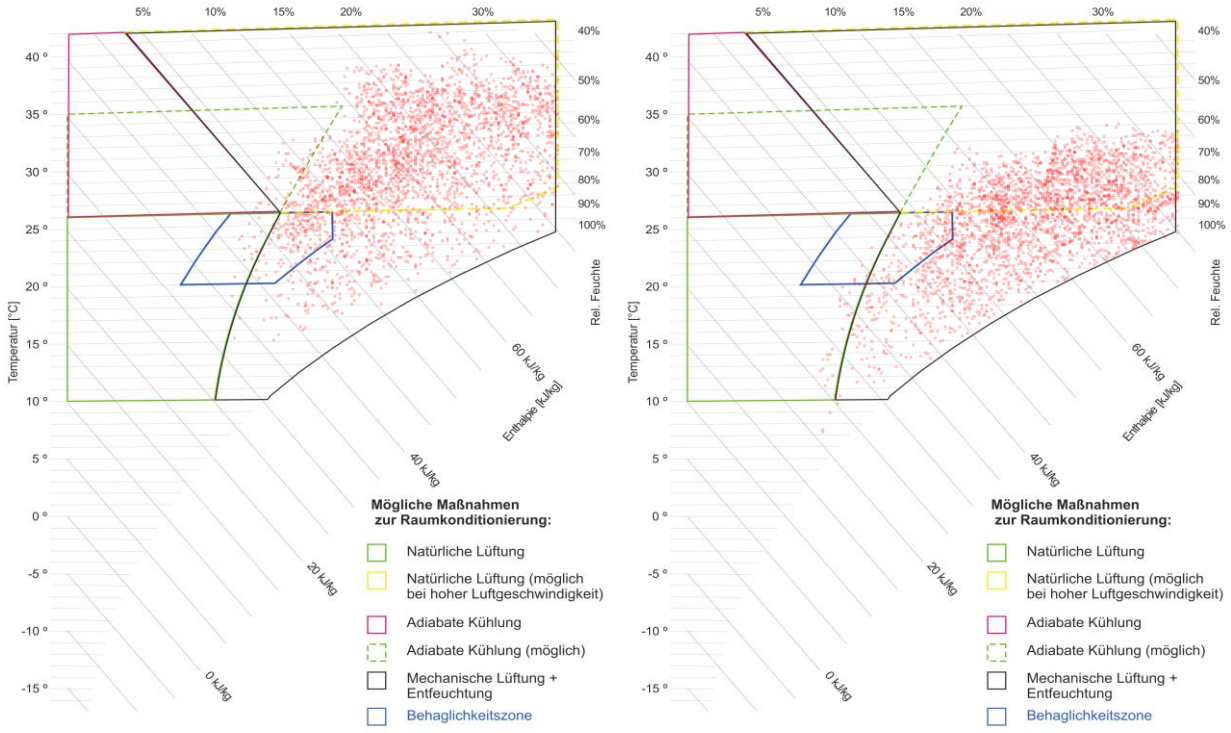


Abbildung 3.36 Maßnahmen zum Umgang mit der Luft (eigene Darstellung); links: Jeddah; rechts: Miami

Alle möglichen Maßnahmen können nur innerhalb eines bestimmten Bereichs von Lufttemperatur und relativer Feuchte ausgeführt werden, da sie vom Wassergehalt in der Luft abhängig sind. In dem Skript werden für jeden Bereich der Maßnahmen die Koordinaten eines Polygons eingegeben und ein anderes Skript stellt fest, ob ein Punkt innerhalb des Polygons vorliegt. Das Skript *Point-In-Polygon* wurde aus dem Internet heruntergeladen und integriert [197], [198].

Es kann festgestellt werden, dass der Wassergehalt in der Luft in Jeddah und Miami hoch ist. Zwar kann im gelben Bereich natürlich bei höherer Luftgeschwindigkeit belüftet werden, aber das ist schwierig in Büroräumen, wo die Innenlasten hoch sind. Bei der Nutzung von Kühldecken ist das Öffnen des Fensters an diesen Standorten deshalb ungünstig. Aufgrund des hohen Wassergehalts erreicht die Luft bei niedriger Temperatur ihren Sättigungspunkt bei einer

relativen Feuchte von 100 %. Das führt zu Tauwasserabbildung unter der Kühldecke, was hygienische Probleme verursachen kann. Entfeuchtung ist aufgrund der hohen Luftfeuchte in beiden Städten die meiste Zeit erforderlich. Fensterlüftung kommt sehr selten infrage. Allerdings muss in solchen Fällen die Menge der zu konditionierenden Zuluft auf die für die Hygiene erforderliche Menge minimiert werden, um den Energiebedarf zu reduzieren.

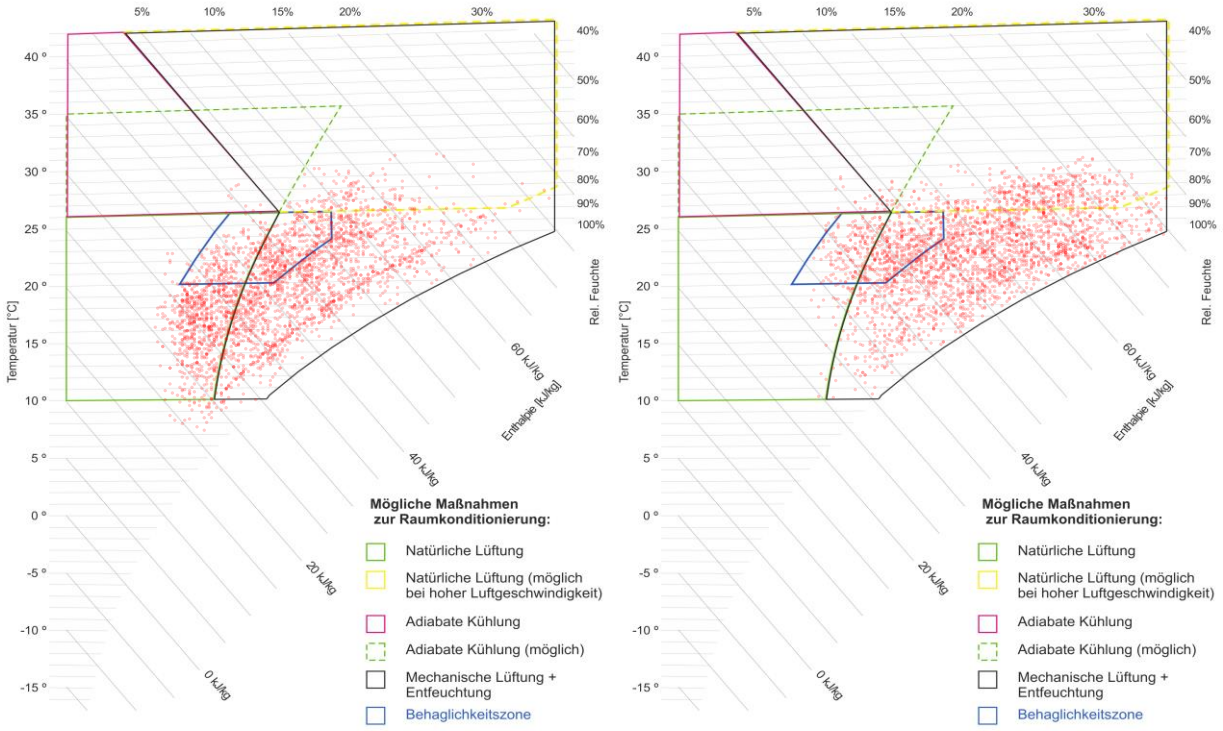


Abbildung 3.37 Maßnahmen zum Umgang mit der Luft (eigene Darstellung); links: Sydney; rechts: Durban

In Sydney und Durban liegt die Außenluft für eine hohe Stundenzahl im Behaglichkeitsbereich. In Sydney besteht die Möglichkeit, von der natürlichen Lüftung zu profitieren, das heißt, die Zuluft kann ohne Vorkonditionierung zugeführt werden. In der meisten Zeit wird aber eine Klimaanlage oder Luftentfeuchtung benötigt. In Abbildung 3.38 wird für jeden Standort die Stundenzahl im Hinblick auf die möglichen Maßnahmen dargestellt.

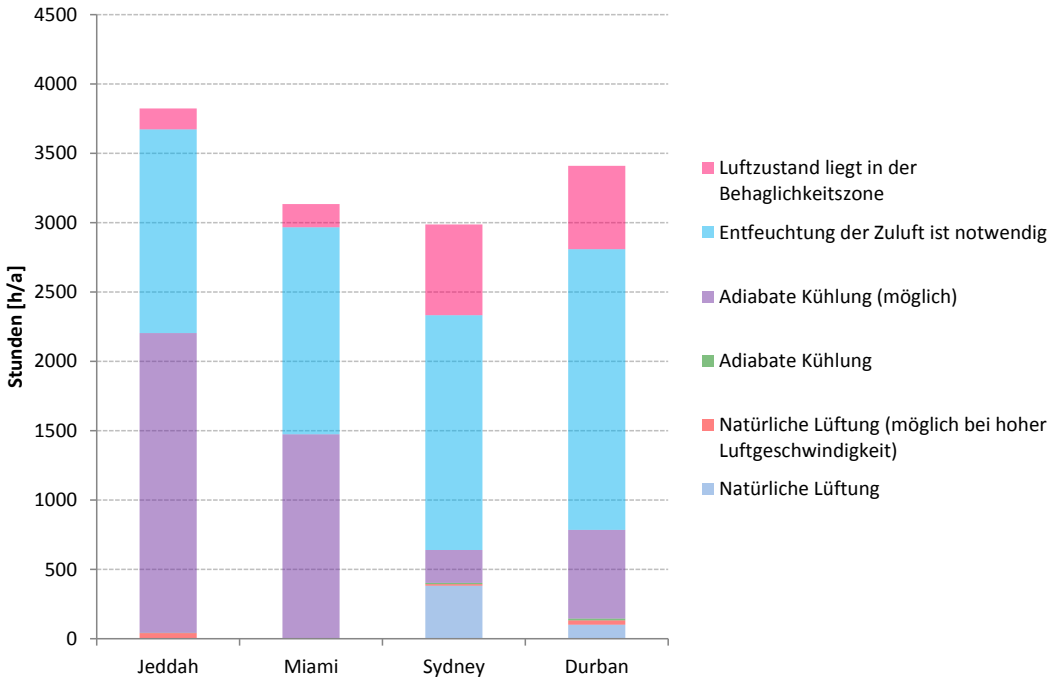


Abbildung 3.38 Maßnahmen zum Umgang mit den Lufteigenschaften (eigene Darstellung)

Ein Überblick über die Zeit, in der jeweils Entfeuchtung notwendig ist, zeigt, dass trotz der stark schwankenden Übertemperaturstunden die hohe Stundenzahl zur Entfeuchtung eine gemeinsame Eigenschaft der untersuchten Städte darstellt. Für Sydney ist dies besonders interessant, da die Übertemperaturstunden gemäß Abbildung 3.34 sehr gering sind.

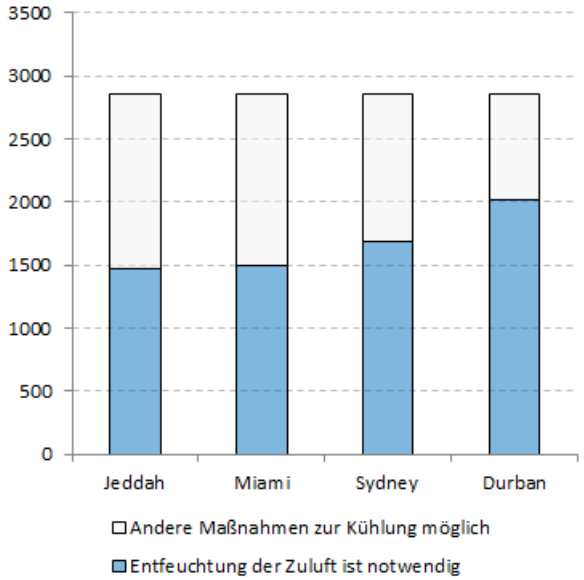


Abbildung 3.39 Betriebsstunden mit erforderlicher Entfeuchtung der Zuluft (eigene Darstellung)

Der entscheidende Unterschied zwischen den Standorten ist die zur Entfeuchtung benötigte wirksame Leistung. Diese nennt sich erforderliche Enthalpie zur Änderung des Luftzustandes

und lässt sich mittels des h-x-Diagramms ermitteln. Um vergleichen zu können, wie hoch der benötigte Energiebedarf zur Entfeuchtung an jedem Standort ist, wurde mit dem entwickelten Werkzeug ein Raum simuliert. Die Rahmenbedingungen sind in Tabelle 3.10 aufgelistet.

Bürofläche	33	[m²]	**Personen**	2	[-]
Orientierung	Süd	[-]	**Luftwechselrate**	0,6	[h^{-1}]
Fassadenfläche	16,5	[m²]	**Beleuchtung**	5	[W/m²]
Verglasungsanteil	30%	[-]	**Kühlung**	27	[W/m²]
U-Wert Fenster	0,7	[W/m²K]	**Heizung**	0	[W/m²]
g-Wert	73%	[-]	**Standort**	Variiert	[-]
Fc-Wert	40%	[-]			
Sonnenschutzsteuerung	zu Gk > 100	[-]			
U-Wert Außenwand	0,3	[W/m²K]			
Innenwände	Leicht, adiabat	[-]			
Decken	Massiv, adiabat	[-]			

Tabelle 3.10 Rahmenbedingungen der Simulationen

Die Balken in Abbildung 3.40 stellen den zur Konditionierung der Zuluft in einem von zwei Personen belegten Büroraum benötigten Energieaufwand pro Jahr und Quadratmeter dar. Es wird deutlich, dass Sydney und Durban einen geringeren Energieaufwand zur Entfeuchtung benötigen als die anderen zwei Städte, obwohl sie höhere Betriebsstunden aufweisen.

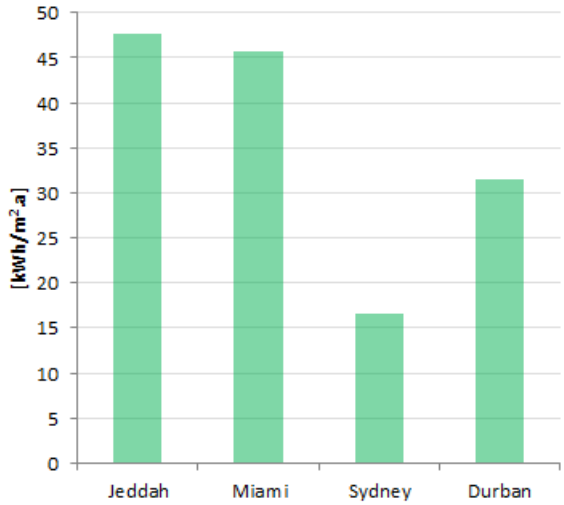


Abbildung 3.40 Vergleich der erforderlichen Nutzenergie zur Konditionierung der Zuluft in einem Beispielraum

Der Grund dafür kann im Zusammenhang mit den Grafiken in Abbildung 3.34 sowie den h-x-Diagrammen in Abbildung 3.37 geklärt werden. Trotz des hohen Wassergehalts in der Luft ist die benötigte Enthalpie wegen der niedrigen Lufttemperatur geringer als in Jeddah und Miami, wo die Lufttemperatur hoch ist.

3.2 Solarenergieoptimierungstool

3.2.1 Notwendigkeit der Fassadenoptimierung

Die Hülle eines Gebäudes definiert die Trennung zwischen innen und außen, sie prägt das äußere Erscheinungsbild des Bauwerks und kommuniziert mit seinem Umfeld. In der Entwicklungsgeschichte der Gebäudehülle stehen daher gestaltprägende Merkmale, Proportion, Materialität und kulturelle Bedeutungen im Vordergrund. Ihr funktionaler Nutzen besteht primär darin, das Bauwerk vor Wind, Niederschlag und Sonnenstrahlung zu schützen. Mit zunehmenden Behaglichkeitsanforderungen übernimmt die Gebäudehülle jedoch auch komplexere klimaregulierende Funktionen. Ein weiterer Schritt ist der Beitrag der Fassade zur dezentralen Energieversorgung [6].

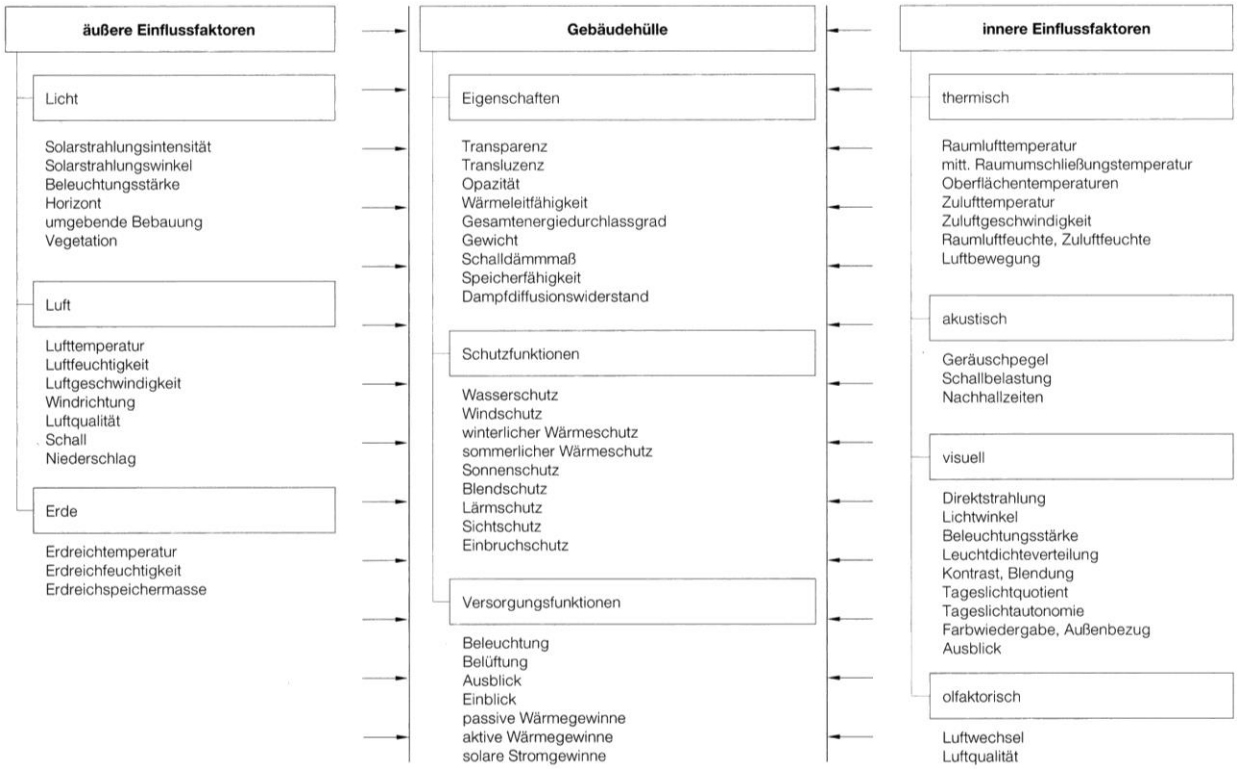


Abbildung 3.41 Fassade: Einflussfaktoren, Eigenschaften und Funktionen [6]

Wärme und Licht sind zwei wesentliche Energiearten, die die thermische und visuelle Behaglichkeit des Nutzers beeinflussen. Sie sollen daher nach entsprechenden Normen in bestimmten Maßen vorhanden sein. Die Kühllast (Wärmelast) ist die Wärmemenge, die aus einem Raum abgeführt werden muss, um die operative Temperatur des Raums in einem bestimmten Bereich zu halten. Über die Fassade als schützende Hülle werden die zugelassene Energie (äußere Kühllasten) sowie das Tageslicht bestimmt, das in den Raum gelangt.

Die Verfügbarkeit von ausreichend Tageslicht im Arbeitsraum wirkt sich wesentlich auf die Leistungsfähigkeit des Nutzers aus, da dieses physiologische Funktionen im menschlichen Körper beeinflusst. In Zeiten von nicht ausreichenden Energiemengen müssen Wärme bzw.

Kälte und Licht aus anderen Energiequellen bereitgestellt werden. Kunstlicht zählt zu den inneren Kühllasten, da es einen großen Teil der bezogenen Stromenergie in Wärme umwandelt und an den Raum abgibt. Es verursacht also weiteren Bedarf an Stromenergie und an Kühlenergie.

Für die Energiebilanz von Gebäuden stellt die Hülle das wichtigste bauliche Subsystem dar. Sie ist bei der Integration solartechnischer Systeme die wesentliche, auch optisch wirksame Schnittstelle zwischen Architektur und Solartechnik. Die Integration entsprechender Technik in die Gebäudehülle bedeutet das schlüssige Einfügen eines Bauteils in Dach und Fassade, wobei dieses Element als Teil der Gebäudehülle funktionale und konstruktive Aufgaben zu übernehmen hat.

Ein wichtiger Einflussfaktor für die Integrationsarbeit ist der angestrebte Abdeckungsgrad durch thermische bzw. fotovoltaische Solarenergienutzung und die daraus resultierende Dimensionierung der Anlagen [199]. Grundlegend für die Bestimmung des Deckungsgrads bzw. der benötigten Fläche für Energietechnik ist der Energiebedarf des Gebäudes. Im Fall der Kühlung in warmen Gebieten wird dieser durch Variieren der in den roten Kästen in

Abbildung 3.42 gezeigten Kerneinflussgrößen oder der entsprechenden Subparameter bestimmt. Dasselbe gilt auch für die Sicherstellung der visuellen Behaglichkeit.

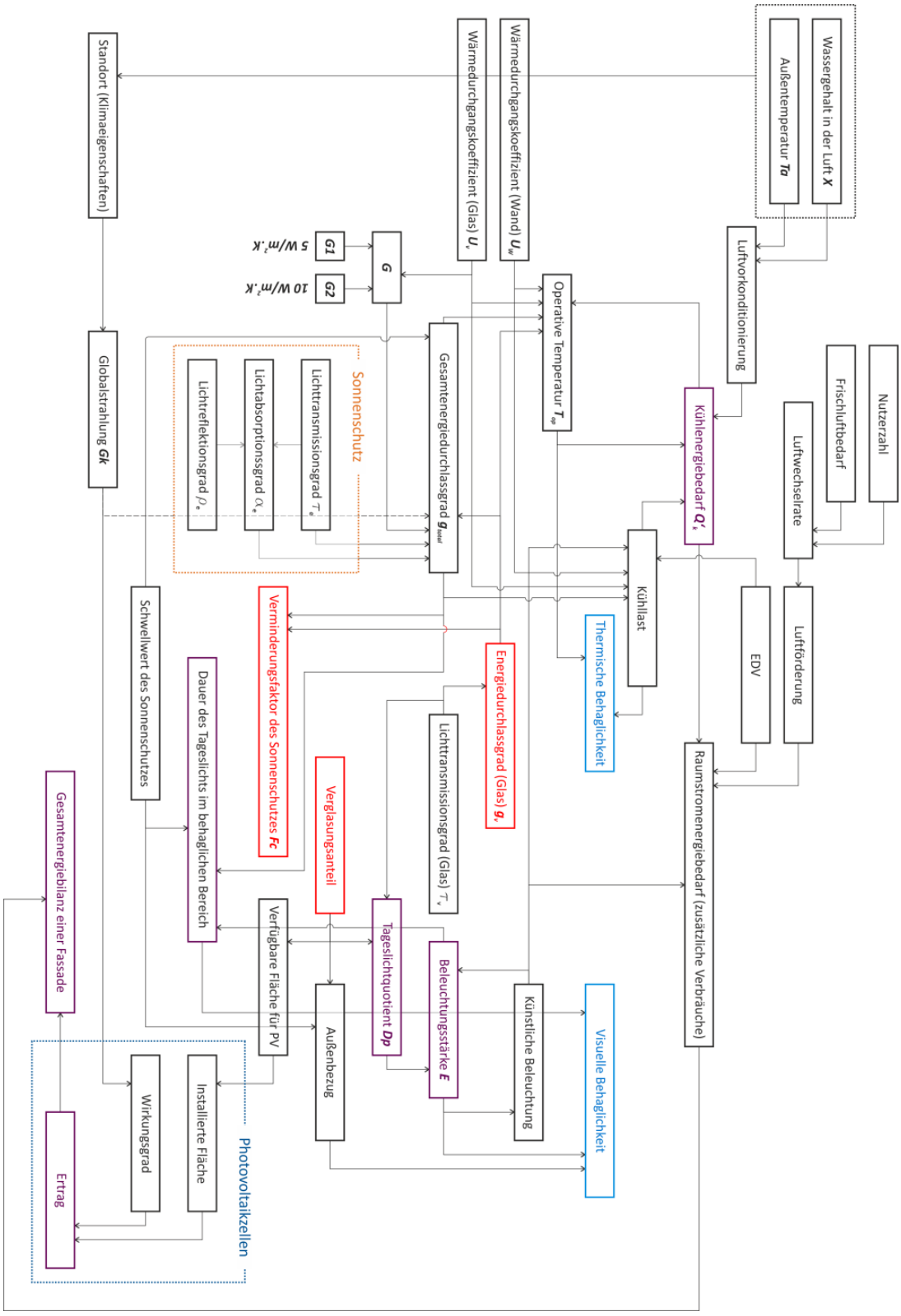


Abbildung 3.42 Darstellung der Zusammenhänge und Abhängigkeiten der ausgewählten Einflussgrößen (eigene Darstellung)

Die Optimierung einer Fassade hinsichtlich Energieeinsparung und -erzeugung maximiert die Anpassungsfähigkeit an ihren Standort bzw. ihre Randbedingungen. Optimierung bedeutet in diesem Fall eine Art Selbstorganisation des Fassadensystems, wobei einige Parameter nach komplexer Betrachtung in ihrer Struktur neu definiert werden. Es wird v. a. unter Biologen häufig diskutiert, dass das erstaunliche Merkmal einiger komplexer Systeme ihre Fähigkeit ist, zu lernen, sich zu verändern, an Vielfältigkeit und Komplexität zu gewinnen und sich zu entwickeln [149]. *Smart Grid* beispielsweise ist im Endeffekt eine große Batterie! Dieses System stellt einen vernünftigen Umgang mit den Grenzen der Energiespeicherung dar: Durch die Entwicklung eines selbstorganisierenden Systems, das durch eine intelligente Software gesteuert wird, kann die Leistungsfähigkeit sowohl der Infrastruktur als auch des einzelnen Verbrauchers erheblich erhöht werden. Das Energiemanagementsystem basiert dabei auf Optimierungsalgorithmen, die eine effiziente Energieverteilung ermöglichen.

Korrelation zwischen Kühlung und Beleuchtung beim heutigen Bauen

Zwei direkt von der Fassade beeinflusste Behaglichkeitsfaktoren stehen miteinander im Zielkonflikt: die thermische und die visuelle Behaglichkeit. Diese Tatsache soll im Folgenden erläutert werden. Mithilfe des Energiebilanztools, das im Solarenergieoptimierungstool integriert ist, wurde eine Sensitivitätsanalyse durchgeführt. Ziel war es herauszufinden, wie sich die Veränderung einer Größe, nämlich des Verglasungsanteils der Fassade, auf den jährlichen Kühlbedarf sowie den Strombedarf für Kunstlicht auswirkt. Weiter stellt sich die Frage, wie bestimmte Behaglichkeitsfaktoren dadurch beeinflusst werden können: Wie hoch ist mit dem jeweiligen Verglasungsanteil bei bestimmtem g-Wert und Fc-Faktor die Stundenzahl im Bereich der visuellen bzw. thermischen Behaglichkeit?

Raum		
Standort	Jeddah	[-]
Orientierung	Süd	[-]
Bürofläche	25,9	[m²]
Volumen	77,8	[m^3]
Anzahl der Nutzer	2	[-]
Luftwechselrate	0,5	[h^{-1}]

Fassade		
Fassadenfläche	10,80	[m²]
Verglasungsanteil	Variiert	[-]
g-Wert	40	[%]
Fc-Faktor	20	[%]
t_L-Wert	67	[%]
U-Wert Fenster	1,10	[W/m²K]
Schwellwert (SoSu)	100	[W/m²]
U-Wert Außenwand	0,3	[W/m²K]

Sonstige Bedingungen		
Spez. Wärmeabgabe Beleuchtung	10,0	[W/m²]
COP (Kälteanlage)	3,0	[-]

Tabelle 3.11 Rahmenbedingungen der durchgeführten Sensibilitätsanalyse

Die Rahmenbedingungen der durchgeführten Sensibilitätsanalyse werden in der Tabelle 3.11 beschrieben. Es wurde nur der Verglasungsanteil verändert, während alle anderen Parameter gleich blieben.

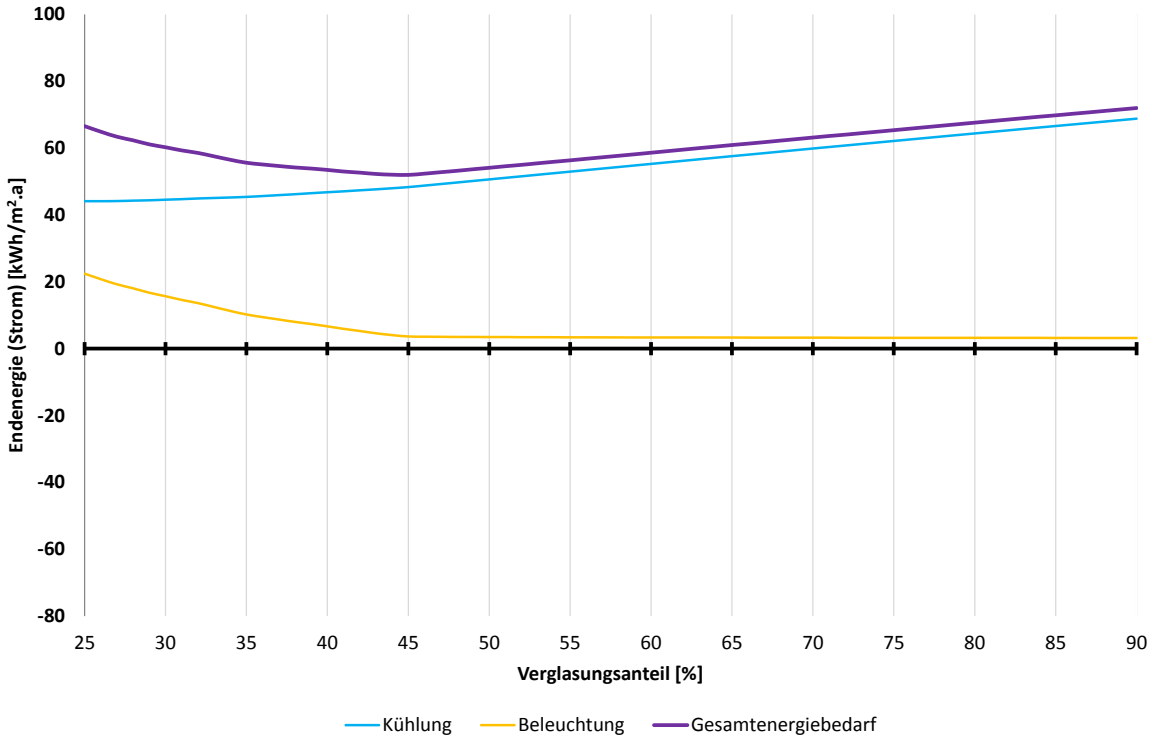


Abbildung 3.43 jährlicher Stromenergiebedarf für Beleuchtung und Raumkühlung je nach Verglasungsanteil (Simulation und Darstellung: Solarenergieoptimierungstool)

Die horizontale Achse in Abbildung 3.43 stellt den veränderbaren Verglasungsanteil dar. Die gelbe Kurve zeigt den erforderlichen Stromenergiebedarf für Beleuchtung, die blaue den Stromenergiebedarf für Raumkühlung. Es liegt auf der Hand, dass mit zunehmendem Verglasungsanteil der Kühlbedarf steigt sowie der Beleuchtungsbedarf abnimmt und umgekehrt. Die kritische Betrachtung dieser Korrelation ist wichtig, auch wenn die Effizienz der Beleuchtung hoch ist. Die Summe des Energiebedarfs für beide Aspekte nimmt mit zunehmendem Verglasungsanteil zu. Am niedrigsten ist sie bei einem Verglasungsanteil von 25 %.

Die thermische und die visuelle Behaglichkeit sind in diesem Fall zwei wichtige Indikatoren der Performance. In der Grafik der Abbildung 3.44 wird der Anteil der Arbeitszeit im Bereich thermischer Behaglichkeit mit einer grüngestrichelten Kurve dargestellt. Die Grenzen der operativen Temperatur wurden nach DIN EN ISO 7730 festgelegt. Diese Norm legt fest, dass die Raumtemperatur für eine bestmögliche Behaglichkeit im Winter bei 22 °C +/- 2 K und im Sommer bei 24 °C +/- 2 K liegen sollte, bei einer Raumluftfeuchte zwischen 30 und 60 %.

Die Veränderung des Verglasungsanteils keine große Auswirkung auf die thermische Behaglichkeit hat, da eine aktive Kühlung in Betrieb ist. Die Prozentanteile der Stunden im Behaglichkeitsbereich des Tageslichts variieren erheblich und liegen zwischen 25 % und 85 % der jährlichen Arbeitszeit.

Die grüne Kurve in der Grafik stellt den Tageslichtquotienten bei unterschiedlichen Verglasungsanteilen dar. Die Höhe des Tageslichtquotienten wird auf der rechten Achse dargestellt. Der Tageslichtquotient besagt, wie viel Prozent der Außenbeleuchtungsstärke durch

Öffnungen in einen Innenraum gelangen. Er ist aufgrund der Proportionalität der Beleuchtungsstärken E_p und E_a sowie aufgrund der rotationssymmetrischen Leuchtdichteverteilung des bedeckten Himmels unabhängig sowohl von der Tages- und der Jahreszeit als auch von der horizontalen Orientierung der Tageslichtöffnungen und damit des Gebäudes [200]. Jeder Punkt in einem Raum hat seinen individuellen Tageslichtquotienten. Die rechts in der Abbildung 3.44 ermittelten Daten beziehen sich jeweils auf einen bestimmten Punkt im Innenraum. Daten über die Richtwerte des Tageslichtquotienten in Büroräumen können in Abschnitt 3.1.5 und bei [168] nachgelesen werden.

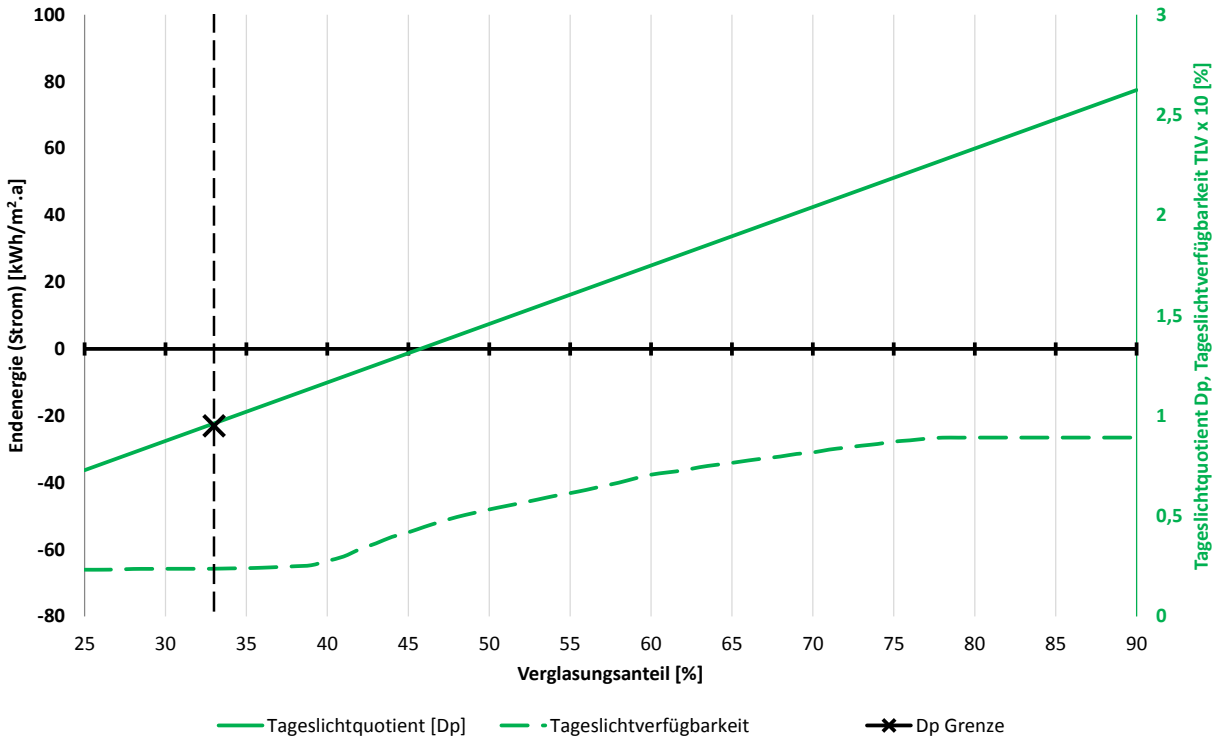


Abbildung 3.44 Links: Anteil der Arbeitszeit im Bereich der visuellen Behaglichkeit; rechts: Tageslichtquotient in der Raummitte (Simulation und Darstellung: Solarenergieoptimierungstool)

Die Arbeitsstätten müssen möglichst ausreichend Tageslicht erhalten. Eine Beleuchtung mit Tageslicht ist der Beleuchtung mit ausschließlich künstlichem Licht vorzuziehen. Die grüne gestrichelte Kurve der Abbildung 3.44 zeigt den Anteil der jährlichen Gesamtarbeitszeit, in dem die Beleuchtungsstärke des Tageslichts im Büro im Bereich der visuellen Behaglichkeit nach DIN 5035 liegt. Damit die Werte dieser Linie auf der rechten Achse gelesen werden können, müssen sie mit 10 multipliziert werden.

Der empfohlene Bereich der Beleuchtungsstärke liegt nach den Normen zwischen 300 lx und 5400 lx. Hier muss darauf hingewiesen werden, dass sich dieser Indikator in der Analyse auf das Tageslicht bezieht, also den Tageslichteintrag über die Verglasung. Dies wurde so eingestellt, um für den Nutzer möglichst maximales Tageslicht zu gewährleisten. Wenn während der Arbeitszeit nicht ausreichend Tageslicht zur Verfügung steht, also die Beleuchtungsstärke durch Tageslicht weniger als 300 lx beträgt, wird das Kunstlicht eingeschaltet. Dies kann auch

beim Herunterfahren des Sonnenschutzes vorkommen, dessen vorgesetzter Schwellwert bezüglich der Einstrahlung auf die Fassade 100 W/m^2 beträgt.

In der oberen Grafik zeigt sich, dass die Veränderung des Verglasungsanteils eine dramatische Wirkung auf die Höhe der gestrichelten grünen Linie hat. Das heißt, bei einem Verglasungsanteil von 40 % befindet sich der Raum in weniger als 50 % der Arbeitszeit im Bereich der visuellen Behaglichkeit durch Tageslicht. Das bedeutet, dass mehr als 50 % der Zeit das Kunstlicht eingeschaltet werden muss. Es ist interessant zu sehen, dass die Balkenlänge keiner linearen Funktion folgt. Die Kurve erreicht einen Höhepunkt bei 77 % Verglasungsanteil und bleibt konstant auf nahezu 85 % der Arbeitszeit.

Im Zusammenhang mit der Minimierung des Energiebedarfs und der Einhaltung der menschlichen Behaglichkeit stellt sich bei der Suche nach der optimalen Fassade automatisch die Frage nach dem optimalen Verglasungsanteil, bei dem die Summe des Energiebedarfs für Kühlung und Beleuchtung am geringsten ist und die Stundenzahl im Bereich der visuellen Behaglichkeit sowie der Tageslichtquotient am höchsten sind.

Noch spannender ist es, die Verläufe zu sehen, wenn der Fc-Faktor (Verminderungsfaktor des Sonnenschutzes) von 100 % beträgt, also kein Sonnenschutz. Die Rahmenbedingungen der entsprechenden Sensibilitätsanalyse werden in der Tabelle 3.12 beschrieben.

Raum		
Standort	Jeddah	[-]
Orientierung	Süd	[-]
Bürofläche	25,9	[m²]
Volumen	77,8	[m^3]
Anzahl der Nutzer	2	[-]
Luftwechselrate	0,5	[h^{-1}]

Fassade		
Fassadenfläche	10,80	[m²]
Verglasungsanteil	Variiert	[-]
g-Wert	40	[%]
Fc-Faktor	100	[%]
t_L-Wert	67	[%]
U-Wert Fenster	1,10	[W/m²K]
Schwellwert (SoSu)	100	[W/m²]
U-Wert Außenwand	0,3	[W/m²K]

Sonstige Bedingungen		
Spez. Wärmeabgabe Beleuchtung	10,0	[W/m²]
COP (Kälteanlage)	3,0	[-]

Tabelle 3.12 Rahmenbedingungen der Sensibilitätsanalyse mit einem Sonnenschutz

Das Diagramm in Abbildung 3.45 zeigt den Kühl- und Beleuchtungsenergiebedarf für den Raum mit zunehmendem Verglasungsanteil. Im Vergleich zum Diagramm in Abbildung 3.43 ist der Kühlbedarf ohne Sonnenschutz deutlich höher.

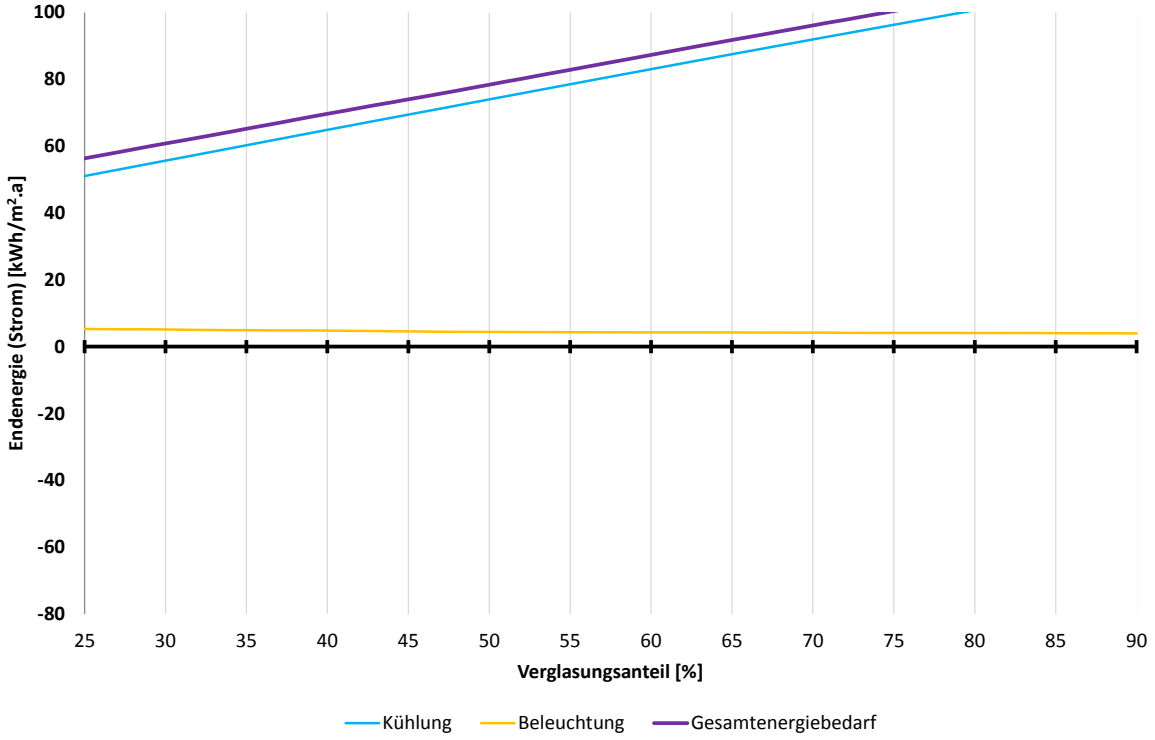


Abbildung 3.45 Kühl- und Beleuchtungsenergiebedarf eines Raums ohne Sonnenschutz (Simulation und Darstellung: Solarenergieoptimierungstool)

Die Summe des Energiebedarfs für Kühlung und Beleuchtung verändert sich ebenfalls ohne den Sonnenschutz. In der oberen Grafik wird gezeigt, dass bei einem Verglasungsanteil von 25 % die minimale Summe erreicht wird. Es ist auch interessant zu sehen, dass die Kühlung der Entscheidende Faktor in diesem Zusammenhang ist, und ohne Sonnenschutz, wie erwartet, drastisch zugenommen hat.

Abbildung 3.46 zeigt, dass sich in diesem Fall der Anteil der Arbeitszeit im behaglichen Bereich im Gegensatz zur vorherigen Analyse umgekehrt verhält. Ein Grund dafür ist, dass die Beleuchtungsstärke durch Tageslicht im Raum mit zunehmendem Verglasungsanteil deutlich zunimmt und die maximale Grenze überschreitet. Auf der anderen Seite weist die Grafik in Abbildung 3.46 darauf hin, dass bei einem Verglasungsanteil von 53 % die maximale Stundenzahl im Bereich der visuellen Behaglichkeit von ca. 65 % erreicht werden kann. Danach nimmt die Kurve erheblich ab.

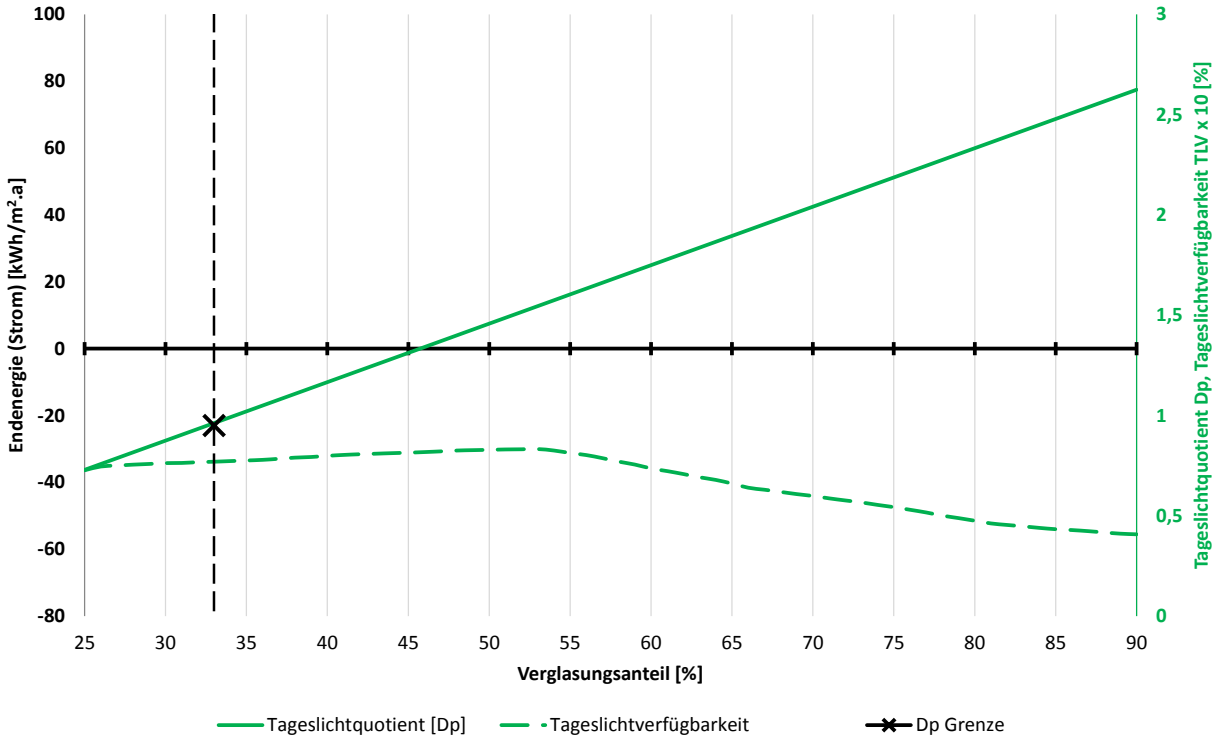


Abbildung 3.46 Anteil der Stundenzahl im Bereich der visuellen Behaglichkeit (Simulation und Darstellung: Solarenergieoptimierungstool)

Auf Basis der beiden Analysen lässt sich feststellen, dass in Bezug auf die Energieeffizienz der Fassaden viele Korrelationen vorliegen, was Potenziale zur Optimierung eröffnet und gleichzeitig eine Entscheidungshilfe bei der Planung erfordert.

Einfluss der Integration von Solartechnik

Photovoltaik eignet sich aufgrund der Bauhöhe und der relativ großen Anpassungsfähigkeit sowie einer Reihe gestalterischer Optionen (unterschiedliche Formate, Farbigkeit und Struktur) in besonderer Weise für die Integration in die Fassade. Der Einbau von Photovoltaikmodulen ist sowohl in opaken Warm- als auch Kaltfassaden möglich, wobei grundsätzlich auf eine niedrige Betriebstemperatur zu achten ist. Da bei ansteigender Temperatur der Wirkungsgrad abnimmt, sind bei Konstruktionen mit Hinterlüftung mindestens 5 cm Abstand vorzusehen. Neben gerahmten Standardkomponenten werden rahmenlose PV-Module in Pfosten-Riegel- und Element-Fassadenkonstruktionen eingebaut. Weil die Module die optischen und funktionalen Eigenschaften von Glas aufweisen, lassen sie sich leicht mit Glasbefestigungstechnik installieren [199].

Für das erste Beispiel in Abbildung 4.43 und Abbildung 4.44 wird angenommen, dass der Stromenergiebedarf – ganz oder teilweise – durch fassadenintegrierte Photovoltaikzellen abgedeckt werden soll. In der Tabelle 3.13 werden die Rahmenbedingungen gezeigt.

Raum		
Standort	Jeddah	[-]
Orientierung	Süd	[-]
Bürofläche	25,9	[m²]
Volumen	77,8	[m^3]
Anzahl der Nutzer	2	[-]
Luftwechselrate	0,5	[h^{-1}]

Photovoltaikzellen		
Verfügbare Fassadenfläche für PV	Variiert	[-]
Totale verfügbare Fläche	Variiert	[m²]
Neigungswinkel	90,00	[°]
Wirkungsgrad	0,15	[-]

Fassade		
Fassadenfläche	10,80	[m²]
Verglasungsanteil	Variiert	[-]
g-Wert	40	[%]
Fc-Faktor	100	[%]
t_L-Wert	67	[%]
U-Wert Fenster	1,10	[W/m²K]
Schwellwert (SoSu)	100	[W/m²]
U-Wert Außenwand	0,3	[W/m²K]

Sonstige Bedingungen		
Spez. Wärmeabgabe Beleuchtung	10,0	[W/m²]
COP (Kälteanlage)	3,0	[-]

Tabelle 3.13 Rahmenbedingungen der durchgeführten Analyse

Die zur Integration von Photovoltaikzellen verfügbare Fassadenfläche sinkt mit der Zunahme des Verglasungsanteils. Die Grafik auf der rechten Seite der Abbildung 3.47 zeigt die Korrelation zwischen dem Energiebedarf und dem aus fassadenintegrierten Photovoltaikzellen erzeugten Ertrag für die Annahme, dass immer 90 % der opaken Fläche für das Einbauen von Photovoltaikzellen reserviert werden. Es zeigt sich, dass mit zunehmendem Verglasungsanteil einerseits der Bedarf zunimmt und anderseits der Ertrag abnimmt.

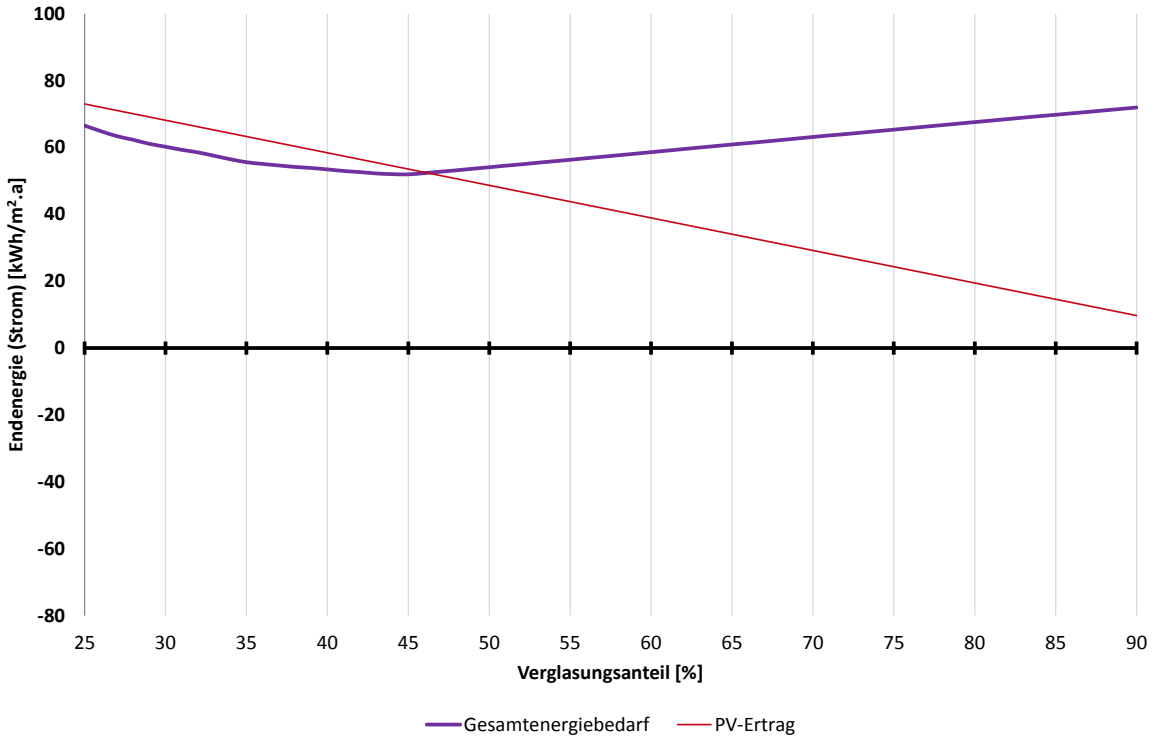


Abbildung 3.47 Links: verfügbare opake Fläche für PV; rechts: Ertrag gegen Energiebedarf (Simulation und Darstellung: Solarenergieoptimierungstool)

Das Diagramm in Abbildung 3.48 kombiniert den Energiebedarf mit dem Ertrag und stellt die daraus resultierende Energiebilanz dar. Es lässt sich feststellen, dass bis zum Verglasungsanteil von 55 % der Raum, der von der simulierten Fassade geschützt wird, eine Plus-Energiebilanz aufweist. Danach nimmt die Bilanz ab und geht in den negativen Bereich.

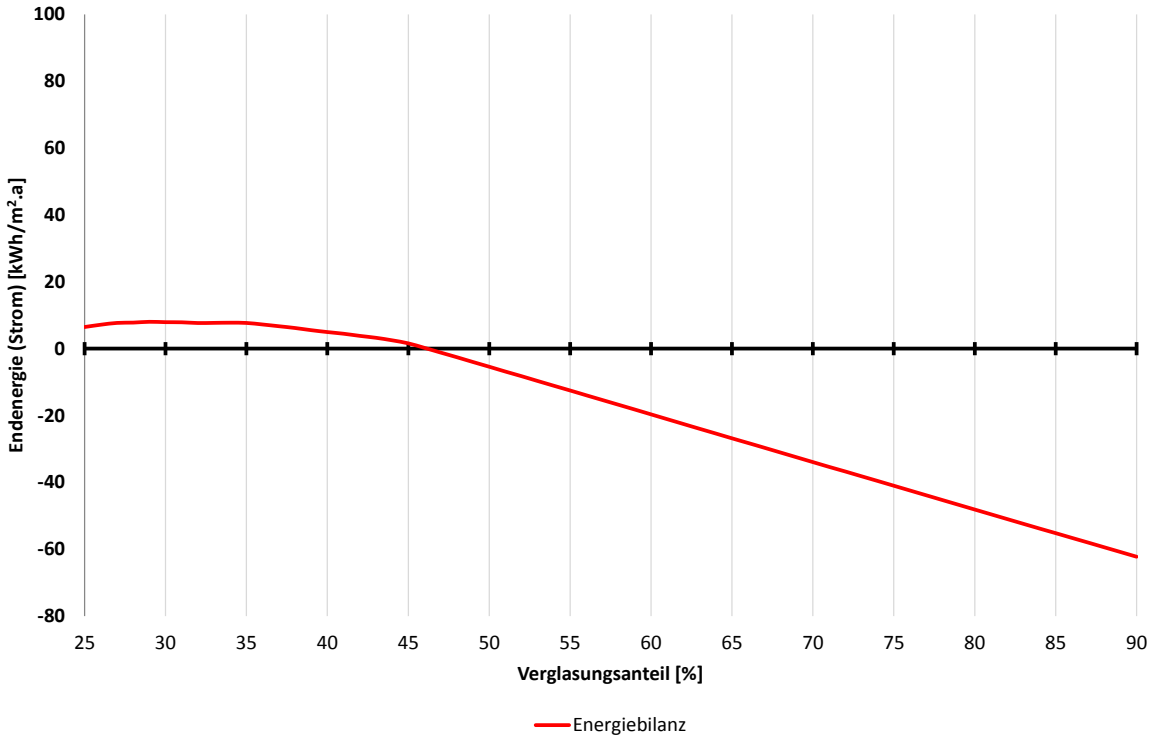


Abbildung 3.48 Energiebilanz (Simulation und Darstellung: Solarenergieoptimierungstool)

Im nächsten Diagramm in der Abbildung 3.49 wird die Energiebilanz (Kombination Ertrag und Bedarf) in Rot dargestellt. Es kann gesehen werden, dass eine maximale Energiebilanz bei einem Verglasungsanteil von 34 % erreicht werden kann, während eine Null-Energiebilanz bei 46 % liegt.

Die oben beschriebenen Korrelationen von den verschiedenen Parametern bieten große Möglichkeiten zur Optimierung. Es kann demzufolge nicht den einzigen und absolut optimalen Zustand geben, der der beste Zustand bei allen Bedingungen ist. Daher ist es sinnvoll, eine Entscheidungshilfe bereitzustellen, die dem Nutzer qualitative Alternativen zur Auswahl gibt.

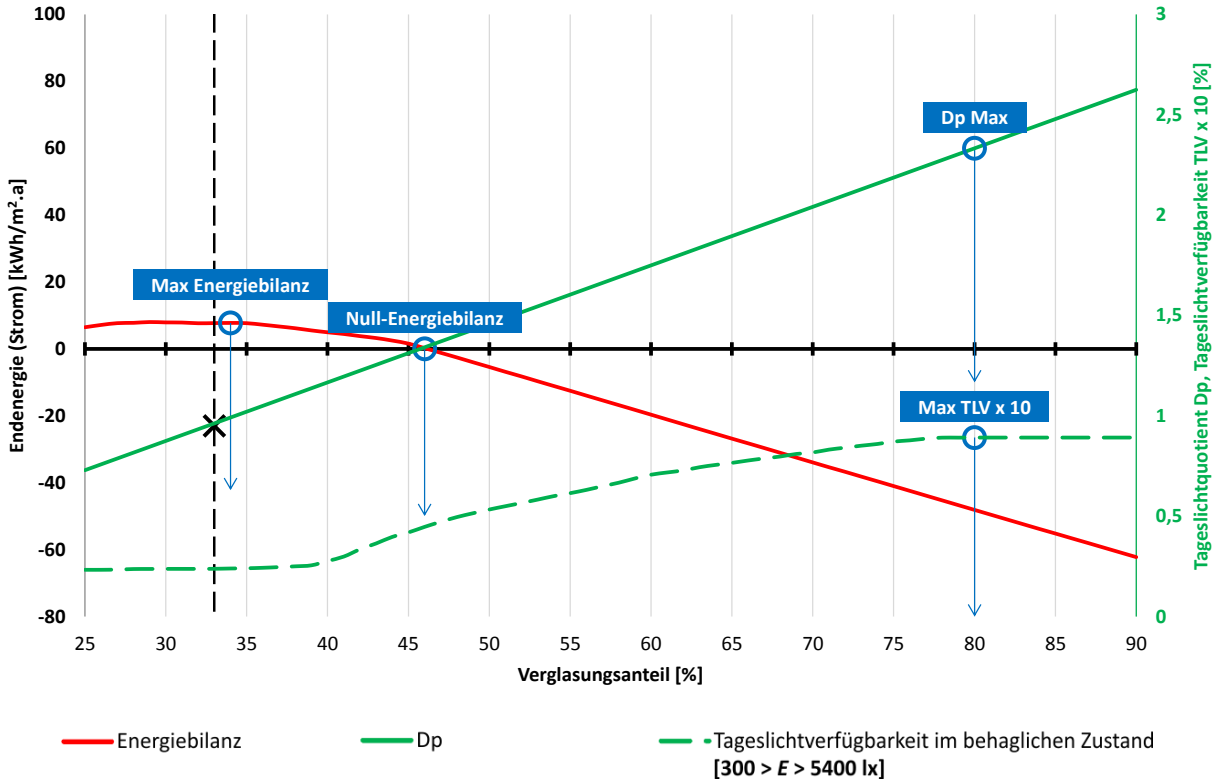


Abbildung 3.49 Zusammenfassung der Ergebnisse aus der Sensitivitätsanalyse (Simulation und Darstellung: Solarenergieoptimierungstool)

In dem ausgeführten Beispiel wurde nur eine Größe variiert und es konnte gezeigt werden, wie sensibel das Modell im Hinblick auf diese Größe ist. Wenn im Rahmen einer globalen Sensitivitätsanalyse mehrere Größen gleichzeitig variiert werden, werden die Korrelationen noch komplexer. Weitere Anwendungsbeispiele werden ausführlich in Kapitel 4 diskutiert.

Maßnahmen zur Fassadenoptimierung im Kontext des historischen Bauens

Vor der Entdeckung der fossilen Brennstoffe stellten der sparsame Umgang mit Energie zur Heizung und Kühlung sowie die Anwendung von Prinzipien solarer Energienutzung einen wichtigen Bestandteil in der Konzeption von Gebäuden bzw. Gebäudehüllen dar. Materialwahl, Orientierung des Baukörpers zur oder weg von der Sonne, Exposition im Hinblick auf Witterungseinflüsse sowie die Planung des Grundrisses und die Ausformung der Fassaden- und Dachflächen wurden angepasst an die Rahmenbedingungen des Standorts. Dazu wurden das lokale Klima, die Topografie, die Verfügbarkeit von Werkstoffen für die Herstellung und von Brennmaterial für den Betrieb von Gebäuden sorgfältig untersucht. Nach dieser Vorgehensweise entwickelte sich über Jahrhunderte hinweg in jeder Klimazone der Erde eine Baukultur, bei der ein unmittelbarer Zusammenhang zwischen den funktionalen Anforderungen und dem Erscheinungsbild der Bauten bestand, was sich auch heute noch an traditionellen Gebäuden überall in der Welt ablesen lässt [201].

„Die Notwendigkeit, Bauwerke gegen wechselnde klimatische Zustände zu schützen sowie das Innere für die Nutzer zu temperieren, bedingt seit jeher die Gestaltung von Fassaden. Diese

entstanden entweder direkt als Abschluss des verwendeten Materials, beispielsweise bei massiven Stein- und Holzkonstruktionen, sie ergaben sich aus der Konstruktion, etwa bei Fachwerkbauten, oder die Oberfläche wurde je nach Region und vorhandenem Material mit Natursteinplatten überzogen, verputzt oder mit Klinker oder Holzbrettern verkleidet.“ [202]

Abbildung 3.50 Gemeinsame Nutzung der Wände, um die A/V zu verringern; Damaskus [203]

Die Anpassung an die klimatischen Bedingungen zur Verringerung der Wärmeaufnahme stellte immer einen wesentlichen Bestandteil der traditionellen/vernakulären Architektur in den warmen Regionen dar. Zwar gab es nicht die Rechenmöglichkeiten wie heute, aber an vielen Beispielen wird deutlich, dass Optimierung ein angestrebtes Ziel war. Zur Minimierung der der Sonnenstrahlung ausgesetzten Fläche wurden Wände so oft wie möglich mehrfach-/teilgenutzt. Das obere Bild zeigt die opake Fläche eines Stadtviertels in Kairo. In den meisten Häusern wird nur eine Fassade der Sonne ausgesetzt.

Abbildung 3.51 Luftaufnahme der Stadt Shibam [204]

In der ersten Hochhausstadt der Geschichte (Shibam) war Kompaktheit besonders bedeutend, nicht nur aus Sicherheitsgründen, sondern auch zum Schutz vor Sandstürmen. Die Verringerung der exponierten Flächen im Hinblick auf die Sonneneinstrahlung kann in Abbildung 3.51 gesehen werden.

Abbildung 3.52 Eine Gasse in Shibam [205]

Außerdem haben die Verschattung durch Nachbarschaftsbebauung sowie die Kanalisierung des Windes wahrscheinlich sehr gut funktioniert.

Optimierung des Fensterflächenanteils

Das Verhältnis von Fenster und Wand – also von offener und geschlossener Fläche – ist eines der wesentlichen Themen der Außenhaut. Zunächst, so scheint es, besaßen unsere Vorfahren eine Vorliebe für das Dunkle, Mystische. Kleine Öffnungen in der Wand resultierten in vielen traditionellen Bauweisen nicht nur aus konstruktiven Gegebenheiten – in der massiven Stein- oder Lehmarchitektur ist es prinzipiell schwierig, die Mauer mit großen Fenstern zu durchbrechen –, sondern gleichermaßen aus dem Wunsch nach Schutz und Geborgenheit: Der

Mensch sehnte sich nach seiner Höhle. Aber auch der Energieverlust durch die Öffnung musste in Zeiten, als Glas noch Mangelware war, klein gehalten werden [199].

Neben dem Wärmeschutz diente das kleine Fenster dem Schutz vor der hohen Einstrahlung und den Sandstürmen. Bei der Fassadenoptimierung haben neben Verkleinerung des Fensterflächenanteils Speichermassen eine wesentliche Rolle gespielt.

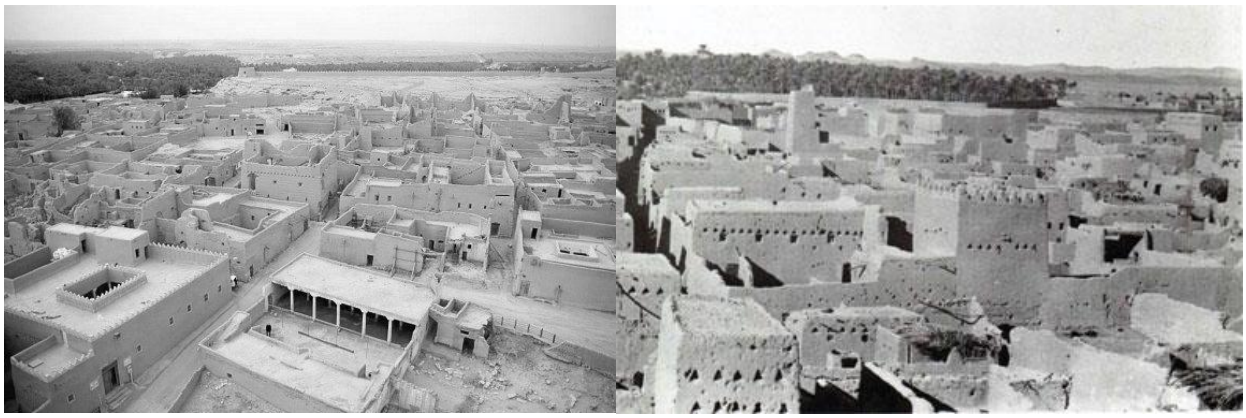


Abbildung 3.53 Kleiner Fensterflächenanteil zur Verringerung der Wärmeaufnahme; Standort: Riyadh-Region, Saudi-Arabien [206], [207]

Allerdings muss man auch feststellen, dass die Anforderungen an die thermische und visuelle Behaglichkeit nicht so groß waren wie heute. Damals gab es keine künstliche Beleuchtung, die dem Raum Wärme zuführte. Auch bei den Hochhäusern von Shibam zeigt sich, wie gering der Fensterflächenanteil war. Es gab dabei verschiedene Fensterarten, die bestimmte Funktionen wie zum Beispiel Lüftung erfüllten.

Abbildung 3.54 Stadtviertel in Shibam [205]

Indirekte Beleuchtung

Ein vernünftiges Optimierungskonzept im Hinblick auf die indirekte Beleuchtung kann in der Einrichtung des Innenhofes gesehen werden. Das folgende Bild zeigt, wie sich die Innenhöfe als grundsätzlicher Bestandteil der Städte in den warmen Regionen herausgebildet haben.

Abbildung 3.55 Innenhöfe zur indirekten Beleuchtung; Marrakesch [208]

Das folgende Beispiel zeigt die räumliche Funktion eines Innenhofs, der auch als Aufenthaltsraum mit Begrünung verwendet wurde. Das rote Rechteck zeigt die Position des sogenannten *Takhtabousch*, der einen Teil des großen Innenhofes im Haus darstellte.

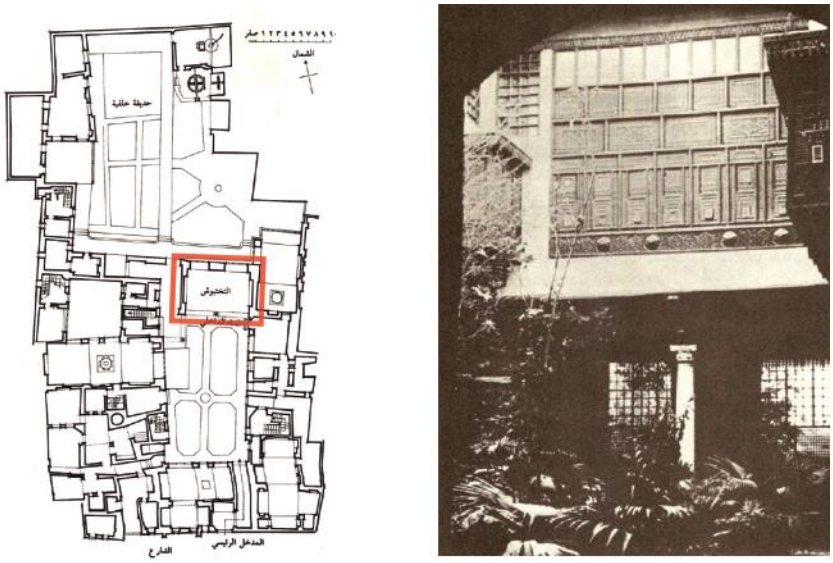


Abbildung 3.56 Der Innenhof eines Wohnhauses, Standort: Kairo [208]

Maschrabiya/Roschan als frühe optimierte Fassade

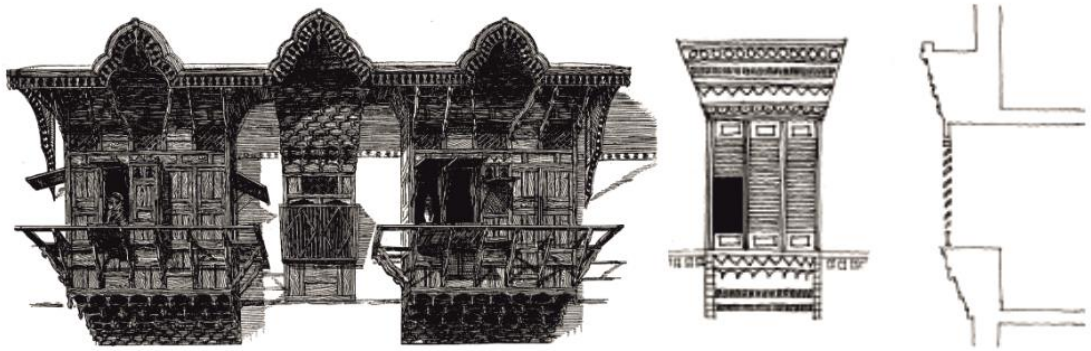


Abbildung 3.57 Darstellung einer typischen Maschrabiya (Quelle: unbekannt)

Ein wichtiges Element der vernakulären Architektur in den Subtropen ist die Maschrabiya oder das Gitterfenster. Neben dem Schutz der Privatsphäre dient das Gitter der Streuung des Lichts, es schafft einen weichen Übergang zwischen direktem und indirektem Licht.

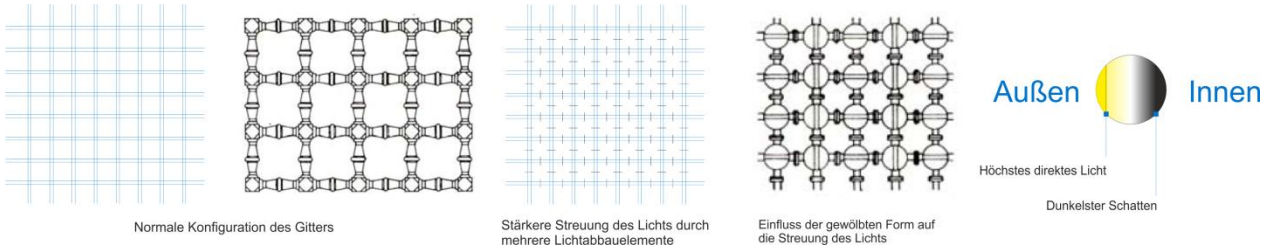


Abbildung 3.58 Zwei Arten der Maschrabiya nach dem Lichtstreuungskonzept (eigene Darstellung)

Um das direkte Licht zu reduzieren, wird die Dichte des Netzes erhöht. Gleichzeitig werden sphärische Elemente in das Gitter eingebaut, um die lichtreflektierende bzw. -absorbierende Fläche zu maximieren. Dadurch wird im dahinterliegenden Raum die Sichtverbindung nach außen nicht beeinträchtigt.

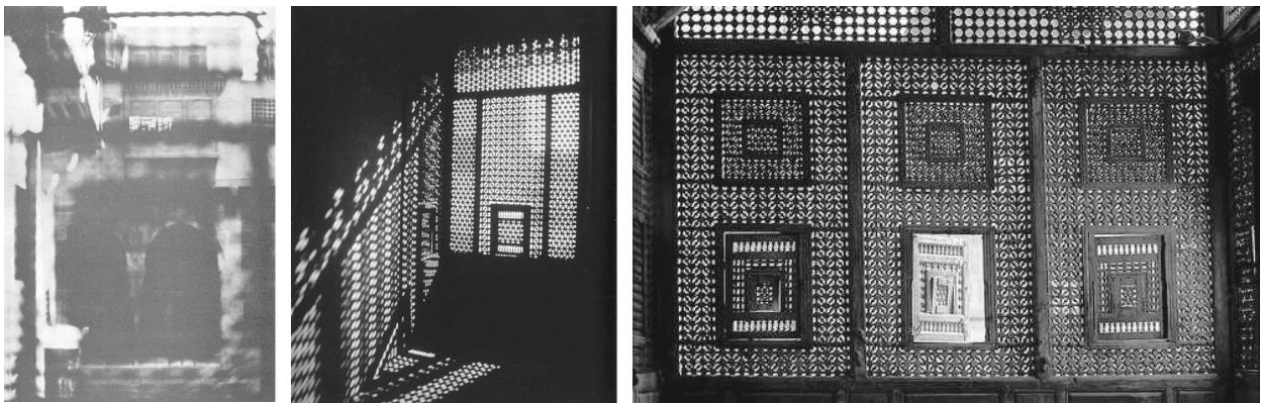


Abbildung 3.59 Die Maschrabiya von innen [208]

Die Bilder in Abbildung 3.59 zeigen Innenaussichten durch die Maschrabiya. Man kann davon ausgehen, dass trotz des Gitters eine ausreichende Menge an Tageslicht in den Raum gelangt.

Die Maschrabiya kann geöffnet werden. Die Öffnungen dienen nicht nur zur Kommunikation und der Erhöhung der Lüftungsintensität, sondern erhöhen die Leuchtdichte und verstärken den Außenbezug. Das erste Bild von links wurde ganz nah an der Maschrabiya aufgenommen. Es zeigt, dass die Sichtverbindung nach außen nicht behindert ist.

3.2.2 Rückblick auf die erste Version des Tools

Durch ihre Exponierung bietet die Hochhausfassade Potenziale zur Energieerzeugung. Die Integration von Energieerzeugungssystemen wie Photovoltaikzellen zur Stromerzeugung oder Solarkollektoren zur Gewinnung von thermischer Energie in die Fassade ist sinnvoll, da die hohen äußeren Kühllasten mit der hohen Einstrahlung zusammenfallen. Deshalb wurden Sonnenschutzvorrichtungen mit der Zeit zu einem Hauptbestandteil moderner Gebäude.

Das im Rahmen der vorliegenden Arbeit vorgestellte Fassadenoptimierungstool ist eine Weiterentwicklung bzw. zweite Version des im Rahmen der Masterthesis entwickelten Planungstools zur Optimierung von Hochhausfassaden. In dieser ersten Version sind Energieeinsparungs- bzw. Energieerzeugungsfunktionen integriert, damit durch Optimierung des Fensterflächenanteils die Energiebilanz maximiert werden kann. Es wurde festgestellt, dass der Verglasungsanteil und die für die Energieerzeugung reservierte Fläche zwei korrelierende Parameter sind, die optimiert werden sollten, um die Wärmeaufnahme durch den solaren Eintrag zu minimieren und gleichzeitig den Energieertrag zu maximieren. Mithilfe von Optimierungsalgorithmen wurden die Simulationsergebnisse verschiedener Fassadeneigenschaften mit ausgewählten Energieerzeugungskonzepten kombiniert, um den optimalen Zustand zu ermitteln und diesen in einem dynamischen Kriterienkatalog darzustellen [209]. Die Entwicklung der ersten Version des Werkzeugs hatte sich mit folgender Forschungsfrage beschäftigt: Welches ist das optimale Wand-Fenster-Verhältnis unter Einbezug von Orientierung, Energiedurchlassgrad der Verglasung (g), Verminderungsfaktor durch den Sonnenschutz (Fc) und Neigungswinkel, bei dem der Energiebedarf für Kühlung und Beleuchtung ein Minimum erreicht? Es stellt sich nun die Frage, wie groß die Fensterflächenanteile sein können, um den elektrischen Energiebedarf durch fassadenintegrierte PV-Elemente zu decken.

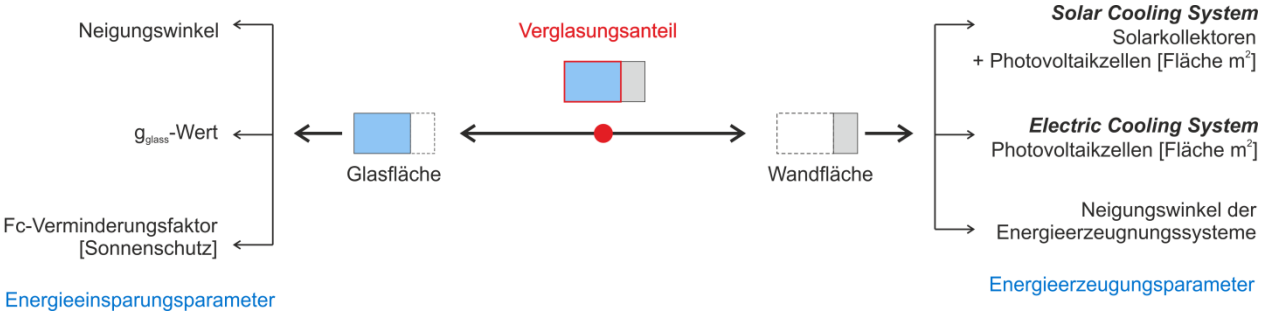


Abbildung 3.60 Wesentliche Rolle des Fensterflächenanteils (eigene Darstellung) [209]

Die Darstellung Abbildung 3.60 zeigt die entscheidende Rolle des Fensterflächenanteils unter anderen Parametern bei der Energieeinsparung und Energieerzeugung. In diese frühe Untersuchung wurde auch ein Modell für solare Klimatisierung/*Solar Cooling* integriert. Neben thermischer Energie wird Strom für die Absorptionskältemaschine benötigt. Es wurde ermittelt,

dass die für Solarkollektoren und Photovoltaikzellen benötigte Fassadenfläche zum Betreiben der Absorptionskältemaschine fast vier Mal so groß ist wie die für Photovoltaik benötigte Fläche im System der elektrischen Klimatisierung. Die Potenziale der solaren Klimatisierung sind relativ begrenzt, v. a. in den warmen Regionen, da aufgrund der hohen Umgebungstemperatur der technische Aufwand zur Rückkühlung groß ist.

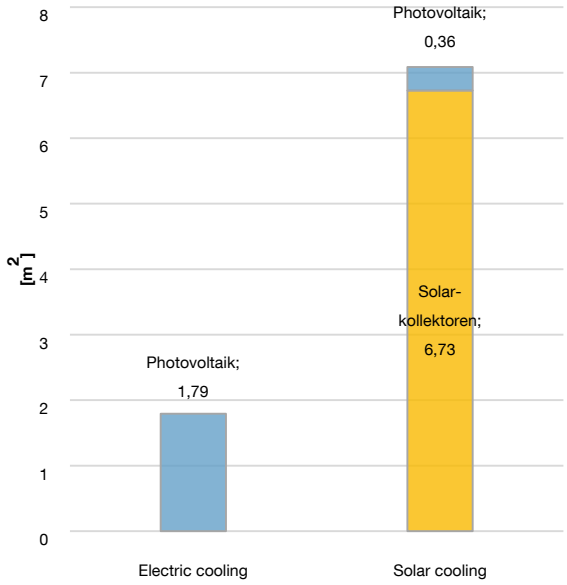


Abbildung 3.61 Erforderliche Fassadenfläche, um 10 kWh/m^2.a Kälte zu erzeugen (Süd, 90° geneigt, Standort: Riyadh)

Nach dem Vergleich zwischen elektrischer und solarer Klimatisierung (Abbildung 3.61) wurde entschieden, in der neueren Version des Fassadenoptimierungstools kein Modell für solare Klimatisierung zu berücksichtigen. Abbildung 3.62 gibt einen Überblick über die Haupteinflussgrößen.

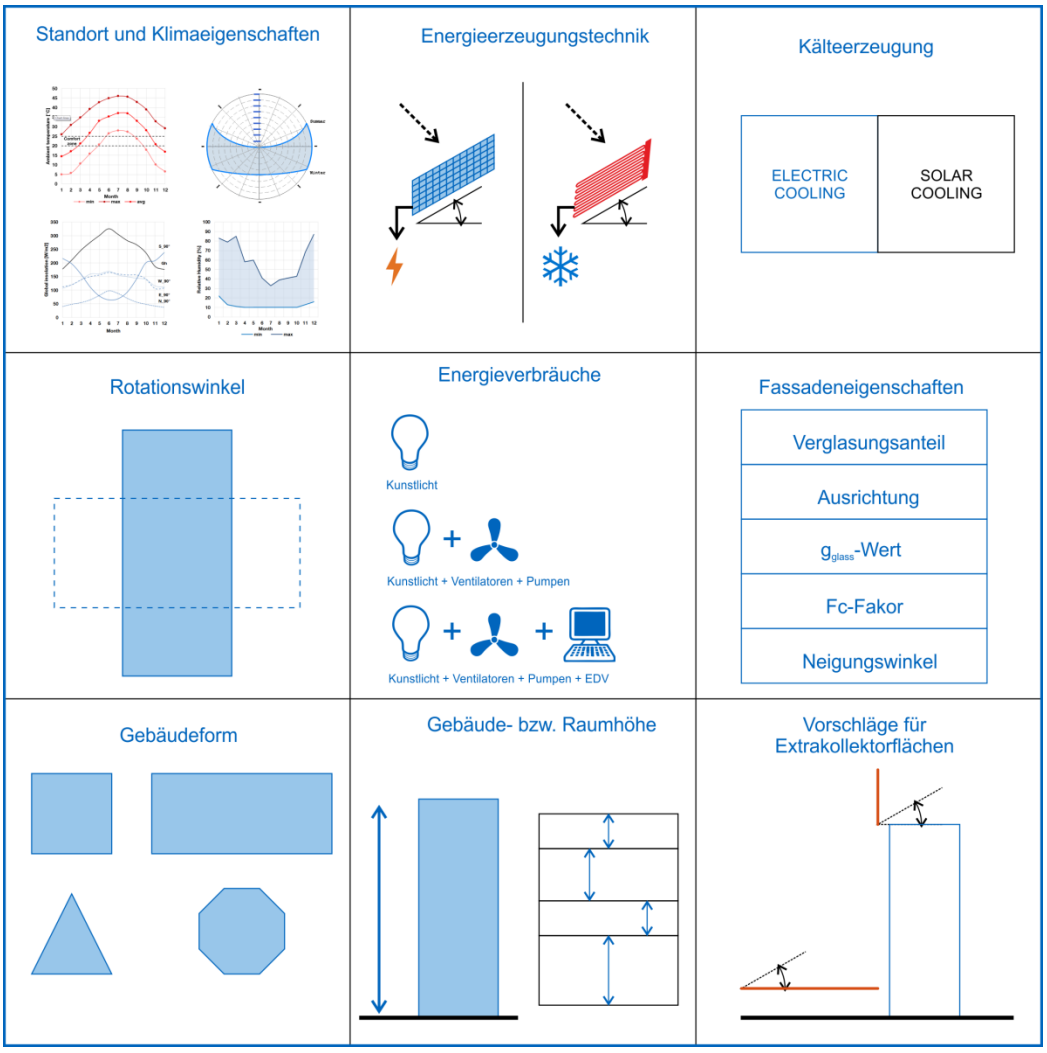


Abbildung 3.62 Einflussgrößen im dargestellten Werkzeug

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wird dieses Tool mit dem erwähnten Energiebilanztool kombiniert, um die Nutzung von einem externen Programm – wie im Fall der zitierten Masterarbeit – bei der Simulation zu vermeiden, was nicht nur die Untersuchung mehrerer Standorte und Fassadenparameter ermöglicht, sondern Zeit und Simulationsaufwand spart.

Ein Beispiel für die Optimierung des Verglasungsanteils im Hinblick auf Energieeinsparung und Energieerzeugung in einem typischen Büroraum wird in Abbildung 3.63 dargestellt.

Rahmenbendingungen

Standort	[-]	Riyadh
Orientierung	[-]	S
g-Glass	[%]	0,17
Fc-Faktor	[-]	1
Neigungswinkel	[°]	90
Simulierte Verbräuche	[-]	Beleuchtung
	[-]	Kühlung
Kälteerzeugungssystem	[-]	Elektrisch
COP	[-]	3

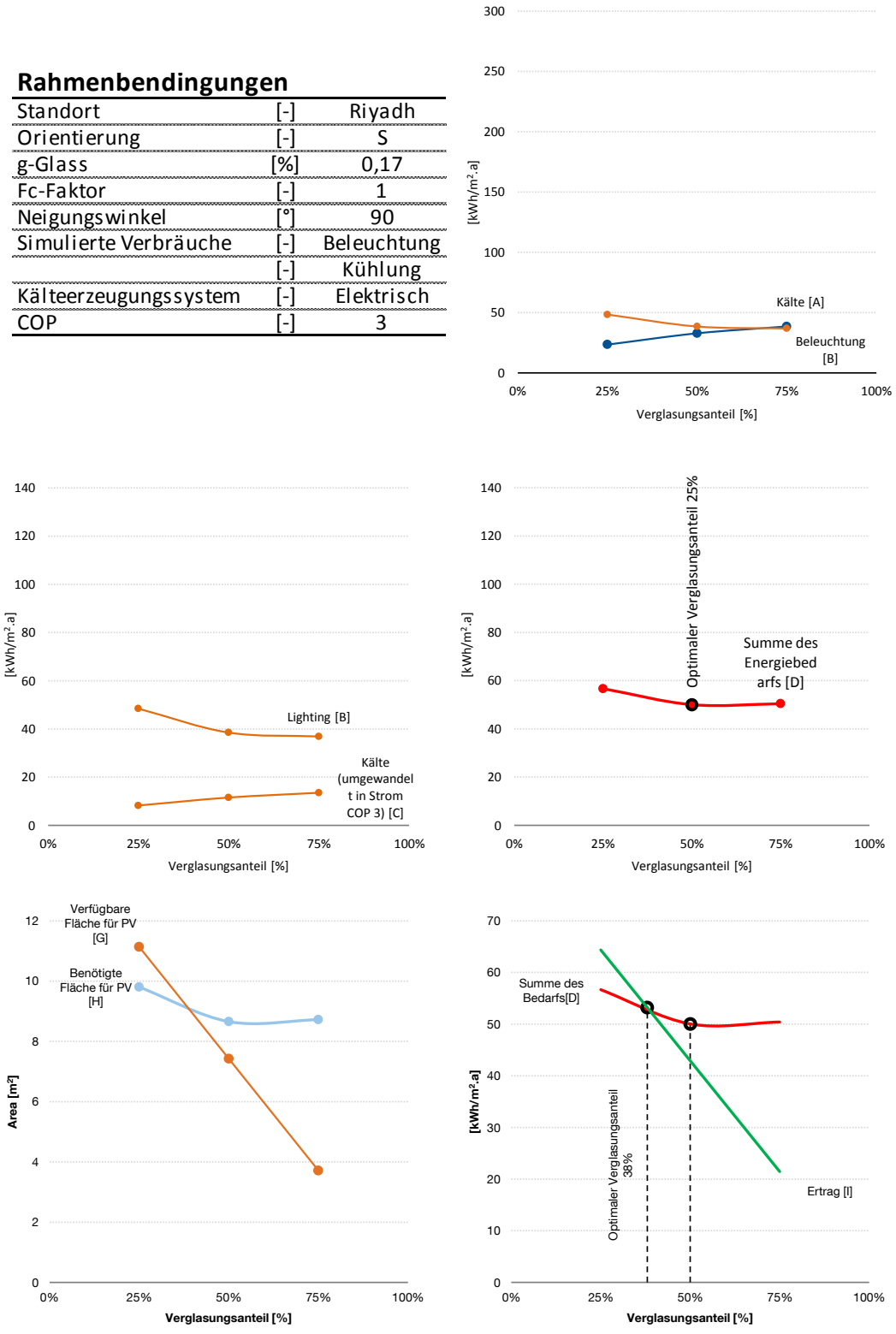


Abbildung 3.63 Optimierungsprozess des Verglasungsanteils zur Energieeinsparung bzw. -erzeugung durch fassadenintegrierte Photovoltaikzellen (eigene Darstellung)

Oben links in Abbildung 3.63 werden die Rahmenbedingungen des Optimierungsvorgangs beschrieben. Die horizontale Achse zeigt in allen Diagrammen die Verglasungsanteile. Oben rechts kann abgelesen werden, welche Auswirkung der zunehmende Verglasungsanteil auf den Kälte- und den Beleuchtungsbedarf hat. Die blaue Kurve [A] repräsentiert Kälte, die orangene Linie Strom. Mittig links wurde die Kälte in Strom umgewandelt. Es wurde angenommen, dass das System eine Kompressionskältemaschine beinhaltet, deren Wirkungsgrad (COP) drei beträgt. Es ist auffällig, dass der Strombedarf für Kühlung bei zunehmendem Verglasungsanteil zunimmt, wobei der Strombedarf für die Beleuchtung abnimmt. Ein Grund dafür ist der geringe Gesamtenergiedurchlassgrad der Verglasung (g-Glas), der nur 17 % beträgt.

Die Summe der beiden Energieverbräuche wird mittig rechts durch die rote Kurve dargestellt. Nachvollziehbar ist, dass der optimale Verglasungsanteil bei 25 % liegt, da an diesem Punkt die Summe des Energiebedarfs am geringsten ist. Das Diagramm unten links zeigt eine weitere Analyse nach dem Einbezug von fassadenintegrierten Photovoltaikzellen. Dabei zeigt sich, wie groß die für Photovoltaikzellen benötigte Fläche im Vergleich zur verfügbaren Wandfläche ist. Es liegt auf der Hand, dass die verfügbare Wandfläche bei größer werdendem Verglasungsanteil abnimmt. Auf der anderen Seite nimmt die benötigte Photovoltaikfläche zu. Das Diagramm unten rechts gibt an, dass bei 38 % Verglasungsanteil die benötigte Photovoltaikfläche der verfügbaren Wandfläche entspricht, d. h., an diesem Punkt erzielt die Fassade eine Null-Energiebilanz.

Mit steigendem Verglasungsanteil nimmt das Verhältnis zwischen Ertrag und Bedarf ab. Die Darstellung zeigt, dass es einen möglichen Bereich gibt, der durch Verglasungsanteile von 38 % und 50 % eingegrenzt wird. Das bedeutet, bei 50 % Verglasungsanteil ist die Energiebilanz negativ. Der Nutzer kann für sich und im Hinblick auf gestalterische Qualitäten entscheiden, welchen Verglasungsanteil innerhalb des Rahmens er wählt.

Die Grenze dieses Tools liegt darin, dass es mit dem Verglasungsanteil nur eine Größe unter Einbezug von anderen Größen optimiert. Die Einhaltung des nach DIN 5034 empfohlenen Tageslichtquotienten (0,95 %) wurde in diesem Tool dagegen nicht berücksichtigt.

Der Optimierungsprozess wird auf der Basis von in *IDA ICE 4,0* vorsimulierten Extremdaten zum Energiebedarf bei verschiedenen Fassadeneigenschaften durchgeführt, die in einer Datenbank nach mehr als 800 Simulationen zusammengeführt wurden. Die Nutzung von vorsimulierten Daten ist nicht nur zeitintensiv, sondern sehr aufwendig. Außerdem beschränkt dieses Vorgehen das Tool auf einen bestimmten Standort und auf bestimmte Nebenbedingungen. Die für Kunstlicht, Luftförderung und EDV benötigte Energie wurde in dieses Tool integriert.

3.2.3 Optimierungsmodelle und deren Wirkungen

Dieses Tool beschäftigt sich mit der Ermittlung der optimalen bauphysikalischen Eigenschaften einer oder mehrerer Fassaden. Hinsichtlich der Energieerzeugung über fassadenintegrierte Photovoltaikzellen und der Energieeinsparung durch Minimierung der Wärmeaufnahme dient das Solarenergieoptimierungstool zur Ermittlung der optimalen Werte der wesentlichen Einflussgrößen. Dies erfolgt unter Einbezug von Standort, Orientierung und Daten zu den integrierten Energieerzeugungssystemen. Um die Flexibilität zu erhöhen, kann mit dem Tool mehr als eine Größe gleichzeitig optimiert werden.

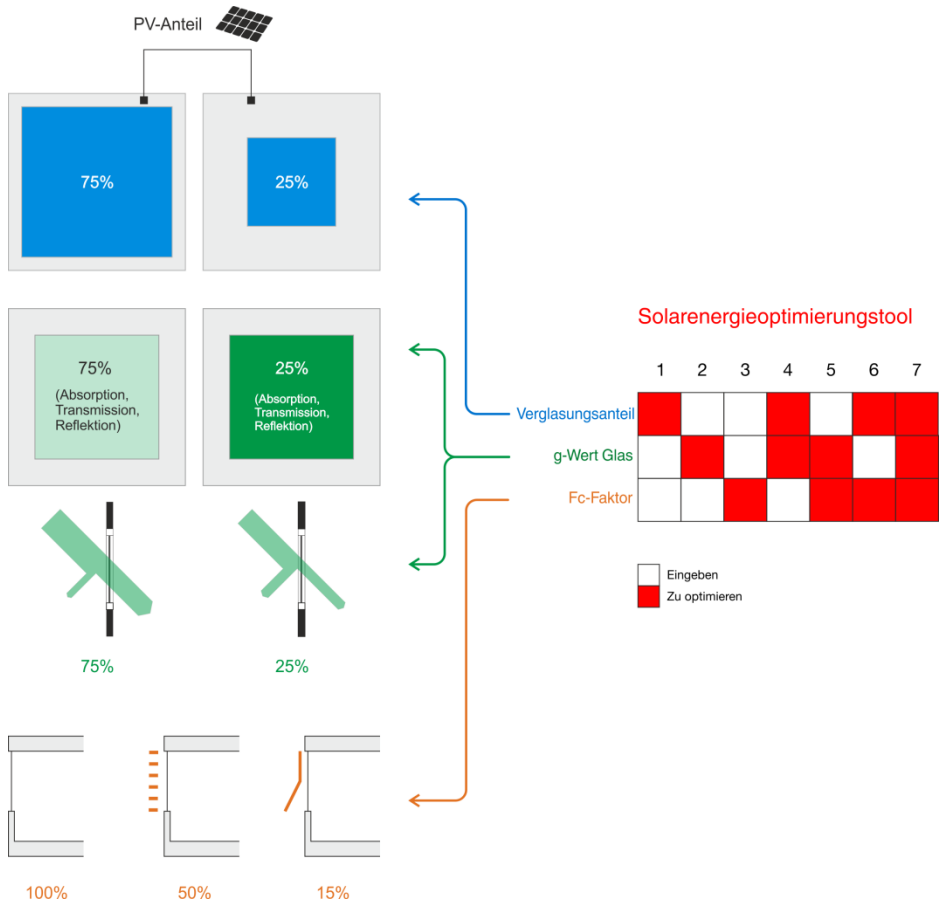


Abbildung 3.64 Variierbare Größen des Solarenergieoptimierungstools (eigene Darstellung)

Der Nutzer kann eines oder mehrere der in Abbildung 3.64 gezeigten Optimierungsmodelle auswählen und durchführen lassen. Je mehr optimierte Varianten, desto größere Auswahlmöglichkeiten. Die erzeugten optimierten Varianten werden mittels eines Kriterienkatalogs für jede Fassade dargestellt. Der Nutzer kann die Fassadenkriterien zusammenfügen und sofort die Auswirkung auf die drei genannten Aspekte beobachten: Energiebilanz, Gestaltung und Behaglichkeit. Neben den Optimierungsalgorithmen dient das eingebettete Energiebilanztool zur groben Berechnung des Energiebedarfs im generischen Büroraum.

Wie bereits erläutert, erfolgt die Optimierung nach Durchführung einer Sensibilitätsanalyse. Um die Rechengeschwindigkeit zu erhöhen, kombiniert sich der Optimierungsalgorithmus im Lösungsprozess mit dem Excel-Solver.

Die roten Zellen in jedem der gezeigten Optimierungsmodelle stellen die zu optimierenden Größen dar, während die weißen Zellen für die einzugebenden Daten stehen. Nachfolgend sind Beispielszenarien im Hinblick auf die Auswahl der Optimierungsmodelle aufgeführt:

1. Der Architekt will herausfinden, wie hoch der optimale Fensterflächenanteil bei 50 % g-Wert (Glas) und 20 % Fc-Faktor (Verminderungsfaktor des Sonnenschutzes) ist.

2. Im zweiten Fall gibt der Architekt einen unbedingt gewünschten Fensterflächenanteil von 85 % mit einem Fc-Faktor von 20 % vor. Der optimale g-Wert (Glas) wird ermittelt: Er beträgt 37 %.

3. Es kann sein, dass der Architekt einen bestimmten Fensterflächenanteil und einen g-Wert (Glas) festlegen möchte. Vom Programm bekommt er den optimalen Fc-Faktor. Es sei denn, dass er einen Sonnenschutz einbauen will, der einen Fc-Faktor über 20 % aufweist und ab 200 W Einstrahlung zum Einsatz kommt, um das Fenster zu schützen und ihm einen Gesamtenergiedurchlassgrad (g-Wert (gesamt)) von 45 % zu verleihen.

4. Im Fall Nummer vier will der Architekt den Fc-Faktor von 20 % durch bestimmte Jalousien einhalten. Daher müssen zwei Größen optimiert werden, um eine maximale Energiebilanz zu erreichen: Fensterflächenanteil und g-Wert (Glas). Vom Programm wird ein Fensterflächenanteil von 67 % mit einem g-Wert (Glas) von 58 % errechnet. Der Tageslichtquotient beträgt 1,26 %.

5. Aufgrund gestalterischer Wünsche will der Architekt einen Fensterflächenanteil von 75 % haben und möchte wissen, mit welchem g-Wert (Glas) und welchem Fc-Faktor die höchste Energiebilanz erreicht werden kann. Das Fassadenoptimierungstool ermittelt, dass ein g-Wert (Glas) von 63 % und ein Fc-Faktor von 19 % optimal sind.

6. Eine bestimmte Verglasung hat den Architekten und Bauherren gefallen und sie wollen herausfinden, wie groß die optimale Glasfläche und wie niedrig der Fc-Faktor sein muss, um die höchste Energiebilanz zu erzielen. Nach dem Fassadenoptimierungstool wird ein Fensterflächenanteil von 75 % mit einem Sonnenschutz mit einem Fc-Faktor von 20 % empfohlen. Hier kann die Energiebilanz -36,9 kWh/m^2.a erreicht werden.

7. Falls der Architekt keinen bestimmten Wunsch hat, kann er alle drei Größen im Sinne einer höchstmöglichen Energiebilanz optimieren. Das Fassadenoptimierungstool stellt die folgenden optimalen Parameter fest: 75 % für den Fensterflächenanteil, 63 % für den g-Wert (Glas) und 19 % für den Fc-Faktor. Diese Kriterien führen zu einer Energiebilanz von ca. -38,6 kWh/m^2.a.

3.2.4 Optimierungsprozess auf der Ebene einer Fassade

Wie bereits beschrieben, dient das Solarenergieoptimierungstool zur Maximierung des Energieertrags aus fassadenintegrierten Photovoltaikzellen und zur Minimierung des Energiebedarfs im Hinblick auf die Behaglichkeit. Es gibt verschiedene Optimierungsziele, nach denen die empfohlenen optimalen Grenzen definiert werden. Abbildung 3.65 gibt eine Übersicht über den Rechenprozess im Solarenergieoptimierungstool. Es lässt sich feststellen, dass sich durch Änderung der obersten Parameter das Verhältnis zwischen der zur Integration von Photovoltaikzellen benötigten Wandfläche und der verfügbaren Wandfläche ändert.

Für die Beschreibung des Vorgangs muss zuerst geklärt werden, welche Funktion das Energiebilanztool übernimmt. Grundsätzlich wird der Energiebedarf eines Raums zur Kühlung und Beleuchtung nach den Behaglichkeitsgrenzen bestimmt. Im Hinblick auf die Kühlung hat ein typischer Büroraum Innen- und Außenlasten. Die Wärmeabgabe von Menschen, Beleuchtung und Elektrogeräten wie EDV stellen die Innenlasten dar. Zu den Außenlasten trägt am wesentlichsten die Solarstrahlung bei. Wärme wird durch Transmission, Strahlung und Konvektion aufgenommen. Die erwähnten ausgewählten Einflussgrößen Verglasungsanteil, g-Wert Glas und Fc-Faktor beschäftigen sich meistens mit der Strahlung. Die genaue Berechnung des Abminderungsfaktors des Sonnenschutzes berücksichtigt auch den Wärmedurchgangskoeffizienten (U-Wert) der Verglasung. Der U-Wert wird vom Hersteller gegeben und steht nicht im Zusammenhang mit dem g-Wert. Daher wird ein grober U-Wert auf der Basis einer eingebetteten Datenbank geschätzt. Allerdings muss darauf hingewiesen werden, dass in der untersuchten Region, wo Kühlung notwendig ist, die Variierung des g-Werts im Hinblick auf den Kühlbedarf entscheidender ist. Gemäß der Innen- und Außenlasten wird vom Energiebilanztool ermittelt, wie viel Wärme beim Kühlen aus dem Raum abzuführen ist. Zur Kühlung zählt auch der Kälteenergiebedarf zur Luftvorkonditionierung.

Der Gesamtkälteenergiebedarf wird durch eine strombetriebene Kältemaschine abgedeckt, deren Wirkungsgrad z. B. COP 3 beträgt. Daraus ergibt sich der Strombedarf zur Kälteerzeugung. Dies ist der zweite große Strombedarf neben dem Gesamtstrombedarf für Beleuchtung, Lüftung und EDV. Für jeden Bedarf wird eine Wandfläche zur Integration von Photovoltaikzellen benötigt. Das heißt, je größer der Bedarf ist, desto größer ist die benötigte Wandfläche und umgekehrt.

In manchen Fällen kann übrige Wandfläche zur Verfügung stehen, in den meisten Fällen entsteht aber ein Fassadendefizit, d. h., es wird weitere Fläche zur Abdeckung des Bedarfs benötigt. Diese kann entweder durch das Dach oder durch vertikale bzw. horizontale Extraflächen zur Verfügung gestellt werden. Die benötigte Fläche kann durch die vielen Räume, Ausrichtungen und Geschosse sehr groß werden. Eine andere Möglichkeit ist die Abdeckung des Defizits oder zumindest eines Teils davon durch die Nutzung von Windenergie.

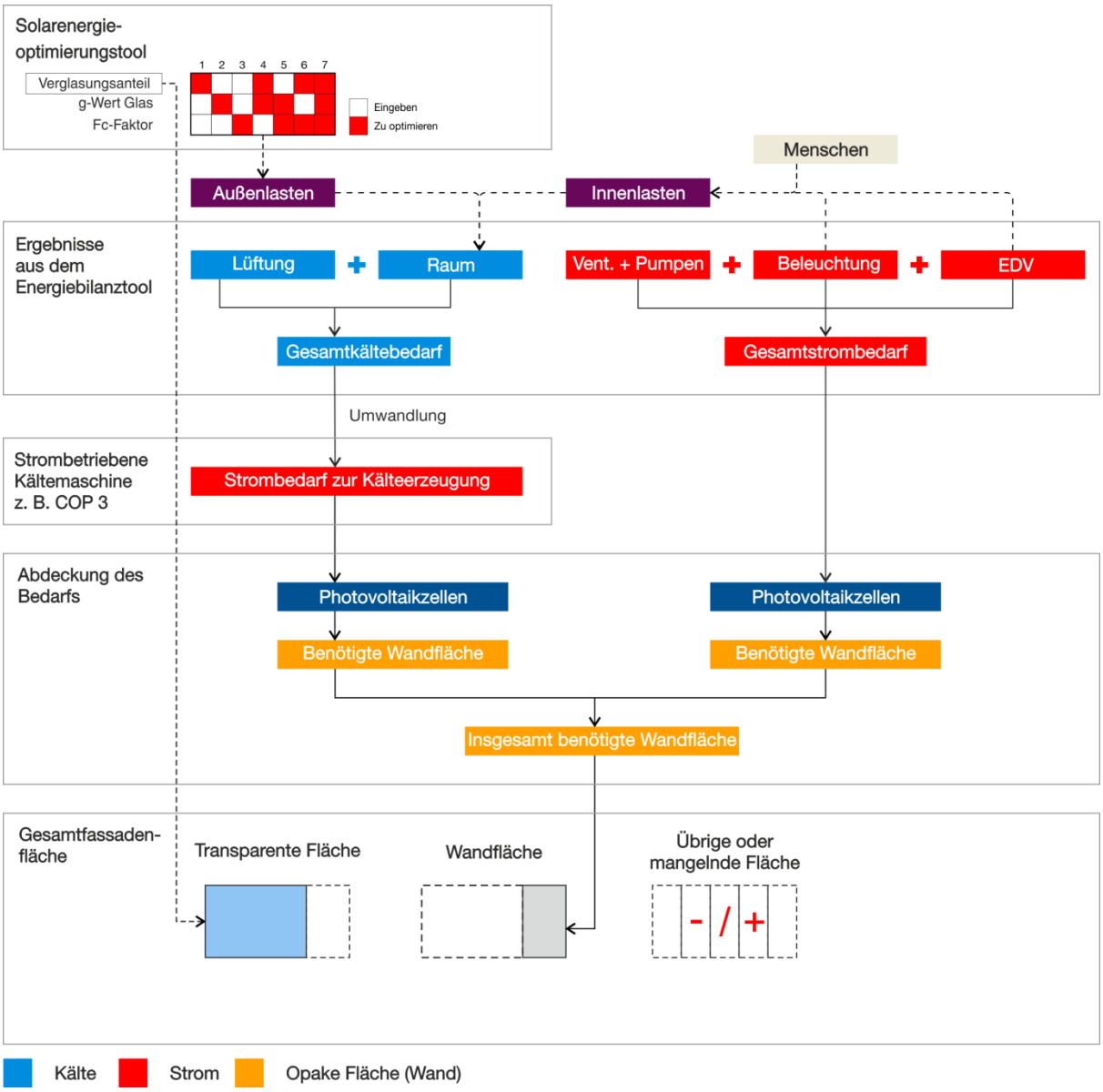


Abbildung 3.65 Übersicht über den Rechenprozess im Solarenergieoptimierungstool (eigene Darstellung)

Nach jedem Optimierungsverfahren, das in einem Optierungsmodell durchgeführt wurde, werden vier lokale Optima (Plural des Begriffs Optimum) erzeugt. Die Abbildung 3.66 stellt die optimalen Bedingungen bei verändertem Energiedurchlassgrad der Verglasung (g-Wert) für folgende Ziele dar:

a. Maximale Energiebilanz
b. Null-Energiebilanz
c. Einhaltung eines eingegebenen oder vorgesetzten Tageslichtquotienten
d. Maximale Verfügbarkeit von Tageslicht im behaglichen Bereich

Für dieses Beispiel wurde das Optimierungsmodell-2 verwendet. Die gezeigte Grafik bezieht sich auf eine Südfassade am Standort Jeddah, deren Verglasungsanteil 40 % beträgt und die

über einen Sonnenschutz verfügt, dessen Fc-Faktor 20 % beträgt. Für den Indikator (c) wurde eine Grenze für den Tageslichtquotienten von 0,95 % angegeben.

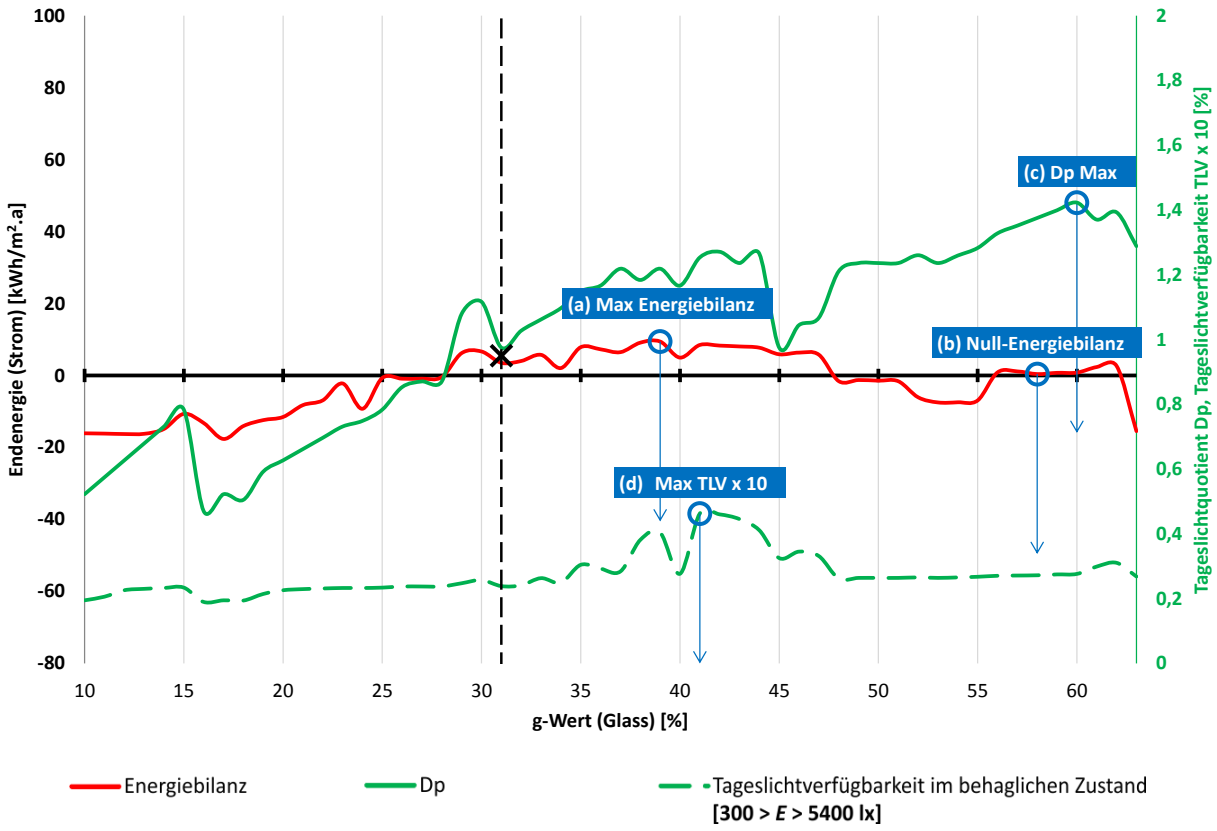


Abbildung 3.66 Darstellung der Ergebnisse des Optimierungsmodells-2

Jeder in Abbildung 3.66 gezeigte Punkt repräsentiert eine optimierte Variante. Die dabei entstehenden Kriterien und Werte werden begutachtet. Zur Beurteilung der visuellen Behaglichkeit des Nutzers im Raum dienen der Tageslichtquotient und die Verfügbarkeit von Tageslicht im behaglichen Bereich. Für die Gestaltung werden folgende Annahmen getroffen:

- Je größer der Verglasungsanteil ist, desto besser ist dies für die Gestaltung.
- Je transparenter die Verglasung (hoher g-Wert und t-Wert) ist, desto besser ist dies für die Gestaltung.
- Je geringer der Verminderungsfaktor des Sonnenschutzes (Fc-Faktor) ist, desto besser ist dies für die Gestaltung.

Aspekte	Gestaltung	Behaglichkeit	Energie
Indikatoren	Verglasungsanteil g-Wert (Glas) Fc-Faktor	Tageslichtquotient Verfügbarkeit von Tageslicht im behaglichen Bereich	Energiebilanz
Gewichtungsprinzip	+ (aufsteigend)	+ (aufsteigend)	+ (aufsteigend)

Abbildung 3.67 Überblick über das Gewichtungsprinzip

Verglasungsanteil	g-Wert	Fc-Faktor	Energiebilanz	Tageslichquotient	Tageslichtverfügbarkeit	**Gewichtung**
80%	60%	100%	25	1,30%	50%	**10**
75%	55%	90%	20	1,20%	45%	**9**
70%	50%	80%	15	1,10%	40%	**8**
65%	45%	70%	10	1,00%	35%	**7**
60%	40%	60%	5	0,90%	30%	**6**
55%	35%	50%	0	0,80%	25%	**5**
50%	30%	40%	-5	0,70%	20%	**4**
45%	25%	30%	-10	0,60%	15%	**3**
40%	20%	20%	-15	0,50%	10%	**2**
35%	15%	10%	-20	0,40%	5%	**1**
30%	10%	0%	-25	0,30%	0%	**0**

Tabelle 3.14 Gewichtungsmaßstab

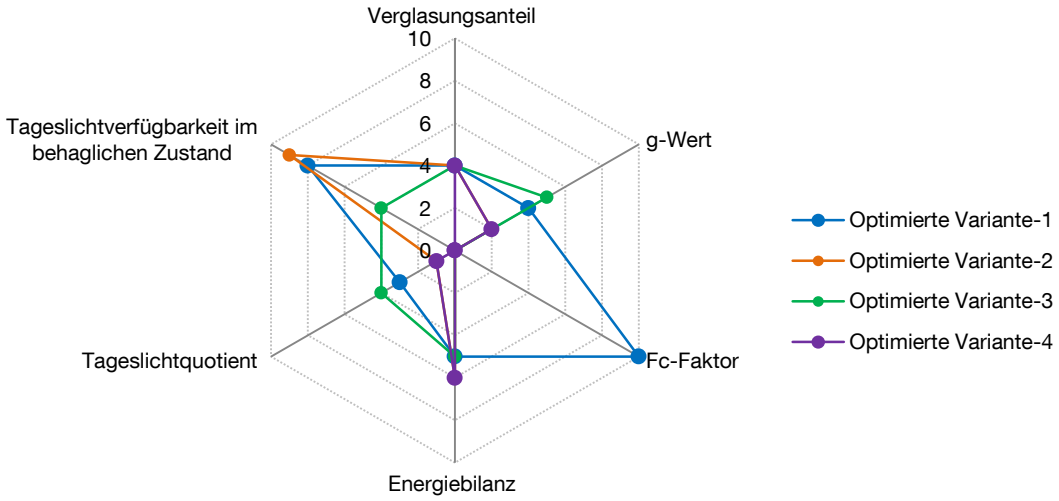


Abbildung 3.68 Darstellung der Bewertung der optimierten Varianten

Die Tabelle 3.14 gibt Auskunft über den Gewichtungsmaßstab, der im Bewertungsprozess verwendet wird. Die Bewertung der vier Varianten wird in

Abbildung 3.68 dargestellt. Ausgehend von 100 % zeigt die Gewichtung, wie hoch die Abweichung vom absolut optimalen Zustand ist. Wenn ein Indikator beispielsweise 9 Punkte erzielt, dann erzielt er 1 bzw. 10 % Abweichung. Der nächste Schritt ist, herauszufinden, welche Variante die minimale Abweichung vom absolut optimalen Zustand aufweist. Es wird angenommen, dass sich der absolut optimale Zustand über 0 % mittlere Abweichung von dem jeweiligen Aspekt definieren lässt.

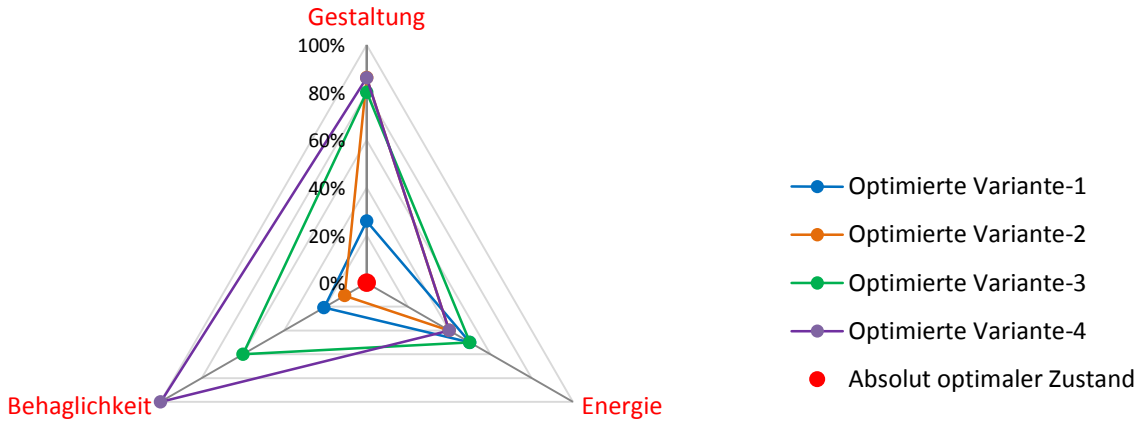


Abbildung 3.69 Abweichung der jeweiligen Variante vom absolut optimalen Zustand

Aus der in Abbildung 3.69 dargestellten Grafik kann man ablesen, dass die optimierte Variante-2 im dargestellten Fall die geringste Abweichung aufweist, nämlich 34 %. Einen Überblick über den Bewertungsprozess der Ergebnisse eines Modells liefert Abbildung 3.70.

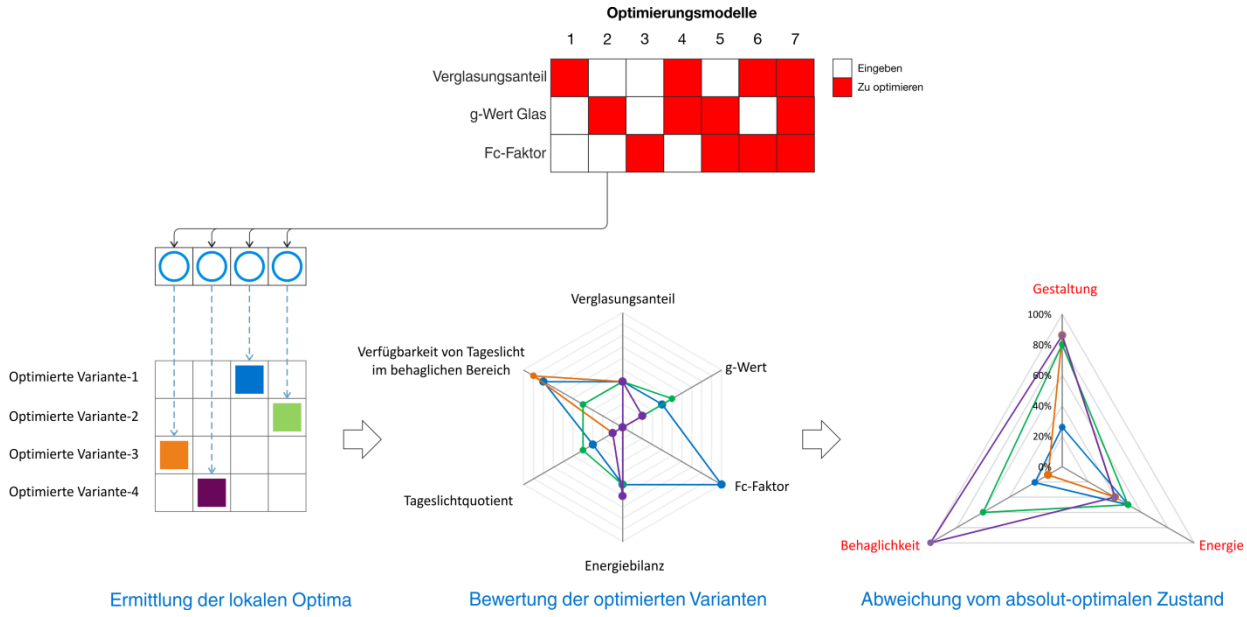


Abbildung 3.70 Bewertungsprozess der Ergebnisse eines Optimierungsmodells (eigene Darstellung)

Angenommen, der Planer hat alle Optimierungsmodelle durchgeführt, um mehrere Varianten zu erzeugen und das globale Optimum herauszufinden – die Ergebnisse dieses Schritts werden in

Abbildung 3.71 dargestellt. Das Programm gibt einen Hinweis auf die Variante, die unter allen Varianten die minimale Abweichung aufweist.

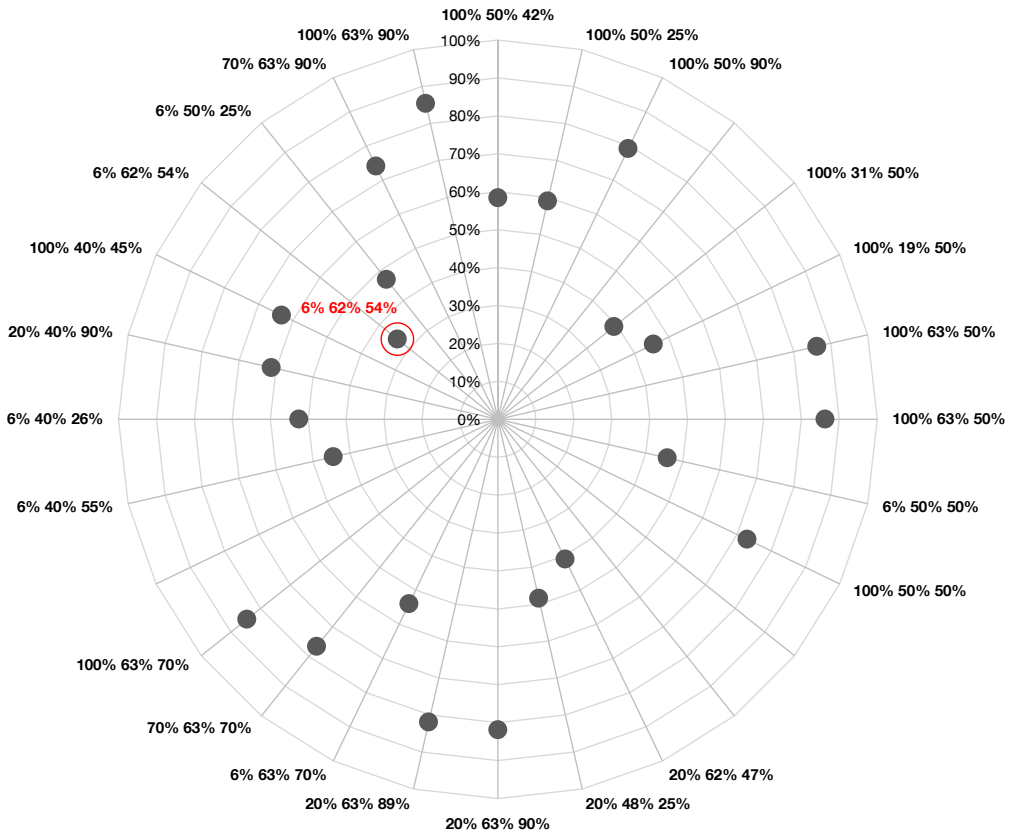


Abbildung 3.71 Abweichung der verschiedenen optimierten Varianten vom absolut optimalen Zustand (eigene Darstellung); Legende: Fc-Faktor [%]; g-Wert [%]; Verglasungsanteil [%]

Trotzdem muss der Nutzer nicht immer die Variante mit der minimalen Abweichung wählen, da er andere Wünsche haben kann, die von der angebotenen Variante nicht erfüllt werden können. Vielleicht will er dem Nutzer einen schönen Blick nach Süden ermöglichen, wo das Meer gesehen werden kann. Dann sollte er die Variante mit maximalem Verglasungsanteil oder hoher Transparenz auswählen.

In einer überschaubaren Weise werden die besten Kriterien mit ihren Auswirkungen im Rahmen eines Kriterienkatalogs dargestellt. Auf der linken Seite sind die Entscheidungskriterien aufgeführt. Die horizontalen Balken sind zahlenlos dargestellt, um die Relation zwischen den Varianten eindeutiger zu machen, was zu einer schnellen Entscheidung führen kann. Der Nutzer kann für jede Fassade die seinen Wünschen entsprechenden Kriterien zusammenfügen.

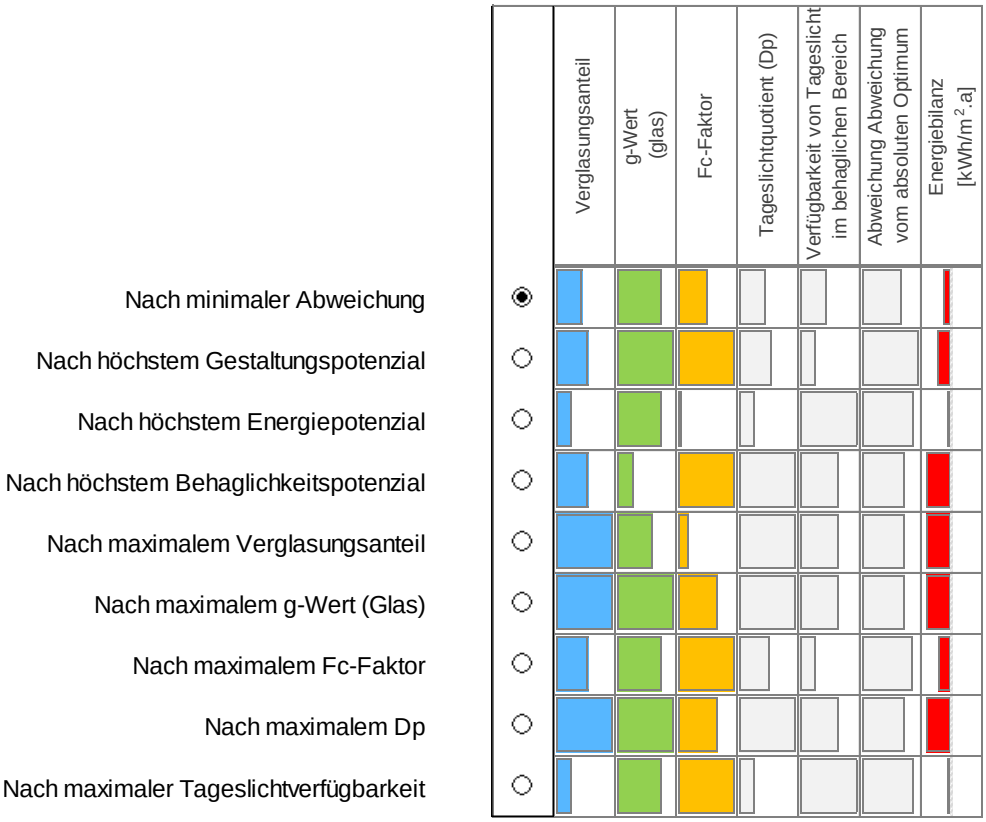


Abbildung 3.72 Beispiel des Kriterienkatalogs der optimierten Südfassade

Führt der Nutzer den Prozess für die vier Fassaden eines quadratischen Hochhauses durch, wird folgende Darstellung erzeugt. Die Grafik in Abbildung 3.73 zeigt auf der linken Seite die Fassadenkriterien und deren Auswirkungen auf die Abweichung vom absolut optimalen Zustand, den Tageslichtquotienten und die Tageslichtverfügbarkeit. Die resultierende Energiebilanz kann auf der rechten Seite abgelesen werden. Der Abstand zwischen den Strichen am Rand des Kreises stellt 10 % dar. Nur für den Tageslichtquotienten entspricht der Abstand 0,02 %. Eine grafische Erklärung folgt in Abbildung 3.74.

Um nochmals auf die Probleme bei der Modellbildung zurückzukommen: Es ist wichtig anzumerken, dass ein Optimierungsverfahren wirklich nur die Ziele optimiert, die explizit formuliert werden. Das klingt trivial (und ist es auch), trotzdem kommt es oft vor, dass ein Anwender „seine“ intuitiv ermittelte Lösung besser findet als die errechnete Optimallösung. Ein Grund für diese Diskrepanz besteht gewöhnlich darin, dass er zusätzliche, nur schwer formulierbare Nebenbedingungen und Ziele in seinem mathematischen Modell nicht berücksichtigt hat [147]. Aufgrund der Vielfalt an subjektiven Parametern kann dies in der Architekturoptimierung vorkommen.

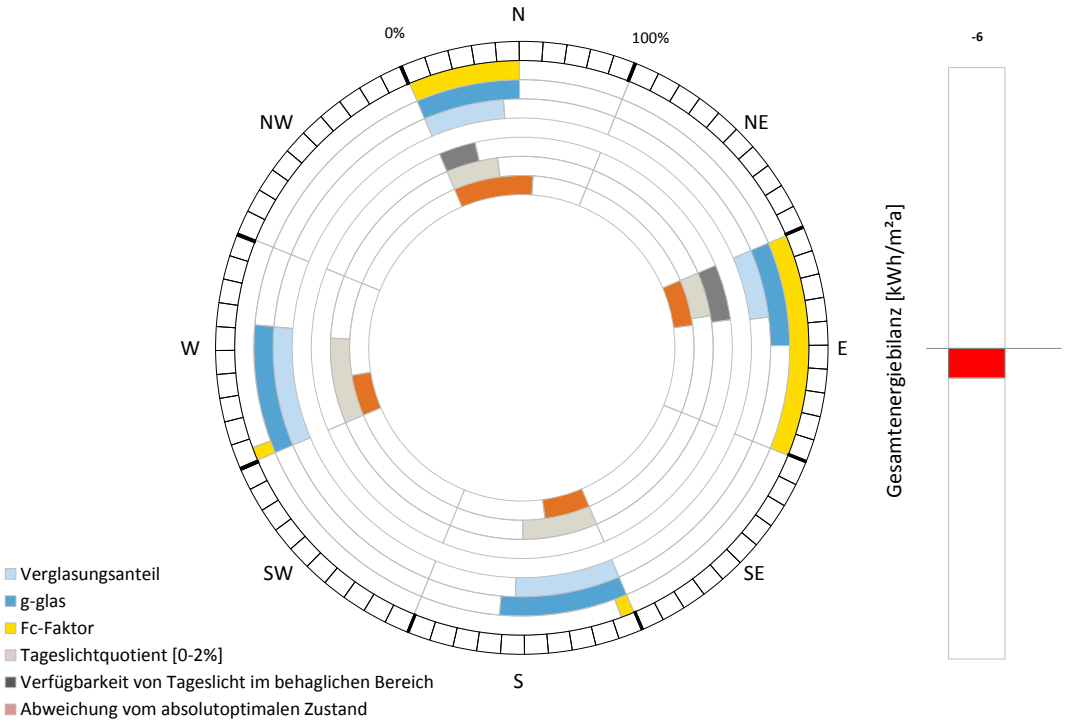


Abbildung 3.73 Darstellung der Fassadenkriterien und deren wesentlichen Auswirkungen

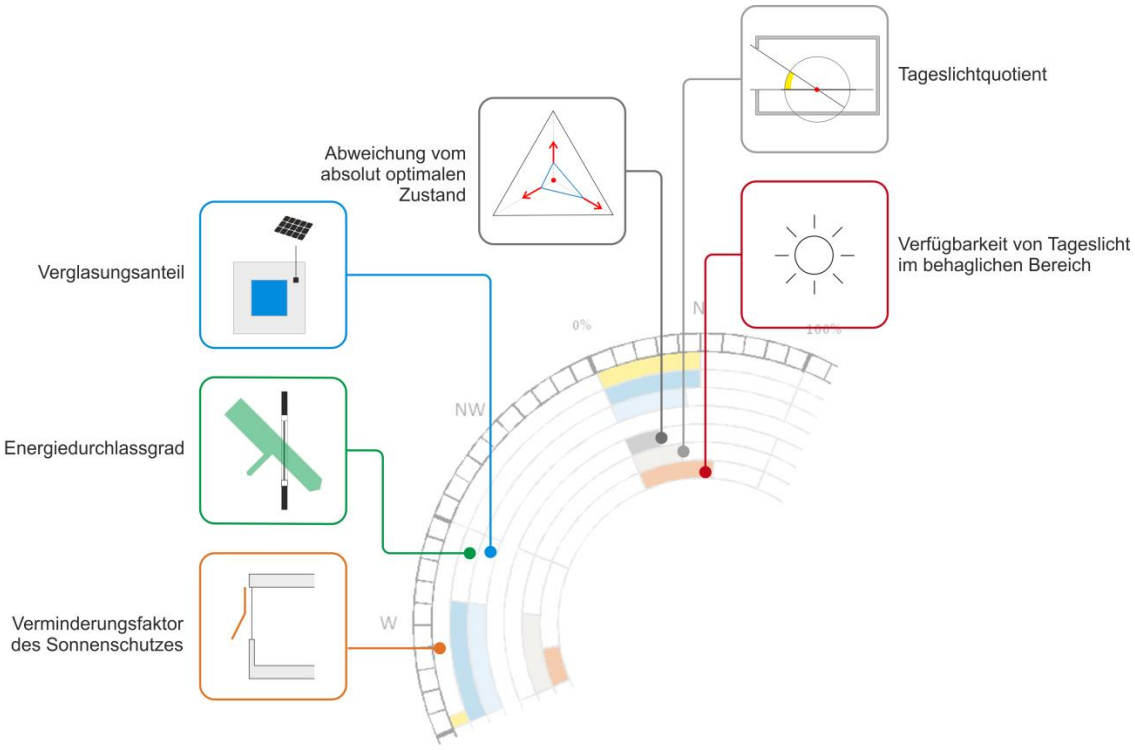


Abbildung 3.74 Erklärung der dargestellten Werte

3.3 Windenergieoptimierungstool

3.3.1 Grundlagen und Rahmenbedingungen

Wind hat gute und schlechte Seiten. Viele seiner Eigenschaften werden dabei subjektiv bewertet. Für den Tragwerksplaner von Hochhäusern ist die Windwirkung eine negative Größe, die die Baukosten in die Höhe treibt. Für Stadtplaner bietet Wind positive Aspekte aufgrund der Ableitung von Schadstoffen und negative Aspekte durch die Komfortbeeinträchtigung von Fußgängern. Der Windeinfluss auf die gesicherte Rauchableitung bei Hochhäusern im Brandfall wird von den Brandschutzsachverständigen erst seit jüngster Vergangenheit akzeptiert und verstanden. Für Windingenieure, die sich mit der Windwirkung an und in Hochhäusern beschäftigen, ist Wind ein faszinierendes Phänomen. Die Windtechnologie, das Arbeitsgebiet der Windingenieure, ist dabei ein vergleichsweise junges Arbeitsgebiet. Es vereinigt Wissensbereiche der Meteorologie, der Aerodynamik, der Strukturdynamik und – bei Betrachtung der windbedingten Ausbreitung von Schadstoffen – der Chemie [114].

Bei der Windenergie handelt es sich um die kinetische Energie der bewegten Luftmassen der Atmosphäre. Da sie durch die Einwirkung der Sonne kurzfristig neu entsteht wird, zählt sie zu den erneuerbaren Energien. Die Windenergie-Nutzung mittels Windmühlen – heute zur Stromerzeugung mit Windkraftanlagen – ist eine seit dem Altertum bekannte Möglichkeit, Energie aus der Umwelt für technische Zwecke verfügbar zu machen [210]. Die Windströme um Gebäude und v. a. um das Hochhaus eröffnen zahlreiche Potenziale zur Energieerzeugung. Die Nutzung dieser Potenziale erfordert die Optimierung der Bauform und die Positionierung von Rotoren an günstigen Positionen. Da die Windgeschwindigkeit der entscheidendste Faktor beim Ertrag ist und gleichzeitig mit der Höhe zunimmt, können Windrotoren entweder an der Fassade des Hochhauses oder auf dem Dach installiert werden. Eine vernünftige Integration der Rotoren in den Baukörper kann als weitere Maßnahme zur Erhöhung des Ertrags betrachtet werden. Durch die Erhöhung der Windgeschwindigkeit (U) am Rotor steigt das Potenzial zur Energieerzeugung, da deren Faktor in der folgenden Gleichung zur Ermittlung des Ertrags verdreifacht wird:

$$\mathrm{P} = 0{,}5 \,.\, \rho \,.\, (\varphi^2 . \pi) . \upsilon^3 . \eta$$

Formel 1

P: Ertrag

ρ: Luftdichte (ca. 1,225 kg/m^3)

φ: Radius

υ: Windgeschwindigkeit

η: Wirkungsgrad

Die Analyse beschäftigt sich mit der folgenden Frage:

Für ein bestimmtes Energiedefizit, das im Zusammenhang mit der Form und Höhe eines Hochhauses entsteht, ist ein integraler Lösungsansatz zu finden und zu optimieren, der neben dem solaren Ansatz Antworten auf die Frage gibt, welche günstigen Positionen für Windrotoren am/auf/im Gebäude möglich sind und wie die Windgeschwindigkeit am Rotor zu erhöhen ist. Um die Forschungsfrage zu beantworten, muss das Windverhalten an den ausgewählten Standorten untersucht werden und eine Strömungsanalyse durchgeführt werden.

Im Rahmen dieser Arbeit wurden fünf Grundformen von Hochhäusern bei verschiedenen Windrichtungen simuliert. Die Daten und variierbaren Größen wurden in einen Algorithmus integriert, der die optimalen Bedingungen sucht. Neben der Rotorenposition ist auch die Optimierung der Rotorenflächen notwendig, um den Ertrag zu maximieren

Gebäudenahe Windströmung

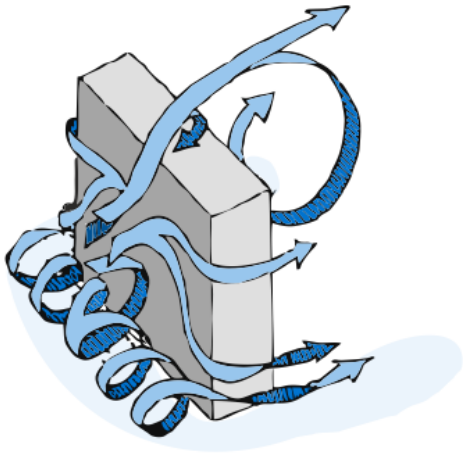


Abbildung 3.75 Die hochturbulente Luftströmung um ein Gebäude weist äußerst komplexe und nur schwer berechenbare Strukturen auf [114]

Abbildung 3.75 zeigt beispielhaft Strömungsvorgänge im Nahbereich eines scheibenförmigen Hochhauses, das parallel bzw. senkrecht zur Hauptachse angeströmt wird. Die eingezeichneten, mit Pfeilen versehenen Linien sind Stromlinien des zeitlich gemittelten Strömungsfeldes. Stromlinien zeigen an jedem Ort und zu jeder Zeit in Richtung der Strömung [102]. Der Überdruck auf der dem Wind zugewandten Luvseite ergibt sich durch den Aufstaueffekt des Windes. Das dortige Druckfeld wird nur wenig von den relativen Gebäudeabmessungen beeinflusst. Der Nachlauf und der hierdurch bedingte Unterdruck auf der im Sog liegenden Leeseite werden dagegen wesentlich durch die Verdrängungswirkung des Gebäudes beeinflusst. Ein quer angeströmtes scheibenartiges Hochhaus ergibt einen ausgeprägten und ausgedehnten Nachlauf mit großem Unterdruck, stromab von parallel angeströmten Scheibenhochhäusern schließt sich der Nachlauf dagegen sehr rasch (geringer Unterdruck). Das bodennahe Windfeld beeinflusst maßgeblich sowohl den Aufenthaltskomfort als auch die Ausbreitung von Schadstoffen, z. B. Verkehrsemissionen [114].

Bodennaher Wind ist böig, seine Geschwindigkeit und Richtungen sind sowohl räumlich als auch zeitlich stark schwankend. Es handelt sich in der Regel um eine hochturbulente Strömung,

die durch die Angabe des zeitlichen Verlaufs der Geschwindigkeit (nach Betrag und Richtung) und des statistischen Druckes für jeden Raumpunkt beschrieben werden kann. Bei natürlichen Strömungen scheinen diese Größen zufällig und sind daher schwer rechnerisch erfassbar. Für manche Problemstellungen ist es deshalb zulässig und notwendig, die Beschreibung des Strömungsfeldes aufzuteilen. Es setzt sich dann aus einem zeitlich gemittelten stationären Feld und einem zeitlich fluktuierenden Anteil zusammen. Qualitativ lässt sich die Topologie des gebäudenahen Strömungsfeldes in Modellversuchen im Windkanal durch Sichtbarmachung mit Rauch ohne Weiteres für verschiedene Windrichtungen ermitteln [102].

Simulationstechnik

Die notwendigen Tests im Windkanal kosten viel Zeit und Geld. Die computergestützte Strömungssimulation anhand von *Computational Fluid Dynamics (CFD) Analysen* bietet Alternativen zur Windkanaluntersuchung an. Die Simulationen sind numerische Berechnungen der Strömung in einem bzw. um ein Bauelement und können sowohl fluidische als auch thermische Effekte darstellen, die durch die Geometrie der Bauteile beeinflusst werden. Die CFD-Software erzeugt dreidimensionale Modelle, die Geschwindigkeit, Temperatur, Druck und andere Variablen an jeder Position berücksichtigen. Daher ist es möglich, die aerodynamischen Verhältnisse an einzelnen Baugruppen auf dem Bildschirm sichtbar zu machen – und zwar ohne große Testaufbauten [211].

In der vorliegenden Arbeit wurden Programme zur Durchführung von CFD-Analysen verwendet. Da dieses Programm hauptsächlich für nichtarchitektonische Zwecke entwickelt worden ist, mussten einige Parameter besonders sorgfältig eingestellt werden. Der wichtigste davon ist das Windprofil. Dafür wurde das Potenzgesetz angewendet, das in Formel 2 gezeigt wird. Für den Rauigkeitsfaktor α wurde 0,28 angegeben, was den Bedingungen der Innenstadt entspricht. Allerdings ist es im Rechenprogramm des Windenergieoptimierungstools möglich, eine andere Geländerauigkeit einzugeben. Durch den Rechenprozess werden die Windgeschwindigkeiten an den Messpunkten an die festgelegte Geländerauigkeit angepasst.

Abschätzung der Umgebungseinflüsse

Wind ist ein Zufallsereignis (= stochastische Größe). Eine quantitative Aussage zur Auswirkung von Windereignissen kann daher nur unter Betrachtung der statistischen Eigenschaften der Windströmung gemacht werden. Zur Bestimmung der Windgeschwindigkeit an/über und vielleicht im Hochhaus müssen die örtlichen bodennahen Windgeschwindigkeiten mit der Langzeitwindstatistik einer nah gelegenen Wetterstation korreliert werden. Wetterstationen befinden sich aber im Allgemeinen in wenig bebautem Gelände mit nur niedrigem Bewuchs [114]. Die in dieser Arbeit verwendeten Winddaten der untersuchten Standorte wurden aus der Wetterdatenbank *Meteonorm* ermittelt, die auf Messungen an Flughäfen basiert [39].

Die spezifischen städtebaulichen Eigenschaften der Umgebung beeinflussen das Windverhalten maßgeblich. Die Haupteinflussfaktoren sind die Dichte der Bebauung, Volumen und Größe der einzelnen Gebäude, Ausrichtung der Straßen sowie Präsenz und Größe von offenen Räumen und grünen Gürteln.

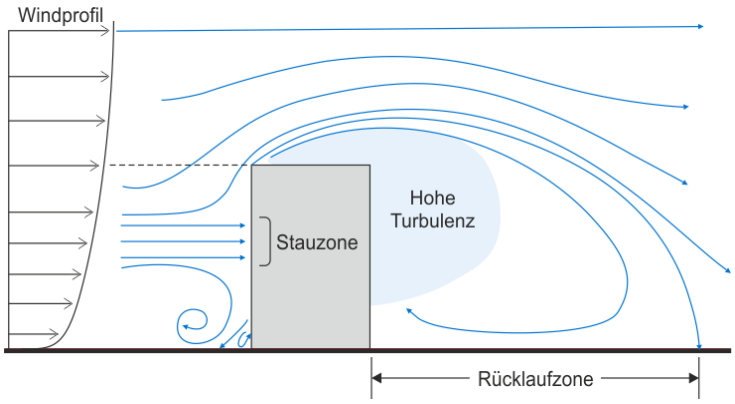


Abbildung 3.76 Darstellung des typischen Windfelds (eigene Darstellung) [212]

Das Windfeld wird von zwei Parametern charakterisiert, die auch vom Profil des Terrains abhängig sind [213]:

- das vertikale Profil der gemittelten Windgeschwindigkeiten
- das Spektrum der Turbulenzen

Bei der Übertragung der an der Wetterstation gemessenen Windgeschwindigkeiten auf den betrachteten innerstädtischen Bereich sind die unterschiedlichen Profile der Windgeschwindigkeitsschwankungen zu beachten. Am Boden ist der Wind wegen Hindernissen und der Bodenrauigkeit stark gebremst. Hoch über dem Boden, in den ungestörten Luftschichten des geostrophischen Windes (in einer Höhe von ca. 5 km), ist der Wind nicht mehr von der Oberflächenbeschaffenheit der Erde beeinflusst. Zwischen diesen beiden Schichten ändert sich die Windgeschwindigkeit mit der Höhe über Grund. Dieses Phänomen wird als vertikale Windscherung bezeichnet [214]. Eine numerische Methode zur Erzeugung des Windprofils wird im Folgenden gezeigt. Um das vertikale Windprofil zu modellieren, wird die vereinfachte Formel (nach Davenport 1960) verwendet:

$$U(z) = U(Z_G)\left(\frac{Z}{Z_G}\right)^{\alpha}$$

Formel 2

$U(Z)$: Windgeschwindigkeit [m/s].

$U(Z_G)$: Gradientengeschwindigkeit auf der Höhe der Grenzschicht Z_G =100%, nach der die Windgeschwindigkeit konstant und unbehindert ist [m/s]

Z: Höhe, für die die Windgeschwindigkeit berechnet wird [m]

Z_G: Referenzhöhe (z. B. Wetterstation) [m]

α: empirischer Exponent, der die Geländerauigkeit beschreibt [-]

Folgende Tabelle zeigt typische Werte von Z_{ref} und α für die durchschnittliche Windgeschwindigkeit von vier Geländearten. Diese Werte stammen aus den *ASHRAE-Normen* [212].

Rauigkeitsklasse	Typen von Geländeoberflächen		Exponent α	Grenzschichthöhe met_G oder Z_G
1	Großstadt mit hohen Gebäuden und Wolkenkratzern	Großes Stadtzentrum, wo mind. 50 % der Bauten höher als 21 m sind (über eine Rauigkeitslänge von 2000 m).	0,33	460
2	Stadt	Dörfer, Kleinstädte, landwirtschaftliches Gelände mit vielen oder hohen Hecken, Wäldern und sehr raues und unebenes Terrain (über eine Rauigkeitslänge von 2000 m).	0,22	370
3	Stadtrand	Landwirtschaftliches Gelände mit einigen Häusern und weniger als 10 Meter hohen Hecken.	0,14	270
4	Freies Feld	Wasserflächen: Meer und Seen.	0,1	210

Tabelle 3.15 Rauigkeitsklassen nach ASHRAE [212]

Formel 3 ergibt sich aus Formel 2 und hilft zur Berechnung der Windgeschwindigkeit für jede Höhe:

$$U(z) = U(Z_{10})\left(\frac{Z}{Z_{10}}\right)^{\alpha}$$

Formel 3

$U(Z_{10})$: Gradientengeschwindigkeit auf 10 [m] Höhe [m/s]

Z: Höhe, für die die Windgeschwindigkeit berechnet wird [m]

Z_{10}: Referenzhöhe 10 [m] (z. B. Wetterstation)

Die Geländerauigkeit an Wetterstationen wie Flughäfen ist geringer als in den Städten, in denen Hochhäuser gebaut werden. Für eine genauere Abschätzung muss die durchschnittliche Windgeschwindigkeit auf der Referenzhöhe im Untersuchungsgebiet umgerechnet werden. Dies kann nach der Formel 4 geschehen:

$$\frac{U(met_{10})}{U(Z_{10})} = \left[\frac{\left[\frac{met_{10}}{met_G}\right]^{a_{met}}}{\left[\frac{Z_{10}}{Z_G}\right]^{a}}\right]$$

Formel 4

$$U(Z_{10}) = \frac{U(met_{10})\left[\frac{Z_{10}}{Z_G}\right]^{a}}{\left[\frac{met_{10}}{met_G}\right]^{a_{met}}}$$

Formel 5

$U(met_{10})$: Durchschnittliche Windgeschwindigkeit auf 10 [m] Höhe an der Wetterstation [m/s].

met_{10}: Typische Messhöhe in Wetterstationen 10 [m]

a_{met}: Geländerauigkeit an der Wetterstation [-]

a : Geländerauigkeit im Untersuchungsgebiet [-]

met_G: Grenzschichthöhe an der Wetterstation [m]

Z_G: Grenzschichthöhe im Untersuchungsgebiet [m]

Die gemäß Formel 5 korrigierte Windgeschwindigkeit auf der Referenzhöhe wird in Formel 3 angewendet. Auf diese Weise kann die Windgeschwindigkeit für jede Höhe im Windprofil ermittelt werden. In der Abbildung 3.77 kommt zum Ausdruck, dass sich die vertikalen Windprofile über der Innenstadt, dem Stadtrand und dem Freiland stark unterscheiden. Neben der Abnahme der Windgeschwindigkeit zum Stadtzentrum hin erkennt man auch die im Stadtkern höhere Störung des Windfeldes.

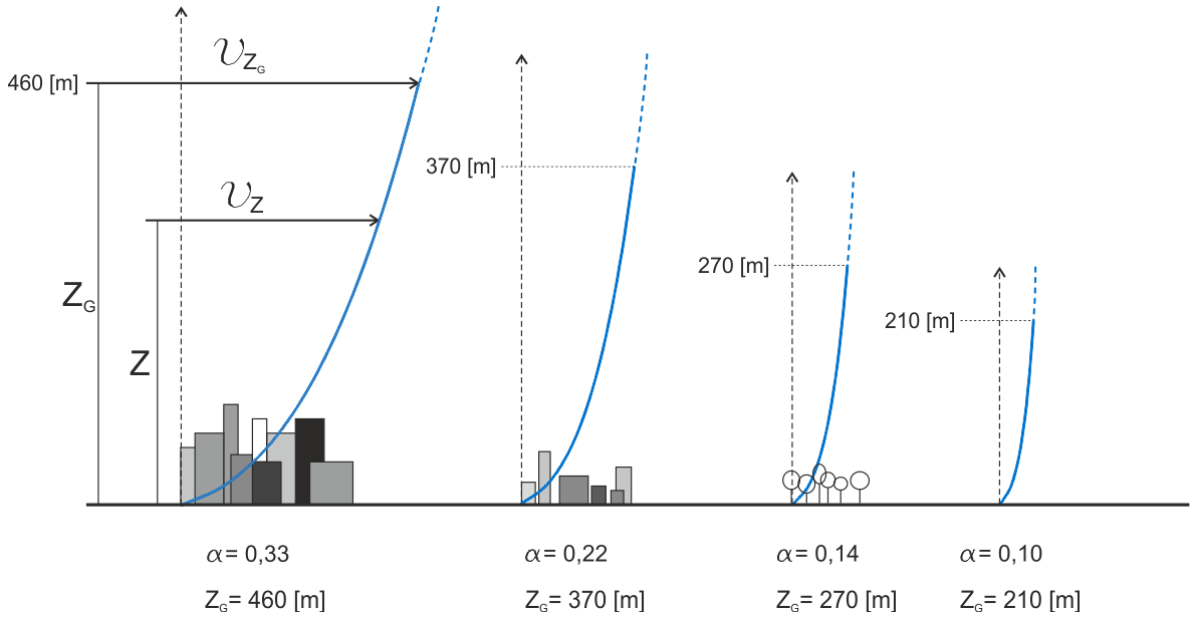


Abbildung 3.77 Vertikales Windprofil über dichter Innenstadt, Innenstadt, Stadtrand und Freiland

Die Windgeschwindigkeiten liegen in Städten unter denen des Umlands, da die Rauigkeit und Unregelmäßigkeit der Bebauung die Luftströmung in Bodennähe beeinträchtigt und verlangsamt

[170]. Die Windströmung bzw. Windgeschwindigkeit am Hochhaus wird deshalb in einer dichten Innenstadt von der Bebauung der Nachbarschaft beeinflusst. Die Installation von Windrotoren in dichten Städten bietet das Potenzial, die windbeschleunigende Wirkung des Tunneleffekts, z. B. zwischen zwei hohen Gebäuden, auszunutzen [215]. Es gibt bereits wissenschaftliche Arbeiten, die sich mit den Auswirkungen der spezifischen Bedingungen auf den Ertrag aus hochhausintegrierten Windrotoren beschäftigt haben. So wurde im Rahmen einer Untersuchung von Li und Ip in Hongkong festgestellt, dass die lokale Bebauung die Windgeschwindigkeit an Rotoren in den untersuchten Fällen weiter steigern kann [216]. Dies ist aufgrund der nicht linearen Dynamik des Windverhaltens sehr relativ.

In einem Planungsprogramm für die konzeptionelle Phase ist es schwer, diese Einflüsse zu berücksichtigen, da sie einerseits von den lokalen und spezifischen städtebaulichen Eigenschaften abhängig sind, die von Fall zu Fall unterschiedlich sind, und das Planungswerkzeug andererseits auf vorsimulierten Daten basiert, die auf der Grundlage von durchschnittlichen Fällen eingestellt worden sind. Daher muss es für den Nutzer möglich sein, den Exponent der allgemeinen Geländerauigkeit für eine erste Annäherung auszuwählen.

Simulierte Objekte und Ergebnisse

Grundsätzlich ist die CFD-Simulation wichtig, um die Windgeschwindigkeit an bestimmten Punkten am Gebäude zu ermitteln und eventuell mittels anderer Rechenvorgänge über die günstigsten Positionen für Rotoren Auskunft zu geben. Andere Faktoren wie Druck sind in diesem Zusammenhang irrelevant, sind aber wichtig zur Abschätzung der am Gebäude auftretenden Kräfte, was für die Tragwerksplanung entscheidend ist. Es gibt bereits Rechenverfahren zur Ermittlung des Winddrucks aus der Windgeschwindigkeit [159].

Bei der Simulation wurden vier Grundformen in drei Höhen (90, 180 und 270 Meter) simuliert. Nach jeder Simulation wurden die Windgeschwindigkeiten an den vorgegebenen Messpunkten festgelegt und in einer Datenbank gesammelt und verarbeitet. Besonders wichtig sind die verschiedenen Windrichtungen, die von Standort zu Standort unterschiedlich sind. Die Windrichtungshäufigkeit beeinflusst den Endertrag. Da die Integration der Windrichtungshäufigkeit in die CFD-Analyse kompliziert ist, wurden die Modelle für jede Windrichtung simuliert. Die Ergebnisse wurden dann mit einem Algorithmus manipuliert, um jedem Standort seine Windrichtungscharakteristik zu geben. Das gilt auch für die Windgeschwindigkeit im Fluidbehälter, wo das Modell steht. Es wurde das Jahresmittel der Windgeschwindigkeit eines Standortes genutzt, das ebenfalls mittels eines Algorithmus für die anderen Standorte korrigiert wurde.

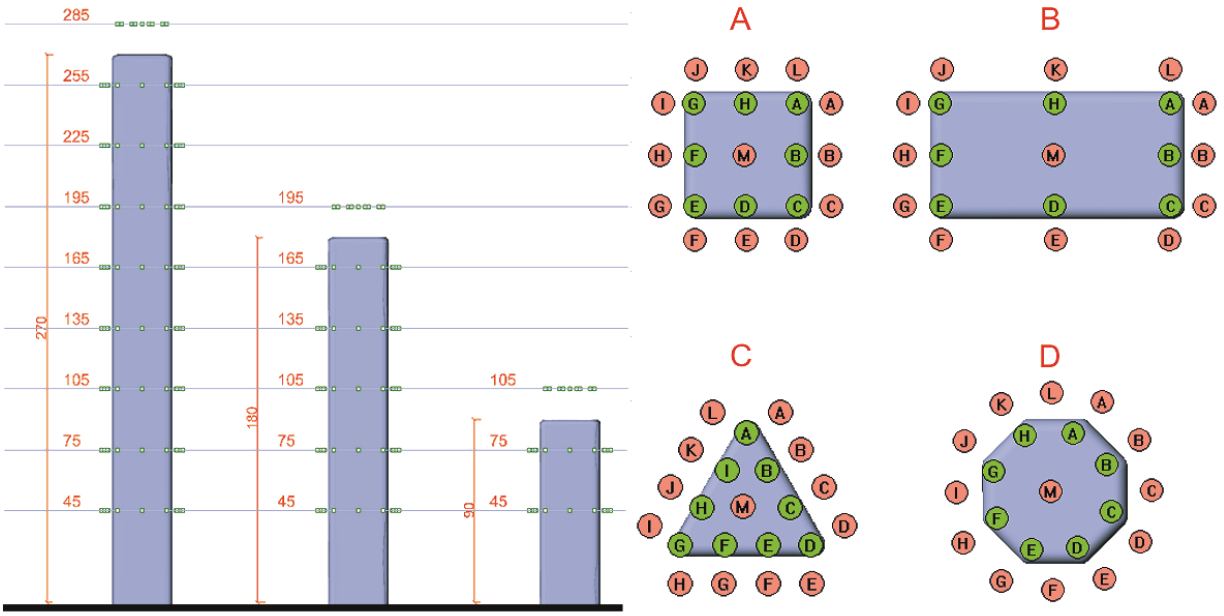


Abbildung 3.78 Positionen der Messpunkte, die evtl. für Rotoren genutzt werden können (eigene Darstellung)

Zum Ablesen der Windgeschwindigkeiten wurde für jede Form in jeder Höhe ein Raster entwickelt. Jeder Punkt hat einen Namen, der aus einem Buchstaben und der Höhe besteht. Der Name gibt somit einen Hinweis zur Position des Punktes, was für die Optimierung eventuell sehr bedeutend ist. Die Grafik in Abbildung 3.78 zeigt die Positionen der Messpunkte an jeder Bauform, die für Rotoren verwendet werden können. Jeder Buchstabe mit einer Höhe stellt einen Punkt dar. Die grünen Punkte stehen für die dachintegrierten Rotoren.

Methode zur Berechnung des Ertrags

Der natürliche Wind schwankt ständig in seiner Geschwindigkeit. Um die Energieerzeugung durch eine Windkraftanlage vorherzusagen, muss man genau wissen, wie oft der Wind wie stark weht. Üblicherweise misst man mit einem Windmessgerät (Anemometer) alle 10 Minuten die mittlere Windgeschwindigkeit. Diese Werte kann man in Windgeschwindigkeitsklassen einteilen, die je 1 m/s umfassen. Der Energiegehalt des Windes an einem Standort lässt sich nun durch die Häufigkeitsverteilung dieser Windgeschwindigkeitsklassen ausdrücken. Diese Verteilung kann durch die Methode der Weibull-Verteilung angenähert werden [214].

Die Weibull-Verteilung ist eine stetige Wahrscheinlichkeitsverteilung über der Menge der positiven reellen Zahlen, die beispielsweise zur Beschreibung von Lebensdauer und Ausfallhäufigkeiten von elektronischen Bauelementen oder (spröden) Werkstoffen (etwa in der Qualitätssicherung), aber auch für die statistische Untersuchung von Windgeschwindigkeiten verwendet wird. Benannt ist sie nach dem schwedischen Ingenieur und Mathematiker *Waloddi Weibull*. In der Praxis ist die Weibull-Verteilung neben der Exponentialverteilung, welche ein

Spezialfall der allgemeineren Weibull-Verteilung ist, die am häufigsten verwendete Lebensdauerverteilung. Sie stellt oft eine gute Näherung der Windgeschwindigkeitsverteilung dar [217]. Im Fall der hochhausintegrierten Windanlagen wird die mittlere Windgeschwindigkeit an jeder potenziellen Rotorenposition festgelegt. Danach kann die Verteilungskurve erzeugt werden und eventuell die Jahresleistung ermittelt werden.

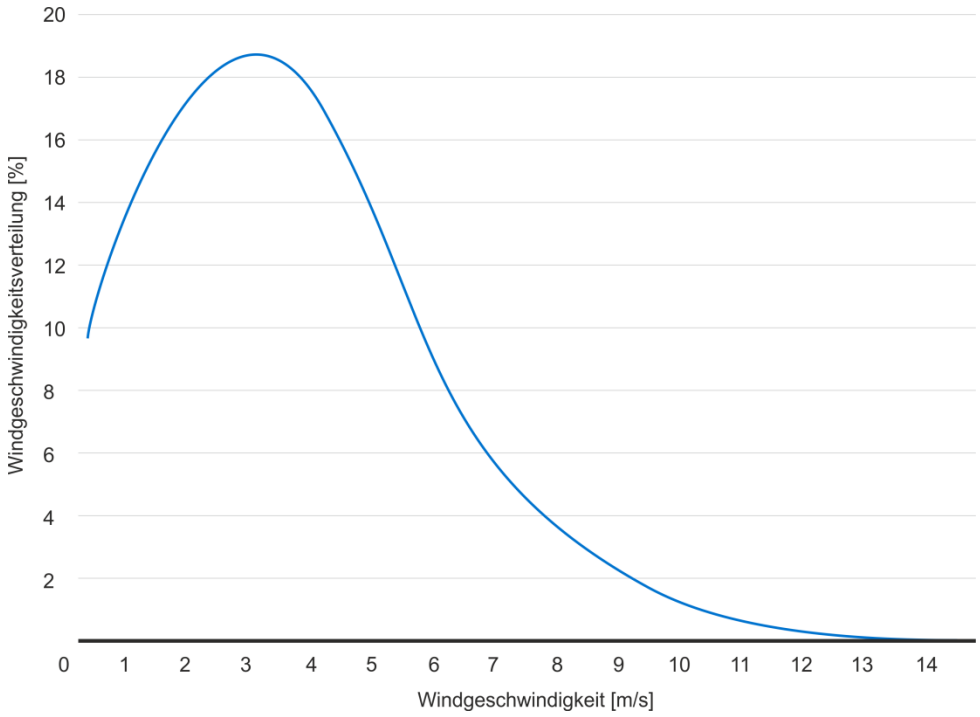


Abbildung 3.79 Beispiel der Weibull-Verteilung der Windgeschwindigkeit eines Binnenstandorts [214]

Die Kurve in Abbildung 3.79 zeigt die Windgeschwindigkeitsverteilung 10 m über Grund für einen Binnenstandort wie z. B. Neuss. Es wird deutlich, dass Windgeschwindigkeiten von 8 m/s bis 15 m/s so gut wie nie vorkommen und die Windgeschwindigkeiten von 1 m/s bis 7 m/s 90 % des gesamten Jahres ausmachen [218].

3.3.2 Potenzial von fassaden- und dachintegrierten Windrotoren

Dieser Abschnitt soll einen Überblick über die Windgeschwindigkeitsverteilung um freistehende Hochhäuser bei verschiedenen Formen und Windrichtungen geben. Die Strömungsbilder in Abbildung 3.86 zeigen den Verlauf der Windgeschwindigkeit bei der Umströmung ausgewählter Hochhausformen aus drei Windrichtungen. Die simulierten Hochhäuser in diesem Beispiel sind 90 Meter hoch, die Darstellungsebene wurde in einer Höhe von 75 Meter geschnitten.

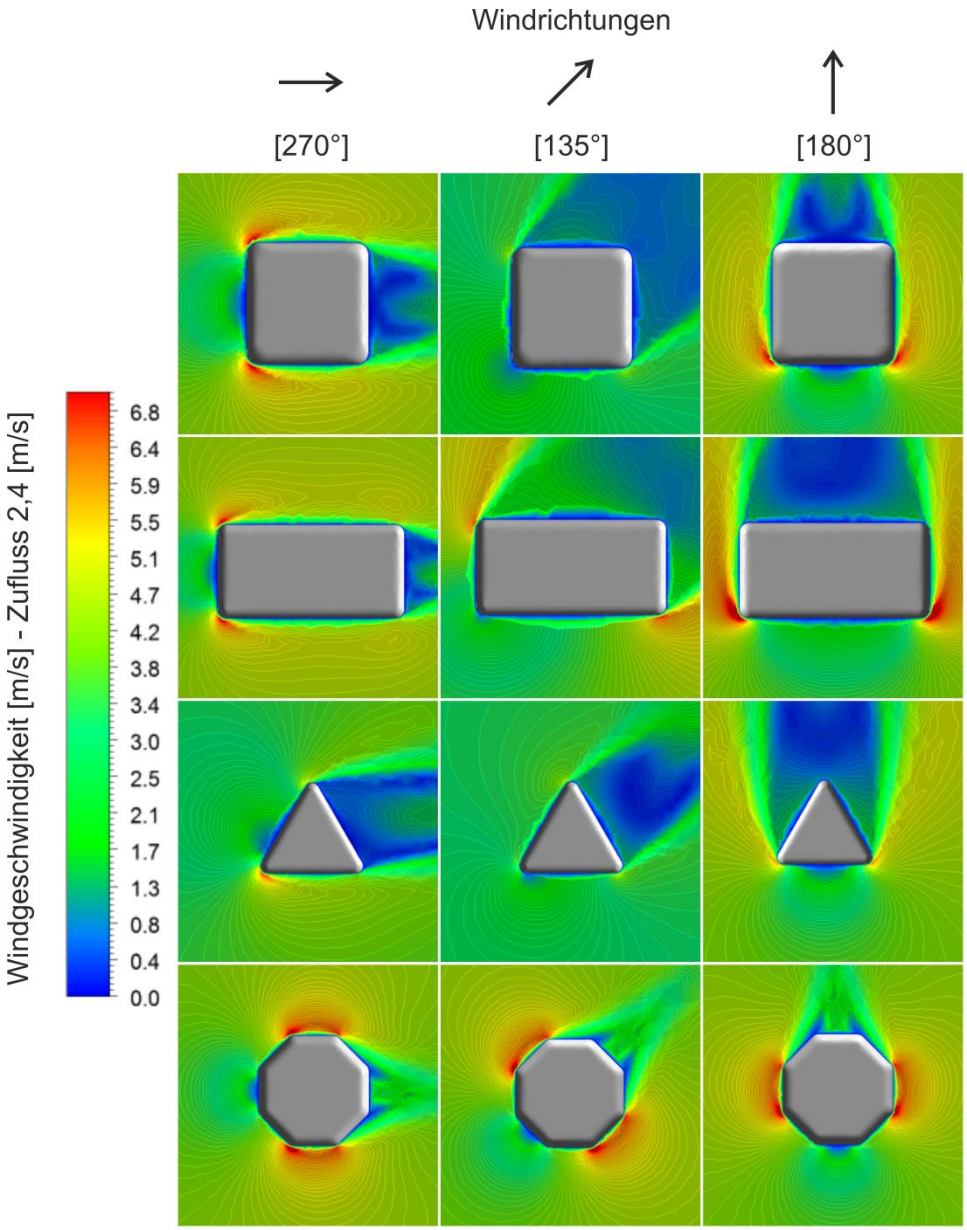


Abbildung 3.80 Hochhausumströmung aus drei Windrichtungen (eigene Simulation und Darstellung))

Es zeigt sich, dass sich die Windgeschwindigkeit an den Ecken erheblich erhöht. Man kann also die von der Fassade abgeleitete Luftströmung an den Eckbereichen nutzen und hat damit eine große angeströmte Fläche zur Verfügung. Dieses Phänomen ist abhängig von Form, Höhe und

Windrichtung. Man darf davon ausgehen, dass die Ecken hohe Potenziale für die Windrotoren bieten.

Nach Abbildung 3.80 hat jede Form ihr eigenes Verhalten, wobei manche Formen, wie das Oktagon, größere rote Gebiete (= höchste Windgeschwindigkeit) aufweisen als die anderen. Die gezeigten Ergebnisse in Kombination mit der Windrichtungshäufigkeit jedes Standorts können Auskünfte über günstige Rotorenpositionen geben.

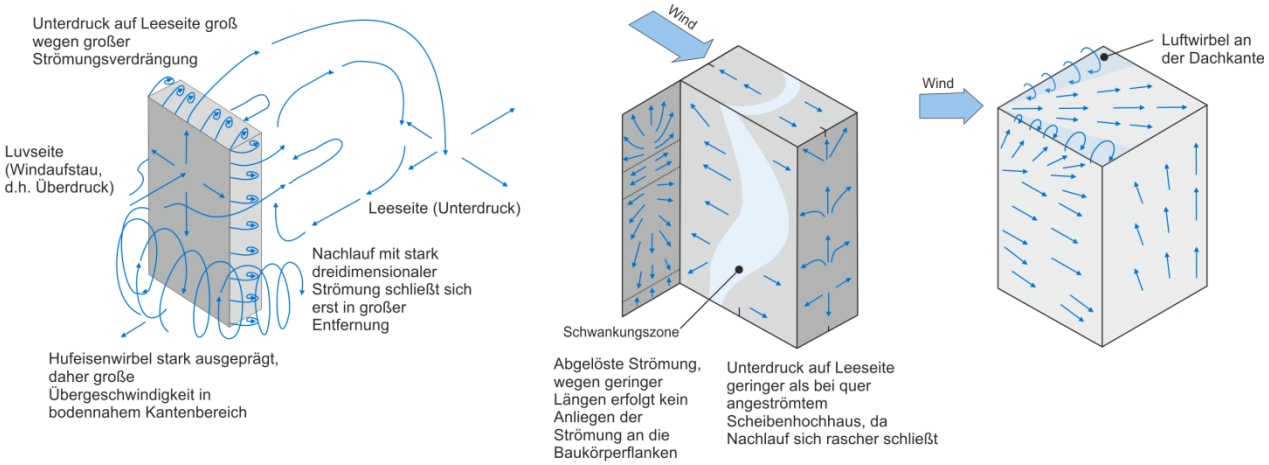


Abbildung 3.81 Darstellung der Windströmung (eigene Darstellung) [114], [212]

In Abbildung 3.81 wird das Windverhalten in drei Fällen dargestellt. Es zeigt sich, dass sich beim linken Scheibenhochhaus ein längerer Nachlauf ergibt als bei den anderen Formen. In der Mitte des Hochhauses mit den tiefen Seiten trifft der Wind die solide Wand und löst sich ab. Danach geht er entweder nach vorne oder nach hinten. Im rechten Bild verläuft die Windströmung hauptsächlich parallel zu der Wand. Ganz oben wird die Strömung gezeigt, die von den Dachkanten verursacht wird. Im linken Bild wird auch deutlich, wie gefährlich der untere Teil des Hochhauses ist.

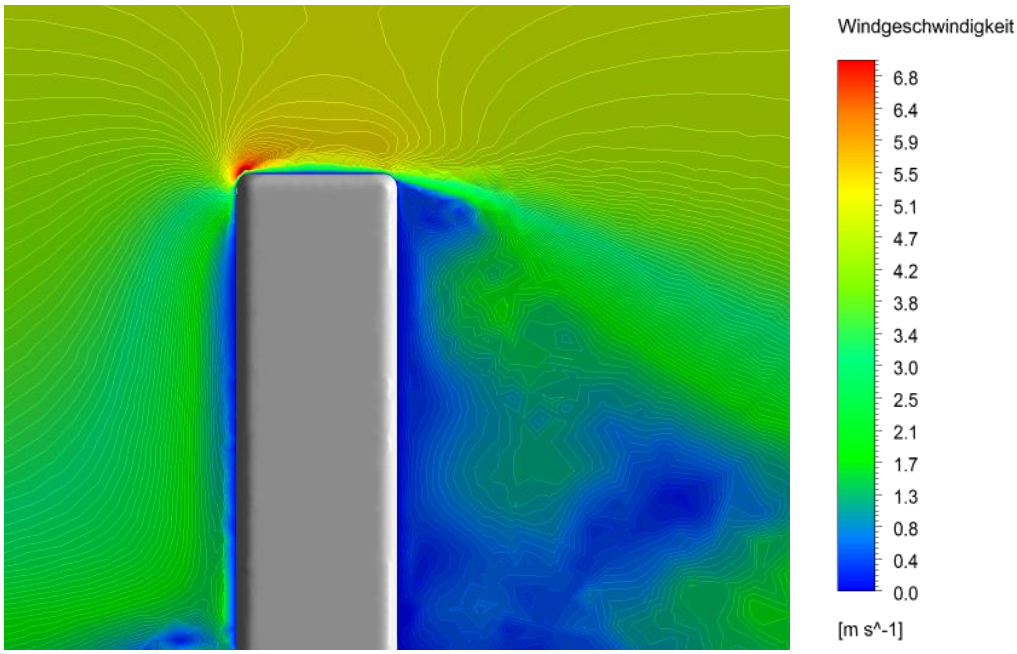


Abbildung 3.82 Windgeschwindigkeitsverteilung bei einer typischen Hochhausumströmung, vertikale Ansicht

Abbildung 3.82 zeigt ein typisches Bespiel der vertikalen Strömung um ein Hochhaus. Es lässt sich feststellen, dass die Windgeschwindigkeit mit der Höhe zunimmt und ihr Maximum an der oberen Kante erreicht. Das zweitbeste Gebiet befindet sich über dem Haus, und zwar einige Meter vom Dach bzw. von der Grenzschicht entfernt. Es muss darauf geachtet werden, die Rotoren nicht in der Grenzschicht der Fassade einzubauen, wo es fast windstill ist. Es ist außerdem notwendig, bei der Installation ausreichend Abstand vom Gebäudekörper einzuhalten.

Es ist sinnvoll, eine grobe Schätzung der zu erzielenden Leistung zu bekommen, wenn an jeder Position gemäß Abbildung 3.78 ein Rotor installiert wird. In der folgenden Analyse wurde ein 180 Meter hohes Hochhaus mit den Windeigenschaften der vier Standorte bei vier Gebäudeformen durchsimuliert. Es stellt sich die Frage, wie hoch der Ertrag aus Wind an welchem Standort, bei welcher Bauform bzw. Gebäudehöhe ausfällt.

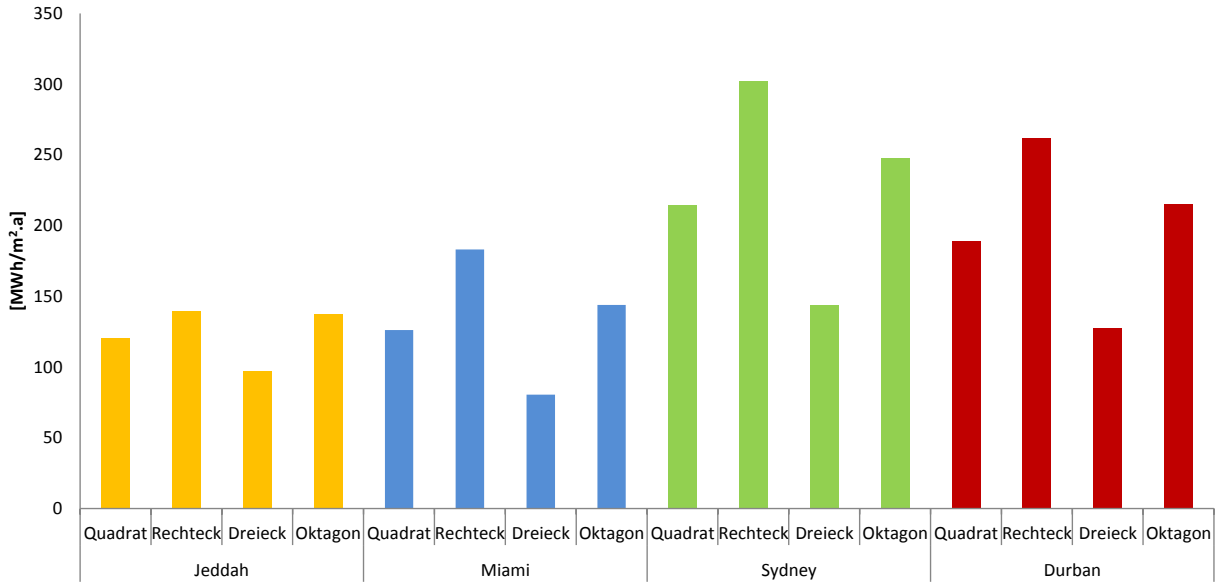


Abbildung 3.83 Vergleich des Jahresertrags pro Quadratmeter aus Windenergie unter der Annahme, dass alle Rotoren an der Fassade und auf dem Dach im Einsatz sind (eigene Darstellung)

Die Grafik in Abbildung 3.83 weist darauf hin, dass am Standort Sydney aufgrund des Windverhaltens ein hoher Ertrag pro Quadratmeter erzielt werden kann. Die Stadt Durban kommt auf den zweiten Platz. Die Relationen zwischen den verschiedenen Formen ändern sich in Abhängigkeit von der Bauform. Das kann besonders gut in Miami beobachtet werden, wo das Rechteck einen deutlich höheren Ertrag erreicht. In sämtlichen Beispielen weist das Dreieck den geringsten Ertrag aller Formen auf. In Jeddah, Sydney und Durban steht jeweils das Oktagon an der Spitze. Danach folgt das Quadrat.

3.3.3 Effektivität des gebäudeintegrierten Winddurchlasses

Untersuchung von verschiedenen baukörperintegrierten Windauslässen zur Erhöhung der Windgeschwindigkeit am Rotor

Das grundlegende Ziel bei der Nutzung von Windenergie ist, die Windgeschwindigkeit am Rotor zu maximieren, um einen möglichst hohen Ertrag zu erzielen. Prinzipiell erhöht sich die Windgeschwindigkeit zwischen den Massen. Es stellt sich also die Frage, ob eine Öffnung im Gebäude den Gesamtertrag erheblich erhöhen kann. Dies ist stark von der Form bzw. Proportion abhängig. Einige Versuche dazu wurden schon umgesetzt, zum Beispiel im fertig gebauten *Pearl River Tower* in China [60]. Die Bilder in Abbildung 3.84 zeigen die Analyse der Strömung durch den Durchlass. Zahlreiche Forschungsarbeiten haben das Thema untersucht und verschiedene Formen für Winddurchlässe entwickelt [45], [219].

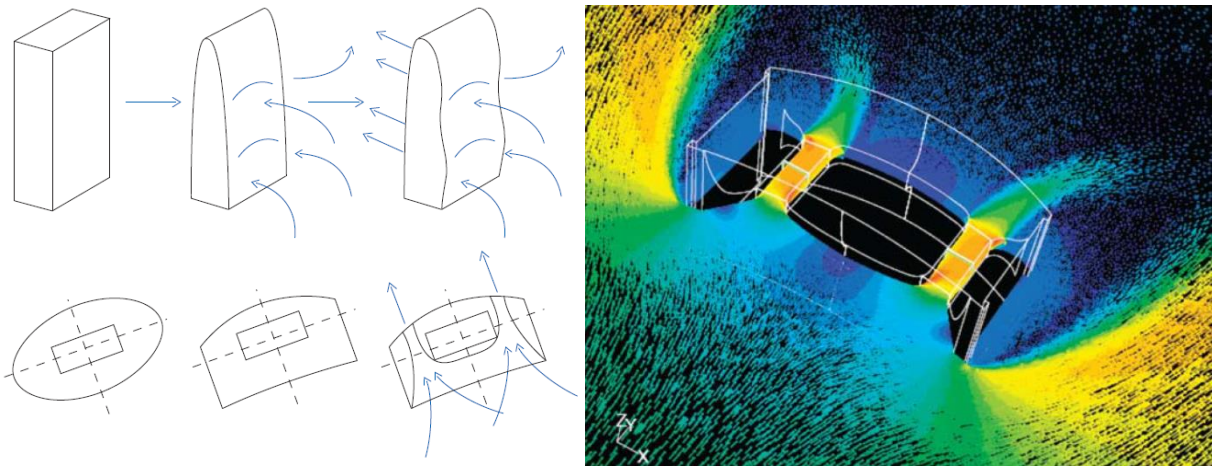


Abbildung 3.84 Links: Analyse der Gebäudeform des Pearl River Tower [220]; rechts: CFD-Simulation der Winddurchlässe [221]

Im Rahmen dieser Arbeit wurden verschiedene Szenarien für Durchlässe konzipiert und in der CFD-Analyse geprüft. Die Formen B und C wurden bereits mit anderen Proportionen getestet [60], [219]. Für die Formen A bis G wird der Vergleich der Windgeschwindigkeit im Durchlass gemäß der rechts angeführten Legende gezeigt. Das Spektrum der Legende stellt Windgeschwindigkeiten zwischen 0 und 7 m/s dar.

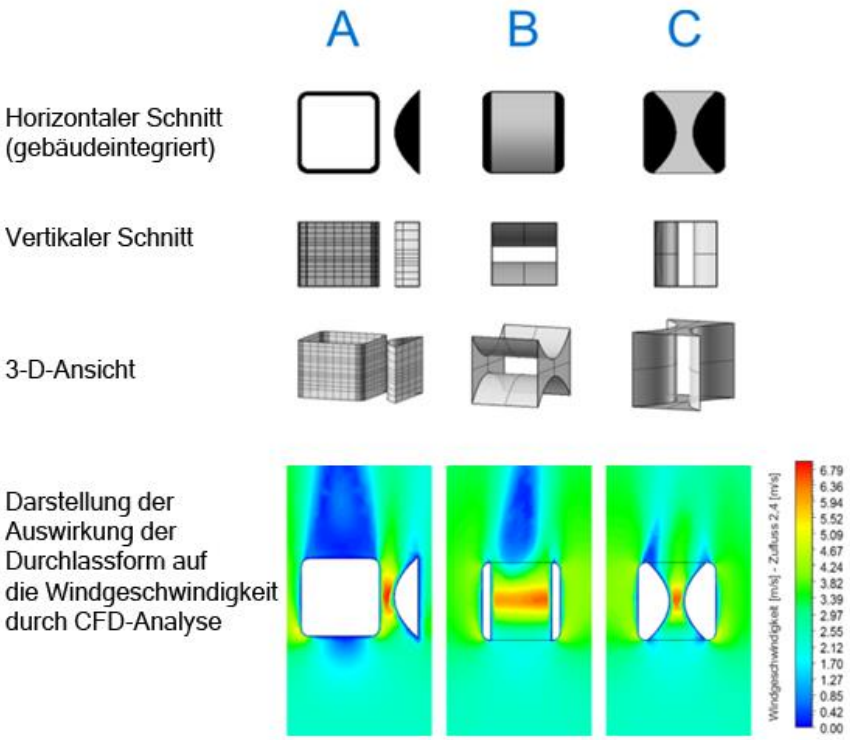


Abbildung 3.85 Vergleich der Windgeschwindigkeit in verschiedenen Windauslässen (A-C) (eigene Simulation und Darstellung)

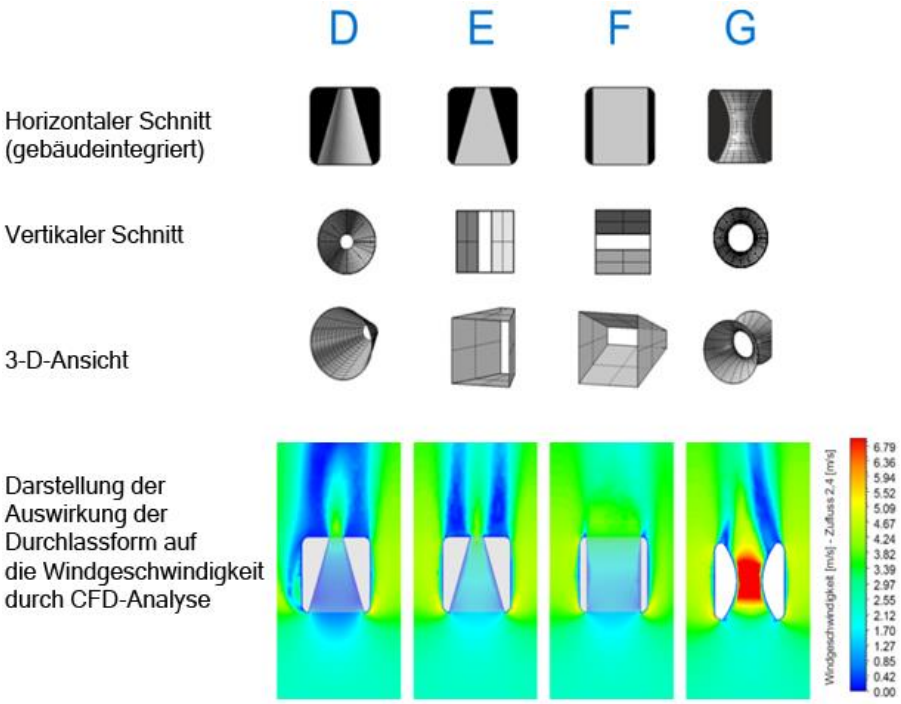


Abbildung 3.86 Vergleich der Windgeschwindigkeit in verschiedenen Windauslässen (D-G) (eigene Simulation und Darstellung)

Es wird deutlich, dass die Formen D, E und F über geringere Potenziale verfügen. Das höchste Potenzial ist dort vorhanden, wo die Intensität der Windgeschwindigkeit am höchsten ist. Dies ist bei Form G der Fall. Die Formen A, B und C bieten ebenfalls gute Potenziale. Ein Vorteil bei Form B ist die Möglichkeit, mehrere Rotoren nebeneinander einzubauen, da die Fläche der Wirkung relativ groß ist.

Festlegung der günstigsten Öffnungsgröße

Im letzten Schritt wurde festgestellt, dass Form G über das größte Potenzial verfügt. Es stellt sich nun die Frage, was die optimalen Proportionen sind. Anders formuliert: Gibt es andere Proportionen, die eine bessere Performance ermöglichen? Zur Beantwortung dieser Frage wurden drei Querschnitte der Form G mit drei Größen simuliert, um herauszufinden, welcher Querschnitt das beste Ergebnis liefert.

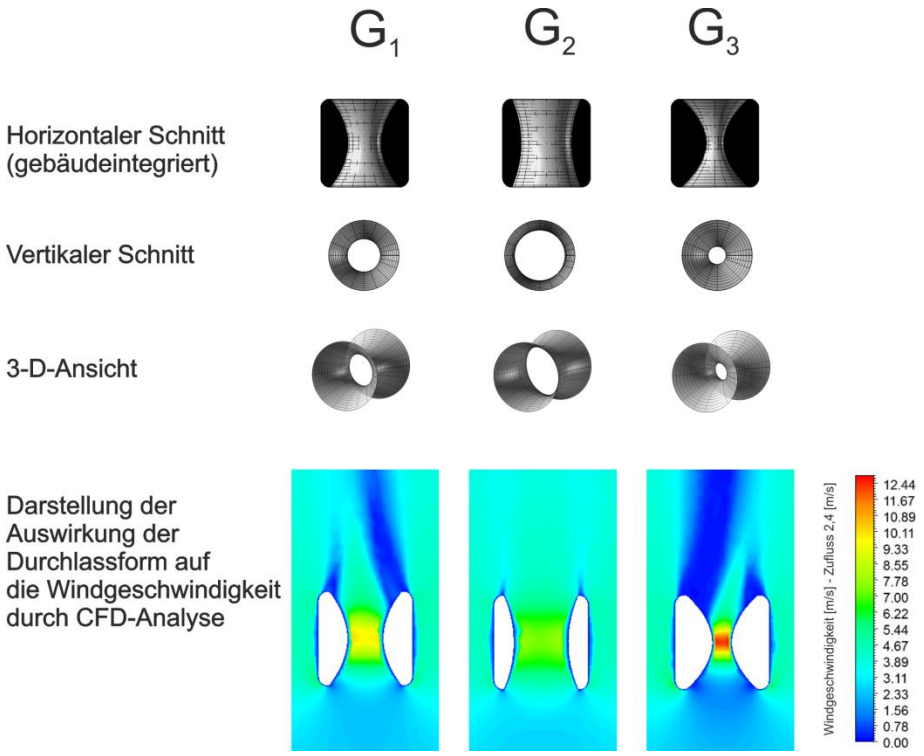


Abbildung 3.87 Vergleich von drei Größen der Form G (eigene Simulation und Darstellung)

Wichtig ist die Legende auf der rechten Seite, die einen anderen Maßstab hat als in Abbildung 3.86. Hier werden Windgeschwindigkeiten zwischen 0 und 12,5 m/s dargestellt. Man geht davon aus, dass die Form G3 mit dem kleinsten Querschnitt die höchste Windgeschwindigkeit von 12,5 m/s erreicht. Die zufließende Windgeschwindigkeit beträgt 2,4 m/s. Das heißt, Form G3 hat diese um ca. das 5-Fache vervielfacht. Für die nächste Analyse im Rahmen der Arbeit wird deshalb die Form G3 ausgewählt.

Anwendung ausgewählter Maßnahmen auf das Hochhausmodell

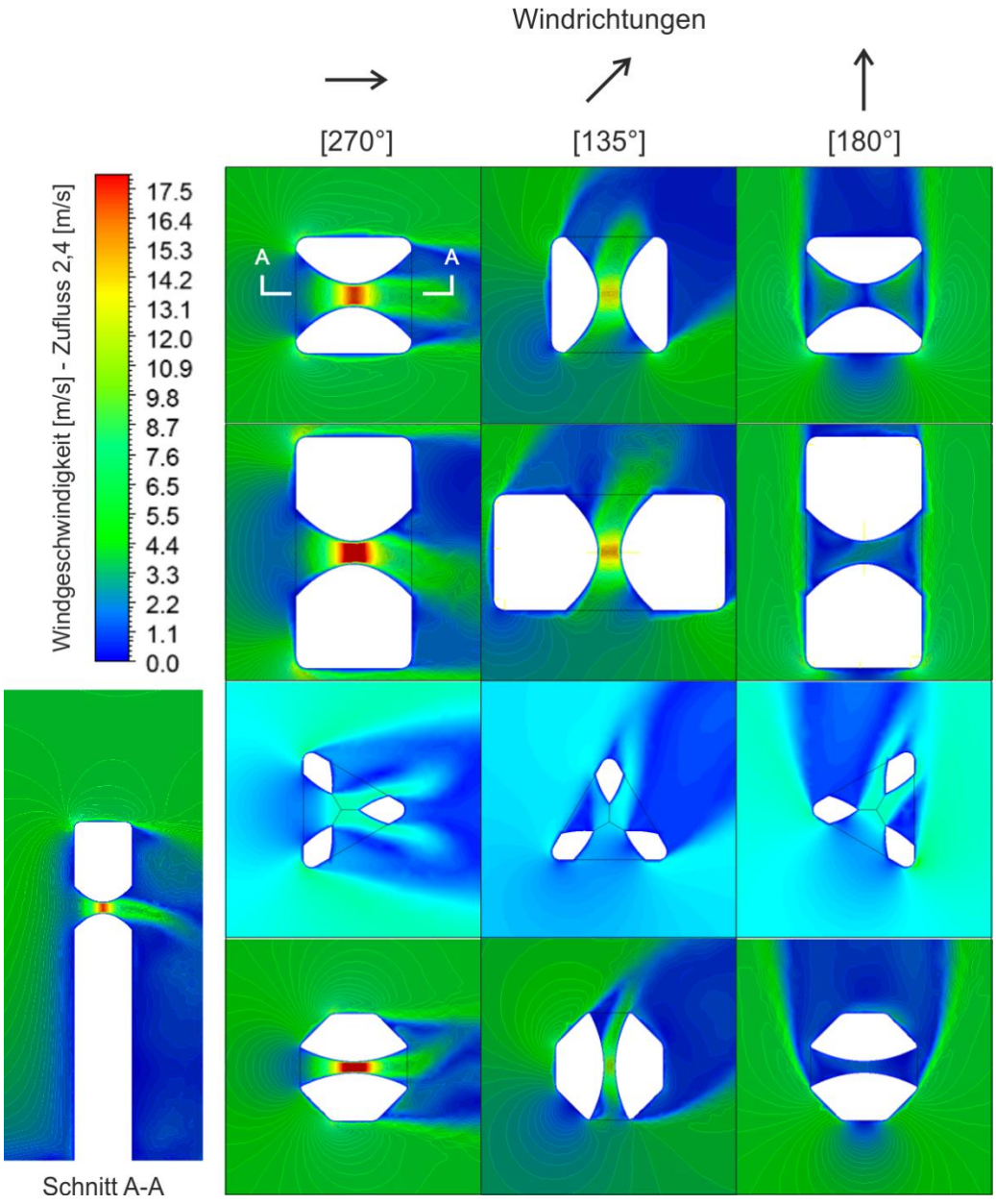


Abbildung 3.88 Darstellung der Windgeschwindigkeitsverteilung (eigene Simulation und Darstellung)

Die Bilder in Abbildung 3.88 zeigen die Auswirkung des gewählten hochhausintegrierten Durchlasses. Das simulierte Hochhaus ist 180 Meter hoch. Die gezeigten Querschnitte wurden auf 135 Meter Höhe angesetzt. Ein typischer Querschnitt wird auf der unteren linken Seite gezeigt. Es ist sehr deutlich zu sehen, dass die Form des Auslasses die Windgeschwindigkeit in der Mitte erheblich erhöht.

Es ist wichtig darauf hinzuweisen, dass beim Dreieck der Durchlass nicht durchgehend geöffnet ist. Es wurden deshalb drei Öffnungen integriert, während bei den anderen Formen nur zwei Öffnungen vorhanden sind. Die Intensität der Windgeschwindigkeit im Durchlass hängt neben

den Standortseigenschaften v. a. von der Bauform ab. Die folgenden Balken zeigen die durchschnittliche Windgeschwindigkeit in den Durchlässen der in Abbildung 3.88 dargestellten Formen. Die Windgeschwindigkeit wurde jeweils am Punkt M_135 abgelesen.

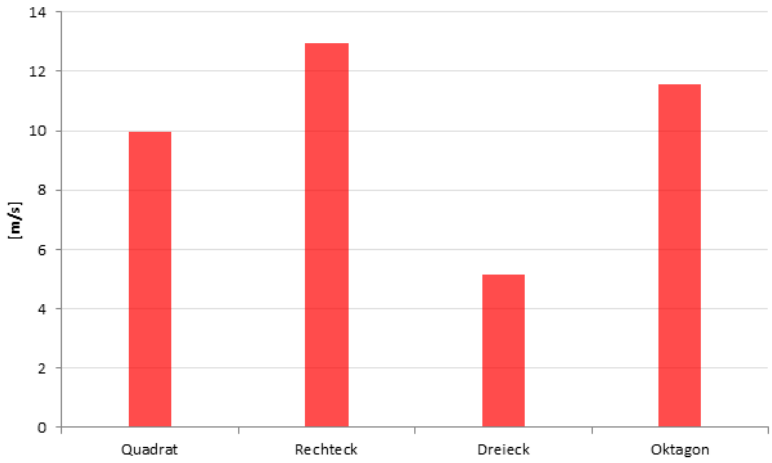


Abbildung 3.89 Durchschnittliche Windgeschwindigkeit im Durchlass

Der Vergleich zeigt, dass beim Rechteck die höchste Windgeschwindigkeit erreicht wird. Auf dem zweiten Platz ist das Oktagon. Der Durchlass hat auch bei der quadratischen Form Potenzial, die an der dritten Stelle steht. Nach den Bildern in der dritten Reihe der Abbildung 3.88 ist die Windgeschwindigkeit im Durchlass im Vergleich zu den anderen Formen aber eher gering.

Vergleich der jährlichen Erträge mit und ohne die Durchlässe

Um die Machbarkeit der Maßnahme zu beurteilen, wurden zwei quadratische Hochhäuser verglichen, wobei in eines davon der Winddurchlass integriert war. Es wurde angenommen, dass alle Positionen mit Rotoren belegt sind. Das heißt, alle Rotoren sind im Einsatz. Die Grafiken in Abbildung 3.91 stellen die jährlichen Erträge von jedem der dach- und fassadenintegrierten Rotoren im Hochhaus dar. Die Balken stellen die Erträge für jeden Rotor dar.

Die blauen Balken repräsentieren die Daten des Hochhauses ohne Durchlass. Die Roteren des Hochhauses mit Durchlass werden in Abbildung 3.91 rot dargestellt. Die Summe der Erträge des ersten Hochhauses wird im dunkelblauen Balken zusammengefasst. Die Erträge des zweiten Hauses mit Durchlass werden im dunkelroten Balken aufsummiert. Beide Balken beziehen sich auf die rechte Achse.

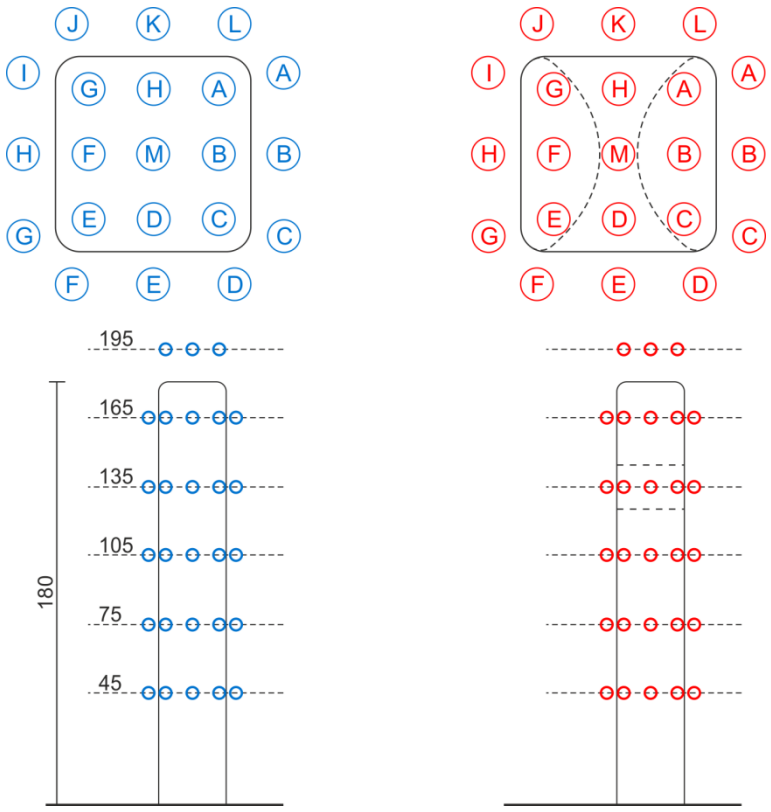


Abbildung 3.90 Rotorenpositionen im gezeigten Vergleich; Links: Hochhaus ohne Durchlass; Rechts: Hochhaus mit Durchlass (eigene Darstellung)

Auf den ersten Blick zeigt sich, dass die Erträge im zweiten Hochhaus (mit Durchlass) bei manchen Balken – bis auf den Punkt M, wo der Durchlass integriert ist – abgenommen haben. Dies ist offensichtlich auf die Auswirkung des Durchlasses zurückzuführen, der neue Strömungsverläufe am Baukörper verursacht. Die Luftströmung ändert sich und wird in den Durchlass gezogen.

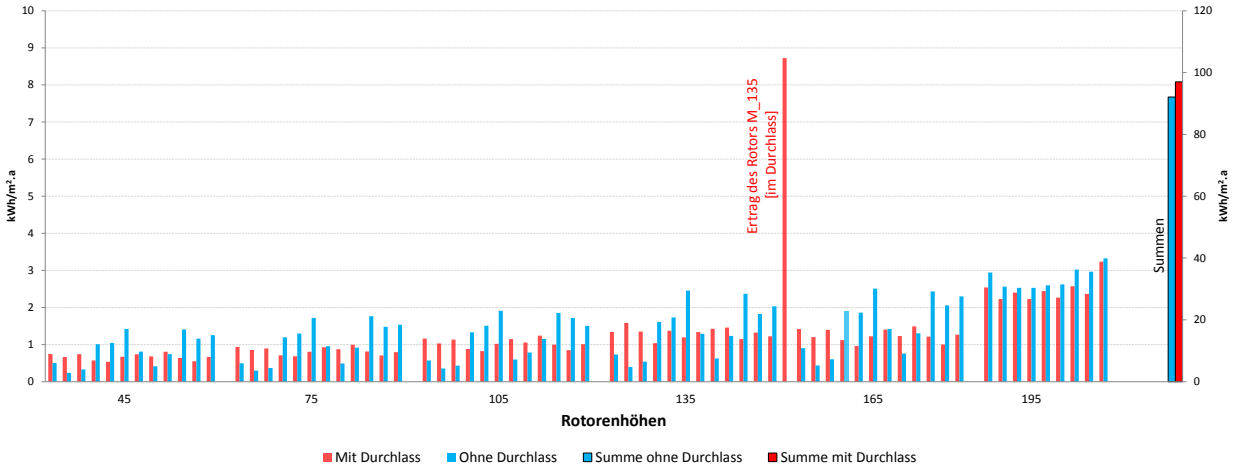


Abbildung 3.91 Erträge aus Rotoren pro Quadratmeter im Hochhaus mit und ohne Durchlass (eigene Darstellung)

Es kann daher festgestellt werden, dass die Integration eines Durchlasses aufgrund der hohen lokalen Windgeschwindigkeit zwar für sich einen hohen Ertrag erzielt, aber im Hinblick auf die Gesamtbilanz nicht viel bringt. Es stellt sich folglich die Frage, wie die Integration des Durchlasses von Vorteil sein kann.

Bei dem Vergleich in Abbildung 3.91 ist auffällig, dass sich der Ertrag beim zweiten Hochhaus (mit Durchlass) bei manchen Positionen erhöht. Ein großer Vorteil des Durchlasses ist, dass die Windturbinen nicht an der Fassade installiert sind und den Blick nach außen nicht beeinträchtigen. Eine überlegte Integration der Rotoren in die Fassade könnte diese allerdings auch zur Verschattung nutzen. Der erzielbare Ertrag kann durch den Einbau von mehreren Rotoren vervielfacht werden. Somit kann der Mangel an weiteren Rotoren an den Fassaden ausgeglichen werden.

Die Integration von Winddurchlässen in Baukörper sollte folglich nicht ausgeschlossen werden und kann neue, interessante Ergebnisse bringen. Im Windenergieoptimierungstool wurde der Durchlass dementsprechend als Option berücksichtigt. Im Rahmen dieser Arbeit wird der Durchlass jedoch nicht weiter untersucht.

3.3.4 Aufbau der Optimierungsmodelle

Die Nutzung der Windenergie ist eine Maßnahme, die die vom Bautyp des Hochhauses angebotenen Potenziale ausnutzt. Gestalterisch und wirtschaftlich gesehen spielt der Ansatz, das Hochhaus als Kraftwerk zu betrachten, eine grundlegende und kritische Rolle, v. a. hinsichtlich Rotorenposition, -anzahl und -größen. Sollte am Standort eine Möglichkeit zur Einspeisevergütung zur Verfügung stehen, eröffnet dieser Ansatz ein hohes wirtschaftliches Potenzial. Ein Hochhaus, das Gebäude in seiner Umgebung mit Energie versorgt, trägt sowohl zum Klimaschutz als auch zur Beschleunigung der Energiewende bei.

Anhand der gezeigten Analyse wurde festgestellt, dass die Integration von Windanlagen in das Gebäude bzw. Hochhaus überlegt erfolgen muss, damit sie wirtschaftlich wird. Dies ist aufgrund der nicht linearen Komplexität des Themas erforderlich, die von den Standortbedingungen sowie den gestalterischen Eigenschaften des Gebäudes beeinflusst wird. Die wesentlichen Zusammenhänge der Energieerzeugung durch gebäudeintegrierte Windrotoren werden in Abbildung 3.92 dargestellt.

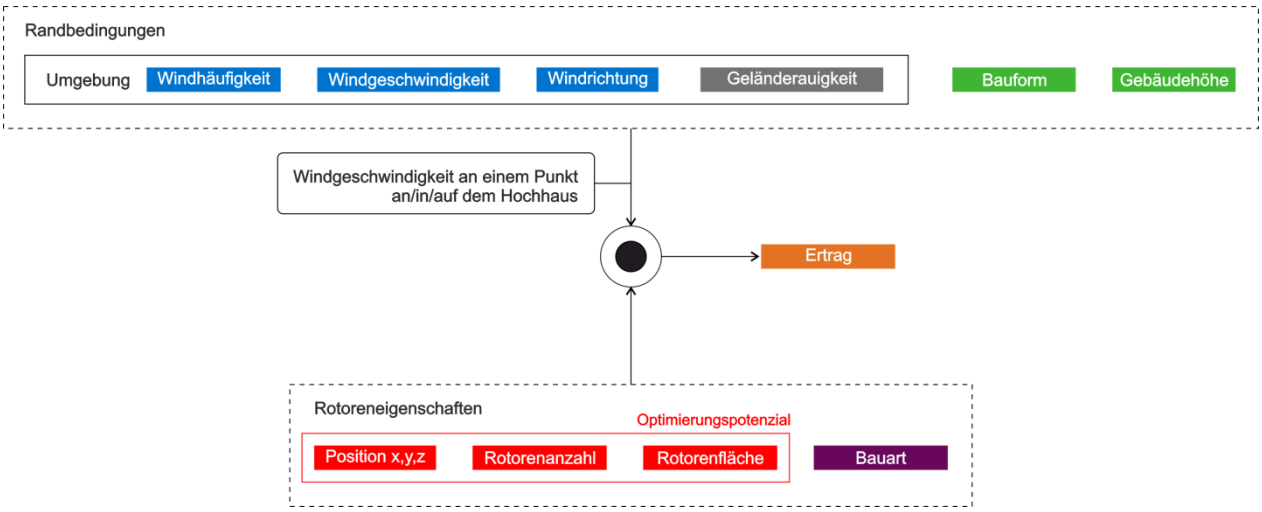


Abbildung 3.92 Zusammenhänge der Energieerzeugung durch gebäudeintegrierte Windrotoren (eigene Darstellung)

Die in den blauen Kästen aufgeführten Faktoren sind standortabhängig. Sie bilden zusammen mit der Geländerauigkeit die Umgebungsparameter ab. Die Bauform des Hochhauses und seine Höhe zählen ebenfalls zu den grundlegenden Rahmenbedingungen. Das Ziel der Grafik ist zu zeigen, welche Parameter für die Windgeschwindigkeit an einem bestimmten Punkt in/an/auf dem Hochhaus entscheidend sind und wo das Optimierungspotenzial steckt. Im unteren Bereich stehen neben der Bauart des Rotors drei rot gekennzeichnete Parameter, die ein Optimierungspotenzial aufweisen können, nämlich Rotorenposition, Rotorenanzahl in der jeweiligen Position und Rotorenfläche. Im Hinblick auf die Bauart wird in dieser Arbeit mit vertikalachsigen Darius-Rotoren gearbeitet, da diese bei allen Windrichtungen funktionieren.

Wie schon geklärt wurde, müssen, um einen hohen Ertrag zu erzielen, bei jedem Standort zunächst immer die günstigsten Positionen für die Rotoren am Gebäude gesucht werden, an denen die Windgeschwindigkeit hoch ist. Danach sollten der Radius bzw. die Flächen der

eingebauten Rotoren vergrößert werden, um das Potenzial weiter zu erhöhen. Interessant ist des Weiteren das Einbauen von mehreren Rotoren an einer Position. Diese Multiplizierung trägt erheblich zur Erhöhung des Ertrags bei, da sie die Potenziale einer Position mehrfach ausnutzt.

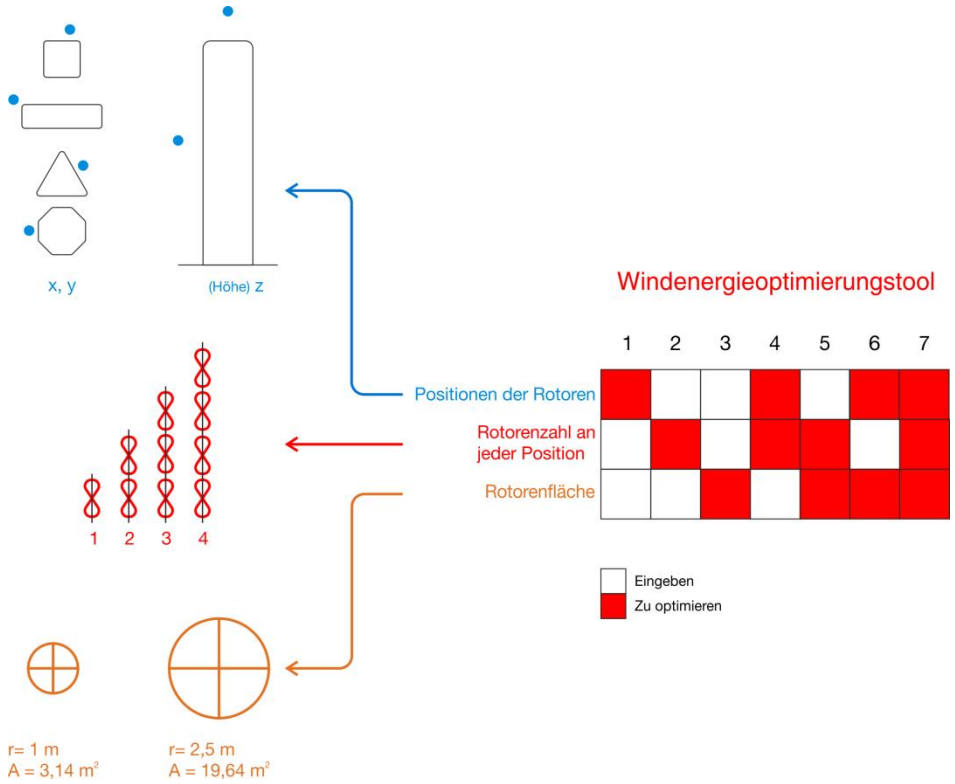


Abbildung 3.93 Variierbare Größen des Windenergieoptimierungstools (eigene Darstellung)

Aufgrund der vielen Zusammenhänge und Abhängigkeiten stellt sich die Frage, wie das Optimierungsmodell aufgebaut werden soll, um Antworten auf die oben gestellten Fragen zu geben. Die Matrix in Abbildung 3.93 zeigt die verschiedenen Optimierungsmodelle, die im Windenergieoptimierungstool ausgeführt werden können. Der Aufbau der Optimierungsmodelle wird in den kommenden Tabellen beschrieben. In Abschnitt 4.2 werden Beispiele von ausgewählten Optimierungsmodellen gezeigt. Eine Erläuterung der Optimierungsmodelle kann im Anhang im Abschnitt 7.2.2 eingesehen werden.

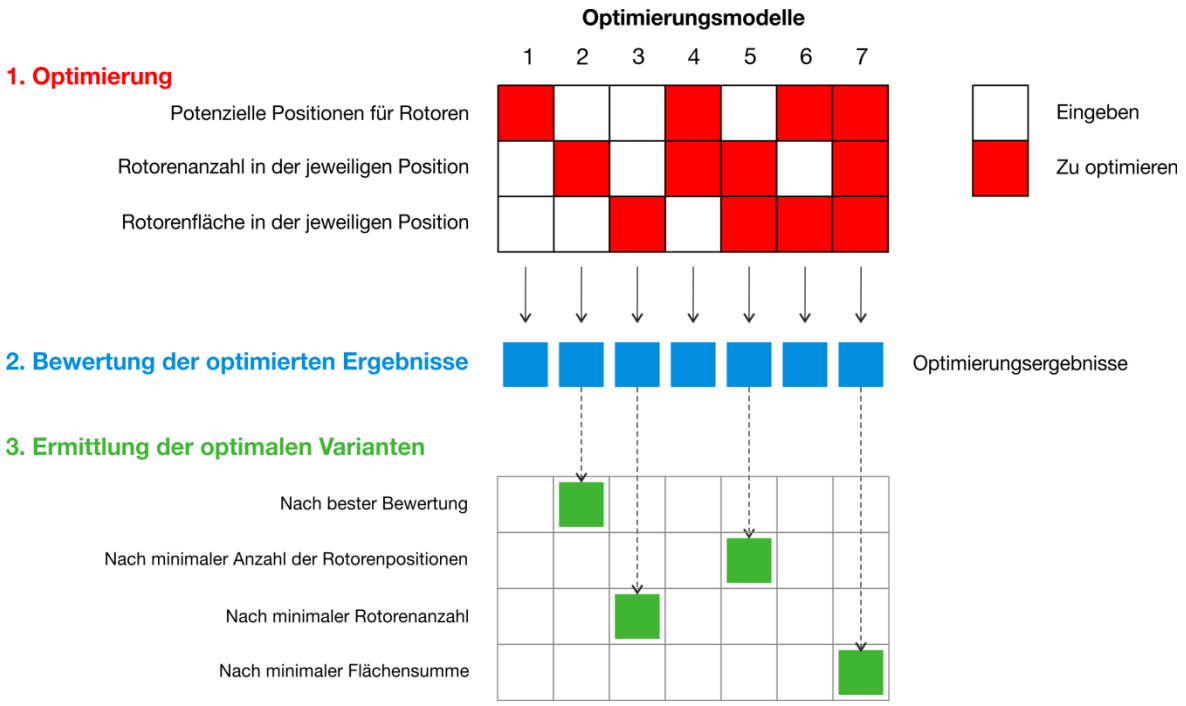


Abbildung 3.94 Darstellung des Optimierungs- und Bewertungsprozesses

Jedes Optimierungsmodell des Windenergieoptimierungstools liefert ein Ergebnis. Jedes Ergebnis kann als lokales Optimum bezeichnet werden. Um das globale Optimum zu ermitteln, sollte der Nutzer alle Optimierungsmodelle durchführen. Die Ergebnisse werden nach einem vorgegebenen Gewichtungsmaßstab bewertet. Nach dem Bewertungsprozess werden dem Nutzer ausgewählte Optimierungsvarianten vorgelegt. Eine grobe Darstellung des Optimierungs- und Bewertungsprozesses wird in der Abbildung 3.94 gezeigt. Die Entscheidungskriterien sind:

- beste Bewertung
- minimale Anzahl der Rotorenpositionen
- minimale Rotorenanzahl
- minimale Flächensumme

Die gebäudeintegrierte Windenergieerzeugung erfolgt durch die Nutzung von Windrotoren, die auf dem Dach, an der Fassade oder in den Baukörper eingebaut werden können. Die konstruktive und gestalterische Integration der Rotoren in ein Hochhaus kann als wichtige Herausforderung für den Architekten gesehen werden, um die Beeinträchtigung von Nachbarn, Anwohnern und Hausgenossen so gering wie möglich zu halten. Im Rahmen einer wissenschaftlichen Untersuchung wurde nachgewiesen, dass Horizontalwindkraftanlagen direkten bewegten Schatten verursachen und allein die ständige Sichtbarkeit eines bewegten Objektes störend wirken kann. Von Nauber wurde behauptet, dass aufgrund der schlankeren Silhouette der Vertikalrotoren deren Schattenwurf weit weniger bewegt ausfallen würde als bei den Horizontalrotoren [215]. In seiner Arbeit wird ein vernünftiges System zum Einbau von mehreren Rotoren übereinander vorgestellt. Ein großer Vorteil ist, dass die ganze Anlage einfach demontiert werden kann. Eine Darstellung der Bestandteile erfolgt in Abbildung 3.95.

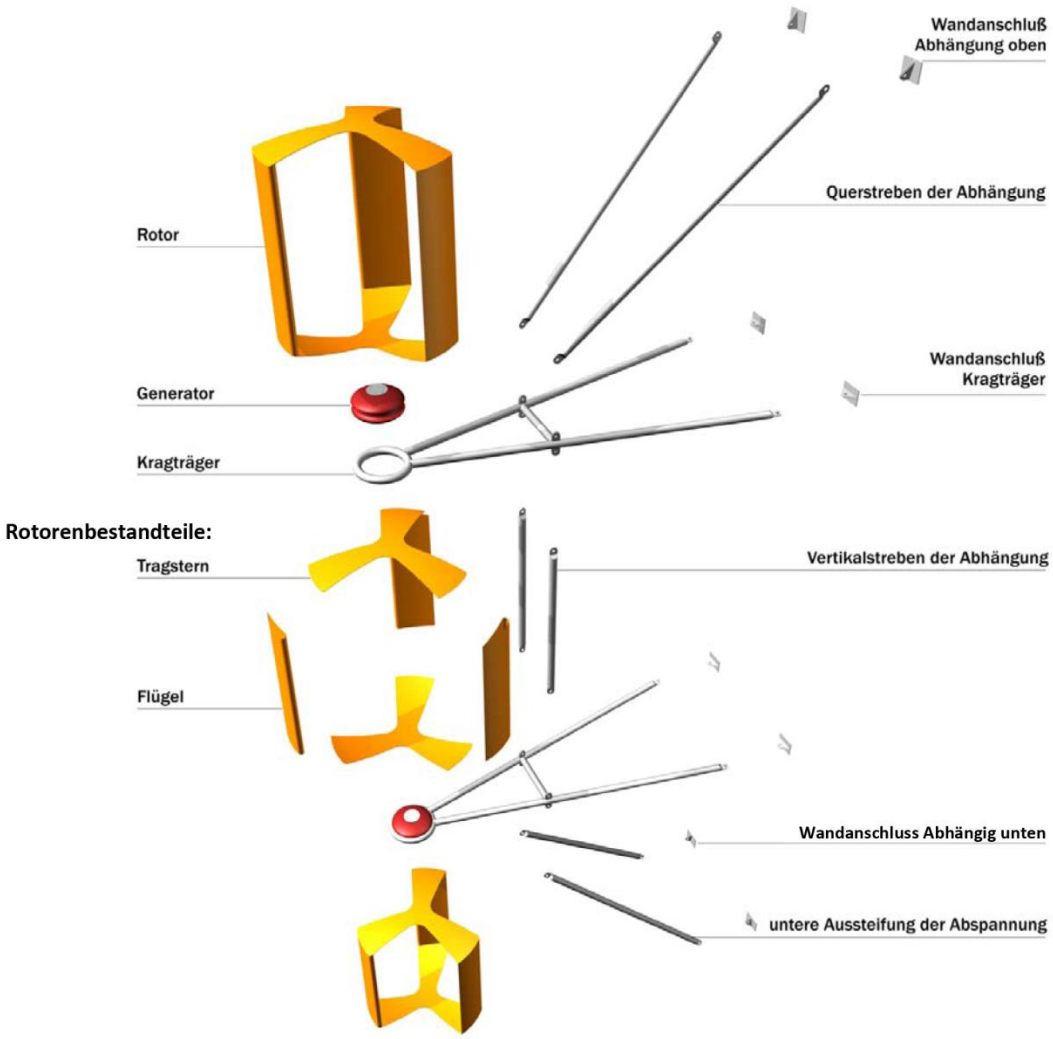


Abbildung 3.95 Systembestandteile am Beispiel einer Anlage mit drei Rotoren [215]

Wesentlich bei vertikalen Anlagen ist, Positionen auszuwählen, in denen sich die Rotoren nicht im direkten Blickfeld der Arbeitsräume befinden. Sinnvoll ist, die Anlagen an weniger beliebten Stellen zu installieren. Außerdem sollten an den Positionen mit hohen Windgeschwindigkeiten mehrere Rotoren eingebaut werden, um die Effizienz des ganzen Systems zu steigern. Dies kann nebeneinander, aufeinander oder in irgendeiner anderen möglichen Form erfolgen. Ein weiterer Vorteil der fassadenintegrierten Windrotoren ist die erhebliche Ersparnis bei der Mastkonstruktion.

4. Validierung des entwickelten Systems

In diesem Abschnitt wird das entwickelte Werkzeug mit seinen zwei Teilwerkzeugen, dem Solarenergieoptimierungstool und dem Windenergieoptimierungstool getestet. Jedes Werkzeug wird zuerst für sich betrachtet, um seine Schwerpunkte sichtbar zu machen. Es werden drei Optimierungsmodelle durchgeführt und an einem ähnlichen Problem auf die vier ausgewählten Standorte angewendet. Die optimierten Ergebnisse werden in Bezug auf die Klimaeigenschaften des jeweiligen Standorts betrachtet, um die Plausibilität zu prüfen.

Beim Solarenergieoptimierungstool wird die Optimierung auf der Ebene einer Fassade gezeigt. Um ähnliche Bedingungen für die Standorte in der nördlichen und der südlichen Hemisphäre zu schaffen, ist die betrachtete Fassade für Jeddah und Miami die Südfassade und für Durban und Sydney die Nordfassade.

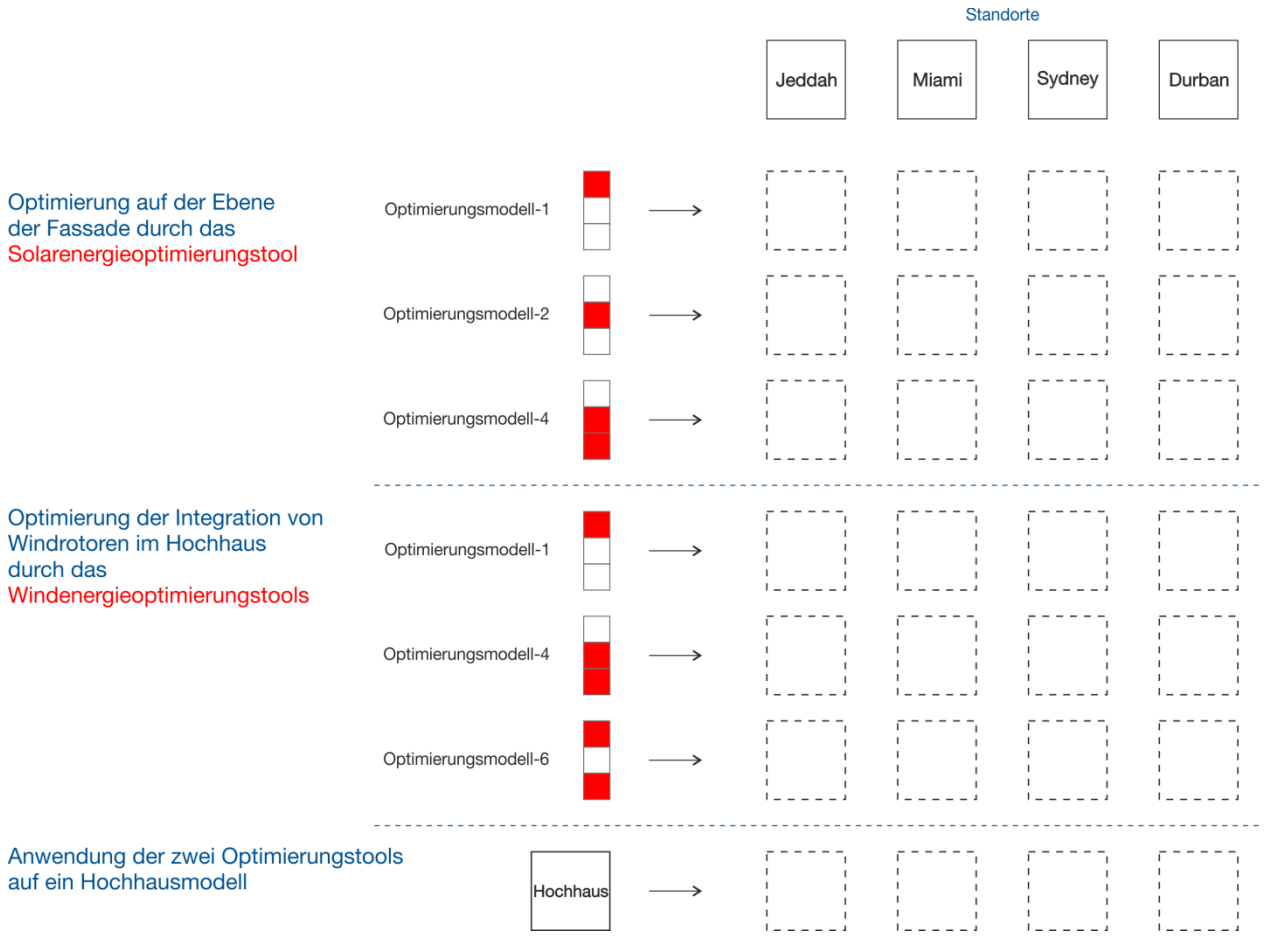


Abbildung 4.1 Ablauf der Validierung in diesem Kapitel

4.1 Optimierung auf der Ebene einer Hochhausfassade

Wie bereits in Abschnitt 3.2 beschrieben, beschäftigt sich das Solarenergieoptimierungstool mit der Maximierung der Effizienz einer Fassade hinsichtlich der aus fassadenintegrierten Photovoltaikzellen erzeugten Energie sowie der Energieeinsparung durch Minimierung der Wärmeaufnahme im dahinterliegenden Raum. Die Einstellung der genannten korrelierenden Parameter, v.a. der bauphysikalischen Eigenschaften der Fassade, steht in einem wesentlichen Zusammenhang mit der visuellen Behaglichkeit.

In diesem Abschnitt wird die Funktionalität des Solarenergieoptimierungstools auf der Ebene einer Fassade überprüft. Für jeden der ausgewählten Standorte werden die Ergebnisse von drei Modellen zur Optimierung einer Fassade gezeigt. Es wird auch beschrieben, wie die optimierten Varianten bewertet werden, um die Nutzerentscheidung zu erleichtern. Abbildung 4.2 zeigt die integrierten Optimierungsmodelle. An dieser Stelle werden die Modelle 1, 4 und 6 dargestellt.

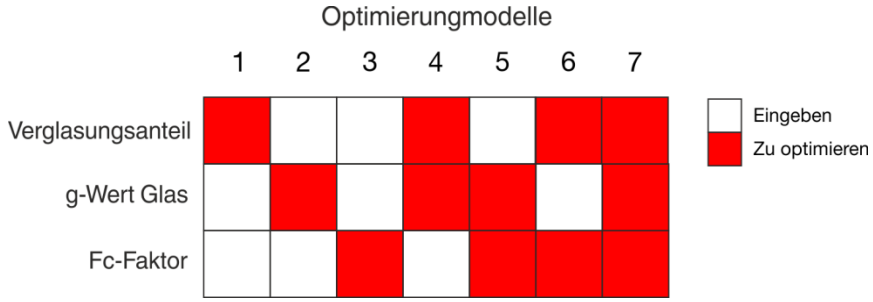


Abbildung 4.2 Optimierungsmodelle des Solarenergieoptimierungstools

Die allgemeinen Rahmenbedingungen der Simulationen werden in Tabelle 4.1 gezeigt:

Raum		
Standort	Variiert	[-]
Orientierung	Süd/Nord	[-]
Bürofläche	25,9	[m²]
Volumen	77,8	[m^3]
Anzahl der Nutzer	2	[-]
Luftwechselrate	0,5	[h^{-1}]

Photovoltaikzellen		
Verfügbare Fassadenfläche für PV	Variiert	[-]
Totale verfügbare Fläche	Variiert	[m²]
Neigungswinkel	90,00	[°]
Wirkungsgrad	0,15	[-]
Sonstige Bedingungen		
Spez. Wärmeabgabe Beleuchtung	4,0	[W/m²]
COP (Kälteanlage)	4,5	[-]

Tabelle 4.1 Allgemeine Rahmenbedingungen

Im eingebetteten Tool zur Ermittlung des Energiebedarfs (Energiebilanztool) wurden die wesentlichen Behaglichkeitsgrenzen festgesetzt, die nicht direkt mit der Fassade zu tun haben. Der Tageslichtquotient ist ein entscheidender Parameter zur Bestimmung der visuellen Behaglichkeit, der u. a. vom Fensterflächenanteil, der Geometrie und dem t-Wert (Transmissionsgrad) bzw. Energiedurchlassgrad der Verglasung abhängig ist. Im Energiebedarfstool wurde die Fensterhöhe festgesetzt und die Breite in Abhängigkeit vom Fensterflächenanteil modelliert. Dazu wurde der *Al-Kreis* integriert, um den Tageslichtquotienten zu ermitteln [155].

4.1.1 Optimierungsmodell-1: Optimierung des Verglasungsanteils

In diesem Beispiel wird gezeigt, wie durch eine Veränderung des Verglasungsanteils die Energieeffizienz maximiert werden kann. Dabei stellt sich die Frage nach dem optimalen Wand-Fenster-Verhältnis, unter Einbezug von Orientierung, Energiedurchlassgrad der Verglasung (g), Verminderungsfaktor durch den Sonnenschutz (Fc) und Neigungswinkel, bei dem der Energiebedarf für Kühlung und Beleuchtung zu einem Minimum führt.

Es stellt sich somit die Frage, wie groß die Fensterflächenanteile sein können, um den Bedarf an elektrischer Energie durch fassadenintegrierte PV-Elemente zu decken.

Im Folgenden wird das Optimierungsmodell-1 auf eine Südfassade am Standort Jeddah angewendet. In diesem Beispiel werden die Ergebnisse der Optimierung nach vier gesetzten Optimierungszielen dargestellt. In Tabelle 4.2 werden die Rahmenbedingungen des Optimierungsverfahrens gezeigt. Es wird vom Solarenergieoptimierungstool erwartet, den optimalen Verglasungsanteil bei folgenden Optimierungszielen zu ermitteln:

- Erreichen der Null-Energiebilanz
- Maximal erreichbare Energiebilanz
- Erreichen eines eingegebenen Tageslichtquotienten
- Maximale Verfügbarkeit von Tageslicht im behaglichen Bereich (Anteil der Arbeitszeit, in der 300 > E (Beleuchtungsstärke) > 500 lx)

Raum		
Standort	Jeddah	[-]
Orientierung	Süd	[-]
Bürofläche	25,9	[m²]
Volumen	77,8	[m^3]
Anzahl der Nutzer	2	[-]
Luftwechselrate	0,5	[h^{-1}]
Photovoltaikzellen		
Verfügbare Fassadenfläche für PV.	Variiert	[-]
Totale verfügbare Fläche	Variiert	[m²]
Neigungswinkel	90,00	[°]
Wirkungsgrad	0,15	[-]

Fassade		
Fassadenfläche	10,80	[m²]
Verglasungsanteil	Variiert	[-]
g-Wert	50,00	[-]
Fc-Faktor	40,00	[-]
t_L-Wert	0,72	[-]
U-Wert Fenster	0,60	[W/m²K]
Schwellwert (SoSu)	200	[W/m²]
U-Wert Außenwand	0,3	[W/m²K]
Sonstige Bedingungen		
Spez. Wärmeabgabe Beleuchtung	4,0	[W/m²]
COP (Kälteanlage)	4,5	[-]

Tabelle 4.2 Rahmenbedingungen der Simulationen

Die folgenden drei Diagramme in Abbildung 4.3 fassen die Ergebnisse des Optimierungsprozesses des Optimierungsmodells-1 bei größer werdendem Verglasungsanteil zusammen. Das erste Diagramm von links stellt die Energiebilanz dar, das zweite zeigt die Auswirkung der vergrößerten Glasfläche auf den Tageslichtquotienten in der Raummitte. Das Diagramm auf der rechten Seite zeigt, wie hoch der Anteil der Arbeitszeit bei jedem Verglasungsanteil ist, in dem die Beleuchtungsstärke des Tageslichts im behaglichen Bereich liegt.

Wie bereits erklärt, werden vier optimierte Bedingungen bzw. Varianten gezeigt. Bezüglich des Optimierungszieles-2 wurde modelliert, dass die maximale Energiebilanz nach Überschreitung des gesetzten bzw. gewünschten Tageslichtquotienten gesucht wird. Daher müssen sich in

Fällen, in denen der Verlauf der Energiebilanz und des Tageslichtquotienten linear ist, die Indikatoren der Optimierungsziele-2 und 3 an derselben Position befinden.

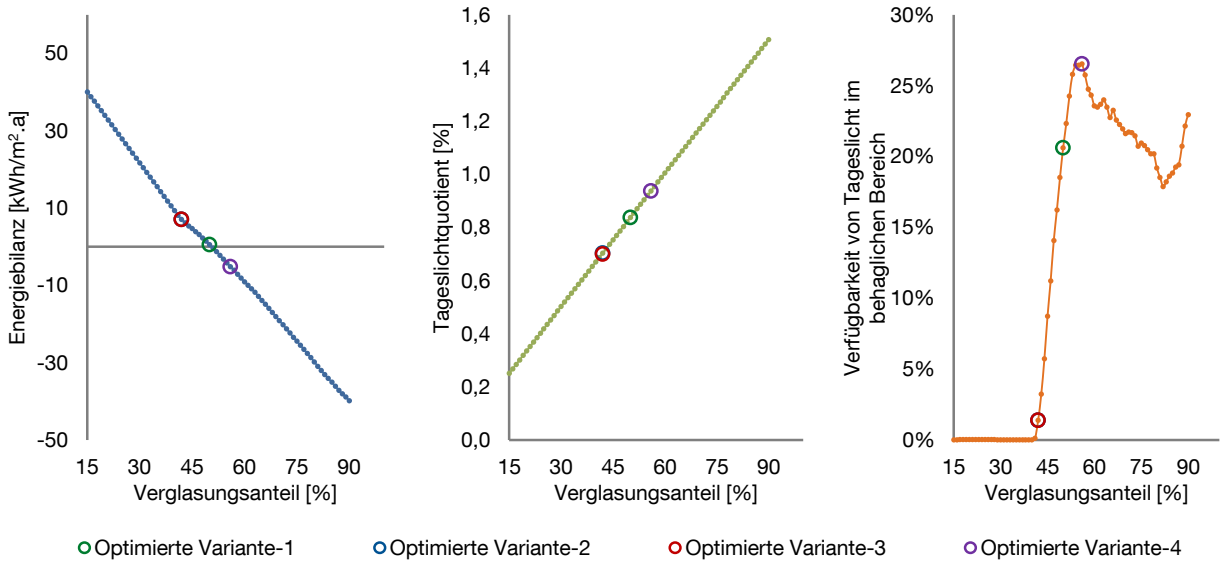


Abbildung 4.3 Ergebnisse des Optimierungsmodells-1 für den Standort Jeddah

Prinzipiell steigt der Kühlenergiebedarf bei größer werdendem Fensterflächenanteil. Gleichzeitig sinkt der Strombedarf für Beleuchtung. Der Ertrag aus fassadenintegrierten Photovoltaikzellen sinkt ebenfalls mit der Vergrößerung der Fensterfläche, da sich der Wandanteil bzw. die opake Fläche dadurch reduziert. Die Kombination der zwei Parameter wird als Energiebilanz bezeichnet und durch die blaue Kurve dargestellt.

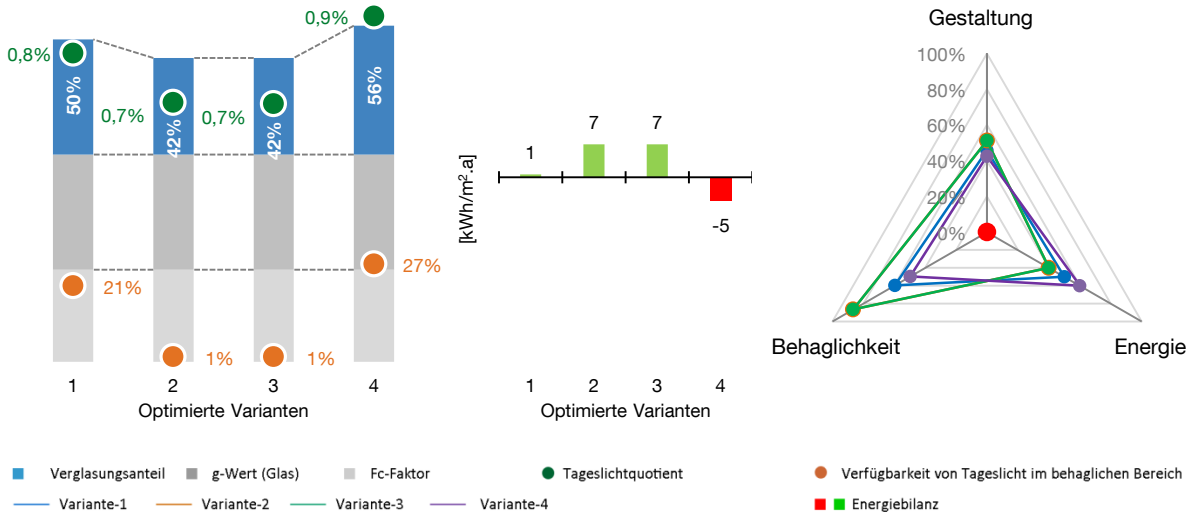


Abbildung 4.4 Vergleich der optimierten Varianten

Abbildung 4.4 gibt einen Überblick über die optimierten Varianten mit ihren entsprechenden Auswirkungen. Die blauen Balken im linken Diagramm stellen die optimierten

Verglasungsanteile dar. Die anderen Balken gehören zu den festgelegten Werten der Rahmenbedingungen. Das rechte Diagramm zeigt die Energiebilanz. Es zeigt sich, dass die vierte Variante gegenüber den anderen Varianten über eine negative bzw. schlechte Energiebilanz verfügt. Dies wird im Vergleich zu der ersten Variante durch die Vergrößerung des Verglasungsanteils verursacht, was die verfügbare Fläche für fassadenintegrierte Photovoltaikzellen reduziert. Auf der anderen Seite führt dies zu einer leichten Erhöhung des Tageslichtquotienten und der Tageslichtverfügbarkeit im behaglichen Bereich.

Die drei grundlegenden Aspekte im Modell der Hypothese sind Gestaltung, Behaglichkeit und Energie. Die Ergebnisse der Varianten hinsichtlich der Erfüllung dieser drei Aspekte variieren deutlich. Nach dem im Rahmen dieser Arbeit entwickelten Bewertungs- und Gewichtungssystem wird jede Variante evaluiert. Daraus ergibt sich die Abweichung vom absolut optimalen bzw. theoretischen Zustand, bei dem die Abweichung 0 % beträgt. Nach dem rechten Bild in Abbildung 4.4 haben die optimierten Varienten-1 und 4 eine ähnliche Charakteristik. Die optimierte Variante-1 weist eine kleinere Abweichung vom absolut optimalen Zustand der Energiebilanz und eine größere im Bereich der Behaglichkeit auf. Umgekehrt verhält sich die optimierte Variante-4. Die mittlere Abweichung der optimierten Variante-1 beträgt 52 %, die der optimierten Variante-4 51 %. Da die Unterschiede nicht erheblich sind, können beide Varianten infrage kommen. Die Varianten-2 und 3 zeigen, obwohl sie sich energetisch und gestalterisch nicht ungünstig verhalten, eine große Abweichung im Behaglichkeitsbereich.

Abbildung 4.5, Abbildung 4.6 und Abbildung 4.7 stellen die optimierten Varianten für die anderen Standorte dar. Für Sydney und Durban wird wiegesagt die Nordfassade simuliert, da diese der Südfassade in der nördlichen Hemisphäre entspricht. Die dargestellten Daten dienen zur Erzeugung des Kriterienkatalogs, mit dessen Hilfe der Planer die Gesamtkriterien der Hochhausfassaden zusammenfügt.

Prinzipiell haben die Klimaeigenschaften eines Standorts keinen Einfluss auf den Tageslichtquotienten in der Mitte eines Raums. Daher gibt es keinen Unterschied in der dritten optimierten Variante. Da die zweite Variante die maximale Energiebilanz nach der Erreichung des gewünschten Tageslichtquotienten angibt und in diesem Optimierungsmodell der Verlauf der Energiebilanz linear ist, sind die optimierten Kriterien ähnlich zu den Kriterien der dritten Variante.

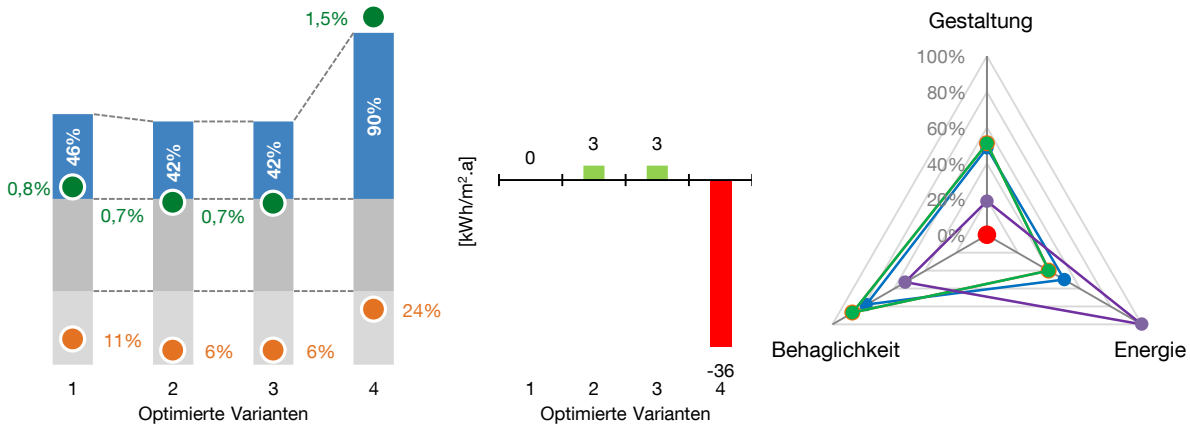


Abbildung 4.5 Optimierte Varianten für den Standort Miami; Ausrichtung: Süd

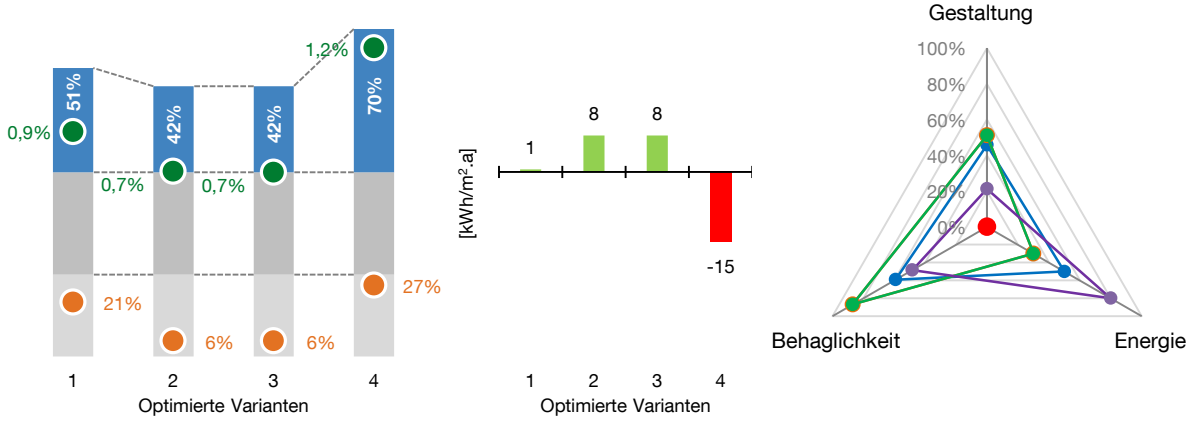


Abbildung 4.6 Optimierte Varianten für den Standort Sydney; Ausrichtung: Nord

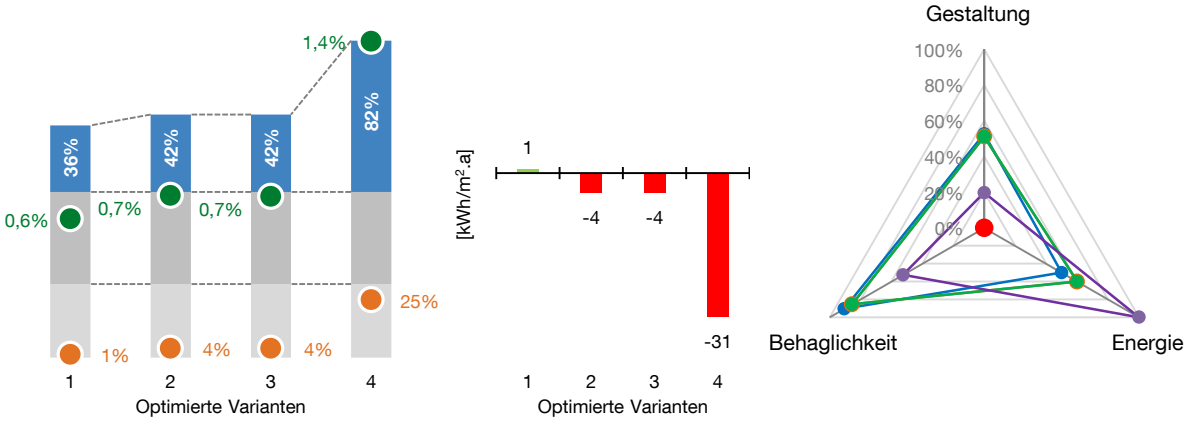
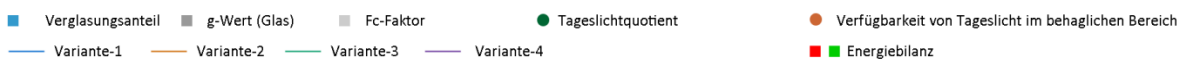


Abbildung 4.7 Optimierte Varianten für den Standort Durban; Ausrichtung: Nord



4.1.2 Optimierungsmodell-4: Optimierung von Verglasungsanteil und Energiedurchlassgrad

In folgendem Beispiel wird gezeigt, wie mittels des Solarenergieoptimierungstools zwei Größen gleichzeitig optimiert werden können. Tabelle 4.3 beschreibt die Rahmenbedingungen der Simulationen. Es werden Verglasungsanteil und Energiedurchlassgrad bei einem festen Fc-Faktor von 20 % verändert bzw. optimiert. Die angegebene Mindestgrenze des gewünschten Tageslichtquotienten beträgt 0,7 %.

Raum		
Standort	Jeddah	[-]
Orientierung	Süd	[-]
Bürofläche	25,9	[m²]
Volumen	77,8	[m^3]
Anzahl der Nutzer	2,0	[-]
Luftwechselrate	1	[h^{-1}]
Photovoltaikzellen		
Verfügbare Fassadenfläche für PV.	Variiert	[-]
Totale verfügbare Fläche	Variiert	[m²]
Neigungswinkel	90,00	[°]
Wirkungsgrad	0,15	[-]
Sonstige Bedingungen		
Spez. Wärmeabgabe Beleuchtung	5,00	[W/m²]
COP (Kälteanlage)	4,50	[-]

Fassade		
Fassadenfläche	10,8	[m²]
Verglasungsanteil	Variiert	[-]
g-Wert	Variiert	[-]
Fc-Wert	20%	[-]
t_L-Wert	Variiert	[-]
U-Wert Fenster	Variiert	[W/m²K]
Schwellwert (SoSu)	100,00	[W/m²]
U-Wert Außenwand	0,27	[W/m²K]

Optimierte Variante(e)	
Null-Energiebilanz	●
Maximal erreichbare Energiebilanz	●
Einhaltung eines angegebenen Tageslichtquotienten	●
Visuelle Behaglichkeit	●

Tabelle 4.3 Rahmenbedingungen der Simulationen

Wie in jedem Optimierungsverfahren werden die optimierten Varianten nach den in den Rahmenbedingungen vorgegebenen Optimierungszielen bewertet. Die drei Hauptaufgaben bzw. Indikatoren sind: Energiebilanz, Tageslichtquotient und Tageslichtverfügbarkeit im behaglichen Bereich.

Die drei Diagramme in Abbildung 4.8 fassen die lokaloptimalen Zustände zusammen, die von dem Solarenergieoptimierungstool erzeugt wurden. Die Kurven stehen für die Verglasungsanteile, die horizontale Achse repräsentiert den g-Wert (Glas).

Gemäß Abbildung 4.8 kann an dem dargestellten Standort mit einem Verglasungsanteil von 50 % und einem g-Wert (Glas) von 49 % die Null-Energiebilanz erzielt werden. Mit einem Verglasungsanteil von 40 % und einem g-Wert (Glas) von 59 % kann die maximale Energiebilanz erreicht werden, die ca. 9 kWh/m^2 pro Jahr entspricht. Die vorgegebene Grenze des Tageslichtquotienten kann mit einem Verglasungsanteil von 70 % und einem g-Wert (Glas) von 24 % eingehalten werden, allerdings wird an diesem Punkt eine negative Energiebilanz von -22 kWh/m^2.a erreicht. Die maximale Tageslichtverfügbarkeit im behaglichen Bereich kann durch einen Verglasungsanteil von 75 % und einen g-Wert (Glas) von 59 % erreicht werden. Dabei liegen 27 % der Arbeitszeit im Bereich der visuellen Behaglichkeit, wo die Beleuchtungsstärke durch Tageslicht zwischen 300 und 500 lx beträgt. Die Energiebilanz beträgt hier -31 kWh/m^2.a.

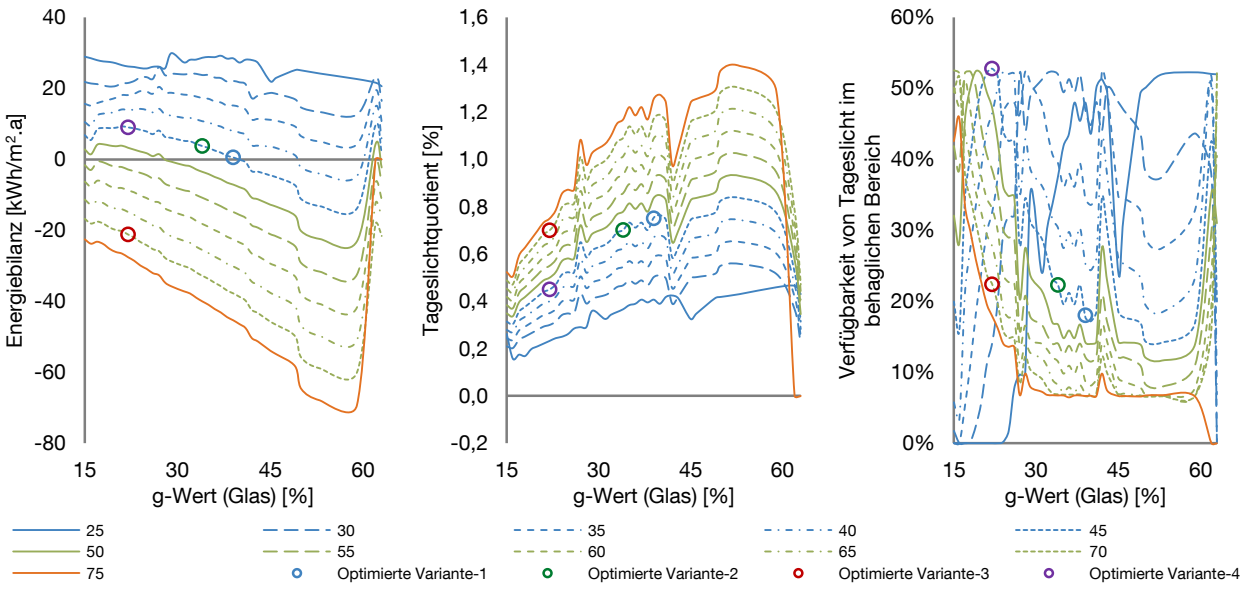


Abbildung 4.8 Darstellung der erzeugten Optimierungsergebnisse für den Standort Jeddah; Ausrichtung: Süd; Die Linien in der Legende Repräsentieren den Verglasungsanteil; Korrelation zwischen t-Wert (Glass) und g-Wert (Glass) berücksichtigt

Wie bereits erwähnt sind die erzeugten optimierten Kriterien lokale Optima, die bestimmte Nebenbedingungen des ausgewählten Optimierungsmodells berücksichtigen. Um die Entscheidung für den Nutzer zu erleichtern, werden die Ergebnisse bewertet. Anhand des rechten Diagramms in Abbildung 4.9 lässt sich feststellen, wie sich welche Variante in Bezug auf Energie, Gestaltung und Behaglichkeit verhält, also wie groß die Abweichung vom absolut optimalen Zustand ist. Aufgrund eines besonderen Blicks oder eines hohen Anspruchs an visuelle Behaglichkeit beispielsweise kann sich ein Architekt mit der vierten Variante dafür entscheiden, keine hohe Energiebilanz aus der Fassadenausrichtung zu erzielen. Das Defizit kann durch andere Maßnahmen wie Verkleinerung des Verglasungsanteils anderer Fassaden oder den Einbau von Windrotoren kompensiert werden.

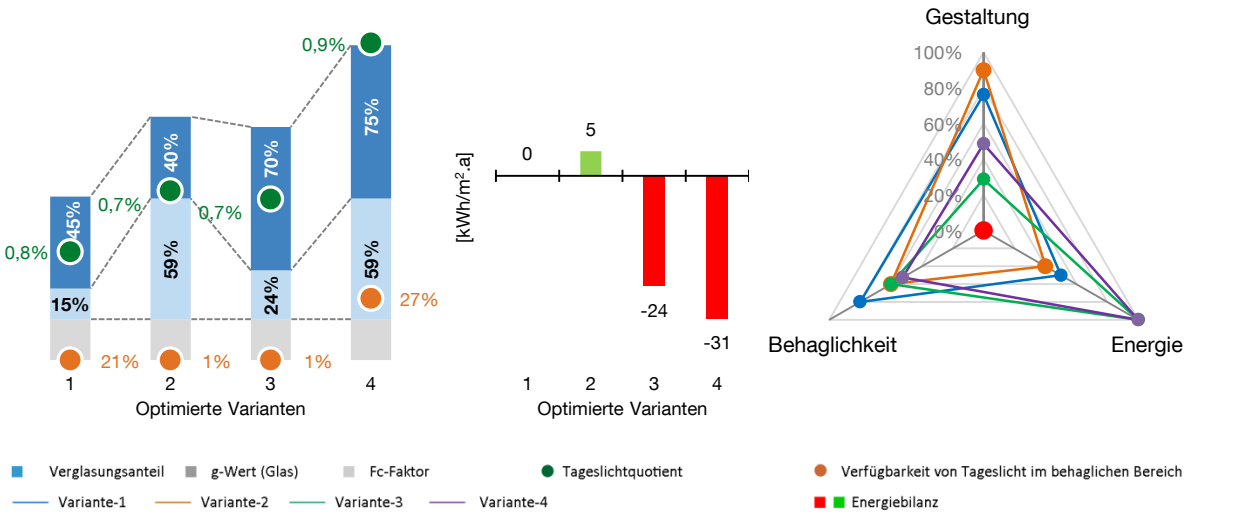


Abbildung 4.9 Darstellung und Bewertung der optimierten Kriterien für den Standort Jeddah; Ausrichtung: Süd

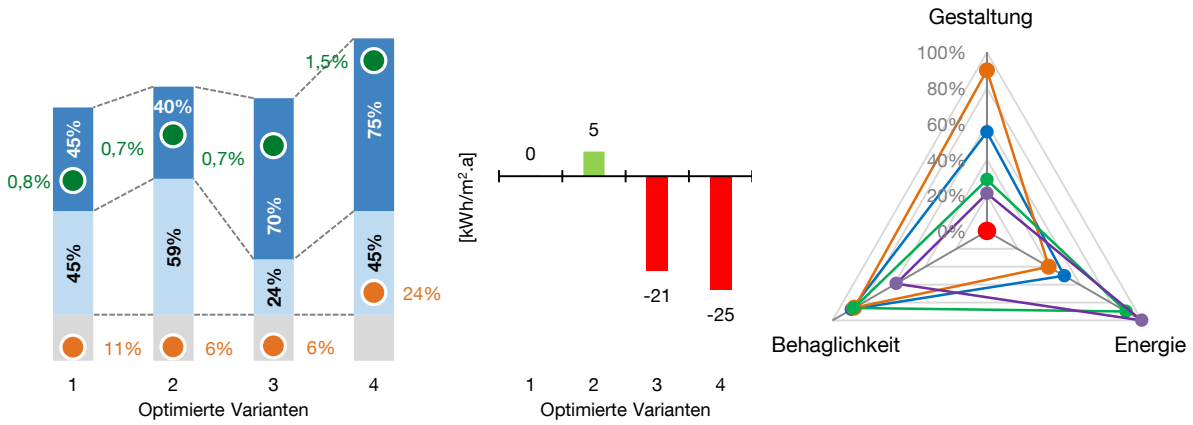


Abbildung 4.10 Darstellung und Bewertung der optimierten Kriterien für den Standort Miami; Ausrichtung: Süd

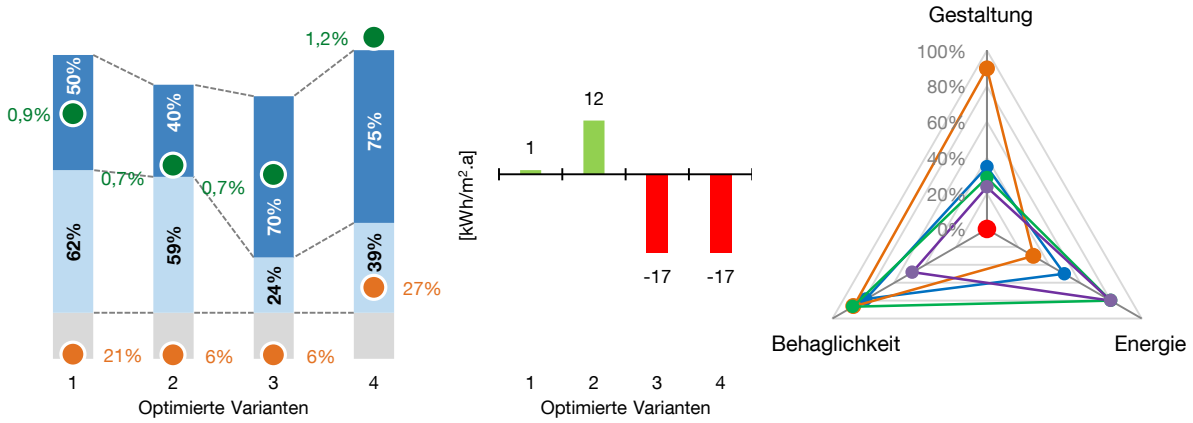


Abbildung 4.11 Darstellung und Bewertung der optimierten Kriterien für den Standort Sydney; Ausrichtung: Nord

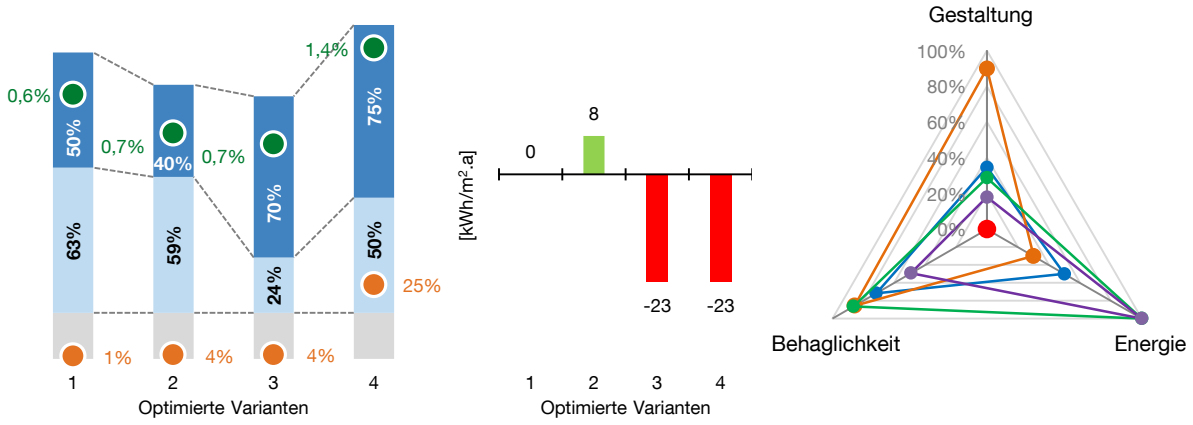


Abbildung 4.12 Darstellung und Bewertung der optimierten Kriterien für den Standort Durban; Ausrichtung: Nord

Die Grafiken in Abbildung 4.10, Abbildung 4.11 und Abbildung 4.12 zeigen die optimierten Kriterien mit ihren Auswirkungen und Bewertungen in Bezug auf die anderen Standorte. Bei der Energiebilanz wird deutlich, wie jeder Standort, trotz einigermaßen ähnlicher optimaler Kriterien, unterschiedlich auf das ausgewählte Optimierungsmodell reagiert.

Die von dem Solarenergieoptimierungstool erzeugten Grafiken, wie in Abbildung 4.8, können weitere Anwendungsbereiche haben. So können sie auch als Werkzeug zur schnellen Abschätzung verwendet werden. Ein Nutzer will z. B. die Performance eines Verglasungsanteils von 50 % und eines g-Werts (Glas) von 50 % bei einem festgelegten Fc-Faktor von 20 % prüfen. Sofort erhält er folgende Auskünfte: Energiebilanz: ca. -5 kWh/m^2.a, Tageslichtquotient: 0,8 % und Anteil der Arbeitsstunden im Bereich der visuellen Behaglichkeit: ca. 0 %.

4.1.3 Optimierungsmodell-6: Optimierung von Verglasungsanteil und Verminderungsfaktor des Sonnenschutzes

In diesem Optimierungsmodell werden ebenfalls zwei Parameter variiert, um die vier Optimierungsziele zu erreichen. Die Parameter sind in diesem Fall der Verglasungsanteil und der Fc-Faktor (Verminderungsfaktor des Sonnenschutzes). Es wurde ein g-Wert (Glas) von 42 % festgelegt. Die Rahmenbedingungen werden in Tabelle 4.4 beschrieben.

Raum		
Standort	Jeddah	[-]
Orientierung	Süd	[-]
Bürofläche	25,9	[m²]
Volumen	77,8	[m^3]
Anzahl der Nutzer	2,0	[-]
Luftwechselrate	1	[h^{-1}]
Photovoltaikzellen		
Verfügbare Fassadenfläche für PV.	Variiert	[-]
Totale verfügbare Fläche	Variiert	[m²]
Neigungswinkel	90,00	[°]
Wirkungsgrad	0,15	[-]
Sonstige Bedingungen		
Spez. Wärmeabgabe Beleuchtung	5,00	[W/m²]
COP (Kälteanlage)	4,50	[-]

Fassade		
Fassadenfläche	10,8	[m²]
Verglasungsanteil	Variiert	[-]
g-Wert	42%	[-]
Fc-Wert	Variiert	[-]
t_L-Wert	Variiert	[-]
U-Wert Fenster	Variiert	[W/m²K]
Schwellwert (SoSu)	100,00	[W/m²]
U-Wert Außenwand	0,27	[W/m²K]

Optimierte Variante(e)	
Null-Energiebilanz	●
Maximal erreichbare Energiebilanz	●
Einhaltung eines angegebenen Tageslichtquotienten	●
Visuelle Behaglichkeit	●

Tabelle 4.4 Rahmenbedingungen der Simulationen

In den zwei Grafiken der Abbildung 4.13 werden die Ergebnisse der Simulation vereinfacht zusammengefasst. In der linken Grafik werden die optimierten Kriterien mit den entsprechenden Energiebilanzen dargestellt. Daneben können die entsprechenden Tageslichtquotienten bzw. Tageslichtverfügbarkeiten betrachtet werden.

Die Null-Energiebilanz kann mit einem Verglasungsanteil von 50 % und einem Fc-Faktor von 15 % erreicht werden. Dabei beträgt der Tageslichtquotient 0,9 %. Die maximale Energiebilanz von ca. 8 kWh/m^2.a kann mit einem Verglasungsanteil von 45 % und einem Fc-Faktor von 9 % erzielt werden. Die Mindestgrenze des Tageslichtquotienten kann bei einem vorgegebenen g-Wert mit 25 % Verglasungsanteil erreicht werden. Durch die Verkleinerung des Verglasungsanteils und die Vergrößerung des Fc-Faktors kann mit 52 % der maximale Anteil der Arbeitszeit im Bereich der visuellen Behaglichkeit stattfinden. Somit ist für die Hälfte der Arbeitszeit eine Versorgung mit angenehmem Tageslicht gewährleistet. Obwohl diese Variante eine hohe Energiebilanz aufweist, benötigt sie anders als beim letzten Fall in Abschnitt 4.1.3 ein kleines Fenster, das keinen hohen Bezug nach außen anbietet, weshalb sie kritisch betrachtet werden kann. Gleichzeitig kann eine solche Variante durchaus angewendet werden, wenn dies beispielsweise durch die Art der Raumnutzung begründet werden kann.

In der folgenden Grafik wird die Auswirkung der optimierten Größen auf die drei Indikatoren dargestellt. Die Grafik kann wieder für weitere Abschätzungen, wie im letzten Abschnitt beschrieben, angewendet werden.

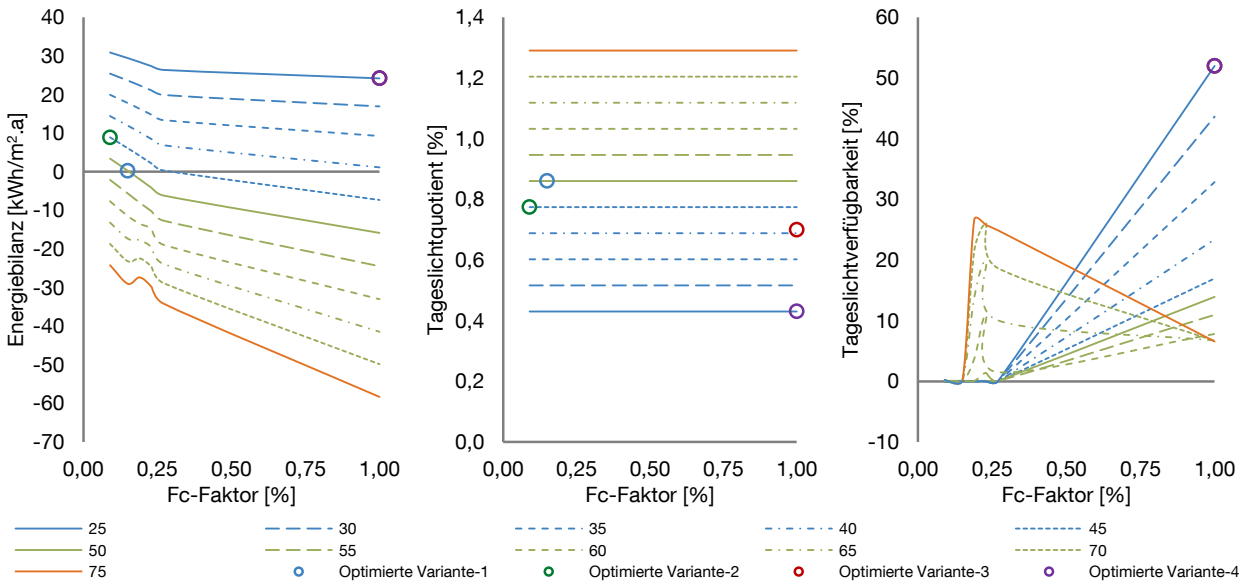


Abbildung 4.13 Darstellung der erzeugten Optimierungsergebnisse für den Standort Jeddah; Ausrichtung: Süd; Die Linien in der Legende Repräsentieren den Verglasungsanteil; Korrelation zwischen t-Wert (Sonnenschutzgewebe) und g-Wert (Glass) berücksichtigt

Anhand der rechten Grafik in Abbildung 4.14 kann schnell festgestellt werden, dass die optimierte Variante-2 die beste ist, da diese nur eine minimale Abweichung von den drei zentralen Aspekten aufweist. Dabei wird durch den starken Sonnenschutz eine Plus-Energiebilanz erreicht. Ohne Sonnenschutz verfügt der Raum über einen hohen Tageslichtquotienten von 9 %. Trotzdem muss der Sonnenschutz einen Großteil des Jahres heruntergezogen werden, um den Energiebedarf zu minimieren und die erwähnte Energiebilanz zu erreichen. Dies führt zu einem Mangel an Tageslichtverfügbarkeit im behaglichen Bereich. Der Sonnenschutz kann aber z. B. morgens oder an bedeckten Tagen geöffnet und die natürliche Beleuchtung mit Kunstlicht unterstützt werden.

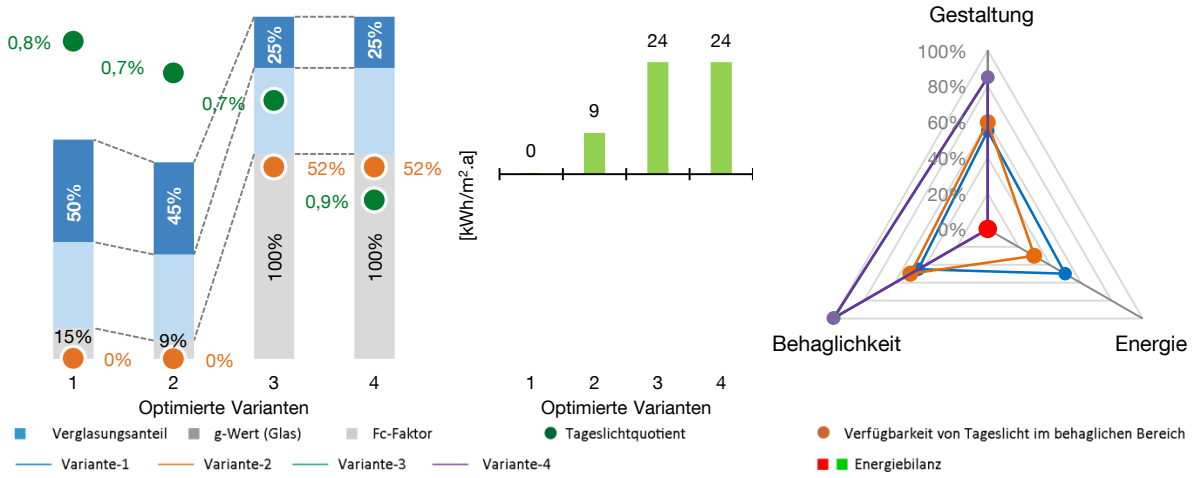


Abbildung 4.14 Dreidimensionale Darstellung des Optimierungsprozesses

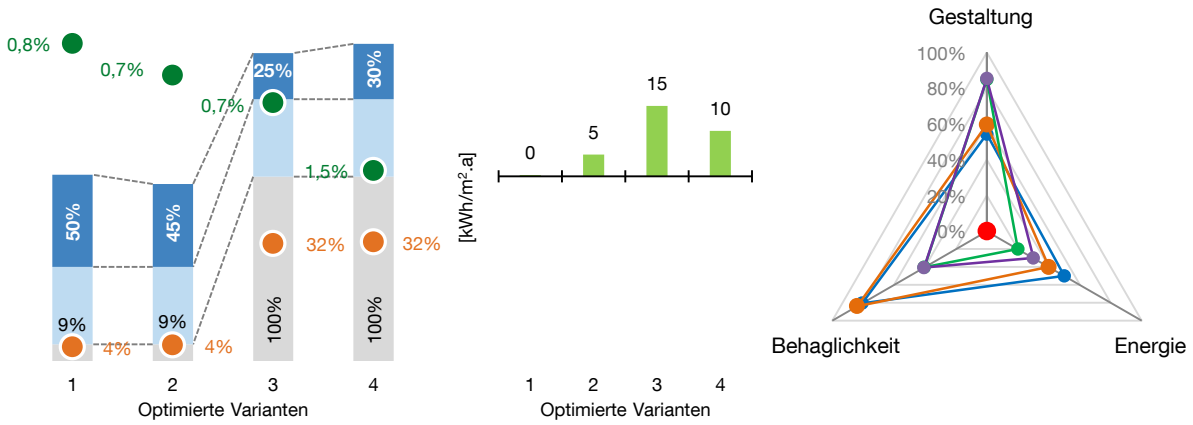


Abbildung 4.15 Darstellung und Bewertung der optimierten Kriterien für den Standort Miami; Ausrichtung: Süd

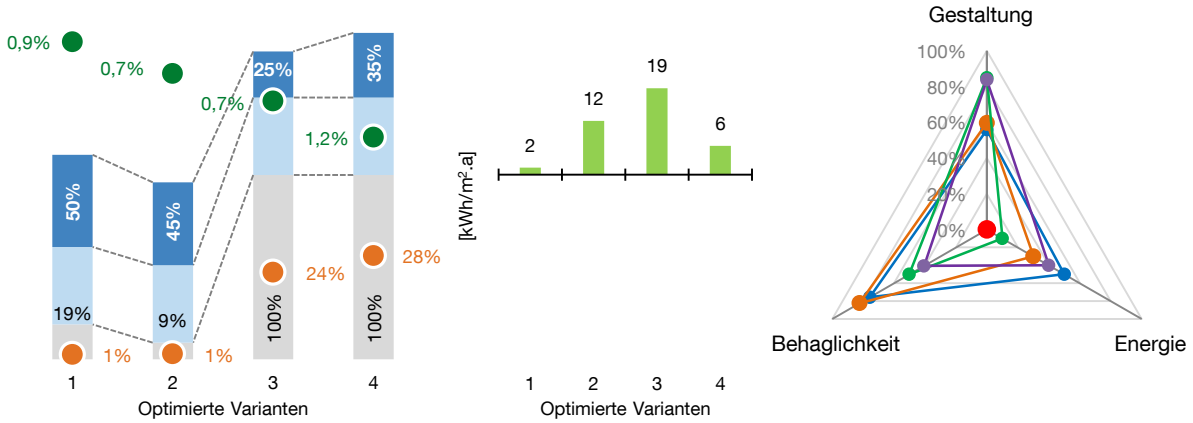


Abbildung 4.16 Darstellung und Bewertung der optimierten Kriterien für den Standort Sydney; Ausrichtung: Nord

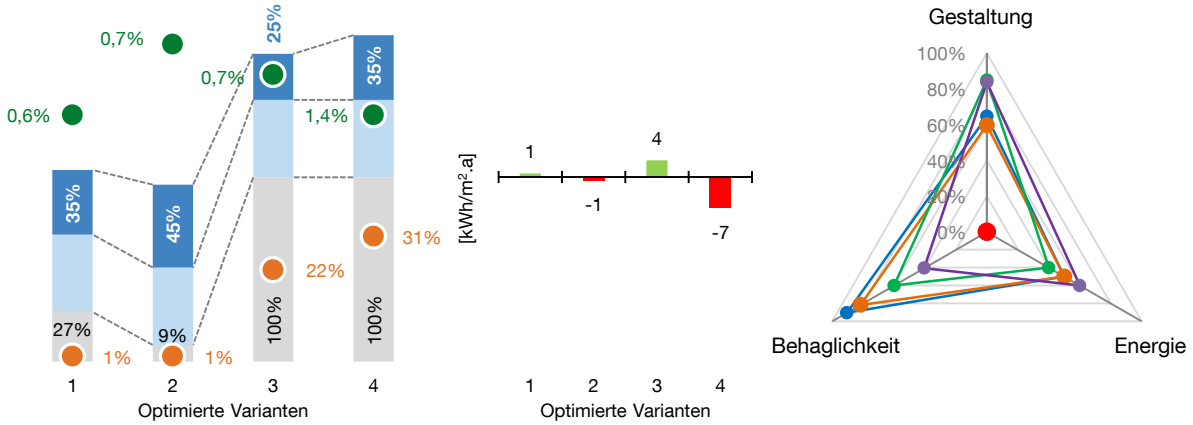


Abbildung 4.17 Darstellung und Bewertung der optimierten Kriterien für den Standort Durban; Ausrichtung: Nord

Anhand der oben dargestellten Grafiken lässt sich feststellen, dass an den untersuchten Standorten die Optimierung des Verglasungsanteils zusammen mit dem Fc-Faktor bei einem mittelgroßen g-Wert (Glas) zu guten Energiebilanzen führt. Bis auf Durban haben alle Standorte die Null- oder Plus-Energiebilanz erzielt. Die Optimierungsvarianten-3 und 4 weisen kleine Abweichungen von den absolut optimalen Zuständen in den Bereichen Energie und Behaglichkeit auf. Hinsichtlich der Gestaltung werden sie aufgrund der kleinen Verglasungsanteile schlecht bewertet. Dies kann vom Architekten aber immer noch subjektiv betrachtet werden, da dieser Punkt von der Gebäudelage und v. a. von seinem Gestaltungswunsch abhängig sein kann.

4.2 Optimierung der Integration von Windrotoren in das Hochhaus

In diesem Teil der Arbeit wird gezeigt, wie durch die optimale Integration von Windrotoren in das Hochhaus eine Plus-Energiebilanz erreicht werden kann. Es werden die Ergebnisse bzw. die lokalen Optima von drei Optimierungsmodellen bezüglich einer Gebäudeform an einem Standort gezeigt. Danach wird das globale Optimum nach Durchführung aller Modelle und Bewertungsverfahren ermittelt. Es wird ein zu erzielender Ertrag von 200 kWh/m^2.a vorgegeben. Die Optimierungsmodelle werden in Abbildung 4.18 dargestellt.

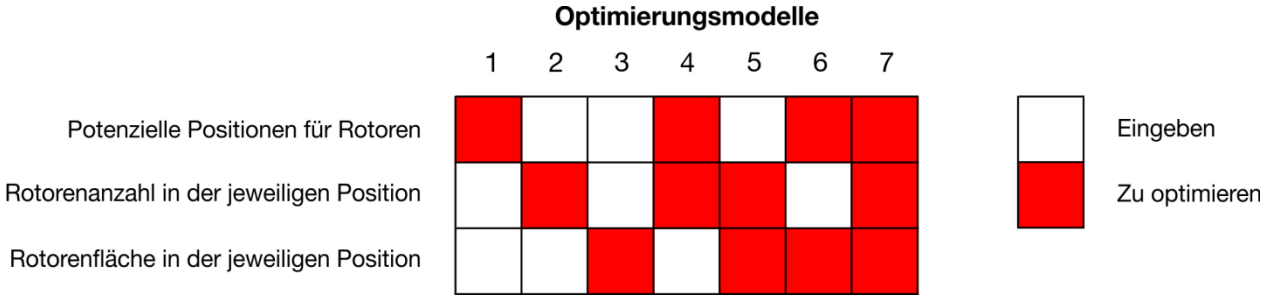


Abbildung 4.18 Optimierungsmodelle des Windenergieoptimierungstools

In der Regel nimmt die Windgeschwindigkeit mit der Höhe zu. Die Gebäudeform eines Hochhauses kann die Windgeschwindigkeit auf dem Dach unterstützen und ihre Verteilung beeinflussen. Das Windenergieoptimierungstool erlaubt dem Nutzer, das Dach für den Einbau von Windrotoren zu nutzen oder auszugrenzen. Das heißt, es kann entweder nur die Fassade berücksichtigt werden oder das Dach mit der Fassade. In jedem Beispiel werden die Optimierungsergebnisse einmal ohne und einmal mit Dach gezeigt.

Das entwickelte Programm erlaubt es dem Planer auch, aus gestalterischen bzw. städtebaulichen Gründen bestimmte Positionen am Gebäude auszuschließen oder gezielt zur Verfügung zu stellen. Dieser Punkt wird in den folgenden Beispielen allerdings nicht berücksichtigt, dem Rechner werden alle Positionen an der Fassade und/oder auf dem Dach zur Verfügung gestellt.

Die erzeugten optimierten Kriterien beziehen sich auf die Windeigenschaften des Standorts und die Simulationsergebnisse der CFD-Simulationen. Einen groben Überblick zur Erklärung der Windströmung um das Gebäude verschaffen Abbildung 3.80 und Abbildung 3.82. Das Windverhalten an den Standorten wird im Abschnitt 3.1.6 beschrieben.

4.2.1 Optimierungsmodell-1: Ermittlung der optimalen Positionen

Das folgende Beispiel zeigt, wie die optimalen Positionen mithilfe des Optimierungsmodells ermittelt werden. Tabelle 4.5 führt die Rahmenbedingungen des simulierten Hochhauses auf. Die Positionen werden nach der Grafik in Abbildung 3.78 gekennzeichnet.

Rahmenbedingungen					
Standort	Jeddah	[-]	Rauigkeitsklasse	2	[-]
Gebäudeform/D.Winkel	Quadrat	0	Umgebungstyp	Stadt	[-]
Geschosshöhe	3	[m]	Exponent (α)	0,22	[-]
Geschosszahl	60	[m]	Grenzschichthöhe (Z_G)	370	[-]
Gebäudehöhe	180	[m]	Dörfer, Kleinstädte, landwirtschaftliches Gelände mit vielen oder hohen Hecken, Wäldern und sehr raues und unebenes Terrain (über eine Rauigkeitslänge von 2000 m).		
Geschossfläche	900	[m^2]			
Gesamtfläche	54000	[m^2]			

Tabelle 4.5 Rahmenbedingungen des Beispiels

Der Aufbau des ersten Optimierungsmodells wird in Tabelle 7.8 vereinfacht dargestellt. Das Ziel ist, herauszufinden, wo an einem bestimmten Standort bei einer bestimmten Gebäudeform und Höhe unter Einbezug von Rotorenflächen und einer begrenzten Anzahl von Rotoren die optimalen Stellen für Windrotoren liegen.

Folgende Darstellung zeigt eine Rangordnung der Windgeschwindigkeiten an verschiedenen Positionen an und auf dem Hochhaus am ausgewählten Standort. Die horizontale Achse repräsentiert die Rotorenpositionen. Die vertikale Achse gibt Auskunft über die Höhe.

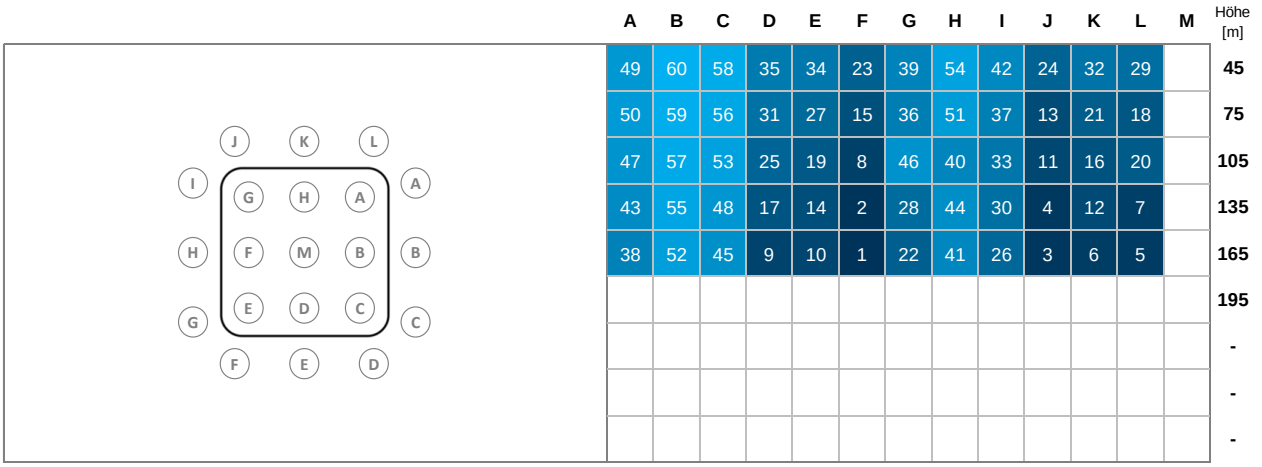
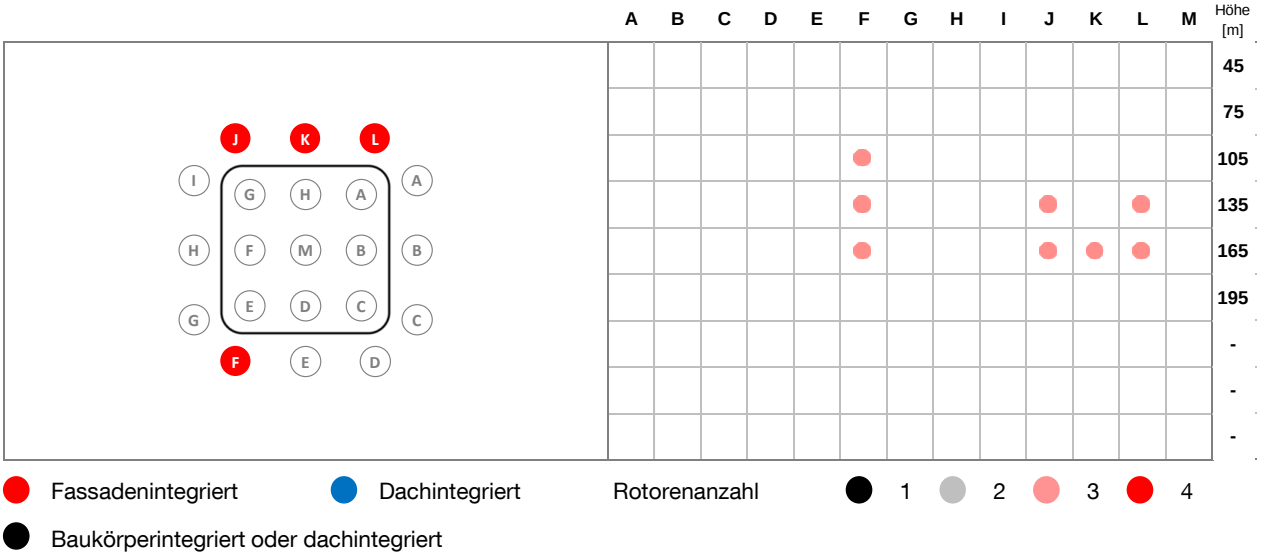


Abbildung 4.19 Rangordnung der Windgeschwindigkeit in Abhängigkeit vom Standort und der Gebäudeform (Windenergieoptimierungstool)

Die wesentlichen Ergebnisse aus der Durchführung des Optimierungsmodells werden im Folgenden dargestellt. Die Grafik links oben in Abbildung 4.20 zeigt durch rote Punkte die optimierten Rotorenpositionen auf dem Grundriss einer angegebenen Gebäudeform. Die anderen Tabellen geben Auskünfte über weitere Details. In der Tabelle oben rechts wird z. B.

die Rotorenanzahl an der jeweiligen Position mit der entsprechenden Höhe gezeigt. Unten links können die Rotorenflächen abgelesen werden.



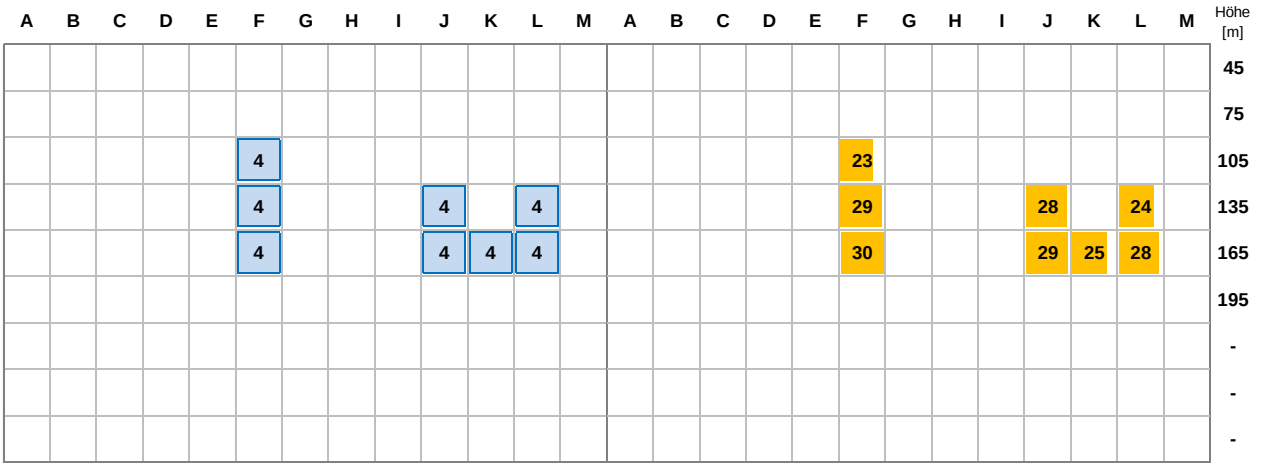
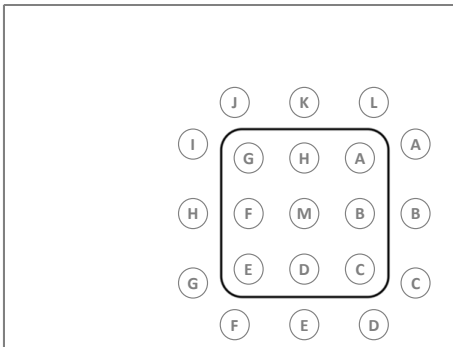


Abbildung 4.20 Ergebnisse des Optimierungsvorgangs (Windenergieoptimierungstool); oben links: Rotorenpositionen; oben rechts: Rotorenanzahl in der jeweiligen Position; unten links: Rotorenflächen in der jeweiligen Position; unten rechts: Erträge aus der jeweiligen Position

Da Rotorenanzahl und Rotorenflächen festgelegt sind, ändern sich die entsprechenden Werte in den genannten zwei Tabellen nicht. Die vierte Tabelle unten rechts zeigt den erwarteten Ertrag aus jeder der oben links gezeigten Positionen. Die Rotorenanzahl wurde auf 3 eingestellt. Die vorgegebene Rotorenfläche beträgt 4 m^2. Dies entspricht einem Radius von 1 m.

Es stellt sich die Frage, wie das System der Windintegration beschaffen ist, wenn das Dach des Hochhauses nicht ausgegrenzt ist. Auch für diesen Fall wird in Abbildung 4.21 die Rangordnung der Windgeschwindigkeiten im Zusammenhang mit Höhe und Position dargestellt.



A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	Höhe [m]
49	60	58	35	34	23	39	54	42	24	32	29		45
50	59	56	31	27	15	36	51	37	13	21	18		75
47	57	53	25	19	8	46	40	33	11	16	20		105
43	55	48	17	14	2	28	44	30	4	12	7		135
38	52	45	9	10	1	22	41	26	3	6	5		165
													195
													-
													-
													-

Abbildung 4.21 Rangordnung der Windgeschwindigkeit in Abhängigkeit vom Standort und der Gebäudeform (Windenergieoptimierungstool)

In der folgenden Abbildung 4.22 wird gezeigt, welches die optimalen Positionen für Windrotoren sind, wenn deren Einbau auch auf dem Dach möglich ist. Aufgrund der herrschenden Windgeschwindigkeiten liegt es auf der Hand, dass sich die meisten Positionen auf dem Dach bzw. auf 195 Meter Höhe befinden. Da am gezeigten Standort der Wind meistens aus Norden und Nordwesten kommt, stellen die ausgewählten Punkte auf dem Dach eine Reaktion darauf dar. An diesen Stellen sind die Windgeschwindigkeiten durch die Kanten, die in Windrichtung stehen, zusätzlich erhöht.

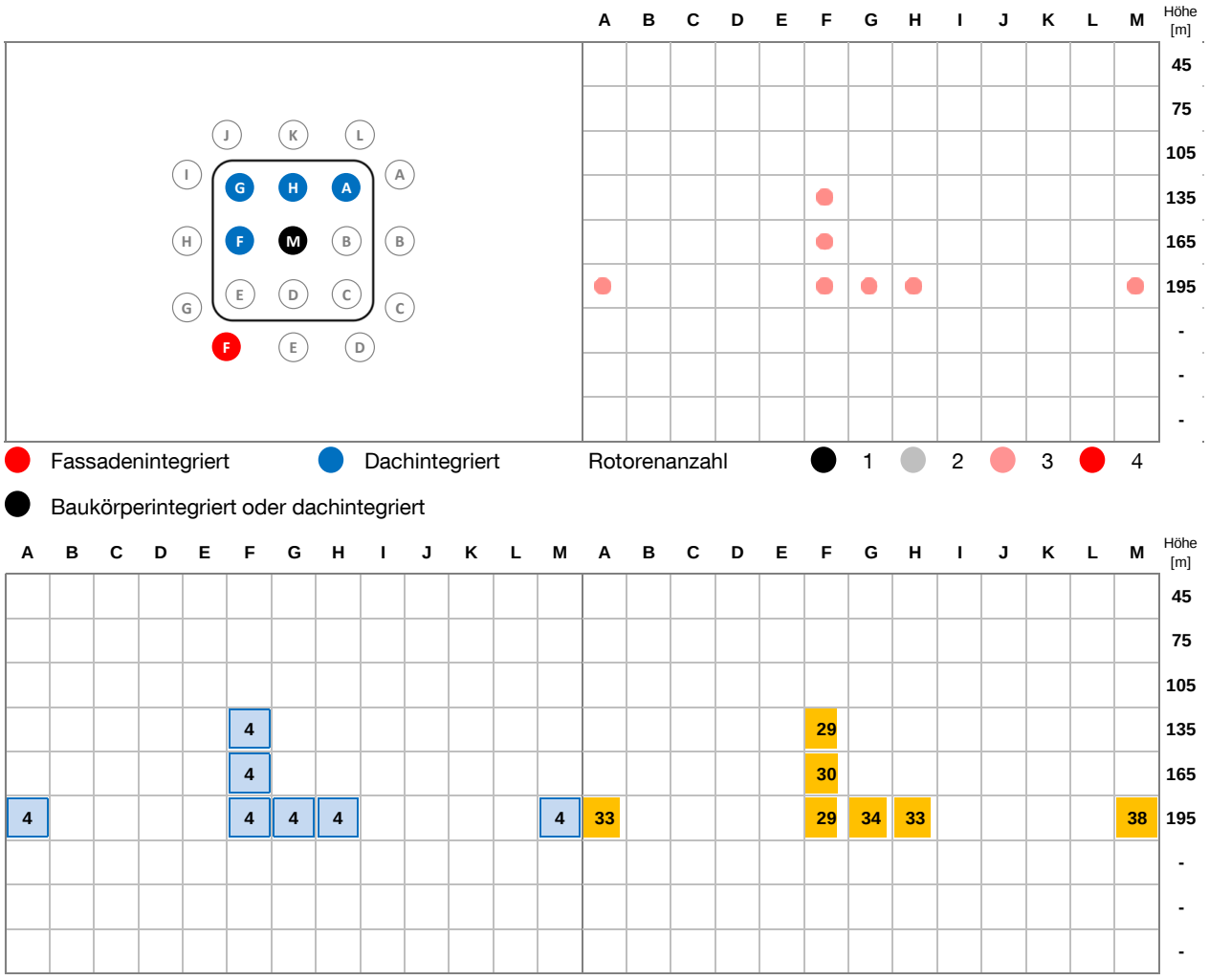


Abbildung 4.22 Ergebnisse des Optimierungsvorgangs (Windenergieoptimierungstool); oben links: Rotorenpositionen; oben rechts: Rotorenanzahl in der jeweiligen Position; unten links: Rotorenflächen in der jeweiligen Position; unten rechts: Erträge aus der jeweiligen Position

Die gemeinsame Betrachtung der Grafiken aus Abbildung 4.21 und Abbildung 4.22 hilft dabei, die Plausibilität des Optimierungsalgorithmus zu prüfen. Es werden immer die besten Positionen nacheinander ausgewählt.

Die kommenden Abbildungen (Abbildung 4.23, Abbildung 4.24, Abbildung 4.25 und Abbildung 4.26) fassen die optimierten Kriterien der drei grundsätzlichen Größen für die vier Standorte zusammen. Das Dach wurde bei den Simulationen ausgegrenzt. Es zeigt sich, dass die Ergebnisse je nach Windverhalten des Standorts variieren. Die Verteilung von Windhäufigkeit, -richtungen und -geschwindigkeiten wird mittels des Windenergieoptimierungstools mit Form und Höhe des Hochhauses korreliert. Das linke Bild zeigt die Rotorenpositionen, das mittlere die Rotorenanzahl in der jeweiligen Position und das rechte die Rotorenflächen in der jeweiligen Position. Der linke Teil der Legende bezieht sich auf das linke Bild, der rechte Teil auf das mittlere Bild.

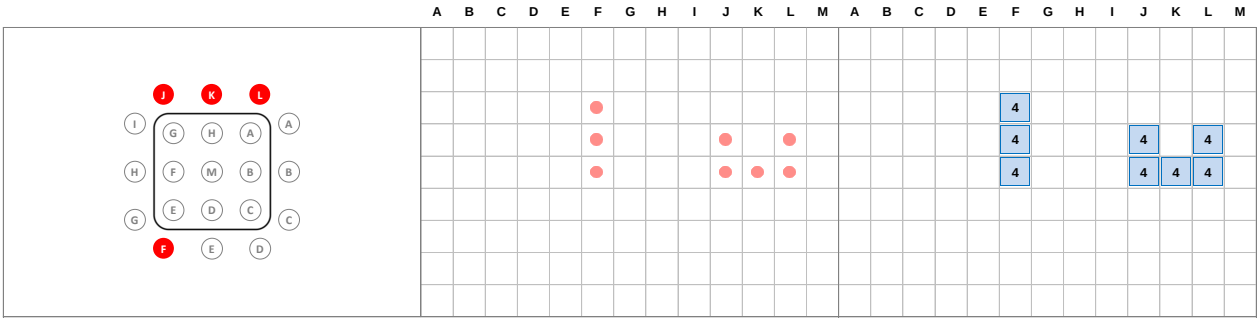


Abbildung 4.23 Optimierte Kriterien zur fassadenintegrierten Windenergie; Standort: Jeddah

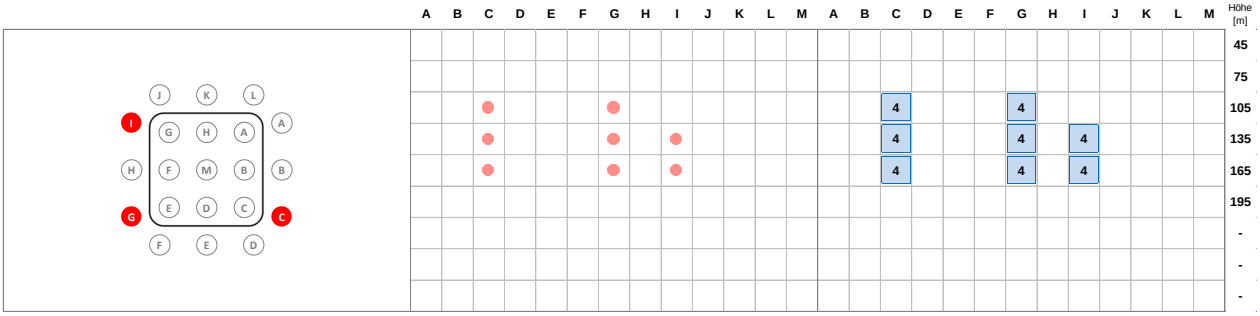


Abbildung 4.24 Optimierte Kriterien zur fassadenintegrierten Windenergie; Standort: Miami

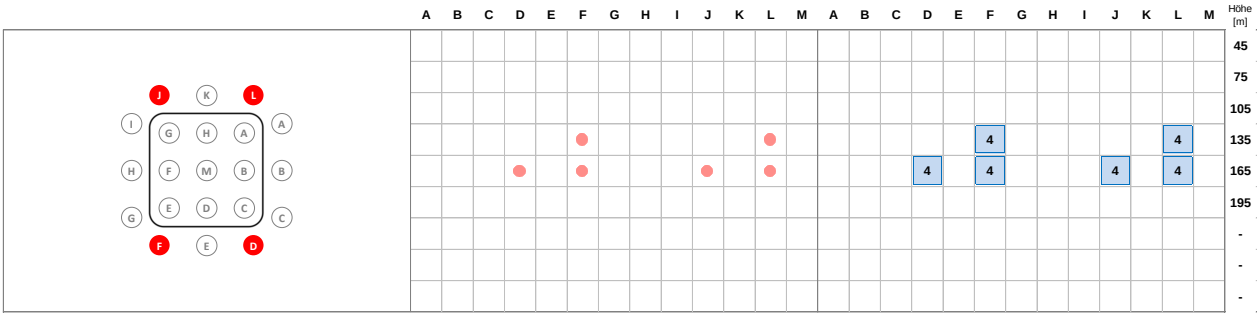


Abbildung 4.25 Optimierte Kriterien zur fassadenintegrierten Windenergie; Standort: Sydney

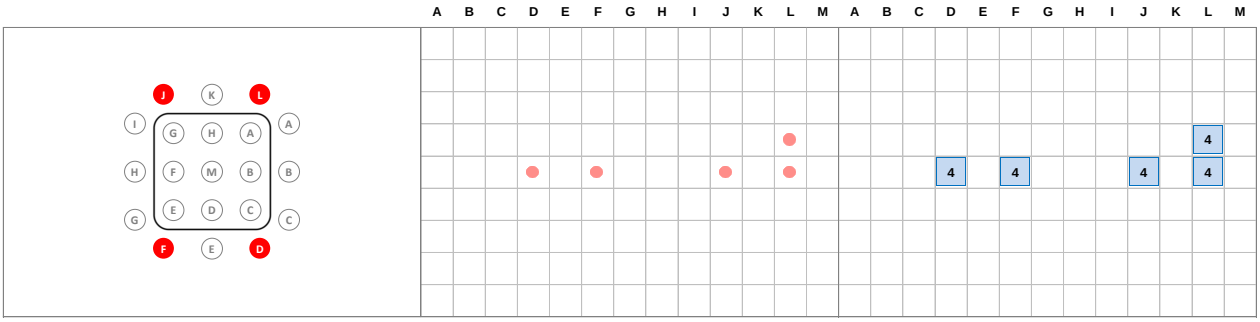


Abbildung 4.26 Optimierte Kriterien zur fassadenintegrierten Windenergie; Standort: Durban

Fassadenintegriert Dachintegriert Rotorenanzahl 1 2 3 4
Baukörperintegriert oder dachintegriert

4.2.2 Optimierungsmodell-4: Ermittlung der minimalen Anzahl an Rotoren in den optimalen Positionen

In diesem Schritt werden Rotorenradius bzw. Rotorenflächen sowie die anderen Rahmenbedingungen noch fest vorgegeben. Es wird untersucht, bei welcher Anzahl an Rotoren an den ermittelten optimalen Positionen ein bestimmtes energetisches Ziel, nämlich ein Ertrag von 200 kWh/m^2.a, erzielt werden kann. Der Nutzer kann wie hier einen gewünschten Ertrag eingeben oder das Energiedefizit vom Fassadenoptimierungstool übertragen lassen. Das heißt, die Energiemenge, die nicht durch fassadenintegrierte Solarenergie abgedeckt werden konnte, kann als durch Windenergie auszugleichendes Defizit angegeben werden. Der Nutzer kann in diesem Modell auch einen Überschuss bedenken und eingeben. Die Ergebnisse des Optimierungsvorgangs werden in Abbildung 4.27 gezeigt. Für die Rotorenfläche wurde 6 m^2 eingegeben, das heißt, der Rotorenradius beträgt 1,4 m.

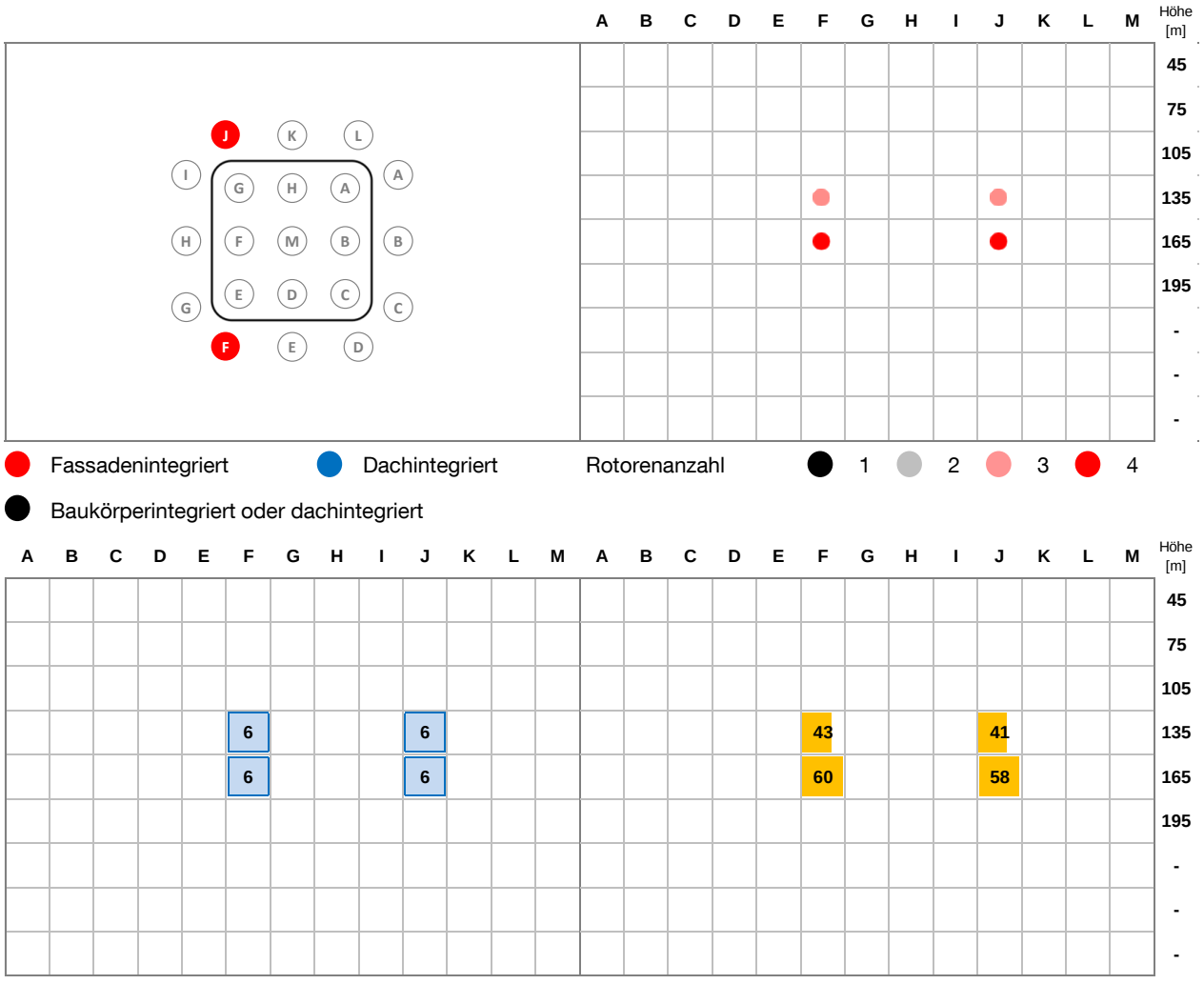
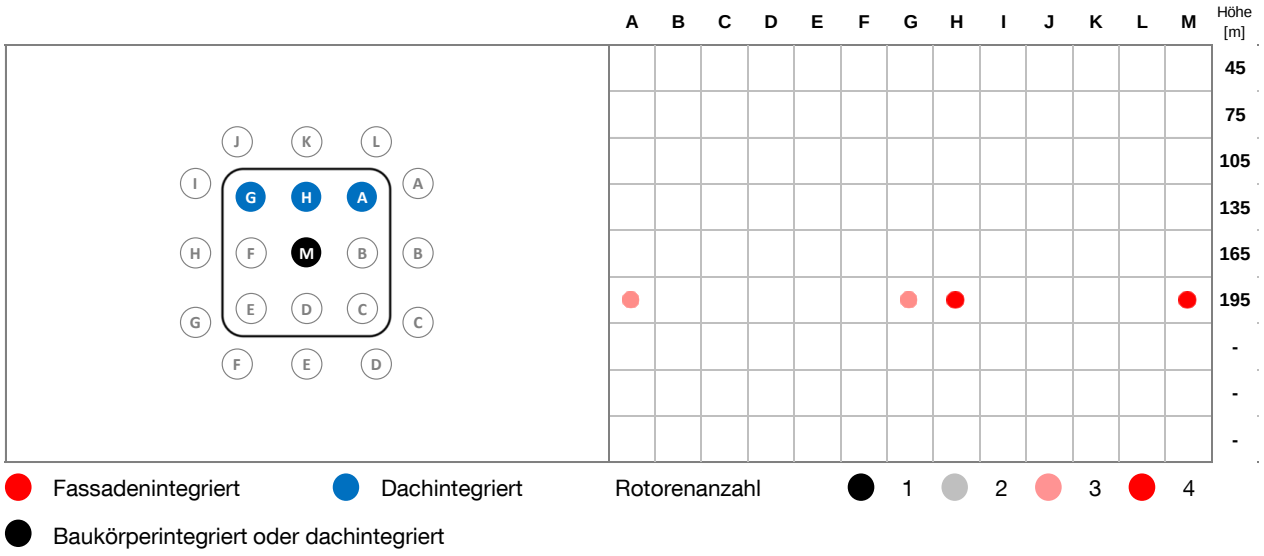


Abbildung 4.27 Ergebnisse des Optimierungsvorgangs (Windenergieoptimierungstool); oben links: Rotorenpositionen; oben rechts: Rotorenanzahl in der jeweiligen Position; unten links: Rotorenflächen in der jeweiligen Position; unten rechts: Erträge aus der jeweiligen Position

Das Diagramm in Abbildung 4.27 zeigt die optimalen Positionen der Rotoren mit den entsprechenden wesentlichen Kriterien. Es ist auch hier sehr deutlich, dass sich die vom Programm ausgewählten Rotorenpositionen auf dem Dach befinden. Im nächsten Diagramm wird die optimale Anzahl der Rotoren an jeder der optimalen Positionen dargestellt. Diese Größe wird nach dem Windverhalten am Standort optimiert. An der Position G auf 195 m Höhe herrschen z. B. relativ hohe Windgeschwindigkeiten, daher werden dort vier Rotoren integriert.



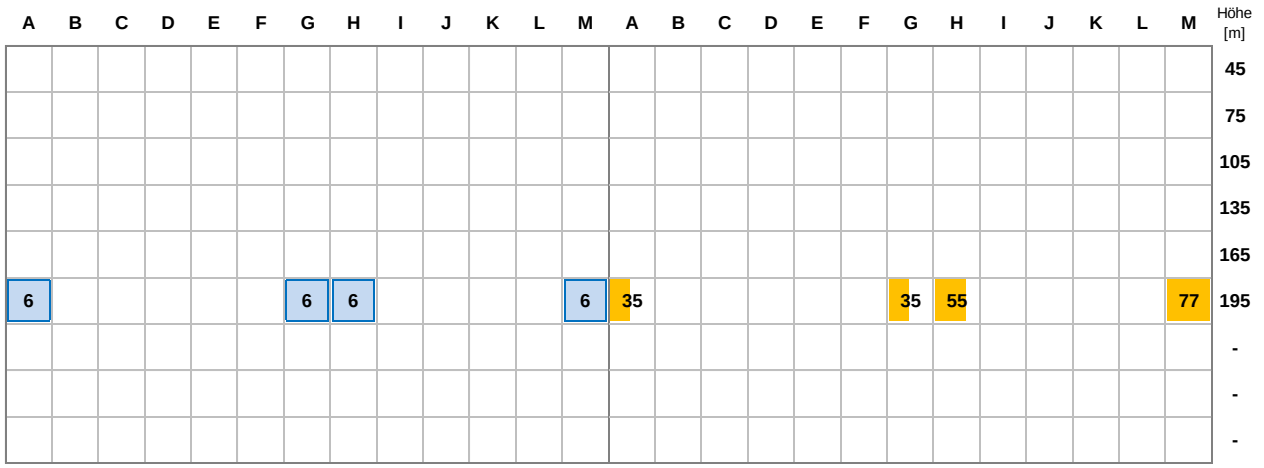


Abbildung 4.28 Ergebnisse des Optimierungsvorgangs (Windenergieoptimierungstool); oben links: Rotorenpositionen; oben recht: Rotorenanzahl in der jeweiligen Position; unten links: Rotorenflächen in der jeweiligen Position; unten rechts: Erträge aus der jeweiligen Position

Im Algorithmus des Programms wurde die Gesamtanzahl der Rotoren unter Einbezug der Rotorenflächen minimiert. Dazu wurden die Rotoren an die optimalen potenziellen Positionen gelegt. Eine weitere Optimierungsmaßnahme zur Erhöhung der Wirtschaftlichkeit ist die Optimierung der Rotorenflächen, sofern dieser Parameter vom Rotorenhersteller einigermaßen flexibel vorgegeben werden kann. Die folgenden Grafiken in Abbildung 4.29, Abbildung 4.30 und Abbildung 4.31 zeigen die Ergebnisse desselben Modells für die vier Standorte.

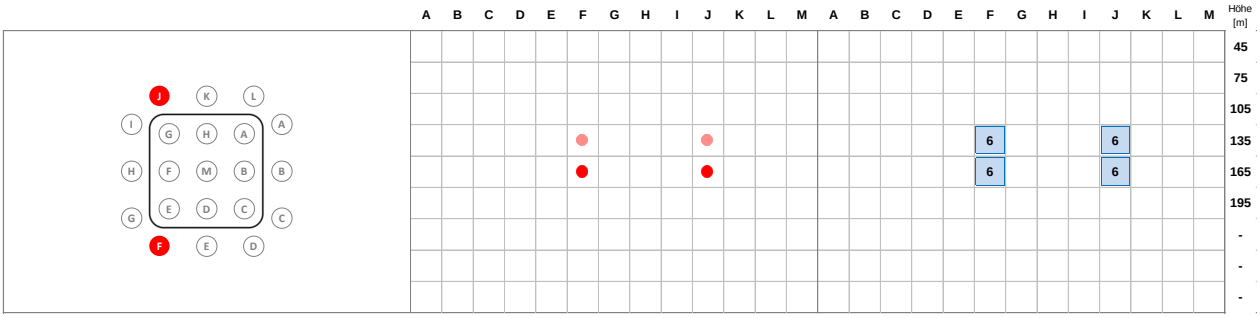


Abbildung 4.29 Optimierte Kriterien zur fassadenintegrierten Windenergie; Standort: Jeddah

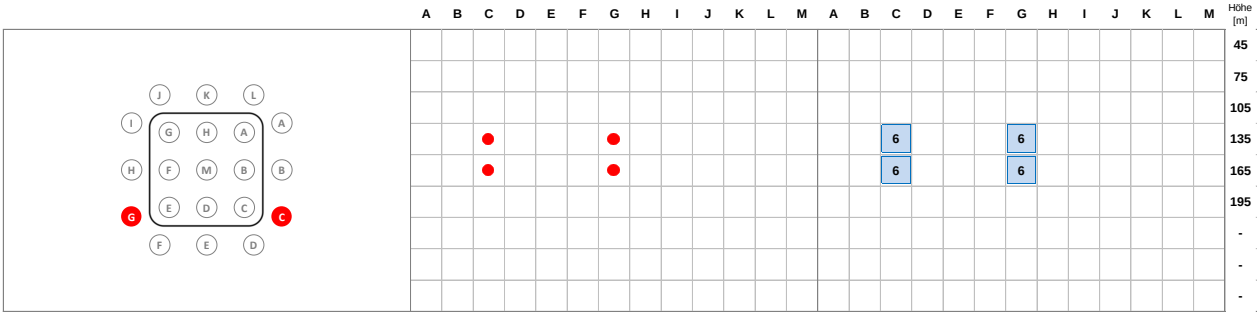


Abbildung 4.30 Optimierte Kriterien zur fassadenintegrierten Windenergie; Standort: Miami

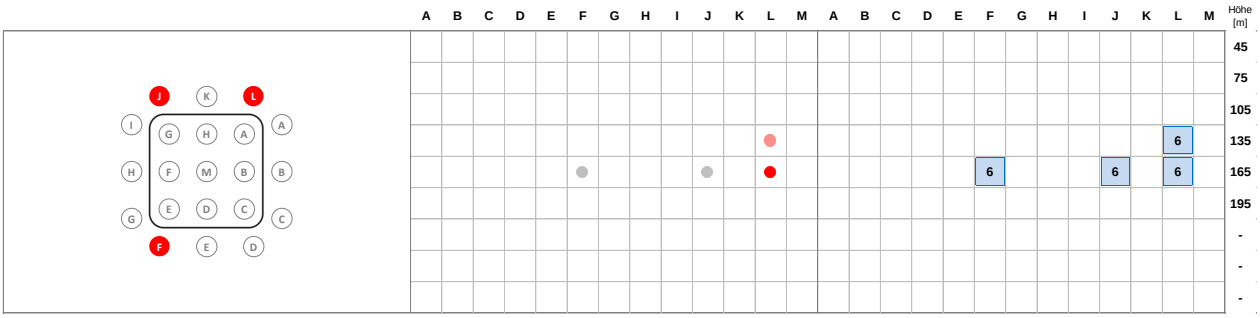


Abbildung 4.31 Optimierte Kriterien zur fassadenintegrierten Windenergie; Standort: Sydney

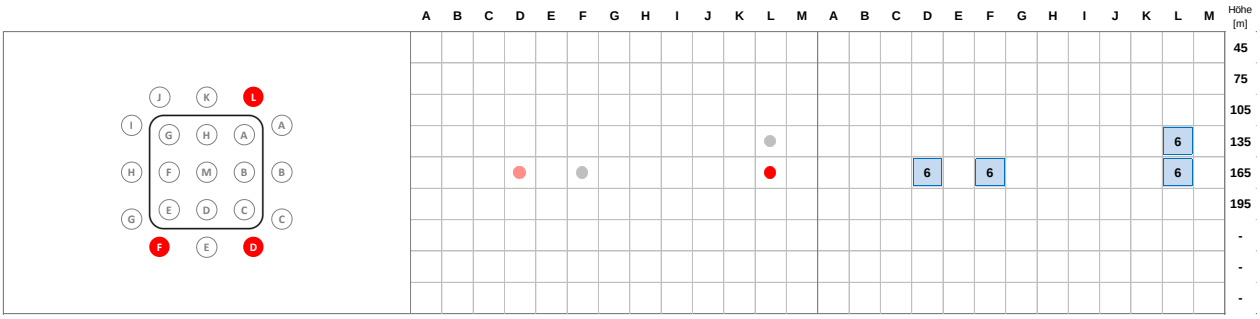


Abbildung 4.32 Optimierte Kriterien zur fassadenintegrierten Windenergie; Standort: Durban

Fassadenintegriert Dachintegriert Rotorenanzahl 1 2 3 4
Baukörperintegriert oder dachintegriert

4.2.3 Optimierungsmodell-6: Ermittlung der optimalen Rotorenflächen in den optimalen Positionen

Im nächsten Schritt wird festgestellt, wo die Rotoren am besten eingebaut werden sollten und was die optimalen Rotorenflächen sind, unter Einbezug der vorgegebenen Rotorenanzahl in der jeweiligen Position. Dafür wird das Optimierungsmodell-6 verwendet, in dem zwei Größen gleichzeitig optimiert werden. Es wird vorausgesetzt, 200 kWh/m^2.a zu erreichen. Die Grafiken in Abbildung 4.33 stellen die Ergebnisse des Optimierungsprozesses für den Standort Jeddah dar. Wie oben rechts zu sehen, wurde der Einbau von zwei Rotoren in jeder Position festgesetzt. Den unteren Grafiken kann entnommen werden, dass die Rotorenflächen der hohen Rotoren größer sind als die der niedrigen. Dies ist auf das Energiepotenzial der Rotorenpositionen zurückzuführen, das hauptsächlich von der herrschenden Windgeschwindigkeit bestimmt wird.

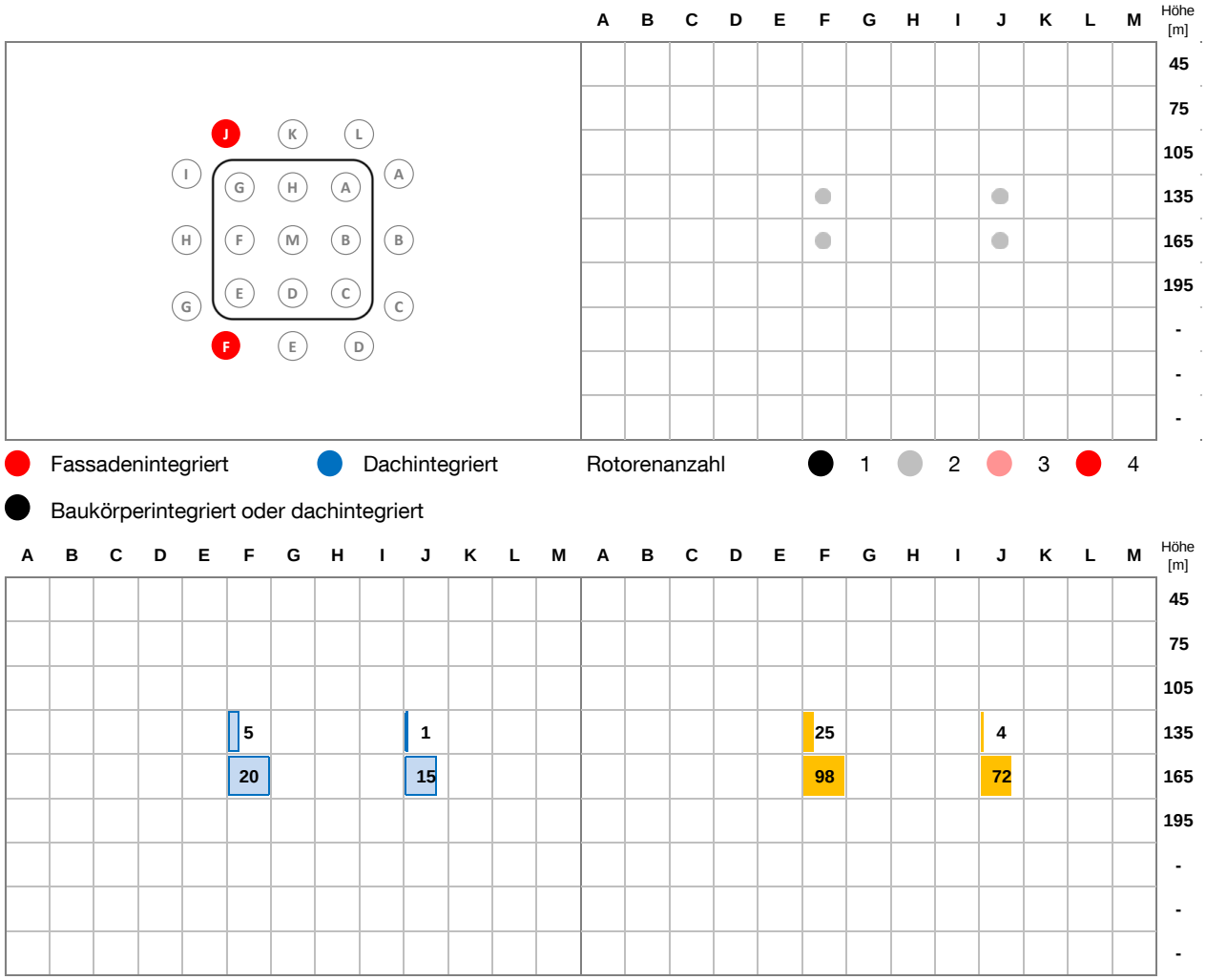
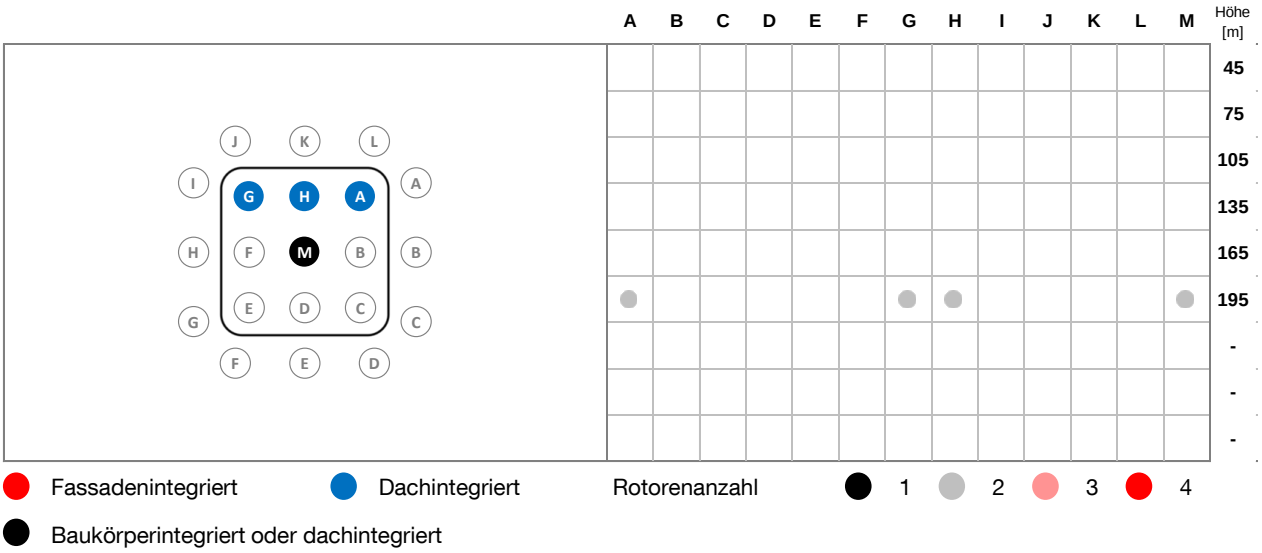


Abbildung 4.33 Ergebnisse des Optimierungsvorgangs (Windenergieoptimierungstool); oben links: Rotorenpositionen; oben rechts: Rotorenanzahl in der jeweiligen Position; unten links: Rotorenflächen in der jeweiligen Position; unten rechts: Erträge aus der jeweiligen Position

Abbildung 4.34 zeigt die Auswirkung für den Fall, dass das Dach nicht ausgegrenzt wird. Wie in den anderen Modellen beschrieben, herrschen auf dem Dach relativ hohe Windgeschwindigkeiten, weshalb die Positionen auf dem Dach vom Programm meistens bevorzugt werden.

In den Positionen A und I sind ganz kleine Rotoren vorgesehen, deren Fläche nur 1 m^2 beträgt. Dies ist eine Frage der Investition, da die Anzahl der Rotoren eine entscheidende Rolle für die Kosten spielt. Man könnte mittels eines anderen Modells die Rotorenanzahl verkleinern, um das energetische Ziel mit möglichst geringer Rotorenanzahl zu erreichen.



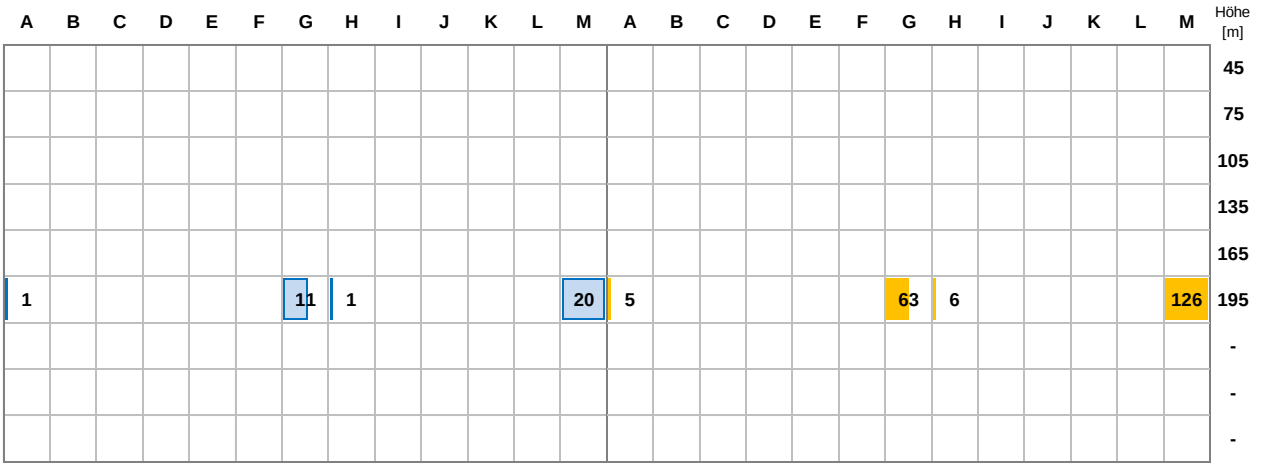


Abbildung 4.34 Darstellung der Anzahl der zu installierenden Rotoren mit deren Höhen und Positionen

Nachfolgend werden in Abbildung 4.35, Abbildung 4.36 und Abbildung 4.37 die Optimierungsergebnisse hinsichtlich der fassadenintegrierten Rotoren für die vier Standorte gezeigt.

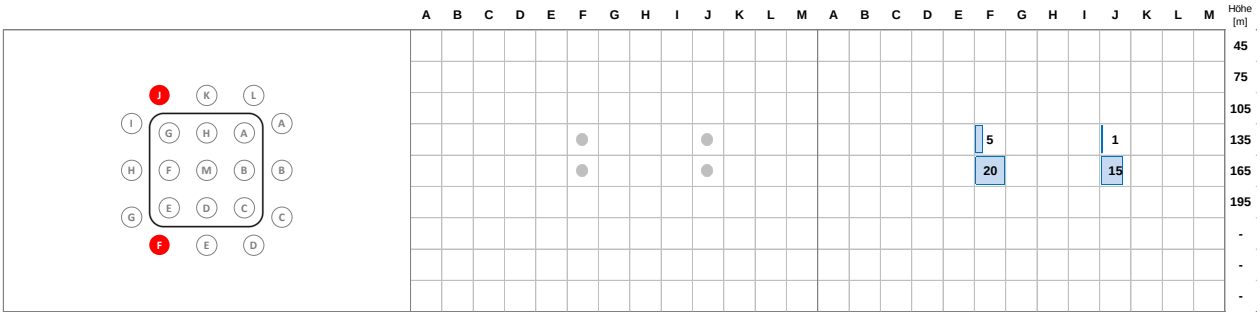


Abbildung 4.35 Optimierte Kriterien zur fassadenintegrierten Windenergie; Standort: Jeddah

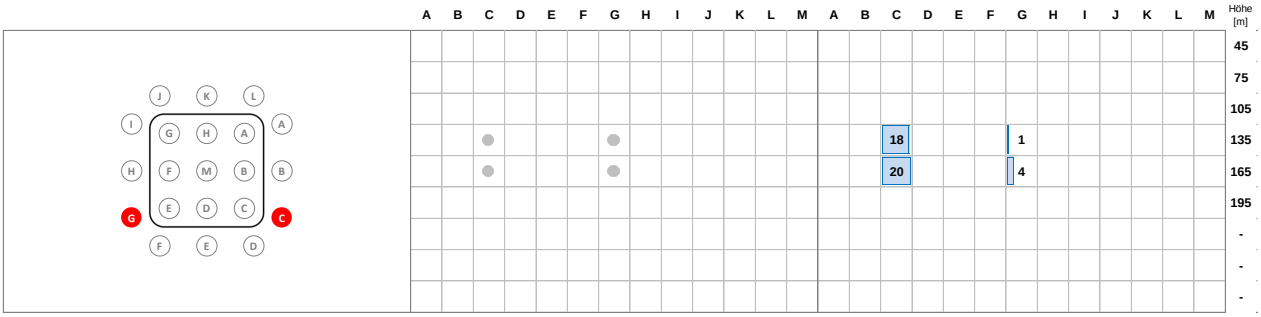


Abbildung 4.36 Optimierte Kriterien zur fassadenintegrierten Windenergie; Standort: Miami

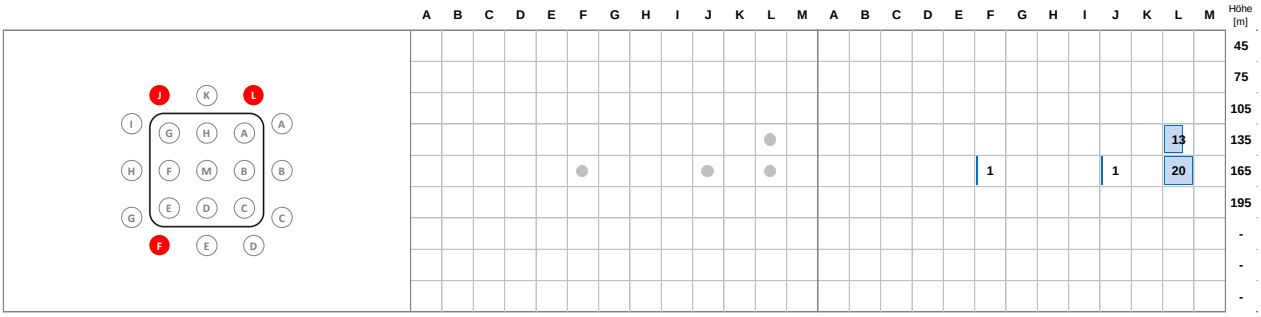


Abbildung 4.37 Optimierte Kriterien zur fassadenintegrierten Windenergie; Standort: Sydney

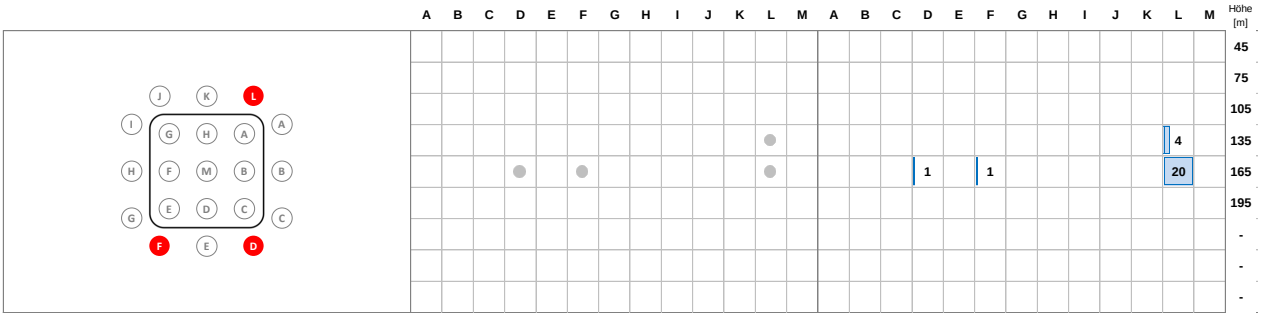
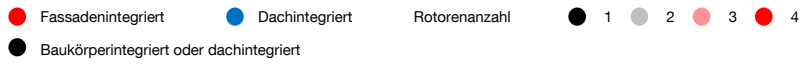


Abbildung 4.38 Optimierte Kriterien zur fassadenintegrierten Windenergie; Standort: Durban



4.3 Anwendung der Werkzeuge auf verschiedene Hochhausformen an den unterschiedlichen Standorten

In den bisherigen Abschnitten wurde die Funktionalität jedes der zwei Teilwerkzeuge für sich diskutiert. Im Folgenden wird nun gezeigt, wie sich das Solarenergieoptimierungstool und das Windenergieoptimierungstool zur Erzeugung eines Kriterienberichts ergänzen, der zur Plus-Energiebilanz führt. Dabei spielen die Bauform und ihre Rotationswinkel, die sich von Standort zu Standort unterscheiden, eine entscheidende Rolle. Daher werden nach der in Abbildung 4.39 folgenden Matrix Optimierungsergebnisse für vier Ausgangsformen an den vier Standorten dargestellt. Die Ergebnisse werden im Hinblick auf die Klimaeigenschaften der Standorte (Abschnitt 3.1.6) und die Strömungsdynamik um die simulierten Gebäudeformen diskutiert.

Im Abschnitt 4.1 wurde die Funktion des Solarenergieoptimierungstools auf der Ebene einer Fassade beschrieben. Hier wird es nun auf alle Hochhausfassaden angewendet, um die Gesamtenergiebilanz festzustellen. Eine Erklärung liefert die Grafik in Abbildung 4.40. Die Tabelle 4.6 gibt Auskunft über die Rahmenbedingungen der gezeigten Optimierungsergebnisse. Die ermittelten Daten stellen im Endeffekt eine Probe der Fähigkeiten der entwickelten Werkzeuge dar.

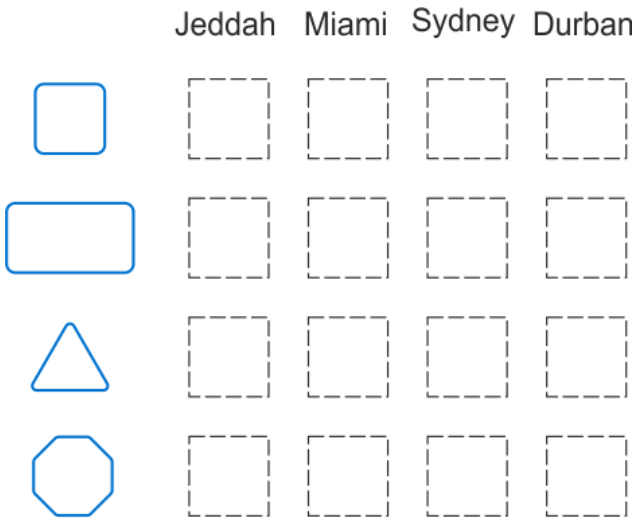


Abbildung 4.39 Erklärung der untersuchten Elemente

Bei den Rahmenbedingungen kann festgestellt werden, dass viele Parameter auf „Variiert“ eingestellt sind. Das bedeutet, dass diese durch die Optimierung mehrere Werte haben werden. Das gilt auch für die Formen und Standorte, die nach der oben gezeigten Matrix variiert werden. Für keine der Formen wird ein Drehwinkel berücksichtigt, da das Ziel dieser Darstellung nur die unterschiedlichen Ergebnisse in Abhängigkeit von Form und Standort sind. Trotzdem kann das Programm diese Funktion bei Bedarf erfüllen.

Hochhaus		
Standort	Variiert	[-]
Gebäudeform	Variiert	[-]
Drehwinkel	0	[°]
Geschosshöhe	3	[m]
Geschosszahl	38	[m]
Gebäudehöhe	180	[m]
Geschossfläche	900	[m^2]
Gesamtfläche	34200	[m^2]

Raum		
Bürofläche	25,9	[m²]
Volumen	77,8	[m^3]
Anzahl der Nutzer	2	[-]
Luftwechselrate	0,5	[h^{-1}]

Rahmenbedingungen des Solarenrgieoptimierungstools		
Verfügbare Fassadenfläche für PV	90	[%]
Totale verfügbare Fläche	Variiert	[m²]
Neigungswinkel	90	[°]
Wirkungsgrad	0,15	[-]

Fassade		
Orientierung	Variiert	[-]
Fassadenfläche	10,80	[m²]
Verglasungsanteil	Variiert	[-]
g-Wert	Variiert	[-]
Fc-Wert	Variiert	[-]
t_L-Wert	Variiert	[-]
U-Wert Fenster	Variiert	[W/m²K]
Schwellwert (SoSu)	100,00	[W/m²]
U-Wert Außenwand	0,27	[W/m²K]

Sonstige Bedingungen		
Spez. Wärmeabgabe Beleuchtung	4,0	[W/m²]
COP (Kälteanlage)	4,5	[-]

Rahmenbedingungen des Windenrgieoptimierungstools		
Rauigkeitsklasse	2	[-]
Umgebungstyp	Stadt	[-]
Exponent (α)	0,22	[-]
Grenzschichthöhe (Z_G)	370	[-]
Dörfer, Kleinstädte, landwirtschaftliches Gelände mit vielen oder hohen Hecken, Wäldern und sehr raues und unebenes Terrain.		
Ausgrenzung des Daches	Ja	[-]

Tabelle 4.6 Rahmenbedingungen der Simulationen

Der Aufbau der folgenden Grafik lässt sich folgendermaßen erklären: Auf der rechten Seite lässt sich die Energiebilanz nach Optimierung der Fassaden im Hinblick auf Energieeinsparung und Solarenergieerzeugung feststellen. In der Mitte des Kreises wird die simulierte Bauform gezeigt. Da alle Angaben in Prozent gemacht wurden, stellt der äußere Ring einen Maßstab zwischen 0 % und 100 % dar, womit die Werte der weiteren Ringe einfach abgelesen werden können.

Jeweils die ersten drei Ringe im Kreis von außen geben Auskunft über die optimalen Fassadenkriterien, nämlich Verglasungsanteil, g-Wert und Fc-Faktor. Danach folgt der vierte Ring, der nur dem Abstand zwischen den Kriterien und deren Folgen dient. Die unter Umständen vorliegende dunkelgraue Fläche im fünften Ring weist darauf hin, wie hoch die Tageslichtverfügbarkeit im behaglichen Bereich ist.

Danach folgt der Ring des Tageslichtquotienten, dessen Maßstab auf dem äußeren Ring zwischen 0 % und 2 % liegt. Im innersten Ring erhält der Nutzer Auskunft über die Abweichung vom absolut optimalen Zustand. Die in diesem Abschnitt gezeigten Optimierungsergebnisse sind allerdings vorbewertet und nach der minimalen Abweichung vom absolut optimalen Zustand ausgewählt.

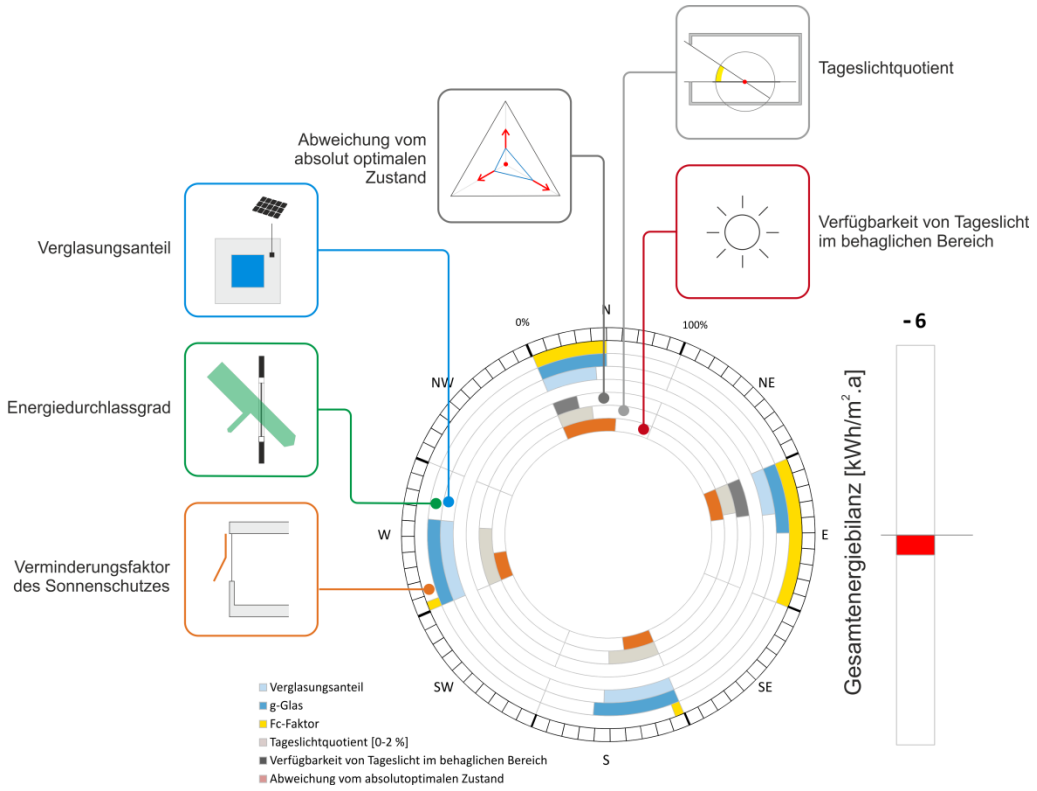


Abbildung 4.40 Erklärung der Optimierungsergebnisse aus dem Solarenergieoptimierungstool

Nach Feststellung der Energiebilanz wird ein zur Abdeckung des Energiedefizits sowie zur Einspeisung ins Netz zu erzielender Energieertrag festgesetzt. In den hier ausgeführten Beispielen wurde ein Ertrag von 400 kWh/m^2.a angegeben. Dieser lässt sich durch das Windenergieoptimierungstool erreichen. Am Ende bekommt der Nutzer eine Reihe von Kriterien, deren Komponenten in Abbildung 4.41 beschrieben sind.

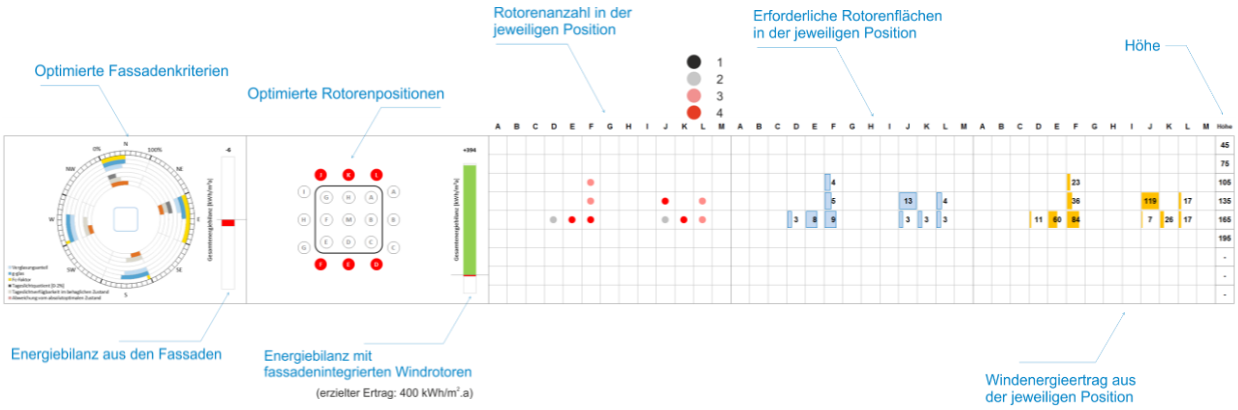


Abbildung 4.41 Überblick über den Aufbau des Kriterienberichts

4.3.1 Jeddah

In den Diagrammen in Abbildung 4.42 geht es um die optimalen Kriterien zum Erreichen der Plus-Energiebilanz bei einer quadratischen Bauform am Standort Jeddah. Auffällig ist oben links die negative Energiebilanz, die trotz Optimierung der Fassade auftritt. Der erzielte Ertrag beträgt 400 kWh/m^2.a. Der grüne Balken oben rechts zeigt, dass – dank Optimierung – nur ein kleiner Teil des Ertrags zur Abdeckung des Defizits benötigt wird und der Rest ins Netz eingespeist werden kann. Das Diagramm unten links erklärt die Rotorenanzahl in der jeweiligen Position und das rechte Diagramm stellt die Rotorenflächen in der jeweiligen Position dar. Der gelbe Ring im Diagramm oben links macht deutlich, dass die Süd- und Westfassade einen sehr wirksamen Sonnenschutz brauchen, während bei der Ostfassade ein Fc-Faktor von 100 % bzw. kein Sonnenschutz steht. Interessanterweise braucht auch die Nordfassade einen Sonnenschutz von ungefähr 50 %, da die Sonne im Sommer von Nordosten her aufgeht, was eine hohe Wärmeaufnahme im Raum verursachen kann. Die Tageslichtverfügbarkeit im behaglichen Bereich kann in den Ost- und Nordräumen mittels der gezeigten Kriterien erzielt werden.

Die Fassaden des Rechtecks weisen ähnlich optimale Eigenschaften auf wie das Quadrat, was dazu führt, dass kein erheblicher Unterschied in der Energiebilanz festgestellt werden kann. Dies zeigt sich in Abbildung 4.43. Nach den Strömungsbildern in Abbildung 3.80 herrschen die hohen Windgeschwindigkeiten beim Rechteck wie beim Quadrat an den Ecken. An den Punkten C und G liegt eine hohe Rotorenanzahl vor, was auf das hohe Windpotenzial an diesen Stellen hinweist.

Abbildung 4.44 zeigt die Optimierungsergebnisse für die Bauform Dreieck. Es kann festgestellt werden, dass ein Dreieck, von dem zwei Fassaden nach Nordwesten und Nordosten ausgerichtet sind, am Standort Jeddah eine schlechtere Energiebilanz erzielt als das Quadrat. Auffällig ist, dass die nordwestliche Fassade keinen Sonnenschutz benötigt. Aufgrund der Hauptwindrichtung in Jeddah, Nord und Nordwest, intensiviert sich die Windgeschwindigkeit um die untere linke Ecke. Daher werden viele Rotoren in der Position H empfohlen. Der Rücklauf der Windströmung trägt dazu bei, dass hohe Windgeschwindigkeiten an der Südfassade auftreten.

Die Energiebilanz im Oktagon nach Abbildung 4.45 ist mehr oder weniger ähnlich zu der im Dreieck. Auffällig sind die drei Fassaden in den Richtungen Ost, Südost und Nordwest, die keinen Sonnenschutz benötigen. Bei den anderen werden sehr wirksame Sonnenschutzelemente gebraucht. Angenehme Tageslichtverfügbarkeit kann in Räumen mit folgenden Orientierungen festgestellt werden: Nordwesten, Nordosten, Norden und Südosten. Die Windrotoren sind auf der Nord- und Südseite positioniert. Das Programm hat die Rotoren relativ hoch auf 135 m und 165 m gelegt. Die Unterschiede zwischen den Bauformen im Hinblick auf die empfohlenen Rotorenhöhen tauchen aufgrund der von der Bauform beeinflussten Windströmung in der dritten Dimension auf.

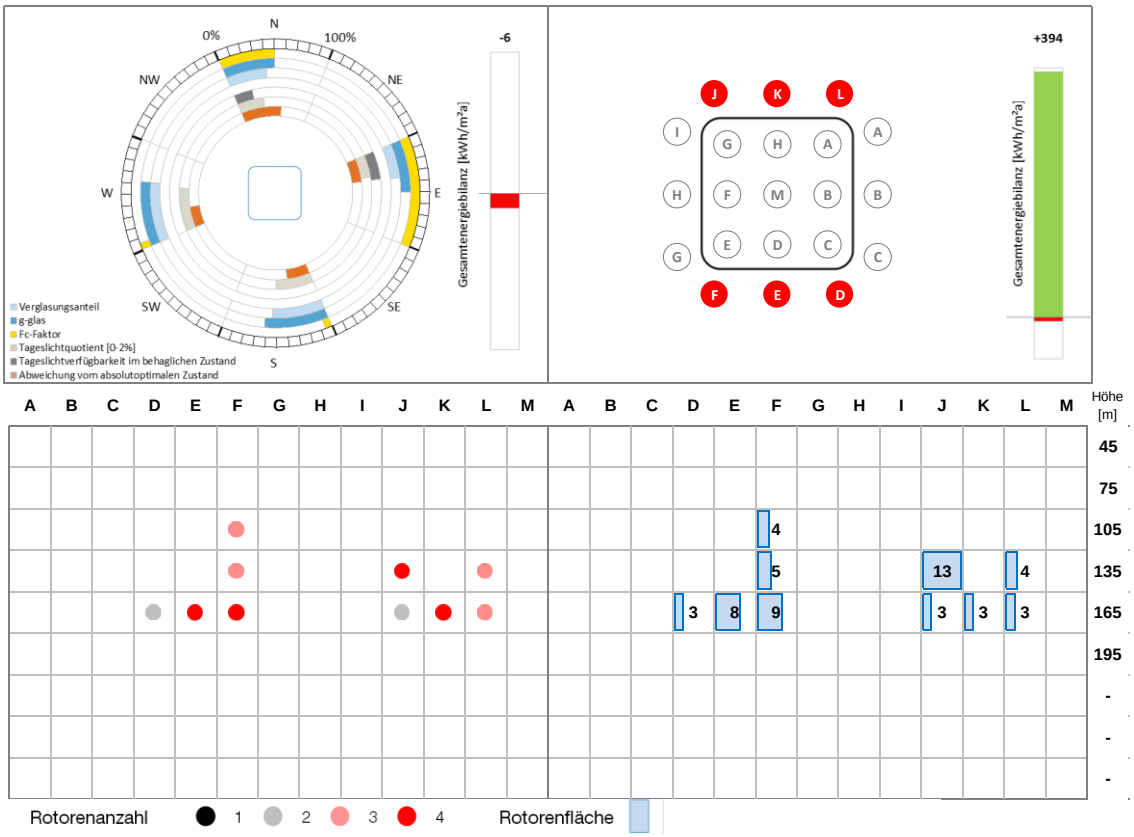


Abbildung 4.42 Darstellung der Optimierungsergebnisse für die Bauform Quadrat; Standort: Jeddah

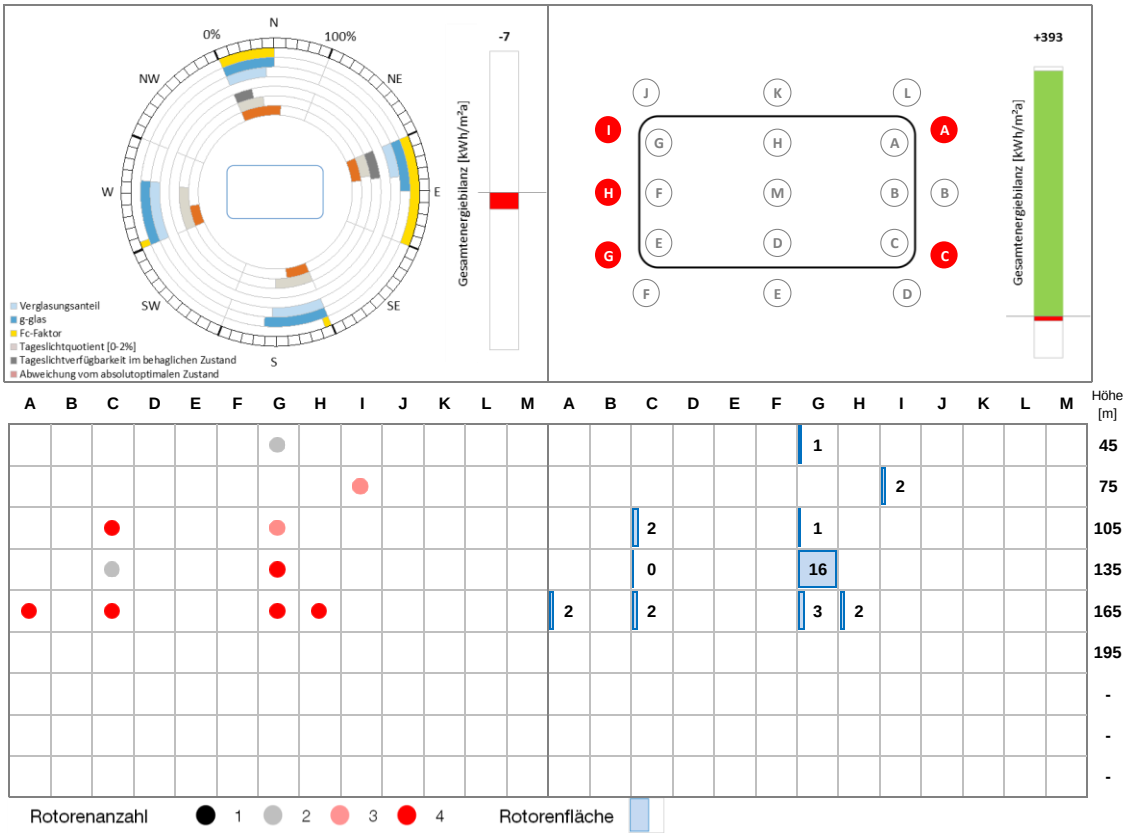


Abbildung 4.43 Darstellung der Optimierungsergebnisse für die Bauform Rechteck; Standort: Jeddah

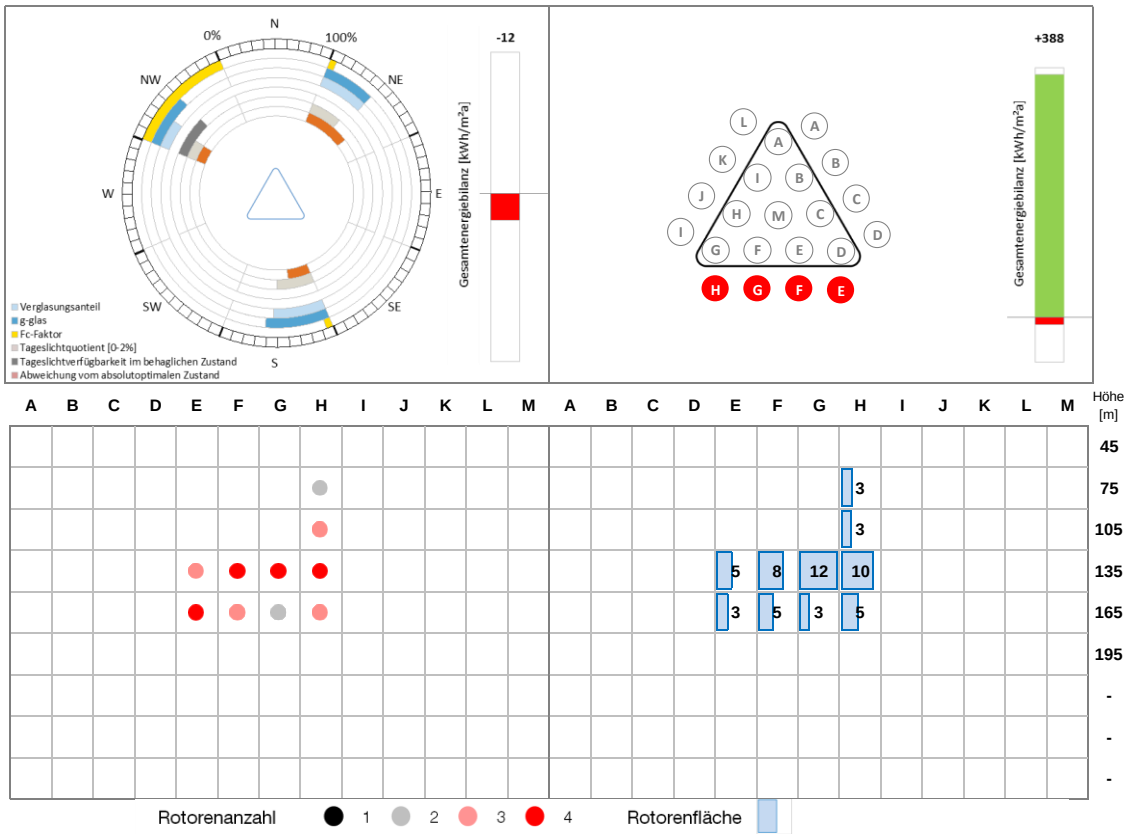


Abbildung 4.44 Darstellung der Optimierungsergebnisse für die Bauform Dreieck; Standort: Jeddah

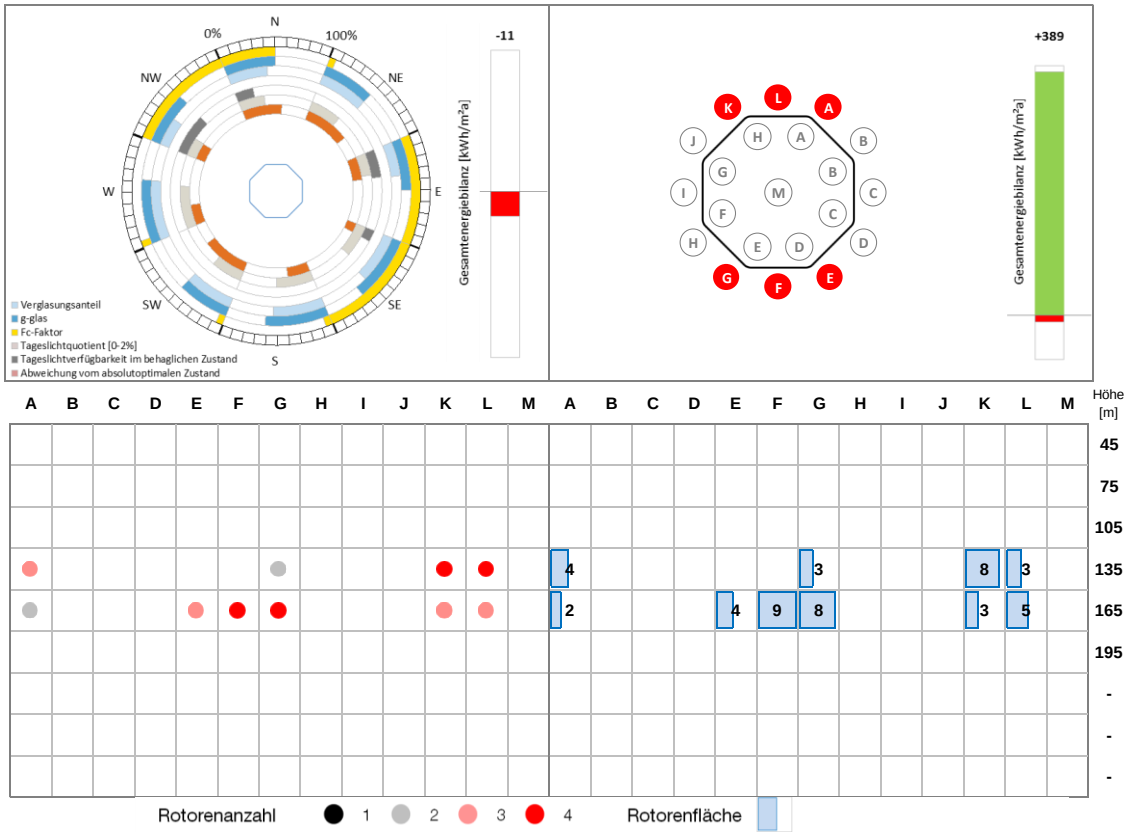


Abbildung 4.45 Darstellung der Optimierungsergebnisse für die Bauform Oktagon; Standort: Jeddah

4.3.2 Miami

Im Gegensatz zum Standort Jeddah brauchen in Miami bei der quadratischen Form drei Fassaden keinen Sonnenschutz, nämlich Ost-, Süd- und Westfassade. Die weiteren Eigenschaften der Fassaden sind ähnlich. Nur die Nordfassade sollte über einen Sonnenschutz verfügen. Sehr interessant für den Architekten ist die Auskunft, dass jeder der Räume hinter den vier Fassaden für ein Viertel der Arbeitszeit über Tageslicht im behaglichen Bereich verfügt. Nachvollziehbar sind die Rotorenpositionen oben rechts nach dem Windenergieoptimierungstool, da diese der Hauptwindrichtung des Standorts Miami entsprechen. Rotorenanzahl und -flächen ergeben sich aus der Optimierung gemäß der lokalen Windgeschwindigkeiten um das Gebäude in der jeweiligen Position.

Das Rechteck hat in Miami im Vergleich zum Quadrat eine etwas schlechtere Energiebilanz. Nach der Darstellung in Abbildung 4.47 sollten Windrotoren auf der nördlichen Seite eingebaut werden, was auf die starken Windgeschwindigkeiten von der nördlichen Seite zurückzuführen ist. Die empfohlene Rotorenanzahl in der jeweiligen Position sowie die Rotorenflächen geben Hinweis darauf, dass an der nordöstlichen Seite hohe Potenziale zur Nutzung der Windenergie vorliegen.

Beim Dreieck (Abbildung 4.48) wird im Gegensatz zum Quadrat für keine der Fassaden Sonnenschutz benötigt. Dazu werden kleine Verglasungsanteile empfohlen. Die optimalen Rotorenpositionen sind einigermaßen vergleichbar mit dem Standort Jeddah. Unterschiede in Rotorenanzahl und -flächen weisen auf das abwechslungsreiche Windverhalten in Abhängigkeit vom Standort hin.

Außer der Nordfassade braucht beim Oktagon in Miami keine der Fassaden einen Sonnenschutz! Allerdings hat das Oktagon die schlechteste Energiebilanz der gezeigten Formen. Andererseits kann bei allen Fassaden für ca. 25 % der Arbeitszeit eine Tageslichtverfügbarkeit im behaglichen Bereich erreicht werden. Die Punkte A, B und C weisen das höchste Potenzial zur Energieerzeugung aus Wind auf, weil die Hauptwindrichtung in Miami Ost-West ist.

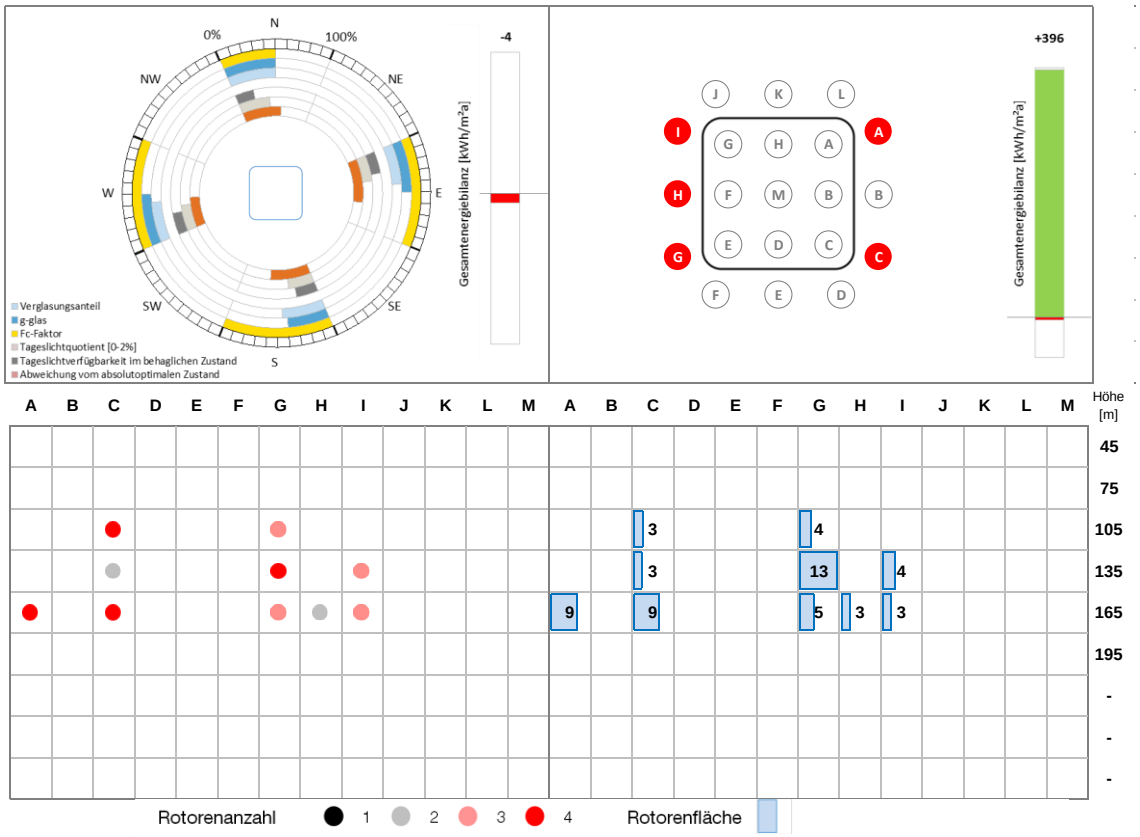


Abbildung 4.46 Darstellung der Optimierungsergebnisse für die Bauform Quadrat; Standort: Miami

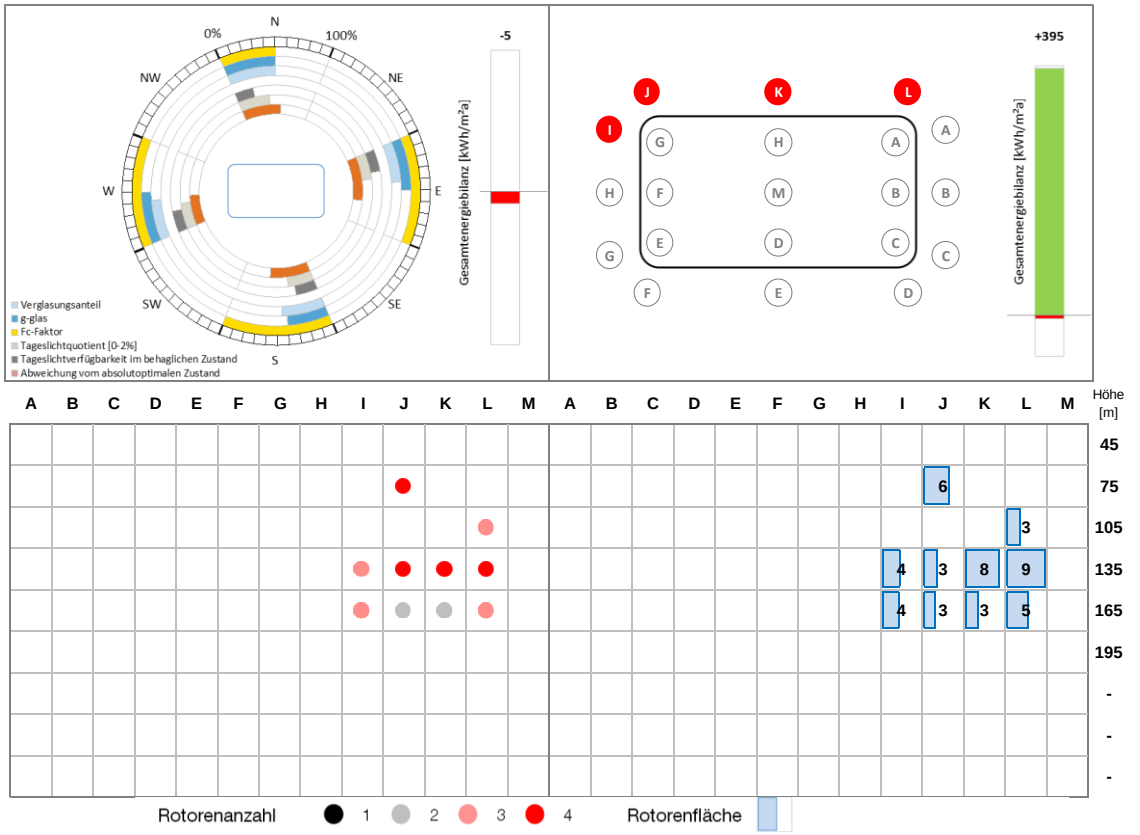


Abbildung 4.47 Darstellung der Optimierungsergebnisse für die Bauform Rechteck; Standort: Miami

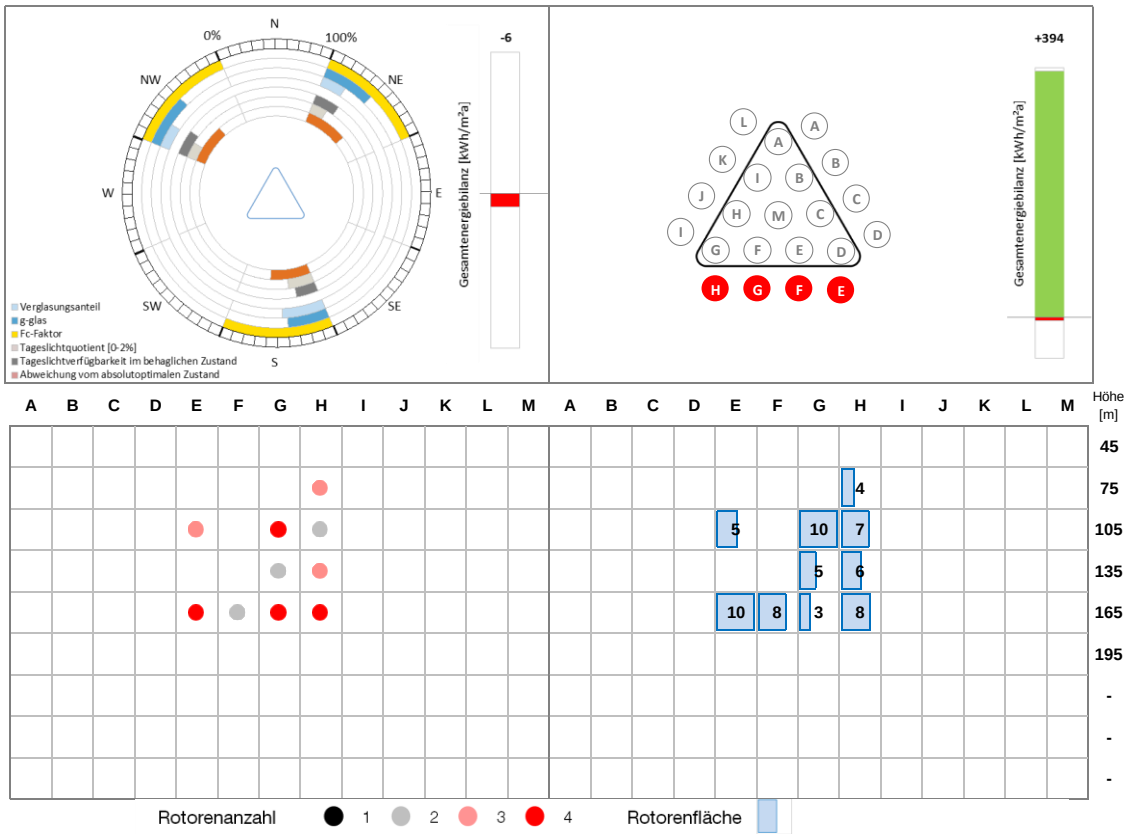


Abbildung 4.48 Darstellung der Optimierungsergebnisse für die Bauform Dreieck; Standort: Miami

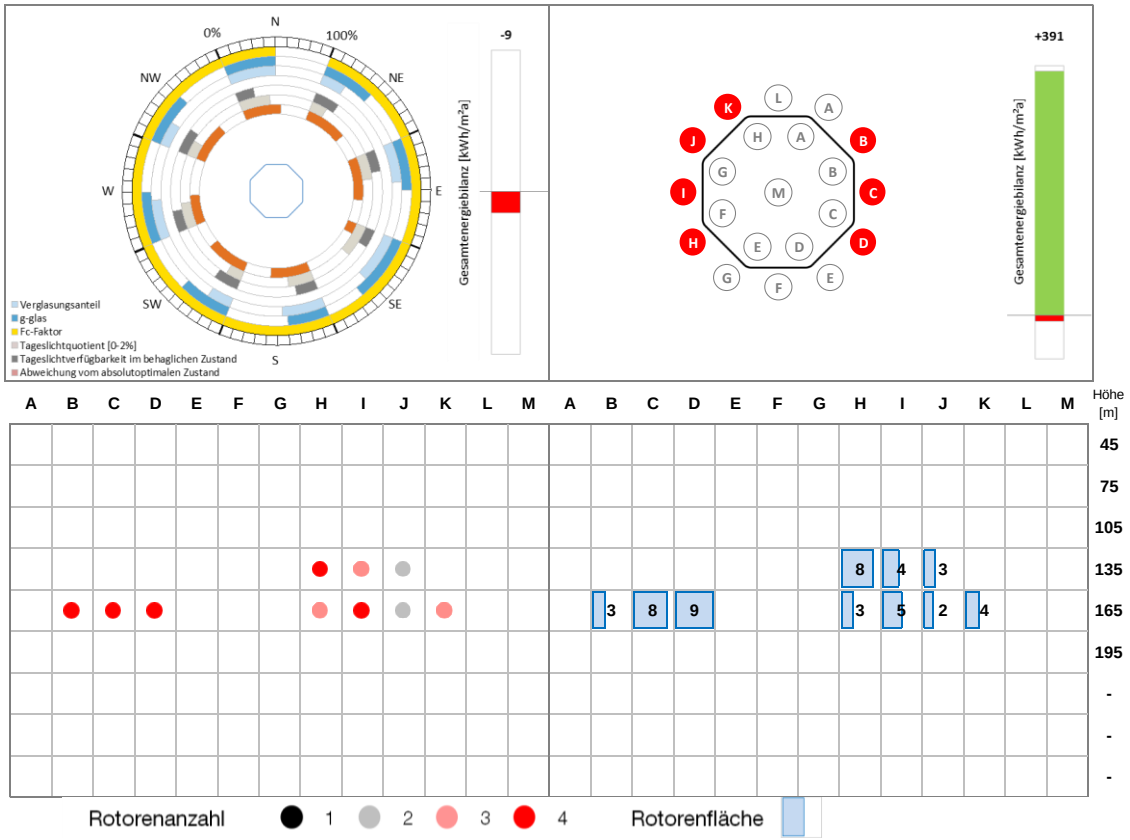


Abbildung 4.49 Darstellung der Optimierungsergebnisse für die Bauform Oktagon; Standort: Miami

4.3.3 Sydney

In Bezug auf Sydney ist oben links in Abbildung 4.50 auffällig, dass bei einer quadratischen Bauweise kein Sonnenschutz für die vier Fassaden benötigt wird. Die Südfassade verfügt über einen höheren Verglasungsanteil, nämlich ca. 50 %. Über fast 30 % sollte die Westfassade verfügen. Trotzdem verfügen die Räume hinter den vier Fassaden für etwa 20 % bis 30 % der Arbeitszeit über Tageslicht im behaglichen Bereich. Die Hauptwindrichtung in Sydney ist Nord-Süd, wobei ebenfalls eine hohe Wahrscheinlichkeit für Westen und Nordwesten besteht. Die Windgeschwindigkeit ist bei Richtung von Norden, Nordosten und Osten gemäß den in Abbildung 3.27 dargestellten Windeigenschaften erheblich höher als bei den anderen Richtungen. Damit kann erklärt werden, warum das Optimierungstool die nordöstliche und nordwestliche Ecke bevorzugt. In den unteren Grafiken fällt auf, dass die Rotoren auf 135 und 165 Meter Höhe positioniert sind und über hohe Flächen verfügen.

Für das Rechteck zeigen die optimierten Ergebnisse der Abbildung 4.51, dass ein Sonnenschutz bei den vier Fassaden ebenfalls nicht nötig ist. Die Westfassade kann mit einem relativ kleinen Verglasungsanteil eine hohe Energiebilanz erzielen. Die Windrotoren sollten auf der linken Seite positioniert werden. Am Punkt I herrscht das höchste Windpotenzial, weshalb hier 13 kleine Windrotoren eingebaut werden sollten.

Auch beim Dreieck (Abbildung 4.52) brauchen die drei Fassaden keinen Sonnenschutz und es reicht ein Energiedurchlassgrad der Verglasungen von ca. 50 %. Es fällt auf, dass es im allgemeinen an diesem Standort keine grundsätzlichen Unterschiede zwischen den Fassaden gibt. In Sydney hat das Dreieck eine bessere Energiebilanz als das Quadrat. Aufgrund der Hauptwindrichtung werden die meisten Rotoren im Fall des Dreiecks südlich positioniert.

Die optimierten Fassadenkriterien des Oktagons Abbildung 4.53 weisen darauf hin, dass die acht Fassaden unter Einbezug einer hohen Energiebilanz ohne Sonnenschutz auskommen können. Dank Optimierung verfügen alle Seiten für ca. ein Viertel des Jahres über Tageslicht im behaglichen Bereich. Auf einer Höhe von 165 m sollten Windrotoren an fast allen Ecken integriert werden.

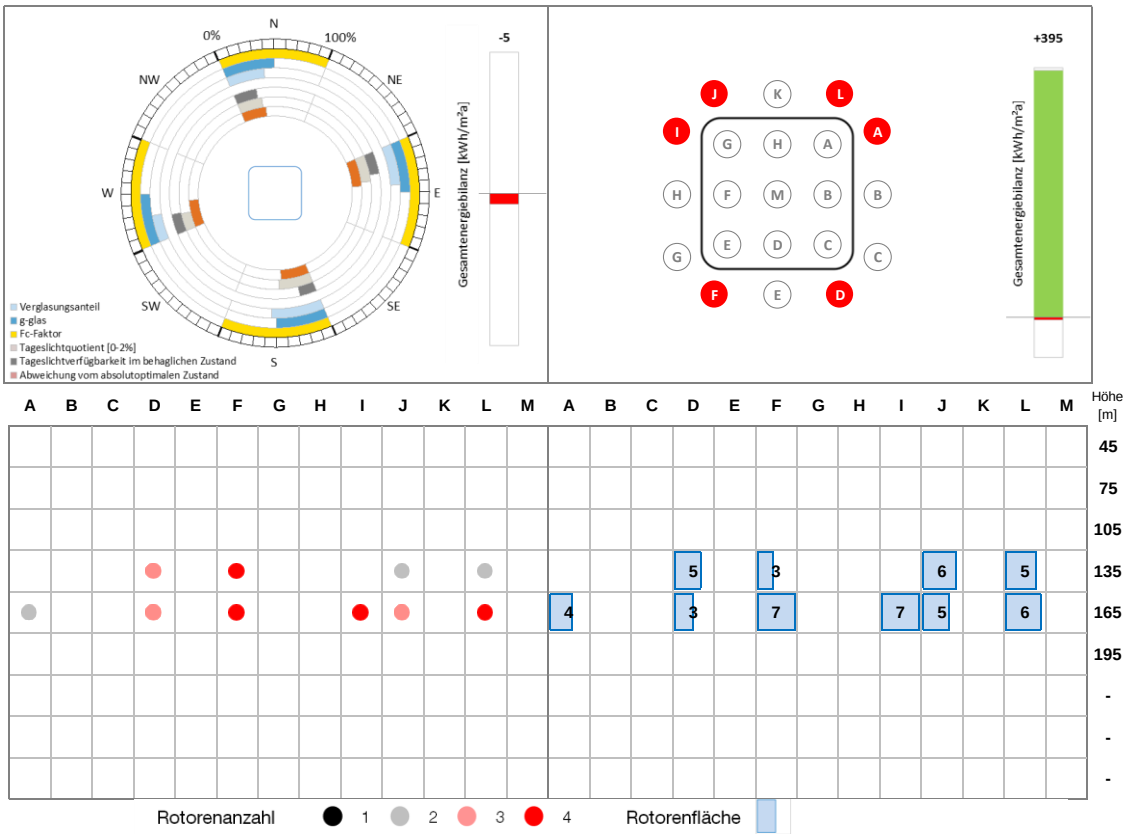


Abbildung 4.50 Darstellung der Optimierungsergebnisse für die Bauform Quadrat; Standort: Sydney

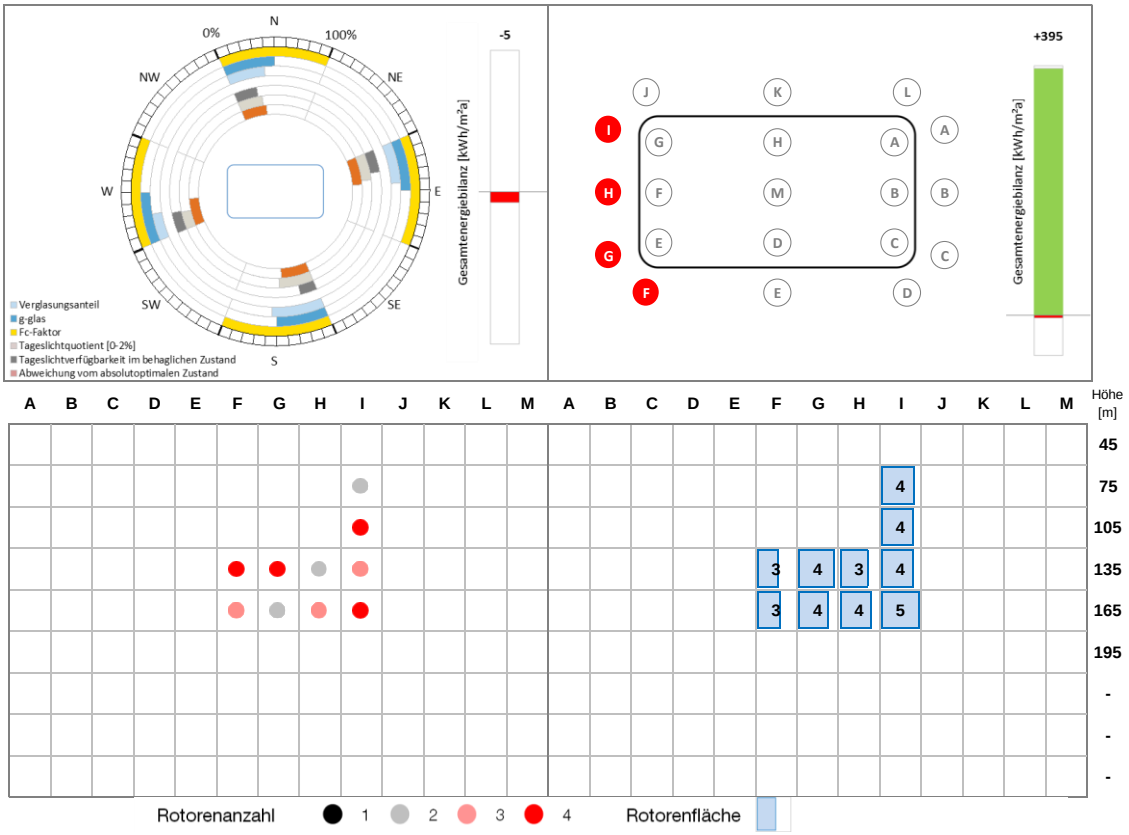


Abbildung 4.51 Darstellung der Optimierungsergebnisse für die Bauform Rechteck; Standort: Sydney

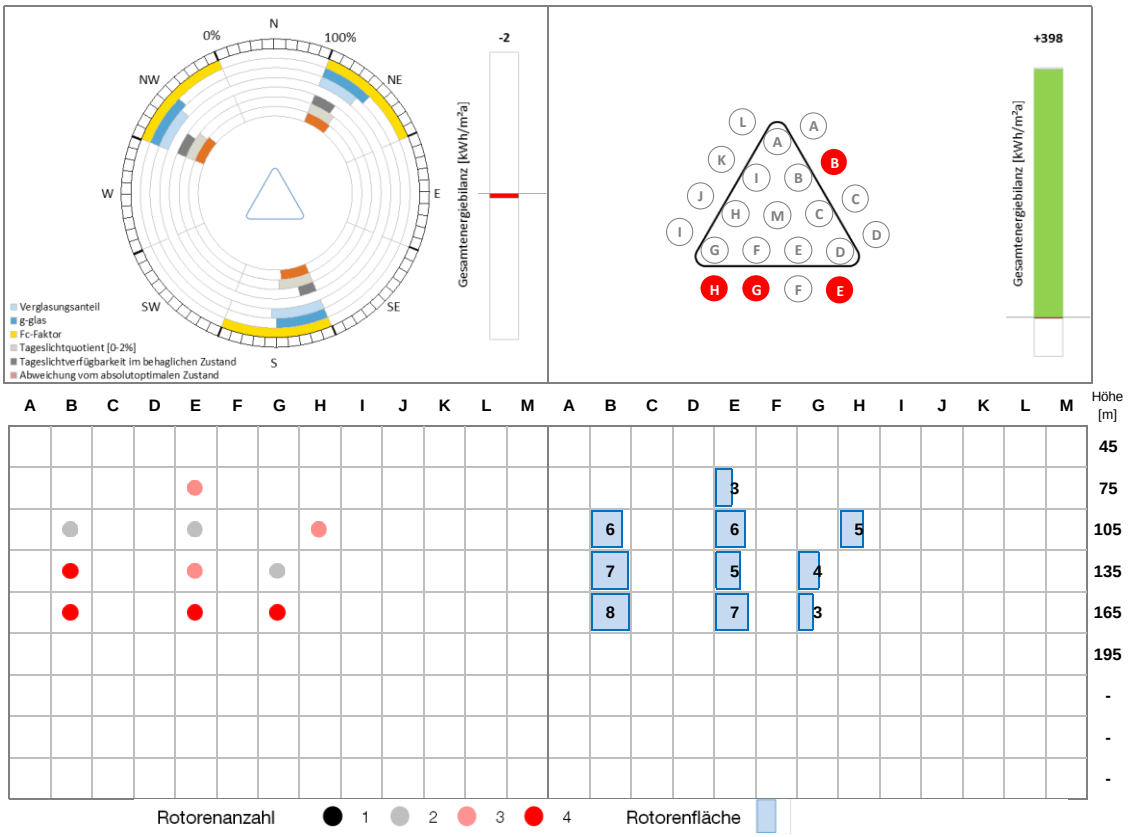


Abbildung 4.52 Darstellung der Optimierungsergebnisse für die Bauform Dreieck; Standort: Sydney

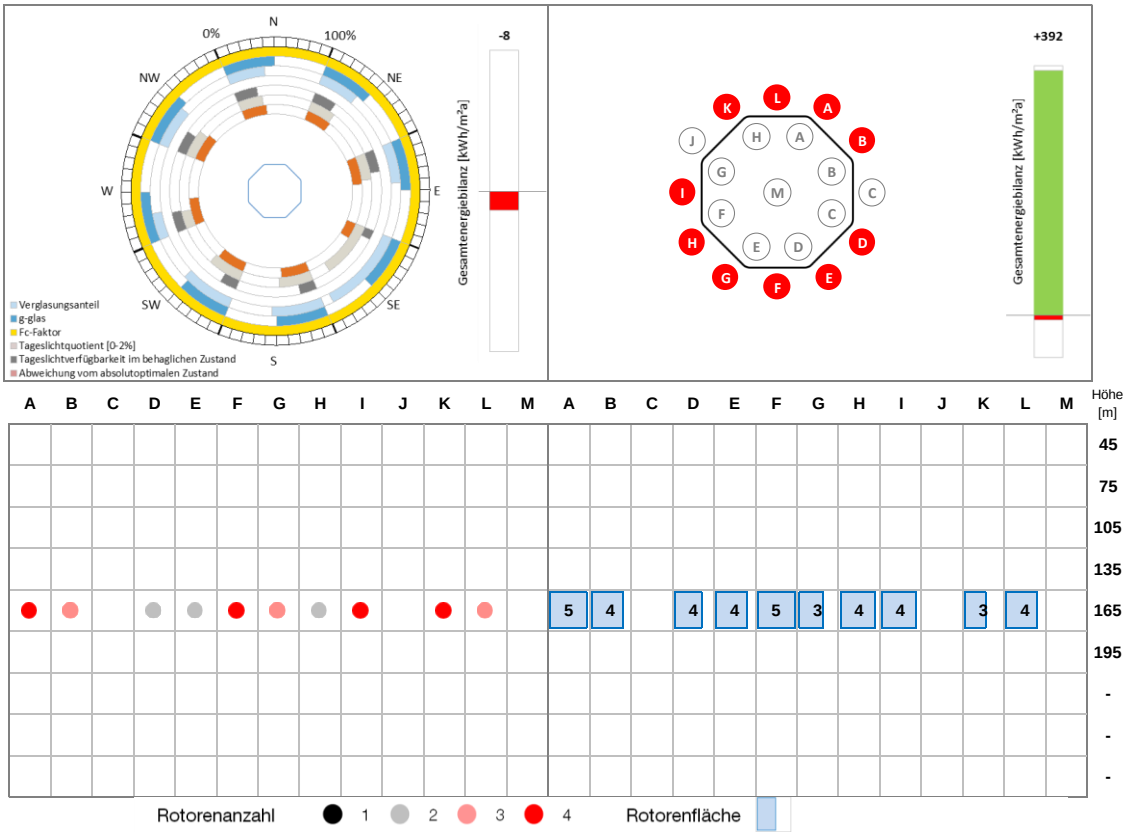


Abbildung 4.53 Darstellung der Optimierungsergebnisse für die Bauform Oktagon; Standort: Sydney

4.3.4 Durban

In der Grafik oben links in Abbildung 4.54 ist unverkennbar, dass bei quadratischer Bauweise in Durban nur die Westfassade einen Sonnenschutz braucht und das mit einem sehr niedrigen Fc-Faktor von weniger als 10 %. Im Arbeitsraum hinter der Westfassade besteht gegenüber den anderen Fassaden die geringste Tageslichtverfügbarkeit. Durban hat eine Nord-Süd-Hauptwindrichtung mit hoher Windwahrscheinlichkeit aus Süden. Nach den Strömungsbildern in Abbildung 3.80 wurden vom Windenergieoptimierungstool die nördlichen Positionen neben den Ecken als Windstaupunkte ausgewählt. Es kann auch festgestellt werden, dass die optimalen Rotorenpositionen mit den Positionen am Standort Jeddah vergleichbar sind. Allerdings bestehen Unterschiede auf der Ebene der Rotorenanzahl und -flächen.

Die optimalen Fassadenkriterien sowie die Energiebilanz des Rechtecks in Durban sind ähnlich wie im Fall des Quadrats. Trotz der Hauptwindrichtung Nord-Süd besteht ebenfalls eine hohe Wahrscheinlichkeit für Wind aus Westen und Nordwesten. Daher wird der Einsatz der Rotoren im westlichen Bereich empfohlen.

Die Fassadenkriterien beim simulierten Dreieck sind einander sehr ähnlich, allerdings hat die Südfassade einen höheren Verglasungsanteil. Das Dreieck in Durban führt im Vergleich zum Quadrat zu einer besseren Energiebilanz. Gemäß den Ergebnissen des Windenergieoptimierungstools herrschen am Punkt E sehr hohe Windgeschwindigkeiten, was auf die hohen Geschwindigkeiten von Osten, Südosten und Süden zurückzuführen ist.

Bei der Form des Oktagons sollte ausschließlich die Westfassade mit Sonnenschutz ausgestattet werden. Die Westfassade sowie die Südostfassade weisen im Vergleich zu den anderen Fassaden eine ungünstige Tageslichtverfügbarkeit auf. Allerdings hat die Südwestfassade aufgrund des hohen Energiedurchlassgrads der Verglasung einen hohen Tageslichtquotienten. Die Windrotoren sollten auf 135 und 165 m Höhe an der Nord-und Südseite eingebaut werden, was mit der Hauptwindrichtung in Zusammenhang steht.

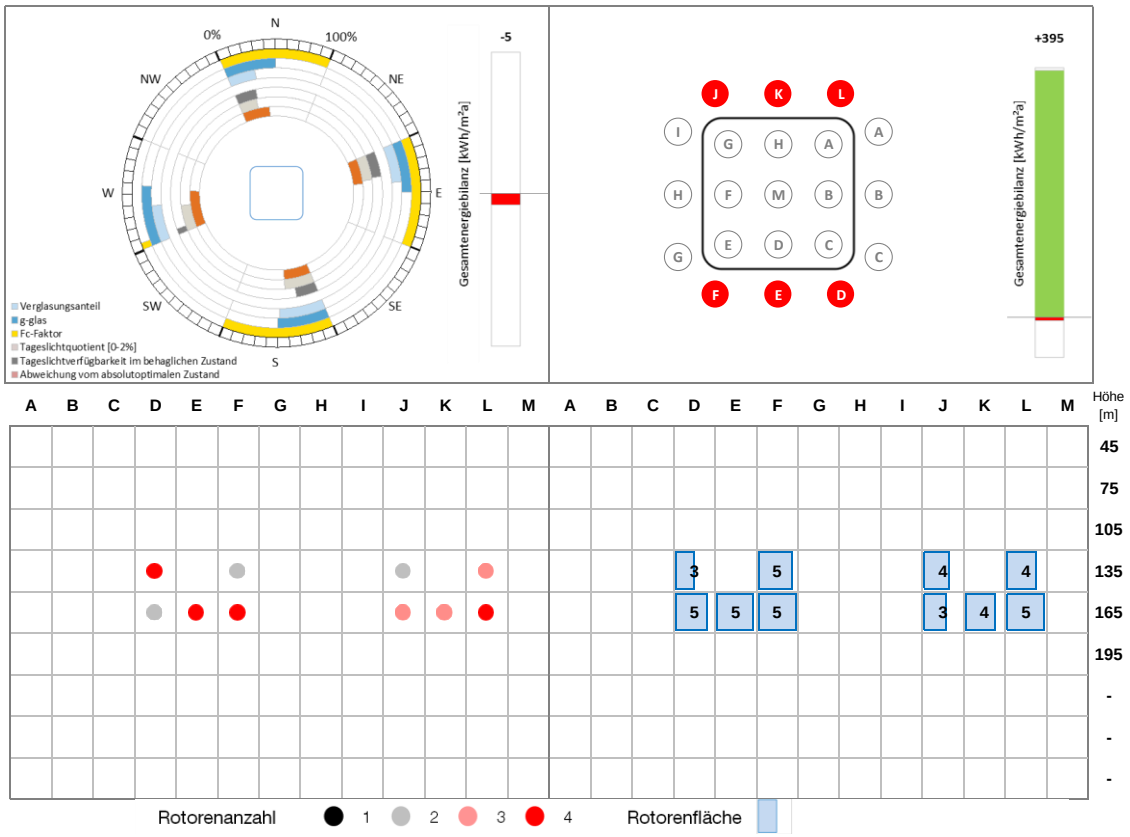


Abbildung 4.54 Darstellung der Optimierungsergebnisse der Bauform Quadrat; Standort: Durban

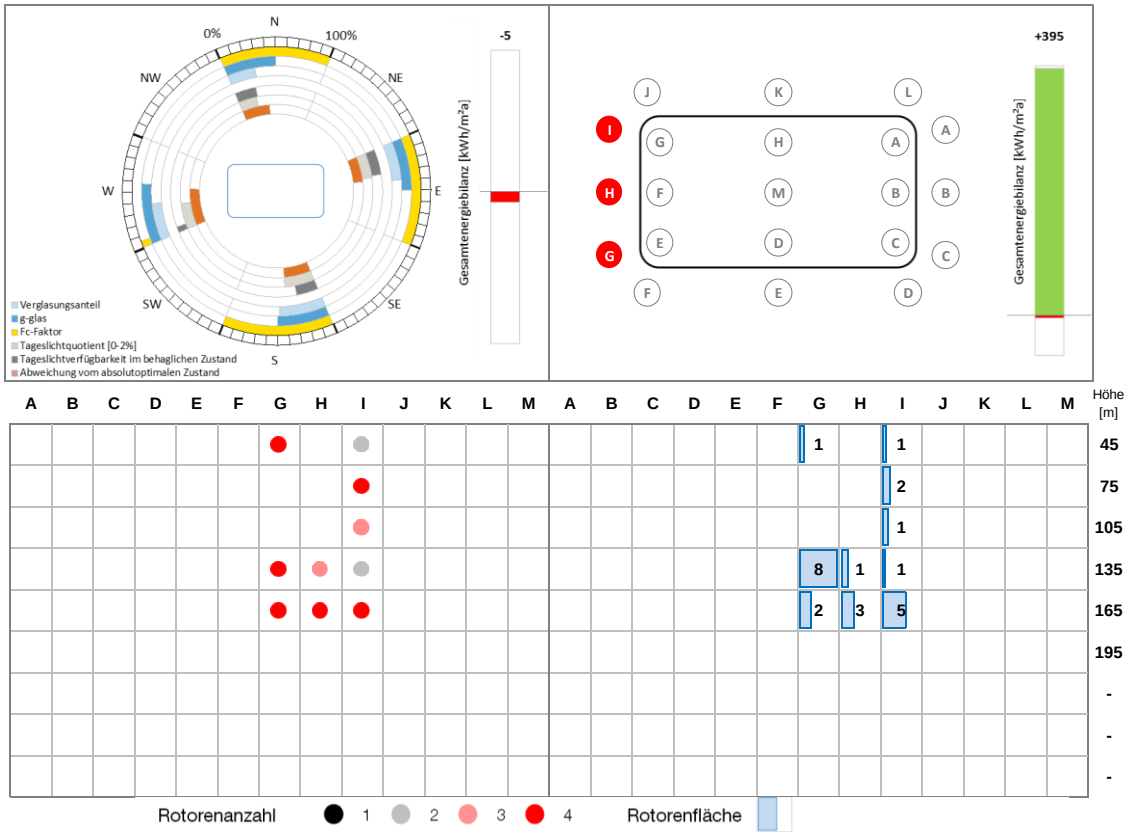


Abbildung 4.55 Darstellung der Optimierungsergebnisse der Bauform Rechteck; Standort: Durban

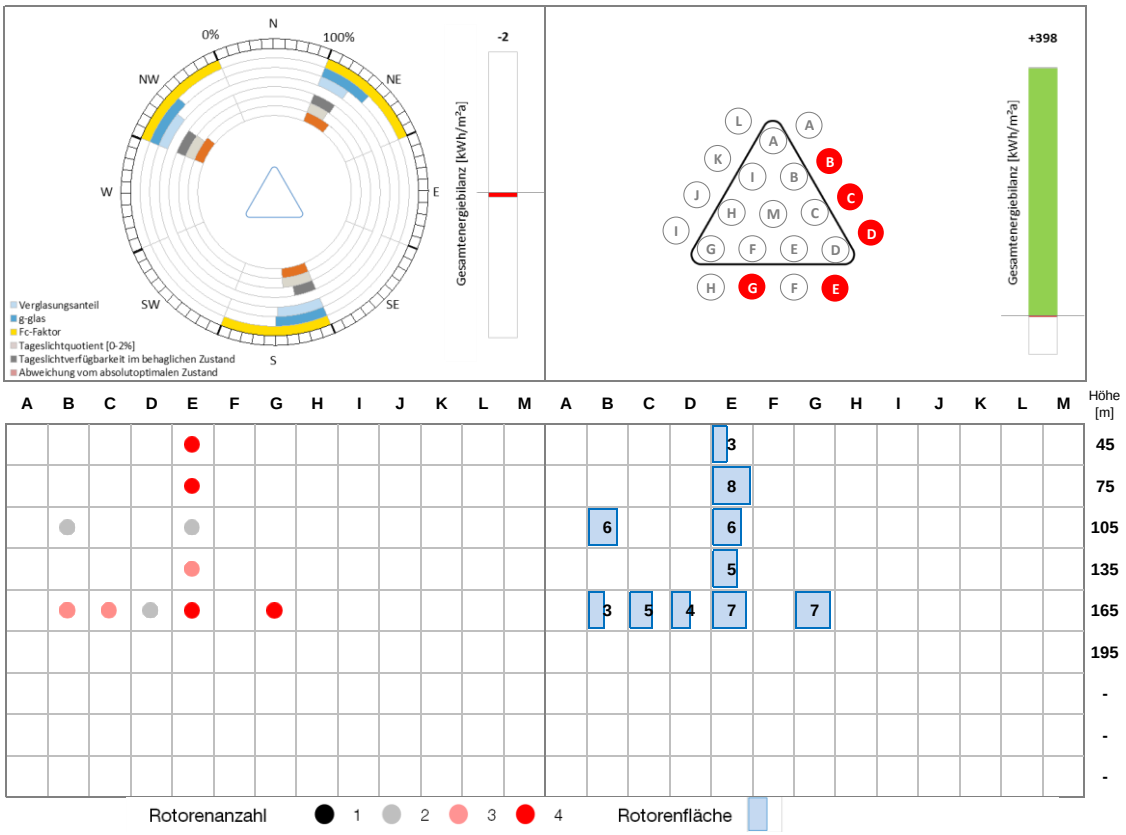


Abbildung 4.56 Darstellung der Optimierungsergebnisse für die Bauform Dreieck; Standort: Durban

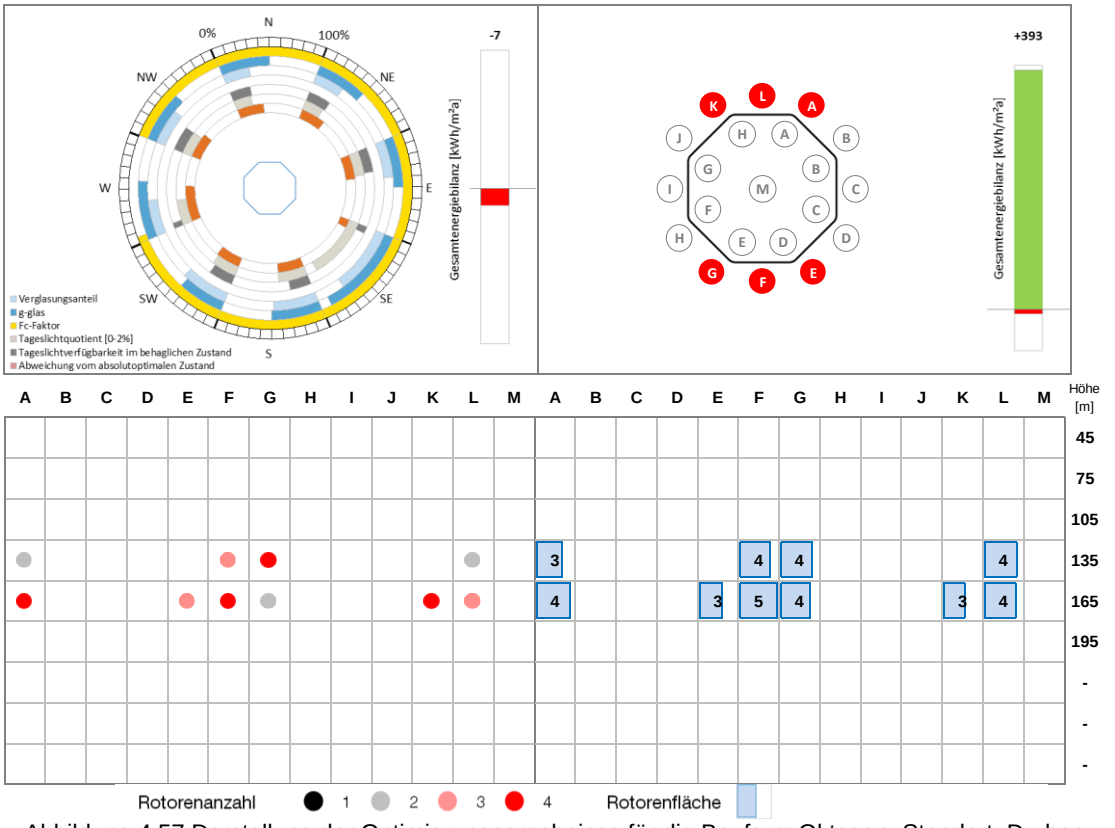


Abbildung 4.57 Darstellung der Optimierungsergebnisse für die Bauform Oktagon; Standort: Durban

5. Zusammenfassung und Ausblick

5.1 Aggregation der wissenschaftlichen Arbeit

Die vorliegende wissenschaftliche Arbeit hat sich mit der Frage auseinandergesetzt, mit welchen Kriterien in einem Hochhaus in der subtropischen Klimaregion eine Plus-Energiebilanz erreicht werden kann. Im folgenden Abschnitt werden die Arbeitsschritte überblicksartig zusammengefasst und die Ergebnisse der Arbeit diskutiert. Abschließend folgen die offenen Fragen und der Ausblick.

5.1.1 Zum einführenden Teil

Der Überblick über die Grundlagen diente zum einen zur Definition des Plus-Energie-Hochhauses und der wesentlichen Begriffe, die mit der Thematik in Zusammenhang stehen. Zum anderen wurden die Komplexität des Problems und die Zielkonflikte unter den beeinflussenden Aspekten erläutert. Es folgten die Abgrenzung des Themas und die Vorstellung der Hauptaspekte, die in dieser Arbeit behandelt werden sollten.

Das Kapitel zum Stand der Forschung beschäftigte sich mit der systematischen Betrachtung von verschiedenen Entwurfsabläufen bzw. -methoden im Hinblick auf die Erhöhung der Gebäudeperformance. In diesem Rahmen wurden die heute verfügbaren Planungswerkzeuge untersucht und verglichen. Das Ziel war herauszufinden, ob ein Erweiterungspotenzial besteht. Als Forschungslücke wurde die Möglichkeit der Optimierung in der frühen Planungsphase festgestellt.

Da Energieeinsparung und lokale Energieerzeugung in einem übergeordneten Zusammenhang mit dem Plus-Energie-Hochhaus stehen, wurden die technischen Potenziale zur Erhöhung der Energieeffizienz erforscht und Lösungen für gebäudeintegrierte Energieerzeugung aus Sonne und Wind betrachtet. Zu diesem Zweck wurde eine Reihe von bereits realisierten oder konzeptionellen Beispielen diskutiert.

In der Problemstellung wurde die Forschungslücke nochmals zusammengefasst. Es wurde festgestellt, dass trotz der technischen Potenziale zur gebäudeintegrierten Energieerzeugung das Erreichen einer Plus-Energiebilanz in einem Hochhaus in der subtropischen Klimaregion aktuell nicht möglich ist. Das liegt v. a. an der mangelnden Effizienz, deren Grundlagen in der konzeptionellen Phase stark vom Architekten beeinflusst werden. Ein Grund dafür ist die Korrelation der Aspekte der Energieeffizienz mit der Gestaltung des Gebäudes und der Behaglichkeit des Nutzers, wobei das Zusammenspiel durch eine nicht lineare Komplexität geprägt ist.

Es wurde die Hypothese aufgestellt, dass die Energieeffizienz mittels eines Optimierungswerkzeugs erhöht werden kann, das bei der Konzeptionierung einen frühen Einstieg in die relevanten technischen Aspekte ermöglicht. Unter Bezugnahme auf die herkömmlichen Methoden wurde gezeigt, wie und wann das Werkzeug mit seinen Komponenten

zum Einsatz kommt. Danach wurde das Ziel der Arbeit auf die Entwicklung und Validierung des Optimierungswerkzeugs konkretisiert.

5.1.2 Beschreibung der Ausgangslage

Im Hinblick auf die Relevanz der Fragestellung wurden vier grundsätzliche Ausgangspunkte diskutiert. Die Notwendigkeit einer Energiewende gilt als erster Ausgangspunkt heute weltweit. Im Rahmen der Auseinandersetzung mit dieser Problematik wurde ein Überblick über einige der künftigen Krisenszenarien und deren Folgen gegeben. Im Hinblick auf Energieknappheit und Ressourcenverschwendung wurden Daten zur Energiewirtschaft in ausgewählten Regionen analysiert. Es wurde klar festgestellt, dass der Umstieg auf erneuerbare Energien als vernünftiger Weg zur Verhinderung von Krisen weltweit und v. a. in ölreichen Ländern unabdingbar ist. Es wurde auch gezeigt, dass der geplante Einstieg in die Atomenergie in vielen wachsenden Ländern nur als kurzfristige Zwischenlösung betrachtet werden kann. Da es heute unbestritten ist, dass die Umweltprobleme aufgrund des menschlichen Verhaltens entstehen, wurde der Handlungsbedarf im Bausektor als Teil der Ethik vorgestellt, für die der Schutz der nächsten Generationen zu den wesentlichen Aufgaben gehört.

Anschließend folgte die Betrachtung der Entwicklung in verschiedenen Ländern der subtropischen Klimaregion. Nach einer kurzen Vorstellung der Lage und der klimatischen Eigenschaften wurde auf die Bevölkerungsexplosion und die daraus resultierenden Folgen wie Megacities und hoher Verbrauch v. a. fossiler Energien eingegangen. Im Zusammenhang mit dem mangelnden Umweltbewusstsein konnte festgestellt werden, dass die derzeitige rapide Entwicklung zu weiteren Umweltbelastungen führt und führen wird. Eine Lösung für viele Probleme besteht dabei in der Ausnutzung der verfügbaren erneuerbaren Energieressourcen in der Region. Die Bereitstellung von Wohn- und Arbeitsräumen sollte daher im Rahmen eines umweltbewussten Bauens stattfinden.

Der Fokus wurde auf den Bautypus Hochhaus gelegt, der immer noch ein Innovationsgebiet darstellt. Es wurde grundsätzlich gefragt, was das Hochhaus anbietet und wo die Stellen sind, die das Erreichen der Plus-Energiebilanz gegenüber einem Haus niedriger Höhe begrenzen. Es konnte gezeigt werden, dass das Hochhaus eine Maßnahme der Verdichtung darstellt, die auch als Maßnahme zur nachhaltigen Entwicklung verstanden werden kann. Nach der Betrachtung der heutigen Nachfrage nach Hochhäusern wurde grob auf die heutigen Tendenzen im Hochhausbau eingegangen. Die Ausnutzung der exponierten großen Fassadenfläche sowie der Höhe zur Energieerzeugung unter gleichzeitiger Berücksichtigung energiesparender Kriterien wurde als Ansatzpunkt dieser Arbeit ausgemacht.

Es wurde festgestellt, dass die herkömmlichen Vorgehensweisen beim Umgang mit den Aspekten klimagerechten Bauens trotz der Nutzung moderner Rechenwerkzeuge beschränkt sind. Die manuelle Einstellung von Kriterien führt nicht zu einer möglichst hohen Effizienz, da diese meistens schwer gleichzeitig zu erfassen sind und der Nutzer nicht alle Möglichkeiten probieren kann. Das aus der Mathematik stammende Gebiet der Optimierung bietet der performanceorientierten Architektur in diesem Zusammenhang wertvolle Potenziale an. Es wurde zusammengefasst, dass die Kombination von Optimierungsalgorithmen mit den Kriterien

der Energieeffizienz eines Hochhauses erheblich zur Erhöhung von dessen Energiebilanz beitragen kann.

5.1.3 Das Optimierungswerkzeug als Ansatz

Zur Beschreibung des Aufbaus des zu entwickelnden Werkzeugs wurden die für die Energieeinsparung und die Energieerzeugung relevanten Einflussfaktoren im Hochhaus identifiziert und in einem neuen System abgegrenzt, wobei eine nicht lineare Abhängigkeit des Systemverhaltens festgestellt wurde. Neben den Inneneinflüssen bzw. den Grenzen der menschlichen Behaglichkeit ist die Auseinandersetzung mit den Außeneinflüssen wie den Klimaeigenschaften des Standorts entscheidend für die Energiebilanz des Gebäudes. Zum Vergleichen der Standorte wurden Abschätzungen bezüglich der zur Raumkonditionierung benötigten Energie verwendet.

Als Optimierungsmethode wurde die Sensitivitätsanalyse ausgewählt. Um die Energiebilanz (Energiebedarf und Energieertrag) schnell und simultan während des Optimierungsprozesses zu ermitteln, wurde ein Simulationsprogramm weiterentwickelt und in das Optimierungssystem eingebettet. Dieses Simulationsprogramm ist in der Lage, thermische Simulationen durchzuführen und eine erste quantitative sowie qualitative Bewertung des Tageslichts zu liefern. Das fertige Optimierungswerkzeug besteht aus zwei Teilwerkzeugen:

a. Das Solarenergieoptimierungstool dient zur Integration von Energieeinsparung und Energieerzeugung durch die Hochhausfassade.

b. Das Windenergieoptimierungstool beschäftigt sich mit der Optimierung von Rotorenpositionen, -größen, und -anzahl in/an/auf dem Hochhaus.

Die Notwendigkeit der Fassadenoptimierung zum Zweck der Energieeinsparung und Energieerzeugung wurde ausführlich erläutert. Anpassungsmöglichkeiten durch passive Maßnahmen aus den vernakulären Bauten in der betrachteten Region wurden diskutiert und zur Bestimmung der variierbaren Größen verwendet. In beiden Werkzeugen wurden Algorithmen durch die Nutzung von VBA-Script entwickelt. Diese dienen zur Erfüllung von folgenden Funktionen:

a. Modellierung der Optimierungsprobleme

b. Bereitstellung von Simulationsparametern

c. Ablesen und Verarbeitung von Simulationsergebnissen

d. Aufstellung von Kriterien

e. Integration in Benutzeroberflächen

Die Komponente des Solarenergieoptimierungstools sowie die Optimierungsmodelle wurden im Rahmen des Optimierungsprozesses dargestellt. Im Hinblick auf das Windenergieoptimierungstool wurde mit den Grundlagen der gebäudenahen Luftströmung

begonnen. Die Potenziale zur Nutzung der Windenergie im Hochhaus wurden eingehend diskutiert. Der entsprechende Abschnitt beschäftigte sich auch mit der Durchführung von CFD-Simulationen zur Ermittlung der Windgeschwindigkeit an potenziellen Rotorenpositionen bei verschiedenen Hochhausformen und -höhen. Die Messdaten wurden mit den Optimierungsalgorithmen integriert. Maßnahmen wie gebäudekörperintegrierte Winddurchlässe zur Erhöhung des Ertrags der Windrotoren wurden ebenfalls untersucht. Diese Möglichkeit wird auch im Windenergieoptimierungstool angeboten.

Es wurden Entscheidungsalgorithmen programmiert, die die Ergebnisse jedes Werkzeugs verarbeiten, um die besten Lösungen zu ermitteln. Die Benutzeroberflächen zum Bedienen der Werkzeuge wurden so gestaltet, dass sie dem Nutzer die Einstellung von Parametern erlauben. Im Expertenmodus können mehrere Parameter bearbeitet und sogar neu programmiert werden.

5.1.4 Wirksamkeit des Werkzeugs

Die entwickelten Programme wurden zur Validierung in drei Schritten getestet. Zunächst wurde jedes Tool für sich ausprobiert, um schließlich die Kombination der zwei Tools zu prüfen. Da sich das Solarenergieoptimierungstool hauptsächlich mit Fassaden beschäftigt, wurden drei Optimierungsmodelle auf der Ebene einer bestimmten Fassade ausprobiert. Die gezeigten Beispiele machten deutlich, dass die Optimierungsalgorithmen wie geplant funktionieren und plausible Ergebnisse nach den vorgegebenen Optimierungszielen erzeugen.

Auch bezüglich des Windenergieoptimierungstools wurden drei Modelle auf der Ebene einer Hochhausform an den vier gewählten Standorten geprüft. Dazu wurden Daten zu den Windgeschwindigkeiten an den vom Programm vorgeschlagenen Rotorenpositionen generiert, um festzustellen, ob der Algorithmus unter den verfügbaren Positionen die besten auswählt. Auch in diesem Schritt hat das Programm nachvollziehbare Resultate generiert.

In einem dritten Schritt wurden die zwei Optimierungstools kombiniert und im Rahmen eines generischen Hochhauses getestet. Dieser Prozess wurde für vier Hochhausformen an den vier Standorten durchgeführt. Bei der Verarbeitung dieser 4 x 4 Matrix stellte sich die Frage, welche Bauform bei welchen Fassadenkriterien an welchem Standort zur besten Energiebilanz führt. Nach der Optimierung zeigte sich, dass einige Formen ein schlechteres Energieverhalten aufweisen als die anderen.

Im Hinblick auf zu erzeugende Windenergie wurde ein bestimmter Ertrag festgesetzt. Das Windenergieoptimierungstool erzeugte für jede Form an jedem Standort eine optimale Konfiguration. Diese Konfiguration besteht aus Rotorenpositionen, Rotorenanzahl in der jeweiligen Position und Rotorenflächen. Am Ende konnte festgestellt werden, dass jeder Bauform bei jedem Standort eine eigene Kombination aus Kriterien entspricht. Die erzeugten Daten wurden mit den Klimaeigenschaften des jeweiligen Standorts abgeglichen und es zeigte sich, dass die Ergebnisse nachvollziehbar sind. Am Ende konnte bestätigt werden, dass das entwickelte Planungswerkzeug mit seinen zwei Tools die simulierten Hochhausmodelle zur Plus-Energiebilanz geführt hat.

5.2 Offene Fragen und Potenziale für weitere Forschung

5.2.1 Verwendungsformen des Werkzeugs

Das entwickelte Werkzeug mit seinen Programmen kann eigenständig (*Stand-Alone)* auf der Basis des Programms Excel verwendet werden. Ein in VBA-Script erfahrener Nutzer kann das Programm erweitern und mehrere Parameter berücksichtigen. Das Programm wurde mit den Klimadaten der ausgewählten Standorte gefüttert, es kann aber grundsätzlich für jeden beliebigen Standort verwendet werden.

Eine weitere Möglichkeit ist die Nutzung des Programms als *Plug-in-System* zu einem anderen Rechenprogramm. Ein Nutzer kann z. B. das Energiebilanztool deaktivieren und das Programm mit einem erweiterten Simulationsprogramm verknüpfen. Auf diese Weise können ausschließlich die Optimierungskapazitäten genutzt werden.

Eine weitere Nutzung des Programms als *Plug-in* besteht in der Verknüpfung mit einem parametrischen Zeichenprogramm (z. B. *Revit, Archicad*). Dadurch kann der Nutzer schnell Auskünfte über die Energiebilanz seines Entwurfs bekommen. Die Erfahrungen mit den Tests haben gezeigt, dass ein Optimierungsvorgang zwischen 30 Sekunden und 10 Minuten dauern kann. Die Berechnungszeit hängt in der Regel von der Komplexität des Modells und der Rechenkapazität bzw. Ausrüstung des Rechners ab.

5.2.2 Künftige technische Potenziale

Für die im Rahmen dieser Arbeit gezeigten Simulationen wurden konservative Daten verwendet. Die Wirkungsgrade der simulierten Photovoltaikzellen und Windrotoren wurden übersichtlich integriert, sodass sie vom Nutzer einfach eingestellt werden können.

Das in dieser Arbeit betrachtete Sonnenschutzgewebe dient nur zur Verringerung des Energiedurchlassgrades der Verglasung. Die Bilder in **Fehler! Verweisquelle konnte nicht efunden werden.** weisen darauf hin, dass die Sonnenschutzelemente eine große opake Fläche zur Verfügung stellen. In den Zeiten, in denen der Sonnenschutz unten ist, herrscht hohe Solareinstrahlung. Die durch den Sonnenschutz verfügbare Fläche kann deshalb optimal ausgenutzt werden. Ein entsprechendes technisches Potenzial besteht in der Integration von energiegenerierenden Sonnenschutzgeweben, in die Dünnschichtmodule von Photovoltaikzellen eingebettet sind. Aktuell werden Fortschritte bezüglich des Wirkungsgrades dieser Technik durch die Integration von Titan gemacht [222]. Diese Maßnahme kann die Performance der Fassade erheblich erhöhen.

Die Erweiterung des Solarenergieoptimierungstools zu diesem Zweck ist sehr sinnvoll. Der Umgang mit Sandstürmen in der subtropischen Region ist ebenfalls entscheidend, da diese die Wirkungsgrade deutlich verschlechtern. Es gibt bereits Schutzfolien auf dem Markt, die durch die Nutzung von Nanotechnologie ein einfaches Abrutschen der Sandpartikel von der Oberfläche der Photovoltaikzellen ermöglichen.

Eine andere Möglichkeit wurde von der *NASA* entwickelt, um Energieerzeugung für Roboter auf Planeten mit vielen Sandstürmen wie z. B. dem Mars zu ermöglichen. Dabei handelt es sich

nicht um eine Weiterentwicklung der selbstreinigenden Beschichtungen aus der Nanotechnologie. Stattdessen stoßen elektrostatische Ladungen die Staubteilchen von der Oberfläche und transportieren diese zum Rand des Moduls. Dieser Prozess sollte zwei Minuten dauern [223]. Diese Technik bietet zahlreiche Potenziale zur Minimierung des Reinigungsaufwands in Gebäuden und v. a. des Wasserverbrauchs.

5.2.3 Umgebung des Hochhauses

Das Gebiet um die in dieser Arbeit betrachteten Hochhäuser herum wurde zur Vereinfachung nicht berücksichtigt. Ein Grund dafür ist die Schwierigkeit, ein generisches Modell aufzubauen, das sich an den vier ausgewählten Standorten wiederholt. Daraus ergeben sich offene Fragen und Potenziale für weitere Forschungen. Nach Kenntnis des Verfassers sind derzeit systematische Untersuchungen zu dieser Fragestellung an der Assistenzprofessur für Architektur und nachhaltige Gebäudetechnologie am Institut für Technologie in der Architektur der ETH Zürich in Vorbereitung. Diese finden im Rahmen des Projekts *Future Cities* in Singapur statt.

Eine entsprechende Erweiterung des Solarenergieoptimierungstools sollte kein Problem sein. In dieser Arbeit wurde z. B. die Teilverschattung nicht berechnet. Es gibt bereits zahlreiche Methoden für die Berechnung der Verluste durch Teilverschattung, die in der Zukunft integriert werden können. Eine gute Methode wurde z. B. von Brecl vorgestellt [224]. In der jetzigen Version des Werkzeugs können die Verluste extern berechnet und im Solarenergieoptimierungstool für jede Fassadenausrichtung angegeben werden.

Der städtebauliche Kontext spielt auch bei der Nutzung der Windenergie eine wichtige Rolle. Dafür hat der Nutzer die Möglichkeit, Daten zur Geländerauigkeit anzugeben. Um den Einfluss der lokalen Bebauung zu ermitteln, müssen CFD-Simulationen für das Areal durchgeführt werden. Das gilt auch für die Nutzung komplexerer Bauformen. Die Windgeschwindigkeiten an den Messdaten müssen im Windenergieoptimierungstool angegeben werden.

Die entwickelten Werkzeuge schaffen eine Grundlage für Optimierungsprozesse, die eventuell die gestalterischen Eigenschaften des Hauses beeinflussen. Daher sollten bei der architektonischen Betrachtung Fragen zur Konstruktion der Gebäudehülle gestellt werden, um eine vernünftige Integration der Windturbinen zu gewährleisten. Ob die Windturbinen aufgrund ihrer Bewegung oder ihrer Struktur den Ausblick einschränken, sollte geprüft werden. Es sollte außerdem die Frage nach dem Verlustfaktor des Wirkungsgrads der dahinterliegenden bzw. beschatteten Photovoltaikzellen gestellt werden.

Nach den beschriebenen Krisenszenarien muss das Bauen nachhaltiger und umweltfreundlicher Hochhäuser forciert werden.

Die notwendige vernetzte Planung steht dabei immer im Vordergrund.

Das in dieser Dissertation entwickelte Planungswerkzeug ist ein Ansatz, der unter Nutzung algorithmischer Potenziale des Rechners dem Architekten die Möglichkeit gibt in der ersten Planungsphase zu wesentlichen Entscheidungen über die Performance des Plus-Energie-Hochhauses zu kommen.

6. Literaturverzeichnis

[1] H. Leibundgut, *LowEx Building Design: fur eine ZeroEmission Architecture*. Vdf Hochschulverlag, 2011, p. 120.

[2] Wikipedia-Autoren, “Plusenergiehaus,” *Wikipedia*. 2012.

[3] K. Voss and E. Musall, Nullenergiegebäude: Klimaneutrales Wohnen und Arbeiten im internationalen Vergleich [Broschiert]. Ins. F. Int. Architektur, 2011, p. 191.

[4] Carsten Grobe, “Vom Passivhaus zum Plus-Energiehaus.” [Online]. Verfügbar unter: http://www.passivhaus.de/passivhaus-informationen/vom-passivhaus-zum-plus-energiehaus/. [Zugriff am: 05-Apr-2012].

[5] Wiebke Gehring, Thomas Michael, Björn Richter, and Reinhold Schlimm, “Diercke Weltatlas ,” *Bildungshaus Schulbuchverlage*. [Online]. Verfügbar unter: http://www.diercke.de/kartenansicht.xtp?artId=978-3-14-100700-8&seite=67&id=4954&kartennr=2. [Zugriff am: 27-Jun-2012].

[6] M. Hegger, *Energie-Atlas : nachhaltige Architektur*. München: Inst. für Internat. Architektur-Dok. - Birkhäuser;Edition Detail, 2008, p. 280 S.

[7] B. Hornung, “Architekturmanagement,” In *Hochhausatlas*, 2002, pp. 250–255.

[8] ASHRAE, *ASHRAE Vision 2020*. 2008.

[9] European Parliament, Report on the proposal for a directive of the European Parliament and of the Council on the energy performance of buildings (recast). 2009.

[10] S. Attia, E. Gratia, A. De Herde, and J. L. M. Hensen, “Simulation-based decision support tool for early stages of zero-energy building design,” *Energy and Buildings*, vol. 49, no. 0, pp. 2–15, Jun. 2012.

[11] K. Daniels and R. Hammann, *Energy Designs for Tomorrow*. Axel Menges, 2009, p. 368.

[12] M. M. Ali and P. J. Armstrong, “Overview of Sustainable Design Factors in High-Rise Buildings,” *CTBUH 8th World Congress 2008*, 2008.

[13] S. A. et al. A. Athienitis, “Strategic design, optimization, and modelling issues of net-zero energy solar buildings,” In *Eurosun Conference, Graz.*, 2010.

[14] M. Hegger, “SolarDecathlon,” In *Bau 2009-Forum Zukunft des Bauens*, 2009.

[15] M. Grohmann, “Morphogenese und freier Wille,” *Bauwelt*, pp. 6–11, 2011.

[16] N. Kohler, “Teamonrientierte Bauplanung. Die Vernetzung von Kompetenzdomainen in virtuellen Projekträumen.,” Universität Karlsruhe, 1999.

[17] N. Cross, “Forty years of design research,” *Design Studies*, vol. 28, no. 1, pp. 1–4, Jan. 2007.

[18] Y. E. Kalay, “Performance-based design,” *Sciences-New York*, pp. 395–409, 1999.

[19] U. Bogenstatter, “Prediction and optimization of life-cycle costs in early design,” *Building Research and Information*, vol. 28, no. 5–6, pp. 376–386, 2000.

[20] Wikipedia-Autoren, “Optimierung (Mathematik),” *Wikipedia, Die freie Enzyklopädie.* 2012.

[21] G. Löhnert, “Der integrale Planungsprozess,” In *EnergieEffizientes Bauen*, 2002, p. 31f.

[22] C. Organ, C. L. Nunn, Z. Machanda, and R. W. Wrangham, “Phylogenetic rate shifts in feeding time during the evolution of Homo.,” *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, vol. 108, no. 35, pp. 14555–9, Aug. 2011.

[23] Whity, “Die Evolution der Menschen,” 2007. [Online]. Verfügbar unter: http://www.magistrix.de/texte/Schule/Referate/Biologie/Die-Evolution-der-Menschen.11169.html. [Zugriff am: 27-Jun-2012].

[24] S. Petersen and S. Svendsen, “Method and simulation program informed decisions in the early stages of building design,” *Energy and Buildings*, vol. 42, no. 7, pp. 1113–1119, Jul. 2010.

[25] A. Schlüter and Frank Thesseling, “Design Performance Viewer 2.0 - Evolution und Weiterentwicklung,” *Architecture*. Bundesamt für Energie BFE, Ch, p. 15, 2010.

[26] K. J. Lomas and H. Eppel, “Sensitivity analysis techniques for building thermal simulation programs,” *Energy and Buildings*, vol. 19, no. 1, pp. 21–44, 1992.

[27] C. J. Hopfe, “Uncertainty and sensitivity analysis in building performance simulation for decision support and design optimization,” Technische Universiteit Eindhoven, 2009.

[28] P. D. Wilde, “Providing computational support for the selection of energy saving building components,” Technical University of Delft, 2004.

[29] A. D. H. S. Attia, “Early design simulation tools for net zero energy buildings: a comparison of ten tools,” In *International Building Performance Simulation Association*, 2011.

[30] D. B. Crawley, J. W. Hand, M. Kummert, and B. T. Griffith, *Contrasting the capabilities of building energy performance simulation programs*. Washington: , 2005.

[31] I. Plüss, “IDA-ICE Schulung, ClimaDesign,” 2010.

[32] P. Liedl, “FassadenTool | climate-tool.com,” 2011. [Online]. Verfügbar unter: http://www.climate-tool.com/fassadentool.html. [Zugriff am: 27-Jun-2012].

[33] Physik für Gymnasien, “Umwandlungsprozess von Primärenergie über Sekundärenergie in Nutzenergie in einem Energieflussdiagramm.” [Online]. Verfügbar unter: http://www.herbartgymnasium.de/faecher/physik/energie/energieumwandlungen/seite8.htm. [Zugriff am: 29-Jun-2012].

[34] A. E. Mangold, “Was bedeutet ‘Primärenergiefaktor’?”[Online]. Verfügbar unter: http://www.bhkw-dachs.de/primernerg_01.htm. [Zugriff am: 29-Jun-2012].

[35] M. N. Fisch, “Sustainable and Energy Efficient Commercial Buildings Design , Construction and Operation Sustainable and Energy Efficient Commercial Buildings Green / Eco / Buildings,” 2008.

[36] Bundesministeriums der Justiz, *Verordnung zur Änderung der Energieeinsparverordnung*, vol. 1. 2009, pp. 1–76.

[37] S. Paltera, Picture of Solar Decathlon competition on the Washington Mall. U.S. Department of Energy, 2009.

[38] D. Fink, *Projektsstudie Power Tower*. München: TU-München, 2009.

[39] Meteotest, “Meteonorm Global meteorological database.” 2011.

[40] S. RENTZING, “Senkrecht der Sonne entgegen,” *Nachrichten aus der ChemieEnergie und Nachhaltigkeit*, vol. 57, no. 7–8, pp. 784–785, Jul-2009.

[41] J. Betancur and S. Beardsley, “Multitasking façade: How to combine BIPV with passive solar mitigation strategies in a high-rise curtain wall system,” In *Energy Forum on Solar Building Skin*, 2011, pp. 55–59.

[42] Schüco International KG, *Schüco E 2 Fassade*. 2009.

[43] “Wind Atlases of the World.” [Online]. Verfügbar unter: http://www.windatlas.dk/index.htm.

[44] Eric Rogers, “near north apartments.” Flickr, 2011.

[45] S. Behling, J. Hieber, M. Blanch, and T. D. Gruiter, “Wind energy for the built environment,” *Built Environment*, no. July, pp. 4–7, 2001.

[46] K. Daniels, “How to manage High-rise Buildings with natural ressources?,” *Building*. 2010.

[47] Wikipedia-Autoren, “Pearl_River_Tower.” Wikimedia Foundation, 2012.

[48] D. Kitwood, “The 480ft Strata Tower In London Is Named The UK’s Ugliest New Building.” Getty Images Europe, 2010.

[49] Frankfurter Rundschau, “Strata Tower: Englands hässlichster Wolkenkratzer,” *Frankfurter Rundschau*, Aug-2010.

[50] A. Smith and G. Gill, “Clean Technology Tower, Project Protfolio.” 2008.

[51] M. Kottas, “Die Jet- Stream Turbine ein neues Konzept für kostengünstige Windenergie Erzeugung direkt „ über “ dem Verbraucher.”

[52] C. Archer and K. Caldeira, “Global Assessment of High-Altitude Wind Power,” *Energies*, vol. 2, 2009.

[53] Online-Verwaltungslexikon olev.de, “Effektivität, Effizienz - Grundbegriffe im Neuen Steuerungsmodell.” [Online]. Verfügbar unter: http://www.olev.de/e/effekt.htm. [Zugriff am: 25-Jun-2012].

[54] D. Oertel, *Energiespeicher – Stand und Perspektiven*, no. 123. 2008, p. 168.

[55] D.-W.-I. S. von R., Dipl.-Ing. Gilbert Vogler Dipl.-Phys. Thomas Staudacher, “energiespeicher - stand, perspektiven und wirtschaftlichkeit,” *06/04/2009*, 2009. [Online]. Verfügbar unter: http://www.ffe.de/die-themen/speicher-und-netze/204-energiespeicher-stand-perspektiven-und-wirtschaftlichkeit. [Zugriff am: 29-Oct-2011].

[56] J. Schindler et al., Wasserstoff und Brennstoffzellen Starke Partner erneuerbarer Energiesysteme. 2008, p. 35.

[57] Dirk Asendorpf, “Umwelt: Die Mär vom Wasserstoff | Wissen | ZEIT ONLINE,” *DIE ZEIT*, 2004.

[58] S. Macchi, B. Olsson, and M. Zimmermann, “EMPA ‘SELF’,” 2010. [Online]. Verfügbar unter: http://www.empa.ch/self/. [Zugriff am: 19-Apr-2011].

[59] Daniel Leutenegger, “PROTOTYP FÜR NEUES WOHNKONZEPT - RAUMZELLE «SELF» DEBUTIERT AN DER SWISSBAU,” *Büro dlb*, Büro dlb, 2010.

[60] B. Dillon, “Pearl River Tower: Harvesting the wind to make glorious building of natural energy.” 2008.

[61] Harald Böttner, “Die Zukunft: Energierückgewinnung aus Abwärme,” *Fraunhofer IPM*, 2010. [Online]. Verfügbar unter: http://www.ipm.fraunhofer.de/fhg/ipm/technologien/thermoelektrik/was_ist_thermoelektrik/energy_harvesting/energierueckgewinnung.jsp. [Zugriff am: 30-Oct-2011].

[62] KONE (Schweiz) AG - Aufzüge und Rolltreppen, “Aufzüge für Geschäfts- und Bürogebäude,” 2012. [Online]. Verfügbar unter: http://www.kone.com/countries/de_CH/produkte/aufzug-aufzuege/buerogebaeude/Pages/default.aspx. [Zugriff am: 03-Jul-2012].

[63] T. Ambrosetti, Neue Monte-Rosa-Hütte SAC: Ein autarkes Bauwerk im hochalpinen Raum [Gebundene Ausgabe]. Gta Verlag; Auflage: 1, 2010.

[64] ETH-Studio Monte Rosa and T. Ambrosetti, *Neue Monte-Rosa-Hütte SAC, Luftaufnahme Winter*. 2009.

[65] Wikipedia-Autoren, “Intelligentes Stromnetz – Wikipedia.” [Online]. Verfügbar unter: http://de.wikipedia.org/wiki/Intelligentes_Stromnetz#cite_ref-1. [Zugriff am: 29-Oct-2011].

[66] SIEMENS-Smart Grid Team, “Distribution automation and protection .” .

[67] SIEMENS-Smart Grid Team, *Factsheet Smart Grid Energy Sector*, no. April. Messe, Hannover: , 2011.

[68] Pressemitteilung der Stiftung Weltbevölkerung, *7.013.992.000 Menschen zum Jahreswechsel*. 2011.

[69] Wikipedia-Autoren, “Weltbevölkerung,” *Wikipedia*. 2012.

[70] D. Meadows, J. Randers, and D. Meadows, *Grenzen des Wachstums - Das 30-Jahre-Update*. Stuttgart: Hirzel Verlag, 2006.

[71] M. Wackernagel et al., “Tracking the ecological overshoot of the human economy,” *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, vol. 99, no. 14, pp. 9266–9271, 2002.

[72] Wikipedia-Autoren, “Ökologischer Fußabdruck,” *Wikipedia, Die freie Enzyklopädie.* .

[73] Wikipedia-Autoren, “Bevölkerungsentwicklung.” [Online]. Verfügbar unter: http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Spezial:Zitierhilfe&page=Bev&#65533;lkerungsentwicklung&id=95062290. [Zugriff am: 28-Oct-2011].

[74] British Petroleum (BP), Historical statistical data from 1965-2010. 2010.

[75] British Petroleum (BP), *Verbrauch von Primärenergie pro Kopf*. 2007, pp. 24–28.

[76] SZ WISSEN, “Süddeutsche Zeitung WISSEN,” vol. 1, 2005.

[77] Stromtipp.de, “Vorteile und Nachteil der Kohle.” [Online]. Verfügbar unter: http://www.stromtip.de/rubrik2/19865/2/Vor-und-Nachteile.html. [Zugriff am: 28-Oct-2011].

[78] APSO Deutschland e. V., “Uranförderung der einzelnen Länder von 1950-2006 sowie Uranbedarf der Kernreaktoren,” *Sonnenenergie*, vol. 9, no. 10, 2007.

[79] Jan Oliver Löfken, “DLR Blogs,” *25-10-2010*, 2010. [Online]. Verfügbar unter: http://www.dlr.de/blogs/desktopdefault.aspx/tabid-6192/10184_read-279/. [Zugriff am: 29-Oct-2011].

[80] Wikipedia-Autoren, “Elektrizität/Tabellen und Grafiken – Wikipedia.” [Online]. Verfügbar unter: http://de.wikipedia.org/wiki/Elektrizität/Tabellen_und_Grafiken. [Zugriff am: 30-Oct-2011].

[81] Handelsblatt, “Saudi-Arabien will 16 neue Kernkraftwerke,” *Handelsblatt*, 2011.

[82] J. Hansen, M. Sato, R. Ruedy, K. Lo, D. W. Lea, and M. Medina-Elizade, “Global temperature change.,” *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, vol. 103, no. 39, pp. 14288–93, Sep. 2006.

[83] Wikipedia-Autoren, “Globale Erwärmung– Wikipedia.” [Online]. Verfügbar unter: http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Spezial:Zitierhilfe&page=Globale_Erwärmung&id=94550263. [Zugriff am: 26-Oct-2011].

[84] Ges. f. ökologische Forschung, *Der Triftgletscher im Berner Oberland*. 2006.

[85] J. Schellnhuber and S. Lebert, “Ein Mann läuft sturm,” *Die Zeit*, p. 37, 2005.

[86] Wikipedia-Autoren, “Folgen der globalen Erwärmung,” *Wikipedia, Die freie Enzyklopädie.* 2011.

[87] Weizsäcker/Lovins., Faktor Vier. Doppelter Wohlstand - halbierter Naturverbrauch. Der neue Bericht an den Club of Rome [Gebundene Ausgabe]. Droemer Knaur,, 1995.

[88] R. Madlener and J. Domac, “Introduction to the special section ‘Modeling socio-economic aspects of bioenergy use: methodologies, case studies, and policy evaluation and guidance’ (Vol. 35, No. 12),” *Energy Policy*, vol. 35, no. 12, pp. e1–e4, Dec. 2007.

[89] Handelsblatt, “Angeblich bis 2030 Atomkraft-Ersatz möglich,” *Handelsblatt*, 2011.

[90] krause / bossel 7 müller-reißmann:, *energiewende. wachstum und wohlstand ohne erdöl und uran. [Taschenbuch]*. s. fischer verlag; Auflage: 1. auflage, 1980.

[91] Agentur für Erneuerbare Energien, “Erneuerbare Energien zu kalkulierbaren Kosten.” [Online]. Verfügbar unter: http://www.unendlich-viel-energie.de/de/wirtschaft/kosten.html. [Zugriff am: 29-Oct-2011].

[92] Wikipedia-Autoren, “Energiewende – Wikipedia.” [Online]. Verfügbar unter: http://de.wikipedia.org/wiki/Energiewende#cite_note-0. [Zugriff am: 29-Oct-2011].

[93] Forca, “Natürliches Potenzial erneuerbarer Energien,” *Forca*, 2005.

[94] DESERTEC Foundation, “DESERTEC Foundation: Fragen & Antworten.” [Online]. Verfügbar unter: http://www.desertec.org/de/konzept/fragen-antworten/. [Zugriff am: 30-Oct-2011].

[95] Jan Oliver Löfken, “Energy question of the week: What progress is the DESERTEC project making on power from the desert?,” *DLR-Blog*, 2010. [Online]. Verfügbar unter: http://www.dlr.de/blogs/en/desktopdefault.aspx/tabid-6192/10184_read-286/. [Zugriff am: 05-Jul-2012].

[96] S. Ahmed et al., *RenewableS 2011*. 2011, p. 116.

[97] SPIEGEL, “Kampf um Rohstoffe,” *SPIEGEL SPECIAL 5*, 2006.

[98] BSW - Bundesverband Solarwirtschaft e.V., “http://www.solarwirtschaft.de.” .

[99] Patrick Große, “Der Klimawandel in der ethischen Perspektive der Verantwortung,” Grin, 2007.

[100] Jörg Schubert, Das “Prinzip Verantwortung” als verfassungsstaatliches Rechtsprinzip: rechtsphilosophische und verfassungsrechtliche Betrachtungen zur Verantwortungsethik von Hans Jonas. Baden Baden: Nomos, 1998.

[101] John Broom, “Die Ethik des Klimawandels,” *Spectrum.de*, 2009.

[102] K. Daniels, Technologie des ökologischen Bauens: Grundlagen und Maßnahmen, Beispiele und Ideen. Birkhäuser Basel, 1995, p. 304.

[103] S. Tomlinson, “Breaking the climate deadlock,” Technology for a low carbon future, E3G with the Climate Change Group, The Office of Tony Blair. 2009.

[104] Rolof Jürgen, “Führt klimagerechtes Bauen zu einer bestimmten Formensprache ?,” In *Glassbau Atlas*, DETAIL, 2002, pp. 723 – 726.

[105] Wikipedia-Autoren, “Ökophysiologische Klimaklassifikation.” .

[106] Wikipedia-Autoren, “Subtropen.” .

[107] Markus Kottek and Franz Rubel, “Effektive Klimaklassifikation.” [Online]. Verfügbar unter: http://koeppen-geiger.vu-wien.ac.at/. [Zugriff am: 02-Nov-2011].

[108] World Bank Researchers, “World Bank Group.” [Online]. Verfügbar unter: http://www.worldbank.org/. [Zugriff am: 02-Nov-2011].

[109] Wikipedia-Autoren, “Megastadt – Wikipedia,” *Wikipedia, Die freie Enzyklopädie.* [Online]. Verfügbar unter: http://de.wikipedia.org/wiki/Megastadt. [Zugriff am: 28-Oct-2011].

[110] P. D. United Nations, “World Urbanization Prospects: The 2007 Revision Population Database,” 2007. [Online]. Verfügbar unter: http://esa.un.org/unup/. [Zugriff am: 28-Oct-2011].

[111] Bundeszentrale für politische Bildung, *Städtische Bevölkerung*. Berlin: , 2008.

[112] National Bureau of Statistics of China, *China Statistical Yearbook 2009*. 2009, p. 243.

[113] Eva Sternfeld, “Ein Wirtschaftswunder gebaut auf Kohle ,” *Journal der Sächsischen Akademie der Wissenschaften*, no. 6, 2011.

[114] J. Eisele and E. Kloft, HochhausAtlas : Typologie und Beispiele, Konstruktion und Gestalt, Technologie und Betrieb. München: Callwey, 2002, p. 301 p.

[115] CTBUH Height Committee, “CTBUH Height Criteria.” [Online]. Verfügbar unter: http://www.ctbuh.org/HighRiseInfo/TallestDatabase/Criteria/tabid/446/language/en-US/Default.aspx. [Zugriff am: 30-Aug-2011].

[116] D. Fink, “Mehr Dichte! Plädoyer für ein Wachstum nach Innen,” In *70 Jahre Südhausbau , Partner für Generationen*, München: Ottmann GmbH & Co. Südhausbau KG, 2007, pp. 178–187.

[117] Thomas Herzog, “Solare Architektur,” In *Energie Atlas: Nachhaltige Architektur*, Birkhäuser, 2007, p. 280.

[118] K. Daniels, *Low Tech, Light Tech, High Tech*. Birkhäuser Basel, 1998.

[119] V. John, S. Gut, and H. Wallbaum, “Hoch oder quer? Ökologische Lebenszyklusanalyse eines Hochhauses im Vergleich zu einem Riegelgebäude / Upright or crosswise? Comparative ecological Life Cycle Assessment of a high rise and an elongate apartment building. ,” *Bauingenieur*, vol. 08, no. 2010, pp. 341–352, 2010.

[120] H. Cantz, Der Traum vom Turm: Hochhäuser : Mythos, Ingenieurkunst, Baukultur : eine Ausstellung des NRW-Forum Kultur und Wirtschaft Düsseldorf. Düsseldorf: Hatje Cantz, 2004, p. 272.

[121] S. Roaf, D. Crichton, and F. Nicol, ADAPTING BUILDINGS AND CITIES FOR CLIMATE CHANGE A 21st Century Survival Guide Second Edition. Oxford: Architectural Press, 2009.

[122] A. Wood, “SUSTAINABILITY: A NEW HIGH-RISE VERNACULAR?,” *Struct. Design Tall Spec. Build.*, no. 16, pp. 401–410, 2007.

[123] S. Watts and D. Langdon, “The economics of High-Rise,” *CTBUH Journal*, no. Iii, pp. 44–45, 2010.

[124] N. Ruck and Ø. Aschehoug, *Daylight in Buildings*. 2000.

[125] G. Hausladen and P. Liedl, *ClimaDesign*. München: Callwey, 2005.

[126] J. Sunanda, “Facade - Swikipedia,” *Swikipedia*, 2009. [Online]. Verfügbar unter: http://www.sustainable-buildings.org/wiki/index.php?title=Facade&oldid=148. [Zugriff am: 25-Jul-2011].

[127] M. Wigginton and B. McCarthy, “The Environmental Second Skin,” *UK Department of the Environment Transport and the Regions* . 2000.

[128] Detail Autoren, “Hearst Tower,” *Detail Zeitschrift für Architektur*, vol. 9, pp. 1–2, 2007.

[129] Design Build Network, “The Hearst Tower, New York ,” *Design build-network.com* , 2011. [Online]. Verfügbar unter: http://www.designbuild-network.com/projects/hearst/. [Zugriff am: 22-Nov-2011].

[130] CTBUH, “ctbuh tall buildings database,” 2011. [Online]. Verfügbar unter: http://buildingdb.ctbuh.org/index.php. [Zugriff am: 12-Nov-2011].

[131] CTBUH, “Tall & Urban, an analysis of global population and high-rise building,” *CTBUH Journal*, 2011.

[132] T. C. on T. B. and U. H. CTBUH, “Criteria for the Defining and Measuring of Tall Buildings,” *CTBUH Posters*, 2010.

[133] A. L. Huxtable, Zeit für Wolkenkratzer oder die Kunst, Hochhäuser zu bauen. Archibook-Verl., 1986, p. 142.

[134] R. Koolhaas, *Content*. Taschen, 2004, p. 544.

[135] Emporis, “Emporis-Datenbank für Hochhäuser,” 2011. [Online]. Verfügbar unter: www.emporis.de. [Zugriff am: 15-Nov-2011].

[136] “Kingdom Tower: Bin-Laden-Gruppe baut höchsten Turm der Welt - Nachrichten Geld - Immobilien - WELT ONLINE,” 2011.

[137] K. Yeang, “DESIGNING THE ECOSKYSCRAPER: PREMISES FOR TALL BUILDING DESIGN,” *Struct. Design Tall Spec. Build.*, vol. 16, pp. 411–427, 2007.

[138] C. Abel, N. Foster, and M. A. Stevens, *Sky high : vertical architecture*. London: Royal Academy of Arts, 2003, p. 120p.

[139] “Dezeen » Blog Archive » Jean Nouvel in Doha,” 2007. [Online]. Verfügbar unter: http://www.dezeen.com/2007/04/25/jean-nouvel-in-doha/. [Zugriff am: 03-Aug-2011].

[140] Seb c/Flickr, “institut du monde arabe. septembre 2007.” [Online]. Verfügbar unter: http://www.flickr.com/photos/secondlight/1414155190/sizes/m/in/photostream/. [Zugriff am: 10-Sep-2011].

[141] Dave, “O-14 Tower by Reiser + Umemoto » CONTEMPORIST,” *10-03-2011*, 2011. [Online]. Verfügbar unter: http://www.contemporist.com/2011/03/10/o-14-tower-by-reiser-umemoto/. [Zugriff am: 03-Aug-2011].

[142] Chad Smith, “O-14 by Reiser + Umemoto » Yanko Design.” [Online]. Verfügbar unter: http://www.yankodesign.com/2008/12/03/bubbling-up-in-dubai/. [Zugriff am: 15-Nov-2011].

[143] F. Sick, “Klimagerechtes Bauen,” pp. 1–10, 2004.

[144] Institut für Angewandte Optimierung GmbH IfaO, “Optimieren statt Probieren.” [Online]. Verfügbar unter: http://www.opti.ch/index.shtml.

[145] H. Benker, Mathematische Optimierung mit Computeralgebrasystemen: Einführung für Ingenieure, Naturwissenschaftler und Wirtschaftswissenschaftler unter Anwendung ... Mathcad, Matlab und Excel (German Edition). Springer, 2003, p. 512.

[146] ReliaSoft’s R&D staff, “Optimum Preventive Maintenance Replacement Time,” *Reliability Edge*, vol. 1, no. 1, 2000.

[147] F. Jarre and J. Stoer, *Optimierung*. Springer.

[148] A. D. Radford and J. S. Gero, “Tradeoff diagrams for the integrated design of the physical environment in buildings,” *Building and Environment*, vol. 15, no. 1, pp. 3–15, 1980.

[149] D. H. Meadows, *Thinking in Systems: A Primer*. Chelsea Green Publishing, 2008, p. 240.

[150] S.-O. Han, “Varianzbasierte Sensitivitätsanalyse als Beitrag zur Bewertung der Zuverlässigkeit adaptronischer Struktursysteme,” Technisch Universität Darmstadt, 2011.

[151] Wikipedia-Autoren, “Sensitivitätsanalyse – Wikipedia.” .

[152] D. Ohse, “Sensitivitätsanalyse in der Linearen Optimierung,” 2012. [Online]. Verfügbar unter: http://www.wiwi.uni-frankfurt.de/profs/ohse/lehre/dokumente/ORsens_analyse.pdf. [Zugriff am: 31-Mar-2012].

[153] G. Pültz, “Energiebilanz-Tool.” Gunter Pülz; Lehrstuhl für Bauklimatik und Haustechnik, Prof. Hausladen - TUM, 2010.

[154] ILK Dresden, “ILK Dresden - Mollier hx-Diagramm.” [Online]. Verfügbar unter: http://www.ilkdresden.de/index.php?id=726&tx_ttnews[tt_news]=620&tx_ttnews[backPid]=62&cHash=64fd26651a. [Zugriff am: 17-Nov-2011].

[155] A. Lahme, “Grafische Bestimmung von Tageslichtquotienten in Räumen,” TU Braunschweig.

[156] Wikipedia-Autoren, “Maslowsche Bedürfnispyramide,” *Wikipedia, Die freie Enzyklopädie.*, 2011. [Online]. Verfügbar unter: http://de.wikipedia.org/wiki/Maslowsche_Bed&#65533;rfnispyramide. [Zugriff am: 04-Nov-2011].

[157] Wikipedia-Autoren, “Thermische Behaglichkeit – Wikipedia.” [Online]. Verfügbar unter: http://de.wikipedia.org/wiki/Thermische_Behaglichkeit. [Zugriff am: 08-Nov-2011].

[158] Helmut Weber, *Energiebewußt planen*. München: Callway, 1983.

[159] K. Daniels, Gebäudetechnik. Ein Leitfaden für Architekten und Ingenieure. Oldenbourg, 2000.

[160] Wikipedia-Autoren, “ISO 7730.” [Online]. Verfügbar unter: http://de.wikipedia.org/wiki/ISO_7730. [Zugriff am: 06-Aug-2012].

[161] G. Lohmeyer, H. Bergmann, and M. Post, *Praktische Bauphysik: eine Einführung mit Berechnungsbeispielen*. Vieweg +Teubner, 2005, p. 743.

[162] C. Hilgers, R.-P. Strauß, E. Theiß, and Baunetz Wissen-Redaktion, “Heizung,” *Baunetz Wissen*, 2012. [Online]. Verfügbar unter: http://www.baunetzwissen.de/standardartikel/Heizung_Einfluss-der-Wandtemperatur_161092.html. [Zugriff am: 13-Jul-2012].

[163] G. Pültz, Bauklimatischer Entwurf für moderne Glasarchitektur: passive Massnahmen der Energieeinsparung. Ernst & Sohn, 2002, p. 196.

[164] Christoph Waller, “Lichttechnische Begriffe und Einheiten.” [Online]. Verfügbar unter: http://www.cwaller.de/deutsch.htm?lichttechnische_begriffe.htm~information. [Zugriff am: 08-Nov-2011].

[165] DIN Deutsches Institut für Normung, “DIN 5034.” Beuth, 2011.

[166] schorsch.com, “Tageslichtquotient,” *2011*. [Online]. Verfügbar unter: http://www.schorsch.com/de/wissen/glossar/tageslichtquotient.html. [Zugriff am: 01-Dec-2011].

[167] Wikipedia-Autoren, “Tageslichtquotient.” [Online]. Verfügbar unter: http://www.schorsch.com/de/wissen/glossar/tageslichtquotient.html. [Zugriff am: 01-Dec-2011].

[168] C. Zürcher and T. Frank, *Bauphysik*. vdf Hochschulverlag AG, 2004, p. 245.

[169] G. Hausladen, M. de Saldanha, and P. Liedl, ClimaSkin: Konzepte für Gebäudehüllen, die mit weniger Energie mehr leisten. Callwey, 2006, p. 191.

[170] G. Hausladen and K. Tichelmann, *Ausbau Atlas: Integrale Planung, Innenausbau, Haustechnik*. Birkhäuser, 2009, p. 288.

[171] H. Kuchling, *Taschenbuch der Physik*. Fachbuchverl. Leipzig im Carl-Hanser-Verl., 2007, p. 711.

[172] W. K. Adolf J. Schwab, *Elektromagnetische Verträglichkeit*. Berlin: Springer, 2007.

[173] R. Wölfle, “Elektromagnetische Verträglichkeit (EMV).” [Online]. Verfügbar unter: http://www.ralf-woelfle.de/elektrosmog/redir.htm?http://www.ralf-woelfle.de/elektrosmog/technik/emv.htm. [Zugriff am: 08-Nov-2011].

[174] M. Otto and K. E. von Mühlendahl, “Sick-Building-Syndrom (SBS),” 2012. [Online]. Verfügbar unter: http://www.allum.de/krankheiten/sick_building_syndrom-(sbs).html. [Zugriff am: 15-Jul-2012].

[175] Wikipedia-Autoren, “Sick-Building-Syndrom – Wikipedia.” [Online]. Verfügbar unter: http://de.wikipedia.org/wiki/Sick-Building-Syndrom. [Zugriff am: 08-Nov-2011].

[176] Dieter Eis, “Umweltbedingte Gesundheitsgefahren - Tatsachen und Spekulationen,” In *Dokumentationsband über die 39. Jahrestagung der Deutschen Gesel*, Rettenmeier A. W. and C. Feldhaus, Eds. Fulda: Rindt-Druck, 1999, pp. 737–740.

[177] K. Daniels, “Gebäudetechnologie,” In *Hochhausatlas*, München: , 2002, pp. 182–201.

[178] Bing maps, “Saudi Arabien.” [Online]. Verfügbar unter: http://www.bing.com/maps/#Y3A9MjMuMzk0NTIwNjk0NTU5MDc3fjQ3LjYzMDY1MzM4MTM0NzY3Jmx2bD01JnN0eT1y. [Zugriff am: 12-Jul-2012].

[179] Bing maps, “Jeddah.” [Online]. Verfügbar unter: http://www.bing.com/maps/#Y3A9MjEuNTQzNjM4MjYzMjk5MjN+MzkuMTcyOTg1MDc2OTA0MzImbHZsPTExJnN0eT1y. [Zugriff am: 12-Jul-2012].

[180] Wikipedia-Autoren, “Dschidda – Wikipedia.” [Online]. Verfügbar unter: http://de.wikipedia.org/wiki/Dschidda. [Zugriff am: 06-Nov-2011].

[181] bevoelkerungsstatistik.de, “World Gazetteer: Jiddah .” [Online]. Verfügbar unter: http://bevoelkerungsstatistik.de/wg.php?x=1174526936&men=gpro&lng=de&dat=32&geo=-185&srt=pnan&col=aohdq&pt=c&va=&geo=401421917. [Zugriff am: 12-Jul-2012].

[182] “Höchstes Gebäude der Welt: Saudis bauen Kilometer-Turm - ,” *SPIEGEL ONLINE*, 2011.

[183] Bing maps, “USA.” [Online]. Verfügbar unter: http://www.bing.com/maps/#Y3A9NTIuMzI2MjU2NTQxOTY0OTd+LTEyMC4wMDAwMDM4MTQ2OTcyNyZsdmw9MyZzdHk9cg==. [Zugriff am: 12-Jul-2012].

[184] Bing maps, “Miami.” [Online]. Verfügbar unter: http://www.bing.com/maps/#Y3A9MjUuNzk4NzIzODg5NjU0OTF+LTgwLjIwOTYzMjg3MzUzNTE0Jmx2bD0xMCZzdHk9cg==. [Zugriff am: 12-Jul-2012].

[185] miamivice, “Miami.” [Online]. Verfügbar unter: http://www.infracity.de/miamivice/miami.html. [Zugriff am: 12-Jul-2012].

[186] Bing maps, “Australien.” [Online]. Verfügbar unter: http://www.bing.com/maps/#Y3A9LTI4LjY5Mzg3Njg0OTEwODk3NX4xMzEuODIwMDAzNTA5NTIxNSZsdmw9NCZzdHk9cg==. [Zugriff am: 12-Jul-2012].

[187] Bing maps, “Sydney.” [Online]. Verfügbar unter: http://www.bing.com/maps/#Y3A9LTMzLjg2ODM3Mjc4MTUyNTYyfjE1MS4yMDk0NDIxMzg2NzE4OCZsdmw9MTAmc3R5PXI=. [Zugriff am: 12-Jul-2012].

[188] Down Under Guide, “Sydney - New South Wales, Australien,” 2012. [Online]. Verfügbar unter: http://www.down-under-guide.com/stadt/sydney. [Zugriff am: 12-Jul-2012].

[189] Australian Bureau of Statistics, *Sydney (Urban Centre/Locality)*. 2006.

[190] Australian Bureau of Statistics, *Sydney (Statistical Division)*. 2006.

[191] Bing maps, “Südafrika.” [Online]. Verfügbar unter: http://www.bing.com/maps/#Y3A9LTI4Ljc2NzA3NTE4ODE1MDI0NH4yNS4wMjAwMDA0NTc3NjM2NyZsdmw9NiZzdHk9cg==. [Zugriff am: 12-Jul-2012].

[192] Bing maps, “Durban.” [Online]. Verfügbar unter: http://www.bing.com/maps/#Y3A9LTI5Ljg0NjA3NDM4MjEyMzQzM34zMC45ODg2NTMxODI5ODMzOSZsdmw9MTMmc3R5PXI=. [Zugriff am: 12-Jul-2012].

[193] SOUTHERN DOMAIN CC, “Durban.” [Online]. Verfügbar unter: http://www.suedafrika.net/reisefuehrer/kwazulu-natal/durban.html. [Zugriff am: 12-Jul-2012].

[194] Wikipedia-Autoren, “Durban – Wikipedia.” [Online]. Verfügbar unter: http://de.wikipedia.org/wiki/Durban. [Zugriff am: 06-Nov-2011].

[195] N. und R. (BMU) Bundesministerium für Umwelt, “Weltklimagipfel im südafrikanischen Durban .” [Online]. Verfügbar unter: http://www.bmu.de/klimaschutz/internationale_klimapolitik/un-klimakonferenzen/doc/47319.php. [Zugriff am: 12-Jul-2012].

[196] Wikipedia-Autoren, “Mollier-h-x-Diagramm – Wikipedia.” [Online]. Verfügbar unter: http://de.wikipedia.org/wiki/Mollier-h-x-Diagramm. [Zugriff am: 01-Dec-2011].

[197] R. Fragusso, “Point In Polygon.” 2002.

[198] A. Pope, “Point In Polygon.” .

[199] R. Krippner, “Die Gebäudehülle als Wärmeerzeuger und Stromgenerator,” In *Gebäudehüllen - Konzepte, Schichten und Material*, Detail., München: Birkhauser Verlag AG, 2001, pp. 49–61.

[200] Fachverband Tageslicht und Rauchschutz, “ Tageslicht - Grundlagen - Was ist Licht?” [Online]. Verfügbar unter: http://www.fvlr.de/tag_wasistlicht.htm#13. [Zugriff am: 03-Apr-2012].

[201] W. Lang, “Alles nur Fassade? Zu den funktionalen, energetischen und konstruktiven Aspekten der Gebäudehülle,” In *Gebäudehüllen - Konzepte, Schichten und Material2*, Detail., München: Birkhauser Verlag AG, 2001, pp. 29–47.

[202] W. Nerdinger, “Bedeutung der Fassade inm historischen Wandel,” In *ClimaSkin*, München: , 2006, pp. 87–93.

[203] D. U. Hindrichs and K. Daniels, *Plusminus 20°/40° latitude : sustainable building design in tropical and subtropical regions*. Stuttgart ; London: Edition A. Menges, 2007, p. 457 p.

[204] Amer, G. Steinmetz, and N. Geographic, “Shibam, Yemen,” *2010*. [Online]. Verfügbar unter: http://arab-aa.com/2010/02/03/shibam-yemen/.

[205] UNESCO, “Old Walled City of Shibam,” *Islamic Art and Architecture*, 2011. [Online]. Verfügbar unter: http://islamic-arts.org/2011/old-walled-city-of-shibam/.

[206] Unknown, “www.alriyadh.com.” .

[207] “www.Sha6e.com.” [Online]. Verfügbar unter: http://www.sha6e.com/vb/showthread.php?t=4118.

[208] H. Fathy, Natural Energy and Vernacular Architecture: Principles and Examples with Reference to Hot Arid Climates. University Of Chicago Press, 1986, p. 196.

[209] M. Bayoumi, “OPTIMISING THE HIGH-RISE FAÇADE,” Technische Universität München, 2011.

[210] Wikipedia-Autoren, “Windenergie.” IG Windkraft.

[211] TÜV SÜD Gruppe, *Alternative zum Windkanal*. 2008, p. 5.

[212] ASHRAE, *ASHRAE Handbook*. 1997, pp. 262–279.

[213] M. Tahbaz, “The Estimation of the Wind Speed in Urban Areas,” pp. 1–13.

[214] Suisse Eole, “Die Website für Windenergie-Daten der Schweiz.” [Online]. Verfügbar unter: http://www.wind-data.ch. [Zugriff am: 28-Feb-2012].

[215] R. Nauber, “Windenergieanlagen für den urbanen Raum,” Hochschule für Kunst und Design Halle Saale, 2006.

[216] L. Lu and K. Y. Ip, “Investigation on the feasibility and enhancement methods of wind power utilization in high-rise buildings of Hong Kong,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 13, no. 2, pp. 450–461, Feb. 2009.

[217] Wikipedia-Autoren, “Weibull-Verteilung,” *Wikipedia, Die freie Enzyklopädie.* 2012.

[218] Elektrotechnik Stevens, “windgenerator tornado 700s,” 2012. [Online]. Verfügbar unter: http://www.pro-umwelt.de/windturbine-tornado-700s-p-880.html. [Zugriff am: 28-Feb-2012].

[219] C. Yuen, M. Zanchetta, and G. Battle, “Performance of a Building Integrated Wind Farm,” *Fluid Dynamics*, no. September, pp. 19–22, 2004.

[220] S.O.M., “www.SOM.com | Pearl River Tower.” [Online]. Verfügbar unter: http://www.som.com/content.cfm/pearl_river_tower. [Zugriff am: 05-Apr-2012].

[221] R. Frechette and R. Gilchrist, “Seeking Zero-Energy,” *American society of civil engineers*, no. January, 2009.

[222] M. Rawolle et al., “Advances in nanostructuring of titania thin films for dye-sensitized and hybrid photovoltaics,” In *Energy Challenges – Germany 2050*, 2012, p. 15.

[223] Kevin Bullis, “Weg mit dem Staub,” *Technology Review*, 2010.

[224] K. Brecl and M. Topič, “Self-shading losses of fixed free-standing PV arrays,” *Renewable Energy*, vol. 36, no. 11, pp. 3211–3216, Nov. 2011.

[225] Energieinfo.de, “fossile Brennstoffe.” [Online]. Verfügbar unter: http://www.energieinfo.de/eglossar/fossile_brennstoffe.html. [Zugriff am: 05-Aug-2012].

[226] energiesparhaus.at, “Fachbegriffe.” [Online]. Verfügbar unter: http://www.energiesparhaus.at/fachbegriffe/uwert.htm. [Zugriff am: 05-Aug-2012].

[227] Wikipedia-Autoren, “Globalstrahlung – Wikipedia.” [Online]. Verfügbar unter: http://de.wikipedia.org/wiki/Globalstrahlung. [Zugriff am: 05-Aug-2012].

[228] baunetzwissen.de, “Sonnenschutzverglasunge.” [Online]. Verfügbar unter: http://www.baunetzwissen.de/standardartikel/Sonnenschutz-Sonnenschutzverglasungen_787382.html. [Zugriff am: 05-Apr-2012].

[229] Wikipedia-Autoren, “Extremwert – Wikipedia.” [Online]. Verfügbar unter: http://de.wikipedia.org/wiki/Extremwert. [Zugriff am: 05-Aug-2012].

7. Anhang

7.1 Benutzeroberflächen

7.1.1 Eingabe von Hochhausdaten

Im Folgenden soll auf die Komponente der Benutzeroberflächen des Solarenergieoptimierungstools eingegangen werden. In Abbildung 7.1 wird dazu eine grobe Übersicht über die Benutzeroberfläche gegeben.

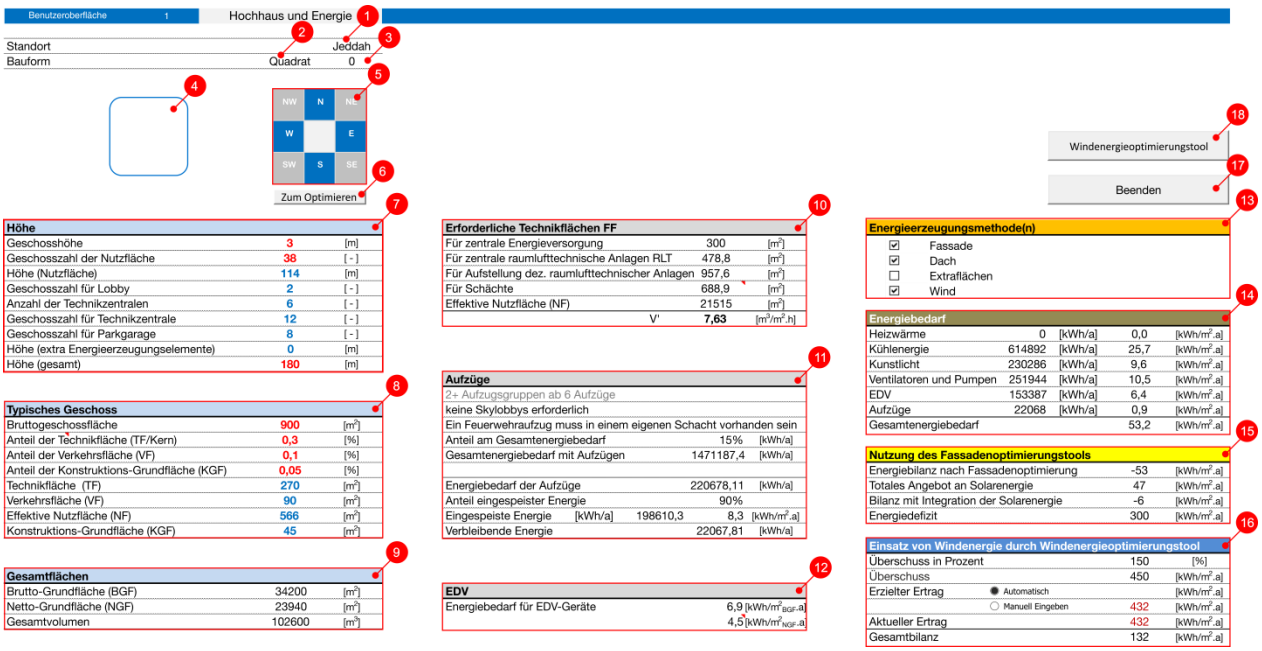


Abbildung 7.1 Benutzeroberfläche der grundlegenden Rahmenbedingungen des Hochhauses (eigene Darstellung)

Folgende Daten beziehen sich auf die rot gekennzeichneten Nummern:

1. Auswahl des Standortes
2. Auswahl der Bauform
3. Eingabe des Rotationswinkels
4. Darstellung der ausgewählten Bauform
5. Darstellung der aktiven Fassadenausrichtungen
6. Verknüpfung zur Benutzeroberfläche-2 bzw. zur Fassadenoptimierung
7. Dateneingabe in Bezug auf die Höhe
8. Dateneingabe eines typischen Geschosses
9. Gesamtflächen und Volumen
10. Technikflächeneingabe
11. Eingabe von Daten zu Aufzügen
12. Anschlussleistung und Wärmeabgabe der EDV
13. Methoden zur Abdeckung des Energiebedarfs
14. Daten zum Energiebedarf

15. Vom Solarenergieoptimierungstool erhaltene Daten zur Energiebilanz
16. Zusammenfassung von Daten zur Gesamtenergiebilanz unter Einbezug des Windenergieoptimierungstools

7.1.2 Solarenergieoptimierungstool

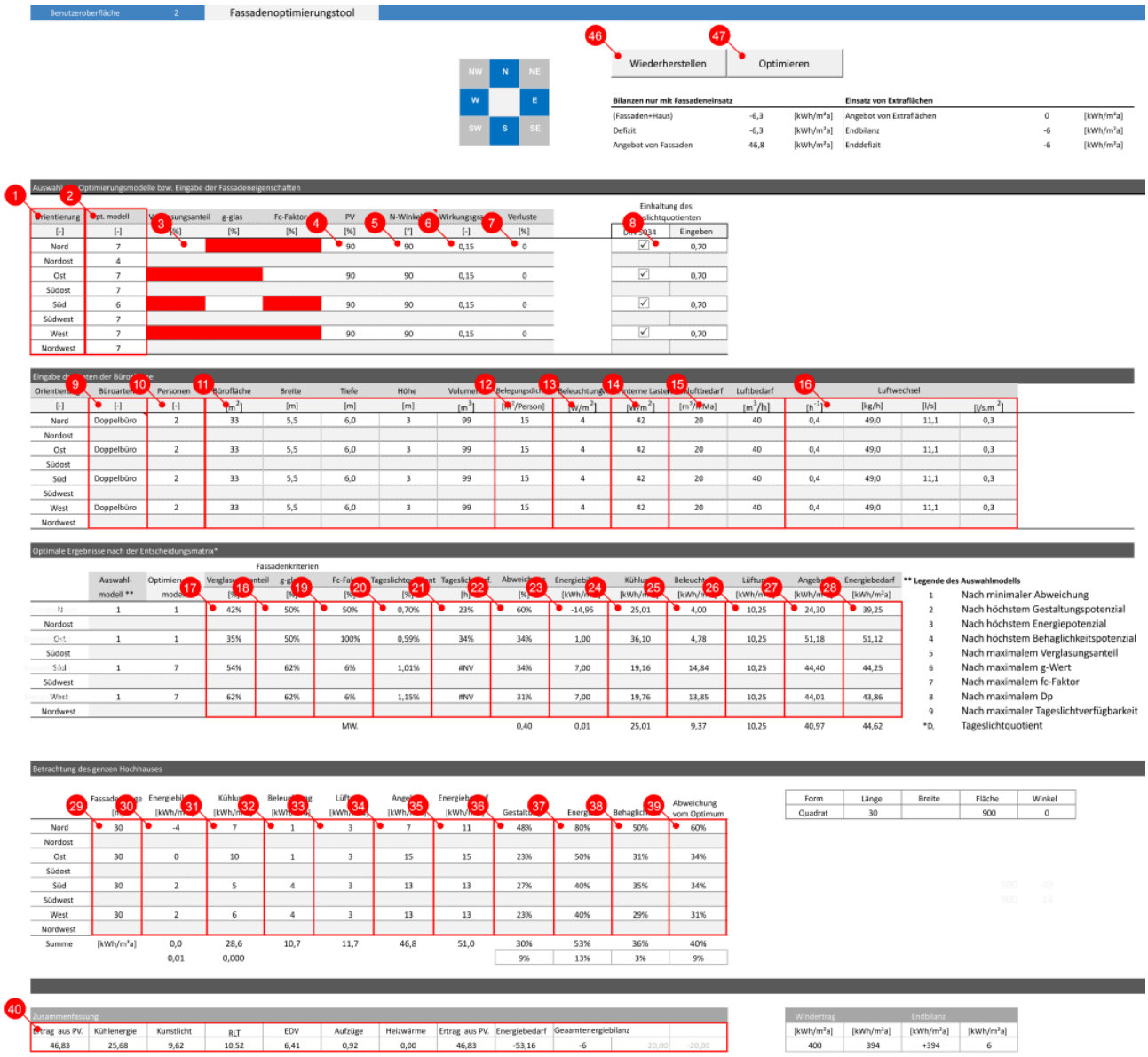


Abbildung 7.2 Benutzeroberfläche-2 des Solarenergieoptimierungstools (eigene Darstellung)

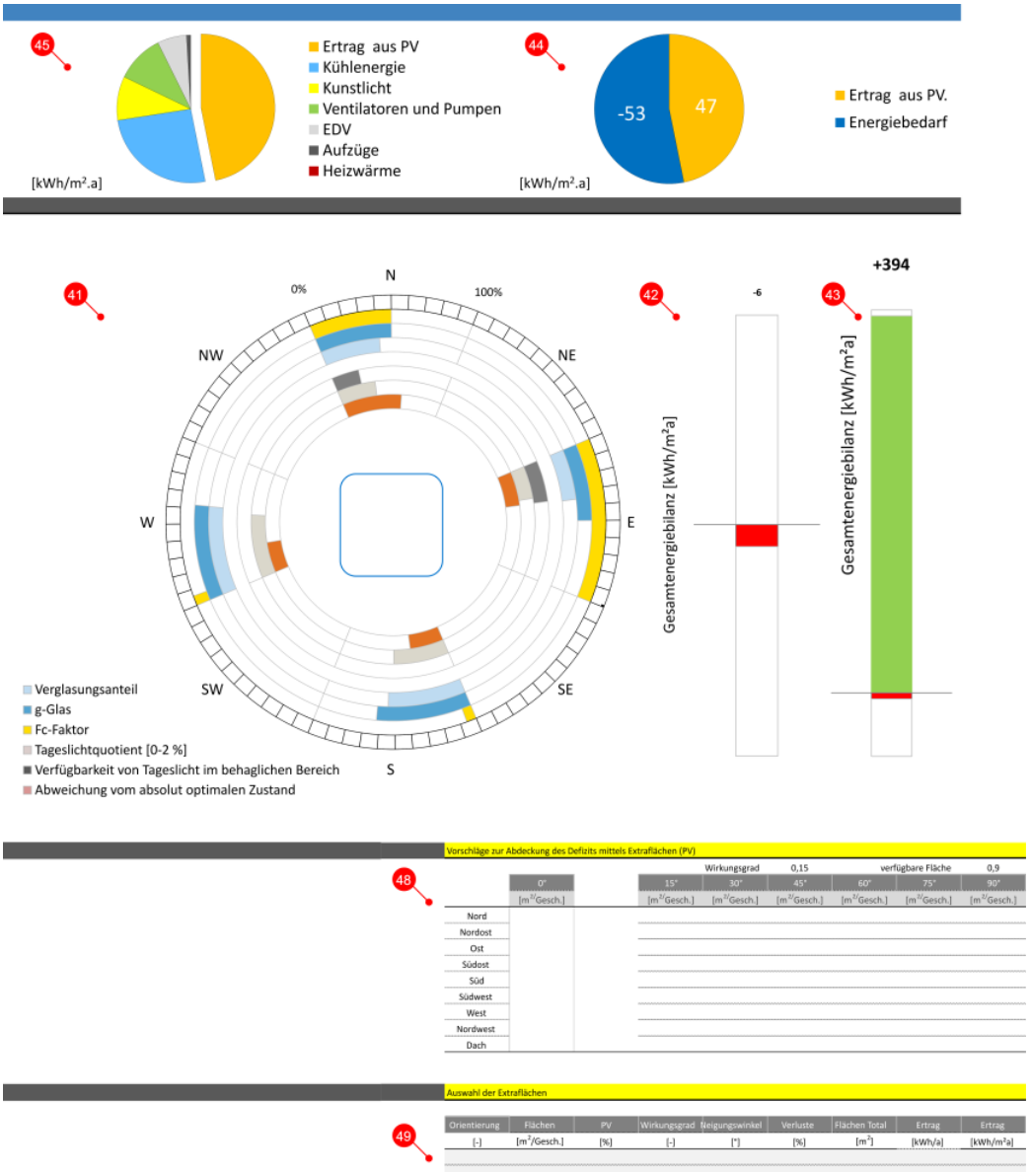


Abbildung 7.3 Fortsetzung der Benutzeroberfläche-2 des Solarenergieoptimierungstools (eigene Darstellung)

Auf der Ebene der Fassade und des dahinterliegenden Raums sind folgende Daten relevant:

1. Fassadenausrichtungen
2. Auswahl des Optimierungsmodells
3. Dateneingabe nach dem ausgewählten Optimierungsmodell
4. Eingabe des Prozentanteils der verfügbaren Wandfläche für die Installation von Photovoltaikflächen
5. Eingabe des Neigungswinkels der Photovoltaikzellen
6. Eingabe des Wirkungsgrads

7. Eingabe des Anteils an Energieverlusten durch weitere Faktoren wie Teilverschattung
8. Hier hat der Nutzer zwei Auswahlmöglichkeiten zur Festlegung der Grenzen des Tageslichtquotienten: entweder nach der Norm DIN 5034 oder manuell.
9. Auswahl der Büroart
10. Eingabe der Nutzeranzahl
11. Eingabe der Raumdimensionen
12. Darstellung der Belegungsdichte
13. Eingabe der Beleuchtungsanschlussleistung
14. Eingabe der weiteren internen Lasten
15. Eingabe des gewünschten Frischluftbedarfs für die Person und den Raum
16. Darstellung des Luftwechsels
17. Erzeugte Kriterien: optimaler Verglasungsanteil
18. Erzeugte Kriterien: optimaler g-Wert Glas
19. Erzeugte Kriterien: optimaler Fc-Faktor
20. Resultierender Tageslichtquotient
21. Resultierende Tageslichtverfügbarkeit im behaglichen Bereich
22. Abweichung vom absolut optimalen Zustand
23. Energiebilanz
24. Kühlenergiebedarf
25. Strombedarf für die Beleuchtung
26. Lüftungsenergiebedarf
27. Ertrag aus Photovoltaikzellen
28. Gesamtenergiebedarf

Darstellung der Resultate auf der Ebene des Hochhauses:

29. Fassadenmaße
30. Energiebilanz
31. Kühlenergiebedarf
32. Strombedarf für die Beleuchtung
33. Lüftungsenergiebedarf
34. Totaler Ertrag aus Photovoltaikzellen
35. Energiebedarf
36. Bewertung der Gestaltung
37. Bewertung der Energie
38. Bewertung der Behaglichkeit
39. Abweichung vom absolut optimalen Zustand
40. Zusammenfassung der Ergebnisse

Darstellung der Ergebnisse:

41. Empfohlene Fassadenkriterien
42. Gesamtenergiebilanz
43. Energiebilanz nach der Nutzung des Windenergieoptimierungstools
44. Bedarf gegen Ertrag aus Photovoltaikzellen
45. Verteilung der Energieverbräuche

Befehle:

46. Befehl zum Löschen der generierten Daten
47. Befehl zum Optimieren

Nutzung von Extraflächen zur Integration von Photovoltaikzellen, um das Defizit abzudecken:

48. Darstellung der benötigten Extraflächen nach Orientierung und Neigungswinkel
49. Auswahl der gewünschten Konfiguration der Extraflächen

7.1.3 Windenergieoptimierungstool

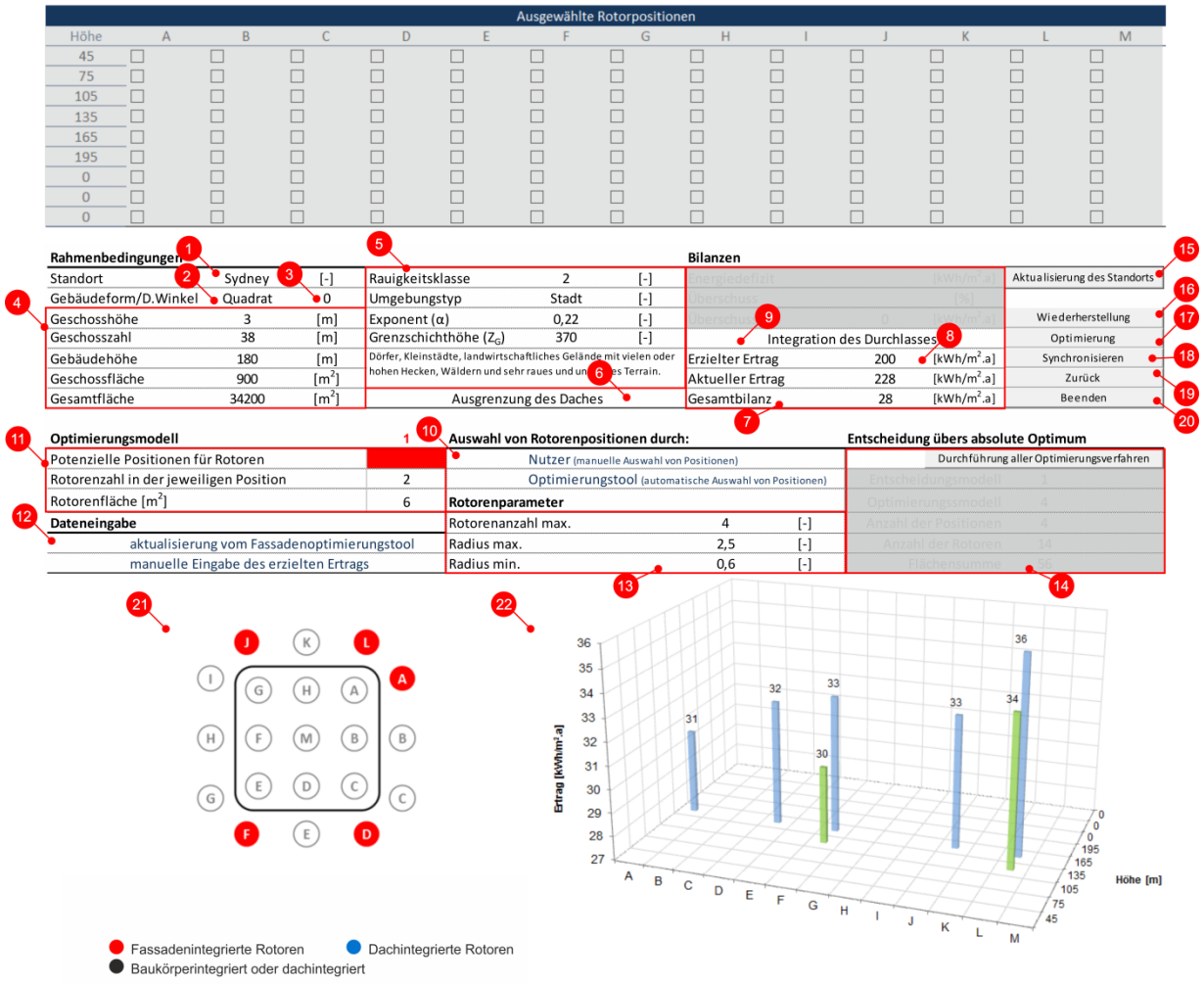


Abbildung 7.4 Benutzeroberfläche des Windenergieoptimierungstools (eigene Darstellung)

1. Auswahl des Standortes
2. Auswahl der Bauform
3. Eingabe des Drehwinkels
4. Eingabe der Baukörperdaten (diese können vom Solarenergieoptimierungstool importiert werden)
5. Daten zur Geländerauigkeit
6. Option zur Ausgrenzung des Daches
7. Daten zur Energiebilanz
8. Eingabe des gewünschten Ertrags
9. Option der Integration eines Winddurchlasses in den Baukörper
10. Daten zu den Optimierungsmodellen
11. Optionale Auswahl der Rotorenpositionen durch den Nutzer oder den Rechner
12. Auswahl der Methode zur Eingabe des erzielten Ertrags

13. Eingabe der Grenzen des Optimierungsmodells
14. Eingabe der Daten des Entscheidungsmodells über das absolute Optimum
15. Nach der Auswahl eines Standorts und/oder Bauform sollten die Daten im Hintergrund aktualisiert werden.
16. Wiederherstellung der eingegebenen Daten zur Durchführung eines neuen Optimierungsvorgangs
17. Durchführung eines Optimierungsvorgangs
18. Synchronisieren der Daten mit dem Solarenergieoptimierungstool
19. Zurück zum Solarenergieoptimierungstool
20. Beenden des Windenergieoptimierungstools
21. Darstellung der empfohlenen Rotorenpositionen
22. Darstellung der Erträge des jeweiligen Rotors bei unterschiedlichen Höhen und Positionen

7.2 Erläuterung des Aufbaus der Optimierungsmodelle

Folgende Tabellen geben Auskunft über den Aufbau der Optimierungsmodelle in beiden Tools. Beim Solarenergieoptimierungstool wird der Fall der Maximierung der Energiebilanz gezeigt.

7.2.1 Solarenergieoptimierungstool

Optimierungsmodell 1
Ermittlung des optimalen Verglasungsanteils

Ziel	Maximale Energiebilanz	≥	0	[kWh/m^2.a]
Variablen	Verglasungsanteil	=		[%]
Nebenbedingungen	Tageslichtquotient	≥	z.B. 0,95	[%]
	g-Wert (Glas)	=		[%]
	t-Wert (Glas)	=		[%]
	Fc-Faktor	=		[%]

Tabelle 7.1 Aufbau des Optimierungsmodells-1

Optimierungsmodell 2
Ermittlung des optimalen Energiedurchlassgrades

Ziel	Maximale Energiebilanz	≥	0	[kWh/m^2.a]
Variablen	g-Wert (Glas)	=		[%]
	t-Wert (Glas)	=		[%]
Nebenbedingungen	Tageslichtquotient	≥	z.B. 0,95	[%]
	Verglasungsanteil	=		[%]
	Fc-Faktor	=		[%]

Tabelle 7.2 Aufbau des Optimierungsmodells-2

Optimierungsmodell 3
Ermittlung des optimalen Abminderungsfaktors des Sonnenschutzes

Ziel	Maximale Energiebilanz	≥	0	[kWh/m^2.a]
Variablen	Fc-Faktor	=		[%]
Nebenbedingungen	Tageslichtquotient	≥	z.B. 0,95	[%]
	g-Wert (Glas)	=		[%]
	t-Wert (Glas)	=		[%]
	Verglasungsanteil	=		[%]

Tabelle 7.3 Aufbau des Optimierungsmodells-3

Optimierungsmodell 4
Ermittlung des optimalen Verglasungsanteils und des optimalen Energiedurchlassgrades

Ziel	Maximale Energiebilanz	≥	0	[kWh/m^2.a]
Variablen	Verglasungsanteil	=		[%]
	g-Wert (Glas)	=		[%]
	t-Wert (Glas)	=		[%]
Nebenbedingungen	Tageslichtquotient	≥	z.B. 0,95	[%]
	Fc-Faktor	=		[%]

Tabelle 7.4 Aufbau des Optimierungsmodells-4

Optimierungsmodell 5

Ermittlung des optimalen Energiedurchlassgrades
und des optimalen Abminderungsfaktors des Sonnenschutzes

Ziel	Maximale Energiebilanz	≥	0	[kWh/m^2.a]
Variablen	Fc-Faktor	=		[%]
	g-Wert (Glas)	=		[%]
	t-Wert (Glas)	=		[%]
Nebenbedingungen	Tageslichtquotient	≥	z.B. 0,95	[%]
	Verglasungsanteil	=		[%]

Tabelle 7.5 Aufbau des Optimierungsmodells-5

Optimierungsmodell 6

Ermittlung des optimalen Verglasungsanteils
und des optimalen Abminderungsfaktors des Sonnenschutzes

Ziel	Maximale Energiebilanz	≥	0	[kWh/m^2.a]
Variablen	Verglasungsanteil	=		[%]
	Fc-Faktor	=		[%]
Nebenbedingungen	Tageslichtquotient	≥	z.B. 0,95	[%]
	g-Wert (Glas)	=		[%]
	t-Wert (Glas)	=		[%]

Tabelle 7.6 Aufbau des Optimierungsmodells-6

Optimierungsmodell 7

Ermittlung des optimalen Verglasungsanteils, des optimalen Energiedurchlassgrades
und des optimalen Abminderungsfaktors des Sonnenschutzes

Ziel	Maximale Energiebilanz	≥	0	[kWh/m^2.a]
Variablen	Verglasungsanteil	=		[%]
	Fc-Faktor	=		[%]
	g-Wert (Glas)	=		[%]
	t-Wert (Glas)	=		[%]
Nebenbedingungen	Tageslichtquotient	≥	z.B. 0,95	[%]

Tabelle 7.7 Aufbau des Optimierungsmodells-7

7.2.2 Windenergieoptimierungstool

Optimierungsmodell 1

Ermittlung der günstigsten Positionen

Ziel	Erzielter Ertrag	≥	100	[kWh/m^2.a]
	Potenzielle Rotorenpositionen			[-]
Variablen	Rotorenpositionen			[-]
Nebenbedingungen	Anzahl der Rotoren in jeder Position	=	2	[-]
	Rotorfläche	=	12	[m^2]
	Messdaten aus der CFD-Analyse			[-]

Tabelle 7.8 Aufbau des Optimierungsmodells-1

Optimierungsmodell 2

Ermittlung der optimalen Rotorenflächen

Ziel	Erzielter Ertrag	≥	100	[kWh/m^2.a]
	Optimale Rotorenflächen			[m^2]
Variablen	Rotorenradius in jeder Position			[m]
Nebenbedingungen	Eingegebene Rotorenpositionen			[-]
	Maximale Anzahl der Rotoren an jeder Position		4	[-]
	Maximaler Rotorenradius		2,5	[m]
	Messdaten aus der CFD-Analyse			[-]

Tabelle 7.9 Aufbau des Optimierungsmodells-2

Optimierungsmodell 3

Ermittlung der optimalen Anzahl der Rotoren in den potenziellen Positionen

Ziel	Erzielter Ertrag	≥	100	[kWh/m^2.a]
	Anzahl der Rotoren an jeder Position			[-]
Variablen	Rotorenpositionen			[-]
Nebenbedingungen	Rotorenradius in jeder Position			[m]
	Eingegebene Rotorenpositionen			
	Maximale Anzahl der Rotoren an jeder Position		4	[-]
	Messdaten aus der CFD-Analyse			[-]

Tabelle 7.10 Aufbau des Optimierungsmodells-3

Optimierungsmodell 4

Ermittlung der optimalen Rotorenpositionen und der optimalen Anzahl der Rotoren an jeder von den

Ziel	Erzielter Ertrag	≥	100	[kWh/m^2.a]
	Optimale Rotorenpositionen			[-]
	Anzahl der Rotoren			[-]
Variablen	Rotorenpositionen			[-]
Nebenbedingungen	Maximale Anzahl der Rotoren an jeder Position		4	[-]
	Rotorfläche	=	12	[m^2]
	Messdaten aus der CFD-Analyse			[-]

Tabelle 7.11 Aufbau des Optimierungsmodells-4

Optimierungsmodell 5

Ermittlung der Anzahl an Rotoren und deren optimalen Flächen

Ziel	Erzielter Ertrag	≥	100	[kWh/m^2.a]
	Anzahl der Rotoren			[-]
	Optimale Rotorfläche			[m^2]
Variablen	Anzahl der Rotoren			[-]
	Rotorenradius in jeder Position			[m]
Nebenbedingungen	Maximale Anzahl der Rotoren an jeder Position		4	[-]
	Messdaten aus der CFD-Analyse			[-]

Tabelle 7.12 Aufbau des Optimierungsmodells-5

Optimierungsmodell 6

Ermittlung der Anzahl an Rotoren an den optimalen Positionen

Ziel	Erzielter Ertrag	≥	100	[kWh/m^2.a]
	Optimale Rotorenpositionen			[-]
	Optimale Rotorenflächen			[-]
Variablen	Rotorenradius in jeder Position			[m]
	Rotorenpositionen			[-]
Nebenbedingungen	Anzahl der Rotoren an jeder Position		2	[-]
	Messdaten aus der CFD-Analyse			[-]

Tabelle 7.13 Aufbau des Optimierungsmodells-6

Optimierungsmodell 7

Optimerung der Anzahl an Rotoren, Rotorenflächen und -positionen

Ziel	Erzielter Ertrag	≥	100	[kWh/m^2.a]
	Optimale Anzahl an Rotorenpositionen			[-]
	Optimale Anzahl an Rotoren			[-]
	Optimale Rotorenflächen			[m^2]
Variablen	Rotorenpositionen			[-]
	Anzahl der Rotoren			[-]
	Rotorenradius in jeder Position			[m]
Nebenbedingungen	Maximale Anzahl der Rotoren an jeder Position		4	[-]
	Maximaler Rotorenradius		2,5	[m]
	Messdaten aus der CFD-Analyse			[-]

Tabelle 7.14 Aufbau des Optimierungsmodells-7

7.3 Begriffserklärung

Fossile Brennstoffe

Fossile Brennstoffe sind tote Biomasse, die vor Jahrmillionen abgestorben ist und durch geologische Prozesse umgewandelt wurde in Kohle, Erdöl und Erdgas sowie verschiedene Mischprodukte wie Ölsande oder Ölschiefer. Der natürlich auf der Erde vorkommende Kernbrennstoff Uran kann ebenfalls zu den fossilen Energien gezählt werden, da er nicht nachgebildet wird [225].

DIN V 18599

Die neue DIN V 18599 „Energetische Bewertung von Gebäuden“ schafft die Grundlage zur energetischen Betrachtung von Alt- und Neubauten, sowohl von Wohngebäuden wie auch von Nichtwohngebäuden. Sie stellt eine Methode zur Bewertung der Gesamtenergieeffizienz von Gebäuden zur Verfügung, bei der alle Energiemengen aus Heizung, Warmwasserbereitung, Lüftung, Kühlung und Beleuchtung berücksichtigt werden. Anders als beim Wohnungsbau werden Nichtwohngebäude bei der Berechnung des Energiebedarfs in Bereiche unterschiedlicher Nutzung und Konditionierung (betrifft Beheizung, Lüftung und Klimatisierung) gegliedert und in Zonen zusammengefasst [4].

DIN 5034

Das Dokument legt die erforderlichen Grundbegriffe und Definitionen im Zusammenhang mit der Innenraumbeleuchtung durch Tageslicht fest. Anschließend werden die Anforderungen an Fenster im Hinblick auf deren psychische Bedeutung genannt, gefolgt von detaillierten Bemerkungen zur Innenraumbeleuchtung durch Tageslicht und entsprechenden Planungshinweisen [4].

DIN 5035

Die DIN-Norm DIN 5035 „Beleuchtung mit künstlichem Licht“ ist eine DIN-Normenreihe, die sich mit den Anforderungen an künstliche Beleuchtung in verschiedenen Bereichen beschäftigt [4].

Primärenergie

Ist die Energie in der Form, wie sie in der Natur vorkommt, z. B. Rohöl. Auf dem Weg zum Verbraucher wird Primärenergie über Endenergie in Nutzenergie umgewandelt. Dieser Vorgang (beim Beispiel Rohöl in der Raffinerie) ist mit Verlusten behaftet, weshalb die Energiemenge, die im Rohstoff enthalten ist, nicht zur Gänze vom Verbraucher genutzt werden kann. Je nach Energieträger sind diese Verluste unterschiedlich hoch [226]. Der Primärenergiebedarf ist die Energiemenge, die zur Deckung des Endenergiebedarfs benötigt wird, unter Berücksichtigung der zusätzlichen Energiemenge, die durch vorgelagerte Prozessketten außerhalb der Systemgrenze „Gebäude“ bei der Gewinnung, Umwandlung und Verteilung der jeweils eingesetzten Brennstoffe verbraucht wird. Es wird also der gesamte Energieaufwand einbezogen [4].

Endenergie

Die Endenergie ist die Energie in der Form, wie sie beim Konsumenten ankommt, also z. B. Heizöl oder Holzpellets. Aus der Primärenergie wird durch Aufbereitung die Endenergie. So wird z. B. aus dem Rohöl in der Raffinerie das Heizöl Extraleicht. Je nach Verfahren kann aus der im Rohstoff enthaltenen Primärenergie unterschiedlich viel Endenergie erzeugt werden. Die Umwandlung hat also einen Wirkungsgrad, Umwandlungsverluste sind nicht zu vermeiden [226]. Der Endenergiebedarf ist die Energiemenge, die zur Deckung der Heiz-, Lüftungs-, Kühl-, Klimatisierungs- und Beleuchtungsleistungen sowie der Warmwasserbereitung benötigt wird, ermittelt an der Systemgrenze des betrachteten Gebäudes [4].

Globalstrahlung

Unter Globalstrahlung versteht man die Summe der an einem Ort eintreffenden Solarstrahlung. Sie setzt sich zusammen aus der auf direktem Weg eintreffenden Solarstrahlung, der Direktstrahlung und der Diffusstrahlung, die über Reflexion durch Wolken, Wasser- und Staubteilchen die Erdoberfläche erreicht. Gäbe es keine Erdatmosphäre, würde sich für den Wert der Globalstrahlung aus geometrischen Gründen ein Viertel der Solarkonstante, also 342 W/m², ergeben, wenn man die gesamte Erdoberfläche betrachtet. Von der Globalstrahlung zu unterscheiden ist die klimatologisch wichtige Nettostrahlung, die die absorbierte Sonnenstrahlung angibt, d. h. die Globalstrahlung abzüglich des reflektierten Anteils, der Albedo (siehe Strahlungshaushalt der Erde) [227].

Luftwechsel

Der Luftwechsel „n“ gibt an, wie oft das vorhandene Luftvolumen eines Raumes in der Stunde ausgetauscht wird. Ohne weitere Spezifizierung wird hiermit im Allgemeinen der Außenluftwechsel bezeichnet [4].

Null-Energie-Haus

Als Null-Energie-Haus wird ein Gebäude bezeichnet, das rechnerisch in der Jahresbilanz keine externe Energie (Elektrizität, Gas, Öl etc.) bezieht. Die für Heizung, Warmwasser etc. benötigte Energie wird im bzw. am Haus selbst erzeugt, meist durch Solaranlagen [4].

Gesamtenergiedurchlassgrad

Der g-Wert ist ein Kennwert für den Gesamtenergiedurchlassgrad in Bezug auf Sonnenstrahlung, sowohl kurzwellige als auch langwellige Strahlung, durch eine transparente Fläche (Verglasung). Hierzu zählen auch sekundäre Wärmegewinne durch das Aufheizen der Scheiben infolge von Strahlungsabsorption. Der g-Wert einer massiven Wand ist null [4].

t-Wert (Lichtdurchlässigkeit)

Die Angabe der Lichtdurchlässigkeit τL bezieht sich auf den Wellenlängenbereich des sichtbaren Lichts von 380 nm bis 780 nm. Sie wird gewichtet nach der Helligkeitsempfindlichkeit des menschlichen Auges – es handelt sich also nicht um einen Reintransmissionsgrad, sondern einen bewerteten Grad. Die Farbe des transmittierten Tageslichts wird gekennzeichnet durch die ähnlichste Farbtemperatur Tη oder durch die Normfarbwertanteile x und y bei Beleuchtung mit Normlicht D 65. Die Farbtemperatur zeigt die Farb- und Filterwirkung [228].

Transmissionswärmeverlust

Als Transmissionswärmeverlust (HT') bezeichnet man die Wärmemenge, welche ein Gebäude durch die Gebäudehülle (Mauerwerk, Fenster, Keller und Dach) bei Luftdichtigkeit nach außen verliert. Ist die Gebäudehülle nicht luftdicht (Fugen oder bei Fensterlüftung), verursacht dies zusätzlich einen Lüftungswärmeverlust. Für den Bauherren gilt: je niedriger der Transmissionswärmeverlust (HT'), desto geringer die Heizkosten.

U-Wert

Der U-Wert (früher k-Wert) ist ein Maß für den Wärmedurchgang durch einen Bauteil und wird in W/(m²K) angegeben. Mit dem U-Wert wird also ausgedrückt, welche Leistung pro m² des Bauteils auf einer Seite benötigt wird, um eine Temperaturdifferenz von 1 Kelvin aufrechtzuerhalten (Anm.: Leistung ist Energie pro Zeiteinheit; deshalb auch: welche Energiemenge pro Zeiteinheit durch den Bauteil fließt). Je kleiner der U-Wert ist, desto besser, weil weniger Wärme durch den Bauteil geleitet wird. Der U-Wert kann aber nur die Wärmeleitung beschreiben und dies auch nur im stationären Fall. Instationäre Vorgänge, Speicherung oder Wärmestrahlung werden dabei nicht berücksichtigt [226].

Wirkungsgrad

Der Wirkungsgrad bezeichnet den Quotienten aus der nutzbaren abgegebenen Arbeit und der zugeführten Brennstoffenergie. Im sogenannten rechtslaufenden Wärmekraftprozess, das heißt bei Zuführung von Wärme zur Erzeugung mechanischer Energie, wird die theoretische Obergrenze des Wirkungsgrades durch den Carnot-Wirkungsgrad angegeben. Das ist die Temperaturdifferenz des Wärmeträgermediums im Anfangs- und Endstadium, bezogen auf seine Anfangstemperatur. Der Carnot-Wirkungsgrad liegt deshalb prinzipiell immer unter 100 Prozent. Bei elektrochemischen Verfahren (z. B. Brennstoffzellen) ist die Stromerzeugung kein Wärmekraftprozess, sie unterliegt also nicht der Wirkungsgradbegrenzung des Carnotschen Kreisprozesses. In Brennstoffzellen wird die chemische Energie der Brennstoffkomponenten direkt in elektrische Energie umgesetzt. Wirkungsgradangaben beziehen sich in der Regel auf Strom und/oder Wärme. Der Wirkungsgrad von Solaranlagen berechnet sich aus der angegebenen Nutzleistung (Strom oder Wärme), bezogen auf den einfallenden Strahlungsfluss [4].

Lokales und globales Optimum

Ein lokales Maximum ist der Wert der Funktion an einer Stelle x, in deren Umgebung die Funktion keine größeren Werte annimmt. x wird lokaler *Maximierer* oder *Extremstelle* genannt, die Kombination aus Stelle und Wert Extrempunkt. Ein globales Maximum wird auch absolutes Maximum genannt, für ein lokales Maximum wird auch der Begriff relatives Maximum gebraucht. Lokale und globale Minima sind analog definiert [229].

7.4 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 01.1 Struktur der Arbeit vi
Abbildung 1.1 Entwicklung des Bedarfs und der Bereitstellung von Stromenergie (eigene Darstellung) 3
Abbildung 1.2 Definition der Plus-Energiebilanz [3] 4
Abbildung 1.3 Grundprinzip des Energiestroms über ein Gebäude (eigene Darstellung) 5
Abbildung 1.4 Schematische Darstellung des Unterschieds zwischen dem herkömmlichen Hochhaus und dem angestrebten (eigene Darstellung) 6
Abbildung 1.5 Hauptsäulen der Nachhaltigkeit [5] 7
Abbildung 1.6 Haupteinflussfaktoren und Zusammenhänge des Lebenszyklus eines nachhaltigen Hochhauses [12] (und eigene Darstellung) 9
Abbildung 1.7 Prozessschema zur Entwicklung von Energiekonzepten [6] 10
Abbildung 1.8 Unterschied zwischen der horizontalen und der vertikalen Fläche in Bezug auf Einstrahlung (eigene Darstellung) 11
Abbildung 1.9 Abnahme der Energiebilanz bei der Nutzung von Solarenergie im Hochhaus mit zunehmender Geschosszahl (eigene Darstellung) 11
Abbildung 1.10 Abnahme der Energiebilanz bei der Nutzung von Windenergie im Hochhaus mit zunehmender Geschosszahl trotz zunehmender Windgeschwindigkeit (eigene Darstellung) 12
Abbildung 1.11 Lineare, iterative und integrative Planungsabläufe [16] 13
Abbildung 1.12 Betrachtete Aspekte in der gewohnten und der besseren Vorgehensweise (eigene Darstellung) 15
Abbildung 1.13 Einflüsse auf die Entwicklung von energieoptimierten Gebäudekonzepten [6] 15
Abbildung 1.14 Typischer Entwurfsprozess, in dem die Fachplaner den Ansatz mittels Simulationstools prüfen [24] 17
Abbildung 1.15 Vorgeschlagener Ansatz von Petersen [24] 18
Abbildung 1.16 Entwicklung der Anzahl der Planungswerkzeuge [13] 20
Abbildung 1.17 Klassifizierung von Simulationstools für Gebäudeperformance [10] 20
Abbildung 1.18 Vergleich und Bewertung von Planungswerkzeugen 21
Abbildung 1.19 Zusammenfassung des Vergleichs und der Bewertung von Planungswerkzeugen 23
Abbildung 1.20 Allgemeines Energieflussdiagramm für Primär-, End- und Nutzenergie (eigene Darstellung) [33] 24
Abbildung 1.21 National Mall in Washington, D.C., während des Wettbewerbs *Solar Decathlon* 2009 [37] 26
Abbildung 1.22 Windenergienutzung im Rahmen der Projektstudie *Power Tower* von Tessa Kölnberger [38] 26
Abbildung 1.23 Möglichkeiten zur Energieerzeugung im Hochhaus 27
Abbildung 1.24 Summe der jährlichen globalen Einstrahlung auf der Welt [39] 28
Abbildung 1.25 Effizienz bzw. Kostenpotenzial der Photovoltaiktechnologie (eigene Darstellung) [40] 29
Abbildung 1.26 Links: Hochhauskonzept der Federation of Korean Industries Headquarters [41]; rechts: Großaufnahme der fassadenintegrierten Photovoltaikzellen 29
Abbildung 1.27 Einfluss des Neigungswinkels; oben: auf die Energielasten; unten: auf die Einstrahlung (eigene Darstellung) [41] 30
Abbildung 1.28 Oben: Gebäudekomplex über Shenzehn University von Auer Weber und Assoziierte; unten: Icade Tower, Berlin [11] 31

Abbildung 1.29 Schüco E² Fassade [42] 32
Abbildung 1.30 Jährliche Windgeschwindigkeiten in 50 m Höhe [43] 33
Abbildung 1.31 Nennleistungen von Windkraftanlagen in Abhängigkeit vom Rotorendurchmesser [11] 33
Abbildung 1.32 Windturbinen auf dem Dach des Hauses Near North Apartments in Chicago, USA [44] 34
Abbildung 1.33 Pearl River Tower, Guangzhou, von S.O.M. [47] 35
Abbildung 1.34 Strata Tower, London [48] 35
Abbildung 1.35 Ansichten und Schnitte vom Projekt Clean Technology Tower [50] 36
Abbildung 1.36 Forschungsmodelle gebäudeintegrierter Windkraftanlagen BIWP [45] 37
Abbildung 1.37 Überblick über den Stand der einzelnen Speichersysteme hinsichtlich üblicher Systemgröße und Entladungszeit [55] (Eigene Darstellung) 39
Abbildung 1.38 Die Wohnzelle SELF [59]. 41
Abbildung 1.39 Neue Monte-Rosa-Hütte SAC, Luftaufnahme Winter [64] 43
Abbildung 1.40 Darstellung eines Smart-Grid-Netzwerks [66] 44
Abbildung 1.41 Grundsätzliches Optimierungsmodell (eigene Darstellung) 46
Abbildung 1.42 Links: Anwendungsgebiet der These-1; rechts: Anwendungsgebiet der These-2 47
Abbildung 1.43 Entwurfsablauf gemäß der Hypothese 48
Abbildung 1.44 Analoge und digitale Planungsabläufe (eigene Darstellung) 49
Abbildung 1.45 Darstellung der zwei Thesen der Arbeit (eigene Darstellung) 49
Abbildung 1.46 Darstellung der Hauptbestandteile des Werkzeugs nach der Forschungsfrage (eigene Darstellung) 50
Abbildung 1.47 Typischer Planungspfad unter Einsatz des Werkzeugs (eigene Darstellung) 51
Abbildung 2.1 Systemanalytische Studie des Club of Rome zur Zukunft der Weltwirtschaft (eigene Darstellung) [6] 54
Abbildung 2.2 Der ökologische Fußabdruck der Menschheit im Vergleich zur ökologischen Tragfähigkeit der Erde [71] 55
Abbildung 2.3 Ökologischer Fußabdruck weltweit, 2007 [72] 56
Abbildung 2.4 Primärenergieverbrauch ausgewählter Regionen der Welt [74] 57
Abbildung 2.5 Weltweiter Verbrauch von Primärenergie pro Kopf in Tonnen Öläquivalent, nach Regionen und ausgewählten Staaten, 2007 [75] 58
Abbildung 2.6 Geschätzter globaler Primärenergieverbrauch bis 2100 [11] 59
Abbildung 2.7 Weltweite fossile Brennstoffreserven [76] 60
Abbildung 2.8 Zurzeit bekannte und vermutete Reserven von Öl, Gas und Kohle (Energiemenge) [74] 61
Abbildung 2.9 Uranförderung der einzelnen Länder 1950–2006 sowie Uranbedarf der Kernreaktoren [78] 61
Abbildung 2.10 Stand der wirtschaftlichen Kernenergienutzung weltweit [80] 62
Abbildung 2.11 Mittlere Erdoberflächentemperatur [82] 63
Abbildung 2.12 Links eine Aufnahme aus dem Jahr 1948, rechts eine aus dem Jahr 2006 [84] 64
Abbildung 2.13 Simulationen des CO_2-Effektes bei einem Energieverbrauch von 300 x 10^9 MWh/a mit Solar- und Nukleareanwendung, Stand 1995 [11], [87] 65
Abbildung 2.14 CO_2-Emissionen in t pro Kopf und Jahr [11], [88] 66
Abbildung 2.15 Entwicklung der globalen Primärenergieversorgung im 2-K-Szenario [11] 67
Abbildung 2.16 Entwicklung der Nutzung erneuerbarer Energien in den verschiedenen Regionen der Welt (ohne Wasserkraft) [74] 68

Abbildung 2.17 Verteilung der Primärenergieverbräuche nach Regionen und Energieträgern, Stand 2010 69
Abbildung 2.18 Vergleich der Energiewirtschaft ausgewählter Länder [74] 70
Abbildung 2.19 Verteilung der verschiedenen Energieträger beim Weltprimärenergieverbrauch [74] 71
Abbildung 2.20 Natürliches Angebot erneuerbarer Energien [93] 73
Abbildung 2.21 Potenzielles transmediterranes Verteilungsnetz [95] 74
Abbildung 2.22 Anteil der verbrauchten erneuerbaren Energien weltweit 2009 (Endenergieverbrauch) 75
Abbildung 2.23 Verteilung der installierten Leistungen erneuerbarer Energien weltweit, Stand 2008 (Datenquelle: IEA Internationale Energieagentur) 76
Abbildung 2.24 Oben: geschätzter Primärenergiebedarf und -deckung durch verschiedene Energieträger [97]; unten: Veränderung des weltweiten Energiemixes [98] 77
Abbildung 2.25 Subtropische Klimazone der Erde [106] 81
Abbildung 2.26 Anteil städtischer an gesamter Bevölkerung für die Periode 2006–2010 [108]; Die subtropische Region wird durch schwarze Linie hervorgehoben 82
Abbildung 2.27 Jährliches Wachstum städtischer Bevölkerung in Prozent für die Periode 2006–2010 [108]; Die subtropische Region wird durch schwarze Linie hervorgehoben 82
Abbildung 2.28 Verteilung der Megastädte weltweit [73] 84
Abbildung 2.29 Wichtige Städte in der subtropischen Region 84
Abbildung 2.30 Städtische Bevölkerung nach Regionen (Anteil an der Gesamtbevölkerung in %) 85
Abbildung 2.31 Primärenergieverbrauch (MWh pro Kopf) für die Periode 2007–2011 [108]; Die subtropische Region wird durch schwarze Linie hervorgehoben 87
Abbildung 2.32 Anteil der verbrauchten fossilen Brennstoffe für die Periode 2006–2010 [108]; Die subtropische Region wird durch schwarze Linie hervorgehoben 88
Abbildung 2.33 Jährliche CO_2-Emission (kt) der verschiedenen Länder für die Periode 2006–2010; Die subtropische Region wird durch schwarze Linie hervorgehoben 89
Abbildung 2.34 CO_2-Emission (Tonnen pro Kopf) für die Periode 2006–2010 [108]; Die subtropische Region wird durch schwarze Linie hervorgehoben 89
Abbildung 2.35 Globale Einstrahlung in der subtropischen Zone [39] 91
Abbildung 2.36 Durchschnittliche jährliche Windgeschwindigkeiten in 50 m Höhe [43] 91
Abbildung 2.37 Höhe relativ zum Kontext [115] 94
Abbildung 2.38 Proportionen [115] 94
Abbildung 2.39 Technologie im Hochhaus aufgrund der Höhe [115] 95
Abbildung 2.40 Super-Hochhaus [115] 95
Abbildung 2.41 Wirkungsabschätzung durch Eco-Indicator 99, Gebäudevergleich [119] 102
Abbildung 2.42 Hearst Tower, New York [129] 103
Abbildung 2.43 Zahl der abgeschlossenen Hochhausbauprojekte pro Jahr [130] 104
Abbildung 2.44 Zunahme der Bevölkerungs- und Hochhauszahl [132] 104
Abbildung 2.45 Links: besonders aktive Länder beim Bau von Hochhäusern; rechts: zum Hochhausbau ambitionierte Länder [130] 105
Abbildung 2.46 Standorte der höchsten Gebäude der Welt [130] 106
Abbildung 2.47 Geschichte der höchsten Gebäude der Welt [135] 107
Abbildung 2.48 Links: Kindom Tower, Jeddah; rechts: Burj Khalifa, Dubai 108
Abbildung 2.49 Links: Dancing Towers, Dubai; rechts: drehender Turm, Dubai. 109
Abbildung 2.50 National Commercial Bank, Jeddah 110
Abbildung 2.51 EDITT Tower, Singapur [137] 111
Abbildung 2.52 Commerzbank, Frankfurt [138] 111

Abbildung 2.53 Links: Doha Tower, Doha [139]; Mitte: Sonnenschutzhülle im Doha Tower [139]; rechts: Teil der Fassade des Institut du Monde Arabe (IMA) [140] 112
Abbildung 2.54 Links: O-14 Tower, Dubai [141]; rechts: Innenaussicht einer Etage des O-14 Tower, Dubai [142] 112
Abbildung 2.55 die drei betrachteten Hauptaspekte im Grundmodell 114
Abbildung 2.56 Beispiel eines Absolutminimums [146] 116
Abbildung 2.57 Allgemeine Bestandteile eines Optimierungsmodells (eigene Darstellung) [145] 116
Abbildung 2.58 Hauptaufgaben der jeweiligen Planungsphasen (eigene Darstellung) 118
Abbildung 3.1 Allgemeines Energieschema des Plus-Energie-Hochhauses (eigene Darstellung) 122
Abbildung 3.2 Zusammenhänge in einem generischen energieeffizienten Hochhaus (eigene Darstellung) 123
Abbildung 3.3 Abhängigkeiten und Zusammenhänge im Hinblick auf das Grundmodell (eigene Darstellung) 124
Abbildung 3.4 Herkömmliche und typische Planungsmethode (eigene Darstellung) 125
Abbildung 3.5 Vorgeschlagene Methode (eigene Darstellung) 126
Abbildung 3.6 Hauptkomponenten des Hochhausoptimierungstools (eigene Darstellung) 128
Abbildung 3.7 Anwendungspfad des Systems (eigene Darstellung) 129
Abbildung 3.8 Systematische Darstellung von Behaglichkeitsfaktoren [6] 133
Abbildung 3.9 Gesamtwärmeabgabe eines normal bekleideten Menschen ohne körperliche Tätigkeit bei ruhender Luft [159] 134
Abbildung 3.10 Behaglichkeitszone in Abhängigkeit von der Raumlufttemperatur und der relativen Feuchte 135
Abbildung 3.11 Behaglichkeitszone in Abhängigkeit von Raumlufttemperatur und mittlerer Raumumschließungstemperatur [161] 136
Abbildung 3.12 Zusammenhang zwischen Temperatur und Leistung nach Wyon [159] 137
Abbildung 3.13 Außenluftrate pro Person bei verschiedenen zulässigen CO2-Konzentrationen 141
Abbildung 3.14 Hörfläche des menschlichen Ohrs [171] 142
Abbildung 3.15 Überblick über die Lage der ausgewählten Städte (eigene Darstellung) 145
Abbildung 3.16 Satellitenbilder des Standorts Jeddah; links: regionale Betrachtung [178]; rechts: Großaufnahme der Stadt [179] 146
Abbildung 3.17 Links: Sonnenstandsdiagramm; rechts: Globalstrahlung auf die Gebäudehülle (eigene Darstellung) 146
Abbildung 3.18 Links: monatliche durchschnittliche Außentemperatur; rechts: monatliche durchschnittliche relative Feuchte 147
Abbildung 3.19 Links: Windrichtungshäufigkeit; rechts: Windgeschwindigkeitshäufigkeit in Abhängigkeit von der Windrichtung 147
Abbildung 3.20 Satellitenbilder des Standorts Miami; links: regionale Betrachtung [183]; rechts: Großaufnahme der Stadt [184] 150
Abbildung 3.21 Links: Sonnenstandsdiagramm; rechts: Globalstrahlung auf die Gebäudehülle (eigene Darstellung) 150
Abbildung 3.22 Links: monatliche durchschnittliche Außentemperatur; rechts: monatliche durchschnittliche relative Feuchte 151
Abbildung 3.23 Links: Windrichtungshäufigkeit; rechts: Windgeschwindigkeitshäufigkeit in Abhängigkeit von der Windrichtung 151
Abbildung 3.24 Satellitenbilder des Standorts Sydney; links: regionale Betrachtung [186]; rechts: Großaufnahme der Stadt [187] 154

Abbildung 3.25 Links: Sonnenstandsdiagramm; rechts: Globalstrahlung auf die Gebäudehülle (eigene Darstellung) 154
Abbildung 3.26 Links: monatliche durchschnittliche Außentemperatur; rechts: monatliche durchschnittliche relative Feuchte 155
Abbildung 3.27 Links: Windrichtungshäufigkeit; rechts: Windgeschwindigkeitshäufigkeit in Abhängigkeit von der Windrichtung 155
Abbildung 3.28 Satellitenbilder des Standorts Durban; links: regionale Betrachtung [191]; rechts: Großaufnahme der Stadt [192] 158
Abbildung .3.29 Links: Sonnenstandsdiagramm; rechts: Globalstrahlung auf die Gebäudehülle (eigene Darstellung) 158
Abbildung 3.30 Links: monatliche durchschnittliche Außentemperatur; rechts: monatliche durchschnittliche relative Feuchte 159
Abbildung 3.31 Links: Windrichtungshäufigkeit; rechts: Windgeschwindigkeitshäufigkeit in Abhängigkeit von der Windrichtung 159
Abbildung 3.32 Betriebsstunden mit erforderlicher aktiver Kühlung und Verfügbarkeit von Tageslicht im Komfortbereich (angenommener Tageslichtquotient: 0,9 %) – Standort: Jeddah 162
Abbildung 3.33 Betriebsstunden mit erforderlicher aktiver Kühlung und Verfügbarkeit von Tageslicht im Komfortbereich (angenommener Tageslichtquotient: 0,9 %) – Standort: Miami 162
Abbildung 3.34 Betriebsstunden mit erforderlicher aktiver Kühlung und Verfügbarkeit von Tageslicht im Komfortbereich (angenommener Tageslichtquotient: 0,9 %) – Standort: Sydney 163
Abbildung 3.35 Betriebsstunden mit erforderlicher aktiver Kühlung und Verfügbarkeit von Tageslicht im Komfortbereich (angenommener Tageslichtquotient: 0,9 %) – Standort: Durban 163
Abbildung 3.36 Maßnahmen zum Umgang mit der Luft (eigene Darstellung); links: Jeddah; rechts: Miami 164
Abbildung 3.37 Maßnahmen zum Umgang mit der Luft (eigene Darstellung); links: Sydney; rechts: Durban 165
Abbildung 3.38 Maßnahmen zum Umgang mit den Lufteigenschaften (eigene Darstellung) 166
Abbildung 3.39 Betriebsstunden mit erforderlicher Entfeuchtung der Zuluft (eigene Darstellung) 166
Abbildung 3.40 Vergleich der erforderlichen Nutzenergie zur Konditionierung der Zuluft in einem Beispielraum 167
Abbildung 3.41 Fassade: Einflussfaktoren, Eigenschaften und Funktionen [6] 168
Abbildung 3.42 Darstellung der Zusammenhänge und Abhängigkeiten der ausgewählten Einflussgrößen (eigene Darstellung) 170
Abbildung 3.43 jährlicher Stromenergiebedarf für Beleuchtung und Raumkühlung je nach Verglasungsanteil (Simulation und Darstellung: Solarenergieoptimierungstool) 172
Abbildung 3.44 Links: Anteil der Arbeitszeit im Bereich der visuellen Behaglichkeit; rechts: Tageslichtquotient in der Raummitte (Simulation und Darstellung: Solarenergieoptimierungstool) 173
Abbildung 3.45 Kühl- und Beleuchtungsenergiebedarf eines Raums ohne Sonnenschutz (Simulation und Darstellung: Solarenergieoptimierungstool) 175
Abbildung 3.46 Anteil der Stundenzahl im Bereich der visuellen Behaglichkeit (Simulation und Darstellung: Solarenergieoptimierungstool) 176
Abbildung 3.47 Links: verfügbare opake Fläche für PV; rechts: Ertrag gegen Energiebedarf (Simulation und Darstellung: Solarenergieoptimierungstool) 177
Abbildung 3.48 Energiebilanz (Simulation und Darstellung: Solarenergieoptimierungstool) 178

Abbildung 3.49 Zusammenfassung der Ergebnisse aus der Sensitivitätsanalyse (Simulation und Darstellung: Solarenergieoptimierungstool) 179
Abbildung 3.51 Gemeinsame Nutzung der Wände, um die A/V zu verringern; Damaskus [203] 180
Abbildung 3.52 Luftaufnahme der Stadt Shibam [204] 181
Abbildung 3.53 Eine Gasse in Shibam [205] 181
Abbildung 3.54 Kleiner Fensterflächenanteil zur Verringerung der Wärmeaufnahme; Standort: Riyadh-Region, Saudi-Arabien [206], [207] 182
Abbildung 3.55 Stadtviertel in Shibam [205] 182
Abbildung 3.56 Innenhöfe zur indirekten Beleuchtung; Marrakesch [208] 183
Abbildung 3.57 Der Innenhof eines Wohnhauses, Standort: Kairo [208] 183
Abbildung 3.58 Darstellung einer typischen Maschrabiya (Quelle: unbekannt) 184
Abbildung 3.59 Zwei Arten der Maschrabiya nach dem Lichtstreuungskonzept (eigene Darstellung) 184
Abbildung 3.60 Die Maschrabiya von innen [208] 184
Abbildung 3.61 Wesentliche Rolle des Fensterflächenanteils (eigene Darstellung) [209] 185
Abbildung 3.62 Erforderliche Fassadenfläche, um 10 kWh/m^2.a Kälte zu erzeugen (Süd, 90° geneigt, Standort: Riyadh) 186
Abbildung 3.63 Einflussgrößen im dargestellten Werkzeug 187
Abbildung 3.64 Optimierungsprozess des Verglasungsanteils zur Energieeinsparung bzw. -erzeugung durch fassadenintegrierte Photovoltaikzellen (eigene Darstellung) 188
Abbildung 3.65 Variierbare Größen des Solarenergieoptimierungstools (eigene Darstellung) 190
Abbildung 3.66 Übersicht über den Rechenprozess im Solarenergieoptimierungstool (eigene Darstellung) 193
Abbildung 3.67 Darstellung der Ergebnisse des Optimierungsmodells-2 194
Abbildung 3.68 Überblick über das Gewichtungsprinzip 195
Abbildung 3.69 Darstellung der Bewertung der optimierten Varianten 195
Abbildung 3.70 Abweichung der jeweiligen Variante vom absolut optimalen Zustand 196
Abbildung 3.71 Bewertungsprozess der Ergebnisse eines Optimierungsmodells (eigene Darstellung) 196
Abbildung 3.72 Abweichung der verschiedenen optimierten Varianten vom absolut optimalen Zustand (eigene Darstellung); Legende: Fc-Faktor [%]; g-Wert [%]; Verglasungsanteil [%] 197
Abbildung 3.73 Beispiel des Kriterienkatalogs der optimierten Südfassade 198
Abbildung 3.74 Darstellung der Fassadenkriterien und deren wesentlichen Auswirkungen 199
Abbildung 3.75 Erklärung der dargestellten Werte 199
Abbildung 3.76 Die hochturbulente Luftströmung um ein Gebäude weist äußerst komplexe und nur schwer berechenbare Strukturen auf [114] 201
Abbildung 3.77 Darstellung des typischen Windfelds (eigene Darstellung) [212] 203
Abbildung 3.78 Vertikales Windprofil über dichter Innenstadt, Innenstadt, Stadtrand und Freiland 205
Abbildung 3.79 Positionen der Messpunkte, die evtl. für Rotoren genutzt werden können (eigene Darstellung) 207
Abbildung 3.80 Beispiel der Weibull-Verteilung der Windgeschwindigkeit eines Binnenstandorts [214] 208
Abbildung 3.81 Hochhausumströmung aus drei Windrichtungen (eigene Simulation und Darstellung)) 209
Abbildung 3.82 Darstellung der Windströmung (eigene Darstellung) [114], [212] 210

Abbildung 3.83 Windgeschwindigkeitsverteilung bei einer typischen Hochhausumströmung, vertikale Ansicht 211
Abbildung 3.84 Vergleich des Jahresertrags pro Quadratmeter aus Windenergie unter der Annahme, dass alle Rotoren an der Fassade und auf dem Dach im Einsatz sind (eigene Darstellung) 212
Abbildung 3.85 Links: Analyse der Gebäudeform des Pearl River Tower [220]; rechts: CFD-Simulation der Winddurchlässe [221] 213
Abbildung 3.86 Vergleich der Windgeschwindigkeit in verschiedenen Windauslässen (A-C) (eigene Simulation und Darstellung) 214
Abbildung 3.87 Vergleich der Windgeschwindigkeit in verschiedenen Windauslässen (D-G) (eigene Simulation und Darstellung) 214
Abbildung 3.88 Vergleich von drei Größen der Form G (eigene Simulation und Darstellung) 215
Abbildung 3.89 Darstellung der Windgeschwindigkeitsverteilung (eigene Simulation und Darstellung) 216
Abbildung 3.90 Durchschnittliche Windgeschwindigkeit im Durchlass 217
Abbildung 3.91 Rotorenpositionen im gezeigten Vergleich; Links: Hochhaus ohne Durchlass; Rechts: Hochhaus mit Durchlass (eigene Darstellung) 218
Abbildung 3.92 Erträge aus Rotoren pro Quadratmeter im Hochhaus mit und ohne Durchlass (eigene Darstellung) 218
Abbildung 3.93 Zusammenhänge der Energieerzeugung durch gebäudeintegrierte Windrotoren (eigene Darstellung) 220
Abbildung 3.94 Variierbare Größen des Windenergieoptimierungstools (eigene Darstellung) 221
Abbildung 3.95 Darstellung des Optimierungs- und Bewertungsprozesses 222
Abbildung 3.96 Systembestandteile am Beispiel einer Anlage mit drei Rotoren [215] 223
Abbildung 4.1 Ablauf der Validierung in diesem Kapitel 224
Abbildung 4.2 Optimierungsmodelle des Solarenergieoptimierungstools 225
Abbildung 4.3 Ergebnisse des Optimierungsmodells-1 für den Standort Jeddah 227
Abbildung 4.4 Vergleich der optimierten Varianten 227
Abbildung 4.5 Optimierte Varianten für den Standort Miami; Ausrichtung: Süd 229
Abbildung 4.6 Optimierte Varianten für den Standort Sydney; Ausrichtung: Nord 229
Abbildung 4.7 Optimierte Varianten für den Standort Durban; Ausrichtung: Nord 229
Abbildung 4.8 Darstellung der erzeugten Optimierungsergebnisse für den Standort Jeddah; Ausrichtung: Süd; Die Linien in der Legende Repräsentieren den Verglasungsanteil; Korrelation zwischen t-Wert (Glass) und g-Wert (Glass) berücksichtigt 231
Abbildung 4.9 Darstellung und Bewertung der optimierten Kriterien für den Standort Jeddah; Ausrichtung: Süd 231
Abbildung 4.10 Darstellung und Bewertung der optimierten Kriterien für den Standort Miami; Ausrichtung: Süd 232
Abbildung 4.11 Darstellung und Bewertung der optimierten Kriterien für den Standort Sydney; Ausrichtung: Nord 232
Abbildung 4.12 Darstellung und Bewertung der optimierten Kriterien für den Standort Durban; Ausrichtung: Nord 232
Abbildung 4.13 Darstellung der erzeugten Optimierungsergebnisse für den Standort Jeddah; Ausrichtung: Süd; Die Linien in der Legende Repräsentieren den Verglasungsanteil; Korrelation zwischen t-Wert (Sonnenschutzgewebe) und g-Wert (Glass) berücksichtigt 235
Abbildung 4.14 Dreidimensionale Darstellung des Optimierungsprozesses 235

Abbildung 4.15 Darstellung und Bewertung der optimierten Kriterien für den Standort Miami; Ausrichtung: Süd 236
Abbildung 4.16 Darstellung und Bewertung der optimierten Kriterien für den Standort Sydney; Ausrichtung: Nord 236
Abbildung 4.17 Darstellung und Bewertung der optimierten Kriterien für den Standort Durban; Ausrichtung: Nord 236
Abbildung 4.18 Optimierungsmodelle des Windenergieoptimierungstools 238
Abbildung 4.19 Rangordnung der Windgeschwindigkeit in Abhängigkeit vom Standort und der Gebäudeform (Windenergieoptimierungstool) 239
Abbildung 4.20 Ergebnisse des Optimierungsvorgangs (Windenergieoptimierungstool); oben links: Rotorenpositionen; oben rechts: Rotorenanzahl in der jeweiligen Position; unten links: Rotorenflächen in der jeweiligen Position; unten rechts: Erträge aus der jeweiligen Position 240
Abbildung 4.21 Rangordnung der Windgeschwindigkeit in Abhängigkeit vom Standort und der Gebäudeform (Windenergieoptimierungstool) 241
Abbildung 4.22 Ergebnisse des Optimierungsvorgangs (Windenergieoptimierungstool); oben links: Rotorenpositionen; oben rechts: Rotorenanzahl in der jeweiligen Position; unten links: Rotorenflächen in der jeweiligen Position; unten rechts: Erträge aus der jeweiligen Position 242
Abbildung 4.23 Optimierte Kriterien zur fassadenintegrierten Windenergie; Standort: Jeddah 243
Abbildung 4.24 Optimierte Kriterien zur fassadenintegrierten Windenergie; Standort: Miami 243
Abbildung 4.25 Optimierte Kriterien zur fassadenintegrierten Windenergie; Standort: Sydney 243
Abbildung 4.26 Optimierte Kriterien zur fassadenintegrierten Windenergie; Standort: Durban 243
Abbildung 4.27 Ergebnisse des Optimierungsvorgangs (Windenergieoptimierungstool); oben links: Rotorenpositionen; oben rechts: Rotorenanzahl in der jeweiligen Position; unten links: Rotorenflächen in der jeweiligen Position; unten rechts: Erträge aus der jeweiligen Position 244
Abbildung 4.28 Ergebnisse des Optimierungsvorgangs (Windenergieoptimierungstool); oben links: Rotorenpositionen; oben recht: Rotorenanzahl in der jeweiligen Position; unten links: Rotorenflächen in der jeweiligen Position; unten rechts: Erträge aus der jeweiligen Position 245
Abbildung 4.29 Optimierte Kriterien zur fassadenintegrierten Windenergie; Standort: Jeddah 246
Abbildung 4.30 Optimierte Kriterien zur fassadenintegrierten Windenergie; Standort: Miami 246
Abbildung 4.31 Optimierte Kriterien zur fassadenintegrierten Windenergie; Standort: Sydney 246
Abbildung 4.32 Optimierte Kriterien zur fassadenintegrierten Windenergie; Standort: Durban 246
Abbildung 4.33 Ergebnisse des Optimierungsvorgangs (Windenergieoptimierungstool); oben links: Rotorenpositionen; oben rechts: Rotorenanzahl in der jeweiligen Position; unten links: Rotorenflächen in der jeweiligen Position; unten rechts: Erträge aus der jeweiligen Position 247
Abbildung 4.34 Darstellung der Anzahl der zu installierenden Rotoren mit deren Höhen und Positionen 248
Abbildung 4.35 Optimierte Kriterien zur fassadenintegrierten Windenergie; Standort: Jeddah 249
Abbildung 4.36 Optimierte Kriterien zur fassadenintegrierten Windenergie; Standort: Miami 249

Abbildung 4.37 Optimierte Kriterien zur fassadenintegrierten Windenergie; Standort: Sydney 249
Abbildung 4.38 Optimierte Kriterien zur fassadenintegrierten Windenergie; Standort: Durban 249
Abbildung 4.39 Erklärung der untersuchten Elemente 250
Abbildung 4.40 Erklärung der Optimierungsergebnisse aus dem Solarenergieoptimierungstool 252
Abbildung 4.41 Überblick über den Aufbau des Kriterienberichts 252
Abbildung 4.42 Darstellung der Optimierungsergebnisse für die Bauform Quadrat; Standort: Jeddah 254
Abbildung 4.43 Darstellung der Optimierungsergebnisse für die Bauform Rechteck; Standort: Jeddah 254
Abbildung 4.44 Darstellung der Optimierungsergebnisse für die Bauform Dreieck; Standort: Jeddah 255
Abbildung 4.45 Darstellung der Optimierungsergebnisse für die Bauform Oktagon; Standort: Jeddah 255
Abbildung 4.46 Darstellung der Optimierungsergebnisse für die Bauform Quadrat; Standort: Miami 257
Abbildung 4.47 Darstellung der Optimierungsergebnisse für die Bauform Rechteck; Standort: Miami 257
Abbildung 4.48 Darstellung der Optimierungsergebnisse für die Bauform Dreieck; Standort: Miami 258
Abbildung 4.49 Darstellung der Optimierungsergebnisse für die Bauform Oktagon; Standort: Miami 258
Abbildung 4.50 Darstellung der Optimierungsergebnisse für die Bauform Quadrat; Standort: Sydney 260
Abbildung 4.51 Darstellung der Optimierungsergebnisse für die Bauform Rechteck; Standort: Sydney 260
Abbildung 4.52 Darstellung der Optimierungsergebnisse für die Bauform Dreieck; Standort: Sydney 261
Abbildung 4.53 Darstellung der Optimierungsergebnisse für die Bauform Oktagon; Standort: Sydney 261
Abbildung 4.54 Darstellung der Optimierungsergebnisse der Bauform Quadrat; Standort: Durban 263
Abbildung 4.55 Darstellung der Optimierungsergebnisse der Bauform Rechteck; Standort: Durban 263
Abbildung 4.56 Darstellung der Optimierungsergebnisse für die Bauform Dreieck; Standort: Durban 264
Abbildung 4.57 Darstellung der Optimierungsergebnisse für die Bauform Oktagon; Standort: Durban 264
Abbildung 7.1 Benutzeroberfläche der grundlegenden Rahmenbedingungen des Hochhauses (eigene Darstellung) 286
Abbildung 7.2 Benutzeroberfläche-2 des Solarenergieoptimierungstools (eigene Darstellung) 288
Abbildung 7.3 Fortsetzung der Benutzeroberfläche-2 des Solarenergieoptimierungstools (eigene Darstellung) 289
Abbildung 7.4 Benutzeroberfläche des Windenergieoptimierungstools (eigene Darstellung) 292

7.5 Tabellenverzeichnis

Tabelle 2.1 Liste von Megacities in der subtropischen Klimaregion 85
Tabelle 2.2 Meinungen für und gegen Hochhäuser (eigene Erarbeitung) [121], [122] 99
Tabelle 3.1 Gesamtwärmeabgabe des Menschen bei verschiedenen Tätigkeiten (1 met = 58 W/m^2), nach (*ISO 7730*); 134
Tabelle 3.2 Richtwerte für Beleuchtungsstärke nach DIN 5035 138
Tabelle 3.3 Richtwerte für Tageslichtquotienten [168] 139
Tabelle 3.4 Erforderliche Luftwechselraten in Büroräumen 141
Tabelle 3.5 Mögliche Schäden durch Signale der Elektrogeräte [159] 143
Tabelle 3.6 Überblick über die klimatischen Eigenschaften des Standorts 148
Tabelle 3.7 Überblick über die klimatischen Eigenschaften des Standorts 152
Tabelle 3.8 Überblick über die klimatischen Eigenschaften des Standorts 156
Tabelle 3.9 Überblick über die klimatischen Eigenschaften des Standorts 160
Tabelle 3.10 Rahmenbedingungen der Simulationen 167
Tabelle 3.11 Rahmenbedingungen der durchgeführten Sensibilitätsanalyse 171
Tabelle 3.12 Rahmenbedingungen der Sensibilitätsanalyse mit einem Sonnenschutz 174
Tabelle 3.13 Rahmenbedingungen der durchgeführten Analyse 177
Tabelle 3.14 Gewichtungsmaßstab 195
Tabelle 3.15 Rauigkeitsklassen nach ASHRAE [212] 204
Tabelle 4.1 Allgemeine Rahmenbedingungen 225
Tabelle 4.2 Rahmenbedingungen der Simulationen 226
Tabelle 4.3 Rahmenbedingungen der Simulationen 230
Tabelle 4.4 Rahmenbedingungen der Simulationen 234
Tabelle 4.5 Rahmenbedingungen des Beispiels 239
Tabelle 4.6 Rahmenbedingungen der Simulationen 251
Tabelle 7.1 Aufbau des Optimierungsmodells-1 294
Tabelle 7.2 Aufbau des Optimierungsmodells-2 294
Tabelle 7.3 Aufbau des Optimierungsmodells-3 294
Tabelle 7.4 Aufbau des Optimierungsmodells-4 294
Tabelle 7.5 Aufbau des Optimierungsmodells-5 295
Tabelle 7.6 Aufbau des Optimierungsmodells-6 295
Tabelle 7.7 Aufbau des Optimierungsmodells-7 295
Tabelle 7.8 Aufbau des Optimierungsmodells-1 296
Tabelle 7.9 Aufbau des Optimierungsmodells-2 296
Tabelle 7.10 Aufbau des Optimierungsmodells-3 296
Tabelle 7.11 Aufbau des Optimierungsmodells-4 297
Tabelle 7.12 Aufbau des Optimierungsmodells-5 297
Tabelle 7.13 Aufbau des Optimierungsmodells-6 297
Tabelle 7.14 Aufbau des Optimierungsmodells-7 297