



GEBÄUDEINTEGRATION VON PHOTOVOLTAIK (GIPV) IN EUROPA

Vom Fachbereich Architektur der Technischen Universität Darmstadt
genehmigte Dissertation zur Erlangung der Würde eines Doktor-Ingenieurs.

Vorgelegt von: DIPL.-ING. SILKE A. KRAWIETZ, Würzburg

Referent: PROFESSOR DIPL.-ING. JOHANN EISELE
Technische Universität Darmstadt (TUD)
Fachgebiet Entwerfen und Baugestaltung
Fachbereich Architektur

Korreferent: PROFESSOR DR.-ING. THOMAS HARTKOPF
Technische Universität Darmstadt (TUD)
Fachgebiet Regenerative Energien
Institut für Elektrische Energiewandlung
Fachbereich Elektrotechnik und Informationstechnik

Einreichung: 13. November 2002

Mündliche Prüfung: 09. Januar 2003

Darmstadt 2003

D 17



DISSERTATION

DANKSAGUNG

Allen Personen, die mich während der Bearbeitung hilfreich unterstützt haben, mit Rat, Tat und Finanzierungen und somit zu einer erfolgreichen Fertigstellung meiner Dissertation beigetragen haben, möchte ich hiermit danken, im Besonderen dem Referenten Herrn Professor Dipl.-Ing. Johann Eisele, für seine einzigartige Betreuung, sowie Herrn Professor Dr.-Ing. Thomas Hartkopf für die Übernahme des Korreferats und für seine ebenfalls herausragende Betreuung, da mich beide während der Bearbeitung mit starkem Interesse und Engagement geleitet, unterstützt und ermutigt haben, diesen Weg zu gehen.

Ferner danke ich Herrn Dr. Hartmut Wittkopf für seine tatkräftige und engagierte Unterstützung, die mir zur Durchführung und Fertigstellung der Dissertation verhalf. Hiermit danke ich ebenso vielmals der BSN-Stiftung, im speziellen Herrn Manfred Ebbers und Frau Christiane Beule, die mir grundlegend die Bearbeitung und Fertigstellung der Doktorarbeit durch ihre Finanzierung ermöglichten. Ferner danke ich Herrn Dipl.-Ing. Joachim Benemann und Herrn Dipl.-Phys. Oussama Chehab für ihre engagierte Unterstützung und Ermutigung zur Bearbeitung der Forschungsarbeit auf diesem Gebiet, sowie für deren finanziellen Hilfestellungen hierzu. Herrn Dr. Richard Einzinger danke ich für seine fachkundigen Beratungen, sowie Herrn Dipl.-Ing. Edwin Cunow für sein Interesse und seine fachliche Unterstützung. Außerdem möchte ich allen Personen danken, die mir die Durchführung und Fertigstellung der Projektstudie ermöglichten, den einzelnen Firmen und jeweiligen Fachingenieuren der Projekte.

Herrn Professor Dr. Martin A. Green danke ich vielmals für seine großartige Unterstützung und Ermöglichung des Einblicks in die Forschungstätigkeiten seines Lehrbereichs an der University of New South Wales (UNSW) in Sydney, Australien, sowie Herrn Professor Dr. Stuart Wenham, Herrn Dr. Robert Largent, Frau Jenny Hansen und allen weiteren Mitarbeitern des Departments von Herrn Professor Dr. Martin A. Green für ihre Hilfe und die Vermittlung detaillierter Fachkenntnisse im Bereich der Grundlagen und Forschungen der Photovoltaikentwicklung. Sämtlichen Personen, die mich in jeglicher Hinsicht unterstützt und zur Bearbeitung und Fertigstellung der Dissertation ermutigt haben, möchte ich hiermit danken, im Besonderen danke ich Herrn Dr. Paolo Bocci für seine Geduld und Hilfe in den verschiedenen Bereichen, Herrn Dr. Dante Caponera für seine Unterstützung, sowie meinen Eltern und meiner Schwester.



DISSERTATION

GLIEDERUNG DER DISSERTATION

AUFBAU DER DISSERTATION

- I** **THEMA**
- II** **STATUS PV / GIPV**
- III** **PROJEKTSTUDIE**
- IV** **VERALLGEMEINERUNG DER BEISPIELE**
- V** **KONKLUSION DER DISSERTATION**

Gliederung der Dissertation

1. THEMA

- 1.0 Thema der Dissertation
- 1.1 Motivation / Aktionsbedürfnis
- 1.2 Hintergründe

2. STATUS PV / GIPV

- 2.1 Marktsituation der Photovoltaik
- 2.2 Gebäudeintegration von Photovoltaik
„Vorurteile“ der Gebäudeintegration

3. PROJEKTSTUDIE

- Untersuchung der GIPV in Europa -
- 3.1 **Projektzusammenstellung**
 - Kriterien der Untersuchung
 - Faktoren
- 3.2 **Verifizierung der Projekte**

4. OBJEKTIVIERUNG DER BEISPIELE

- [Vergleich der Projekte]
- 4.0 **OBJEKTIVIERUNG**
- 4.0.1 TOUGHNESS-KRITERIEN / Vergleich
 - Erläuterungen
 - Vergleich der Projekte
 - Fassadenintegrationsbeispiele
 - Dachintegrationsbeispiele
- 4.1 **GRAPHISCHE PROJEKTÜBERSICHT**
 - Graphiken A,B, A/B
 - Architektonische Anwendung (‘Handhabung’)
 - Performance Ratio / Erläuterungen / Berechnung
 - Einstrahlungswerte der Projektstandorte
 - PR der Projekte mit Graphiken [PR] und [PR_{horiz}]
 - Auswertung der PR und PR_{horiz}-Ergebnisse
 - Überlagerungsgraphik von PR und PR_{horiz}

5. KONKLUSION DER DISSERTATIONSSTUDIE

- 5.0.1 Erkenntnisse aus der Dissertation
- 5.0.2 Weitere Einflussfaktoren
- 5.0.3 Ergebnisse der Toughness-Kriterien
- 5.0.4 Konklusion / Performance Ratio [PR], [PR_{horiz}]
SYNTHESE der Disserstationsstudie
- 5.1 **Ausblick in die Zukunft**
- 5.1.1 Zukunft der Gebäudeintegration von Photovoltaik

- ANHANG A** Photovoltaik-Technologie
- ANHANG B** Projektstudien - detaillierte Studien
- ANLAGE** Promotionsantrag vom 23.06.2000

1. THEMA

1.0	THEMA DER DISSERTATION	3
1.0.1	THEMENBESCHREIBUNG	3
	1.0.1.1 Erzieltes Resultat	
	1.0.1.2 Begründung zur Auswahl des Themas	
1.0.2	ABGRENZUNG DES THEMAS	4
1.0.3	ZIEL UND AUFBAU DER DISSERTATION	5
1.1	MOTIVATION / AKTIONSBEDÜRFNIS	7
1.1.1	FAKTEN	7
1.1.2	SITUATION FÜR GIPV / EXISTIERENDE STUDIEN	9
1.2	HINTERGRÜNDE	10
1.2.1	WORLD SUMMIT 2002 - JOHANNESBURG	11
	1.2.1.1 Nachhaltige Entwicklung / Informationen	
	- Übersicht 1972 - 2002	11
	- Hintergrundinformationen	11
	- Der Zeitplan	13
	- Website WSJ 2002	14
	- Gastkommentare	14
	- Pressemitteilungen	15
	- Websites zur (nationalen) Vorbereitung	16
1.2.2	ÖKOLOGISCHE SITUATION DER WELT / BEVÖLKERUNGSWACHSTUM	16
1.2.3	EINSATZ VON TECHNOLOGIE	17
1.2.4	NOTWENDIGKEIT FÜR ERNEUERBARE ENERGIEN	17
	Zusatzinformationen	19
	Bibliographie	19
	Wichtige Links zum Thema Nachhaltige Entwicklung / Johannesburg	20
	Weitere Quellen	22
	Abbildungsverzeichnis	24

2. STATUS PV / GIPV

2.0	STATUS DER PV / GIPV	27
2.1	MARKTSITUATION DER PHOTOVOLTAIK	27
2.1.1	MARKTSITUATION DER PHOTOVOLTAIK	27
	2.1.1.1 Der Photovoltaik-Boom	27
	- Überblick der PV-Produktion 2000	28
	2.1.1.2 Netzangeschlossene Märkte	30
	- Gebäudeintegrierte Photovoltaik	33
	2.1.1.3 Entwicklung des Photovoltaik-Marktes	34

2.1.2	HINDERUNGSGRÜNDE FÜR DEN VERSTÄRKTEN PV-EINSATZ	35
2.1.2.1	Allgemeine Kategorie / Gebäudeintegration	35
2.1.2.2	Wissenschaftliche Kategorie	36
2.1.3	KOSTEN FÜR PHOTOVOLTAIK-ELEKTRIZITÄT / METHODEN ZUR KOSTENREDUKTION	37
2.1.3.1	Reduktion der Kosten des Substrats	38
2.1.3.2	Entwicklung von Hocheffizienz-Zellen	39
2.1.3.3	Konzentrierung von Licht auf Solarzellen	39
2.1.3.4	Reduktion durch Gleichgewicht von System und Einkapselungskosten	39
2.2	GEBÄUDEINTEGRATION VON PHOTOVOLTAIK	40
2.2.1	‘VORURTEILE’ DER GEBÄUDEINTEGRATION	40
	Bibliographie	42
	Abbildungsverzeichnis	42
	Begriffserklärungen	43
3.	PROJEKTSTUDIE	45
3.0	PROJEKTSTUDIE DER DISSERTATION	47
3.0.1	RAHMENBEDINGUNGEN	47
3.0.2	ALLGEMEINE SCHWERPUNKTE	47
3.1	PROJEKTZUSAMMENSTELLUNG / ÜBERSICHT	48
3.1.1	KRITERIEN / UNTERSUCHUNGSFAKTOREN	
	- KURZVERSION	48
	- LANGVERSION	48
3.1.2	PROJEKTÜBERSICHTSSCHEMATA	49
3.2	VERIFIZIERUNG DER PROJEKTE / KURZFORM	49
	- BREITENGRAD 55°N / 53°N	
	Solar Office, Newcastle, U.K.	50
	Tobias Grau, Hamburg, D	50
	- BREITENGRAD 52°N	
	BP-Pavillon, Port Talbot, U.K.	50
	Service-Pavillon, Steinhuder Meer, D	51
	UTZ, Berlin, D	51
	Expo Messehalle 7, Hannover, D	51
	Expo-Turm, Hameln, D	52
	Üstra-Projekt, Expo, Hannover, D	52
	- BREITENGRAD 51°N	
	Fortbildungsakademie, Herne, D	52

- BREITENGRAD 49°N / 48°N		
	Nikolaus-Fiebiger-Zentrum, Erlangen, D	53
	Haus Sobek, Stuttgart, D	53
	Solardach Messe München-Riem, D	53
- BREITENGRAD 47°N		
	Solkraftwertk Stadtwerke Konstanz, D	54
4. OBJEKTIVIERUNG		55
4.0 OBJEKTIVIERUNG DER PROJEKTBEISPIELE		58
4.0.1 TOUGHNESS-KRITERIEN /		59
4.0.1.1 ALLGEMEINE ERLÄUTERUNG		60
4.0.1.2 BEISPIELSCHEMATA		61
4.0.1.3 VERGLEICH DER PROJEKTE		61
Fassadenintegrationsbeispiele		
- 55° N / Solar-Office / Newcastle, U.K.		62
- 53° N / Tobias Grau / Hamburg, D		62
- 52° N / UTZ / Berlin, D		64
- 52° N / Messehalle Expo / Hannover, D		64
- 52° N / Expo-Turm (Mittelteil) / Hameln, D		66
- 52° N / Expo-Turm (Solarflügel) / Hameln, D		66
- 52° N / Üstra / Hannover, D		68
- 51° N / Mont-Cernis / Herne, D		68
- 49° N / KMF-Zentrum / Erlangen, D		70
Dachintegrationsbeispiele		
- 52° N / BP-Pavillon / Birmingham, U.K.		70
- 52° N / S-Pavillon / Steinhuder Meer, D		72
- 52° N / Messehalle Expo / Hannover, D		72
- 52° N / Üstra / Hannover, D		74
- 51° N / Mont-Cernis / Herne, D		74
- 49° N / KMF-Zentrum / Erlangen, D		76
- 48° N / Haus Sobek R128 / Stuttgart, D		76
- 48° N / Solardach Messe München, D		78
- 47° N / Stadtwerke Konstanz, D		78
4.1 GRAPHISCHE PROJEKTÜBERSICHT		80
4.1.1 GRAPHIK A		80
4.1.2 GRAPHIK B		81
4.1.3 GRAPHIK A/B		83
4.1.4 ARCHITEKTONISCHE ANWENDUNG / HANDHABUNG DER GRAPHIKEN		84
4.1.5 PERFORMANCE RATIO [PR] - ERLÄUTERUNGEN / BERECHNUNGSGRUNDLAGEN		85
4.1.6 KARTEN UND TABELLENÜBERSICHT DER EINSTRAHLUNGSWERTE		90

4.1.7	GRAPHIKEN [PR] A, B, A/B	95
4.1.8	PERFORMANCE RATIO _{HORIZ} / GRAPHIKEN [PR _{HORIZ}] A, B, A/B	95
4.1.9	AUSWERTUNG DER PR-ERGEBNISSE	98
4.1.10	AUSWERTUNG DER PR _{HORIZ} -ERGEBNISSE	102
4.1.11	ÜBERLAGERUNG DER GRAPHIKEN PR UND PR _{HORIZ}	104
	Bibliographie / Kapitel 4	106
	Abbildungsverzeichnis / Begriffserklärungen	106

5. KONKLUSION

5.0	KONKLUSION DER DISSERTATION	111
5.0.1	GEWONNENE ERKENNTNISSE [GIPV]	111
	Grundlegende Feststellungen	111
	- Einfluss des Breitengrades	111
	Allgemeine Erkenntnisse	114
	- Dach-und Fassadenintegration im Vergleich	114
5.0.2	WEITERE EINFLUSSFAKTOREN	115
5.0.3	ERGEBNISSE DER `TOUGHNESS-KRITERIEN	118
	T - Photovoltaik-Typ	118
	- Besonderheiten	119
	- Glas/Glas-Module	119
	- Farbe	119
	- Wirkungsgrad	121
	- Resumé der T-Kriterien	122
	O - Ort [Standort / Lage / Ausrichtung]	124
	- Breitengrad	124
	- Ausrichtung	125
	- Nicht erwartete Resultate	129
	- Ergebnis	130
	- Resumé der O-Kriterien	130
	U - Ort [Standort / Lage / Ausrichtung]	130
	G - GIPV / Gestaltungsfaktor	130
	H - Hindernisse / Verschattungen	131
	- Ohne Verschattung / Dachintegration	132
	- Mit Teilverschattung / Dachintegration	133
	- Ohne Verschattung / Fassadenintegration	123
	- Mit Teilverschattung / Fassadenintegration	134
	- Teilverschattung / Fassade / 2-achsige Nachführung	135
	- Besonderheiten	136
	- Anzahl der Wechselrichter	137
	- Einfluß meteorologischer Daten	139
	- „Add-On“-Systeme	139
	- Ergebnis / Besonderheiten	140
	N - Neigung der Photovoltaik	141
	E - Ertrag (Spezifischer Jahresertrag)	143
	S - Spezifischer Ertrag / a [Mittelwert]	144
	S - Spitzenwert Spezifischer Jahresertrag	145

	Allgemeine Erkenntnisse	145
5.0.4	KONKLUSION / PERFORMANCE RATIO [PR], [PR _{horiz}]	147
	SYNTHESE AUS DER DISSERTATIONSSTUDIE	152
5.1	AUSBLICK IN DIE ZUKUNFT	155
5.1.1	ZUKUNFT DER GEBÄUDEINTEGRATION VON PHOTOVOLTAIK	156
	Bibliographie	157

ANHANG A

A.0	DIE PHOTOVOLTAIK-TECHNOLOGIE	159
	ABSICHT / ZIEL	162
	FORMELZEICHEN UND EINHEITEN	163
A.0	PHOTOVOLTAIK-TECHNOLOGIE	
A.0.1	ELEKTRIZITÄT AUS DER SONNE / HISTORISCHER ÜBERBLICK	164 164
A.1	SOLARSTRAHLUNG	
A.1.1	EINLEITUNG	168
A.1.2	ENERGIE VON DER SONNE	169
A.1.3	ZUSAMMENFASSUNG	175
A.2	GRUNDLAGEN DER PV-TECHNOLOGIE	
A.2.1	EINLEITUNG	176
A.2.1.1	Sonnenlicht und Solarzellen	176
A.2.2	PHOTOVOLTAIK-BASISINFORMATIONEN	176
A.2.2.1	Solarzellen	176
A.2.2.2	Mono- und polykristalline Zellen	178
	- Oberflächentexturierung	178
	- Wie man die Effizienz steigert	179
	- „Buried contact“-Zelle	180
	- Streifen- oder Bandsubstrate	180
A.2.2.3	Dünnschichtzellen	181
A.2.2.4	Modulkonstruktion	181
A.2.2.5	Modulgestaltung	181
A.2.3	PV-DÜNNSCICHT-TECHNOLOGIE	182
A.2.3.1	Dünne Filme	182
A.2.3.2	Andere Materialien	186
A.2.4	SOLARZELLEN IM ÜBERBLICK	188

A.3	GEBÄUDEINTEGRATION VON PHOTOVOLTAIK	
A.3.1	ASPEKTE DER GEBÄUDEINTEGRATION	189
A.3.1.1	Typologien der Gebäudeintegration	189
	Komponenten einer PV-Anlage	190
A.3.1.2	Sonnenenergie und Wirkungsgrad	191
A.3.1.3	Nennleistung	192
A.3.1.4	Jahresertrag / Orientierung der GIPV	192
A.3.1.5	Bedeutung der richtigen Ausrichtung	194
A.3.1.6	Stromproduktion	195
A.3.1.7	Energieersparnis	196
A.3.1.8	Kosten einer Photovoltaikanlage	196
A.3.1.9	Energetische Amortisation	196
A.4	ERTRAGSBEEINFLUSSENDE PLANUNGSFAKTOREN IM ÜBERBLICK	197
A.4.1	AUSRICHTUNG	197
A.4.2	HINTERLÜFTUNG	197
A.4.3	ABSCHATTUNG UND UNTERSCHIEDLICHE ORIENTIERUNGEN	198
A.5	SPEZIFISCHE WERTE FÜR PHOTOVOLTAIK	201
A.I	Bibliographie	204
A.II	Abbildungsverzeichnis	208
A.III	Tabellenverzeichnis	209
A.IV	Zusatzinformationen	209
A.V	Detailinformationen / PV-Technologie	210
	- Hocheffizienz-Zellen	210
	- 'Buried contact'-Zelle	211
A.VI	Begriffserklärungen	212

ANHANG B

B.1	PROJEKT 1 / SOLAR OFFICE - NEWCASTLE, U.K.	B.01
B.2	PROJEKT 2 / TOBIAS GRAU - HAMBURG	B.02
B.3	PROJEKT 3 / BP-PAVILLON - BIRMINGHAM, U.K.	B.03
B.4	PROJEKT 4 / STEINHUDER MEER - STEINHUDE	B.04
B.5	PROJEKT 5 / UMWELT-TECHNOLOGIE-ZENTRUM - BERLIN	B.05
B.6	PROJEKT 6 / EXPO-MESSEHALLE - HANNOVER	B.06
B.7	PROJEKT 7 / EXPO-TURM - HAMELN-EMMERTHAL	B.07
B.8	PROJEKT 8 / ÜSTRA-BETRIEBSBAHNHOF - HANNOVER	B.08
B.9	PROJEKT 9 / FORTBILDUNGSKADEMIE MONT-CENIS - HERNE	B.09
B.10	PROJEKT 10 / KMF-ZENTRUM - ERLANGEN	B.10
B.11	PROJEKT 11 / HAUS SOBEK R128 - STUTTGART	B.11
B.12	PROJEKT 12 / MESSEDACH - MÜNCHEN-RIEM	B.12
B.13	PROJEKT 13 / STADTWERKE KONSTANZ - KONSTANZ	B.13