

INSTITUT FÜR GEOGRAPHIE  
DER  
FRIEDRICH-ALEXANDER-UNIVERSITÄT ERLANGEN-NÜRNBERG

Lehrstuhl für Physische Geographie  
Prof. Dr. Achim Bräuning

# **Die Eignung von Dachflächen für Solaranlagen zur dezentralen Energieversorgung einer Großstadt am Beispiel von Nürnberg**

## **Diplomarbeit**

vorgelegt von  
Christian Mitschke

mit

104 Seiten, 62 Abbildungen, 9 Karten, 2 Anlagen

Erstgutachter : PD. Dr. Cyrus Samimi  
Zweitgutachter : Prof. Dr. Rupert Bäumler

Erlangen April 2008

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Motivation</b>	<b>1</b>
1.1	Ziel der Untersuchung . . . . .	1
1.2	Vorgehen . . . . .	2
<b>2</b>	<b>Grundlagen</b>	<b>3</b>
2.1	Energieversorgung in Deutschland . . . . .	3
2.2	Die Sonne als Energieversorger . . . . .	4
2.3	Systeme zur aktiven Nutzung der Solarenergie . . . . .	6
2.3.1	Thermische Solarkollektoren . . . . .	7
2.3.2	Fotovoltaik . . . . .	13
2.3.3	Ökologische Aspekte . . . . .	18
2.4	Anforderungen an die Dachfläche für die Eignung für Solarenergienutzung .	20
2.4.1	Dachformen . . . . .	20
2.4.2	Neigung und Exposition . . . . .	21
2.4.3	Verschattung . . . . .	21
2.4.4	Flächengröße . . . . .	25
2.4.5	Bauvorschriften, Denkmalschutz und Auswirkungen auf das äußere Erscheinungsbild des Gebäudes . . . . .	26
2.5	Das Untersuchungsgebiet im Nürnberger Stadtteil St. Leonhard / Sündersbühl	27
<b>3</b>	<b>Potentialstudien</b>	<b>32</b>
3.1	Kaltschmitt und Wiese . . . . .	32
3.2	Quaschnig . . . . .	34
3.3	Ecofys . . . . .	35
3.4	Diskussion der Untersuchungen . . . . .	36
<b>4</b>	<b>Ausgangsdaten und verwendete Software</b>	<b>38</b>
4.1	Digitale Stadtgrundkarte (DSGK) . . . . .	38
4.2	Flugzeug-gestütztes Laserscanning (LIDAR) . . . . .	39
4.3	Luftbilder . . . . .	42
4.4	Strahlungswinkel . . . . .	43

4.5	Verwendete Software . . . . .	44
4.5.1	ESRI ArcGIS 9.2 . . . . .	44
4.5.2	MICROSOFT OFFICE Access 2007 . . . . .	44
4.5.3	SUNSET . . . . .	45
4.5.4	@Last Software SketchUp 6 Pro . . . . .	45
<b>5</b>	<b>Eignungsklassifikation</b>	<b>47</b>
5.1	Arbeitsschritte . . . . .	47
5.2	Aufbereitung der LIDAR-Daten . . . . .	49
5.3	Beleuchtungs- und Verschattungssimulation . . . . .	50
5.3.1	Gebäudebedingte Verschattung . . . . .	51
5.3.2	Standortbedingte Verschattung . . . . .	53
5.4	Berechnung von Exposition und Dachneigung . . . . .	58
5.5	Rasterkombination . . . . .	60
5.6	Ermittlung von Großflächen für Fotovoltaik . . . . .	65
<b>6</b>	<b>Interpretation</b>	<b>70</b>
6.1	Interpretation des Klassifikationsergebnisses nach Gebäudetypen . . . . .	71
6.1.1	Gründerzeitquartiere . . . . .	71
6.1.2	Siedlungen des sozialen Wohnungsbaus der Nachkriegszeit . . . . .	73
6.1.3	Reihenhäuser, Einfamilienhäuser, Mehrfamilienhäuser ab 1980 . . . . .	75
6.1.4	Moderne Bürogebäude und Flachbauten . . . . .	76
6.1.5	Industrie- und Gewerbebauten . . . . .	77
6.2	Gesamtbeurteilung des untersuchten Stadtteiles Nürnberg St. Leonhard . . . . .	79
<b>7</b>	<b>Diskussion und Ausblick</b>	<b>81</b>
<b>A</b>	<b>Sonnenwinkel und Sonnenazimut</b>	<b>85</b>
A.1	DIN 5034 Algorithmus zur Berechnung von Sonnenwinkel und Sonnenazimut	85
A.2	Mit SUNSET berechnete Sonnenwinkel und Sonnenazimut für 2007 . . . . .	86
<b>B</b>	<b>Karten</b>	<b>87</b>
	<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>91</b>
	<b>Verwendete Abkürzungen</b>	<b>94</b>
	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>96</b>

# Wahrheitsgemäße Erklärung

Ich erkläre hiermit wahrheitsgemäß, dass ich

- die vorliegende Arbeit selbständig und ohne unerlaubte Hilfe angefertigt habe;
- außer den im Quellenverzeichnis angegebenen Stellen keine weiteren benutzt habe und alle Zitate, die aus dem Literaturverzeichnis ganz oder in Teilen entnommen sind, als solche kenntlich gemacht und einzeln durch die Angabe des Urhebers und des Erscheinungsjahres nachgewiesen habe;
- alle sonstigen Quellen als solche kenntlich gemacht und einzeln durch Angabe des Urhebers und des Erscheinungsjahres nachgewiesen habe;
- alle Personen und Stellen, die mir bei der Durchführung und Erstellung der Arbeit geholfen haben, genannt habe;
- die vorliegende Arbeit noch keiner anderen Stelle zur Prüfung vorgelegt habe.

Erlangen, den.....

.....

# Kapitel 1

## Motivation

Eine der Hauptaufgaben unserer Gesellschaft in den kommenden Jahren und Jahrzehnten ist die Verringerung der  $CO_2$ -Emissionen unserer Energieversorgung. Nur durch die Überwindung der gegenwärtig starken Abhängigkeit von fossilen Rohstoffen, insbesondere in Form von Erdöl, Erdgas und Kohle, können zukünftige ökonomische und politische Konflikte um die sich immer weiter erschöpfenden Vorkommen vermieden werden.

Einen entscheidenden Beitrag dazu leisten hierbei regenerative Energien. Das Augenmerk dieser Untersuchung liegt dabei auf der direkten Nutzung der Sonnenenergie. Sonnenkollektoren ermöglichen die Bereitstellung von Energie dort, wo sie benötigt wird. Eine dezentrale Energieversorgung über Fotovoltaikanlagen und Solarthermiesysteme kann erheblich dazu beitragen, die Luftqualität der Städte zu verbessern. Die so zur Verfügung gestellte Energie muss nicht über fossile Energieträger generiert werden, wodurch Schadstoffemissionen in erheblichem Umfang eingespart werden. Die Installation von Solarkollektoren auf bereits vorhandenen Flächen vermeidet eine Verstärkung der im urbanen Raum ohnehin bereits sehr hohen Flächenversiegelung.

### 1.1 Ziel der Untersuchung

Ziel der Untersuchung ist es, Dachflächen des Gebäudebestandes einer Großstadt am Beispiel von Nürnberg hinsichtlich ihrer Eignung für die aktive Solarenergienutzung mittels in der Dachhaut oder auf dem Dach installierter thermischer Solarkollektoren oder Fotovoltaikanlagen zu untersuchen. Nachgeführte Systeme werden nicht berücksichtigt. Dabei wird auf die bereits gewonnenen Erfahrungen existierender Potentialstudien zurückgegriffen. Die Analyse erfolgt mit vorhandenen Geobasisdaten und marktüblicher Software. In einem halbautomatischen GIS-basierten Verfahren werden die nutzbaren Dachflächen klassifiziert und in einer Eignungskarte visualisiert. Die enorm hohe Auflösung der zur Verfügung stehenden Ausgangsdaten erlaubt, im Gegensatz zu den meisten bisher durchge-

führten großräumigen Untersuchungen, die in der Regel auf der Auswertung statistischer Daten basierten, Bewertungen sowohl von Einzelgebäuden als auch ganzer Stadtraumtypen vorzunehmen. Dies ist in dieser Genauigkeit erst durch den Einsatz moderner Mess- und Erfassungsverfahren im Bereich der verwendeten Geodaten, im konkreten Fall handelt es sich um Daten aus dem flugzeug-gestützten Laserscanning, möglich geworden. Die Klassifikation soll Grundlage für die Bewertung der Eignung unterschiedlicher Stadtraumtypen für großdimensionierte Fotovoltaikanlagen sein. Mit dem im Rahmen dieser Arbeit entwickelten Verfahren soll Planern und Entscheidern in Behörden und Planungsbüros ein Werkzeug zur besseren Beurteilung der Dachflächeneignung für Solaranlagen in einem konkreten Gebäudebestand an die Hand gegeben werden.

## 1.2 Vorgehen

Im ersten Teil der Arbeit werden die Grundlagen der Solarthermie sowie der Fotovoltaik und deren unterschiedliche Kollektorsysteme vorgestellt und welche Anforderungen an Dachflächen gestellt werden, um diese Systeme betreiben zu können. Die Untersuchung des gesamten Nürnberger Stadtgebietes ist im Rahmen des angestrebten Vorhabens nur schwer möglich, denn die zu Grunde liegenden Laserscannerdaten sind zum einen noch nicht für das gesamte Stadtgebiet flächendeckend vorhanden, zum anderen ist die Handhabung der Daten sowie die Berechnungsverfahren auf Grund der gigantischen Datenmenge mit einem erheblich größeren Aufwand verbunden.

Als Untersuchungsgebiet wird auf Grund des stark diversifizierten Bestandes an Gebäudetypen der Nürnberger Stadtteil Sankt Leonhard ausgewählt. Ein aus Höhenmessdaten des flugzeug-gestützten Laserscanning erstelltes digitales Oberflächenmodell, welches sowohl die Gebäude als auch die Vegetation enthält, bildet die Grundlage für eine zweistufige Beleuchtungssituation für ein ganzes Jahr. Dazu werden die Dachflächen der Gebäude über Grundrissdaten aus dem Liegenschaftskataster der Stadt Nürnberg extrahiert und die gegenseitige Verschattung der Gebäude in einem dreidimensionalen Stadtmodell berechnet. Die als geeignet identifizierten Flächen werden anschließend anhand von Parametern existierender Potentialstudien hinsichtlich Neigung und Exposition klassifiziert und die Klassifikationsergebnisse in Karten visualisiert. Über den Vergleich mit einer 2007 durchgeführten Potentialstudie zum solaren Städtebau werden die Klassifikationsergebnisse verifiziert und interpretiert.

# Kapitel 2

## Grundlagen

### 2.1 Energieversorgung in Deutschland

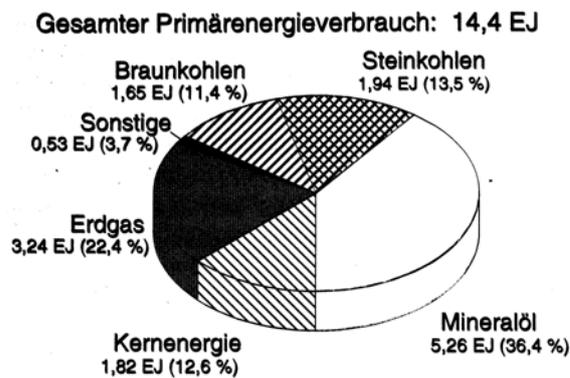


Abbildung 2.1: „Primärenergieverbrauch nach Energieträgern in Deutschland im Jahr 2004“. (KALTSCHMITT U. A. 2006, S.8)

Vor der industriellen Revolution wurden regenerative Energien zur Versorgung, insbesondere in Form von Holz als nachwachsendem Rohstoff genutzt. Im Zuge der Industrialisierung steigerte sich der auf fossilen Rohstoffen, wie Kohle, Erdöl und Erdgas basierende Primärenergiekonsum<sup>1</sup> dramatisch. Erst die Ölkrisen der 1970er Jahre führten zu einer Verlangsamung dieses Wachstums und erhöhten die Sensibilität von Bevölkerung und Unternehmen für die Gestaltung der Energieversorgung.

Durch Modernisierungs- und Rationalisierungsmaßnahmen gelang eine teilweise „Entkopplung“ (BRAND U. REICHE 2005, S.41) des Primärenergieverbrauchs vom Wirtschaftswachstum. Dieser Effekt wurde nach der Wiedervereinigung Deutschlands durch den Zusammenbruch der Wirtschaft in den neuen Bundesländern noch verstärkt. Im Jahr 2004 deckten allein Erdgas und Erdöl fast die Hälfte des gesamten Primärenergieverbrauchs (siehe Abbildung 2.1). Die deutsche Energiewirtschaft ist dabei sehr stark auf Importe angewiesen, da lediglich Braun- und Steinkohle in nutzbarem Umfang als heimische Energierohstoffe vorhanden sind. Im Jahr 2002 betrug der Importanteil am Primärenergieverbrauch nach BRAND U. REICHE (2005) über 60 %, der größte Handelspartner ist die Russische Föderation.

<sup>1</sup>„Primärenergie: Energie in ursprünglicher, noch nicht technisch aufbereiteter Form z.B. Rohöl, Kohle, Uran, Solarstrahlung, Wind“ (QUASCHNING 2006, S.17)

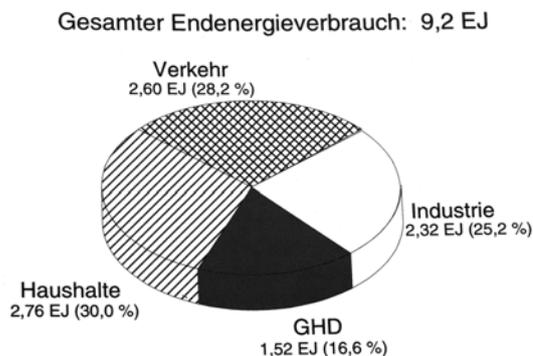


Abbildung 2.2: „Endenergieverbrauch nach Verbrauchergruppen in Deutschland im Jahr 2003 (GHD Gewerbe Handel, Dienstleistungen)“ (KALTSCHMITT U. A. 2006, S.9)

bei 6 % (BRAND U. REICHE 2005). Die Anteile der erneuerbaren Energien steigen in Deutschland nicht zuletzt auf Grund intensiver staatlicher Förder- und Anreizprogramme. Weltweit betrachtet ist der Anteil erneuerbarer Energieträger in den letzten Jahren auf Grund des insgesamt starken Anstiegs des Primärenergieverbrauchs, welcher hauptsächlich durch fossile Energieträger gedeckt wird, leicht gesunken (BRAND U. REICHE 2005).

Die Anreizprogramme tragen in Deutschland dazu bei, dass im Zuge von Gebäude- und Kraftwerkssanierungen verstärkt auf regenerative Energien gesetzt wird, insbesondere im Heizungsbereich der privaten Haushalte. So konnte laut STADT NÜRNBERG (2006) beispielsweise der bis zum Jahr 2000 stetig wachsende Heizwärmebedarf im Stadtgebiet trotz Flächenzuwachs in der Zeit von 2000 bis 2004 reduziert werden. Ursache sind die gestiegenen Preise für fossile Rohstoffe und die Förderungen im Rahmen lokaler und bundesweiter  $CO_2$ -Minderungsprogramme, beispielsweise durch die Kreditanstalt für Wiederaufbau KfW. Die Verschärfung der gesetzlichen Rahmenbedingungen in Bezug auf den Energieverbrauch von Bestands- und insbesondere Neubauten, beispielsweise durch die Energieeinsparverordnung EnEV, forcieren Investitionen in effizientere und umweltverträglichere Energieversorgung.

## 2.2 Die Sonne als Energieversorger

Solarenergie kann direkt über Sonnenkollektoren oder indirekt über entsprechende Architekturkonzepte genutzt werden. Sie wird von der Sonne, deren Kern bis zu

<sup>2</sup>„Endenergie: Energie in der Form, wie sie dem Endverbraucher zugeführt wird z.B. Erdgas, Heizöl, Kraftstoffe, Elektrizität („Strom“), Fernwärme“ (QUASCHNING 2006, S.17)

Die Endenergie<sup>2</sup> wird zu einem Viertel von der Industrie konsumiert, der auf die Haushalte entfallende Anteil liegt bei etwa einem Drittel (siehe Abbildung 2.2). Die Haushalte verwenden die Energie zu 78 % für Licht und Raumwärme (EVERDING 2007).

Der Kohleanteil im Strommarkt liegt bei über 50 %. Im Bereich der regenerativen Energiequellen entfallen lediglich 0,006 % auf Strom aus Fotovoltaikanlagen. Der Beitrag von Wasser- und Windkraft zur Stromversorgung liegt

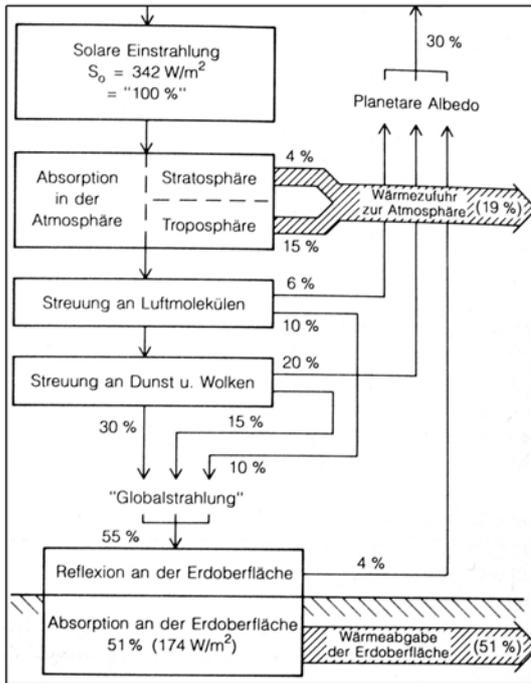


Abbildung 2.3: Globales Budget der solaren Strahlung im System Atmosphäre - Erdoberfläche. Die angegebenen %werte sind mit Unsicherheiten in der Größenordnung  $\pm 2$  behaftet. (ROEDEL 1992, S.53)

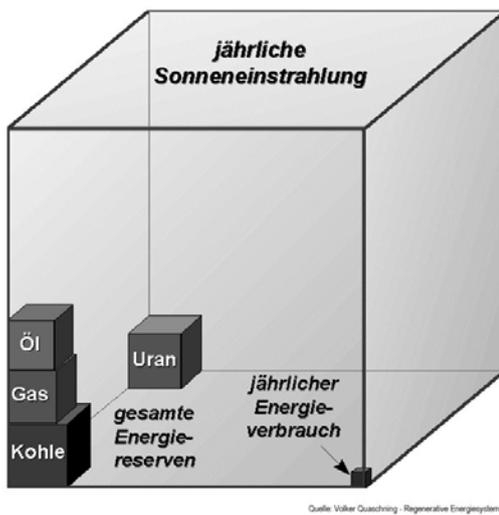


Abbildung 2.4: Vergleich der Dimensionen jährlicher Sonneneinstrahlung mit globalen Reserven fossiler Energieträger (QUASCHNING 2006, S.36)

15 Millionen Grad Celsius heiß ist (AGUADO U. BURT 2004), durch Kernfusion freigesetzt. Bei diesem Prozess verschmelzen in millionenfach parallel ablaufenden Reaktionen jeweils vier Wasserstoffkerne zu einem Heliumkern, wobei Energie freigesetzt wird<sup>3</sup>, welche innerhalb von acht Minuten die Erde erreicht (AGUADO U. BURT 2004).

Die Sonne versorgt unseren Planeten mit einer konstanten Energie von  $1.368 \text{ W/m}^2$  (ZMARSLY U. A. 2002). Diese "Bestrahlungsstärke der extraterrestrischen Solarstrahlung bei mittlerem Sonnenabstand auf die zur einfallenden Strahlung senkrechten Fläche an der oberen Atmosphärenengrenze bezeichnet man als Solarkonstante" (ZMARSLY U. A. 2002, S.27). Auf Grund jahreszeitlicher Änderung der Entfernung zur Sonne schwankt sie auf der Erde innerhalb eines Jahres um 7 %. Die tatsächlich gemessenen Strahlungswerte auf der Erdoberfläche weichen von der Solarkonstanten deutlich ab (siehe Abbildung 2.3). Die Strahlung wird teilweise an der Atmosphäre reflektiert, von Ozon, Wasser, Sauerstoff und Kohlendioxid absorbiert oder durch Rayleigh- oder Mie-Streuung gestreut.

Als Rayleigh-Streuung bezeichnet man die Streuung der Strahlung an „Luftatomen und Molekülen, deren Durchmesser wesentlich kleiner als die Lichtwellenlänge sind“ (VOLLMER 2002, S.2). Kurz-

welliges, blaues Licht wird dadurch um den Faktor fünf bis neun stärker gestreut, als rotes,

<sup>3</sup>Die Masse der Reaktionsedukte ist größer als die der Redaktionsprodukte. Die Massendifferenz ist über die frei werdende Bindungsenergie zu erklären, die bei der Bildung eines stabilen Heliumkerns durch die Umwandlung von zwei Positronen und zwei Elektronen in Strahlungsenergie entsteht (QUASCHNING 2006)

langwelliges Licht (VOLLMER 2002). Dies erklärt beispielsweise auch die Blaufärbung des Himmels.

Mie-Streuung verringert die Strahlung an Partikeln in der Luft, deren Durchmesser gleich oder größer der Wellenlänge des Lichtes ist. Dies können beispielsweise Aerosole, wie Salze, Sulfate oder Nitrate sein, die durch Naturereignisse wie Waldbrände oder Vulkanausbrüche emittiert werden. Der Ausstoß kann aber auch anthropogen verursacht sein, beispielsweise durch Industrieanlagen. Die Stärke der Mie-Streuung ist daher stark standortabhängig.

Als Globalstrahlung bezeichnet man die Summe der direkten und diffusen Strahlung, die an der Erdoberfläche auftrifft. Sie liegt in Mitteleuropa im Jahresmittel etwa bei  $130W/m^2$ , in Spanien bei  $200W/m^2$  (KRAUS 2001). Sie entscheidet über die Eignung eines Standortes für die solarenergetische Nutzung. Die jährlich von der Sonne gelieferte Energie übersteigt den menschlichen Verbrauch um ein Vielfaches, sie „entspricht etwa dem 10.000-fachen des Weltprimärenergiebedarfs und damit weit mehr als alle verfügbaren Energiereserven“ (QUASCHNING 2006, S.36), dargestellt in Abbildung 2.4. Jedoch deckt das Angebot der für die aktive Solarenergienutzung geeigneten und verfügbaren Flächen direkt beim Verbraucher häufig nicht den Bedarf, so dass auch Freiflächen in Anspruch genommen werden müssten. Da die Strahlung abhängig von der geographischen Breite ist, steht in höheren Breiten deutlich weniger nutzbare Sonnenenergie zur Verfügung.

In mittleren Breiten und südlicher kann die Nutzung der Sonnenenergie einen wichtigen Beitrag leisten, die Luftverschmutzung insbesondere in urbanen Räumen deutlich zu reduzieren, weil die Nutzung fossiler Energieträger zum Teil substituiert werden kann.

## 2.3 Systeme zur aktiven Nutzung der Solarenergie



Abbildung 2.5: Nachgeführte Fotovoltaikanlage auf einem Pultdach

Solarthermische Kollektoren und Fotovoltaikmodule wandeln einen Teil des Lichtspektrums in Wärme oder elektrische Energie um. Sie können häufig mit geringem technischen Aufwand in bestehende Gebäude integriert werden und weisen eine große Flexibilität hinsichtlich der Anlagendimension und der Einsatzmöglichkeiten auf (BECHBERGER 2005). Ihr Aufbau und ihre Funktionsweise werden im folgenden Teil näher beschrieben.

Hohe Wirkungsgrade<sup>4</sup> können sie jedoch nur dann erzielen, wenn die Absorberflächen

<sup>4</sup>Quotient aus abgegebener Leistung und Einstrahlungsleistung in %

möglichst ideal zur Sonne ausgerichtet sind. Die höchste Effizienz wird dann erreicht, wenn die Einstrahlung senkrecht auf den Absorber trifft. Jede Abweichung davon führt zwangsläufig zur Reduktion des Ertrags. Die Halbierung dieses Winkels verringert die absorbierte Energie um etwa 30 % (WIESNER 2007). Auf Grund des Jahresganges der Sonne erreichen fest montierte Solaranlagen die idealen Anstrahlwinkel nur selten. Weiterhin ist zu beachten, dass die Einstrahlung in den Wintermonaten selbst bei idealem Winkel durch den verlängerten Weg durch die Atmosphäre geringer ist. Schneeaufasten und Verschmutzungen reduzieren die Ausbeute. Ein weiteres Problem stellen Verschattungen dar, sie werden häufig durch Vegetation oder Gebäude verursacht, die Verluste sind insbesondere bei Fotovoltaikanlagen erheblich. Thermische Sonnenkollektoren sind etwas verschattungstoleranter.

Höchstmögliche Effizienz können nachgeführte Systeme mit konzentrierten Zellen erzielen. Die Solarmodule, ausgestattet mit Linsen, welche das Sonnenlicht auf die Fotovoltaikzellen bündeln, werden dabei auf einem beweglichen Gestell montiert, das, angetrieben von Motoren und gesteuert von einer speziell auf den Standort optimierten Software, dem Sonnenstand nachgeführt und hinsichtlich des Anstellwinkels angepasst wird (dargestellt in Abbildung 2.5). So können örtliche Gegebenheiten, wie der Schattwurf eines benachbarten Gebäudes oder der Vegetation, adaptiert werden. Der Ertrag wird durch die Maximierung der direkten Strahlung auf den Absorber erhöht, jedoch ist der Investitions- und Wartungsaufwand verglichen mit fest montierten Anlagen deutlich größer. Die Realisierung nachgeführter Solaranlagen auf Gebäudedächern in einem Stadtgebiet ist deshalb sowohl technisch als auch finanziell nur schwer durchführbar. Auch in Anbetracht des äußeren Erscheinungsbildes des Gebäudes und durch den deutlich höheren Flächenverbrauch wird diese Lösung im Rahmen der Arbeit ausgeschlossen. Systeme dieses Typs werden sich zukünftig bei Solarkraftwerken auf Freiflächen etablieren, da mit einem niedrigen Anteil an Silizium hohe Wirkungsgrade erreicht werden können (PATEL 1999). Für die durchgeführte Untersuchung werden jedoch nur Anlagen berücksichtigt, die sich auf oder in die bestehende Dachfläche integrieren lassen oder gegebenenfalls die Dachhaut vollständig ersetzen können. Entscheidend für die Wirtschaftlichkeit der Anlage ist der Energieertrag über den gesamten Jahresverlauf.

### 2.3.1 Thermische Solarkollektoren

Thermische Solarkollektoren wandeln den kurzwelligen Anteil der Sonnenstrahlung in Wärme um und können so zur Gebäudeheizung und Brauchwassererhitzung verwendet werden. Für sie gelten unter anderem folgende physikalische Gesetzmäßigkeiten:

Das Prinzip der Umwandlung solarer Strahlung in Wärme wird auch als „photothermische Wandlung“ (KALTSCHMITT U. A. 2006, S.137) bezeichnet. „Die maximale zu erwarten-

de Strahlungsleistung der Sonne beträgt ca.  $1.000\text{W}/\text{m}^2$ . Es gilt, einen möglichst großen Teil dieser Sonnenenergie zu nutzen. Zu 100% ist dies in keinem technischen System realisierbar, da die zur Verfügung stehende Energie immer durch Verluste reduziert wird.“ (WIESNER 2007, S.115). Im Rahmen dieser Arbeit erfolgt eine detaillierte Betrachtung im Wohnbereich verbreiteter thermischer Solarkollektoren.

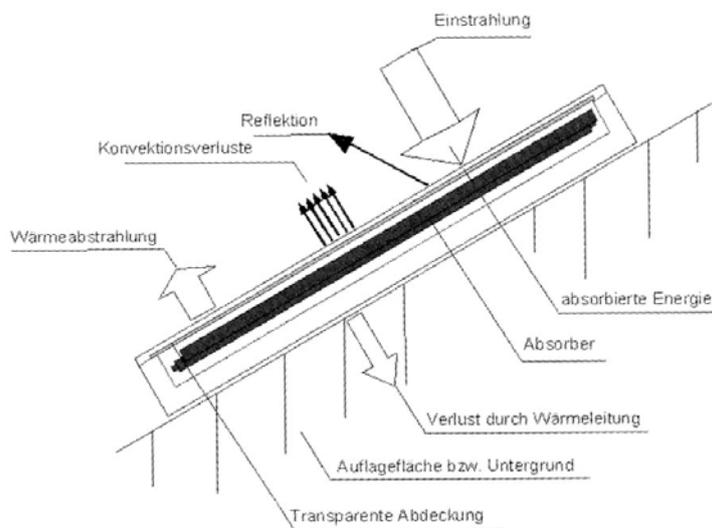


Abbildung 2.6: Schematische Darstellung eines solarthermischen Kollektors (WIESNER 2007, S.115)

Auf konzentrierte Hochtemperaturkollektoren, beispielsweise Rinnenkollektoren oder Heliostatenfelder wird nicht näher eingegangen. Die Funktionsweise ist im Grundprinzip stets die selbe: Die Sonnenstrahlung trifft auf einen Absorber. In diesem Absorber wird ein Medium erhitzt, welches entweder direkt oder indirekt in einen Wärmekreislauf integriert ist. Manche Anlagen verfügen

zusätzlich über integrierte oder separate Speicher. Beeinflusst wird die photothermische Wandlung durch die Parameter *Reflexion*, *Emission*, *Transmission* und *Absorption*.

Als Emission  $\epsilon$  wird der Teil der Strahlung bezeichnet, den ein Körper an seine Umgebung abgibt. Der von ihm aufgenommene Anteil stellt die Absorption  $\alpha$  dar. Das Transmissionsverhältnis  $\tau$  beschreibt, wieviel Strahlung den Körper in Relation zur Einstrahlung durchdringen kann. Das Verhältnis von einfallender zu reflektierter Strahlung wird im Reflexionskoeffizient  $\rho$  ausgedrückt. Es gilt

$$\alpha + \rho + \tau = 1$$

(KALTSCHMITT U. A. 2006, S.138)

Nach dem Kirchhoffschen Gesetz ist das Verhältnis zwischen Absorption und Emission, als eine Funktion von Temperatur und Wellenlänge, bei einer gegebenen Temperatur für alle Körper konstant. Es entspricht im Betrag der Abstrahlung eines idealen schwarzen Körpers (KALTSCHMITT U. A. 2006).

Ein idealer schwarzer Körper wäre als Absorber jedoch deshalb nur bedingt geeignet, da er zwar ein Maximum an Strahlung in Wärme umwandelt, jedoch auch einen erheblichen

Teil der Wärme an seine Umwelt emittiert - die Lösung stellen selektive Absorber dar. „Ein idealer Absorber reflektiert keine kurzwellige Strahlung ( $\rho = 0$ ) und absorbiert daher entsprechend [der Gleichung  $\alpha + \rho = 1$ ] die Solarstrahlung in diesem Wellenlängenbereich vollständig ( $\alpha = 1$ ). Für langwellige Strahlung oberhalb einer bestimmten Grenzwellenlänge sind die Verhältnisse bei einem idealen Absorber gerade umgekehrt: hier reflektiert er die Strahlung vollständig und absorbiert überhaupt nicht.“ (KALTSCHMITT U. A. 2006, S.138). Dies wird über verschiedene Beschichtungen der Absorber erreicht, hier kommen Materialien wie Titanoxidnitrid oder Schwarzchrom zum Einsatz. Doch neben dem Absorber sind auch die Eigenschaften der Schutzabdeckungen von entscheidender Bedeutung. Sie sollen die Verluste durch Konvektion möglichst gering halten und einen sehr hohen Transmissionskoeffizienten haben. Hier kommen infrarot-undurchlässige Beschichtungen zum Einsatz, um Abstrahlungsverluste im Infrarotbereich zu reduzieren. Dabei wird auf Grund der besseren Langzeitbeständigkeit häufig bedampftes Sicherheitsglas verwendet, welches auch Hagelereinschläge unbeschadet übersteht.

Im folgenden Teil werden die für die Brauchwassererhitzung und Gebäudeheizung bzw. Heizungsunterstützung verbreitetsten Kollektortypen vorgestellt.

### Kunststoffkollektoren



Abbildung 2.7: Aufbau eines einfachen Kunststoffkollektors (EISENMANN 2005, S.26)

Kunststoffkollektoren stellen die einfachste Form der Wärmeabsorber dar. Es handelt sich in der Regel um nicht verglaste, schwarze Kunststoffmatten oder Kunststoffrohre bzw. -schläuche, welche in einem Wärmekreislauf integriert sind (siehe Abbildung 2.7). Hauptanwendungsbereich ist die Beckenwasserbeheizung von Schwimmbädern mit Temperaturen bis 30 °C (EISENMANN 2005), wobei das Beckenwasser den Wärmespeicher dieses

Kollektorsystems darstellt (QUASCHNING 2006). Das Beckenwasser wird über Pumpen durch die Matten oder Schläuche geleitet und erwärmt sich dabei. Die Ansprüche an die Beständigkeit der Kunststoffe sind hoch, da sowohl die intensive UV-Strahlung, als auch das im Wasser enthaltene Chlor das Material stark strapazieren können.

Diese Kollektorform ist für die kostengünstige, vollständige Wärmeenergieversorgung eines Freibades gut geeignet, da die Wassertemperatur in den Sommermonaten nur

um wenige Grad Celsius erhöht werden muss. Voraussetzung ist, dass die Kollektorfläche mindestens 50 % bis 80 % der Beckenoberfläche entspricht (QUASCHNING 2006).

### Flachkollektoren

Flachkollektoren sind laut BUNDESMINISTERIUM FÜR UMWELT, NATURSCHUTZ UND REAKTORSICHERHEIT (2007) die am häufigsten verwendeten Systeme zur solaren Wärmebereitstellung. Der Absorber befindet sich bei diesem Anlagentyp integriert in einem Gehäuse, welches an der Oberseite mit einer transparenten Abdeckung aus Glas oder Kunststoff versehen ist. Diese Abdeckung soll die Konvektionsverluste reduzieren, jedoch wird an der Oberfläche der Abdeckung auch ein Teil des Sonnenlichts reflektiert. Etwa 14 % der eingestrahnten Energie gehen durch die Wärmeabstrahlung des Absorbers verloren, etwa 2 % durch Absorption an der Abdeckung (QUASCHNING 2006).



Abbildung 2.8: Dachintegrierter flüssigkeitsbasierter Flachkollektor integriert in ein Satteldach

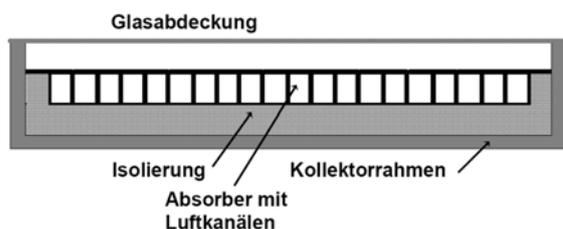


Abbildung 2.9: Aufbau eines Luftkollektors (WITTWER 2007, S.13)

Als Medium für den Wärmetransport existieren sowohl luft- als auch flüssigkeitsbasierte Konzepte. Beim Luftkollektor, dargestellt in Abbildung 2.9, wird der Absorber von Luft durchströmt, welche über ein Gebläse- und Lüftungssystem zur Erwärmung von Räumen zugeführt werden kann.

Flüssigkeitsbasierte Flachkollektoren werden vor allem zur Warmwasseraufbereitung und zur Heizungsunterstützung in Wohngebäuden verwendet. Ein ausgezeichnetes Preis- / Leistungsverhältnis, die vielseitigen Montagemöglichkeiten und der hohe Wirkungsgrad erklären die weite Verbreitung dieses Typs. In Mitteleuropa kann ein Einfamilienhaus mit einer durchschnittlichen Flachkollektoranlage vollständig mit Warmwasser versorgt werden (BECHBERGER 2005). Der Wirkungsgrad der

Flüssigkeitskollektoren lässt sich noch steigern, indem der Raum zwischen Abdeckung und Absorber zur weiteren Verminderung der Konvektionsverluste evakuiert wird. Zur Stabilisation muss die Abdeckscheibe von der Innenseite des Kollektors abgestützt werden. „Jedoch lässt sich das Vakuum über längere Zeit nicht stabilisieren, da das Eindringen von Luft am Übergang zwischen Glas und Kollektorgehäuse nicht vollständig zu vermeiden ist.

Deshalb muss ein Vakuumflachkollektor in gewissen Zeitabständen nachevakuiert werden“ (QUASCHNING 2006, S.95). Weitere Effizienzsteigerungen sind bei dieser Bauart durch Reflektorbeschichtungen zu erzielen, die das Sonnenlicht gebündelt auf den Absorber reflektieren.

### Speicherkollektoren

Speicherkollektoren integrieren neben dem Absorber ein eigenes Speichersystem in das Konzept eines flüssigkeitsbasierten Flachkollektors, häufig in Form eines Edelstahl tanks. Der Wärmespeicher, welcher bei Flachkollektoren im Gebäude untergebracht ist, wird dadurch überflüssig. Der Tank ist in einem von einer transparenten Abdeckung an der Oberseite abgeschlossenen Gehäuse untergebracht (siehe schematische Darstellung in Abbildung 2.10). Das eingestrahelte Licht wird über einen Reflektor auf den Tank gebündelt und das darin enthaltene Medium, häufig Trinkwasser, erwärmt.

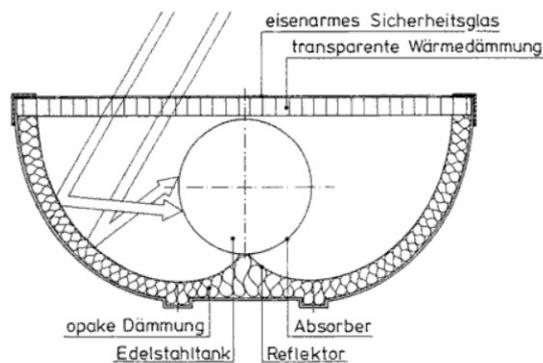


Abbildung 2.10: Schematischer Aufbau eines Speicherkollektors (BRAUN U. MARKO 1997, S.276)

Mit Speicherkollektoren kann die Brauchwasserversorgung von Wohngebäuden während der Sommermonate je nach Anlagengröße fast vollständig abgedeckt werden, Kälteperioden können durch nachgeschaltete Durchlauferhitzer kompensiert werden. Insbesondere in Regionen mit sehr tiefen Wintertemperaturen besteht jedoch die Gefahr von Frostschäden.

Speicherkollektoren können sowohl auf Dächern, als auch in Fassaden integriert werden. Problematisch wirkt sich dabei das durch den Tank bedingte hohe Gewicht aus, so dass gegebenenfalls die Tragfähigkeit von Dachkonstruktionen vor der Installation überprüft werden muss.

### Vakuurröhrenkollektoren

Vakuurröhrenkollektoren bestehen aus evakuierten, geneigten Glasröhren. Sie haben einen Durchmesser von mehreren Zentimetern und umschließen Wärmeleiter, die als *Heatpipes* bezeichnet werden. Sie sind gefüllt mit einem Medium, das eine hohe Wärmeleitfähigkeit aufweist, beispielsweise Methanol.

Durch die Sonnenstrahlen erwärmt sich das Medium in der Heatpipe und steigt nach oben. Die Glasröhren werden an ihrem höchsten Punkt von einem Wärmetauscher abgeschlossen.

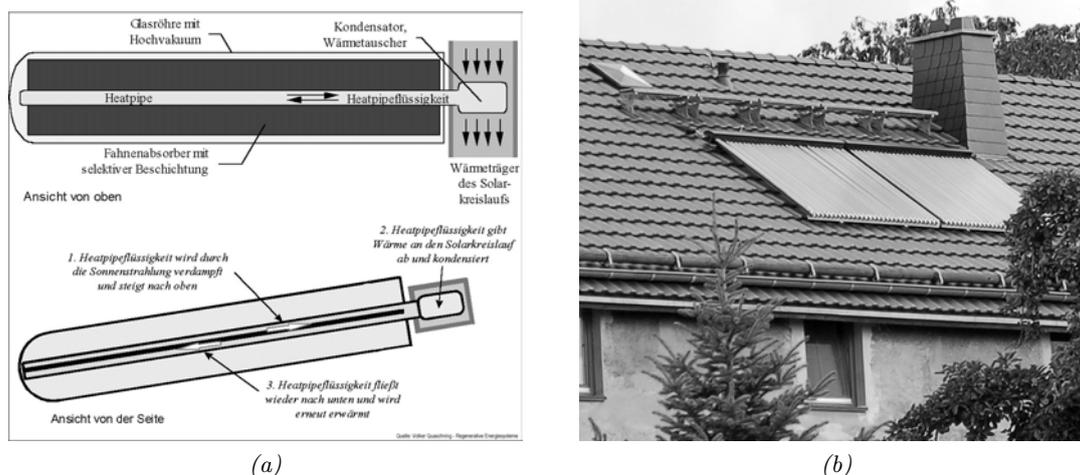


Abbildung 2.11: (a) Schematische Darstellung eines Vakuumröhrenkollektors (QUASCHNING 2006, S.96)  
 (b) Vakuumröhrenkollektor zur Gebäudebeheizung

An diesem kondensiert das aufgestiegene Wärmeleitmedium und gibt dabei seine Energie an die im Heizungskreislauf integrierte Wärmeleitflüssigkeit ab. Es sind daneben auch Systeme auf dem Markt, bei denen die Heatpipes direkt in den Wärmekreislauf der Heizanlage integriert sind. Dadurch wird eine Schrägmontage des Kollektors überflüssig, so dass dieser beispielsweise auch in eine Gebäudefassade integriert werden kann.

Mit Vakuumröhrenkollektoren kann sowohl eine Gebäudebeheizung betrieben als auch Prozesswärme zur Verfügung gestellt werden.

Die Wirkungsgrade liegen bei etwa 80 % (BECHBERGER 2005), wobei insbesondere in der kalten Jahreszeit gegenüber herkömmlichen Flachkollektoren große Vorteile erzielt werden, da auch geringe Temperaturdifferenzen in den Wärmekreislauf überführt werden können. Nachteilig wirken sich die deutlich höheren Anschaffungskosten aus, welche aus aufwändigeren Herstellungsverfahren resultieren. So ist bei der Herstellung die Integration von Wasserstoffabsorbern in die Kollektoren nötig, da die Absorption von atmosphärischem Wasserstoff das Vakuum auf Dauer zerstören würde. Dadurch ist eine Nachevakuierung, wie sie bei Vakuumflachkollektoren nötig ist, überflüssig.

### Hybridkollektoren

Hybridkollektoren vereinigen mehrere Konzepte in einem System. Sie stellen die neueste technische Entwicklung dar und befinden sich gegenwärtig teilweise noch im Prototypenstadium.

Man unterscheidet Kollektoren, die sowohl in den Wärme- als auch in den Wasserkreislauf eines Gebäudes integriert werden, und Kollektoren, die das Licht über Fotovoltaik zur Stromgewinnung nutzen und die entstehende Wärme zur thermischen Nutzung ableiten. Dieses System bezeichnet man als PV/T (Photovoltaisch-thermischer Hybridkollektor).

Der Wirkungsgrad der Fotovoltaikanlage ist abhängig von der Temperatur der Zellen, näheres dazu in Kapitel 2.3.2. Durch Hinterlüftung der Fotovoltaikzellen oder über Flüssigkühlung kann die Kollektorfläche doppelt genutzt und die Solarzellen gleichzeitig gekühlt werden (siehe Abbildung 2.12).

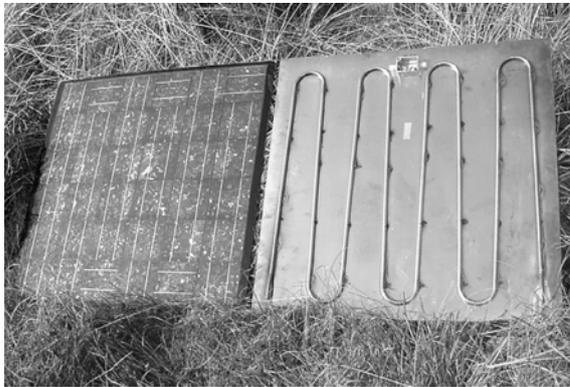


Abbildung 2.12: Vorder- und Rückseite eines Hybridkollektors (JONG U. A. 2004, S.2)

verfügbaren Flachkollektoren noch erheblich kleiner (EISENMANN 2005), so dass eine Verwendung mit dem derzeitigen Stand der Technik lediglich im Niedertemperaturbereich, beispielsweise zur Beheizung von Schwimmbecken, möglich ist.

Dies erlaubt deutliche Kosteneinsparungen, was im Falle der Verknappung der nutzbaren Flächen (Flächenkonkurrenz zwischen solarer Stromerzeugung und solarer Wärmebereitstellung) ein wesentlicher Vorteil ist (EISENMANN 2005). Problematisch ist gegenwärtig noch die Temperaturbeständigkeit einiger Bauteile der Fotovoltaikmodule, so dass die Lebensdauer etwas geringer ausfällt. Auch die Bereitstellung von Wärme ist im Vergleich zu derzeit

Hybridkollektoren können zukünftig auch dazu beitragen, Gebäude in entlegenen, nicht am öffentlichen Stromnetz gelegenen Standorten mit Wärme und Strom aus einem System zu versorgen.

### 2.3.2 Fotovoltaik

Fotovoltaikzellen wandeln Sonnenlicht unter Ausnutzung des photovoltaischen Effektes direkt in elektrische Energie um. Darunter versteht man die Freisetzung positiver und negativer Ladungsträger in einem Festkörper verursacht durch die Lichteinstrahlung.

Eine Fotovoltaik- oder Solarzelle ist aus zwei oder mehreren eng aneinander liegenden Halbleiterelementen aufgebaut, in denen durch unterschiedliche Ladungskonzentration eine elektrische Feldstärke entsteht. Zu den Halbleitern zählt man Stoffe wie Silizium, Germanium oder Gallium-Arsenid. Sie verhalten sich bei tiefen Temperaturen wie Nichtleiter, bei hohen Temperaturen jedoch können sich Valenzelektronen aus ihren Bindungen lösen. Die Leitfähigkeit steigt dabei mit der Temperatur (KALTSCHMITT U. A. 2006).

Der Ladungsunterschied der Halbleiterelemente wird durch Dotieren, also durch das gezielte Einbringen von anderen chemischen Elementen in das Material, erreicht, wobei einer der Halbleiter mit Fremdatomen verunreinigt wird, die einen Elektronenüberschuss

aufweisen (n-Dotierung). Ein anderer Halbleiter wird mit Fremdatomen mit einem Elektronendefizit dotiert (p-Dotierung).

Beide Bauteile werden zu einer Solarzelle kombiniert, die p-Schicht bildet auf einer Kontaktschicht aus Metall die untere Lage der Zelle. An der Oberseite befinden sich die n-Schicht sowie diverse Schutzschichten zur Verminderung der Reflexion und zum Schutz vor äußeren Einflüssen. Die frei beweglichen Ladungsträger bauen an der Grenzfläche der Halbleiter ein elektrisches Feld auf.

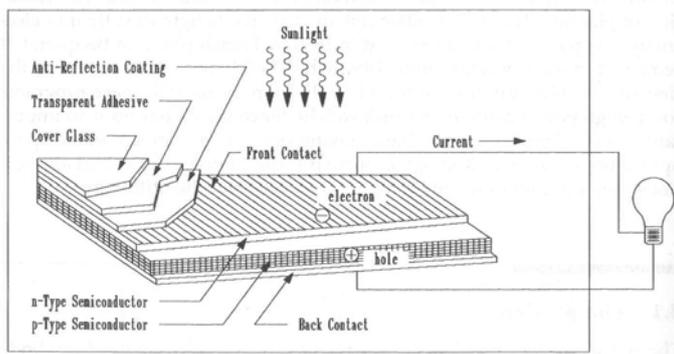


Abbildung 2.13: Aufbau einer Fotovoltaikzelle (PATEL 1999, S.126)

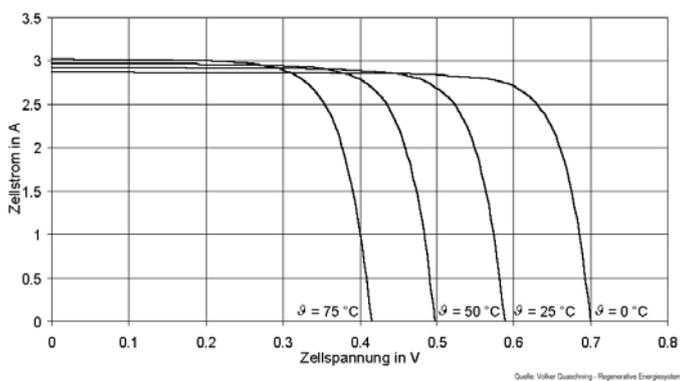


Abbildung 2.14: Temperaturabhängigkeit von Solarzellen (QUASCHNING 2006, S.174)

Nach PATEL (1999) führt bei einer typischen monokristallinen Solarzelle (siehe Kapitel auf der nächsten Seite) jedes Grad Celsius Temperaturanstieg zu einem Rückgang der Spannung um 0,45 %. Die Stromstärke steigt dabei zwar an, jedoch nicht so stark, wie die Spannung abfällt. Dadurch fällt die Leistung bei hohen Temperaturen ab.

Im folgenden Teil werden die unterschiedlichen Typen und Fertigungsmethoden der gegenwärtig marktüblichen Fotovoltaikzellen beschrieben.

Angeregt durch die Photonen des Lichtes wandern Elektronen durch den Übergang beider Halbleiter, so dass durch Anschluss eines Verbrauchers Strom fließt. Der Wirkungsgrad von Fotovoltaikzellen ist dabei abhängig von der Temperatur. Abbildung 2.14 verdeutlicht den Zusammenhang: je niedriger die Zelltemperatur, desto stärker ist die Leerlaufspannung. Dieses Prinzip wird von den im vorherigen Kapitel beschriebenen PV/T-Kollektoren genutzt, um zusätzlich thermische Energie bereitzustellen.

## Polykristalline Solarzellen

Polykristalline Solarzellen werden aus hochreinen Siliziumstäben produziert. Die Grundlage dafür bildet Quarzsand, welcher mit Kohlenstoff bei Temperaturen von 1.800 °C oder in einem aluminothermischen Reduktionsverfahren bei 1.100 °C bis 1.200 °C umgewandelt wird. Als Produkt erhält man metallurgisches Silizium mit Reinheitsgraden von bis zu 99 % (KALTSCHMITT U. A. 2006).

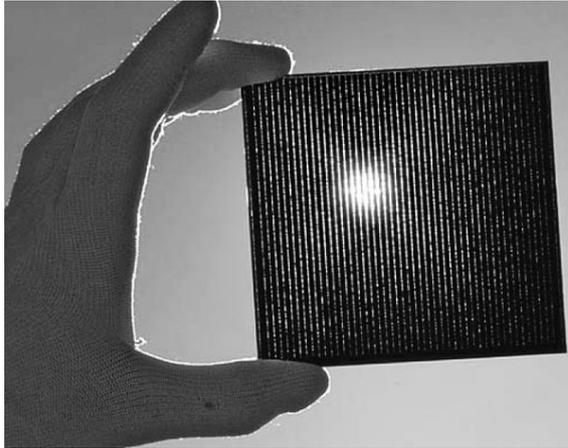


Abbildung 2.15: Vorderseite einer RISE-Solarzelle (SCHOCK 2005, S.45)

Über anschließende Aufbereitungsverfahren<sup>5</sup> werden hochreine Siliziumstäbe gefertigt, die in als *Waver* bezeichnete, 200  $\mu\text{m}$  bis 500  $\mu\text{m}$  dicke Scheiben zersägt werden. Der nächste Schritt im Herstellungsverfahren ist die Dotierung bei Temperaturen von bis zu 1.200 °C sowie das Aufbringen der Kontakte im Siebdruckverfahren. Bei sogenannten RISE-Solarzellen (*rear-interdigitated single-evaporated*) werden beide Kontakte auf die Rückseite der Zelle aufgebracht, um die Vorderseite vollständig

verschattungsfrei herzustellen. Polykristalline Solarzellen weisen unterschiedliche Ausprägungen der Siliziumkristalle auf. An deren Korngrenzen entstehen Verluste, die den Wirkungsgrad begrenzen. In der Serienfertigung liegt er bei etwa 13 - 15 %.(KALTSCHMITT U. A. 2006). Im Labor konnten nach dem RISE-Verfahren gefertigte Zellen bereits bis zu 22 % Wirkungsgrad erzielen (SCHOCK 2005).

## Monokristalline Solarzellen

Bei monokristallinen Solarzellen wird basierend auf den aus dem Herstellungsverfahren polykristalliner Solarzellen erzeugten hochreinen Siliziumstäben mittels spezieller Aufbereitungsverfahren<sup>6</sup> ein einkristalliner Siliziumstab erzeugt. Dieser ist etwa 10 bis 15 cm lang und breit. Er wird in quadratische Waver zerschnitten, um die Flächenausnutzung und somit den Wirkungsgrad noch zu steigern. Es werden unter Laborbedingungen Wirkungsgrade von etwa 25 %, im Praxiseinsatz etwa 14 - 17 % erreicht (KALTSCHMITT U. A. 2006).

<sup>5</sup>Schritt 1: Silan-Prozess: Versetzen des Silizium mit Chlorwasserstoff - Reaktionsprodukte Trichlorsilan und Wasserstoff; Schritt 2: Rückgewinnung des Siliziums nach Destillation mit Chemical-Vapor-Desposition - Abscheiden des Siliziums bei 1350 °C (QUASCHNING 2006)

<sup>6</sup>Czochralski-Tiegelziehverfahren oder Zonenziehverfahren (QUASCHNING 2006) oder Zonenschmelzverfahren für Wirkungsgrade von über 25 % (KALTSCHMITT U. A. 2006, S.215)

## Dünnschichtzellen

Die ersten Dünnschichtzellen wurden aus amorphem Silizium bereits in den 1970er Jahren entwickelt. Dabei werden mehrere insgesamt weniger als  $1\mu\text{m}$  dünne Schichten wasserstoffpassiviertes amorphes Silizium auf einen Glasuntergrund oder eine Folie aufgedampft. Die nur wenige 100 nm dicken, unterschiedlich dotierten Schichten werden mit einem leitfähigen Oxid bedampft und auf einen metallischen Untergrund, der als Rückseitenkontakt fungiert, aufgebracht. Die so entstandene Solarzelle hat im Labor Spitzenwirkungsgrade von 14,6 % (KALTSCHMITT U. A. 2006) erreicht. Die Wirkungsgrade im Praxiseinsatz sind jedoch erheblich geringer, da es durch den Staebler-Wronski-Effekt<sup>7</sup> zu Degradation der Zellen in den ersten Betriebsmonaten kommt. Die Effizienz liegt im Alltagsbetrieb bei 5 bis 7 % (BECHBERGER 2005), was diesen Typ für großflächige Anwendungen unattraktiv macht. Dünnschichtzellen aus amorphem Silizium kommen in elektronischen Kleingeräten, wie Uhren oder Taschenrechnern, zum Einsatz.

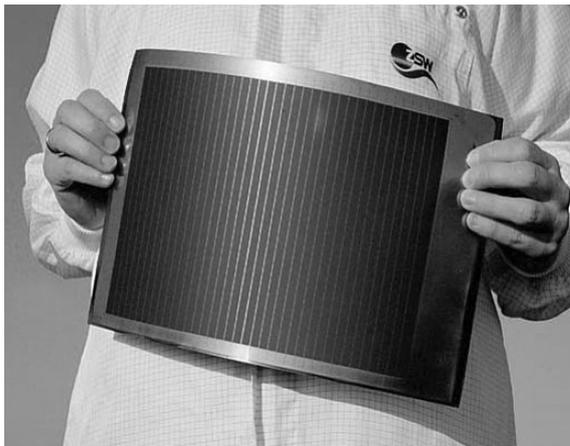


Abbildung 2.16: Dünnschichtmodul aus Kupfer-Indium-Di-Selenid auf einer Metallfolie (SCHOCK 2005, S.45)

Im Bereich der Dünnschichtzellen wird gegenwärtig ein großer Forschungsaufwand betrieben, da der Materialeinsatz im Vergleich zu poly- und monokristallinen Solarzellen deutlich geringer ist. Moderne Dünnschichtzellen werden auf Basis von Chalkogeniden und Chalkopyriten (CIS) gefertigt. Es handelt sich dabei um polykristalline Solarzellen aus Halbleitern wie Cadmium-Tellurid oder Kupfer-Indium-Di-Selenid (Beispiel in Abbildung 2.16). Sie werden bei Temperaturen von über  $600\text{ }^{\circ}\text{C}$  auf

Glas aufgebracht und können unter Laborbedingungen Wirkungsgrade von 16 bis 18 % erreichen (KALTSCHMITT U. A. 2006). Auf Grund der geringen Mächtigkeit erschließt dieser Zelltyp völlig neue Anwendungsfelder. So ist es beispielsweise möglich, die dotierten Schichten statt auf Glas auch auf Folie oder sogar Textilien<sup>8</sup> abzuscheiden, so dass biegsame, flexible Solarzellen gefertigt werden können. Dünnschichtzellen erreichten im Jahr 2004 bereits einen weltweiten Marktanteil von 17 % (UMWELTBUNDESAMT 2004).

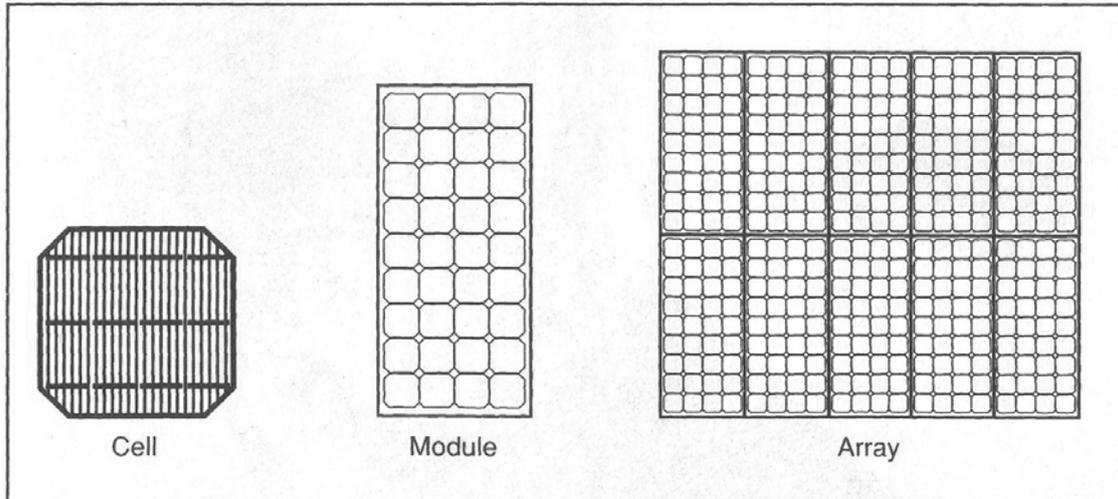


Abbildung 2.17: Solarzelle, Solarmodul aus mehreren Solarzellen, Feld aus mehreren Solarmodulen (PATEL 1999, S.127)

### Modularer Aufbau von Solaranlagen

Eine einzelne monokristalline Solarzelle aus Silizium kann eine Spannung von etwa 0,6 V mit etwa 5 A auf einer Fläche von  $15 \text{ cm}^2$  (LUTHER 2005) bei einer Einstrahlung von  $1.000 \text{ W/m}^2$  und einer Zelltemperatur von  $25 \text{ }^\circ\text{C}$  liefern. Um eine für den Betrieb im öffentlichen Stromnetz ausreichende Spannung zu erzielen, werden die Solarzellen in Reihe geschaltet und zu einem Modul zusammengefasst, welches über 100 V (WIESNER 2007) erzielen kann (siehe Abbildung 2.17). Die Solarzellen sind in einem Modul in Ethylvinylacetatfolie eingebettet und an der Rückseite mit einer Folie, die als *Tedlar* bezeichnet wird, befestigt. Dieses Modul besteht weiterhin aus einer Rückseitenabdeckung, einer transparenten Schutzglasabdeckung an der Oberseite sowie einem Rahmen.

Module gibt es in verschiedenen Größen und Ausführungen. Sie können sowohl auf dem Dach aufmontiert werden als auch die Dachhaut selbst bilden. So kann die gesamte Dachfläche zur Stromerzeugung genutzt werden. Die ebenfalls erhältlichen Solardachziegel führen auf Grund des größeren Verkabelungsaufwandes zu vergleichsweise höheren Investitionskosten.

Eine Fotovoltaikanlage besteht aus einem oder mehreren Modulen sowie dem Wechselrichter, der den Gleichstrom der Solarzellen in Wechselspannung des in Deutschland üblichen Stromnetzes wandelt. Mehrere Fotovoltaikmodule werden zu sogenannten *Strings* zusammengefasst, jeder String leistet maximal 1.000 V und verfügt über einen eigenen

<sup>7</sup>Die Leitfähigkeit nimmt nach Beleuchtung ab, da Wasserstoff-Silizium-Bindungen zerstört werden. Dieser Prozess ist bei Temperaturen über  $150 \text{ }^\circ\text{C}$  reversibel (BERGMANN U. SCHAEFER 2005)

<sup>8</sup>Forschungsprojekt des Instituts für Physikalische Elektronik der Universität Stuttgart (BERNREUTER 2004)

Wechselrichter. Der Ausfall eines Wechselrichters der parallel geschalteten Strings führt so nicht zum Ausfall der gesamten Fotovoltaikanlage, was insbesondere an Standorten ohne öffentliches Stromnetz wichtig ist. Diese Betriebsform wird als Inselbetrieb bezeichnet; sie bietet sich auch für Kleinanlagen wie Parkuhren oder Notrufsäulen an.

### 2.3.3 Ökologische Aspekte

#### Auswirkungen auf das Stadtklima

Solaranlagen können das Stadtklima in erheblichem Umfang positiv beeinflussen. Wenn im Zuge der Modernisierung von Gebäuden in großflächigem Umfang solarthermische Kollektoren zur Unterstützung oder zur Substitution der Heizanlage installiert werden, können die Schadstoffkonzentrationen der Stadtluft, beispielsweise Feinstaubemissionen aus Öl- und Gasfeuerungsanlagen, aber auch der Ausstoß von Kohlendioxid, vermindert werden. Durch die Mehrfachnutzung von Flächen ist keine weitere Steigerung der Flächenversiegelung nötig. Der Einsatz von Solarthermie und Fotovoltaik hat beispielsweise im Stadtgebiet Nürnberg laut STADT NÜRNBERG (2006) im Jahr 2006 4.700 t Kohlendioxid eingespart.

#### Betrieb von Solaranlagen

Der Betrieb thermischer Solaranlagen verursacht durch die im System integrierten Pumpen- oder Speichersysteme nur sehr geringe Emissionen. Der Betrieb einer Fotovoltaikanlage emittiert weder Schadstoffe noch Lärm. Problematisch ist, wie bei vielen regenerativen Energieträgern, die schwankende Bereitstellung der Energie - Solarkollektoren können diese nur zur Verfügung stellen, wenn die Sonne scheint.

Die Speicherung elektrischer Energie, beispielsweise um ein Mehrfamilienhaus auch während der Nacht oder der Wintermonate versorgen zu können, ist gegenwärtig mit großem technischen Aufwand verbunden. Es werden großdimensionierte Solaranlagen mit Akkumulatoren benötigt.

Thermische Solaranlagen werden auf Grund der gestiegenen Preise für fossile Energieträger häufig groß dimensioniert, um auch im Winter ausreichend Wärme zur Verfügung zu stellen. Dies kann in den Sommermonaten zu Überhitzungen führen, so dass sich die Solarwärmepumpe abschaltet. Bei weiterer Erhitzung kann die Wärmeträgerflüssigkeit verdampfen und zu Schäden an Teilen der Anlage führen (SCHOCK 2005). Um den Deckungsgrad von solarthermischen Heizsystemen zu erhöhen, können diese mit anderen regenerativen Energien, beispielsweise Geothermie, aber auch mit Erdgas-Brennwertsystemen oder Wärmepumpen kombiniert werden.

Ein Prototypenkonzept wird derzeit an der Höheren Technischen Lehranstalt Steyr getestet. Eine Umweltmessstation wird mit einer Kombination aus Brennstoffzelle und

Fotovoltaikanlage betrieben. Mit dem nicht benötigten Strom wird tagsüber in einem Elektrolyseur Wasser in seine Bestandteile gespalten, der frei werdende Sauerstoff wird an die Umgebung abgegeben, der Wasserstoff wird gespeichert. Die Brennstoffzelle erzeugt während der Dunkelheit mit Hilfe von aus der Umgebung aufgenommenem Sauerstoff Strom, welchen sie in das Versorgungsnetz des Gebäudes einspeist. Eine autarke Stromversorgung eines Gebäudes ist mit diesem Konzept realisierbar (LUEDERS 2007).

### **Herstellung, Haltbarkeit und Entsorgung**

Verglichen mit konventionellen Methoden der Energiegewinnung fallen bei der Solarenergie die Emissionen zum Großteil nur bei der Herstellung und der Errichtung der Anlagen an. Entgegen des in der Diskussion um regenerative Energien häufig verwendeten Argumentes, Solaranlagen erwirtschafteten während ihres Betriebes nicht einmal die Energie, die für ihre Herstellung benötigt würde, sind die Amortisierungszeiträume durch moderne Produktionstechniken relativ kurz. So amortisieren thermische Solarkollektoren ihre Produktionsenergie im Durchschnitt schon nach 4 Jahren (BECHBERGER 2005), Fotovoltaikanlagen weisen Zeiträume von 17 bis 41 Monate auf (BECHBERGER 2005). Pro Kilowattstunde elektrischer Leistung werden etwa 100 g  $CO_2$  emittiert. Ein modernes Wind- oder Wasserkraftwerk emittiert nur 20 % davon, ein modernes Gas-Dampf-Kraftwerk das Vierfache (BECHBERGER 2005).

Die Herstellungsverfahren der Absorber sind in den vergangenen Jahren wesentlich umweltfreundlicher geworden, die bisherigen Galvanisierungsverfahren werden zunehmend durch Vakuumbeschichtungsverfahren abgelöst (KALTSCHMITT U. A. 2006). Die Hersteller übernehmen beim Rückbau der Anlagen häufig die Entsorgung sowie das Recycling der verwendeten Werkstoffe. Es wurden zahlreiche Studien zur Untersuchung der Haltbarkeit von Solaranlagen durchgeführt. Im Bereich der solarthermischen Systeme kam die Studie von PEUSSER (1997) zu folgendem Ergebnis: „Die Effizienz der kompletten Systeme verringerte sich im Verlauf von 15 Jahren Betrieb nur um schwerpunktmäßig 5 % relativ, in einigen Fällen um 10 % relativ. Die höhere Degradation erfolgte dabei an Systemen, die mit Kollektoren bestückt waren, die - wegen der inzwischen erkannten Konstruktionsmängel - in dieser Form heute nicht mehr gebaut werden.“ (PEUSSER 1997, S.6). Bei der Untersuchung wurde stets das gesamte System einschließlich Leitungen und Speicher betrachtet. Man kann insgesamt von einer Haltbarkeit von 20 bis 25 Jahren ausgehen. Haltbarkeitsstudien im Betrieb von Fotovoltaiksystemen können erst seit dem Betrieb der ersten netzgekoppelten Anlage im Jahr 1982 durchgeführt werden. Alterungstest bescheinigen den Kollektoren Standzeiten von 30 bis 35 Jahren (UMWELTBUNDESAMT 2004), die Solaranlage könnte demzufolge im Rahmen einer dann anstehenden Dachsanierung erneuert bzw. ersetzt werden.

## 2.4 Anforderungen an die Dachfläche für die Eignung für Solarenergienutzung

### 2.4.1 Dachformen

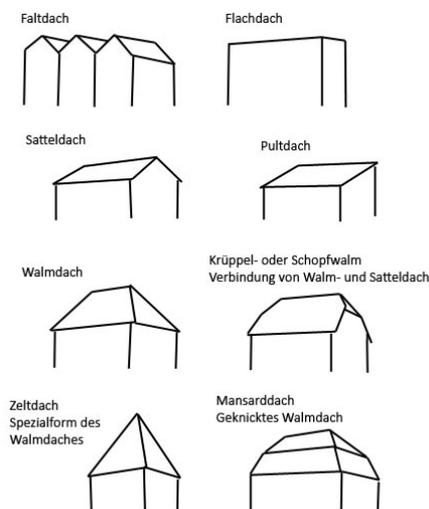


Abbildung 2.18: Übersicht der häufigsten Dachformen in Deutschland (SCHMITT U. HEENE 2001, S.475)



Abbildung 2.19: Satteldach mit Schleppgauben, Kunigundenstraße

Ein Dach ist „der oberste, flache oder steil ansteigende Abschluss eines Gebäudes“ (LUEGER 1894, S.95). Es besteht aus dem Tragwerk, häufig in Form von Balken, und der Dachhaut. Als Dachhaut kommen die verschiedensten Materialien, am häufigsten jedoch Dachziegel zur Anwendung.

Die oberste Kante des Daches wird als *First* bezeichnet, die unterste als *Traufe*. Es existiert eine enorme Vielzahl an Dachformen, sie gehen historisch auf die klimatischen Bedingungen und Bauvorschriften, die der Brandsicherheit dienen, zurück. Die in Deutschland am weitesten verbreiteten Formen sind in Abbildung 2.18 dargestellt. Am häufigsten sind, bedingt durch die einfache Konstruktion, Satteldächer realisiert, aber auch Pult- oder Flachdächer. Sie eignen sich auf Grund ihrer großen, homogenen Flächen auch bezüglich des äußeren Erscheinungsbildes des Gebäudes sehr gut für die Installation von Solaranlagen. Ein Pultdach hat nur eine schräg geneigte Dachfläche, deren oberste Kante den First und deren unterste Kante die Traufe bildet. Ein Satteldach besteht aus zwei gegeneinander gestell-

ten Dachflächen, die sich am First berühren. Befinden sich auf den Firstseiten ebenfalls geneigte Dachflächen, so bezeichnet man dies als Walmdach, bei gekürzten Giebelflächen als Krüppelwalmdach. Diese Dachformen können mit einer Mansarde kombiniert sein, in diesem Fall ist der Neigungswinkel der Dachfläche im unteren Bereich wesentlich steiler, der nutzbare Wohnraum eines Gebäudes kann so vergrößert werden. Bei den Gebäuden

aus der Gründerzeit, als die Wohnungsnot in den Städten extrem groß war, sind in vielen Fällen Mansardendächer errichtet worden. Dachgauben erfüllen eine ähnliche Funktion, sie integrieren steil stehende Fenster in die Dachfläche und vergrößern so den nutzbaren Wohnraum.

Man unterscheidet Spitz- und Schleppgauben, abhängig davon, ob das Dach der Gaube als Satteldach oder Pultdach (Beispiel in Abbildung 2.19) ausgeführt ist. Ein Zwerchhaus ist eine Spitzgaube, die die Größe eines separaten Giebels annimmt. Eine gering oder nicht geneigte Dachfläche bezeichnet man als Flachdach. Es ist häufig auf Grund der einfachen Konstruktion bei großflächigen Gebäuden, bei Lager- und Fabrikhallen realisiert.

### 2.4.2 Neigung und Exposition

Solaranlagen können ihre maximale Leistung nur entfalten, wenn sie senkrecht zur Einstrahlung der Sonne ausgerichtet werden. Da, wie bereits in Kapitel 2.3 beschrieben, nachgeführte Systeme nicht berücksichtigt werden, muss die Dachfläche hinsichtlich Neigung und Exposition bestimmte Kriterien erfüllen, damit darauf montierte Sonnenkollektoren effizient betrieben werden können.

Die Neigung sollte zwischen  $0^\circ$  und  $60^\circ$  liegen, damit entspricht die maximale Neigung der maximalen Sonnenhöhe (siehe berechnete Strahlungswinkel in Abbildung A.2), welche im Juni erreicht wird. Für Mitteleuropa erzielen Kollektorneigungen zwischen  $25^\circ$  und  $45^\circ$  optimale Jahresenergieerträge (KALTSCHMITT U. A. 2006), so dass die Dachneigung für einen ganzjährig optimalen Wirkungsgrad in diesem Bereich liegen sollte. Geringere Neigungen erfordern die Aufständigung der Module. Diese Methode ist auch bei stärkeren Neigungen möglich, jedoch wird dadurch das äußere Erscheinungsbild des Gebäudes erheblich beeinträchtigt.

Die Exposition richtet sich nach dem Sonnenazimut. Die höchste Einstrahlung erzielen südexponierte Standorte, auch Expositionen nach Südwest oder Südost sind gut geeignet. Ost- und westexponierte Flächen eignen sich nur bedingt, da sie nur morgens oder abends beschienen werden. Nord-, nordost- und nordwestexponierte Dächer sind für die solarenergetische Nutzung ungeeignet, da sie nur diffus bestrahlt werden.

### 2.4.3 Verschattung

Um den Wirkungsgrad zu maximieren, darf die Solaranlage nicht oder nur sehr gering verschattet sein. Der Schattenwurf beeinflusst Fotovoltaikanlagen wesentlich stärker negativ als thermische Solarkollektoren, denn die Verschattung einzelner Solarzellen (siehe Abbildung 2.20) hat Auswirkungen auf den gesamten String: „Eine verschattete Zelle produziert keinen Strom, sie verbraucht sogar den Strom, den die übrigen Zellen

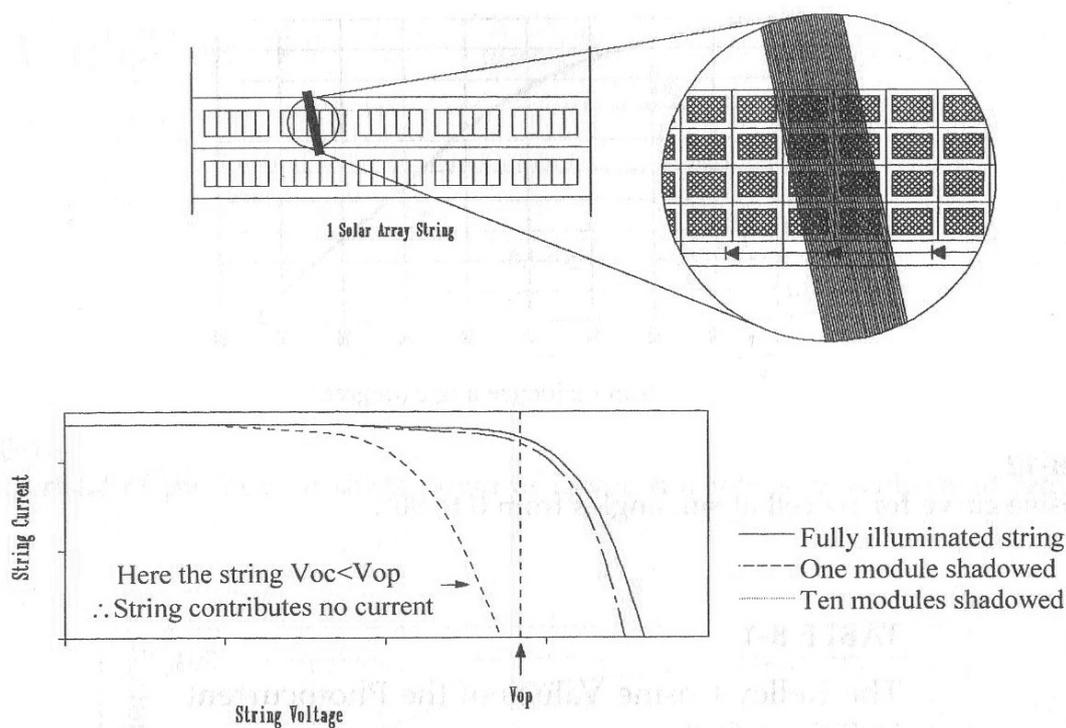


Abbildung 2.20: Auswirkungen von Schatten auf Zellen eines Fotovoltaikmoduls (PATEL 1999, S.136)

des Strings produzieren und setzt ihn in Wärme um“ (KONRAD 2007, S.9). Der Abfall der Spannung eines Moduls ist nicht direkt proportional zur Verschattung, sehr geringe Verschattungen werden toleriert, größere Verschattungen führen zu starkem Rückgang der bereitgestellten Spannung (PATEL 1999). Häufig verschattete Module sollten deshalb zu einem String mit einem gemeinsamen Wechselrichter ausgestattet werden, um den Gesamtwirkungsgrad nicht zu stark zu beeinträchtigen.

Man unterscheidet temporäre, standortbedingte und gebäudebedingte- oder auch entwurfsbedingte Verschattung.

### Temporäre Verschattung

Temporäre Verschattungen sind standortabhängig. In höheren Lagen der Mittelgebirge und im alpinen Raum sind dies in den Wintermonaten häufig Schneeauflagen. Diese schmelzen jedoch auf Grund der guten Ausrichtung der Kollektoren zur Sonne relativ schnell ab (PATEL 1999). In Industrie- und Ballungsräumen führen Ruß- und Schmutzfilme zu deutlichen Ertragseinbußen. Auch Laub und Vogelkot beeinträchtigen die Energieerträge negativ. Temporäre Verschattungen können durch eine Erhöhung der Kollektorneigung reduziert, jedoch nicht gänzlich vermieden werden. Die Verluste durch Verschmutzungen betragen laut QUASCHNING (2006) bei einer um  $30^\circ$  geneigten Kollektorfläche zwischen

2 und 10 %. Die Reinigung der Module erfolgt über ablaufendes Regenwasser selbständig, extreme Schmutzaufgaben können jedoch eine manuelle Reinigung der Solaranlage erforderlich machen.

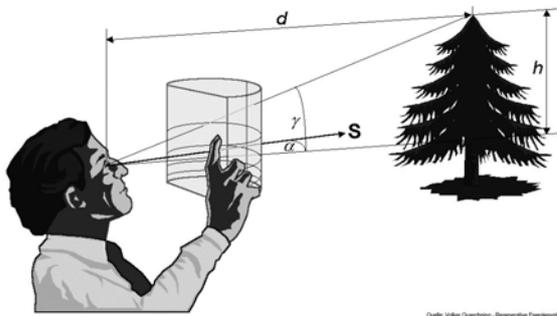


Abbildung 2.21: Aufnahme der Umgebung eines potentiellen Standortes für Solaranlagen mit einem Schattenanalysator (QUASCHNING 2006, S.70)



Abbildung 2.22: Beispiel für die mögliche Verschattung eines Flachdaches durch einen Baum direkt neben dem Gebäude

Ein weiterer Einflussfaktor ist die Bewölkung. An einem teilweise bewölkten Tag erreichen nach PATEL (1999) Fotovoltaikanlagen beispielsweise etwa 80% der Leistung bei unbewölktem Himmel. An Tagen mit dichter Bewölkung werden nur etwa 30% dieser Leistung erreicht.

### Standortbedingte Verschattung

Bereits bei der Planung einer Solaranlage muss die Umgebung eines potentiellen Standortes untersucht werden, um Verschattungen durch benachbarte Gebäude aber auch durch Vegetation (wie im Beispiel in Abbildung 2.22 dargestellt) festzustellen. Auch einzelne Objekte, wie der Schatten eines schmalen Mastes, der während des Tagesverlaufs über die Kollektorfläche wandert, wirken sich insbesondere bei Fotovoltaikanlagen stark auf die Energieausbeute aus.

Bei der Planung von Einzelobjekten hat sich die Verschattungsanalyse über ein Sonnenbahndiagramm etabliert. Dabei wird die Umgebung des potentiellen Standortes von einem vorher festgelegten Bezugspunkt aufgenommen, dieser sollte sich an der untersten Position der Solaranlage befinden. Es werden die Nachbargebäude, nahe Bäume und höhere Sträucher mit ihrer Höhe und der

Entfernung zum Bezugspunkt erfasst. Aus den so gewonnenen Daten lassen sich Höhen- und Azimutwinkel berechnen, so dass die Umgebung als Polygonzug in ein Sonnenbahndiagramm eingetragen werden kann. Dies ermöglicht die Erfassung der Tageszeiten, an denen



#### 2.4.4 Flächengröße

Die Anforderungen an die Größe der Dachfläche sind abhängig vom angestrebten Deckungsgrad der Solaranlage und dem Wirkungsgrad der installierten Systeme. Im Bereich der Solarthermie können auf der gleichen Fläche mit Vakuumröhrenkollektoren auf Grund der besseren Effizienz höhere Deckungsgrade erzielt werden als mit Flachkollektoren. Das Verhältnis der benötigten Dachfläche zur Bruttogrundfläche des Gebäudes ist in Abbildung 2.24 dargestellt. Bei der Untersuchung wurde von Deckungsgraden von 50 % ausgegangen, wobei bei einem dreigeschossigen Mehrfamilienhaus bereits fast ein Viertel der Bruttogrundfläche zur Versorgung mit Strom und Wärme benötigt werden. Die nutzbare Dachfläche muss optimal ausgerichtet sein, was bei einem Gebäude mit einem Satteldach, dessen Flächen nach Ost und West zeigen und das mit Spitzgauben oder Erkern versehen ist, nur schwer erreicht werden kann.

	Für Kollektoren zur Warmwasserbereitung (Deckungsgrad 50–60%)	Für Solarmodule zur Stromerzeugung (Deckungsgrad 50%)	Summe Warm- wasser und Strom
<b>Einfamilienhaus DH/RH</b>	5%	11%	16%
<b>Mehrfamilienhaus (3 Geschosse)</b>	5%	18%	23%
<b>Mehrfamilienhaus (4 Geschosse)</b>	7%	24%	31%

Abbildung 2.24: „Minimaler Dachflächenbedarf für die aktive Solarenergienutzung zur Warmwasserbereitung und Stromerzeugung. Bezugsgröße ist die Bruttogrundfläche der Gebäude.“ (HELBING U. A. 1999, S.163)

Für einen wirtschaftlich sinnvollen Betrieb muss die für eine Fotovoltaik vorgesehene Fläche eine Mindestgröße aufweisen. Im 100.000 Dächer-Solarstrom-Programm der KREDITANSTALT FÜR WIEDERAUFBAU (2002) wird eine Mindestgröße von 1.000 W Nennleistung mit einem Darlehen bezuschusst. Dafür wird eine um 30° bis 40° geneigte, 10 m<sup>2</sup> große Dachfläche oder ein 30 m<sup>2</sup> großes Flachdach benötigt. Für die Berechnung des technisch realisierbaren Potentials kann man davon ausgehen, dass pro Quadratmeter Fotovoltaikanlage etwa 100 W elektrischer Spitzenleistung (HEINLOTH 2003) erzielt werden können, wenn diese ideal zum Sonnenstand ausgerichtet ist. Für Flachdächer muss der Modulabstand vergrößert werden, um eine gegenseitige Verschattung der Module zu verhindern (siehe vorangegangenes Kapitel). Deshalb sollte die Fläche etwa der dreifachen Größe entsprechen.

Die staatlichen Fördermaßnahmen, beispielsweise durch Einspeisevergütungen, machen zwar einen Betrieb einer Anlage in dieser Größe zu einem reizvollen Investitionsobjekt,

jedoch wäre die Nutzung der Dachfläche zur thermischen Energieversorgung des Gebäudes in Anbetracht des Zieles der Verringerung der Luftschadstoffe im urbanen Raum, sinnvoller.

Je größer die Fotovoltaikanlage dimensioniert werden kann, desto ökonomischer ist ihr Betrieb, da die bei Großanlagen installierte Wechselrichterelektrik deutlich höhere Wirkungsgrade als bei Kleinanlagen aufweist (KALTSCHMITT U. A. 2006). Die Stadt Nürnberg hat als Mindestflächengrößen für die Aufnahme einer Dachfläche in die Solardachbörse<sup>9</sup> für Flachdächer 300 Quadratmeter und für geneigte Dachflächen 100 Quadratmeter vorausgesetzt.

#### 2.4.5 Bauvorschriften, Denkmalschutz und Auswirkungen auf das äußere Erscheinungsbild des Gebäudes



Abbildung 2.25: Integration einer Fotovoltaikanlage in das Satteldach eines Reihenhauses, Konstanzenstraße

Bei der Anlagenplanung sollte die jeweilige Landesbauordnung konsultiert werden. In Bayern sind laut Landesbauordnung „Solarenergieanlagen und Sonnenkollektoren [...] in und an Dach- und Außenwandflächen sowie auf Flachdächern, im Übrigen mit einer Fläche von bis zu 9 Quadratmetern“ (BAYERISCHES STAATSMINISTERIUM DES INNEREN 2007, ART. 57 (2) B) genehmigungsfrei. Die Tragfähigkeit der Dachkonstruktion sollte jedoch vor der Installation mit einem Architekten oder Statiker überprüft werden.

Bei denkmalgeschützten Gebäuden ist die Installation einer Solaranlage in die Fassade oder auf Steildächern häufig problematisch, wenn diese von der Straße oder von erhöhten Punkten aus eingesehen werden könnte. Die Auswahl der Materialien hinsichtlich Farbe und Form spielt eine erhebliche Rolle. Hier ist eine enge Zusammenarbeit zwischen Denkmalschutzbehörden und Planern gefragt, da es auch im Bereich historischer Bebauungen Möglichkeiten der Solarenergienutzung realisieren lassen. Zu beachten ist des Weiteren das Urheberrecht des Architekten. Dieses kann für jedes Gebäude beansprucht werden, es wird vererbt und kann gegebenenfalls die Installation einer Solaranlage trotz idealer Standortvoraussetzungen verhindern.

Die Integration einer Solaranlage in ein Dach stellt nicht nur hinsichtlich der technischen Umsetzung und eines möglichst optimalen Wirkungsgrades, sondern auch in Bezug auf das

<sup>9</sup>Im Internet unter <http://www.solardachboerse-nuernberg.de/>

äußere Erscheinungsbild eines Gebäudes eine große Herausforderung dar. Die stimmigsten Ergebnisse lassen sich bei orthogonalen Formen, wie Pult- oder Satteldächern erzielen (NIEBLER U. KRIPPNER 2007). Auf eine zusätzliche Aufständigung wird bei geneigten Dächern auf Grund des hohen Materialaufwandes und aus optischen Gründen häufig verzichtet - die Solaranlage wird in der Regel direkt auf das Dach montiert oder in die Dachhaut integriert, wie im Beispiel des Satteldaches in Abbildung 2.25.

Im Idealfall übernimmt die Solaranlage selbst die Funktion der Dachhaut, so dass die gesamte Fläche optimal zur Strom- und Wärmegegewinnung genutzt werden kann. So kann ein einheitliches Erscheinungsbild des Gebäudes erzielt werden. „Allerdings sind bei der gestalterischen Einbindung von solartechnischen Systemen häufig Unverträglichkeiten mit der Dachgeometrie, eine zusammenhanglose Verteilung der Komponenten auf dem Dach, die Zerstückelung homogener Flächen, Diskrepanzen in der Farbgebung und fehlende Abstimmung der Bauteilabmessungen mit dem überwiegend kleinteiligen Dachdeckungsmaterial anzutreffen“ (NIEBLER U. KRIPPNER 2007, S.89). Der Widerspruch zwischen technischer und gestalterischer Umsetzung sollte deshalb für jedes Gebäude bei der Anlagenplanung individuell betrachtet werden.

Die gute Sichtbarkeit einer Solaranlage auf einem Gebäude kann die Haltung gegenüber regenerativer Energiequellen bei Eigentümern und Bewohnern verbessern und zu Nachahmung anregen (BECHBERGER 2005).

## 2.5 Das Untersuchungsgebiet im Nürnberger Stadtteil St. Leonhard / Sündersbühl

Da die Untersuchung der Dachflächeneignung Ergebnisse für ein möglichst breit gefächertes Spektrum an Gebäudetypen und Baustilen liefern soll, muss das zu untersuchende Areal einen möglichst stark differenzierten Gebäudebestand hinsichtlich Gebäudealter- und Nutzung aufweisen.

Durch Luftbildanalysen und Recherche der Nürnberger Stadtentwicklung wurde der Stadtteil Sankt Leonhard / Sündersbühl als geeignet befunden, da kleinräumig die verschiedensten Baustile und Gebäudetypen aus einem Zeitraum von 100 Jahren anzutreffen sind, jedoch keine großräumigen denkmalschutzbedingten Einschränkungen, wie in der Nürnberger Altstadt, bestehen. Es handelt sich um eine Fläche von ca.  $1 \text{ km}^2$  mit etwa 2.000 Gebäuden oder Teilgebäuden. Begrenzt wird es im Norden durch die Rothenburger Straße, östlich durch die Schlachthofstraße und Amselstraße bzw. Finkenstraße. Die Südgrenze bildet die Eisenbahnlinie von Nürnberg in Richtung Ansbach, die Westgrenze stellt die Gustav-Adolf-Straße, Teil des Nürnberger Rings, dar.

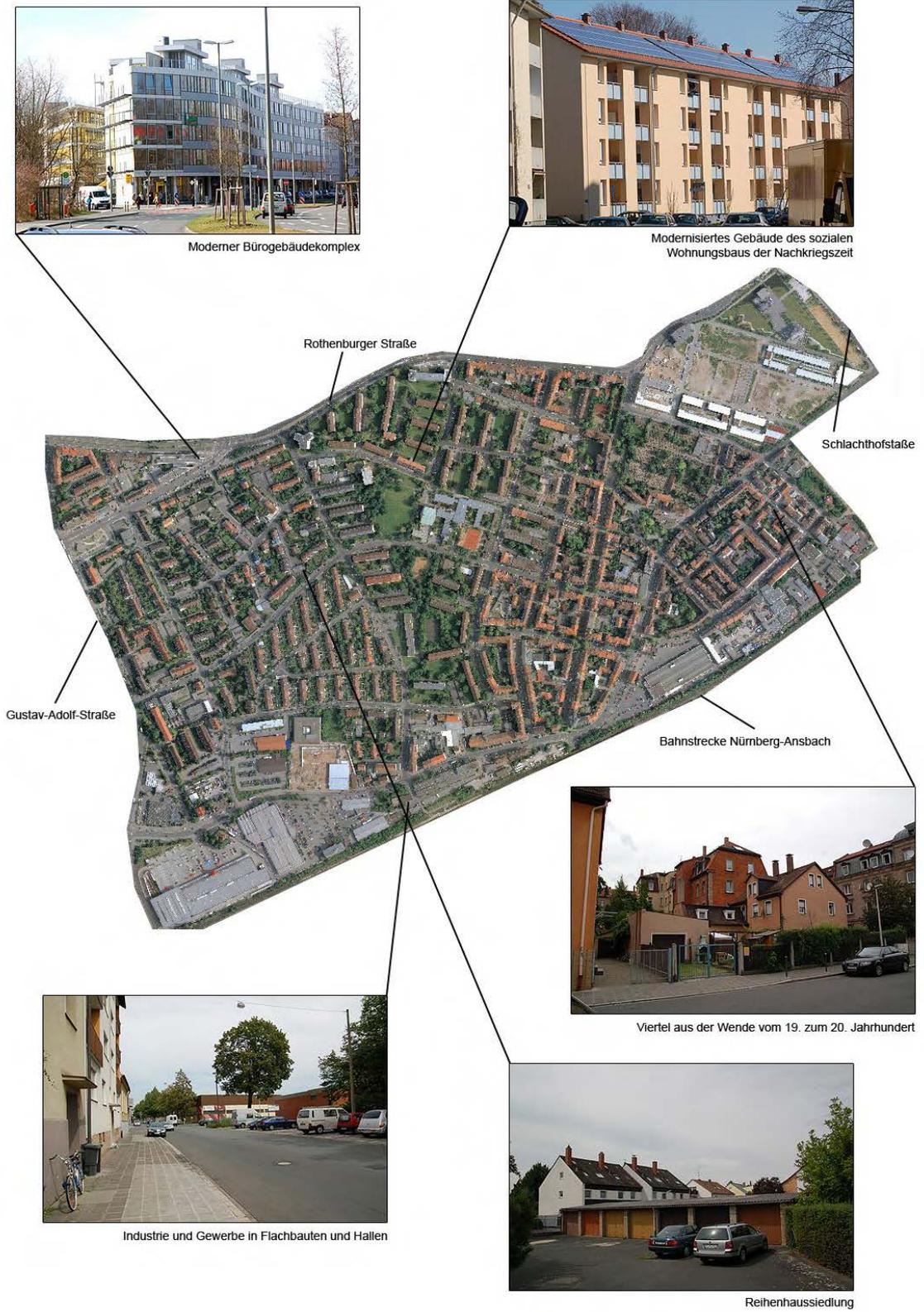


Abbildung 2.26: Untersuchungsgebiet: Luftaufnahme von 2006 mit Beispielfotos



Abbildung 2.27: Gebäude des 19. und frühen 20. Jahrhunderts prägen die Schweinauer Straße.

Im Ostteil von Sankt Leonhard befinden sich die ältesten Gebäude, sie bilden den historischen Kern des Ortes, der seinen Ursprung in einem Dorf entlang einer bedeutenden Handelsroute von Nürnberg nach Rothenburg hat. Der ursprüngliche Ort „selbst dürfte älter als Nürnberg sein und hat eine bewegte Vergangenheit“ (SIMON 1988, S. 248). Die Gemeinde diente als sog. 'Siechenkobel', einem Ort, in dem an Lepra erkrankte weibliche Einwohner Nürnbergs untergebracht wurden, um sie von der städtischen Gesellschaft zu isolieren. Aus Spendengeldern wurde die Kapelle Sankt Leonhard errichtet, welche sich heute am Leonharder Kirchplatz befindet. Die Umgebung dieses Bereiches wird geprägt von gründerzeitlichen Blockrandsiedlungen mit bebauten Innenhöfen. Sie stammen aus der Zeit der Jahrhundertwende vom neunzehnten zum zwanzigsten Jahrhundert (Beispiel Schweinauer Straße, dargestellt in Abbildung 2.27).

Nürnberg erlebte in dieser Zeit einen enormen wirtschaftlichen Aufschwung, welcher sich in reger Bautätigkeit manifestierte. Die Bevölkerungszahl stieg, auch bedingt durch die in der Modernisierung und Rationalisierung der Landwirtschaft begründete Landflucht stark an. Im Jahr 1895 lebten in Nürnberg bereits über 160.000 Menschen, nach mehreren Eingemeindungen und weiterem Bevölkerungswachstum waren es im Jahr 1900 etwa 260.000 Einwohner (BAUERNFEIND 2007). Sankt Leonhard wurde Mitte des neunzehnten Jahrhunderts ein Teil von Sündersbühl, welches 1898 nach Nürnberg eingemeindet wurde (BAUERNFEIND 2007). Der heutige Baubestand ist durch Kriegszerstörungen und Baulückenschließungen teilweise sehr inhomogen.

In den Orten der Umgebung hatten sich zahlreiche Industrie- und Handwerksbetriebe niedergelassen. Sankt Leonhard wurde zum Ver- und Entsorgungszentrum des aufblühenden Nürnbergs der frühen Industrialisierung. Im nördlichen Teil von Sankt Leonhard wurde im Jahr 1843 der Nürnberger Kanalhafen feierlich eröffnet, parallel dazu wurden nur wenige Zeit später die Eisenbahnstrecken nach Bamberg und Würzburg fertiggestellt. Der Kanal verlor daraufhin rasch an Bedeutung, nach seinem Rückbau wurde auf der Trasse des ehemaligen Kanalbettes der Frankenschnellweg, Teil der Autobahnverbindung nach Erlangen, errichtet. In der Finkenstraße, welche die Südostgrenze des Untersuchungsareals darstellt, befand sich ursprünglich der Nürnberger Fäkalienverladebahnhof, von dem die Abwässer der Stadt, die mit Pferdewagen und später per LKW abgepumpt wurden, mit Zügen in das Nürnberger Umland transportiert wurden, um dort als Dünger verwendet zu werden. Das Areal diente später als Verladeplatz des städtischen Energieversorgers EWAG, jetzt N-Ergie, der vom angrenzenden Stadtteil Sündersbühl aus bereits zum Ende des neunzehnten Jahrhunderts Nürnberg mit Gas und Strom versorgte. Heute befinden sich in diesem Bereich Grün- und Freizeitanlagen.

Im Norden nahe des alten Kanalhafens befindet sich das ehemalige Schlachthofgelände. Auf Grund eines Beschlusses des Magistrats von 1869 musste das mittelalterliche Schlachthaus an den Rand der Stadt verlegt werden. Die Nähe zum Kanal und zur Eisenbahn führte zur Errichtung des Schlachthofes in Sankt Leonhard. Es handelte sich dabei um eine „Kombination aus dem bedeutendsten Viehmarkt Süddeutschlands und einer großen industriellen Schlachtfabrik auf einer Gesamtfläche von sieben Hektar“ (SIMON 1988, S. 246). Im Jahr 1992 wurde der Schlachthof auf Grund veralteter Technik und der starken Umweltbelastung außer Betrieb genommen und zurückgebaut. Auf dem Gebiet entsteht gegenwärtig die Neubausiedlung 'Am Leonhardspark' mit modernen Wohn- und Gemeinschaftsanlagen sowie Arztpraxen und Kindertagesstätten. Teil des Gebietes ist die 'Solarsiedlung Nürnberg', ein nach den Standards des modernen solaren Städtebaus entworfener Gebäudekomplex.

Das Zentrum des Untersuchungsgebietes, welches direkt westlich an die gründerzeitlichen Gebäudekomplexe anschließt, bildet eine großflächige Genossenschaftswohnsiedlung, entstanden in den 1950er und 1960er Jahren. Sie besteht aus weitgehend parallel angeordneten West-Ost-orientierten oder im rechten Winkel dazu angeordneten Häuserriegeln mit vier bis fünf Wohngeschossen des sozialen Wohnungsbaus (siehe Beispiel Abbildung 2.28) sowie einem Flachbaukomplex mit Sozial- und Bildungseinrichtungen. Den nördlichen Abschluss der Siedlung bilden ein neungeschossiger Hochhausriegel sowie ein sternförmiges Hochhaus.



*Abbildung 2.28:* Sanierte 1950er Jahre Siedlung mit Fotovoltaikanlage, Leopoldstraße.

Der Bereich zwischen der Westgrenze des Untersuchungsareals und der Genossenschafts-siedlung wird durch eine weitläufige Reihenhaussiedlung mit zwei- bis dreigeschossigen Gebäuden ausgefüllt. Der gesamte südliche, an die Bahntrasse grenzende Teil im Bereich der Geissestraße und Schwabacher Straße wird von Industrie- und großflächigen Gewerbebauten geprägt. Es handelt sich dabei vorwiegend um großdimensionierte Lager- und Produktionshallen sowie Verkaufsflächen, welche mit Flach- oder Pultdächern ausgeführt sind. Über Gebäude, die vor Ende des neunzehnten Jahrhunderts entstanden sind, kann anhand dieses Untersuchungsgebietes keine Aussage getroffen werden.

# Kapitel 3

## Potentialstudien

Die Eignung von Dachflächen zur Energieversorgung mit Solaranlagen wurde im Rahmen zahlreicher Potentialstudien in den vergangenen Jahren und Jahrzehnten untersucht. Sie gelangen teilweise zu sehr unterschiedlichen Ergebnissen, wie der Vergleich einiger Untersuchungen in Abbildung 3.1 veranschaulicht:

Abschätzungen für das technische Stromerzeugungspotenzial der Photovoltaik in Deutschland											
	System- wirkungsgrad	Dächer		Fassaden		Siedlungs-/ Verkehrsflächen		Freiflächen		Summe	
		Fläche	Stromertrag	Fläche	Stromertrag	Fläche	Stromertrag	Fläche	Stromertrag	Fläche	Stromertrag
<b>Kaltschmitt (1993)</b>	8 – 9 %	800 km <sup>2</sup>	98,1 TWh/a	/	/	/	/	3.518 km <sup>2</sup>	411,3 TWh/a	<b>4.318 km<sup>2</sup></b>	<b>509,4 TWh/a</b>
<b>Kaltschmitt (2002)</b>	5,4/5,7 % 1)	838 km <sup>2</sup>	45 TWh/a	200 km <sup>2</sup>	7 TWh/a	/	/	4.140 km <sup>2</sup>	263 TWh/a	<b>5.178 km<sup>2</sup></b>	<b>315 TWh/a</b>
	11,7/12,4 % 2)	838 km <sup>2</sup>	99 TWh/a	200 km <sup>2</sup>	14 TWh/a	/	/	4.140 km <sup>2</sup>	577 TWh/a	<b>5.178 km<sup>2</sup></b>	<b>690 TWh/a</b>
<b>Nitsch (1999)</b>	11,7 %	200 km <sup>2</sup> 3)	k.A.	150 km <sup>2</sup>	k.A.	350 km <sup>2</sup> 4)	k.A.	300 km <sup>2</sup> 5)	k.A.	<b>1.000 km<sup>2</sup></b>	<b>135 TWh/a</b>
<b>Quaschnig (2000)</b>	13,5 %	864 km <sup>2</sup> 6)	112,5 TWh/a	200 km <sup>2</sup>	20,7 TWh/a	39 km <sup>2</sup>	5,7 TWh/a	250 km <sup>2</sup>	36,5 TWh/a	<b>1.353 km<sup>2</sup></b>	<b>175,3 TWh/a</b>
<b>Lehmann (2002)</b>	16,0 %	986 km <sup>2</sup>	164,2 TWh/a	531 km <sup>2</sup>	44,4 TWh/a	/	/	/	/	<b>1.516 km<sup>2</sup></b>	<b>208,6 TWh/a</b>

1) amorphe Module mit 6,3 % Wirkungsgrad; Performance Ratio: 0,85 (Dach-, Fassadenflächen) bzw. 0,9 (Freiflächen)  
 2) monokristalline Module mit 13,8 % Wirkungsgrad; Performance Ratio: 0,85 (Dach-, Fassadenflächen) bzw. 0,9 (Freiflächen)  
 3) 25 % von 800 km<sup>2</sup>; 600 km<sup>2</sup> für Solarthermie  
 4) 50 % von 700 km<sup>2</sup>; 350 km<sup>2</sup> für Solarthermie  
 5) 45 % von 650 km<sup>2</sup>; 350 km<sup>2</sup> für Solarthermie  
 6) 66 % von 1.304 km<sup>2</sup>; 440 km<sup>2</sup> für Solarthermie

Abbildung 3.1: Vergleich unterschiedlicher Potentialstudien zum technischen Stromerzeugungspotenzial für Photovoltaik in Deutschland (BERNREUTER 2002)

Die Unterschiede ergeben sich auf Grund differenzierter Betrachtungen der Systemwirkungsgrade und der zu Grunde gelegten Flächenklassifikation. Die in der Abbildung dargestellte Studie von KALTSCHMITT U. WIESE (1993), die Untersuchung von QUASCHNING (2000) und die erst im Jahr 2007 erschienene Potentialstudie von Ecofys (EVERDING (2007) und WOUTERS (2007)) werden im folgenden Teil näher vorgestellt.

### 3.1 Kaltschmitt und Wiese

KALTSCHMITT U. WIESE (1993) ermittelten in ihrer 1993 erstmals vorgestellten und im Jahr 2002 überarbeiteten veröffentlichten Untersuchung das *theoretische* Potential für

die Nutzung von Dach- und Freiflächen zur aktiven Nutzung der Sonnenenergie mittels solarthermischen Kollektoren im Niedertemperaturbereich und Fotovoltaikanlagen. Systeme der konzentrierten Solarthermie, wie Parabolrinnen-Kollektoren aber auch die passive Solarenergienutzung über entsprechende Architekturkonzepte wurden nicht in Betracht gezogen.

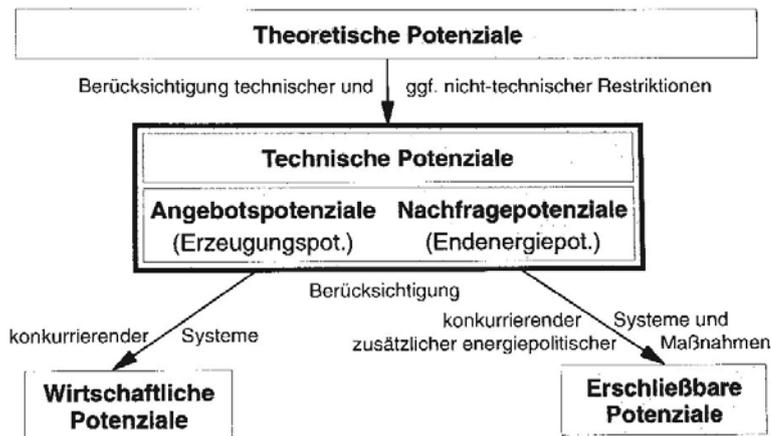


Abbildung 3.2: Abgrenzung des Potentialbegriffs nach (SCHNEIDER U. KALTSCHMITT 2005, S.21)

Neben dem *theoretischen Potential* werden das *technische*, das *wirtschaftliche* und das *erschließbare Potential* unterschieden.

Das *theoretische Potential* umfasst dabei alle theoretisch physisch nutzbaren Flächen. Diese Größe hat allerdings in der Realität nur geringe

Bedeutung, da die technische Umsetzung nicht berücksichtigt wird.

Diese ist Gegenstand des *technischen Potentials*. Es werden alle technischen Einschränkungen zur Umsetzung berücksichtigt. Da diese jedoch abhängig vom zu Grunde gelegten technischen Stand sind, lassen sich ermittelte technische Potentiale auf Grund der differenzierten Ausgangsgrößen verschiedener Studien nur schwer miteinander vergleichen. Das *wirtschaftliche Potential* untersucht, welcher Teil des technischen Potentials sich unter energiewirtschaftlichen Gesichtspunkten ökonomisch realisieren lässt. Dies ist stark abhängig von den Preisen der konkurrierenden fossilen, wie auch regenerativen Energieträger.

Die tatsächliche mögliche Umsetzung ist im *erschließbaren Potential* ausgedrückt. Es ist abhängig von Faktoren wie der Bereitstellungszeit der Systeme durch die Hersteller, welche stark von den Produktionskapazitäten und der Marktsituation abhängen. Auch Rahmenbedingungen wie staatliche Subventionsprogramme haben Einfluss darauf.

Basierend auf den theoretisch zur Verfügung stehenden Dach- und Freiflächen wurde das Potential unter Berücksichtigung der Kriterien Wohngebäude oder Nichtwohngebäude, Geschosshöhe sowie Schrägdach oder Flachdach, ermittelt. Dachflächen dürfen um nicht

mehr als  $45^\circ$  von der Südrichtung abweichen. Durch Subtraktion der durch Verschattung und Dachaufbauten oder durch Denkmalschutz betroffenen Flächen wurde die eigentliche potentielle Nutzfläche errechnet.

Laut dieser Studie wären bundesweit 16 % der Schräg- und 25 % der Flachdachflächen theoretisch nutzbar. Dies entspricht einer Gesamtfläche von ca.  $800 \text{ km}^2$  bezogen auf das gesamte Gebiet der Bundesrepublik Deutschland. Der Wirkungsgrad der Solarsysteme wurde mit 8 bis 9 % berücksichtigt, was dem Forschungsstand von 1993 etwa entspricht. Im Jahr 2002 wurde die Studie überarbeitet vorgestellt, in der Neuauflage wurde zusätzlich das Fassadenpotential berücksichtigt und die Wirkungsgrade der untersuchten Systeme mit 11 bis 12 % für monokristalline Solarzellen und etwa 6 % für amorphe Solarzellen angepasst.

Neben Dachflächen werden auch alle nutzbaren Freiflächen berücksichtigt. Dort sollen großdimensionierte Fotovoltaikkraftwerke oder thermische Sonnenkollektoren installiert werden. Für diese Nutzungsform errechnen KALTSCHMITT U. A. (2006) eine Fläche von  $4.140 \text{ km}^2$  in der BRD.

Das errechnete technische Potential berücksichtigt Dachflächen- und Nachfragepotentiale gemeinsam. Das Ergebnis ist ein Deckungsgrad von 5 % beim Endenergieeinsatz zur Wärmebedarfsdeckung im Jahr 1991 im gesamten Bundesgebiet. Für die Raumwärmeversorgung und Warmwasserbereitung liegt dieser bei 40 % für Ein- und Zweifamilienhäuser und bei 34 % für Mehrfamilienhäuser, insgesamt beträgt er 17 % im Bundesgebiet. Das technische Potential für solar erzeugten Strom übersteigt den Bedarf um 15 %, wenn alle theoretisch nutzbaren Flächen für die Stromerzeugung herangezogen würden.

## 3.2 Quaschning

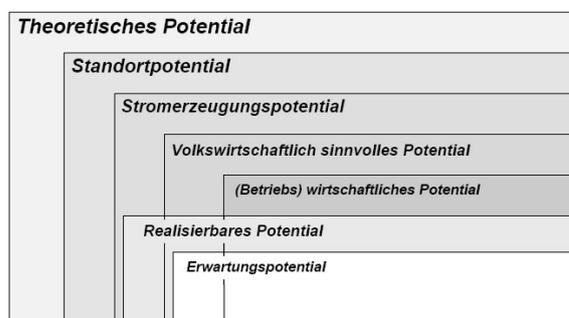


Abbildung 3.3: Abgrenzung des Potentialbegriffs nach QUASCHNING (2000, S.42)

Volker Quaschning veröffentlichte im Jahr 2000 seine Studie unter dem Titel „Systemtechnik einer klimaverträglichen Elektrizitätsversorgung in Deutschland für das 21. Jahrhundert“ (QUASCHNING 2000). Auch Quaschning unterscheidet wie KALTSCHMITT U. A. (2006) unterschiedliche Potentialbegriffe (siehe Abbildung 3.3).

Zum *theoretischen Potential* rechnet Quaschnig das gesamte physikalische Angebot in Form der durchschnittlichen solaren Strahlung (gemittelt aus den Werten von 80 Messstationen) und errechnet, dass unter Beanspruchung der gesamten Fläche der BRD ein Potential erzielt werden kann, das dem 94-fachen des Primärenergieverbrauchs von 1994 entspricht. Das *technische Potential* enthält beispielsweise die gesamte technisch nutzbare Fläche und die Wirkungsgrade der solartechnischen Systeme. Im *Standortpotential* werden nur die wirklich verfügbaren Flächen berücksichtigt. Daraus lässt sich über die Effizienz der Systeme das *Stromerzeugungspotential* errechnen. Der ökonomisch nutzbare Teil des technischen Potentials wird im *wirtschaftlichen Potential* ausgedrückt. Das *Erwartungspotential* beschreibt den Anteil, der tatsächlich realisiert werden kann.

Für die Ermittlung des Stromerzeugungspotentials werden Dachflächen, nicht genutzte landwirtschaftliche Freiflächen, Gebäudefassaden und Flächen entlang von Verkehrswegen, wie Autobahnen herangezogen. Hier werden wie bei KALTSCHMITT U. A. (2006) statistische Daten herangezogen. Bei den Wohngebäuden wird ein Verhältnis von Wohn- zu Dachfläche errechnet und draus die nutzbare Dachfläche ermittelt. Bei Nichtwohngebäuden wird von einem Flachdachanteil von 60 % ausgegangen. auf Grund von Verschattungen werden 40 % der Dachflächen als nicht geeignet befunden, die verbliebenen 60 % werden in zwei Klassen unterteilt: Klasse I enthält Schrägdächer mit maximalem Neigungswinkel von  $60^\circ$  und maximaler Abweichung  $45^\circ$  von der Südausrichtung. Des Weiteren werden 15 % Flachdächer in die Klassen I und II aufgeteilt. In Klasse II werden Dächer mit maximalen Abweichungen von  $90^\circ$  von der Südausrichtung und einem maximalen Neigungswinkel von  $60^\circ$  herangezogen. Die geringeren Einstrahlungswerte sollen dort durch Verwendung verschattungstoleranter Anlagen kompensiert werden. Aus den so ermittelten Flächen werden die in Abbildung 3.1 dargestellten Ergebnisse berechnet. Quaschnig geht von einem mittleren Systemwirkungsgrad von 13,5 % aus.

Als Ergebnis erhält man eine Fläche von  $863,5 \text{ km}^2$  im gesamten Bundesgebiet für Fotovoltaik auf Dachflächen. Die Berechnung des Fassadenpotentials ergibt weitere  $200 \text{ km}^2$  nutzbarer Fläche. Quaschnig schlägt des Weiteren  $250 \text{ km}^2$  Freilandfläche für die Nutzung durch Solaranlagen vor, was erheblich geringer als bei KALTSCHMITT U. A. (2006) ist. Dies begründet sich vor allem darin, dass die Studie die Freilandflächen vorwiegend zur Nutzung von Biomasseproduktion vorsieht.

### 3.3 Ecofys

Die Untersuchungsergebnisse des Beratungsbüros Ecofys hat EVERDING (HRSG) im Jahr 2007 veröffentlicht (EVERDING (2007) und WOUTERS (2007)). Während die

oben aufgeführten Studien keine Rücksicht auf die direkte bauliche Umsetzung und die harmonische Integration der Solarsysteme in den Gebäudebestand nehmen, geht die Ecofys-Studie einen Schritt weiter.

„Die Differenzierung des Gebäudebestandes in Stadtraumtypen ermöglicht eine weitergehende Potentialdefinition, welche die städtebaulichen Aspekte der Solarenergienutzung integriert und als solarurbanes Potential bezeichnet wird“ (WOUTERS 2007, S.273). Anhand von Prototypen wurden mögliche solarenergetische Sanierungskonzepte untersucht und teilweise auch realisiert. Dabei wurden sowohl die aktive Nutzung der Sonnenenergie über thermische Solarkollektoren und Fotovoltaik, als auch die passive Nutzung über entsprechende Fenster- und Beleuchtungskonzepte untersucht. Dazu wurden zwanzig unterschiedliche Stadtraumtypen, beginnend bei innerstädtischen Baublöcken der Gründerzeit bis hin zu Einfamilienhäusern der 1980er Jahre, aber auch Freizeitanlagen und Einkaufszentren, definiert und unter Berücksichtigung der Eigenverschattung, Ausrichtung und Nachbarbebauung auf zahlreiche Kriterien untersucht:

Die Abweichung der Flächenausrichtung von Süden darf wie bei KALTSCHMITT U. A. (2006) maximal  $45^\circ$  betragen. Die Verschattung wird im Gegensatz zu den oben genannten Studien nicht geschätzt, sondern anhand des Sonnenstandes am 21. Dezember um 12:00 Uhr simuliert. Die Eingriffsempfindlichkeit, also die Auswirkung der Solaranlage auf das äußere Erscheinungsbild des Gebäudes, wird anhand von Photoshop-Experimenten überprüft. Dies hatte zur Folge, dass die Fassadenflächen wesentlich schlechter für die solarenergetische Nutzung geeignet sind, als bisherige Potentialstudien ergaben.

Vielmehr sieht das Konzept vor, dass ausreichend Fensterfläche für die passive Nutzung der Solarenergie und trotzdem Flächen für die aktive Nutzung mit Solarthermie und Fotovoltaik verfügbar sind. Solarthermische Kollektoren werden gegenüber der Fotovoltaik bevorzugt, da diese weniger empfindlich auf Verschattung reagieren.

Bundesweit ermittelt die Ecofys-Studie ein solarurbanes Flächenpotential von  $1760 \text{ km}^2$  Dach- und  $584 \text{ km}^2$  Fassadenfläche. Freilandflächen wurden im Gegensatz zu KALTSCHMITT U. A. (2006) oder QUASCHNING (2000) nicht untersucht.

### 3.4 Diskussion der Untersuchungen

„Martin Kaltschmitt und Andreas Wiese haben die Basis aller bekannten Potentialstudien für die Solarenergienutzung in Deutschland gelegt, alle anderen Studien sind davon abgeleitet“ (WOUTERS 2007, S.236). Die Untersuchungen basieren häufig auf einer Vielzahl statistischer Daten. So werden durchschnittliche Gebäudegrundrissflächen, mittlere Dachneigung oder Stockwerkzahlen erhoben, teilweise geschätzt und mit diversen

Korrekturfaktoren verrechnet, um Dachaufbauten, Abschattungen oder Denkmalschutzkriterien zu berücksichtigen. Die ermittelten theoretischen und technischen Potentiale haben hinsichtlich der tatsächlichen praktischen Umsetzung kaum eine Bedeutung.

Die 2007 veröffentlichte Ecofys-Studie berücksichtigt auch das nutzbare Potential bezogen auf unterschiedliche Baustile und Architekturkonzepte. Es werden im Gegensatz zu vorangegangenen Erhebungen auch die mit der Umsetzung der Konzepte verbundenen optischen Eingriffe in das Erscheinungsbild eines Gebäudes berücksichtigt.

Die in den Potentialstudien zu Grunde gelegten Kriterien können, mit modernen Messverfahren kombiniert, zu wesentlich realistischeren Ergebnissen in höherer Auflösung kommen. Das im Rahmen dieser Untersuchung verwendete Verfahren soll einen Ansatz darstellen, zukünftige Potentialstudien zu einem präziseren Werkzeug der Energieplanung zu formen.

## Kapitel 4

# Ausgangsdaten und verwendete Software

Die Untersuchung soll mit Geobasisdaten durchgeführt werden, die Städten und Kommunen bereits zur Verfügung stehen oder die zeitnah verfügbar sein werden. Dazu gehören Gebäudegrundrissdaten, aber auch Luftbilder und dreidimensionale Stadtmodelle. Da jedoch für das Stadtgebiet von Nürnberg kein solches digitales Stadtmodell verfügbar ist, soll es aus den verfügbaren Laserscannerdaten erstellt werden.

### 4.1 Digitale Stadtgrundkarte (DSGK)

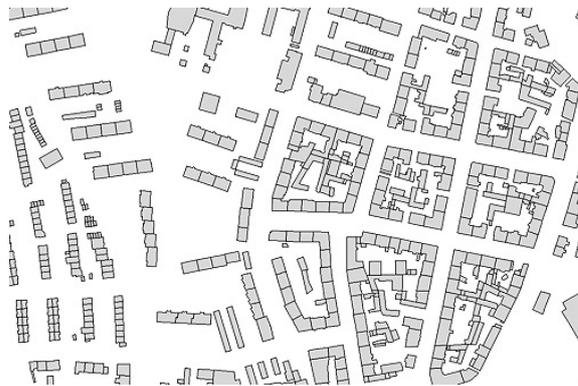


Abbildung 4.1: Ausschnitt aus der digitalen Stadtgrundkarte

Die digitale Stadtgrundkarte der Stadt Nürnberg (DSGK) liegt im Maßstab 1:1.000 vor. Sie enthält alle Liegenschaften mit Flurstücksgrenzen, Flurstücksnummern, Gebäuden aber auch Nutzungsartengrenzen sowie Verwaltungs- und Verfahrensgrenzen, aber auch die Topographie. Die DSGK basiert auf digitalisierten Katasterdaten des Vermessungsamtes Nürnberg sowie des Amtes für Geoinformation und Bodenordnung. Sie ist in dieser Form

seit 1998 verfügbar und vereinigt die bis dahin analog geführten Kartenwerke, in einem Datenbestand (SEIDLER 2004).

Aus der DSGK werden die Gebäudegrundrissdaten für die Gebäudeerkennung benötigt. Diese wurden vom Umweltamt Nürnberg in Form eines Polygondatensatzes,

ausschnittsweise dargestellt in Abbildung 4.1, in der Gauß-Krüger-Projektion mit sechsstelligen Koordinaten zur Verfügung gestellt.

## 4.2 Flugzeug-gestütztes Laserscanning (LIDAR)

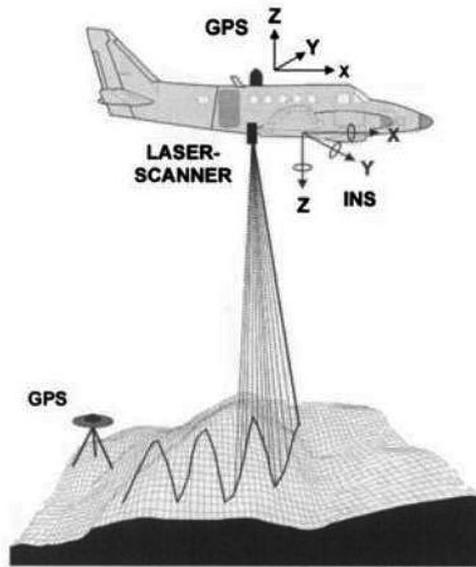


Abbildung 4.2: „Abtastender Laser im Flugzeug“ (KRAUS 2004, S.450)

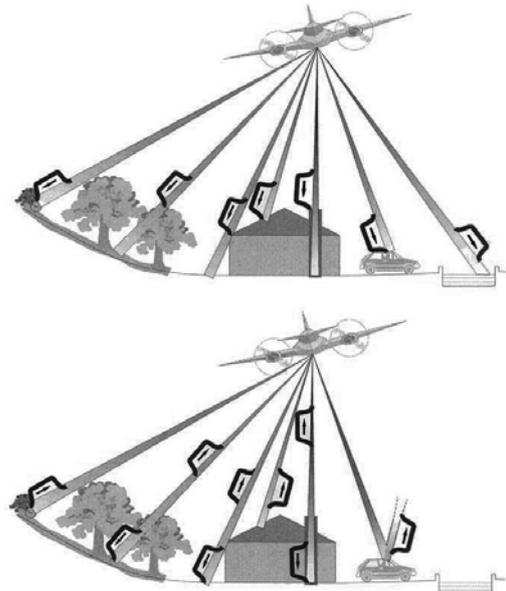


Abbildung 4.3: „Erstes (oben) und letztes (unten) Echo an unterschiedlichen Objekten sowie Spiegelung und zu große Absorption“ (KRAUS 2004, S.452)

Das flugzeug-gestützte Laserscanning hat die Erstellung Digitaler Geländemodelle (DGM) deutlich erleichtert. Bei diesem Verfahren wird die Geländeoberfläche mit einem an der Unterseite eines Flugzeuges angebrachten Laserscanners abgetastet. Das Prinzip ist in den Abbildungen 4.2 und 4.3 dargestellt. Es wird als *light detection and ranging* (LIDAR) bezeichnet und wird unter anderem von KRAUS (2004) detailliert erläutert.

Das am Flugzeug angebrachte Laserscanmodul sendet eine Abfolge gerichteter Lichtimpulse zur Geländeoberfläche und empfängt die reflektierten Impulse wieder. Die Position des Flugzeuges wird über GPS und eine inertialen Messeinrichtung (IMU oder INS) permanent bestimmt. Die Puls-Signale, welche zuerst am Boden oder auf Bodenobjekten auftreffen, bezeichnet man als *first pulse* (FP), verdeutlicht am Beispiel des oberen Bildes in Abbildung 4.3. Während die reflektierten FP-Signale bereits wieder beim Scanner registriert werden, treffen die letzten Impulse auf tiefer gelegene Objekte, sie durchdringen beispielsweise Baumkronen bis zur eigentlichen Bodenoberfläche, dargestellt am Beispiel des unteren Bildes in Abbildung 4.3. Diese Signale bezeichnet man als *last pulse* (LP). Trifft ein Impuls auf eine stark reflektierende Fläche, wie bei Fahrzeugen oder großen Glasflächen, wird er möglicherweise an einer anderen Oberfläche diffus reflektiert

und wieder empfangen. Die Vegetation absorbiert Teile der Laserimpulse oder reflektiert sie diffus, auch Wasseroberflächen absorbieren die Signale teilweise so stark, dass eine Messung der reflektierten Impulse nicht möglich ist. Die Absorption ist dabei stark vom Einfallswinkel des Impulses abhängig, am stärksten ist sie, wenn der Laserstrahl im rechten Winkel auf die Wasseroberfläche trifft. Aus der Laufzeit der Impulse, die zum Scanner zurückgestrahlt werden, der Position des Flugzeuges über dem Boden und der Flughöhe, lässt sich die Position der gemessenen Oberflächenhöhenpunkte rekonstruieren. Diese liegen nicht zwangsläufig auf der Bodenoberfläche, sondern auf der Oberfläche aller Objekte, wie Bäumen, Gebäuden oder Fahrzeugen.

FP-Signale enthalten Höheninformationen von Gebäuden, der Vegetation, von Fahrzeugen, in seltenen Fällen auch von Vögeln oder anderen Objekten in der Luft. Aus diesen Daten kann durch *Triangulation*, durch Vermaschung der Messpunkte zu einem Dreiecksnetz, ein digitales Oberflächenmodell (DOM) erstellt werden. So lässt sich beispielsweise in einem Waldgebiet ein grobes Oberflächenmodell der Baumkronen generieren.

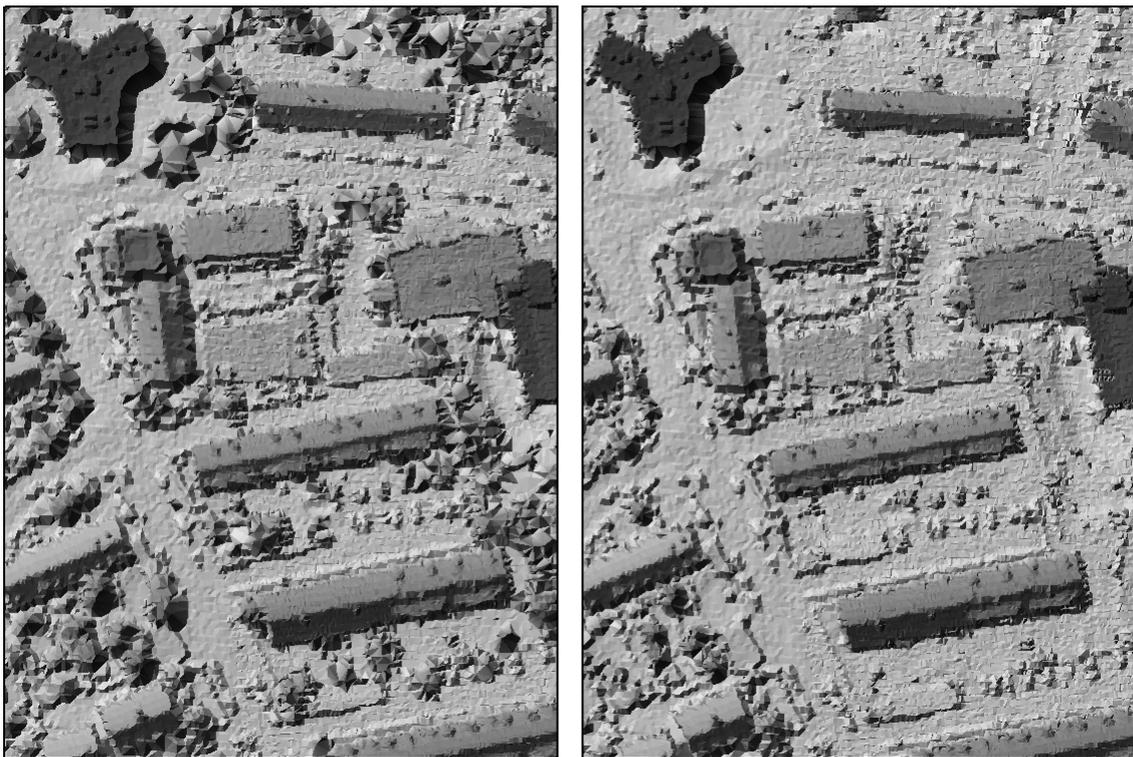


Abbildung 4.4: Vergleich zwischen DOM aus First-Pulse und Last-Pulse Daten

Die LP-Signale repräsentieren im unbebauten Gelände die Bodenoberfläche und die Oberfläche nicht durchdringbarer Objekte, beispielsweise von Fahrzeugen. Daraus kann ein digitales Geländemodell (DGM) erstellt werden. In bebauten Geländebereichen kann LIDAR nur auf Basis der Erstellung eines DGMs dienen. Über verschiedene Berechnungs-

algorithmen<sup>1</sup> können Gebäude, Vegetation und andere nicht vom Laser durchdringbare Objekte aus der Oberfläche extrahiert werden. Abbildung 4.4 veranschaulicht den Unterschied zwischen einem DOM aus FP- (links) und LP-Signalen (rechts). Sie treten insbesondere in der Ausprägung der Vegetation zu Tage.

Verglichen mit der Stereophotogrammetrie, bei der die dreidimensionalen Objekte über mindestens zwei Aufnahmen aus verschiedenen Perspektiven rekonstruiert werden, genügt beim flugzeug-gestützten Laserscanning eine einzige Aufnahme. „Die Punktedichte liegt bei bis zu 4 Punkten pro  $m^2$  mit einer Höhengenaugigkeit von 0,1 m. Mehrfachreflexionen der Lichtimpulse ('first pulse' und 'last pulse') lassen eine Klassifizierung der Punktwolke in Bodenpunkte sowie Höhenpunkte (Vegetation und Gebäude) zu. Diese Laserscandaten erlauben erstmals kleinräumige Analysen (z.B. Bestimmung der Dachneigung) über große Untersuchungsbereiche (z.B. das gesamte Bundesgebiet).“ (KLÄRLE U. LUDWIG 2005, S.16)

Die Auflösungen des LIDAR übertreffen die der Stereophotogrammetrie erheblich, so dass diese insbesondere in „bewaldeten und in bebauten Gebieten zur Ableitung von Geländemodellen überlegen“ (KRAUS 2005, S.389) ist.

Die LIDAR-Daten wurden vom Bayerischen Landesamt für Vermessung und Geoinformation (LVG) in München in Form jeweils einer FP- und LP-Szene sowie einem DGM mit einer Gitterweite von 1 m zur Verfügung gestellt. Die Informationen liegen im Rohdatenformat als Text-Dateien in Form von Punktwolken als Höhenkoordinaten (z) über einer Fläche (x,y) vor. Das folgende Beispiel repräsentiert vier Punkte:

```
4430394.17 5477690.49 321.682 0
4430363.30 5477783.55 321.131 0
4430363.77 5477783.37 321.141 0
4430363.03 5477785.32 321.191 0
```

Eine Zeile entspricht dabei einem Punkt, die ersten beiden Zahlen repräsentieren jeweils siebenstellige Gauß-Krüger-Koordinaten, die dritte Zahl beschreibt die Höhe des Punktes über NN, die vierte Zahl kann ein weiteres Attribut des Punktes darstellen, beispielsweise die Kennzeichnung als Gebäude, Baum oder Gewässer. Die Punktwolken enthalten für das Untersuchungsgebiet etwa 1,3 Millionen FP-Punkte und 1,4 Millionen LP-Punkte. Das DGM enthält etwa 1,1 Millionen gleichmäßig verteilte Gitterpunkte.

Da in diesem Format jeder (x,y)-Koordinate nur ein (z)-Wert zugewiesen werden

---

<sup>1</sup>Siehe VÖGTLE U. A. (2005): Digitale Geländemodelle

kann, ist es nicht möglich, bestimmte räumliche Aspekte in den daraus generierten Oberflächenmodellen zu erfassen. Dies sind beispielsweise Morphologien von Steilküsten oder Dachüberstände.

Laserscanning ist als aktives Messverfahren zur Oberflächendetektierung im Gegensatz zur Photogrammetrie nicht von der Sonneneinstrahlung abhängig. Dies ermöglicht es, die Befliegung der zu erfassenden Bereiche auch bei Dunkelheit durchzuführen.

Flugzeug-gestützte Laserscan-Daten werden in naher Zukunft für das gesamte Bundesgebiet in hoher Auflösung zur Verfügung stehen (KLÄRLE U. LUDWIG 2005).

### 4.3 Luftbilder



Abbildung 4.5: Ausschnitt aus dem Luftbild von 2006

Die Aerophotogrammetrie ist eine Teildisziplin der Fernerkundung und dient der Erfassung von Objekten und ihrer Verortung im Raum mittels von Flugzeugen oder Hubschraubern aus aufgenommener Fotos in analoger oder digitaler Form. Diese werden in Streifen aufgenommen, welche sich gegenseitig überlappen. Als Orthofoto können diese Bilder anschließend in einem Geographischen Informationssystem (siehe Kapitel 4.5.1) zu Vermessungs- und

Kartographiezwecken verwendet werden, sofern sie im Lot zur Erdoberfläche fotografiert und die bei der Zentralprojektion durch die Kamera, die Erdkrümmung und die Unterschiede der Geländehöhe verursachten Verzerrungen durch Georeferenzierung korrigiert worden sind.

Es liegen Echtfarben-RGB-Orthofotos in unterschiedlicher Qualität und Auflösung aus drei Befliegungen in der Gauß-Krüger-Projektion mit sechsstelligen Koordinaten vor. Die Luftaufnahme aus dem Jahr 2002 besteht aus zwei benachbarten Kacheln mit einer jeweiligen Auflösung von 6.325 x 6.325 Pixeln. Die Aufnahme aus dem Jahr 2005 besteht gleichfalls aus zwei benachbarten quadratischen Kacheln mit einer Auflösung von 5.870 Pixeln.

Der Luftbildsatz aus dem Jahr 2006 besteht durch hohe Auflösung. Die 13 Kacheln, welche das Untersuchungsgebiet abbilden, sind jeweils 5.000 x 5.000 Pixel groß. Abbildung

4.5 stellt einen kleinen Ausschnitt dieser Szene dar. Die Luftaufnahmen wurden im \*.tif-Format vom Umweltamt Nürnberg zur Verfügung gestellt.

#### 4.4 Strahlungswinkel

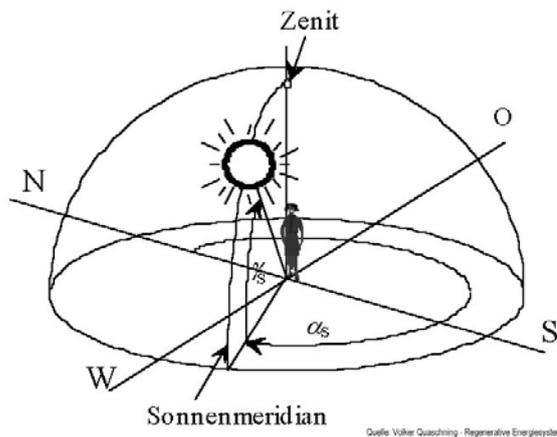


Abbildung 4.6: Winkelbezeichnungen des Sonnenstandes

Essenziell für die Simulation der Verschattung und der späteren Klassifikation der geeigneten Flächen ist die genaue Kenntnis des Sonnenstandes für den zu untersuchenden Standort zu jeder beliebigen Zeit. Dieser ist, wie in Abbildung 4.6 dargestellt, durch die Sonnenhöhe  $\gamma_S$  und das Sonnenazimut  $\alpha_S$  bestimmt. „Die Sonnenhöhe ist nach DIN 5034 als der Winkel zwischen dem Sonnenmittelpunkt und dem Horizont, vom Betrachter aus beobachtet, definiert. Das Sonnenazimut beschreibt den Winkel zwischen der geographischen Nordrichtung und dem Vertikalkreis durch den Sonnenmittelpunkt“ (QUASCHNING 2006, S.59). Für die Berechnung von Sonnenazimut und Sonnenhöhe wird die geographische Position des Betrachters sowie das Datum und die Uhrzeit zu Grunde gelegt.

Für die im Rahmen dieser Untersuchung durchgeführte Beleuchtungssimulation (siehe Kapitel 5.3.1) werden die benötigten Werte für die Sonnenhöhe und das Sonnenazimut für das gesamte Jahr 2007 mit Hilfe der Software SUNSET (siehe Kapitel 4.5.3) nach dem DIN 5034-Algorithmus berechnet. Um sowohl den Tages- als auch den Jahresgang der Sonnenstrahlung erfassen zu können, werden die Strahlungsparameter für jeweils einen Tag jedes Monats am Vormittag um 9:00 Uhr, am Mittag um 12:00 Uhr und am Nachmittag um 15:00 Uhr für den Standort Nürnberg (11,04° Länge, 49,27° Breite) berechnet<sup>2</sup>.

<sup>2</sup>Mit SUNSET nach DIN 5034 berechnete Werte siehe Anhang

## 4.5 Verwendete Software

### 4.5.1 ESRI ArcGIS 9.2

Die Untersuchung wird mit Hilfe eines *geographischen Informationssystems* oder *Geoinformationssystems* (Kurzform: *GIS*) durchgeführt. Unter einem GIS versteht man „ein rechnergestütztes Informationssystem, das aus Hardware, Software, Daten und den Anwendungen besteht. Mit ihm können raumbezogene Daten digital erfasst und redigiert, gespeichert und reorganisiert, modelliert und analysiert sowie alphanumerisch und graphisch präsentiert werden“ (BILL U. FRITSCH 1994, S.). In einem GIS können Daten in unterschiedlicher Form eingegeben werden. Dies können ASCII-Daten, GPS-Punkte, digitalisierte Karten aber auch Scannerdaten sein. Sie werden als Vektor- oder Rasterdaten aber auch als Grafiken oder in Form von Tabellen in Datenbanken gespeichert und verwaltet. Sie bilden die Basis für die weitere Be- und Verarbeitung in Form von Abfragen oder Umwandlungen, deren Ergebnisse auf Bildschirmen, als Dateien, in Form von Karten oder in anderen Formaten visualisiert werden können.

Für diese Arbeit wird als Geographisches Informationssystem das Softwarepaket *ArcGIS* in der Version 9.2 von ESRI eingesetzt. Mittels der darin enthaltenen Programme *ArcMap*, *ArcCatalog* und *ArcScene* kann ein Großteil der Operationen durchgeführt werden.

Zur Verarbeitung der verwendeten Laserscannerdaten kommt die Erweiterung dieses Softwarepaketes *3D-Analyst* von ESRI zum Einsatz. Sie ermöglicht vielfältige Operationen und Visualisierungen dreidimensionaler Geodaten. Für die Simulation der Beleuchtung wird das Erweiterungsprogramm *Spatial Analyst* verwendet.

### 4.5.2 MICROSOFT OFFICE Access 2007

Um die Rohdaten des Laserscans im GIS verarbeiten zu können, müssen sie zunächst aufbereitet werden. Dazu werden die Textdateien mit der Datenbanksoftware *Access 2007* von MICROSOFT eingelesen und als einzelne Datensätze in Tabellen einer Access2000-Datenbank *mdb-Format* abgelegt.

Dieses Datenformat ist zu *ArcGIS* kompatibel und ermöglicht einen unkomplizierten Datenaustausch zwischen den unterschiedlichen Programmen. Die einfache Umwandlung mit einem Texteditor oder einem Tabellenkalkulationsprogramm war auf Grund der enormen Datenmenge (mehrere Millionen Datensätze) nicht möglich.

### 4.5.3 SUNSET

Um die Berechnung der Einstrahlungsparameter der Sonnenstrahlung zu vereinfachen, hat das Labor für Physik und Solartechnik der Fachhochschule Osnabrück ein Programm entworfen, welches als Makro unter MICROSOFT OFFICE Excel zur Anwendung kommt. Über eine simple Benutzeroberfläche (siehe Abbildung 4.7) werden das Datum, die Uhrzeit sowie die Orientierung und Neigung einer Fläche eingegeben. Der Ort kann entweder aus der Datenbank des Programmes entnommen werden oder über Ortskoordinaten in Längen- und Breitengrad frei eingegeben werden.

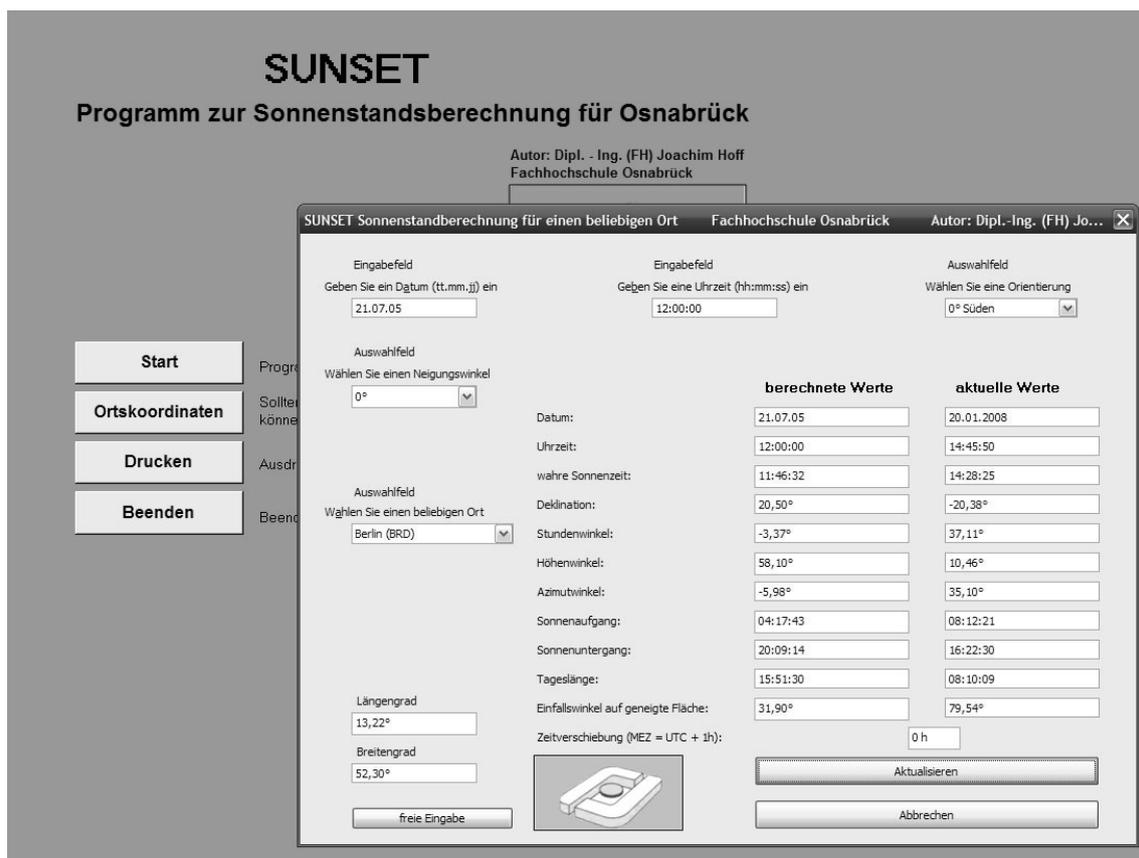


Abbildung 4.7: Benutzeroberfläche von Sunset

Die Software arbeitet nach dem Algorithmus der DIN 5034<sup>3</sup>. SUNSET berechnet für den angegebenen Ort die wahre Sonnenzeit, Deklination, Stundenwinkel, Höhenwinkel, Azimutwinkel, Sonnenauf- und Sonnenuntergang, die Tageslänge und den Einfallswinkel auf die geneigte Fläche.

### 4.5.4 @Last Software SketchUp 6 Pro

Sketchup 6 Pro von @Last Software ist eine Software zur dreidimensionalen Modellierung von Gebäuden oder Gegenständen. Sie wurde unter anderem entwickelt, um Gebäude

<sup>3</sup>DIN 5034: „Tageslicht in Innenräumen“, 3 Teile, Beuth Verlag 1999, Berechnungsverfahren siehe Abbildung B im Anhang

für Google Earth zu gestalten und mit fotorealistischen Texturen zu versehen. Über ein Plugin für ArcGIS 9.2 können Daten, wie Polygon-Dateien oder digitale Geländemodelle zwischen Sketchup und ArcGIS einfach ausgetauscht werden.

Mit Sketchup können fotorealistische 3D-Gebäudemodelle erstellt werden, welche frei skaliert, betrachtet und sogar durchlaufen werden können, da auch Innenarchitektur erstellt werden kann. Daneben ist die Modellierung ganzer Landschaften möglich sowie die dreidimensionale Visualisierung geometrischer Daten, beispielsweise Rauminformationen aus einem GIS. Sketchup wird im Rahmen dieser Arbeit verwendet, um dreidimensionale Blockmodelle von Gebäuden aus im GIS erstellten Polygonsätzen zu erstellen und die Verschattung zu bestimmten Tages- und Jahreszeiten realistisch simulieren zu können.

# Kapitel 5

## Eignungsklassifikation

Das Klassifikationsschema orientiert sich an bereits durchgeführten Potentialstudien. Beispielsweise definieren KALTSCHMITT U. A. (2006) die Nutzfläche für solarenergetische Nutzung wie folgt: „Die auf Dächern installierbaren Modulflächen leiten sich aus dem Gebäudebestand, der durchschnittlichen Dachfläche, der Dachform und -neigung sowie unter Berücksichtigung der bautechnischen (z. B. Kamine, Dachfenster) und solartechnischen Restriktionen (z. B. Abschattungseffekte, Sicherheitsabstände) ab“ (KALTSCHMITT U. A. 2006, S.271). Die durchgeführte Klassifikation basiert daher auf den über die Gebäudegrundrisse extrahierten Dachflächengrößen, deren Neigung und Exposition sowie deren Verschattung durch Vegetation, andere Gebäude oder Dachaufbauten. Die Realisierung nachgeführter Systeme (schwenkbare Absorber) wird im Rahmen der Untersuchung ausgeschlossen. Die Betrachtung erfolgt für aufgeständerte bzw. direkt auf oder in der Dachhaut montierte Absorber.

### 5.1 Arbeitsschritte

Die in Kapitel 3 vorgestellten Potentialstudien basieren auf statistischen Daten, die in einem Klassifikationsverfahren hinsichtlich ihrer Eignung für Solarenergienutzung eingestuft werden. Im Rahmen dieser Arbeit soll stattdessen ein GIS-basiertes Untersuchungsverfahren mit hochauflösenden Geländeinformationen und einer Beleuchtungssimulation die Ableitung von Aussagen für Einzelgebäude mit höherer Genauigkeit ermöglichen. Die Analyse erfolgt in mehreren Stufen, dargestellt in Abbildung 5.1. Nach Aufbereitung der Laserscannerdaten werden die Beleuchtungsverhältnisse in einem zweistufigen Verfahren simuliert. Anschließend erfolgt die Berechnung von Neigung und Exposition. Die Ergebnisse bilden die Grundlage der eigentlichen Eignungsklassifikation. Aus den klassifizierten Flächen werden abschließend noch für Fotovoltaik nutzbare Dächer extrahiert.

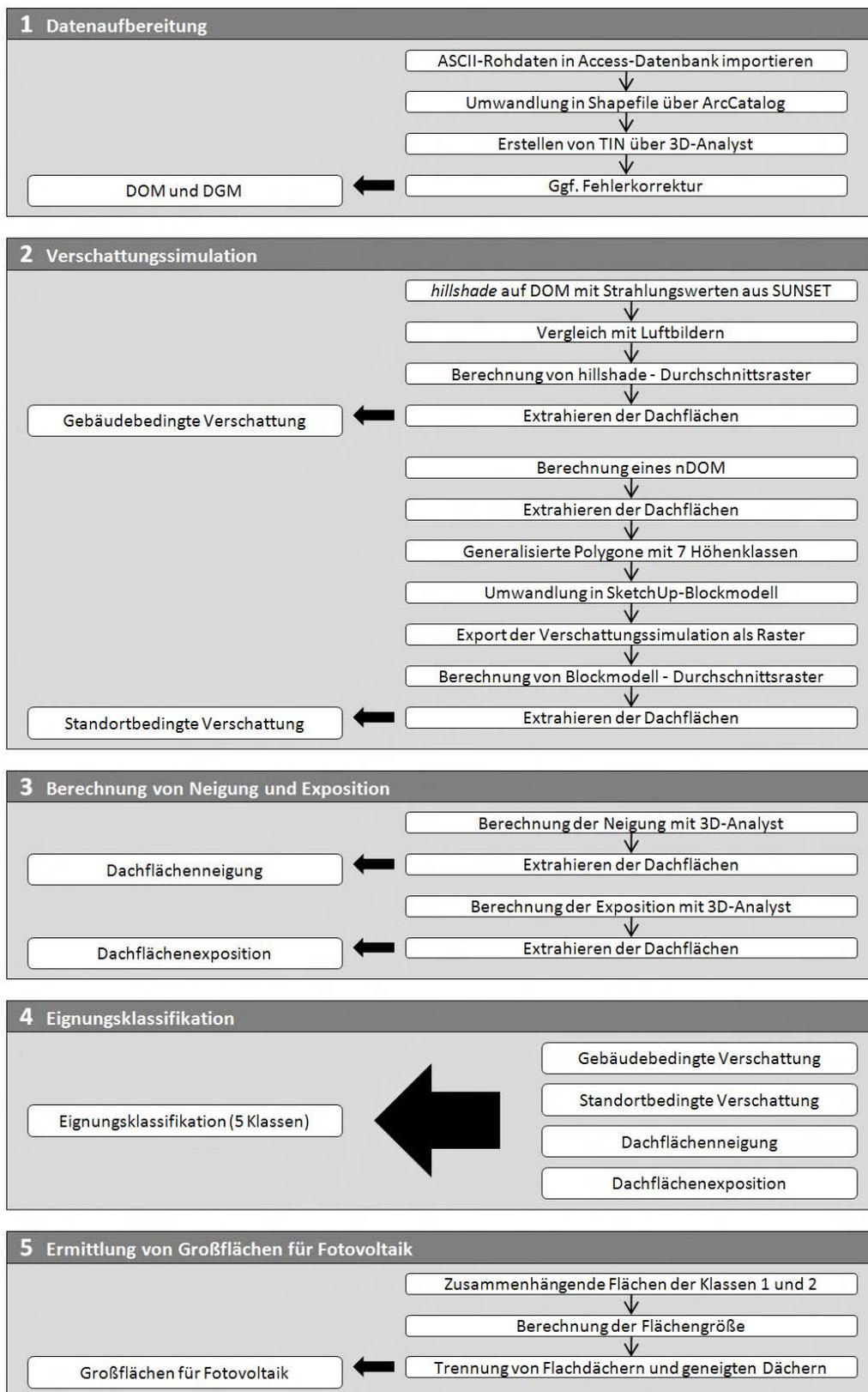


Abbildung 5.1: Durchgeführte Arbeitsschritte

## 5.2 Aufbereitung der LIDAR-Daten

Die Laserscanning-Daten liegen als *first-pulse* (FP) und *last-pulse* (LP) Szenen sowie als DGM in Form von Höhenpunkten im ASCII-Format vor. Für die weitere Verarbeitung werden sie in das ArcGIS-Vektorformat *shapefile* überführt. In diesem Format können Punkte, Linien oder Polygone repräsentiert und zur Visualisierung frei skaliert werden, die Auflösung ist theoretisch unbegrenzt. Für den Import mit ArcCatalog müssen die Punkte entweder in Form von kommagetrennten Werten  $x,y,z$  oder abgelegt in Spalten einer Tabelle oder Datenbank vorliegen. ArcCatalog ermöglicht die Migration von Daten aus einer MICROSOFT *Access2000-Datenbank* im *\*.mdb* oder *dBase-Format \*.dbf*. Um dieses Format herzustellen, werden die ASCII-Dateien in Access eingelesen und jeweils in einer Tabelle einer gemeinsamen Datenbank gespeichert. Dabei sind Datenbankfeldern entsprechende Datentypen zuzuweisen, damit die Datensätze beim Import von ArcCatalog als Zahlen erkannt werden.

Über den Befehl *'Create Feature Class From XY-Table'* werden die Daten in ArcCatalog unter Zuweisung der entsprechenden Projektion (Gauß-Krüger) geographisch verortet, indem der Rechts- und Hochwert den X- und Y-Koordinaten und die Höhe den Z-Koordinaten zugeordnet werden. Das *shapefile* enthält nach diesem Schritt alle Oberflächenpunkte als ungeordnete Punktwolke. Eine Triangulation ermöglicht die Generierung dreidimensionaler Oberflächen, indem ein *Triangulated Irregular Network* (TIN) über den 3D-Analyst mit der Funktion *'Create TIN from Features...'* erzeugt wird. Jeder Punkt bildet dabei mit seinen Nachbarpunkten ein Netzwerk aus Dreiecksflächen. Durch Interpolation kann jeder beliebige Punkt zwischen den einzelnen Oberflächenpunkten berechnet werden. Die visuelle Überprüfung der TINs zeigt bei den FP und LP-Oberflächen starke punktuelle Abweichungen der Höhenpunkte. Es handelt sich um Abweichungen von mindestens 200 Höhenmetern gegenüber der übrigen Geländeoberfläche bei 900 der 1.305.190 Punkte des FP-Datensatzes sowie bei 904 der 1.412.009 Punkte des LP-Datensatzes. Die Abweichungen konzentrieren sich auf eine wenige hundert Quadratmeter große Fläche im Südwestteil des Untersuchungsgebietes (siehe Abbildung 5.2).

Die Ursache der Fehler ist nicht bekannt. Verursacher derartiger Abweichungen sind beispielsweise größere Objekte in der Luft, wie Vogelschwärme. Auf Grund der hohen räumlichen Auflösung der Datensätze werden alle Messpunkte, deren Geländehöhe 500 m über NN übersteigt, aus den Datenbanken entfernt und die Datensätze erneut in *shapefiles* umgewandelt und trianguliert. Die Qualität der so korrigierten TIN-Oberflächen wird durch die vorgenommene Fehlerkorrektur nicht relevant beeinträchtigt (siehe Abbildung 5.2). Voraussetzung für die Verwendung der TINs in Kombination mit den Luftbildern oder den Gebäudegrundrissdaten ist eine gemeinsame Projektion. In ArcCatalog werden die korrigierten TINs aus diesem Grund in das 6-stellige Gauß-Krüger-System konvertiert und im weiteren Verlauf wie folgt abgekürzt:

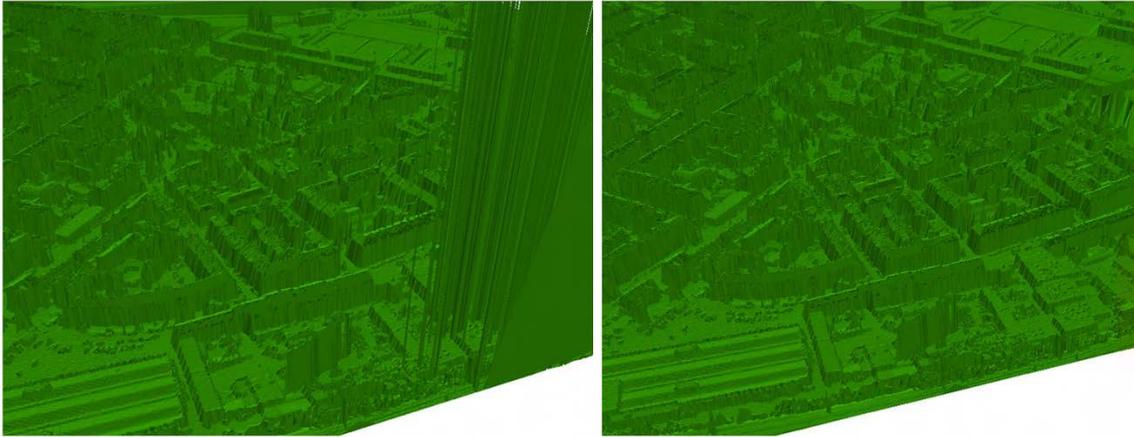


Abbildung 5.2: Visualisierung der abweichenden Z-Werte im TIN aus FP-Signal (links) und nach Entfernen und erneuter Triangulation (rechts)

- Korrigiertes *first-pulse*-TIN im sechsstelligen Gauß-Krüger-Format: FPL6K
- Korrigiertes *last-pulse*-TIN im sechsstelligen Gauß-Krüger-Format: LPL6K
- Digitales Geländemodell im sechsstelligen Gauß-Krüger-Format: DGM6

Abbildung 5.3 zeigt am Beispiel des FPL6K-TINs im Vergleich mit den hochaufgelösten Orthofotos, dass neben der Vegetation auch kleinräumige Strukturen, wie Dachaufbauten und Erker in den so erzeugten digitalen Oberflächenmodellen (DOM) detailreich erfasst sind, so dass sie für die Simulation der Schattenverhältnisse berücksichtigt werden können.

### 5.3 Beleuchtungs- und Verschattungssimulation

Benachbarte Gebäude oder Vegetation beeinträchtigen durch ihren Schattenfall auf die Absorberflächen den Wirkungsgrad einer Solaranlage erheblich. Dies betrifft vor allem Fotovoltaikmodule (siehe Kapitel 2.4.3). Bisher wurde bei der Untersuchung des Potentials der Solarenergie die Verschattung auf Grund des hohen Aufwandes nur in geringem Umfang berücksichtigt. Im Rahmen der deutschlandweiten Studien von KALTSCHMITT U. WIESE (1993) oder QUASCHNING (2000) (siehe Kapitel 3) wurde die Verschattung über Korrekturfaktoren eingerechnet, die Ecofys-Studie (EVERDING (2007) / WOUTERS (2007)) berücksichtigt die Verschattung am 21.12. um 12:00 Uhr. Auf Grund ihrer Bedeutung für den optimalen Betrieb von Solaranlagen, soll die Verschattung im Rahmen dieser Arbeit eine erhebliche Rolle spielen. Deshalb erfolgt für das Jahr 2007, jeweils am 21. Tag jedes Monats um 9:00 Uhr, 12:00 Uhr und 15:00 Uhr eine Untersuchung der gebäudebedingten sowie der standortbedingten Verschattung.

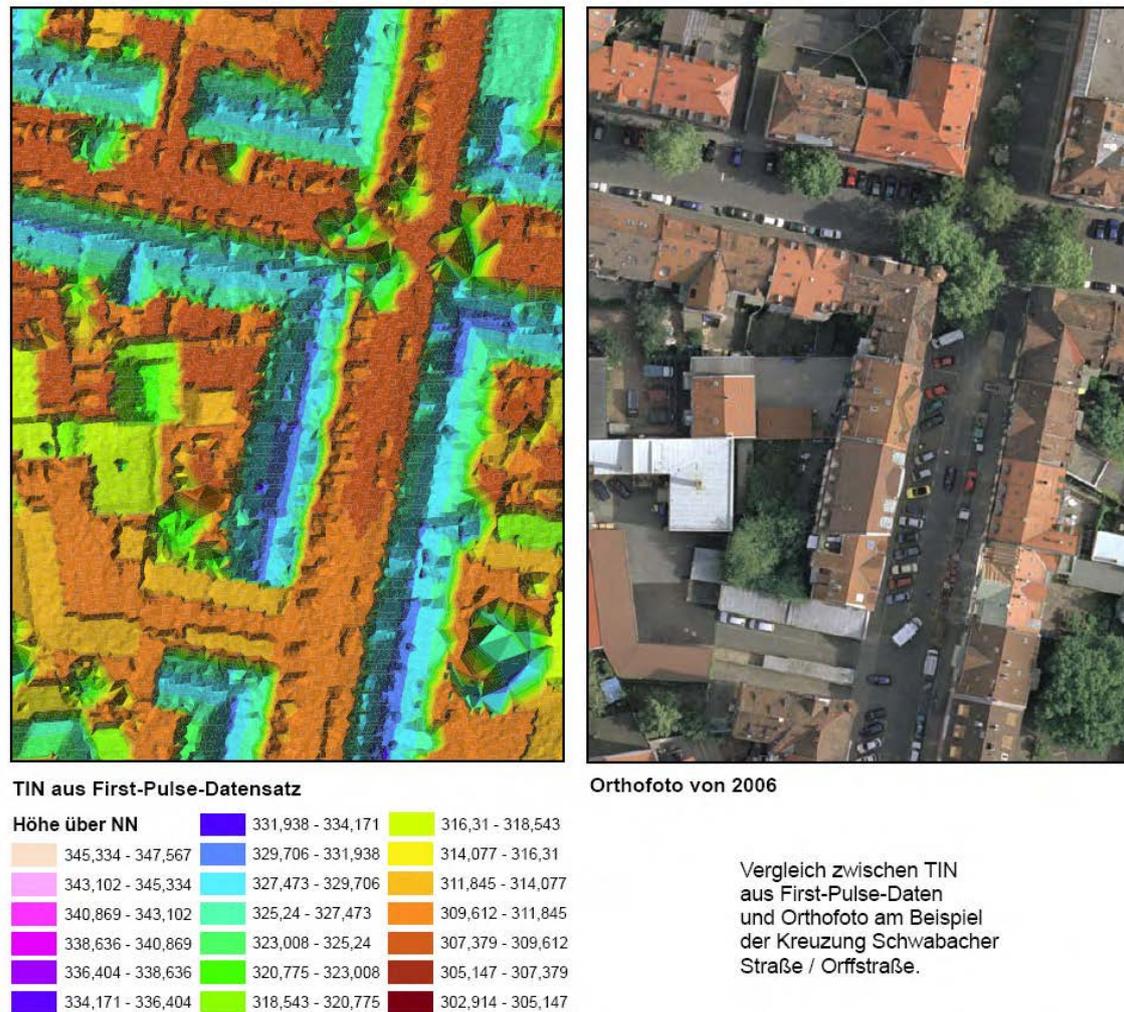


Abbildung 5.3: Vergleich zwischen TIN und Orthofoto.

### 5.3.1 Gebäudebedingte Verschattung

Für die Simulation der gebäudebedingten Verschattung kommt die *hillshade*-Funktion von 3D-Analyst zur Anwendung. Sie ermöglicht die Visualisierung hypothetischer Beleuchtungsszenarien auf einer TIN-Oberfläche unter Berücksichtigung der frei wählbaren Strahlungsparameter Sonnenhöhe  $\gamma_S$  und Sonnenazimut  $\alpha_S$ . Dieses Verfahren wurde ursprünglich konzipiert, um Oberflächenschummerungen zu erzeugen, so dass eine Landschaft beispielsweise plastischer wirkt. Dabei kann ein Schatten erzeugt werden.

Die Ausgabe erfolgt in einem Raster, dessen Pixel Werte zwischen 0 (unbeleuchtet) und 255 (maximal beleuchtet) enthalten. Die Durchführung von *hillshade* auf die FPL6K- oder LPL6K-Oberflächen zeigt im Vergleich mit Luftbildern (siehe Abbildung 5.4) eine sehr gute kleinräumige Reproduktion der Beleuchtungsverhältnisse. Die Methode wird verwendet, um durch Dachaufbauten, Schornsteine und Erker verschattete Bereiche zu detektieren und um Schatten von Vegetation direkt am Gebäude festzustellen. Die

**Reproduktion kleinräumiger Verschattung auf Gebäudedächern**  
 Beispiel: Satteldach mit Pitzgaube und Zwerchhaus



Abbildung 5.4: Vergleich zwischen hillshade auf dem FPL6K-TIN und einem Orthofoto von 2006

Strahlungsparameter wurden mit SUNSET berechnet (siehe Kapitel 4.4). Großflächige gegenseitige Schattenwürfe, wie sie von Gebäuden verursacht werden, können mit diesem Verfahren nicht untersucht werden. Für die Erstellung der 36 Raster kommt für die Monate März bis November das FPL6K-TIN als Oberfläche zum Einsatz, um Vegetation direkt neben den Gebäuden mit entsprechendem Laub berücksichtigen zu können. Für die Wintermonate Dezember bis Februar wird das LPL6K-TIN benutzt.

Bei der Kombination der Raster wird für jedes Pixel der Durchschnittswert berechnet, so dass sowohl die Verschattung im Jahres- als auch im Tagesgang berücksichtigt ist. Die Extrahierung der Dachflächen erfolgt über die Spatial-Analyst-Funktion *'Extraction by Mask'*, indem das Durchschnittsraster mit dem Polygondatensatz der Gebäudegrundrisse verschnitten wird. Für die Eignungsklassifikation wird das Ergebnistraster zur Vereinfachung der weiteren Prozesse in sechs Stufen reklassifiziert (siehe Abbildung 5.5). Flächen, die ganzjährig im Durchschnitt mindestens die Bestrahlungsintensität einer unverschatteten Flachdachfläche am 21.12.2007 um 12:00 Uhr erreichen, werden für die weitere Eignungsklassifikation berücksichtigt. Dies sind die Klassen 5 und 6 des *hillshade*-Verschattungsrasters. So können geeignete Dachflächen mit geringer und sehr geringer gebäudebedingter Verschattung ermittelt werden. Das Ergebnis ist in Abbildung 5.6 dargestellt.

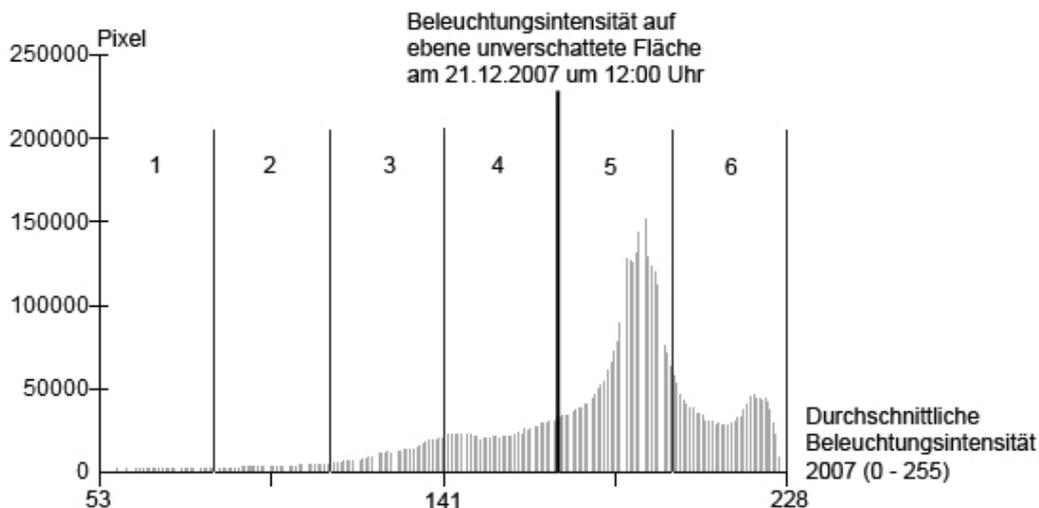


Abbildung 5.5: Verteilung der durchschnittlichen Rasterwerte der durchgeführten Beleuchtungssimulation für das Jahr 2007

### 5.3.2 Standortbedingte Verschattung

Die Simulation der gegenseitigen Verschattung von Gebäuden kann über die *hillshade*-Funktion von 3D-Analyst wie beschrieben nicht im gewünschten Umfang durchgeführt werden. Über CAD-Software können Blockmodelle von Gebäuden entwickelt und deren Beleuchtung realistisch simuliert werden. Die 3D-Software SketchUp 6 Pro erlaubt die Anwendung dieser Funktionen auf Geodaten durch Datenaustausch mit ArcGIS. Ein generalisiertes Blockmodell soll die Simulation der Schattenwürfe ermöglichen.

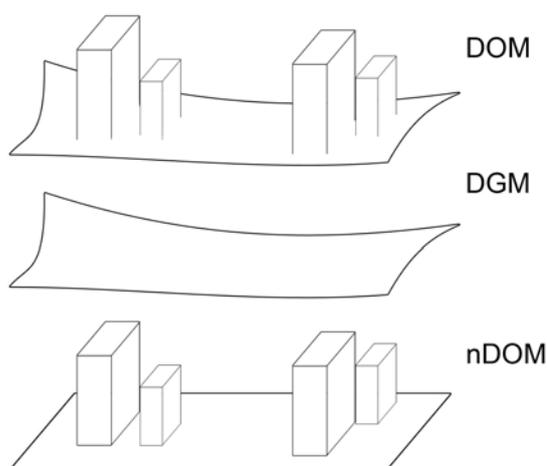


Abbildung 5.7: Erstellen eines normalisierten Oberflächenmodells aus der Differenz eines DOM und eines DGM

Um die Gebäudehöhe korrekt zu ermitteln, wird ein normalisiertes digitalisiertes Oberflächenmodell (nDOM) erstellt (siehe Abbildung 5.7). Es errechnet sich aus der Differenz des digitalen Oberflächenmodells (DOM) aus dem FPL6K-Datensatz sowie dem digitalen Geländemodell (DGM). Beide TINs werden dafür in Raster umgewandelt und die Differenz der Raster mit dem Polygondatensatz der Gebäudegrundrisse verschnitten. Das Ergebnistraster enthält in jedem Pixel die Höheninformation für den jeweiligen Gebäudeteil. Der Export von ArcGIS in SketchUp erfordert die Um-

**Gebäudebedingte  
Verschattung**

mit unterlegtem  
Luftbild aus  
Befliegung 2006

- Klasse 6: unverschattet
- Klasse 5: gering verschattet
- Klasse 1 bis 4: verschattet



Abbildung 5.6: Errechnete gebäudebedingte Verschattung der Dachflächen

wandlung des Rasters in einen Polygondatensatz, bei dem jedem Polygon die Höheninformation des Rasters als Attribut zugewiesen wird. Für die Umwandlung des Rasters in Polygone, müssen die Pixel im *unsigned Integer*-Format (ganzzahlige Werte von 0 bis 255) vorliegen, was die Reklassifikation des Ergebnisrasters erfordert. Die Reduktion auf Integerwerte ergibt ein Grid mit einer Höhenauflösung von einem Meter, dessen Werte sich von 1 m bis 42 m, verteilt auf 23 Höhenklassen, erstrecken.

Dieses Raster wird in einen Polygondatensatz konvertiert und kann anschließend über das SketchUp Importer/Exporter-PlugIn für ArcGIS exportiert werden. Dabei wird die als Attribut hinterlegte Höheninformation zugewiesen. SketchUp verwendet die Polygonfläche als Grundriss für einen Block, der auf die zugewiesene Höhe ausgedehnt wird. Liegen für ein Gebäude mehrere Höhenwerte vor, besteht das so erstellte Blockmodell aus einzelnen, direkt benachbarten Blöcken unterschiedlicher Höhe. Diese Form der dreidimensionalen Ausdehnung von Polygonen zur Visualisierung ist mit ArcScene ebenfalls möglich. Jedoch können die gewünschten Verschattungen nicht ohne weiteres simuliert werden, weshalb für diese Untersuchung die Migration der Daten in SketchUp durchgeführt wird. SketchUp ermöglicht die Rekonstruktion der Beleuchtung dreidimensionaler Objekte durch die Sonne sowie die Visualisierung des dadurch entstehenden Schattens. Über zahlreiche Erweiterungen sind fotorealistische Renderings möglich, diese Option wird jedoch aus Gründen der Verringerung des Rechenaufwandes nicht angewendet. Für die Beleuchtungssimulation eines Objektes wird dessen Position über die Angabe von Längen- und Breitengrad definiert. Uhrzeit und Datum können frei bestimmt werden.

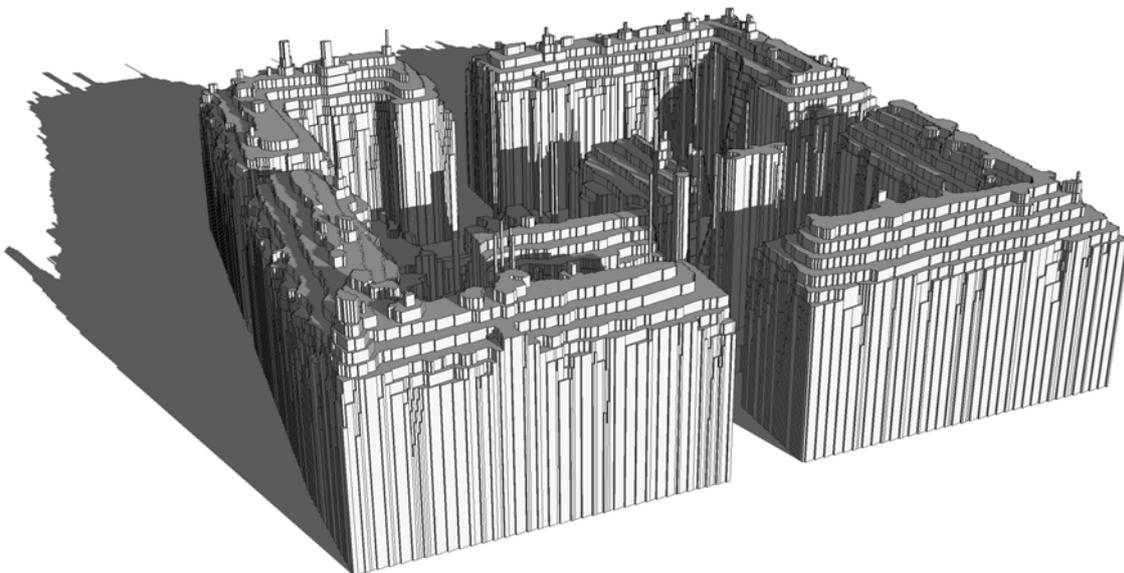


Abbildung 5.8: Blockmodell eines Gründerzeitblockes mit einer Höhenauflösung von einem Meter und simulierter Verschattung am 21.12.2007 um 12:00 Uhr

Der Rechenaufwand ist sowohl für den Export als auch für die Darstellung der

Verschattung in SketchUp stark von der Auflösung des Polygondatensatzes abhängig. Zu Testzwecken wird zunächst nur ein gründerzeitlicher Block mit einer Höhenauflösung von einem Meter exportiert, um zu ermitteln, ob für die Modellierung des gesamten Stadtteiles Vereinfachungen des Blockmodells erforderlich sind. Das Gebäudeensemble (siehe Abbildung 5.8) besteht aus 2.850 Einzelpolygonen und benötigt für die Migration von ArcGIS nach SketchUp auf dem verwendeten System (AMD Athlon 64 X2 2x2,2GHz, 2GB Arbeitsspeicher) fünfzehn Minuten. Der Export des gesamten Stadtmodells mit 136.659 Polygonen und einer Höhenauflösung von einem Meter würde unter diesen Umständen theoretisch 12 Stunden Rechenzeit in Anspruch nehmen, führte jedoch zu zahlreichen Systemabstürzen. Die Handhabung in SketchUp wäre unter den Hardwarevoraussetzungen nur schwer möglich, so dass eine Vereinfachung des Blockmodells erforderlich ist. Eine Reduktion der Höhenauflösung bewirkt gleichzeitig eine Verringerung der Polygonzahl.

Die Umsetzung des Blockmodells über ein auf zehn Höhenstufen reklassifiziertes Raster ist für den gesamten Gebäudebestand in einem Schritt ebenfalls nicht möglich, da der Rechenaufwand für die verwendete Hard- und Software zu groß ist und zu Systemabstürzen führt. Die Übertragung von einzelnen Gebäudekomplexen, die in SketchUp wieder zusammengefügt werden, verursacht nach Modellierung von etwa einem Viertel der Gebäude extrem lange Rechenzeiten für die Darstellung und Simulation der Verschattung, so dass eine weitere Reduktion der Höhenauflösung nötig ist.

Erst die Reduktion auf sieben Höhenklassen, welche aus dem nDOM-Raster über die Spatial-Analyst-Funktion *'Reclassify'* mit der Methode *'Natural Breaks (Jenks)'* erstellt wurden, ist mit der verwendeten Hard- und Software umsetzbar, erfordert jedoch ebenfalls die schrittweise Migration einzelner Gebäudekomplexe aus ArcGIS in SketchUp bei weiterhin hohem Rechenaufwand für Darstellung und Speicherung.

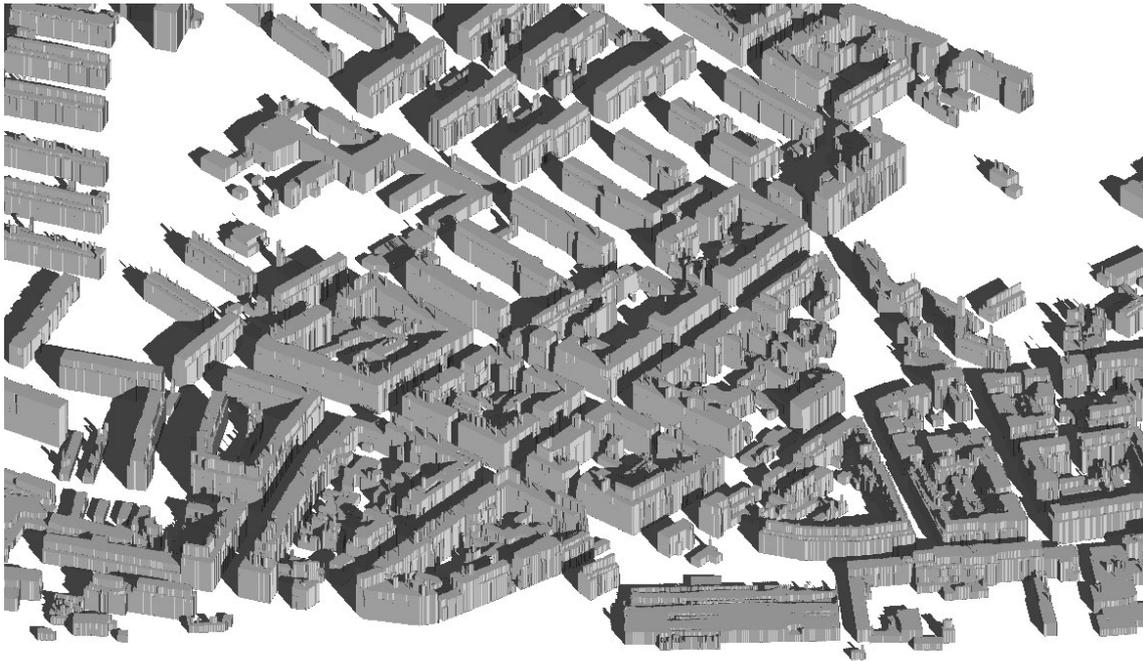


Abbildung 5.9: Ausschnitt des auf sieben Gebäudehöhenstufen vereinfachten Blockmodells des Untersuchungsareals

Das erstellte Blockmodell des Stadtteiles enthält 20.437 Polygone. Durch Angabe von Längen- und Breitengrad wird das gesamte Modell in SketchUp korrekt positioniert, so dass die Verschattung simuliert werden kann. Um die Qualität der Schattenwürfe zu überprüfen, erfolgt ein Vergleich mit Orthofotos. Dazu werden die hochauflösenden Aufnahmen der Befliegung 2006 herangezogen. Die Aufnahmen erfolgten im Juni 2006 in den Vormittagsstunden, das genaue Datum und die Uhrzeit sind nicht bekannt.

Für den Vergleich werden die Schattenwürfe am 21.06.2007 um 09:00 Uhr verwendet. Nach Eingabe von Datum und Uhrzeit berechnet SketchUp die Schatten und stellt sie auf dem Modell dar. Die senkrechte Aufsicht auf das Blockmodell wird als Raster im *\*.tif*-Format gespeichert und mit ArcGIS importiert. Der direkte Export des Modells nach ArcGIS als dreidimensionales Modell im ESRI Multipatch-Format ist zwar möglich, die Schattenwürfe werden dabei jedoch nicht übernommen. Durch den Export als zweidimensionales Bild geht die Georeferenzierung verloren, so dass das Raster unter Verwendung des Gebäudegrundrissdatensatzes neu georeferenziert werden muss. Der Vergleich der Schattenwürfe mit dem Luftbild zeigt eine sehr gute Reproduktion der tatsächlichen Verhältnisse (siehe Abbildung 5.10), diese Methode wird verwendet um die standortbedingte Verschattung zu simulieren.

Es erfolgt analog zur gebäudebedingten Verschattung die Erzeugung von 36 Verschattungsrastern (für jeden 21. Tag jedes Monats um 9:00 Uhr, 12:00 Uhr, 15:00 Uhr). Nach dem Import in ArcGIS wird ein Durchschnittsraster erstellt, bei dem jedem Pixel die durchschnittliche Verschattung für das gesamte Jahr 2007 zugewiesen wird. Abbildung 5.12 zeigt einen Ausschnitt des Durchschnittsrasters aus dem Nordwestteil des Untersuchungs-

**Reproduktion gegenseitiger Verschattung von Gebäuden**  
 Beispiel: Siedlungen der 1950er und 1960er Jahre



Abbildung 5.10: Vergleich zwischen den Schattenwürfen des Blockmodells und einem Orthofoto von 2006

gebietes. Nach der Georeferenzierung erfolgt eine Reklassifikation in zwei Eignungsklassen. Klasse 1 umfasst alle Flächen, die ganzjährig schlechter beleuchtet sind, als eine unverschattete ebene Fläche am 21.12.2007 um 12:00 Uhr. Zu diesem Zeitpunkt steht die Sonne im Vergleich zum gesamten Jahr am niedrigsten über dem Horizont.

Flächen der Klasse 1 werden demnach nicht ganzjährig besonnt, da sie sich beispielsweise im Innenhof eines Gebäudes befinden oder durch ein benachbartes Gebäude verdeckt werden. Sie werden deshalb für die Eignungsklassifikation nicht mehr berücksichtigt.

Das Ergebnis der Berechnung der standortbedingten Verschattung ist in Abbildung 5.11 dargestellt.

## 5.4 Berechnung von Exposition und Dachneigung

Die Neigungswinkel und Exposition der Dachflächen werden mit 3D-Analyst aus dem FPL6K- oder LPL6K-TINs über die Funktionen *'Surface Analysis - Slope...'* und *'Surface Analysis - Aspect...'* berechnet und in Rastern gespeichert. Die Pixel des Neigungsdatensatzes erhalten dabei Werte zwischen 0 und 90, die des Expositionsrasters von 0 bis 360. Um die Dachflächen aus den Rastern zu extrahieren, werden diese mit dem Polygondatensatz der Gebäudegrundrisse verschnitten. Für die Untersuchung der Eignung werden beide Raster reklassifiziert (siehe Abbildung 5.15). Das Ausrichtungsraster wird in acht Klassen unterteilt, deren Klassen jeweils einen Bereich von  $\pm 22,5^\circ$  um die jeweilige Himmelsrichtung Nord, Nordost, Ost usw. abdecken.

Die Neigung wird in drei Klassen zusammengefasst: Flachdächer und Flächen mit



Abbildung 5.11: Errechnete standortbedingte Verschattung der Dachflächen



Abbildung 5.12: Ausschnitt des Rasters der ganzjährigen durchschnittlichen standortbedingten Verschattung

sehr geringen Neigungen bis  $10^\circ$  werden in einer Klasse erfasst. Dachflächen, deren Neigung größer als  $10^\circ$  und maximal  $60^\circ$  beträgt, eignen sich für die direkte Integration der Solarmodule in die Dachfläche. Die maximale Sonnenhöhe im Untersuchungsgebiet liegt bei  $62^\circ$  im Juni<sup>1</sup>, QUASCHNING (2000) begrenzt die für die Solarenergienutzung geeignete Neigung mit  $60^\circ$ . Flächen, deren Neigung größer ist, werden in der dritten Neigungsklasse erfasst.

Die Ergebnisse der Berechnungen von Ausrichtung und Exposition der Dachflächen sind in den Abbildungen 5.13 und 5.14 dargestellt.

## 5.5 Rasterkombination

Nachdem die benötigten Eignungsraster bezüglich der standortbedingten Verschattung, der gebäudebedingten Verschattung, der Neigung und der Ausrichtung der Dachflächen erstellt sind, wird die eigentliche Eignungsklassifikation der Dachflächen durchgeführt. Die Kombination der Raster erfolgt über die Spatial Analyst Funktion *'Raster Calculator'*, welche eine Vielzahl von Abfragen auf Datenbestände ermöglicht. Dabei können sowohl mathematische Berechnungen als auch Analysen über die sog. *'Map Algebra'*, eine eigene Abfragesprache, durchgeführt werden, deren Ergebnisse in Rastern gespeichert werden. Für die Klassifikation wird ein Schema entwickelt, welches in Abbildung 5.16 dargestellt ist.

Der erste Arbeitsschritt ist die Berücksichtigung der standortbedingten Verschattung. Flächen, die ganzjährig eine starke Verschattung aufweisen, sind beim Untersuchungsver-

---

<sup>1</sup>Berechnung nach Algorithmus gemäß DIN 5034



Abbildung 5.13: Berechnete Ausrichtung der Dachflächen



Abbildung 5.14: Berechnete Neigung der Dachflächen

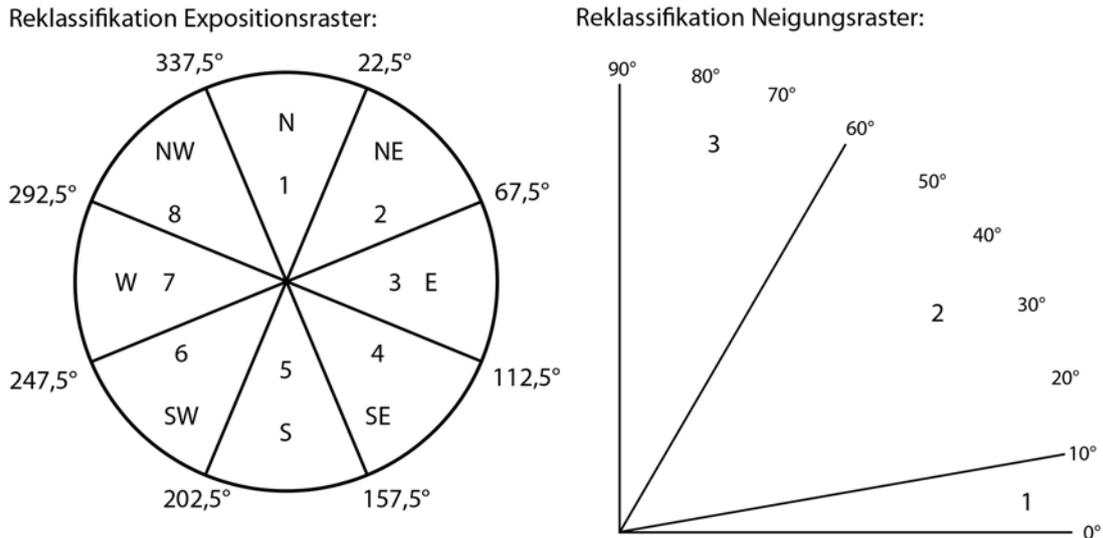


Abbildung 5.15: Reklassifikationsschema der Exposition in 8 Klassen und der Dachneigung in 3 Klassen

fahren (siehe Kapitel 5.3.2) der Klasse 1 zugewiesen worden. Diese Flächen werden in den weiteren Schritten nicht mehr berücksichtigt. Die verbleibenden Flächen in Klasse 2 werden hinsichtlich der gebäudebedingten Verschattung untersucht. Dazu werden beide Raster in den Raster-Calculator importiert und eine Abfrage durchgeführt. Sie ist beispielhaft für alle weiteren Abfragen, die auf die Ergebnisraster der vorangegangenen Analysen ausgeführt werden. Abbildung 5.17 veranschaulicht das Beispiel dieser einfachen Abfrage veranschaulichen.

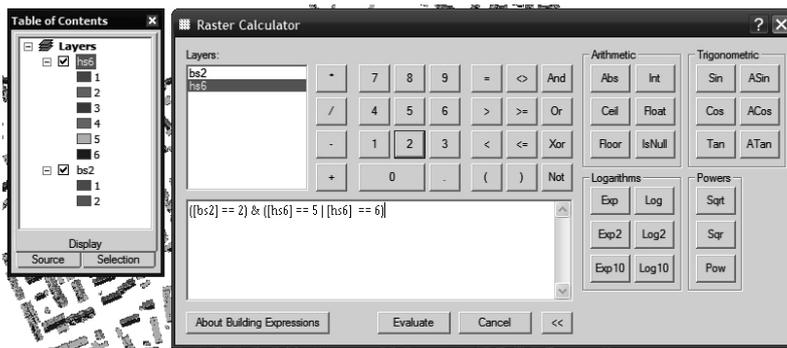


Abbildung 5.17: Beispiel einer Abfrage mit dem Raster Calculator

Das Raster der standortbedingten Verschattung ist mit *bs2*, das der gebäudebedingten Verschattung mit *hs6* bezeichnet. Für Abfragen können

beliebig viele Raster importiert werden, sie werden im Raster-Calculator in der 'Layers'-Übersicht dargestellt. Mit der dargestellten Abfrage sollen alle Flächen identifiziert werden, die im *bs2*-Raster in die Klasse 2 eingestuft sind und im *hs6*-Raster entweder in Klasse 5 oder in Klasse 6 enthalten sind. Jedes Pixel, das die Bedingung erfüllt, erhält im Ergebnisraster den Wert 1. Wird die Bedingung nicht erfüllt, erhält es den Wert 0.

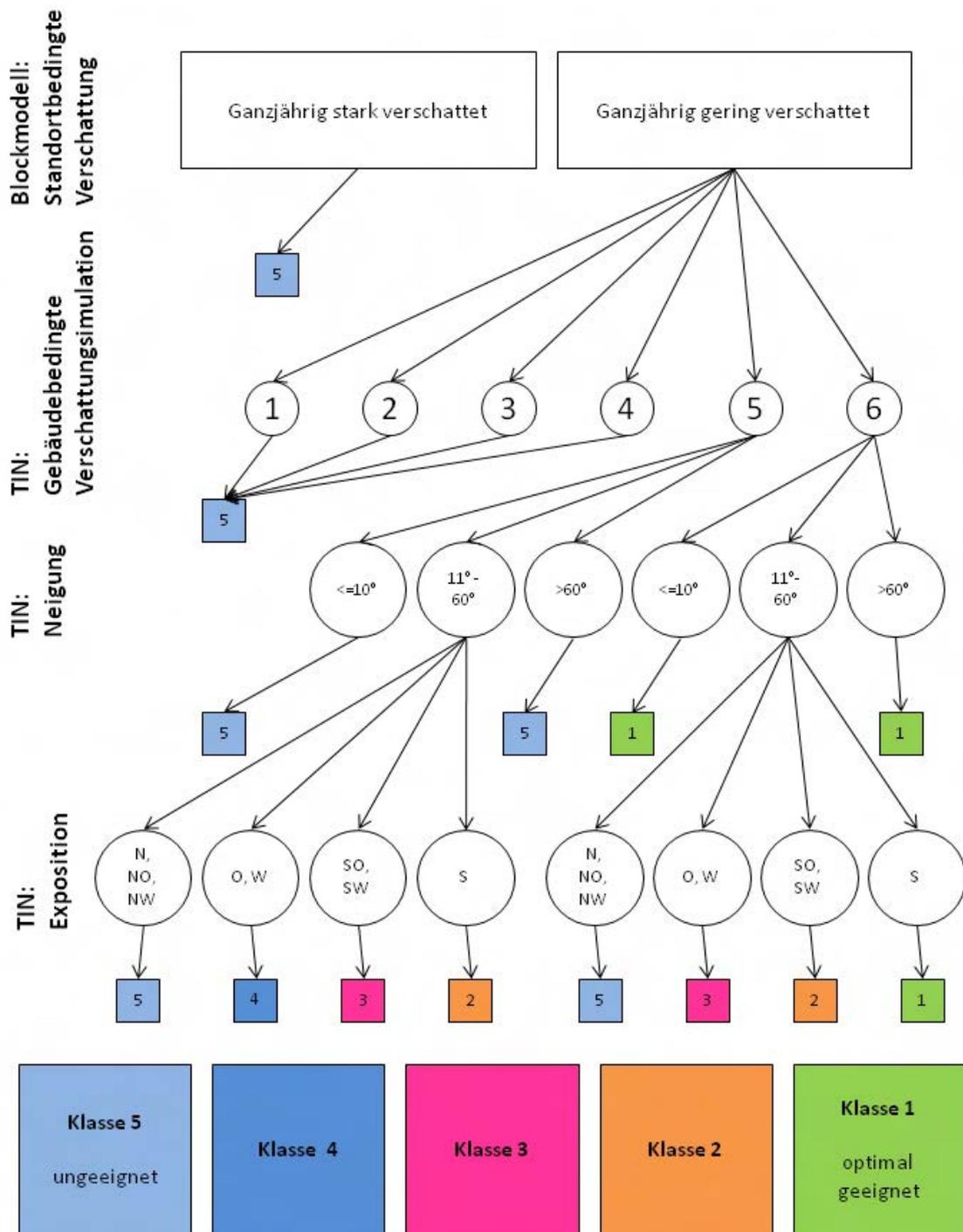


Abbildung 5.16: Klassifikationsschema für die Eignung einer Dachfläche für solarenergetische Nutzung

Die Abfrage besteht aus zwei Teilen, die jeweils in Klammern zusammengefasst und mit einem logischen UND (&) verknüpft sind:

$$([\text{bs}2] == 2) \& ([\text{hs}6] == 5 \mid [\text{hs}6] == 6)$$

Der erste Teil der Abfrage untersucht jedes Pixel des *bs2*-Rasters darauf, ob sein Wert gleich oder ungleich dem Wert '2' ist. Der zweite Abfrageteil besteht seinerseits ebenfalls aus zwei Abschnitten, welche über ein logisches ODER (|) verknüpft sind. Er überprüft alle Pixel des *hs6*-Rasters darauf, ob sie den Werten '5' oder '6' entsprechen. Das Beispiel zeigt, wie schnell und einfach Abfragen auf Raster mit dieser Funktion möglich sind. Über wesentlich komplexere Abfragen können eine Vielzahl an Kriterien und Bedingungen über eine einzige Operation überprüft werden.

In weiteren Abfragen werden die Flächen in Bezug auf die gebäudebedingte Verschattung eingestuft. Die Flächen der Klassen 5 und 6 des *hs6*-Rasters mit geringer standortbedingter Verschattung werden dazu weiterhin getrennt behandelt, um optimal beleuchtete Standorte besser identifizieren zu können. Sie werden jeweils auf ihre Neigungsklassifikation überprüft, Flächen mit Neigungen über 60° werden als ungeeignete Standorte in die finale Eignungsklasse 5 eingestuft, Flachdächer oder gering geneigte Flächen werden der besten Eignungsklasse 1 zugewiesen. Dort können Sonnenkollektoren problemlos optimal ausgerichtet und aufgeständert werden. Der letzte Schritt ist die Einstufung der verbliebenen 10° bis 60° geneigten Flächen hinsichtlich ihrer Exposition. Nord-, nordost- und nordwestexponierte Flächen eignen sich nicht für die Solarenergienutzung, sie werden deshalb der Eignungsklasse 5 zugewiesen. Dächer mit geringer standortbedingter Verschattung und einer Einstufung in die Klasse 6 des *hs6*-Rasters werden bei der Einstufung der Pixel in finale Eignungsklassen jeweils eine Klassenstufe besser eingestuft. So kann eine ungünstigere Exposition einer Fläche durch bessere Besonnung kompensiert werden. Das Ergebnis der finalen Eignungsklassifikation ist das in Abbildung 5.5 dargestellte Raster, dessen Pixel Werte von 1 bis 5 für die jeweilige Eignungsklasse enthalten.

## 5.6 Ermittlung von Großflächen für Fotovoltaik

Die Untersuchung der klassifizierten Dachflächen hinsichtlich ihrer Eignung für die Installation und den Betrieb von Fotovoltaikmodulen ist notwendig, um hohe Wirkungsgrade zu erzielen. Fotovoltaikanlagen sollten, wie bereits in Kapitel 2.4.4 beschrieben, Mindestgrößen aufweisen, damit Wechselrichter mit höheren Wirkungsgraden eingesetzt werden können. Auf Grund ihrer sehr geringen Verschattungstoleranz werden nur Flächen der Eignungs-



Abbildung 5.18: Eignung von Dachflächen für die Nutzung durch Solaranlagen

klassen 1 und 2 berücksichtigt. Diese Flächen sind süd- oder südost- bzw. südwestexpo- niert und gering verschattet, so dass ganzjährig hohe Erträge realisiert werden können. Die

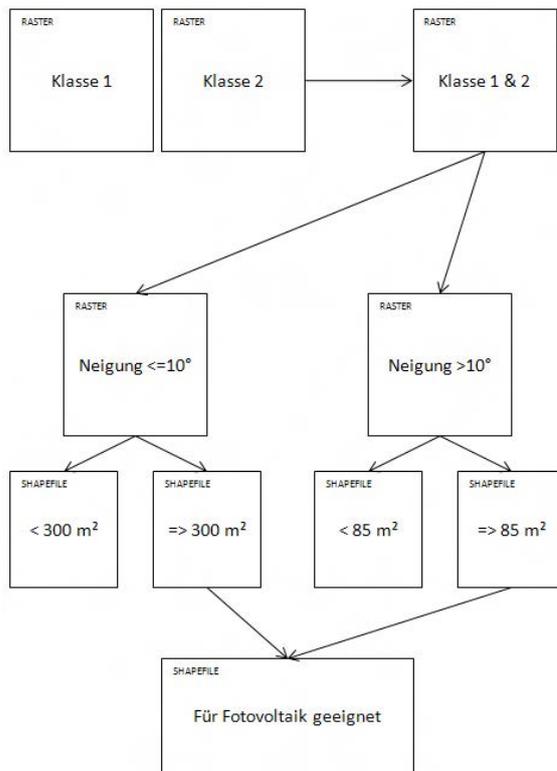


Abbildung 5.19: Klassifikation der Flächen hinsichtlich ihrer Eignung für Fotovoltaikanlagen

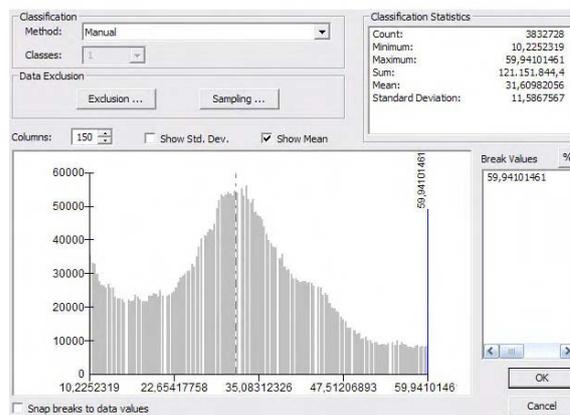


Abbildung 5.20: Verteilung der Dachneigungen zwischen 10° und 60°

winkel von 32° zu Grunde gelegt (siehe Abbildung 5.20). Das Raster bzw. die konvertierten Polygone enthalten lediglich die Bruttogrundfläche. Eine 100 m<sup>2</sup> große Fläche, die 32° geneigt ist, hat eine dementsprechend kleinere Bruttogrundfläche von ca. 85 m<sup>2</sup> (cos (32) x 100). Die Auswahl der Polygone erfolgt analog zur Auswahl der Flachdachflächen.

von der Stadt Nürnberg in der So- lardachbörse (siehe Kapitel 2.4.4) festgelegten Mindestflächengrößen wer- den für die Einstufung übernommen. Sie betragen 300 m<sup>2</sup> bei Flachdachflächen und 100 m<sup>2</sup> bei geneigten Dächern.

Die Flächen der Eignungsklassen 1 und 2 werden zusammengefasst. Durch Kombination mit dem Neigungsra- ster (siehe Kapitel 5.4) können mit dem Raster Calculator Flachdächer bis 10° und geneigte Dachflächen voneinander separiert werden. Die Zusammen- fassung benachbarter Pixel gleichen Wertes erfolgt durch Umwandlung in Polygone, so dass zusammenhängende Flächen ermittelt werden können. Deren Flächengröße wird über die Funktion 'Calculate Areas' der 'Spatial Statistics Tools' in der, der Projektion zu Grunde liegenden Einheit, berechnet - in diesem Fall in Metern. Um geeignete Flach- dachflächen mit einer Mindestgröße von 300 m<sup>2</sup> zu ermitteln, werden die Polygone über die Attributtabelle nach der berechneten Flächengröße sortiert und alle Polygone mit Flächen über 300 m<sup>2</sup> als separater Datensatz gespeichert.

Für die Auswahl geeigneter Schrägdä- cher mit mindestens 100 m<sup>2</sup> muss die Neigung für die Auswahl berücksichtigt werden, es wird ein mittlerer Neigungs-

Das Untersuchungsgebiet weist insgesamt über 37.000  $m^2$  geeignete Flachdachfläche mit einer Mindestgröße von 300  $m^2$  und fast 20.000  $m^2$  geeignete Schrägdachfläche mit einer Mindestgröße von 100  $m^2$  auf. Das Ergebnis ist in Abbildung 5.18 dargestellt. Bezogen auf die Bruttogrundfläche entspricht es einem Anteil von 30 %, der für die Nutzung durch Fotovoltaikanlagen geeignet ist. Daraus kann theoretisch eine Maximalleistung von über 3 MW<sup>2</sup> erzeugt werden.

---

<sup>2</sup>30 Quadratmeter Flachdachfläche mit aufgeständerten Fotovoltaikmodulen generieren etwa 1 KW Peak, 10 Quadratmeter Schrägdachfläche mit auf oder in die Dachhaut montierten Fotovoltaikmodulen generieren etwa 1 KW Peak (HEINLOTH 2003, S.318)

**Großflächen für  
Fotovoltaik**  
mit unterlegtem  
Luftbild aus  
Befliegung 2006



Flachdach > 300m<sup>2</sup>  
Geneigtes Dach > 100m<sup>2</sup>

Abbildung 5.21: Eignung von Dachflächen für die Nutzung durch großflächige Fotovoltaikanlagen

# Kapitel 6

## Interpretation

	Pixel (57x57cm)	Anteil in %	Bruttogrundfläche in m <sup>2</sup>
Klasse 1	280461	35	91122
Klasse 2	65761	8	21366
Klasse 3	28638	4	9304
Klasse 4	90408	11	29374
Klasse 5	329671	41	107110
SUMME	794939	100	258276

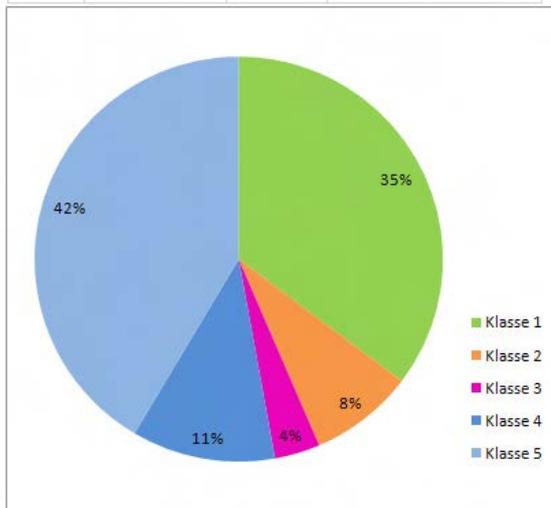


Abbildung 6.1: Anteile der Eignungsklassen in Bezug auf die Bruttogrundfläche

Solar-energienutzung besonders gut geeignete Gebäude und Siedlungsstrukturen identifiziert werden. Die Ergebnisse werden mit den Resultaten der Ecofys-Studie (EVERDING (2007) und WOUTERS (2007)) verglichen, um die Qualität des Verfahrens beurteilen zu können. Abschließend erfolgt eine kurze Planungsempfehlung für die Installation von Solaranlagen.

Das Ergebnis der Untersuchung des Stadtteiles St. Leonhard ist eine Eignungskarte, die durch ihre sehr hohe Auflösung auch Aussagen für Einzelgebäude zulässt. Abbildung 6.1 zeigt die Verteilung der untersuchten Dachflächen auf die Eignungsklassen bezogen auf die Gebäudegrundfläche. Demzufolge sind mehr als ein Drittel aller untersuchten Flächen für Solaranlagen optimal geeignet und der besten Eignungsklasse 1 zugewiesen. Ein Anteil von 43 % der Bruttogrundfläche entfällt auf die Klassen 1 und 2, wovon wiederum etwa 50 % der Flächen die Mindestgröße für großflächige Fotovoltaikanlagen (siehe Kapitel 5.6) erfüllen.

Die Interpretation der Untersuchungsergebnisse erfolgt im nachfolgenden Teil durch Fokussierung auf unterschiedliche Stadtraumtypen. So können für Solar-

## 6.1 Interpretation des Klassifikationsergebnisses nach Gebäudetypen

### 6.1.1 Gründerzeitquartiere

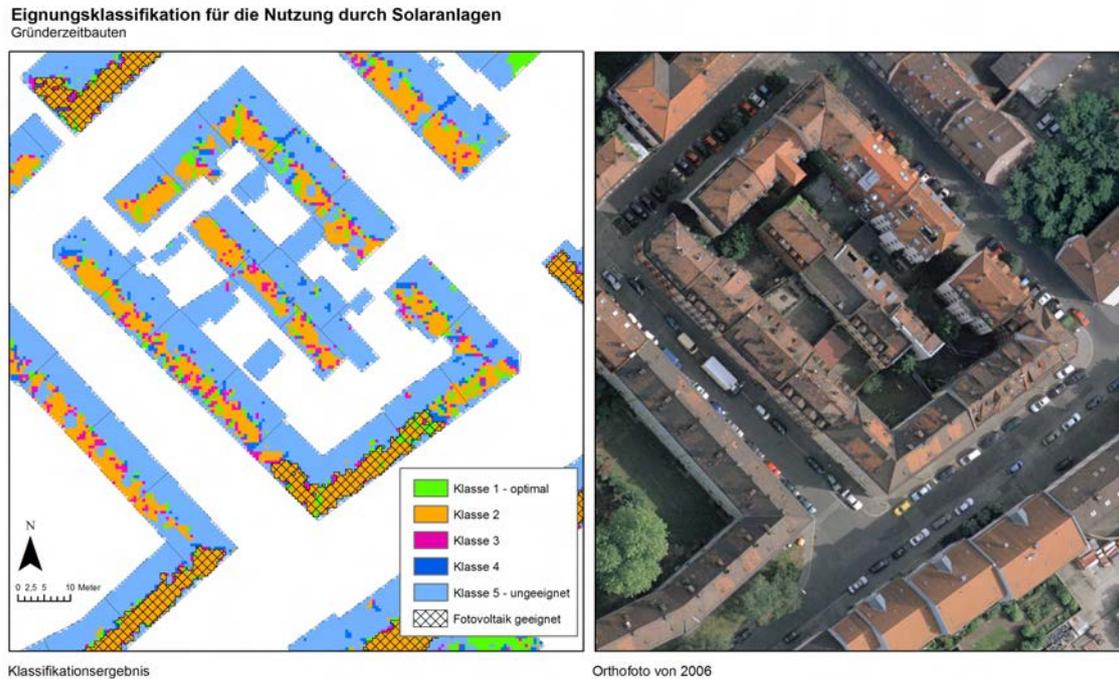


Abbildung 6.2: Vergleich zwischen dem Ergebnis der Eignungsklassifikation und dem Orthofoto von 2006 am Beispiel eines gründerzeitlichen Blocks an der Hermannstraße

Gründerzeitliche Quartiere wurden als Reaktion auf den enormen Bevölkerungsanstieg gegen Ende des 19. Jahrhunderts in vielen europäischen Großstädten errichtet. Die gründerzeitlichen Stadterweiterungen fußen auf einem Netz von Straßen, deren Zwischenräume mit geschlossenen Wohnblöcken ("Mietskasernen") bebaut sind. In den Innenhöfen befinden sich Wohn-, Gewerbe- aber auch Industriebauten, welche jedoch nicht immer die Gebäudehöhe der umschließenden Wohnblöcke erreichen. Dies führt nicht nur auf den Dachflächen der Hinterhofhäuser, sondern insbesondere in deren Räumen der unteren Geschosse zu sehr ungünstigen Beleuchtungsverhältnissen (siehe Verschattungssimulation mit hochaufgelöstem Blockmodell in Abbildung 5.8). Der Formenschatz der Dächer umfasst vorwiegend Sattel- oder Walmdächer, seltener Pultdächer. In den Innenhöfen finden sich vereinzelt Flachdächer. Typisch für diese Epoche sind Mansarden, die zu einer Verringerung der solarenergetisch nutzbaren Dachfläche führt. Die Dachflächen sind durch Erker oder Schleppegauben sowie Schornsteine und zahlreiche Aufbauten stark zerklüftet, wie am Beispiel des in Abbildung 6.3 dargestellten Gebäudes gut zu erkennen ist. Die typische Dachneigung beträgt zwischen  $30^\circ$  und  $40^\circ$  oberhalb der Mansarde.



Abbildung 6.3: Typischer Gründerzeitbau in der Schweinauer Straße, für Fotovoltaik ungeeignet

Die Einstufung der Flächen bei der Eignungsklassifikation zeigt kleinräumig eine hohe Variabilität. Dies begründet sich durch die oben beschriebene inhomogene Dachflächenbeschaffenheit (siehe Abbildung 6.3). Süd-, südost- und südwestexponierte Flächen der Blöcke sind weitestgehend der Eignungsklasse 2 zugewiesen. Auf Grund der geringen Flächengröße der Einzelgebäude existieren nur wenig zusammenhängende, gut geeignete Dachflächen, auf denen Fotovoltaikanlagen installiert werden können. Die Dachflächen der Innenhöfe sind bedingt durch ihre starken Verschattung durch die umgebende Be-

bauung sowie durch die in den Höfen teilweise vorhandene Vegetation für solarenergetische Nutzung nur in Einzelfällen geeignet.

Die Ecofys-Studie ermittelte für diesen Stadtraumtyp problematische Verschattungen, insbesondere in den Sockel- und Innenhofbereichen, und eine erhebliche Eingriffsempfindlichkeit hinsichtlich des äußeren Erscheinungsbildes. Jedoch sind sie für die nachträgliche Installation von Systemen zur solaren Nahwärmeversorgung geeignet. „Für die Wohnsiedlungsbestände der Vorkriegszeit, deren Erscheinungsbild für die Stadtbildpflege von großer Bedeutung ist, entfallen sowohl Dächer als auch Fassaden als Flächenpotential für die Photovoltaik“ (EVERDING 2007, S.208).

Aus dem Klassifikationsergebnis dieser Untersuchung lässt sich die Empfehlung ableiten, geeignete Flächen mit solarthermischen Anlagen auszustatten. Auf Grund der starken Parzellierung der Viertel und der damit verbundenen Eigentumsverhältnisse sind Fotovoltaikgroßanlagen nur schwer realisierbar. Großflächen können relativ kostengünstig mit Flachkollektoren (siehe Kapitel 2.3.1) ausgestattet werden, deren Wärme der Heizungsunterstützung oder Brauchwassererwärmung zur Verfügung gestellt werden kann. Sind nur sehr kleine Flächen mit guter Eignung vorhanden, kann dies durch die Installation von Kollektorsystemen mit höherem Wirkungsgrad ausgeglichen werden, beispielsweise durch Vakuumröhrenkollektoren. Der Investitionsaufwand ist jedoch erheblich höher als bei Flachkollektoren.

### 6.1.2 Siedlungen des sozialen Wohnungsbaus der Nachkriegszeit

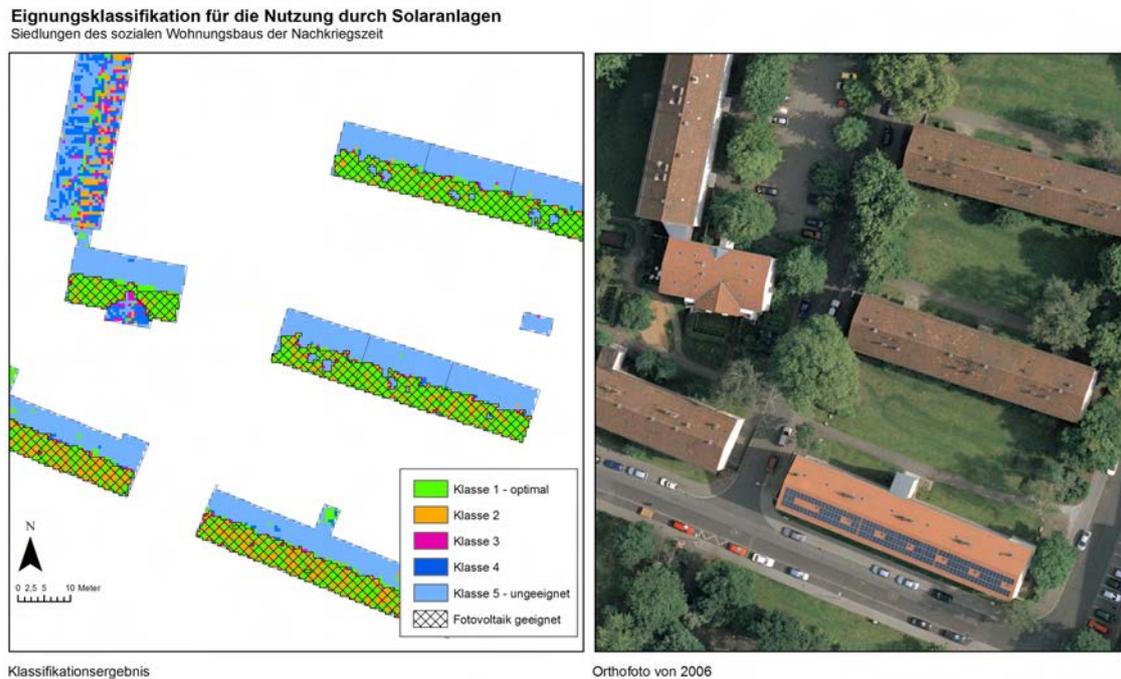


Abbildung 6.4: Vergleich zwischen dem Ergebnis der Eignungsklassifikation und dem Orthofoto von 2006 am Beispiel der Siedlung der Wohnungsbaugenossenschaft Nürnberg südlich der Rothenburger Straße.

Die Siedlungen des sozialen Wohnungsbaus der 1950er und 1960er Jahre bestehen in der Regel aus, hinsichtlich ihrer Architektur, genormten, typisierten und rationalisierten Gebäuden, welche nebeneinander oder parallel angeordnet sind, so dass die Siedlung eine geschlossene Einheit bildet.

Fußgängerbereiche sind von den Straßen separiert, das Areal ist begrünt und mit zahlreichen großen Bäumen bewachsen, die teilweise die Gebäudehöhe erreichen. Das untersuchte Gebäudeensemble ist die Genossenschaftssiedlung der WBG Nürnberg, welche aus vier- bis fünfgeschossigen Häuserriegeln mit Satteldach besteht. „Als Akzentuierung der Siedlungsbilder dienen häufig Wohnhochhäuser, die als Scheiben oder Punkthochhäuser ausgebildet werden“ (WACHTEN U. KLOOS 2007, S.31). Im Beispiel handelt es sich um zwei Hochhäuser mit Flachdach im Norden der Siedlung, deren Dachflächen mit zahlreichen Aufbauten ausgestattet sind. Die Neigung der Satteldächer beträgt etwa  $30^\circ$ , sie sind weitestgehend frei von Aufbauten, lediglich einige Schornsteine unterbrechen die homogenen Flächen. Im Zuge der gegenwärtig stattfindenden Sanierung der Gebäude werden Schornsteine entfernt oder verkürzt. Die südexponierte Dachfläche der Ost-West-ausgerichteten Häuserriegel wird dabei mit Fotovoltaikanlagen ausgestattet (siehe Abbildung 6.5). Die angeschlossenen Versorgungs- und Infrastruktureinrichtungen sind häufig als Flachbauten ausgeführt.



Abbildung 6.5: Mit Fotovoltaikanlage ausgestattete Süddachfläche in der Zollerstraße

Die Eignungsklassifikation identifiziert erhebliche Teile dieses Stadtraumtyps durch Zuweisung großer Flächenteile in die beste Eignungsklasse 1 als besonders gut geeignet. Dies betrifft die südexponierten Dachflächen der Satteldächer sowie die teilweise vorhandenen Flachdächer der

angeschlossenen Infrastrukturegebäude, sofern diese nicht zu stark verschattet sind. Die Dächer von Nord-Süd-ausgerichteten Gebäuden werden nur in den Vormittags- oder Nachmittagsstunden besonnt und eignen sich deshalb nicht für die aktive Solarenergienutzung. Beinahe alle Flächen, die den Eignungsklassen 1 und 2 zugewiesen sind, weisen die Mindestgröße für Fotovoltaikanlagen auf.

Die Ecofys-Studie kommt bei der Untersuchung dieses Stadtraumtyps zu ähnlich eindeutigen Ergebnissen: „Die Wohnsiedlungen der 50er-Jahre sind prädestinierte Solarsiedlungen“ (EVERDING 2007, S.218). Durch den großen Gebäudeabstand kann standortbedingte Verschattung vermieden werden. Problematisch ist teilweise die Verschattung durch Vegetation. Insbesondere im Bereich der solaren Wärmeversorgung sei „eine Deckungsrate von 50 % [...] aufgrund der baulichen Gegebenheiten bei den Stadtraumtypen der Nachkriegszeit generell realisierbar“ (EVERDING 2007, S.207).

Als Ergebnis der in dieser Untersuchung durchgeführten Eignungsklassifikation kann die Installation von großflächigen Fotovoltaikanlagen auf geeigneten Standorten empfohlen werden. Auf Grund der Homogenität der Dachflächen kann eine Zerstückelung der Kollektorfläche vermieden werden, so dass ein einheitliches äußeres Erscheinungsbild der Gebäude entsteht. Ein mit einer solchen Anlage ausgestattetes Gebäude mit  $750 \text{ m}^2$  Fotovoltaikfläche speist im Jahr ca. 67.500 KWh in das öffentliche Stromnetz ein (EVERDING 2007). Alternativ wäre die Nutzung der Flächen durch Flachkollektoren empfehlenswert, beispielsweise wenn die Siedlung nicht mit Fernwärme versorgt wird. Die Kollektoren können bei einer Dachsanierung selbst die Funktion der Dachhaut übernehmen und in Kombination mit Wärmespeichern erheblich zur Deckung des Heiz- und Warmwasserbe-

darfs der Siedlung beitragen. Sobald durch technologischen Fortschritt im Bereich der Hybridkollektoren (siehe Kapitel 2.3.1) effizientere Systeme marktreif sind, empfiehlt sich die Doppelnutzung der Flächen zur solaren Stromerzeugung und Wärmebereitstellung.

### 6.1.3 Reihenhäuser, Einfamilienhäuser, Mehrfamilienhäuser ab 1980

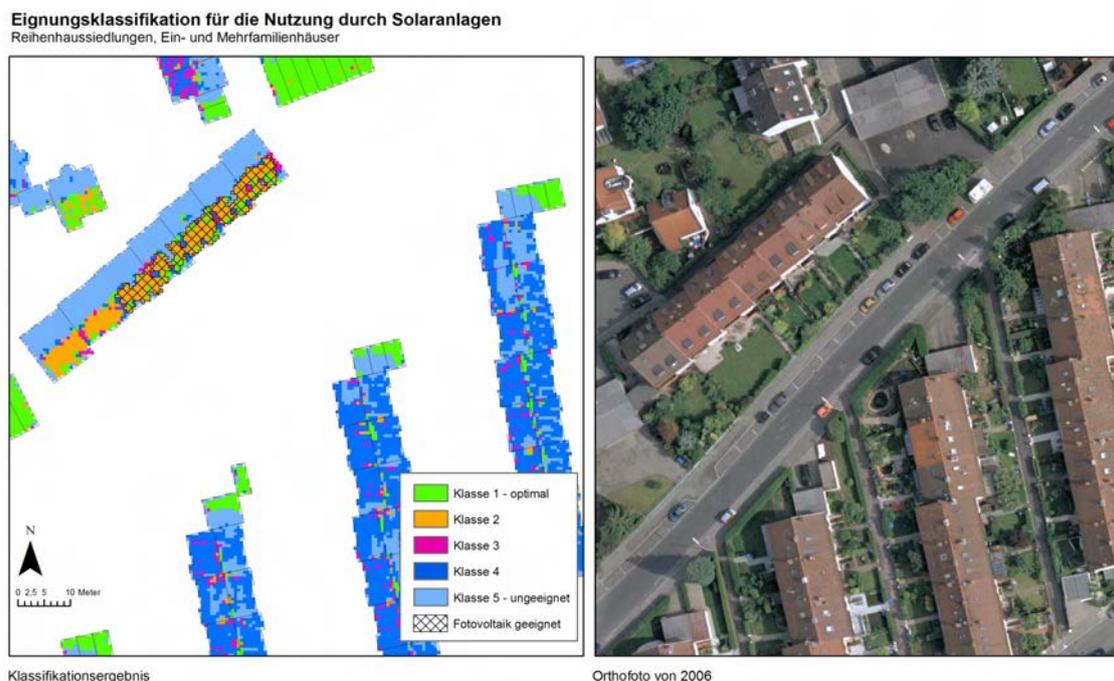


Abbildung 6.6: Vergleich zwischen dem Ergebnis der Eignungsklassifikation und dem Orthofoto von 2006 am Beispiel einer Reihenhaussiedlung im Westen des Untersuchungsgebietes

Bei den untersuchten Ein- und Mehrfamilienhaussiedlungen, welche als Reihenhäuser - vereinzelt auch als Einzelhäuser ausgeführt sind, handelt es sich um Stadterweiterungen der 1980er Jahre. Die Gebäude (siehe Abbildung 6.6) sind architektonisch weitestgehend einheitlich. Die in parallelen Reihen errichteten Bauten, sind durch Gärten voneinander getrennt. Das Inventar der Dachflächen besteht aus  $30^\circ$  bis  $40^\circ$  geneigten Satteldächern mit zahlreichen Schleppegauben, Schornsteinen und Aufbauten. Zwischen den Häuserriegeln oder daneben sind Garagen oder Schuppen in Flachbauweise ausgeführt. Die Siedlung ist mit Bäumen und Sträuchern begrünt, die die Gebäude teilweise überragen. Nord-Süd-ausgerichtete Gebäudezeilen eignen sich nach der durchgeführten Klassifikation nicht für die aktive solarenergetische Nutzung. Die Dachflächen sind zu inhomogen, es kommt auf Grund des niedrigen Gebäudeabstandes zu gegenseitigen Verschattungen. Süd-exponierte Dachflächen erreichen bedingt durch die starke Zerklüftung der Dachflächen durch Erker und Gauben nur eine Einstufung in die Eignungsklasse 2. Flachbauten sind häufig von Verschattung durch die Gebäude oder durch Vegetation betroffen. Für Fotovoltaiknutzung sind nur südexponierte Dächer von Mehrfamilienhäusern aus den 1980er Jahren geeignet.

Die Ecofys-Studie hat diesen Stadtraumtyp nicht explizit in einem Pilotprojekt untersucht, weist jedoch darauf hin, dass bei diesen Gebäudebeständen Deckungsraten zwischen 30 % und 60 % (EVERDING 2007, S.207) im Bereich der solaren Wärmeversorgung realisierbar sind. Als problematisch bei der Umsetzung großmaßstäblicher solarenergetischer Sanierungsmaßnahmen kann sich die stark diversifizierte Eigentümerstruktur erweisen.

Südexponierte Dachflächen, die in die Eignungsklassen 1 oder 2 eingestuft sind, weisen häufig zu geringe Größen für Fotovoltaik auf. Die Bereiche sollten daher für Flachkollektoren bei Einfamilien- oder Reihenhäusern genutzt werden. Dadurch kann bereits ein erheblicher Teil der Wärmeversorgung der Gebäude abgedeckt werden. Im Falle der Mehrfamilienhäuser wäre die Installation von Vakuumröhrenkollektoren denkbar. So können hohe Deckungsraten für den Wärmeenergiebedarf dieser Gebäude erreicht werden, was jedoch mit einem hohen Investitionsaufwand verbunden wäre. Die Gebäude entsprechen häufig bereits den Normen der Wärmeschutzverordnung von 1982, Sanierungen sind zeitnah in vielen Fällen noch nicht notwendig.

#### 6.1.4 Moderne Bürogebäude und Flachbauten

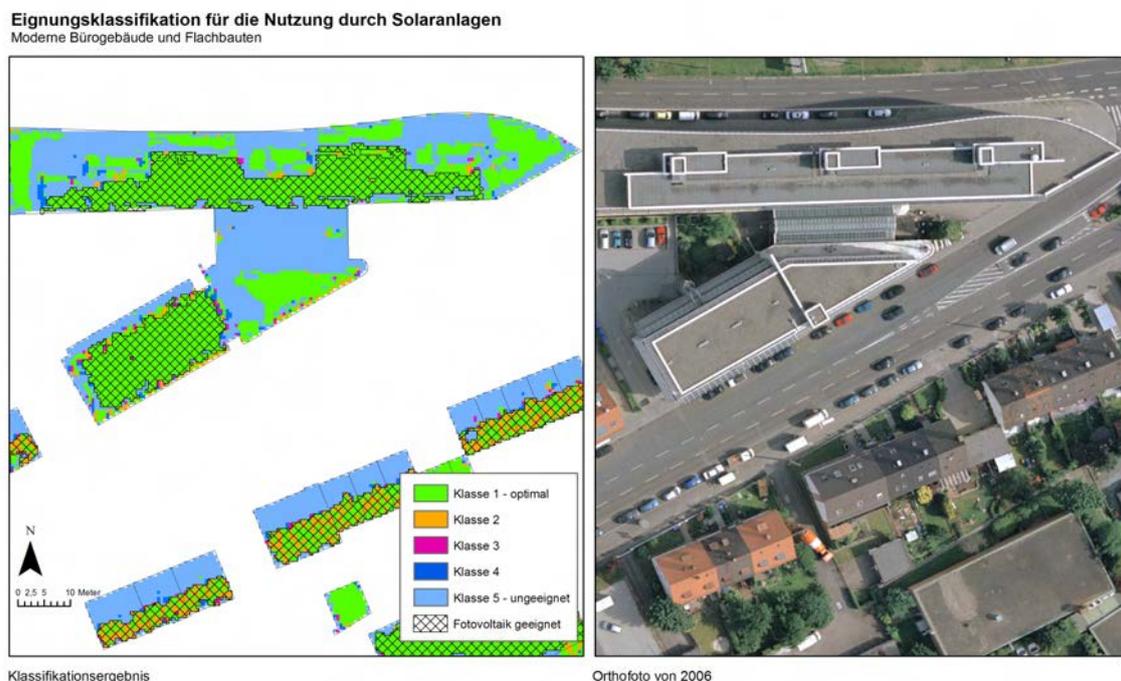


Abbildung 6.7: Vergleich zwischen dem Ergebnis der Eignungsklassifikation und dem Orthofoto von 2006 am Beispiel eines modernen Bürogebäudes an der Rothenburger Straße

Im untersuchten Areal befindet sich ein moderner mehrgeschossiger Bürokomplex zwi-

schen Rothenburger Straße und Wallensteinstraße. Er verfügt über die für diese Gebäudetypische Glasfassade sowie ein Flachdach, welches sich auf mehrere Ebenen erstreckt. Es ist weitestgehend frei von Aufbauten (siehe Abbildung 6.7). Zahlreiche Wohn- und Gewerbebauten im Untersuchungsgebiet sind bereits in den 1980er und 1990er Jahren mit Flachdächern ausgeführt worden. Bei ausreichender Gebäudehöhe, so dass umstehende Vegetation keinen Schatten auf die Flächen werfen kann, sind diese Gebäude für die Installation von Fotovoltaikanlagen gut geeignet, wenn die Dachfläche mindestens  $300 \text{ m}^2$  groß ist. Unverschattete Flachdachflächen sind automatisch der besten Eignungsklasse 1 zugewiesen. Die massive Bauweise der Gebäude und eine ausreichende Tragfähigkeit der Dachkonstruktion ermöglicht die Installation von aufgeständerten Sonnenkollektoren, ohne dass das äußere Erscheinungsbild des Gebäudes erheblich beeinträchtigt wird. Dies ist möglich, wenn die Kollektoren außerhalb der Sichtlinie des Betrachters von der Straße montiert werden, was jedoch die nutzbare Dachfläche erheblich verkleinert.

In der Ecofys-Studie wurde das Beispiel einer solarenergetischen Sanierung eines Bürogebäudes der 1980er Jahre untersucht. Hierbei wurde auf die Installation der Solarmodule auf der Dachfläche zu Gunsten einer Solarfassade verzichtet. Die Studie ermittelte bei diesem Stadtraumtyp einen hohen Wärme- und Klimatisierungsbedarf. Die Außenwirkung des Gebäudes ist besonders wichtig, so dass eine erhöhte Eingriffsempfindlichkeit bezüglich der Montage von Solarmodulen besteht.

Die durchgeführte Untersuchung ermöglicht die Empfehlung mehrerer Konzepte für diese Bauform: Flachdächer eignen sich hervorragend für die Installation von Solaranlagen. Ein modernes Klimatisierungs- und Beheizungssystem kann über auf dem Dach montierte Flachkollektoren umweltfreundlich betrieben werden. Da diese Bauten jedoch ein relativ geringes Alter aufweisen, sind meist moderne Heiz- und Klimaanlage installiert, so dass eine Modernisierung in diesem Bereich aus Kostengründen nicht in Frage kommt. Fotovoltaik ermöglicht die Kompensation eines Teils des erheblichen Energiebedarfs des Gebäudes ohne dass Umbaumaßnahmen in größerem Umfang notwendig sind. Die Dächer weisen die erforderlichen Flächengrößen auf, so dass auch die benötigte Wechselrichterelektronik auf dem Dach untergebracht werden kann.

### 6.1.5 Industrie- und Gewerbebauten

Im Süden des Untersuchungsgebietes befinden sich zahlreiche großflächige Gewerbe- und Industriebetriebe, deren Bauten in der Regel in Form von Hallenkonstruktionen ausgeführt sind. Es handelt sich dabei um Hallen mit sehr gering geneigten Pult- oder Satteldächern bzw. Flachdächern. Die Dachflächen sind teilweise durch Oberlichter zerklüftet aber sehr homogen. Die geringe Tragfähigkeit der Hallendachkonstruktionen kann sich bei der Instal-

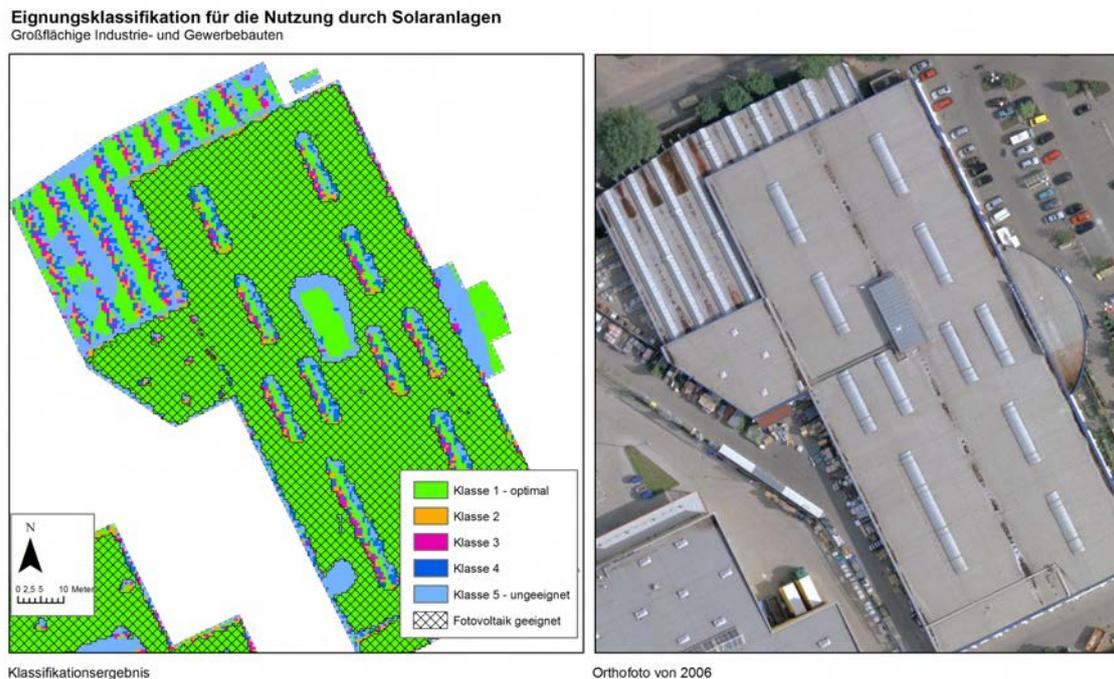


Abbildung 6.8: Vergleich zwischen dem Ergebnis der Eignungsklassifikation und dem Orthofoto von 2006 am Beispiel einiger Bauten an der Geisseestraße

lation von Solaranlagen als problematisch erweisen und erfordert bei Planungsvorhaben die Prüfung durch Architekten und Statiker. Gering- und unverschattete Flachdächer und Dächer mit Neigungen unter  $10^\circ$  werden bei der Klassifikation der besten Eignungsklasse 1 zugewiesen.

Insbesondere bei den Einkaufszentren ermittelt die Ecofys-Studie einen erheblichen Energiebedarf für die Klimatisierung und einen erhöhten Strombedarf der Gebäude (EVERDING 2007, S.198). Die Eigentumsverhältnisse (häufig Einzeleigentümer) stellen gute Voraussetzungen für die Realisation solarenergetischer Modernisierungsmaßnahmen dar.

Bei der Montage von Solarmodulen ist die Außenwirkung nur bei den Verwaltungs- und Repräsentationsbauten der Unternehmen wichtig, bei großflächigen Lagerhallen spielt sie eine untergeordnete Rolle. Ist die Tragfähigkeit der Hallenkonstruktion gewährleistet, empfiehlt sich daher als Resultat dieser Untersuchung die großflächige Installation von Fotovoltaikmodulen. Die Dachflächen verfügen über eine Flächenausdehnung die den Betrieb von Solarkraftwerken und der damit verbundenen positiven Außenwirkung für das Unternehmen ermöglichen. Für Industriebetriebe besteht die Möglichkeit über konzentrierte Solarenergiesysteme, die im Rahmen dieser Untersuchung jedoch nicht berücksichtigt wurden, Prozesswärme zu gewinnen.

## 6.2 Gesamtbeurteilung des untersuchten Stadtteiles Nürnberg St. Leonhard

Die hohe Diversität des Gebäudebestandes des untersuchten Areals spiegelt sich im Ergebnis der Eignungsklassifikation wieder. Es kristallisieren sich einige Gebäudetypen mit hohem Potential für solare Stromerzeugung heraus, Siedlungsstrukturen deren Dachflächen sich zur solaren Wärmeengewinnung eignen sowie Gebäudeensembles, die sich nicht für die Solarenergienutzung eignen. Hohe Potentiale für die solare Stromerzeugung weisen großflächige Hallenkonstruktionen im Industrie- und Gewerbebereich auf, sofern deren Tragfähigkeit eine Aufdach-Montage ermöglicht. An diesen Standorten installierte Solarkraftwerke können dank leistungsfähiger Wechselrichter mit hohen Wirkungsgraden sehr effizient betrieben werden. Die Nutzung moderner Vermittlungsplattformen, wie der Solardachbörse der Stadt Nürnberg, erleichtert die Suche nach möglichen Investoren. Im Wohngebäudebereich empfiehlt sich die Installation von Fotovoltaik besonders auf den nach Süden exponierten Dachflächen des sozialen Wohnungsbaus der 1950er Jahre. Auch Flachdächer moderner Büro- und Gewerbekomplexe eignen sich gut für die Installation dieser Systeme.

Für die solare Wärmebereitstellung sollten geeignete Dachflächen von Gebäuden ab den 1970er Jahren herangezogen werden. Durch Dachgauben und Aufbauten ist die vorhandene Flächengröße häufig nicht ausreichend, um eine Fotovoltaikanlage effizient betreiben zu können. In Verbindung mit einer Gebäudesanierung, welche den Energiebedarf erheblich senkt, können große Teile des Wärmebedarfs über auf dem Dach installierte Flachkollektoren abgedeckt werden. Siedlungsstrukturen der Vorkriegszeit, insbesondere der Gründerjahre, eignen sich bedingt für die Solarenergienutzung. Die Dachflächen sollten bei ausreichender Flächengröße mit Flachkollektoren, bei geringer Flächengröße mit hocheffizienten Vakuumröhrenkollektoren ausgestattet werden. Auf die Installation dieser Systeme auf Dächern der Hinter- und Innenhofgebäude sollte verzichtet werden, da die Beleuchtung dieser Standorte sehr ungünstig ist.

Einfamilien- und Reihenhäuser in Nord-Süd-Ausrichtung sind für die solarenergetische Nutzung ungeeignet, da die Dachflächen zu inhomogen und ungünstig exponiert sind. Die niedrige Gebäudehöhe führt zu Verschattungen der Dachflächen durch Vegetation.

Das Beispiel Sankt Leonhard zeigt, dass die Nutzung von Solarenergie im Gebäudebestand durchführbar ist, wenn geeignete Flächen identifiziert werden können. Aus stadtklimatischer Sicht sollte die Solarthermie gegenüber der solaren Stromerzeugung bevorzugt werden, da so Schadstoff- und Rußpartikelemissionen reduziert werden können. Die Installation der Solaranlagen sollte des Weiteren mit einer Sanierung der Fassaden

und Fenster verbunden sein, um den Gesamtenergiebedarf der Gebäude zu reduzieren.

Bei der Planung von Neubauten oder ganzen Siedlungskomplexen sollte der Aspekt der Nutzung dieser Energien berücksichtigt werden und beispielsweise unterschiedlich geneigte Dachflächen für die solare Stromerzeugung mit Fotovoltaik besonders im Sommer und die solare Wärmegegewinnung über Flachkollektoren im Winter vorgesehen werden.

# Kapitel 7

## Diskussion und Ausblick

Die durchgeführte Analyse greift Klassifikationsprinzipien vorhandener Potentialstudien auf und erweitert sie um die Genauigkeit eines hochaufgelösten digitalen Geländemodells. Mit Ausnahme der Migration der Daten von SketchUp zurück in ArcGIS können die Schritte ohne zusätzliche Eingriffe automatisiert werden. ArcGIS bietet dafür zahlreiche Skriptsprachen<sup>1</sup> an, in denen eine Applikation für diese Zwecke entwickelt werden kann.

Potentielle Fehlerquellen und Probleme dieses Verfahrens sind:

- Fehler in den Ausgangsdaten: Insbesondere die Qualität und Auflösung der Laserscannerdaten als Basis des digitalen Oberflächenmodells sind entscheidend für die Güte der produzierten Eigungskarte. Messfehler im allgemeinen Liegenschaftskataster führen zu fehlerhafter Gebäudeerkennung
- Die Datenbestände der DSGK und LIDAR-Daten sollten zeitlich übereinstimmen, so dass alle Gebäude berücksichtigt werden können
- Eine zu starke Generalisierung des 3D-Blockmodells zur Simulation der standortbedingten Verschattung führt zu falscher Reproduktion von Schatten und so zu Fehlklassifikation einzelner Gebäudeteile
- Die ungleichmäßige Verteilung der Höhenmesspunkte der LIDAR-Daten kann zu Ungenauigkeiten bei der Ermittlung der gebäudebedingten Verschattung führen. Dachaufbauten wie Antennen oder Schornsteine können bei der Simulation stärker stören als in Wirklichkeit, da die Bereiche zwischen den Messpunkten interpoliert werden.
- Dachüberstände werden bei der Gebäudeerkennung nicht berücksichtigt, da die Grundfläche der DSGK zur Abgrenzung der Gebäude dient. Die ermittelten Flächen können als kleiner sein, als die tatsächliche Dachfläche

---

<sup>1</sup>Perl, PHP, Ruby

Viele Städte und Kommunen werden langfristig dreidimensionale Stadtmodelle in ihren Datenbestand integrieren. Diese können die Grundlage für eine Vielzahl von Anwendungen sein, beispielsweise bei der Planung von Mobilfunknetze, zur Vorhersage von Naturkatastrophen wie Überschwemmungen, zur Optimierung von Notfallplänen (JANSA U. STANEK 2003) oder mit zusätzlichen Fassadentexturen versehen im Tourismusbereich. Bei ausreichender Auflösung kann dieses Modell auch für die Verschattungssimulation genutzt werden.

Erweiterungsmöglichkeiten des Verfahrens:

- Die Qualität des Modells kann durch Verwendung des automatischer Algorithmen, vorgestellt unter anderem von JANSA U. STANEK (2003) (ACV-Verfahren), verbessert werden. Diese Verfahren sind in der Lage, Dachstrukturen und Gebäude aus digitalen Laserscannerdaten zu extrahieren und in 3D-CAD-Modellen zu visualisieren.
- Um die Schattenwürfe von Vegetation stärker berücksichtigen zu können, sollten alle größeren Bäume in das Blockmodell integriert werden. Ansätze zur Ableitung von Einzelbäumen aus Laserscannerdaten über TINs oder Raster (Wasserscheidenalgorithmus) haben VÖGTLE U. A. (2005) vorgestellt. Damit wäre es möglich, Vegetation im Stadtgebiet zu erfassen und digital zu rekonstruieren.

Trotz der aufgezeigten Erweiterungsmöglichkeiten und der Fehlerquellen liefert das durchgeführte Verfahren Klassifikationsergebnisse, welche in einer hohen räumlichen Auflösung Aussagen sowohl für ganze Stadtteile als auch für Einzelgebäude ermöglicht - ein Aspekt, der mit bisher durchgeführten großräumigen Untersuchungen nicht möglich war. Die Methode erfüllt die gesteckten Zielvorgaben: es ist kein zusätzlicher Programmieraufwand notwendig, die verwendete Software ist weit verbreitet und die verwendeten Laserscannerdaten werden zeitnah für das gesamte Gebiet der Bundesrepublik Deutschland verfügbar sein (KLÄRLE U. LUDWIG 2005).

Untersuchungen wie diese können zur Optimierung der Subventionen beitragen, indem die allgemeine Förderung nach dem „Gießkannenprinzip“ durch eine gezielte Unterstützung der Vorhaben in optimal geeigneten Gebäudebeständen wie den Siedlungen des sozialen Wohnungsbaus der 1950er und 1960er Jahre, ersetzt wird. So kann verhindert werden, dass eine Fotovoltaikanlage lediglich als Investitionsobjekt mit möglichst hoher Rendite betrachtet wird und Dächer mit hochsubventionierten Kollektoren ausgestattet werden, die nicht effizient betrieben werden können.

Das Wachstum der Stadt Nürnberg erfordert allein für den Wohnbereich in den

Jahren zwischen 2004 und 2015 einen zusätzlichen Flächenbedarf von 73 bis 92 ha laut Flächennutzungsplan (STADT NÜRNBERG 2007). Industrie und Gewerbe sollen weiter wachsen. Gleichzeitig sollen die  $CO_2$ -Emissionen sinken. Dies kann über Neubauten nach neuestem Standard, energetische Sanierung des Präsenzbestandes und verstärkte Nutzung regenerativer Energien erreicht werden. Die Technologie hat im Bereich der aktiven Systeme zur Nutzung der Sonnenenergie in den vergangenen Jahrzehnten erhebliche Fortschritte gemacht. Die solare Stromerzeugung über Fotovoltaik erreicht Wirkungsgrade, in denen ein Betrieb sowohl ökologisch als auch ökonomisch sinnvoll ist.

Die durchgeführte Untersuchung zeigt, dass die Dächer einer Großstadt die Flächen für die Installation von Kollektoranlagen bieten und welche Stadtraumtypen die größten Potentiale aufweisen. Dies ermöglicht die gezielte Förderung solarenergetischer Umbau- und Sanierungsmaßnahmen. Sind die Flächengrößen für den Betrieb von Fotovoltaikanlagen nicht ausreichend, sollte der Schwerpunkt auf die Bereitstellung von Wärme mit hocheffizienten Flach- und Vakuumröhrenkollektoren gesetzt werden. Dadurch kann die Luftqualität durch Reduktion von Emissionen im Stadtbereich, insbesondere in den heizintensiven Wintermonaten, verbessert werden.

# Danksagung

Ich danke PD Dr. Cyrus Samimi für die Betreuung meiner Diplomarbeit.

Die Idee zu dieser Arbeit entstand während eines Praktikums im Bereich Klimaschutz und Energie beim Umweltamt der Stadt Nürnberg, dem ich für die großzügige Bereitstellung der benötigten Geodaten herzlich danken möchte.

Mein Dank gilt des Weiteren dem Bayerischen Landesamt für Geoinformation und Vermessung in München für die unkomplizierte und schnelle Zurverfügungstellung der von mir benötigten Laserscannerdaten.

Ich danke meinen Eltern für die großzügige Unterstützung ohne die diese Arbeit und mein Studium nicht möglich gewesen wären.

# Anhang A

## Sonnenwinkel und Sonnenazimut

### A.1 DIN 5034 Algorithmus zur Berechnung von Sonnenwinkel und Sonnenazimut

Beim DIN-Algorithmus werden über den Parameter

$$J' = 360^\circ \cdot \frac{\text{Tag des Jahres}}{\text{Zahl der Tage im Jahr}}$$

die Sonnendeklination

$$\delta(J') = \{0,3948 - 23,2559 \cdot \cos(J'+9,1^\circ) - 0,3915 \cdot \cos(2 \cdot J'+5,4^\circ) - 0,1764 \cdot \cos(3 \cdot J'+105,2^\circ)\}^\circ \quad (2.14)$$

sowie eine Zeitgleichung

$$Zgl(J') = \{0,0066 + 7,3525 \cdot \cos(J'+85,9^\circ) + 9,9359 \cdot \cos(2 \cdot J'+108,9^\circ) + 0,3387 \cdot \cos(3 \cdot J'+105,2^\circ)\} \text{ min} \quad (2.15)$$

berechnet. Aus der mitteleuropäischen Zeit *MEZ* wird abhängig von der geografischen Länge  $\lambda$  die mittlere Ortszeit

$$MOZ = MEZ - 4 \cdot (15^\circ - \lambda) \cdot \text{min}/^\circ \quad (2.16)$$

ermittelt, aus der sich mit Hilfe der Zeitgleichung *Zgl* die wahre Ortszeit

$$WOZ = MOZ + Zgl \quad (2.17)$$

ergibt. Mit der geografischen Breite  $\varphi$  des Ortes und dem Stundenwinkel

$$\omega = (12.00\text{h} - WOZ) \cdot 15^\circ/\text{h} \quad (2.18)$$

lassen sich nun Sonnenhöhe  $\gamma_s$  und Sonnenazimut  $\alpha_s$  berechnen:

$$\gamma_s = \arcsin(\cos \omega \cdot \cos \varphi \cdot \cos \delta + \sin \varphi \cdot \sin \delta) \quad (2.19)$$

$$\alpha_s = \begin{cases} 180^\circ - \arccos \frac{\sin \gamma_s \cdot \sin \varphi - \sin \delta}{\cos \gamma_s \cdot \cos \varphi} & \text{für } WOZ \leq 12.00\text{h} \\ 180^\circ + \arccos \frac{\sin \gamma_s \cdot \sin \varphi - \sin \delta}{\cos \gamma_s \cdot \cos \varphi} & \text{für } WOZ > 12.00\text{h} \end{cases} \quad (2.20)$$

Abbildung A.1: DIN-Algorithmus zur Berechnung von Sonnenwinkel und Sonnenazimut (QUASCHNING 2006, S.60)

## A.2 Mit SUNSET berechnete Sonnenwinkel und Sonnenazimut für 2007

Datum	Uhrzeit	Sonnenhöhe $\gamma_s$ in Grad	Sonnenazimut $\alpha_s$ in Grad	Datensatz
21.01.2007	9:00 Uhr	6,83	132,19	LPL6K
	12:00 Uhr	20,3	173,39	LPL6K
	15:00 Uhr	12,63	216,68	LPL6K
21.02.2007	9:00 Uhr	13,97	126,76	LPL6K
	12:00 Uhr	29,07	171,63	LPL6K
	15:00 Uhr	21,02	219,81	LPL6K
21.03.2007	9:00 Uhr	23,87	121,91	FPL6K
	12:00 Uhr	39,97	172,26	FPL6K
	15:00 Uhr	29,99	226,7	FPL6K
21.04.2007	9:00 Uhr	34,98	116,11	FPL6K
	12:00 Uhr	52,1	174,17	FPL6K
	15:00 Uhr	39,12	236,56	FPL6K
21.05.2007	9:00 Uhr	42,07	109,84	FPL6K
	12:00 Uhr	60,71	174,19	FPL6K
	15:00 Uhr	45,71	244,09	FPL6K
21.06.2007	9:00 Uhr	43,79	105,57	FPL6K
	12:00 Uhr	63,96	171	FPL6K
	15:00 Uhr	49,05	245,92	FPL6K
21.07.2007	9:00 Uhr	40,83	107,1	FPL6K
	12:00 Uhr	60,9	169,27	FPL6K
	15:00 Uhr	47,51	241,77	FPL6K
21.08.2007	9:00 Uhr	34,58	114,69	FPL6K
	12:00 Uhr	52,39	172,2	FPL6K
	15:00 Uhr	40,09	235,56	FPL6K
21.09.2007	9:00 Uhr	26,25	125,06	FPL6K
	12:00 Uhr	40,64	177,05	FPL6K
	15:00 Uhr	28,57	230,64	FPL6K
21.10.2007	9:00 Uhr	17,37	133,38	FPL6K
	12:00 Uhr	29,11	179,91	FPL6K
	15:00 Uhr	17,45	226,47	FPL6K
21.11.2007	9:00 Uhr	9,5	137,31	FPL6K
	12:00 Uhr	20,37	179,5	FPL6K
	15:00 Uhr	9,94	221,85	FPL6K
21.12.2007	9:00 Uhr	5,49	136,42	LPL6K
	12:00 Uhr	17,22	176,72	LPL6K
	15:00 Uhr	8,41	217,99	LPL6K

Abbildung A.2: Mit dem Programm SUNSET berechnete Sonnenwinkel und Sonnenazimut für das Jahr 2007

# Anhang B

## Karten

Auf den folgenden Seiten sind Ausschnittsvergrößerungen verschiedener Teilgebiete des Untersuchungsareals dargestellt.



Abbildung B.1: Eignungsklassifikation von Dachflächen für die Nutzung durch Solaranlagen: Ausschnitt Gründerzeitliches Viertel

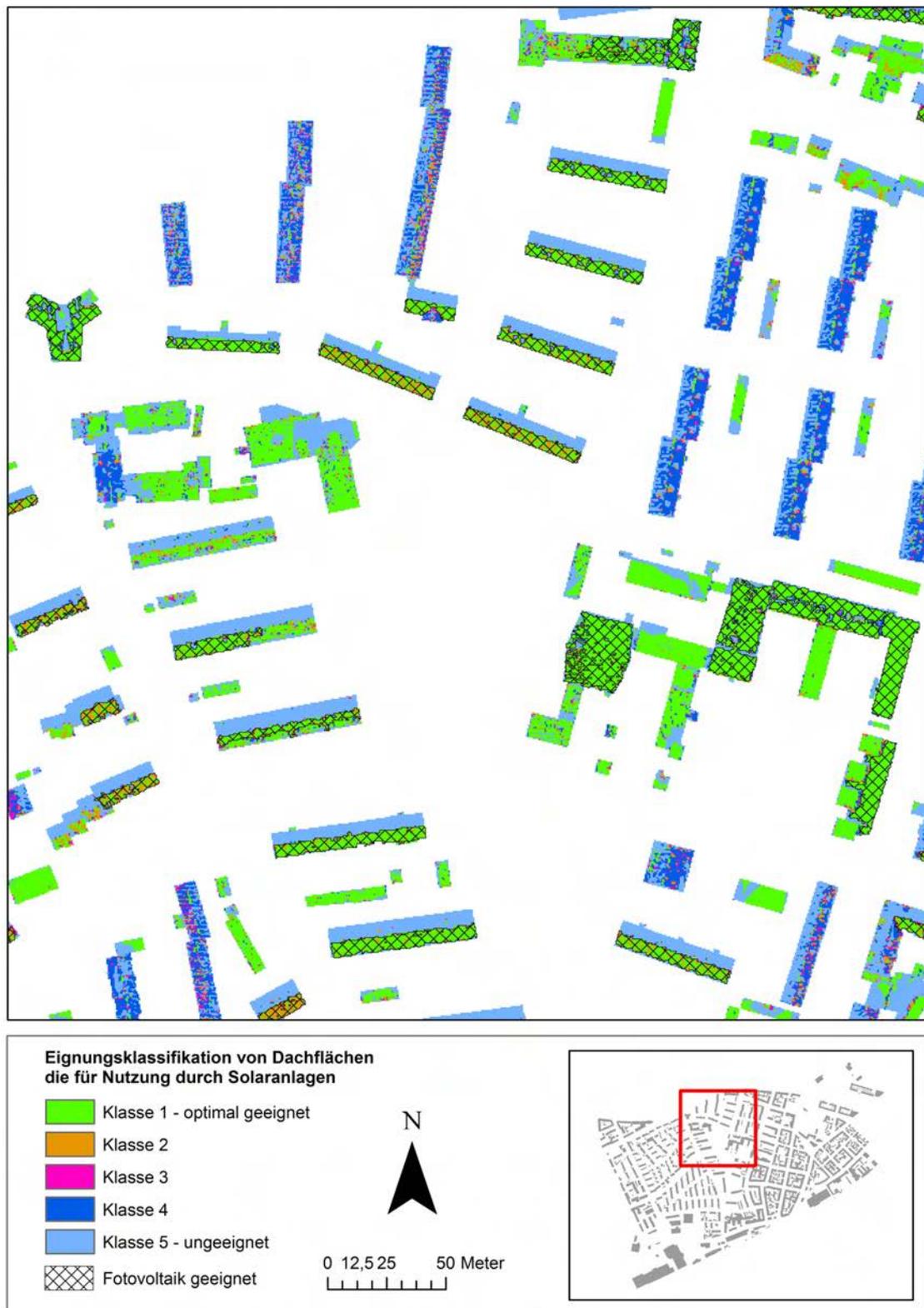


Abbildung B.2: Eignungsklassifikation von Dachflächen für die Nutzung durch Solaranlagen: Ausschnitt Siedlung des sozialen Wohnungsbaus der Nachkriegszeit

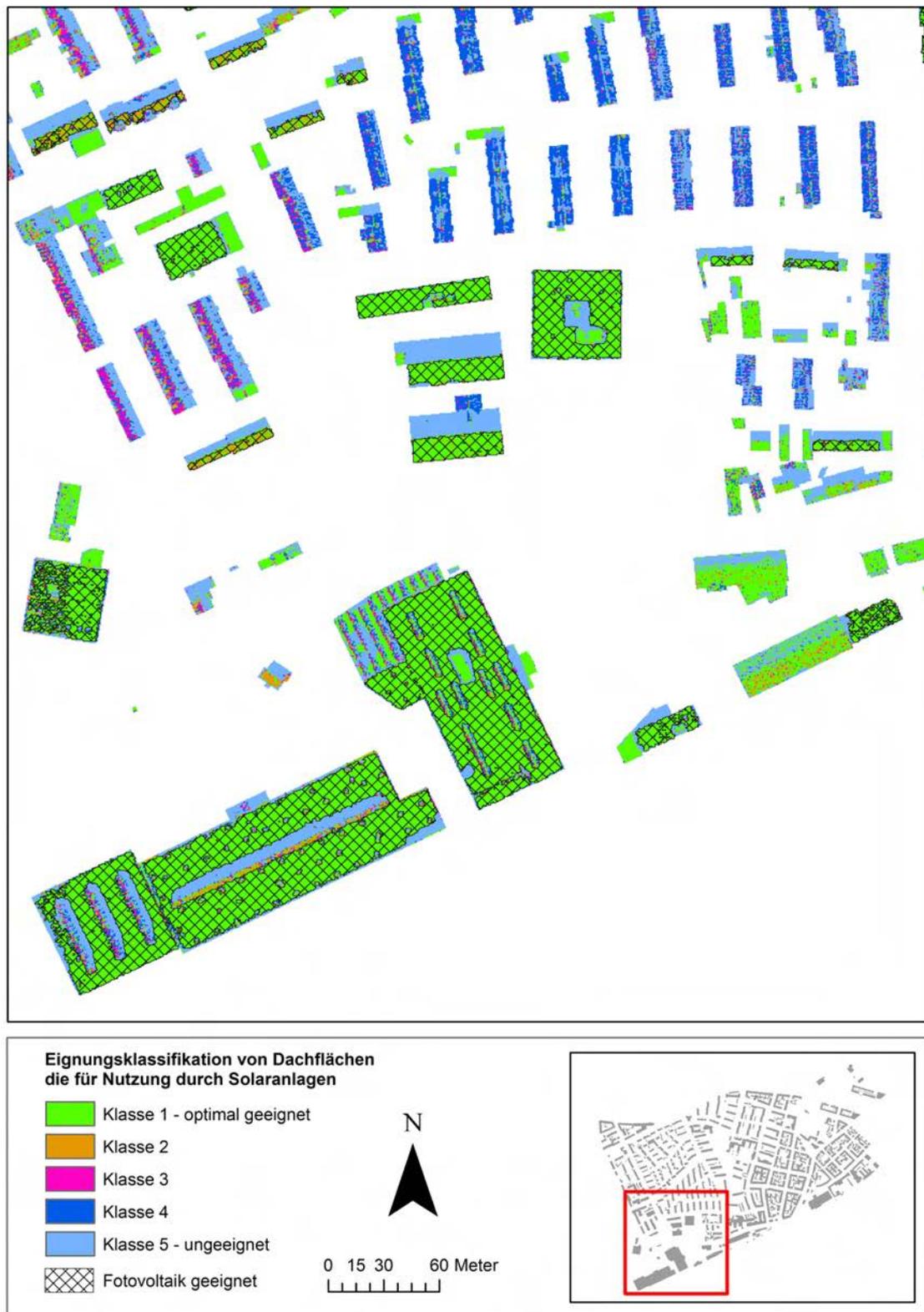


Abbildung B.3: Eignungsklassifikation von Dachflächen für die Nutzung durch Solaranlagen: Ausschnitt Südteil Reihenhaussiedlung / großflächige Hallen für Gewerbe und Industrie

# Abbildungsverzeichnis

2.1	„Primärenergieverbrauch nach Energieträgern in Deutschland im Jahr 2004“ (KALTSCHMITT U. A. 2006, S.8) . . . . .	3
2.2	„Endenergieverbrauch nach Verbrauchergruppen in Deutschland im Jahr 2003 (GHD Gewerbe Handel, Dienstleistungen)“ (KALTSCHMITT U. A. 2006, S.9) . . . . .	4
2.3	Globales Budget der solaren Strahlung im System Atmosphäre - Erdoberfläche. Die angegebenen %werte sind mit Unsicherheiten in der Größenordnung +- 2 behaftet. (ROEDEL 1992, S.53) . . . . .	5
2.4	Vergleich der Dimensionen jährlicher Sonneneinstrahlung mit globalen Reserven fossiler Energieträger (QUASCHNING 2006, S.36) . . . . .	5
2.5	Nachgeführte Fotovoltaikanlage auf einem Pultdach . . . . .	6
2.6	Schematische Darstellung eines solarthermischen Kollektors (WIESNER 2007, S.115) . . . . .	8
2.7	Aufbau eines einfachen Kunststoffkollektors (EISENMANN 2005, S.26) . . . . .	9
2.8	Dachintegrierter flüssigkeitsbasierter Flachkollektor integriert in ein Satteldach	10
2.9	Aufbau eines Luftkollektors (WITTWER 2007, S.13) . . . . .	10
2.10	Schematischer Aufbau eines Speicherkollektors (BRAUN U. MARKO 1997, S.276) . . . . .	11
2.12	Vorder- und Rückseite eines Hybridkollektors (JONG U. A. 2004, S.2) . . . . .	13
2.13	Aufbau einer Fotovoltaikzelle (PATEL 1999, S.126) . . . . .	14
2.14	Temperaturabhängigkeit von Solarzellen (QUASCHNING 2006, S.174) . . . . .	14
2.15	Vorderseite einer RISE-Solarzelle (SCHOCK 2005, S.45) . . . . .	15
2.16	Dünnschichtmodul aus Kupfer-Indium-Di-Selenid auf einer Metallfolie (SCHOCK 2005, S.45) . . . . .	16
2.17	Solarzelle, Solarmodul aus mehreren Solarzellen, Feld aus mehreren Solarmodulen (PATEL 1999, S.127) . . . . .	17
2.18	Übersicht der häufigsten Dachformen in Deutschland (SCHMITT U. HEENE 2001, S.475) . . . . .	20
2.19	Satteldach mit Schleppgauben, Kunigundenstraße . . . . .	20

2.20	Auswirkungen von Schatten auf Zellen eines Fotovoltaikmodules (PATEL 1999, S.136) . . . . .	22
2.21	Aufnahme der Umgebung eines potentiellen Standortes für Solaranlagen mit einem Schattenanalysator (QUASCHNING 2006, S.70) . . . . .	23
2.22	Beispiel für die mögliche Verschattung eines Flachdaches durch einen Baum direkt neben dem Gebäude . . . . .	23
2.23	Geometrische Verhältnisse einer aufgeständerten Solaranlage (QUASCHNING 2006, S.75) . . . . .	24
2.24	„Minimaler Dachflächenbedarf für die aktive Solarenergienutzung zur Warmwasserbereitung und Stromerzeugung. Bezugsgröße ist die Bruttogrundfläche der Gebäude.“ (HELBING U. A. 1999, S.163) . . . . .	25
2.25	Integration einer Fotovoltaikanlage in das Satteldach eines Reihenhauses, Konstanzenstraße . . . . .	26
2.26	Untersuchungsgebiet: Luftaufnahme von 2006 mit Beispielfotos . . . . .	28
2.27	Gebäude des 19. und frühen 20. Jahrhunderts prägen die Schweinauer Straße.	29
2.28	Sanierte 1950er Jahre Siedlung mit Fotovoltaikanlage, Leopoldstraße. . . . .	31
3.1	Vergleich unterschiedlicher Potentialstudien zum technischen Stromerzeugungspotential für Photovoltaik in Deutschland (BERNREUTER 2002) . . . . .	32
3.2	Abgrenzung des Potentialbegriffs nach (SCHNEIDER U. KALTSCHMITT 2005, S.21) . . . . .	33
3.3	Abgrenzung des Potentialbegriffs nach QUASCHNING (2000, S.42) . . . . .	34
4.1	Ausschnitt aus der digitalen Stadtgrundkarte . . . . .	38
4.2	„Abtastender Laser im Flugzeug“ (KRAUS 2004, S.450) . . . . .	39
4.3	„Erstes (oben) und letztes (unten) Echo an unterschiedlichen Objekten sowie Spiegelung und zu große Absorption“ (KRAUS 2004, S.452) . . . . .	39
4.4	Vergleich zwischen DOM aus First-Pulse und Last-Pulse Daten . . . . .	40
4.5	Ausschnitt aus dem Luftbild von 2006 . . . . .	42
4.6	Winkelbezeichnungen des Sonnenstandes . . . . .	43
4.7	Benutzeroberfläche von Sunset . . . . .	45
5.1	Durchgeführte Arbeitsschritte . . . . .	48
5.2	Visualisierung der abweichenden Z-Werte im TIN aus FP-Signal (links) und nach Entfernen und erneuter Triangulation (rechts) . . . . .	50
5.3	Vergleich zwischen TIN und Orthofoto. . . . .	51
5.4	Vergleich zwischen hillshade auf dem FPL6K-TIN und einem Orthofoto von 2006 . . . . .	52
5.5	Verteilung der durchschnittlichen Rasterwerte der durchgeführten Beleuchtungssimulation für das Jahr 2007 . . . . .	53

5.7	Erstellen eines normalisierten Oberflächenmodells aus der Differenz eines DOM und eines DGM . . . . .	53
5.6	Errechnete gebäudebedingte Verschattung der Dachflächen . . . . .	54
5.8	Blockmodell eines Gründerzeitblockes mit einer Höhenauflösung von einem Meter und simulierter Verschattung am 21.12.2007 um 12:00 Uhr . . . . .	55
5.9	Ausschnitt des auf sieben Gebäudehöhenstufen vereinfachten Blockmodells des Untersuchungsareals . . . . .	57
5.10	Vergleich zwischen den Schattenwürfen des Blockmodells und einem Orthofoto von 2006 . . . . .	58
5.11	Errechnete standortbedingte Verschattung der Dachflächen . . . . .	59
5.12	Ausschnitt des Rasters der ganzjährigen durchschnittlichen standortbedingten Verschattung . . . . .	60
5.13	Berechnete Ausrichtung der Dachflächen . . . . .	61
5.14	Berechnete Neigung der Dachflächen . . . . .	62
5.15	Reklassifikationsschema der Exposition in 8 Klassen und der Dachneigung in 3 Klassen . . . . .	63
5.17	Beispiel einer Abfrage mit dem Raster Calculator . . . . .	63
5.16	Klassifikationsschema für die Eignung einer Dachfläche für solarenergetische Nutzung . . . . .	64
5.18	Eignung von Dachflächen für die Nutzung durch Solaranlagen . . . . .	66
5.19	Klassifikation der Flächen hinsichtlich ihrer Eignung für Fotovoltaikanlagen . . . . .	67
5.20	Verteilung der Dachneigungen zwischen 10° und 60° . . . . .	67
5.21	Eignung von Dachflächen für die Nutzung durch großflächige Fotovoltaikanlagen . . . . .	69
6.1	Anteile der Eignungsklassen in Bezug auf die Bruttogrundfläche . . . . .	70
6.2	Vergleich zwischen dem Ergebnis der Eignungsklassifikation und dem Orthofoto von 2006 am Beispiel eines gründerzeitlichen Blocks an der Hermannstraße . . . . .	71
6.3	Typischer Gründerzeitbau in der Schweinauer Straße, für Fotovoltaik ungeeignet . . . . .	72
6.4	Vergleich zwischen dem Ergebnis der Eignungsklassifikation und dem Orthofoto von 2006 am Beispiel der Siedlung der Wohnungsbaugenossenschaft Nürnberg südlich der Rothenburger Straße. . . . .	73
6.5	Mit Fotovoltaikanlage ausgestattete Süddachfläche in der Zollerstraße . . . . .	74
6.6	Vergleich zwischen dem Ergebnis der Eignungsklassifikation und dem Orthofoto von 2006 am Beispiel einer Reihenhaussiedlung im Westen des Untersuchungsgebietes . . . . .	75

6.7	Vergleich zwischen dem Ergebnis der Eignungsklassifikation und dem Orthofoto von 2006 am Beispiel eines modernen Bürogebäudes an der Rothenburger Straße . . . . .	76
6.8	Vergleich zwischen dem Ergebnis der Eignungsklassifikation und dem Orthofoto von 2006 am Beispiel einiger Bauten an der Geisseestraße . . . . .	78
A.1	DIN-Algorithmus zur Berechnung von Sonnenwinkel und Sonnenazimut (QUASCHNING 2006, S.60) . . . . .	85
A.2	Mit dem Programm SUNSET berechnete Sonnenwinkel und Sonnenazimut für das Jahr 2007 . . . . .	86
B.1	Eignungsklassifikation von Dachflächen für die Nutzung durch Solaranlagen: Ausschnitt Gründerzeitliches Viertel . . . . .	88
B.2	Eignungsklassifikation von Dachflächen für die Nutzung durch Solaranlagen: Ausschnitt Siedlung des sozialen Wohnungsbaus der Nachkriegszeit . . . . .	89
B.3	Eignungsklassifikation von Dachflächen für die Nutzung durch Solaranlagen: Ausschnitt Südteil Reihenhaussiedlung / großflächige Hallen für Gewerbe und Industrie . . . . .	90

# Verwendete Abkürzungen

Abkürzung	Erklärung
GIS	Geographisches Informationssystem
KfW	Kreditanstalt für Wiederaufbau
EnEV	Energieeinsparverordnung
UV-Strahlung	Ultraviolette Strahlung
PV/T-Kollektor	Photovoltaisch-Thermischer Kollektor
RISE	Rear Integrated Single Evaporated
CIS	Kupfer-Indium-Diselenid
CAD	Computer Aided Design
BRD	Bundesrepublik Deutschland
DSGK	Digitale Stadtgrundkarte
LIDAR	Light Detection and Ranging
FP	First Pulse
LP	Last Pulse
IMU	Internal Measurement Unit
INS	Internal Navigation System
DOM	Digitales Oberflächenmodell
DGM	Digitales Geländemodell
LVG	Bayerisches Landesamt für Vermessung und Geoinformation
RGB	Rot Grün Blau
ASCII	American Standard Code für Information Interchange
GPS	Global Positioning System
TIN	Triangulated Irregular Network
FPL6K	Korrigiertes TIN aus FP-Daten im sechsstelligen Gauß-Krüger-Format
LPL6K	Korrigiertes TIN aus LP-Daten im sechsstelligen Gauß-Krüger-Format
DGM6	Digitales Geländemodell im sechsstelligen Gauß-Krüger-Format
nDOM	Normalisiertes digitales Oberflächenmodell
WBG	Wohnungsbaugenossenschaft Nürnberg

# Literaturverzeichnis

## **Aguado u. Burt 2004**

AGUADO, Edward ; BURT, James E.: *Understanding Weather and Climate*. Prentice Hall, 2004

## **Bauernfeind 2007**

BAUERNFEIND, Walter: Eingemeindungen und Größenwachstum. In: BAUMANN, Wolfgang (Hrsg.) ; DIEFENBACHER, Michael (Hrsg.) ; HERBERS, Hiltrud (Hrsg.) ; KRÜGER, Fred (Hrsg.) ; WIKTORIN, Dorothea (Hrsg.): *Der Nürnberg Atlas. Vielfalt und Wandel der Stadt im Kartenbild*. Emons, 2007, S. 48–49

## **Bayerisches Staatsministerium des Inneren 2007**

BAYERISCHES STAATSMINISTERIUM DES INNEREN: *Bayerische Bauordnung (BayBO) 2008*. Oberste Baubehörde, 2007

## **Bechberger 2005**

BECHBERGER, Mischa: Solarenergie. In: REICHE, Danyel (Hrsg.): *Grundlagen der Energiepolitik*. Verlag Peter Lang, 2005, S. 155–170

## **Bergmann u. Schaefer 2005**

BERGMANN, Ludwig ; SCHAEFER, Clemens: *Lehrbuch der Experimentalphysik*. Walter de Gruyter, 2005

## **Bernreuter 2002**

BERNREUTER, Johannes: Ein riesiges Potential - Killerargumente widerlegen (1): »Photovoltaik bleibt in Deutschland unbedeutend«. In: *Photon* 9 (2002), S. 57–60

## **Bernreuter 2004**

BERNREUTER, Johannes: Breit sortierte Dünnschicht-Technik. In: *Photon* 6 (2004), S. 48–60

## **Bill u. Fritsch 1994**

BILL, Ralf ; FRITSCH, Dieter: *Grundlagen der Geo-Informationssysteme; Band 1 Hardware, Software und Daten*. Herbert Wichmann, 1994

**Brand u. Reiche 2005**

BRAND, Ruth ; REICHE, Danyel: Status Quo des deutschen und weltweiten Energieverbrauchs. In: REICHE, Danyel (Hrsg.): *Grundlagen der Energiepolitik*. Verlag Peter Lang, 2005, S. 37–45

**Braun u. Marko 1997**

BRAUN, Peter ; MARKO, Achim: *Thermische Solarenergienutzung an Gebäuden*. Springer Verlag, 1997

**Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit 2007**

BUNDESMINISTERIUM FÜR UMWELT, NATURSCHUTZ UND REAKTORSICHERHEIT: *Erneuerbare Energien in Zahlen - nationale und internationale Entwicklung*. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU), Referat Öffentlichkeitsarbeit, 2007

**Eisenmann 2005**

EISENMANN, Wolfgang: Solarkollektoren - Technologien und Systemtechnik. In: *ForschungsVerbund Sonnenenergie (FVS) Themen 2005: Wärme und Kälte - Energie aus Sonne und Erde* (2005), S. 24–29

**Everding 2007**

EVERDING, Dagmar: Von der fossilen Stadt zur Solarstadt - Klimaschutz und solarer Städtebau. In: EVERDING, Dagmar (Hrsg.): *Solarer Städtebau*. Kohlhammer, 2007, S. 11–17

**Heinloth 2003**

HEINLOTH, Klaus: *Die Energiefrage.: Bedarf und Potentiale, Nutzen, Risiken und Kosten*. Vieweg Verlag, 2003

**Helbing u. a. 1999**

HELBING, Alfred ; BAUMÜLLER, Jürgen ; KERSCHGENS, Michael J.: *Stadtklima und Luftreinhalung*. Springer Verlag, 1999

**Jansa u. Stanek 2003**

JANSA, Josef ; STANEK, Heinz: Ableitung von Stadtmodellen aus Laser-Scanner-Daten, Grundrissplänen und photographischen Aufnahmen. In: *Österreichische Zeitschrift für Vermessung und Geoinformation (VGI)* 4 (2003), S. 262–270

**Jong u. a. 2004**

JONG, M.J.M. ; ELSWIJK, M.J. ; STROOTMAN, K.J.: Simulating PV-thermal collectors in large solar systems in TRNSYS. In: *ECN Energy in the Built Environment ECN-RX-04-028* (2004), S. 1–14

**Kaltschmitt u. a. 2006**

KALTSCHMITT, Martin ; STREICHER, Wolfgang ; WIESE, Andreas: *Erneuerbare Energien - Systemtechnik, Wirtschaftlichkeit, Umweltaspekte*. Springer Verlag, 2006

**Kaltschmitt u. Wiese 1993**

KALTSCHMITT, Martin ; WIESE, Andreas: *Erneuerbare Energieträger in Deutschland. Potentiale und Kosten*. Springer-Verlag, 1993

**Klärle u. Ludwig 2005**

KLÄRLE, Martina ; LUDWIG, Dorothea: Standortanalyse für Photovoltaik-Anlagen durch hochauflösende Sensoren in der Fernerkundung - Forschungsprojekt an der Fachhochschule Osnabrück. In: *GIS Business* 4 (2005), S. 16–18

**Konrad 2007**

KONRAD, Frank: *Planung von Photovoltaik-Anlagen*. Vieweg Verlag, 2007

**Kraus 2001**

KRAUS, Helmut: *Die Atmosphäre der Erde - Eine Einführung in die Meteorologie*. Springer Verlag, 2001

**Kraus 2004**

KRAUS, Karl: *Photogrammetrie: Geometrische Information aus Photographien und Laserscanneraufnahmen*. Walter de Gruyter, 2004

**Kraus 2005**

KRAUS, Karl: Laserscanning und Photogrammetrie im Dienste der Geoinformation. In: *AGIT Symposium 2005* (2005)

**Kreditanstalt für Wiederaufbau 2002**

KREDITANSTALT FÜR WIEDERAUFBAU: *100.000 Dächer-Solarstrom-Programm und KfW-Sonderprogramm Photovoltaik*. Kreditanstalt für Wiederaufbau (KfW), 2002

**Lueders 2007**

LUEDERS, Roland: Autarke Stromversorgung mit Photovoltaik und Brennstoffzelle - Solarstrom mit Wasserstoff speichern. In: *de - Der Elektro und Gebäudetechniker* 17 (2007), S. 34

**Lueger 1894**

LUEGER, Otto: *Otto Luegers Lexikon der gesamten Technik und ihrer Hilfswissenschaften*. Deutsche Verlags-Anstalt, 1894

**Luther 2005**

LUTHER, Joachim: Photovoltaik - Energielieferant der Zukunft - Basis einer nachhal-

tigen Stromversorgung und Faszination. In: *IHK-S-Fachjournal* 2005/2006 (2005), S. 14–20

**Niebler u. Krippner 2007**

NIEBLER, Dagmar ; KRIPPNER, Roland: Gestalterische Aspekte bei der Integration solartechnischer Systeme in die bestehende Gebäudehülle. In: EVERDING, Dagmar (Hrsg.): *Solarer Städtebau*. Kohlhammer, 2007, S. 88–100

**Patel 1999**

PATEL, Mukund R.: *Wind and Solar Power Systems*. CRC Press, 1999

**Peusser 1997**

PEUSSER, Felix A.: *Langzeiterfahrungen mit thermischen Solaranlagen*. ZfS-Rationelle Energietechnik GmbH, 1997

**Quaschnig 2000**

QUASCHNING, Volker: *Systemtechnik einer klimaverträglichen Elektrizitätsversorgung in Deutschland für das 21. Jahrhundert*. VDI-Verlag, 2000

**Quaschnig 2006**

QUASCHNING, Volker: *Regenerative Energiesysteme. Technologie - Berechnung - Simulation*. Carl Hanser Verlag, 2006

**Roedel 1992**

ROEDEL, Walter: *Physik unserer Umwelt: Die Atmosphäre*. Springer Verlag, 1992

**Schmitt u. Heene 2001**

SCHMITT, Heinrich ; HEENE, Andreas: *Hochbaukonstruktion. Die Bauteile und das Baugefüge. Grundlagen des heutigen Bauens*. Vieweg Verlag, 2001

**Schneider u. Kaltschmitt 2005**

SCHNEIDER, Sven ; KALTSCHMITT, Martin: Erneuerbare Energien. In: *BWK* 57 4 (2005), S. 87–96

**Schock 2005**

SCHOCK, Hans-Werner: Photovoltaik - Forschung im Zeichen der Nachhaltigkeit. In: *ForschungsVerbund Sonnenenergie (FVS) Themen 2005: Wärme und Kälte - Energie aus Sonne und Erde* (2005), S. 42–46

**Seidler 2004**

SEIDLER, Frank: *Die Zusammenarbeit des staatlichen Vermessungsamtes und des Amtes für Geoinformation und Bodenordnung in Nürnberg*. Amt für Geoinformation und Bodenordnung, 2004

**Simon 1988**

SIMON, Robert: Bleistiftschmuggler und Bier für Kinder: St. Leonhard - Schweinau. In: *Nürnberg zu Fuß*. VSA-Verlag, 1988, S. 245–255

**Stadt Nürnberg 2006**

STADT NÜRNBERG: *Klimaschutzbericht 2006 - Bilanzierung der CO<sub>2</sub>-Emissionen, Entwicklungstendenzen und Erfolgskontrolle*. etz Nürnberg, 2006

**Stadt Nürnberg 2007**

STADT NÜRNBERG: *Klimaschutzfahrplan 2010 2020 - Bilanzierung der CO<sub>2</sub>-Emissionen Entwicklungstendenzen und Erfolgskontrolle*. etz Nürnberg, 2007

**Umweltbundesamt 2004**

UMWELTBUNDESAMT: *Stoffbezogene Anforderungen an Photovoltaik-Produkte und deren Entsorgung*. Umwelt-Forschungs-Plan, FKZ 202 33 304 Endbericht, 2004

**Vögtle u. a. 2005**

VÖGTLE, Thomas ; STEINLE, Eberhard ; TOVARI, Daniel: Analyse flugzeuggetragener Laserscannerdaten. In: BÄHR, Hans-Peter (Hrsg.) ; VÖGTLE, Thomas (Hrsg.): *Digitale Bildverarbeitung - Anwendung in Photogrammetrie, Fernerkundung und GIS*. Wichmann, 2005, S. 135–182

**Vögtle u. Tovari 2005**

VÖGTLE, Thomas ; TOVARI, Daniel: Welches Dach eignet sich für Photovoltaik? In: *GeoBit* 12 (2005), S. 23–25

**Vollmer 2002**

VOLLMER, Michael: Über die Farben der Sonne und des Himmels: Rayleigh- und Miestreuung in Demonstrationsexperimenten. In: *CD-ROM der Frühjahrstagung 2002 des FV Didaktik der Physik in der DPG 2002 in Leipzig* (2002)

**Wachten u. Kloos 2007**

WACHTEN, Kunibert ; KLOOS, Michael: Handlungsmöglichkeiten eines solaren Städtebaus. In: EVERDING, Dagmar (Hrsg.): *Solarer Städtebau*. Kohlhammer, 2007, S. 18–87

**Wiesner 2007**

WIESNER, Wolfgang: Energetische Grundlagen solaren Bauens. In: EVERDING, Dagmar (Hrsg.): *Solarer Städtebau*. Kohlhammer, 2007, S. 101–124

**Wittwer 2007**

WITTWER, Volker: Solartechnik: Technische Entwicklungen für die elektrische Energieerzeugung und Wärmenutzung. In: *präsentiert auf: Solartechnik: Aktuelle technische Entwicklungen und Perspektiven* (2007)

**Wouters 2007**

WOUTERS, Frank: Potentiale passiver und aktiver Solarenergienutzung in den Stadt-  
raumtypen. In: EVERDING, Dagmar (Hrsg.): *Solarer Städtebau*. Kohlhammer, 2007,  
S. 229–245

**Zmarsly u. a. 2002**

ZMARSLY, Ewald ; KUTTLER, Wilhelm ; PETE, Hermann: *Meteorologisch-  
klimatologisches Grundwissen. Eine Einführung mit Übungen, Aufgaben und Lösungen*.  
UTB / Eugen Ulmer, 2002