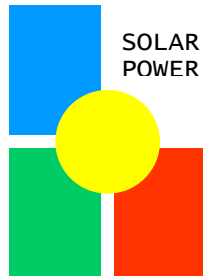


Prof. Volker Hoffmann
Gruppe für Nachhaltigkeit und Technologie
Department Management, Technology and Economy
ETH Zürich

SUNVENTION



Wirtschaftlichkeitsanalyse und Markteinführung eines solaren Energiesystems für Gewächshäuser

22.11.04 bis 18.02.05
Sunvention GmbH, Lörrach



Heini Studer
Sichternstrasse 18
4410 Liestal
hstuder@gmx.net
<http://n.ethz.ch/student/hestuder>

Management Summary

Ausgangslage

Um gute Wachstumsbedingungen zu schaffen benötigen Gewächshäuser in sonnenreichen Ländern heute viel Energie – tagsüber zur Kühlung, nachts zur Heizung. Gleichzeitig verfügen jene Regionen über ideale Voraussetzungen zur energetischen Nutzung der Sonnenstrahlung. Konzentrierende Anwendungen der Solartechnologie ermöglichen hohe Wirkungsgrade, können den diffusen Lichtanteil jedoch nicht nutzen.

Wettbewerbsvorteil

Das solare Energiesystem von Sunvention wird analog zu Beschattungssystemen unter dem Gewächshausdach installiert. Die direkte Strahlung wird von konzentrierender Photovoltaik in Elektrizität und speicherbare Wärme umgewandelt, womit sich die Hitzebelastung auf die Gewächshauskultur vermindert. Aufwendungen zur Kühlung entfallen, der nächtliche Wärmebedarf kann intern gedeckt werden, und das verbleibende diffuse Licht ermöglicht ein optimales Pflanzenwachstum. Da die solare Anlage unter der schützenden Hülle des Gewächshauses angeordnet ist, ist eine leichte, materialsparende Konstruktion möglich. Die Gewächshausfläche wird gleichzeitig agronomisch und solar-energetisch genutzt.



Wirtschaftlichkeit

Die erforderliche Investition pro Flächeneinheit ist nahezu 10mal höher als jene in eine konventionelle Gewächshauskonstruktion. Gegenüber anderen Photovoltaiksystemen sind die Kosten hingegen halbiert. Transmissionsverluste (Gewächshaushülle) reduzieren den Elektrizitätsoutput, doch die niedrigen Investitionskosten sowie Rückflüsse aus Wärmeeinsparung und verbessertem Pflanzenwachs führen zu verhältnismässig günstigen Gestehungskosten zwischen 14 und 19 €-cent pro Kilowattstunde. Die verbreiteten Solarsysteme benötigen rund 30 €-cent/kWh, weshalb staatliche Förderungsprogramme entsprechend hohe Einspeisevergütungen gewähren. Die Berechnungen für Südspanien resultiert deshalb in einer attraktiven Rendite (IRR) von 15%. Werden hocheffiziente Gallium-Arsenid-Solarzellen verwendet, so nehmen zwar die Initialkosten zu, doch die Rentabilität steigt auf 25%, und innerhalb von 4 Jahren zahlt sich die Investition zurück.

Marktpotential

Alleine in Spanien liegen 33'750 Hektar Gewächshausfläche. Die Ausstattung von nur 1-2% dieser Fläche mit einem solaren Energiesystem würde zu einem Output in der Grössenordnung der weltweiten Solarstromproduktion von 2001 führen. Weit grösser sind Flächen in Asien. Japan liegt weiter südlich als die Mittelmeerländer und verfügt nach China über die grösste Gewächshausfläche. Die Energiepreise sind hoch und erneuerbare Energien werden gefördert. Attraktiv sind auch sonnenreiche Wüstenstaaten, wo unter grossem Energieaufwand eine lokale Gemüseproduktion angestrebt wird.

Das solare Energiesystem von Sunvention ist nicht nur ein Schritt in Richtung preiswerte Sonnenenergie. Die Gewächshausindustrie, deren Energiebedarf heute CO₂-Emissionen von nahezu 1'000 Tonnen pro Hektar verursacht, trägt zukünftig bei zu einer nachhaltigen Versorgung mit Lebensmitteln und Energie.

Zürich, 17.02.05

Heini Studer

Inhaltsverzeichnis

1	Grundlagen	4
1.1	Einleitung	4
1.2	Definitionen	5
1.3	Vorgehen	7
1.4	Sonnenstrahlung	8
2	Gewächshaus	11
2.1	Anwendung	11
2.2	Konstruktion	12
2.3	Gewächshausklima	13
2.4	Solare Gewächshäuser	15
3	Solartechnologie	17
3.1	Technologieparameter	17
3.2	Anwendung	19
3.3	Wirtschaftlichkeit und Förderung	20
4	Solares Energiesystems für Gewächshäuser	22
4.1	Technische Neuheiten	22
4.2	Sunflower	24
4.3	Sunray	25
4.4	Systemverbindung	26
5	Solare Ausbeute	28
5.1	Strahlungsdaten	28
5.2	Datenverarbeitung	30
5.3	Energieoutput	32
5.4	Gewächshausklima	36
6	Wirtschaftlichkeit	38
6.1	Investitionskosten	38
6.2	Geldflüsse	41
6.3	Rentabilität	42
7	Markteinführung	45
7.1	Voraussetzungen	45
7.2	Marktattraktivität	47
8	Schlussfolgerung	48
8.1	Zielerreichung	48
8.2	Ausblick	49
9	Verzeichnisse	50
9.1	Literaturverzeichnis	50
9.2	Abbildungsverzeichnis	52
9.3	Tabellenverzeichnis	54
9.4	Anhang	54

1 Grundlagen

1.1 Einleitung

1.1.1 Projektrahmen

In der Diplomarbeit soll eine Problemstellung aus der Praxis angegangen werden, welche auch allgemein von wissenschaftlichem Interesse ist. Sie stellt den Abschluss des Studiums in Betriebs- und Produktionswissenschaften der ETH Zürich dar. Vorgehen, Methodik, Aufgabenerfüllung sowie Bericht und Präsentation werden durch die Professur bewertet.

Zeitraum: 22.11.04 bis 18.02.05

Professur: Prof. Volker Hoffmann yhoffmann@ethz.ch
Gruppe für Nachhaltigkeit und Technologie
Department Management, Technology and Economy, ETH Zürich,
Zürichbergstrasse 18, CH-8028 Zürich

Betrieb: Sunvention GmbH
Industriestrasse 8
D-79541 Lörrach

Claus Colmsan-Freyberger ccf@bsrsolar.com
Jürgen Kleinwächter jkl@bsrsolar.com

Student: Heini Studer hstuder@gmx.net
Sichternstrasse 18
CH-4410 Liestal

1.1.2 Aufgabenstellung

Sunvention ist eine Gesellschaft, die in der Entwicklung und Vermarktung von solaren Systemen tätig ist. Ein Produkt ist „Sunflower“, ein solares Energiesystem für Gewächshäuser, das vor allem in sonnenintensiven Zonen eingesetzt werden soll. Mit der leichten und kostengünstigen Konstruktion, die unter dem schützenden Gewächshausdach untergebracht ist, wird einerseits die Sonneneinstrahlung durch photovoltaische und/oder thermische Systeme in brauchbare Energie umgesetzt und andererseits werden mit einer selektiven Nutzung des Sonnenlichtes im Gewächshaus bessere Bedingungen für das Pflanzenwachstum geschaffen.

Um die abschließenden Entwicklungsarbeiten und die darauf folgenden Vermarktungsaktivitäten für das solare Energiesystem zielgerecht und erfolgreich durchzuführen, muss Sunvention die folgende Fragen beantworten:

- a) Welchen Einfluss hat das solare Energiesystem auf das Gewächshausklima (Strahlungsverhältnisse und Wärmehaushalt)? Was sind Vor- und Nachteile für den Pflanzenwuchs? Wie viel Energie kann in verschiedenen Klimazonen extern (thermisch oder photovoltaisch) genutzt werden?
- b) Wie sieht der Gewächshausmarkt heute aus (technisch und geographisch)? Was sind Voraussetzungen für den Einsatz des solaren Energiesystems? Was sind attraktive Marktsegmente?
- c) Was ist die Wirtschaftlichkeit des solarem Energiesystems in Abhängigkeit von verschiedenen Parametern (Gesamt Betrachtung der energetischen und agronomischen Vorteile): Standort (Sonneneinstrahlung, klimatische Verhältnisse, örtliche alternative Energieversorgung und landwirtschaftliche Nutzung), Größe („economy of scale“), Nutzung der elektrischen und thermischen Energie (intern oder extern, Netzeinspeisung der Elektrizität).

- d) Welche Produktstrategie ist sinnvoll: Standardprodukt oder kundenspezifische Anpassungen?
Wer sind die Kunden, wie werden diese erreicht?

Nach einer Analyse von Technologie und Markt ist ein Konzept für die Markteinführung von Sunflower aufzustellen und die Erfolgswahrscheinlichkeit des Gewächshaus-Energiesystems einzuschätzen. Für diese Beurteilung sind geeignete Kriterien zu einer ganzheitlichen Nachhaltigkeitsbetrachtung heranzuziehen oder zu entwickeln. Die Arbeit soll einerseits das Potential der Solarenergienutzung in Gewächshäusern aufzeigen, andererseits eine Empfehlungen für die weitere Entwicklungs- und Vermarktungstätigkeit von Sunvention darstellen.

Zürich, 04.11.04

Volker Hoffmann / Claus Colman-Freyberger / Heini Studer

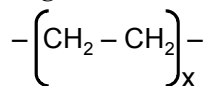
1.2 Definitionen

1.2.1 Begriffe

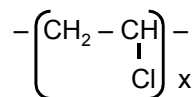
- **Gewächshaus:** „Heizbarer Raum mit lichtdurchlässigem Dach und Wänden, um Pflanzen unabhängig von den klimatischen Verhältnissen an- und aufzuziehen. Meist mit Lüftung und gelegentlich mit Zusatzbeleuchtung und Beregnungsanlagen. Nach den mittleren Temperaturen in der kalten Jahreszeit unterscheidet man zwischen
 - dem Kalthaus (bis 12°C)
 - dem temperierten Haus (12 – 18°C) und
 - dem Warmhaus (**Treibhaus**, ab 18°C)“

(Brockhaus 1993-2, S.360). Wie in Kapitel 2 ausgeführt stehen je nach Region andere Eigenschaften als die Heizbarkeit im Vordergrund. Gemeinsam haben alle Gewächshäuser die Möglichkeit, Klimafaktoren zugunsten des Pflanzenwachstums zu modifizieren.
- **Klimafaktoren:** Temperatur, Luftdruck, Windrichtung und -stärke, Niederschläge, Luftfeuchtigkeit, Bewölkung und Sonnenscheindauer (Brockhaus 1993-3, S.162)
- **System** (Kybernetik, Physik, Technik): „Fundamentaler Begriff, der die Zusammenfassung mehrerer, im allgemeinen untereinander in Wechselwirkung stehender Komponenten zu einer als Ganzes aufzufassenden Einheit bezeichnet.“ (Brockhaus 1994-5, S.213)
- **Solar:** die Sonne betreffend (Brockhaus 1994-5, S.34)
- **Solarenergie / Sonnenenergie:** „Die durch Kernfusion im Innern der Sonne freigesetzte Energie, die durch Strahlungstransport an die Sonnenoberfläche gelangt und in den Weltraum abgestrahlt wird“ (Brockhaus 1994-5, S.43).
- **Solares Energiesystem für Gewächshäuser:** Technisches System, welches die Solarenergie in einem Gewächshaus selektiv energetisch nutzt und die Klimafaktoren zugunsten der Pflanzenproduktion modifiziert (eigene Definition).
- **Sunflower:** zweiachsig nachgeführte Konstruktionsvariante des solaren Energiesystems für Gewächshäuser (eigene Definition)
- **Sunray:** einachsig nachgeführte Konstruktionsvariante des solaren Energiesystems für Gewächshäuser (eigene Definition)
- **Strahlung** (Physik): Gerichtete, räumliche und zeitliche Ausbreitung von Energie in Form von Wellen oder Teilchen (Brockhaus 1994-5, S.159)
- **Sonnenstrahlung, direkte:** Sonnenstrahlung, welche in gerader Linie von der Sonne zum Beobachter gelangt (eigene Definition).
- **Sonnenstrahlung, diffuse:** Sonnenstrahlung, welche beim Traversieren der Atmosphäre gestreut oder diffus reflektiert wurde (Winter 1991, S.76).
- **Globalstrahlung:** Summe von direkter und diffuser Strahlung (Winter 1991, S.76)
- **GHI:** Globale Horizontale Einstrahlung
- **DNI:** Direkte Strahlung auf eine ideal nachgeführte Fläche

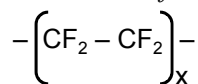
- **Absorption (Physik):** Die Schwächung der Intensität einer Teilchen- oder Wellenstrahlung bei Wechselwirkung mit Materie. Die Strahlungsenergie der absorbierten Strahlung wird dabei in andere Energieformen, z.B. in Wärme umgewandelt oder für Anregungsprozesse verbraucht (Brockhaus 1993-1, S.18). Der Absorber wird in dieser Arbeit als der absorbierende Teil einer Solaranlage bezeichnet (thermische Anwendung: Umwandlung in Wärme / Photovoltaik: Anregungsprozess zur Erzeugung elektrischer Energie)
- **Fresnel-Linse:** Rotationssymmetrische Stufenlinse mit grossem Öffnungsverhältnis, bei der die Abbildung durch Brechung an einzelnen ringförmigen Kegelzonen erfolgt, deren Krümmungsradien so gewählt sind, dass die Brennpunkte aller Zonen zusammenfallen (Brockhaus 1993-2, S.245). Anstelle einer ringförmigen Anordnung kann auch eine lineare gewählt werden, was statt einem Punktfokus zu einer Fokuslinie führt.
- **Photosynthese:** Fundamentale Stoffwechselreaktion von Pflanzen; Bildung von Glucose mit Hilfe des Chlorophylls, welches Strahlungsenergie in die Form einer energiereicheren chemischen Verbindung überführt: $6 \text{CO}_2 + 6 \text{H}_2\text{O} \xrightarrow{-2'825 \text{ kJ}} \text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6 + 6 \text{O}_2$ (Brockhaus 1994-4, S.225)
- **Photovoltaik:** Teilgebiet der Energietechnik, das sich mit der Gewinnung von elektrischer Energie aus Sonnenenergie befasst (Duden 1990, S.602)
- **Hortikultur / Gartenbau:** Der Anbau gärtnerischer Kulturpflanzen (Gemüsebau, Obstbau, Zierpflanzenbau, Baumschulen) (Brockhaus 1993-2, S.288)
- **Nachhaltigkeit:** Aufrechterhaltung des Naturkapitals (starke N.) oder der Produktionskapazität (schwache N.), Stabilität der Ökosysteme (gemäss Vorlesung Bretschger)
- **PE Polyethylen:** Biegsames, zähes Polymer (Mortimer 1996, S.573), für Gewächshausfolien angewandt



- **PVC Polyvinylchlorid:** Polymer, gut formbar, Härte durch Zusätze variierbar, Baumaterial (Mortimer 1996, S.573), für Gewächshausfolien angewandt



- **PTFE Polytetrafluorethylen:** Fluorpolymer, temperaturbeständig, chemisch resistent, nicht brennbar, auch Hostaflon TF oder Teflon genannt (Mortimer 1996, S.573), für Gewächshausfolien angewandt



1.2.2 Symbole

α : Elevationswinkel

β : Azimutwinkel

ζ : Reflexionswinkel

θ : Schattenwinkel O-W-Sunray

κ : Schattenwinkel N-S-Sunray

φ : Neigung der Sunray

δ : Inklination der Erdachse¹

ω : Stundenwinkel der Erddrehung

Φ : Breitengrad

η : Wirkungsgrad

λ : Wellenlänge

R : Einstrahlung pro Flächeneinheit

¹ Neigung, Winkel zwischen der Ebene einer Planetenbahn und der Ebene der Erdbahn (Brockhaus 1993-2, S.659)

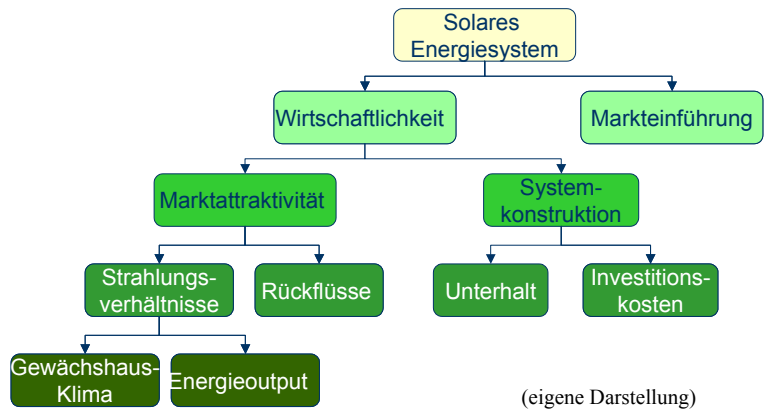
1.3 Vorgehen

1.3.1 Vertiefungsgrad

Die Wirtschaftlichkeit des Systems ist von der Attraktivität des Marktes und der Konstruktion des Systems abhängig. Vertieft wurden vor allem die Strahlungsverhältnisse und der resultierende Energieoutput, sowie der Einfluss auf das Gewächshausklima analysiert. Zusammen mit den erzielbaren Rückflüssen bestimmen diese über die Marktattraktivität.

Die mit dem System verbundenen Investitions- und Unterhaltskosten sind zum heutigen Zeitpunkt schwierig abzuschätzen, es können lediglich die zur Verfügung stehenden Annahmen verarbeitet werden.

Vor einer Markteinführung ist die Wirtschaftlichkeit des Systems fundiert zu analysieren und die Entwicklungsarbeiten müssen abgeschlossen sein. Deshalb beschränkt sich der Teil zur Markteinführung auf einige Empfehlungen.



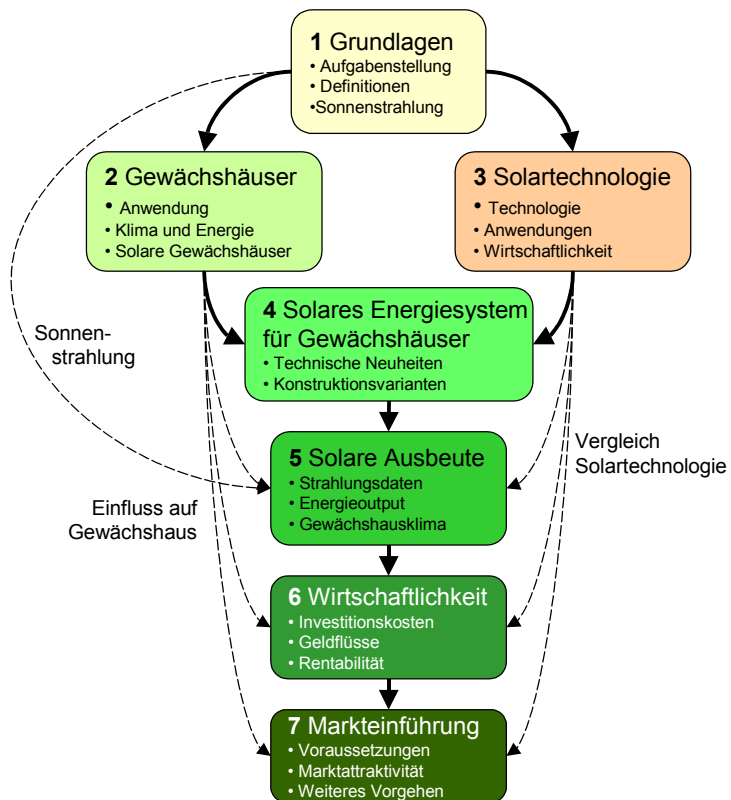
(eigene Darstellung)

Abbildung 1-1: Vertiefungsgrad

1.3.2 Aufbau der Arbeit

Die folgenden Ausführungen zur Sonnenstrahlung sind die Grundlage für Gewächshaus- und Solartechnologie. Kapitel 2 und 3 widmen sich deren grundlegenden Anwendungsgebieten und ökonomischen Rahmenbedingungen. Das solare Energiesystem kombiniert die beiden Technologien. Die technischen Eigenschaften und Konstruktionsvarianten werden vorgestellt.

Anschliessend wird die solare Ausbeute dieser Varianten untersucht. Der Einfluss auf das Gewächshaus wird betrachtet, und ein Vergleich zu alternativen Solarsystemen gezogen. Aus dem Systemoutput resultiert im Zusammenspiel mit den Investitionskosten die Wirtschaftlichkeit. Dabei wird auf die Grundlagen aus Kapitel 2 bis 3 zurückgegriffen. Abschliessend werden die Voraussetzungen zur Markteinführung betrachtet und die Attraktivität verschiedener Märkte analysiert.



(eigene Darstellung)

Abbildung 1-2: Aufbau Diplomarbeit

1.4 Sonnenstrahlung

Die Sonnenstrahlung wird seit Jahrmillionen von Pflanzen und seit wenigen Jahrzehnten mit Hilfe von technischen Systemen energetisch genutzt. Beides ist Gegenstand dieser Arbeit, weshalb vorgängig diese Energiequelle näher betrachtet sein soll. Die von der Sonne emittierte elektromagnetische Strahlung lässt sich bezüglich fünf Faktoren charakterisieren (Hanan 1998, S.91):

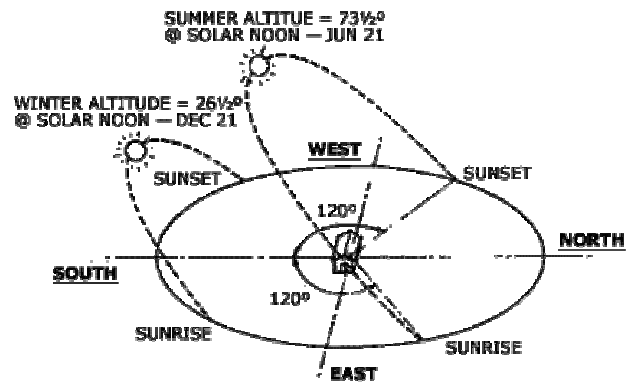
- Quantität: Strahlungsleistung (W/m^2)
- Qualität: spektrale Aufteilung (Frequenz $1/s$ respektive Wellenlänge nm)
- Richtung: diffus / direkt, Winkel zur Interaktionsfläche
- Dauer: Tageslänge / Beleuchtung (h)

1.4.1 Pfad der Sonne

Grundlage für den zeitlichen Ablauf dieser Faktoren sind die astronomischen Bewegungen. In Abbildung 1-3 werden die Differenzen zwischen dem Sonnenverlauf im Winter gegenüber jenem im Sommer ersichtlich (Breitengrad 40°).

Als Elevationswinkel α wird der Winkel zwischen Horizont und Sonne bezeichnet, der Azimutwinkel β wird ab der Nord-Richtung im Uhrzeigersinn gemessen.

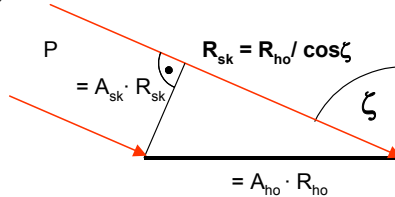
Abbildung 1-3: Sonnenpfad Winter und Sommer



(Attra 2003, Internet)

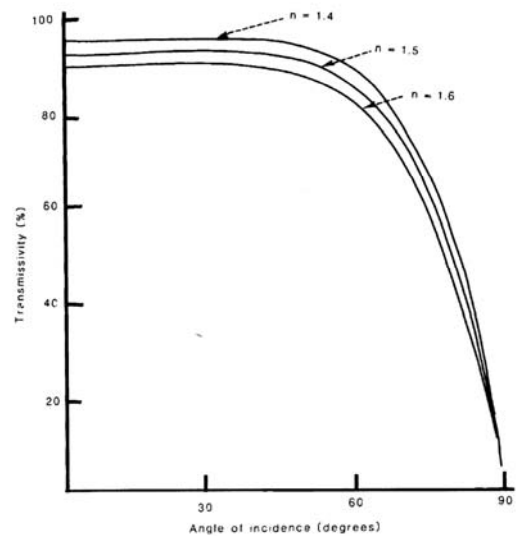
1.4.2 Winkelabhängigkeit

Der Einfallswinkel beeinflusst die Strahlungsdichte. Um auf einer Fläche möglichst viel Strahlung zu registrieren, muss diese der Sonne nachgeführt werden, sodass das Lot auf die Fläche stets zur Sonne zeigt. Eine Abweichung vom Lot (ζ) führt einerseits zu einer um $\cos\zeta$ reduzierte Strahlungsdichte (siehe Abbildung 1-4), andererseits nimmt die Reflexion wie in Abbildung 1-5 gezeigt zu. Dies ist insbesondere relevant für die Transmissionseigenschaft von Gewächshaushülle und optischen Elementen von Solaranlagen.



(eigene Darstellung)

Abbildung 1-4: Strahlungsdichte auf nachgeführte Fläche

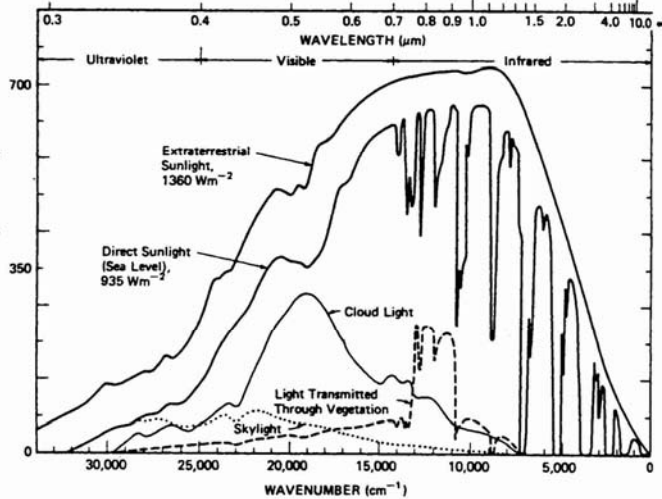


(Hanan 1998, S.107)

Abbildung 1-5: Einfallswinkel und Transmission
[$\eta_{\text{reflex}}(\zeta)$]

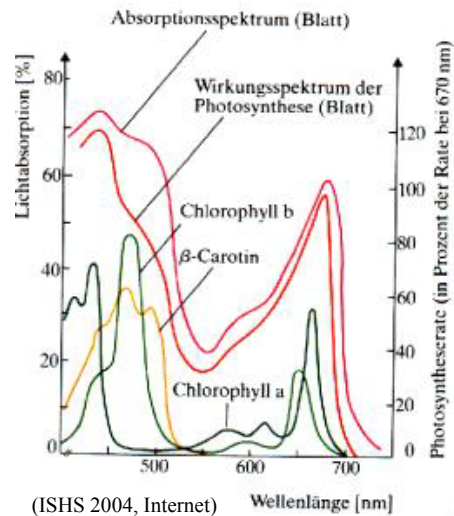
1.4.3 Spektrale Zusammensetzung

Die spektrale Zusammensetzung des Sonnenlichtes resultiert aus dem Planckschen Strahlungsgesetz. Auf dem Weg der Strahlung durch die Atmosphäre werden gewisse Frequenzbereiche absorbiert, sodass das Spektrum wie in Abbildung 1-6 dargestellt resultiert.



(Hanan 1998, S.128)

Abbildung 1-6: Spektrale Zusammensetzung



(ISHS 2004, Internet)

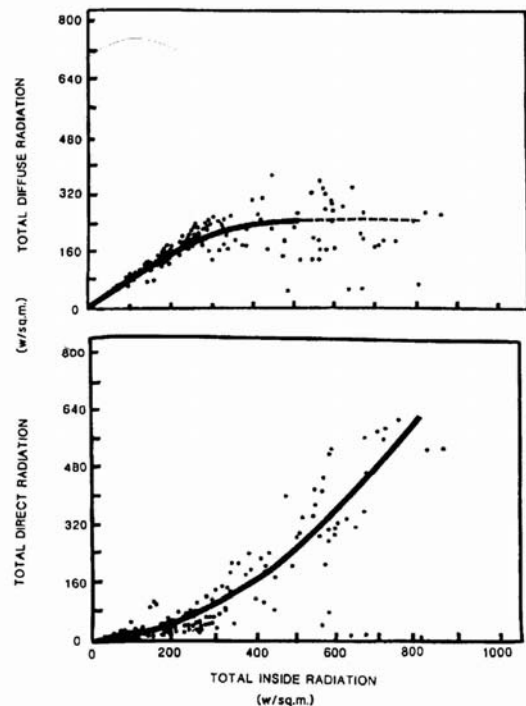
Abbildung 1-7: Absorptionsspektrum Chlorophyll

Zur Photosynthese benötigt die Pflanze nur spezifische Frequenzbereiche (siehe Abbildung 1-7). Der grössere Teil der Strahlung kann nicht genutzt werden und trägt primär zur Erwärmung bei. Auch die Absorptionseigenschaften der Photovoltaik sind frequenzspezifisch. Ein solares Energiesystem bietet die Möglichkeit, das Sonnenlicht selektiv den Pflanzen oder den solartechnischen Mitteln zukommen zu lassen.

1.4.4 Diffuse/direkte Strahlung

Das Licht, welches auf direktem Weg von der Sonne zum Beobachter gelangt, wird als direkte Strahlung bezeichnet. Ein gewisser Teil des Lichts wird auf dem Weg durch die Atmosphäre gestreut. Dieses ungerichtete Licht wird als diffuse Strahlung bezeichnet. Abbildung 1-8 zeigt die Aufteilung des gesamten Lichtes in diffuse und direkte Strahlung. Bei geringer Einstrahlung dominiert die diffuse Strahlung, ab ca. 400 W stagniert der diffuse Anteil, und die direkte Strahlung überwiegt.

Je länger der Weg des Lichtes durch die Atmosphäre, umso höher der diffuse Anteil. Da konzentrierende solartechnische Anwendungen lediglich den direkten Strahlungsanteil nutzen können, nimmt deren Wirtschaftlichkeit mit steigendem Anteil des direkten Lichtes und somit mit der Nähe zum Äquator zu. Diffuse Strahlung hingegen dringt tiefer in die Blattoberfläche ein und stimuliert so die Photosynthese, während direkte Strahlung ein ausdörren verursachen kann (Pollet 2000, S.101). Im Pflanzenbau ist deshalb ein hoher Anteil an diffusem Licht erwünscht.



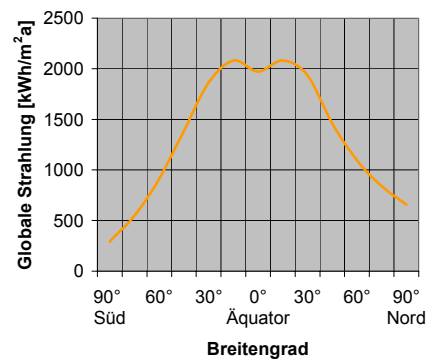
(Hanan 1998, S.110)

Abbildung 1-8 Aufteilung zwischen diffuser und direkter Strahlung

1.4.5 Strahlungsmenge

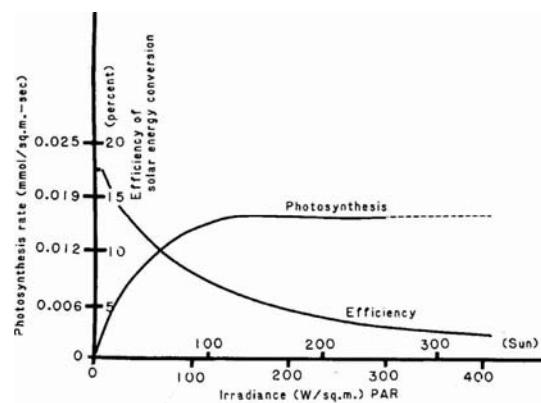
Am Rande der Erdatmosphäre wird eine Strahlungsleistung von 1'367 W/m² angenommen (Solarkonstante, Winter 1991, S.18). Auf der Erdoberfläche werden nahe des Äquators bis zu 1'000 W/m² registriert, in Nordeuropa liegt das Maximum im Januar bei 100 W/m². Die an einem bestimmten Punkt auf der Erde über eine gewisse Zeit registrierte Strahlungsmenge ist vom Breitengrad abhängig und wird üblicherweise in Kilowattstunden (kWh²) pro Quadratmeter horizontale Fläche angegeben (siehe Abbildung 1-9, jährliche Strahlungsenergie). Neben dem Breitengrad bestimmt die Ausprägung der Erdoberfläche – Land oder Wasser, Topographie, Vegetation – sowie die Höhe über Meer die Klimatelemente: Temperatur, Wind, Niederschlag, Luftfeuchtigkeit, Bewölkung und Sonnenscheindauer. Die Eignung einer Region für den Gartenbau und die Anforderungen an das Gewächshaus sind abhängig von diesen Faktoren. Eine Einteilung der resultierenden Klimazonen ist in Anhang 4 dargestellt.

Abbildung 1-10 zeigt, dass die Photosyntheseaktivität über einer Einstrahlung von rund 150 W/m² nicht weiter zunimmt³. Bei intensiverer Strahlung nimmt die Verdunstungsaktivität der Pflanze zu, um die Blattoberflächen zu kühlen. Durchschnittlich wird 70 % der Strahlung zur Verdunstung aufgewendet (Hanan 1998, S.271)



(In Anlehnung an Von Zabeltitz 1999, S.3)

Abbildung 1-9: Jährliche Strahlungsmenge nach Breitengrad



(Hanan 1998, S. 128)

Abbildung 1-10: Strahlungsbedarf der Photosynthese

² Energie = Leistung x Zeit ; 1 kWh = 1 Stunde 1'000 W Leistung = 3'600'000 J = 3,6 MJ

³ Gilt für die natürliche Kohlendioxid Konzentration von 0,034%. Bei höheren CO₂ Konzentrationen liegt die Sättigung bei höheren Werten.

2 Gewächshaus

2.1 Anwendung

Der Entscheid zum Anbau im Gewächshaus ist eine Abwägung zwischen lokaler Produktion und dem Transport von leicht verderblichen pflanzlichen Produkten (primär Gemüse und Schnittblumen). Der Gemüseanbau erfordert Temperaturen zwischen 12 und 30-35°C⁴. Abbildung 2-2 zeigt annäherungsweise den Temperaturbereich für den heissesten und den kältesten Monat in Abhängigkeit des Breitengrades.

Die Gewächshaustechnologie ist anfangs 20. Jahrhundert in den Niederlanden entstanden, um frisches Gemüse ausserhalb der Saison bereitstellen zu können. Mittlerweile hat sich der Einsatz von Gewächshäusern für Gemüse und Schnittblumen weltweit verbreitet, und die Gewächshaus-Produktion hat sich zu einer sehr intensiven und hoch technologisierten Produktionsweise entwickelt.

Die Mittelmeerländer – primär Spanien, Italien und die Türkei – sind mit einer Gewächshausfläche von rund 85'000 ha eine der wichtigsten Anbauregion. Wie aus Abbildung 2-2 ersichtlich wird, ist der Winter dort zwar milder, doch können im Sommer die Maximaltemperaturen überschritten werden.

Um die lokale Produktion zu stärken, findet die Technologie auch in ariden Gebieten Anwendung, wobei einer Überhitzung vorzubeugen ist. Zwischen 1980 und 1992 ist die Gewächshausfläche von den Vereinten Arabischen Emiraten (UAE) von 100 auf 1'450 ha gestiegen (Yusuf Taha Guma 1996, S.419). Die Anforderungen zur Klimaregulierung unterscheiden sich grundsätzlich von jenen in Nordeuropa. Die Gemeinsamkeit besteht hingegen in der Möglichkeit, ein von der Umgebung differenziertes Klima aufrecht zu erhalten und dadurch die Anbauperiode zu verlängern.

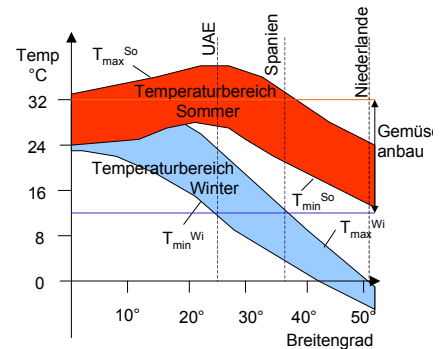
In Tabelle 2-1 sind die wichtigsten Gewächshaus-Länder aufgelistet. Die grössten Gewächshausflächen liegen heute in Asien: Japan und Südkorea verfügen jeweils über mehr als 50'000 ha, die Anbaufläche von China wird gar mit 1'000'000 ha beziffert (e-mail Sase 06.12.04, Anhang 3). Gemessen in Promillen der Landesfläche sind die Niederlande zwar noch immer an zweiter Stelle, die Fläche stagniert jedoch nahezu. Die Anbaufläche der Mittelmeerländer hat sich in den letzten 14 Jahren nahezu verdoppelt, kann jedoch nicht mit dem Wachstum in Asien mithalten.

Ein durchschnittlicher Gewächshausbetrieb in Südspanien misst etwa eine Hektare und erzielt einen Umsatz von 40'000 €/ha. Die variablen Kosten betragen rund 20'000 €/ha, wovon gut die Hälfte auf Lohnkosten entfallen (Calatrava 2001, S.742 / näheres siehe Anhang 2).



(eigene Foto)

Abbildung 2-1: Blumen im Gewächshaus



(In Anlehnung an Von Zabeltitz 1999, S.8)

Abbildung 2-2: Temperaturbereich Gemüseanbau



(eigene Foto)

Abbildung 2-3: Salatbau im Gewächshaus

Tabelle 2-1: Gewächshausflächen

Top 10	1986	2000	‰ Landesfl.
China	13.130	1.000.000	1,05
Japan	27.300	53.518	1,44
Südkorea	1.300	52.189	5,30
Spanien	12.150	33.750	0,67
Italien	17.000	26.000	0,86
Türkei	9.000	22.064	0,28
Niederlande	9.000	10.416	2,51
USA	4.000	7.016	0,01
Frankreich	(?)	8.108	0,15
Israel	400	3.510	1,69

(Hanan 1998, S.8 / e-mail Sase 06.12.04)

⁴ Durchschnitt der Minimal- respektive Maximaltemperaturen. Absolute Minimaltemperatur 0°C, absolute Maximaltemperatur bei trockener Luft 35°C, bei hoher Luftfeuchtigkeit bis zu 43 °C (Von Zabeltitz 1999, S.10).

2.2 Konstruktion

Die wichtigsten Elemente des Gewächshauses sind Hülle, Struktur und Innenausstattung.

2.2.1 Struktur

Die Struktur – meist ein Gestänge aus Stahl, teilweise aus Holzlatten – bestimmt die Form des Gewächshauses. Dachschräge und Ausrichtung des Hauses sind auf eine optimale Ausbeute des Sonnenlichtes auszulegen, wobei die in Abschnitt 1.4.2 erwähnte Problematik der Reflexion zu beachten ist. Durch sägezahnartige Dächer (vergleiche Abbildung 2-4) können grosse Flächen ohne Zwischenunterteilung überdacht werden. Eine einfachere Konstruktion ist in Abbildung 2-5 dargestellt.

2.2.2 Hülle

Bis in die 1950er Jahre dominierten Glashäuser (siehe Abbildung 2-4), mit der Entwicklung von beständigen und preiswerten Kunststoffen verbreiten sich mehr und mehr Folienhäuser (siehe Abbildung 2-5). Vorwiegend werden PE- und PVC-Folien⁵ verwendet. Neben dem Preis sind optische und thermische Eigenschaften entscheidend für die Materialwahl, wobei günstigere Kunststoffe sich aufgrund ihrer UV-Absorption trüben und nach wenigen Jahren ausgewechselt werden müssen. Einerseits soll sichergestellt werden, dass möglichst viel Strahlung ins Gewächshausinnere gelangen kann, andererseits sollen aber Wärmeverluste minimiert werden.

Um den diffusen Lichtanteil zu erhöhen, werden teilweise spezielle Folien oder Gartenklarglas als Hülle verwendet, bei welchen eine raue Oberfläche das Licht streut. Im Gegensatz zu blankem Glas streuen Polyethylen-Folien (PE) aufgrund ihrer Rauheit bereits 47% des transmittierten Lichtes. Kondenswasser kann auf Folien oder Glas eine zusätzliche Streuung bewirken (Pollet 2000, S.101).

2.2.3 Innenausstattung

Der Anbau findet teilweise in Erdbeeten statt, oft jedoch auch in Töpfen oder auf Pflanztischen (vergleiche Abbildung 2-7). Um eine optimale Nährstoff- und Wasserversorgung zu erreichen finden vermehrt modifizierte Erden, erdlose Medien oder Hydrokulturen Verbreitung (Torf, Steinwolle, Nährfilm).

Weitere Installationen dienen der Temperatur- und Beleuchtungsregulierung, auf welche im folgenden Abschnitt eingegangen wird.

2.2.4 Kosten

Die Kosten variieren je nach Standort, Grösse und Konstruktion. Die nebenstehende Tabelle soll lediglich die Grössenordnung der Investitionen pro Quadratmeter Gewächshausfläche aufzeigen.

Tabelle 2-2: Gewächshauskosten
(In Anlehnung an Hanan 1998, S.81)



Abbildung 2-4: Glashaus mit Sägezahndach



Abbildung 2-5: Folienhaus mit Rundbogenkonstruktion



Abbildung 2-6: Anbau im Erdboden



(eigene Fotos)

Abbildung 2-7: Anbau auf Pflanztischen

Gewächshaus 9'000m ²	€/m ²	Anteil
Landkosten	1.34	
Planierung	1.10	
Struktur	10.8	43,7%
Heizung (Gas)	2.50	10,1%
Kühlung (Verdunstungskühlung)	5.53	22,4%
Montage	3.89	15,7%
Fracht	0.66	2,7%
PE-Folie	1.26	5,1%
Total Folienkonstruktion	24.7	100,0%
Total Glasskonstruktion	42.2	
Pflanztische	16.0	

⁵ PE : Polyethylen / PVC : Polyvinylchlorid (Mortimer 1996, S.573)

2.3 Gewächshausklima

Abbildung 2-8 zeigt die Einflussfaktoren auf das Pflanzenwachstum. Auf dem offenen Feld existiert ein intensiver Luftaustausch, welcher Lufttemperatur, Feuchtigkeit und Luftzusammensetzung über weite Flächen ausgleicht. Im Gewächshaus ist diese Interaktion mit dem Umfeld stark reduziert. Es entsteht die Möglichkeit, diese Faktoren zu modifizieren respektive die Aufgabe, das Klima im innern optimal den Bedürfnissen anzupassen.

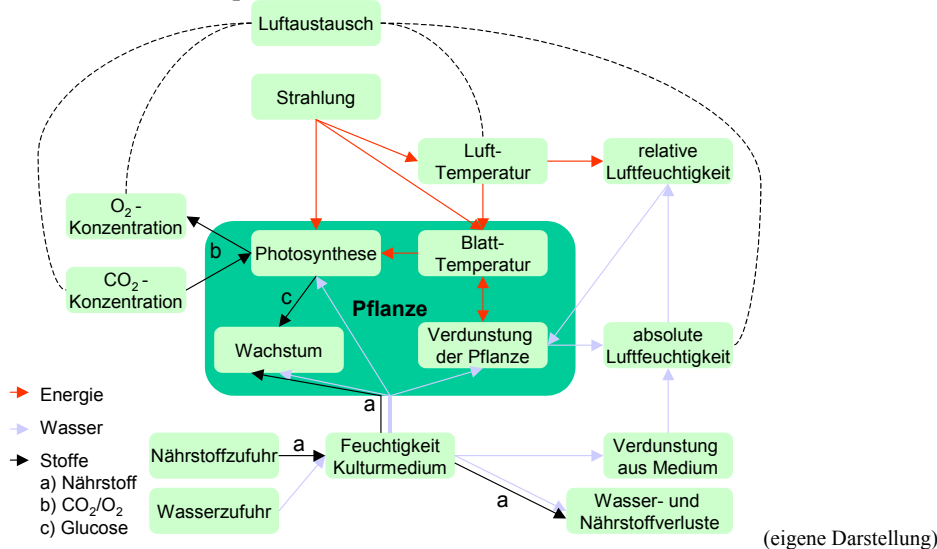
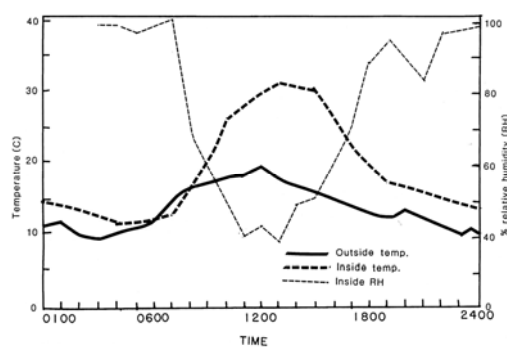


Abbildung 2-8: Einflussfaktoren Pflanzenwachstum

Ein typischer Verlauf der Innen- gegenüber der Aussentemperatur sowie der relativen Luftfeuchtigkeit für eine Frühlingstag in Südspanien ist in Abbildung 2-9 gezeigt.

Je nach Region haben Lüftung, Kühlung, Heizung, Beschattung und künstliche Beleuchtung einen unterschiedlichen Stellenwert. Die folgenden Ausführungen beziehen sich primär auf warme Zonen, wo im Sommer einer Überhitzung vorzubeugen ist.



(Hanan 1998, S.242)

Abbildung 2-9: Tagesverlauf Gewächshausklima (Almeria)

2.3.1 Ventilation und Kühlung

Permanente oder verschliessbare Öffnungen werden für den Luftwechsel vorgesehen, um im Austausch mit der Aussenluft die Wachstumsfaktoren auf dem gewünschten Niveau zu halten. Ventilatoren können die Temperatur jedoch höchstens auf der Umgebungstemperatur halten, weshalb in heißen Regionen oft Verdunstungskühlung angewandt wird. Durch eine Wasserdusche beim Lufteinlass (siehe Abbildung 2-10) oder periodisches Versprühen im Innenraum wird der Luft Wärme entzogen. Allerdings wird nicht nur die Luft abgekühlt sondern auch die Luftfeuchtigkeit erhöht, was das Verdunstungspotential der Pflanze reduziert. Deshalb sinkt die Blatttemperatur nur gering, und ein intensiver Luftaustausch ist erforderlich, damit die Luftfeuchtigkeit reduziert wird (vergleiche Abbildung 2-11). Zudem wird bis zu 20mal mehr Wasser benötigt als für die Bewässerung erforderlich (UAE⁶). Pro Quadratmeter werden jährlich rund 12-14 kWh Elektrizität für die Ventilation benötigt (Israel⁷)



(IGC 2005, Internet)

Abbildung 2-10: Verdunstungskühlung

⁶ e-mail Moustafa 09.02.05, Anhang 3

⁷ e-mail Teitel 20.12.04, Anhang 3

2.3.2 Strahlungsmodifikation

Zur Reduktion der Einstrahlung kann die Gewächshaushülle mit Kalk oder speziellen Farben bedeckt werden, welche bei schlechtem Wetter vom Regen wieder abgewaschen werden. Auch Beschattungssysteme wie in Abbildung 2-12 abgebildet werden angewandt. Dadurch wird zwar ein Teil der Strahlung reflektiert, ein anderer hingegen wird absorbiert und erhöht die Temperatur von Hülle oder Store, welche in der Folge vermehrt Wärme abstrahlt. Zudem steht auch weniger Licht für die Photosynthese zur Verfügung, da die von Chlorophyll benötigte Wellenlängen ebenso reduziert werden wie die übrigen Bereiche (Hanan 1998, S.146).

Deshalb bestehen Bestrebungen, durch eine Modifikation der spektralen Zusammensetzung des Lichtes die Entwicklung der Pflanzen zu beeinflussen. Dazu können mit Pigmenten versehene Folien (Merck 2005, Internet) oder Flüssigfilter (siehe Abschnitt 2.4.2) eingesetzt werden.

2.3.3 Künstliche Beleuchtung

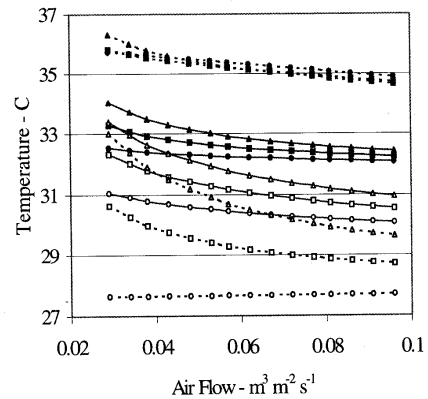
Um Strahlungsdefizite in Regionen mit kurzer Sonnenscheindauer zu vermeiden, wird teilweise künstliche Beleuchtung angewandt. Bezüglich der spektralen Zusammensetzung wird mit speziellen Leuchten eine Annäherung an das von der Photosynthese erforderte Spektrum angestrebt (Hanan 1998, S.134). Der Elektrizitätsbedarf kann bis zu 50 kWh/m²a betragen (Grossbritannien, Carbon Trust 2004, Internet).

Die Phytotechnologie verzichtet sogar vollständig auf das Sonnenlicht, um in geschlossenen Hallen ein von der Witterung unabhängigen industriellen Pflanzenbau zu betreiben. Durch optimal angepasste Beleuchtung, Temperatur und Kohlendioxidkonzentration wird mit der Fliessband-Hydrokultur eine Halbierung der Reifezeit ermöglicht. Der Flächenoutput mehrstöckiger Anlagen kann bis 10mal höher als jener von Gewächshauskulturen und 100mal höher als jener der Freilandproduktion liegen (Ruthner 1981, S.4).

2.3.4 Heizung

Die Sonne ist zweifelsohne die wichtigste Wärmequelle für Gewächshäuser. Zu Diskussionen veranlasst hingegen, ob die Sonne durch eine effiziente Nutzung die gesamte Energie bereitstellen kann. Heute werden je nach Region und Kultur zwischen 675 kWh/m²a und 155 kWh/m²a zusätzliche thermische Energie über Strahlungs-, Warmwasser, Warmluft oder Bodenheizung bereitgestellt (Carbon Trust 2004, Internet). Eine Neuseeländische Studie lässt einen Bedarfsvergleich zwischen feucht-subtropischer und gemässigt-ozeanischer Klimazone zu. Auf der nördlichen Insel (35-40° südlichen Breitengrads) beträgt der Wärmebedarf durchschnittlich 336 kWh/m²a, auf der südlicheren (kühleren) Insel 508 kWh/m²a.

Während früher primär mit Kohle geheizt wurde, überwiegen heute Gasheizungen. Durchschnittlich werden in Neuseeland pro Quadratmeter Gewächshausfläche 96 kg Kohlendioxid emittiert. Im Hinblick auf einen zukünftigen Emissionenhandel würden bei einem Ansatz von 20 €/t CO₂ zusätzliche Kosten von 1,9 €/m²a anfallen (AgriLINK NZ 2004, Internet). Alternative Möglichkeiten zur Bereitstellung der Wärme sind in Anhang 2 ausgeführt.



Volle Symbole: Ohne Verdunstungskühlung
Leere Symbole: Mit Verdunstungskühlung
Gestrichelte Linie: Lufttemperatur
Ausgezogene Linie: Blatttemperatur

(Willits 2000, S.66)

Abbildung 2-11: Blatt- und Lufttemperatur



(UBS 2005, Internet)

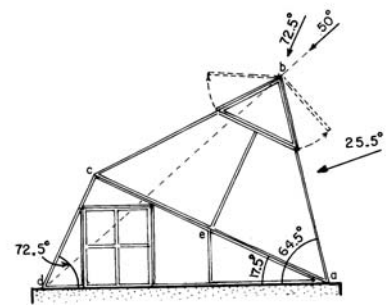
Abbildung 2-12: Beschattung

2.4 Solare Gewächshäuser

In Anbetracht der steigenden Rohstoffpreise entstanden in den Jahren 1970 bis 1980 Bestrebungen, die Sonnenenergie effizienter zu nutzen. Einerseits wird die Isolation und die Ausrichtung zur Sonne optimiert. Einer Überhitzung im Sommer kann vorgebeugt und zugleich eine optimale Sonnenausbeute im Winter erreicht werden, wenn die Gewächshauswände wie in Abbildung 2-14 dargestellt konstruiert werden⁸.

Um Temperaturschwankungen nicht durch energie- und kostenaufwändiges Heizen über Nacht ausgleichen zu müssen, soll andererseits mit einem Wärmespeichermedium eine gewisse thermische Trägheit erzielt werden.

Damit der Speicher genügend Wärme aufnehmen kann, wären Umgebungstemperaturen erwünscht, welche über jenen für das optimale Pflanzenwachstum liegen. Abbildung 2-15 zeigt ein in Israel entwickeltes System mit separierbarer Kollektorfläche. Je nach Tageszeit wird die Verbindung zum Gewächshaus zur Wärmeabgabe geöffnet oder für eine effiziente Erhitzung geschlossen.

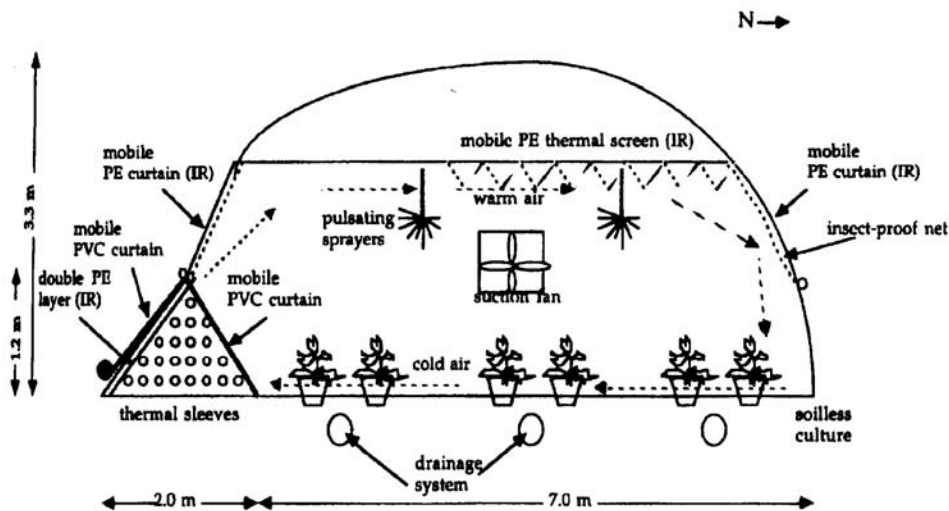


(Vatansver 1976, S.398)

Abbildung 2-14: Jahreszeitlich optimierte Gewächshauskontur



(Von Zabeltitz 1999, S.55)



(Pasternak 1996, S.199)

Abbildung 2-15: Solargewächshaus mit separierter Kollektorfläche

2.4.1 Anpassung an tropische Regionen

Dass Gewächshäuser auch in tropischen Regionen zweckmässig sind, wird in einer FAO-Studie erläutert. Neben dem mildern der intensiven Einstrahlung, wozu Schattenhäuser aus groben Netzen empfohlen werden, wird vor allem der Schutz vor intensiven Niederschlägen angestrebt. Für tropisch-feuchte Zonen werden offene Konstruktionen wie in Abbildung 2-13 gezeigt empfohlen, um einen maximalen Luftwechsel zu ermöglichen. In den Subtropen und im Gebirge hingegen können tiefe Nachttemperaturen die Pflanzen schädigen, weshalb grosse verschliessbare Öffnungen empfohlen werden (Von Zabeltitz 1999, S.65).

⁸ Reflexion im Sommer maximal, im Winter minimal (Winkel gewählt für Istanbul, Breitengrad 41°).

2.4.2 Gewächshaus mit Flüssigkeitsfilter

Solche Konstruktionen erlauben jedoch keine Modifikation der Temperatur oder Luftfeuchtigkeit. Im Auftrag der Saudi-Arabischen Regierung hat Bomin Solar⁹ in den 80er Jahren ein „Liquid Radiation Filter Greenhouse“ entwickelt. Ähnliche Untersuchungen wurden am INRA Research Center (Frankreich) durchgeführt (Chiapale 1981, S.387). Ein Flüssigkeitsfilter durchfließt die doppelwandige Gewächshaushülle und absorbiert selektiv die überschüssige Strahlung, wodurch einer Überhitzung vorgebeugt wird. Transmittiert werden hingegen die zur Photosynthese erforderlichen Wellenlängen (siehe Abschnitt 1.4.3). Die erwärmte Flüssigkeit wird gespeichert und beheizt das Gewächshaus nachts wie in Abbildung 2-16 illustriert.

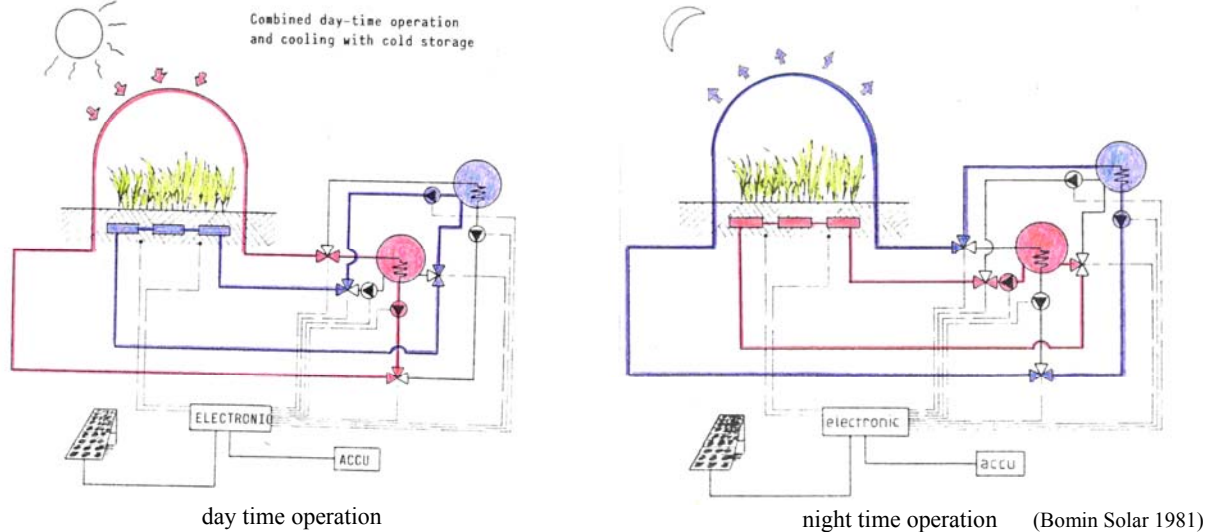


Abbildung 2-16: Funktionsschema Liquid Radiation Filter Greenhouse

2.4.3 Linsengewächshaus

Eine konstruktiv einfachere Möglichkeit stellt das Linsengewächshaus dar, welches von Vladimir Jirka (Envi s.r.o., Tschechien) entwickelt und an der Universität Patras (Griechenland) untersucht wird (e-mail Tripanagnostopoulos 20.12.04, Anhang 3). Das Gewächshausdach besteht aus linearen Fresnel-Linsen, in deren Fokuslinie ein thermischer Receiver oder Photovoltaik Zellen die Sonnenenergie absorbieren.



(Envi 2004, Internet)

Abbildung 2-17: Linsengewächshaus

⁹ BSR Solar Technologies GmbH, welche an Sunvention beteiligt ist, geht aus Bomin Solar hervor.

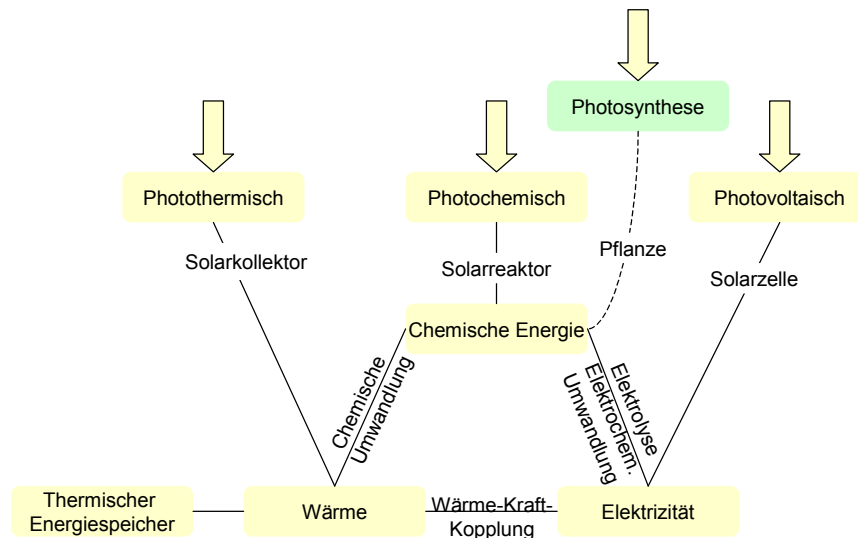
3 Solartechnologie

3.1 Technologieparameter

3.1.1 Energieumwandlung

Grundsätzlich kann zwischen thermischer und photovoltaischer Nutzung der Sonnenenergie unterschieden werden. In gemässigten Klimazonen ist die thermische Nutzung primär für die Warmwassergewinnung mit Flachkollektoren bekannt, andererseits arbeiten auch die grössten bis anhin realisierten Solarkraftwerke mit thermischer Energie, welche mittels der konventionellen Technologie von thermischen Kraftwerken in Elektrizität umgewandelt werden kann.

Demgegenüber liefert die Photovoltaik direkt elektrische Energie, basierend auf dem Photoeffekt in einem Halbleiter wie Silikon. Photovoltaik stellt eine interessante Möglichkeit für netzunabhängige Elektrizitätsverbraucher dar, wo ein Zugang zu der entsprechenden Infrastruktur nicht oder nur sehr aufwändig realisierbar ist (z.B. Alphütten, abgelegene Messstationen oder Beleuchtung, Satelliten). Grössere Netzverbundanlagen werden zwar oft mit staatlicher Unterstützung realisiert, die Energiekosten liegen jedoch deutlich über jenen von nicht-erneuerbaren Energieträgern¹⁰. Abbildung 3-1 zeigt die Möglichkeiten der solaren Energieumwandlung. Der photochemische Weg ist bis anhin wenig fortgeschritten.



(In Anlehnung an Winter 1991, S.15, ergänzt um Photosynthese)

Abbildung 3-1: Solare Energieumwandlung

Aufgrund der variablen Verfügbarkeit der Sonnenenergie (Witterung und Tagesverlauf) ist die Speicherung von grosser Bedeutung, sofern der Verbrauch nicht synchron verläuft¹¹ oder zeitlich flexibel ist¹². Während thermische Energie beschränkt speicherbar ist, kann Elektrizität aus Photovoltaik nur über eine elektrochemische Umwandlung (Batterie) gespeichert werden, was mit Verlusten verbunden ist. Alternativ gelangen Backup-Systeme zum Einsatz (Diesel-Generator).

¹⁰ Externe Kosten sind heute nur ungenügend internalisiert, ansonsten wären die Kosten fossiler Energieträger bedeutend höher.

¹¹ Beispiel: Der sommerliche Elektrizitätsbedarf ist Nordamerika stark von Klimaanlagen abhängig, deren Verbrauch sich weitgehend mit der Verfügbarkeit der Sonnenenergie deckt.

¹² Beispiel: Bei einem Einsatz zur Bewässerung kann die Energie bis zu einem gewissen Grad flexibel in die potentielle Energie eines Wasserspeichers umgewandelt werden.

3.1.2 Energieausbeute

Für eine maximale Strahlungsausbeute ist die Winkelabweichung ζ zwischen Strahlungsrichtung und der Senkrechten auf die Apparaturfläche möglichst gering zu halten (vergleiche Abschnitt 1.4.2).

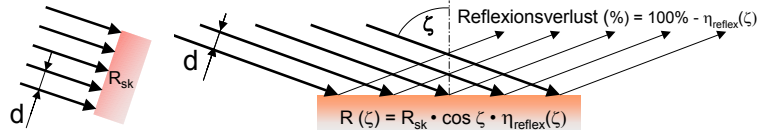


Abbildung 3-2: Cosinus- und Reflexionsverluste

Auf der grossen Fläche rechts in Abbildung 3-2 kann aufgrund der Reflexion weniger Energie absorbiert werden als auf der kleinen, geneigten Fläche links. Eine höhere Einstrahlung kann durch eine Neigung der Fläche entsprechend dem Breitengrad gegen Süden erzielt werden. Die Abweichung vom Lot ist somit in den Mittagstunden auf $\pm 23,44^\circ$ reduziert (Schräglage der Erdachse), doch der azimutale Verlauf der Sonne vermindert weiterhin die Strahlungsdichte.

Dies kann durch eine Rotation der Fläche vermindert werden. Man unterscheidet zwischen Azimut- und Elevationsnachführung. Wird die Apparaturfläche nur um eine Achse gedreht, so spricht man von einachsiger Nachführung; zweiachsige Systeme hingegen ermöglichen eine Ausrichtung stets senkrecht zur Sonnenstrahlung.

3.1.3 Konzentration

Durch Konzentration des Sonnenlichts wird die eingehende Strahlungsleistung auf eine kleinere Fläche fokussiert, auf welcher eine erhöhte Leistung pro Flächeneinheit genutzt werden kann. Thermische Anwendungen können so höhere Temperaturen erzielen. In der Photovoltaik ist die energieaufwändige Gewinnung der reinen Rohstoffe ein massgeblicher Kostenfaktor. Für die Anwendung in Verbindung mit konzentriertem Licht reduziert sich die benötigte Materialmenge entsprechend der Fokussierung. Dazu dienen entweder Spiegel oder Linsen (siehe Abbildung 3-3). Da nur direktes Licht wunschgemäss gebrochen respektive reflektiert wird, kann der diffuse Strahlungsanteil nicht energetisch genutzt werden. Die Attraktivität konzentrierender Systeme hängt somit vom Anteil der direkten Strahlung ab, welcher mit der Nähe zum Äquator zunimmt (siehe Abschnitt 1.4.4).

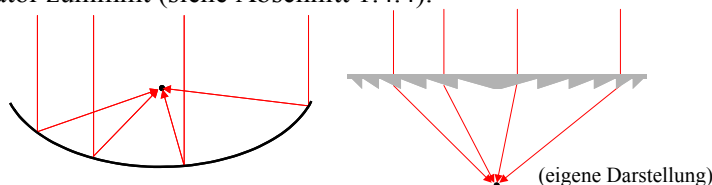


Abbildung 3-3: Parabolspiegel und Fresnel-Linse

Sowohl Linien- wie auch Punktfokussierung ist möglich, wobei eine entsprechende Nachführung erforderlich wird, um den Absorber im Fokus zu halten. Wird eine Linse nur einachsiger nachgeführt, so variiert die Brennweite aufgrund des schräg einfallenden Lichtes.



(Photon 2/05)

Abbildung 3-5: Dachintegrierte Photovoltaik



(NREL 2004, Internet)

Abbildung 3-6: Fixe und nachgeführte Photovoltaik



(NREL 2004, Internet)

Abbildung 3-7: Spiegelfeld mit zentralem Absorber



(NREL 2004, Internet)

Abbildung 3-8: thermisches Parabolspiegel-Kraftwerk

3.1.4 Zellenmaterial

Die üblichen Siliziumzellen erreichen Wirkungsgrade von 15%. Da die Anforderungen an die Reinheit des Siliziums nicht ganz so hoch liegen wie bei der Chip-Herstellung, wird oft Ausschussware aus der Computer-Industrie verwendet. In jüngster Zeit kann die wachsende Nachfrage nach Solarzellen aufgrund der Beschränktheit dieser günstigen Quelle kaum mehr befriedigt werden (Photon 2/05). Deshalb wächst das Interesse an materialsparenden konzentrierenden Anwendungen.

Unter Verwendung anderer Materialien (Gallium, Arsenid) und mit mehrschichtiger Anordnung (Triple Junction) können Wirkungsgrade bis 37% erreicht werden. Diese Zellen wären für flächendeckende Anwendungen zu teuer, empfehlen sich jedoch für konzentrierende Anwendungen (Boeing Spectrolab 2005, Internet).

3.2 Anwendung

3.2.1 Thermische Anwendung

Der jährliche Elektrizitätsoutput solar-thermischer Kraftwerke liegt mit 559 GWh/a deutlich höher als jener von Photovoltaik-Anlagen (336 GWh). Im Vergleich zur weltweiten Stromproduktion von 15 Mio GWh ist der solare Anteil mit 0,006 % jedoch gering und liegt hinter Geothermie, Biomasse- und Abfallverbrennung (siehe Abbildung 3-11).

Thermische Grosskraftwerke mit einachsigen nachgeführten Parabolspiegeln (siehe Abbildung 3-8) ermöglichen zurzeit die tiefsten Energie-Gestehungskosten unter den etablierten Solarsystemen. Bei dem in Abbildung 3-7 gezeigten Spiegelfeld ist der thermodynamische Prozess auf einen zentralen Absorber konzentriert. Das zweiachsig nachgeführte Kollektorfeld ist jedoch kostspielig. Für die Dish-Stirling-Technologie mangelt es an passenden Stirling-Maschinen (siehe Abbildung 3-9). Die Machbarkeitsstudie für Aufwindkraftwerke ist noch ausstehend (Abbildung 3-10).

3.2.2 Photovoltaik

Die Photovoltaikanlagen werden oft, wie Abbildung 3-5 zeigt, dezentral auf Hausdächern installiert. Einige als kleine Inselanlagen zur netzfernen Elektrizitätsversorgung, andere als grossflächige Netzverbundanlagen. Verbreitet ist primär die unkonzentrierte und nicht-nachgeführte Anwendung. Zur besseren Lichtausbeute ist auch eine Nachführung vorstellbar, wie hinten rechts in Abbildung 3-6 gezeigt.

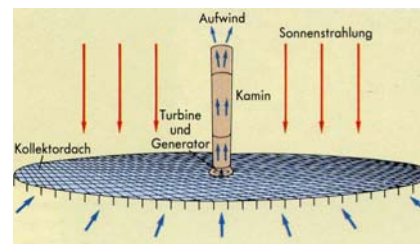
Aufgrund der erhöhten Komplexität konzentrierender Systeme werden solche erst in vereinzelt Netzverbundanlagen angewandt. Abbildung 3-12 zeigt ein 22,5fach konzentrierendes Modul, wie es von Entech u.a. für ein 300 kW-Kraftwerk in Texas Anwendung findet. Da der Zellenwirkungsgrad mit steigender Temperatur abnimmt, ist dem Abführen der Wärme Beachtung zu schenken (siehe Kühlrippen in Abbildung 3-13).

Am Fraunhofer Institut wurde ein punktfokussierendes System für hoch effiziente Gallium-Arsenid-Zellen entwickelt (siehe Abbildung 3-14). Die zweiachsige Nachführung erfolgt mit



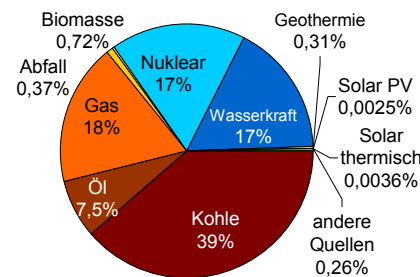
(NREL 2004, Internet)

Abbildung 3-9: Dish-Stirling



(Brockhaus 1994-5, S.44)

Abbildung 3-10: Aufwindkraftwerk



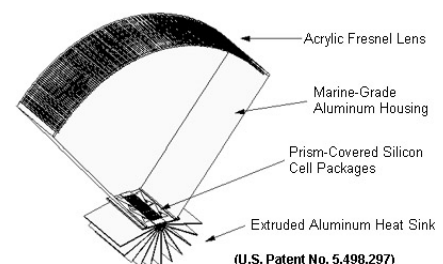
(Stand 2001, IEA 2004, Internet)

Abbildung 3-11: Energieträger
Elektrizitätsproduktion



(Entech 2004, Internet)

Abbildung 3-12: Lineares Fresnel-PV-
Modul von Entech



(U.S. Patent No. 5,498,297)

(Entech 2004, Internet)

Abbildung 3-13: Aufbau Entech-Modul

einem Tracker wie in Abbildung 3-15 abgebildet.

Bei Nachführvorrichtungen ist stets die gegenseitige Beschattung zu beachten. Diese ist gegenüber der Flächendeckung abzuwägen. Mit dem in Kalifornien von Pyron Solar geplanten Solarkraftwerk können 80% der Grundfläche genutzt werden. Die kreisförmig gruppierten Linsenreihen (siehe Abbildung 3-16) schwimmen auf einem Wasserfilm, sodass die azimuthale Nachführung durch ein reibungsarmes Rotieren des Kreises vollzogen werden kann. Linsen mit 400facher Punktfokussierung von Jungbecker Technologies und hocheffiziente Zellen von Boeing Spectrolab werden eingesetzt.

3.2.3 Envelope Technologie

Aufgrund der relativ geringen Strahlungsdichte der Sonne müssen zur Erzeugung grosser Energiemengen weite Flächen überbaut werden. Im Gegensatz zur verbrennungsbasierten Energiegewinnung sind für die Solarenergie nicht Betriebskosten, sondern die Investitionskosten dominierend. Die oben erwähnten Konstruktionsmöglichkeiten haben Wind und Niederschlag stand zu halten und erfordern deshalb eine solide Konstruktion. Für konzentrierende Systeme ist eine präzise Mechanik zur Nachführung erforderlich, welche Sandstürme überstehen muss. Der resultierende Materialbedarf ist ein gewichtiger Kostenfaktor, welcher die Wirtschaftlichkeit solarer Anlagen vermindert.



(Bomin Solar 1981)

Abbildung 3-4: Dampferzeugung mit Envelope-System

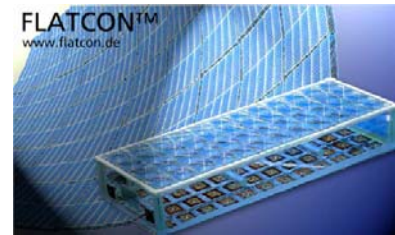
BSR Solar Technologies setzten deshalb auf Leichtbau-Systeme, welche unter einer schützenden Hülle installiert werden (Envelope). Abbildung 3-17 zeigt den 1980 erbauten Parabolspiegel unter einem Dom aus hochtransparenter Florpolymer-Folie, Abbildung 3-4 die Dampferzeugung mit einem kompakten Envelope-System.

3.3 Wirtschaftlichkeit und Förderung

3.3.1 Kosten der Elektrizität

Abbildung 3-18 zeigt das Resultat der Kostenanalyse von Quaschnig 2003. Die Gestehungskosten für die Solarenergie – abgeleitet aus den Investitionskosten und Unterhaltsaufwendungen – sind in Abhängigkeit der verfügbaren globalen Strahlung gegeben.

Die Kosten sinken generell mit zunehmender Globalstrahlung. Da mit der Nähe zum Äquator auch der direkte Strahlungsanteil zunimmt, steigt zudem die Effizienz des thermischen Parabolspiegel-Kraftwerks, welches über 1100 kWh/m^2 Globalstrahlung tiefere Gestehungskosten erlaubt als Photovoltaik.



(Fraunhofer 2004, Internet)

Abbildung 3-14: Punktfokussierung von Flatcon



(Fraunhofer 2005, Internet)

Abbildung 3-15: Nachführ-Vorrichtung von Flatcon



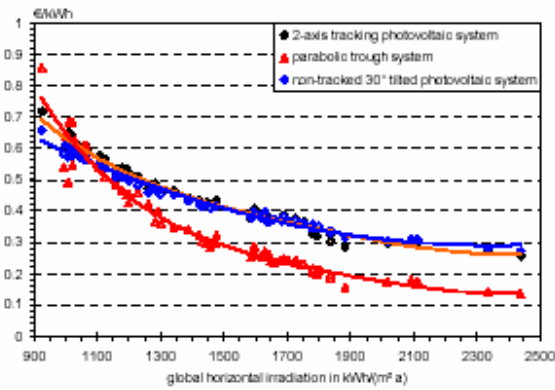
(Pyron Solar 2004, Internet)

Abbildung 3-16: Pyron Solar Prototyp



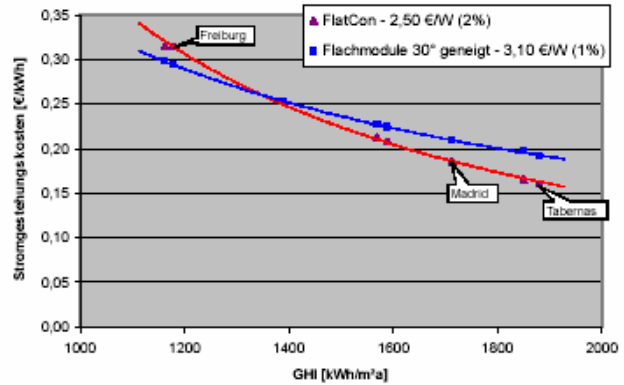
(Bomin Solar 1981)

Abbildung 3-17: Fluoropolymer-Dom



(Quaschnig 2003, Internet)

Abbildung 3-18: Kostenvergleich PV vs. Thermal



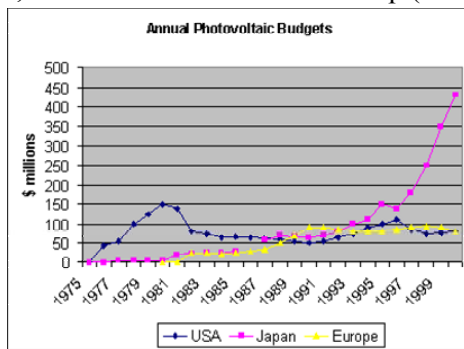
(Fraunhofer 2005, Internet)

Abbildung 3-19: Kostenvergleich Flatcon – Flachmodul PV

Die Wirtschaftlichkeit von konzentrierender Photovoltaik wurde von Quaschnig aufgrund diverser Unsicherheiten nicht analysiert. Für das Flatcon System wurde vom Fraunhofer Institut Gesteungskosten gemäss Abbildung 3-19 berechnet. Der Kostenunterschied für Flachmodule ist auf unterschiedliche Annahmen zum Wartungsaufwand zurückzuführen.

3.3.2 Staatliche Unterstützung

Hinsichtlich der Beschränktheit ressourcengebundener Energieträger und damit verbundenen Emissionen werden erneuerbare teilweise staatlich gefördert. Der Import von fossilen Brennstoffen belastet zudem oft die Importbilanz, weshalb neben ökologischen Aspekten auch das Ziel einer verstärkten energetischen Selbstversorgung eine Motivation dazu bieten kann. Abbildung 3-20 zeigt die Entwicklung der staatlichen Budgets zur Förderung von Photovoltaik der USA, Japan und Europa. Die Vereinigten Staaten Amerikas haben bereits früh in die solare Energiequelle investiert. Mittlerweile sind sie hingegen von Europa eingeholt worden, und die Budgets stagnieren. Japan verfügt kaum über eigene Rohstoffquellen und ist deshalb seit einigen Jahren führend in der Förderung von Photovoltaik. Zudem sind auch einige grosse Hersteller von Photovoltaikmodulen in Japan zu finden, z.B. der Weltmarktführer Sharp (Photon 2/05).



(Solarbuzz 2004, Internet / US Department for Energy)

Abbildung 3-20: Staatliche Photovoltaikbudgets

Tabelle 3-1: Einspeisevergütung Deutschland

EINSPESIERVERGÜTUNGEN NACH EEG	
Freiflächen	45,7 Ct/ kWh
Aufdach bis 30 kW	57,4 Ct/ kWh
Aufdach, Anlagenteil über 30 kW	54,6 Ct/ kWh
Aufdach, Anlagenteil über 100 kW	54,0 Ct/ kWh
Fassaden bis 30 kW	62,4 Ct/ kWh
Fassaden, Anlagenteil über 30 kW	59,6 Ct/ kWh
Fassaden, Anlagenteil über 100 kW	59,0 Ct/ kWh

(Photon Special 05)

Die staatlichen Fördergelder können entweder für Forschung und Entwicklung, für Demonstrationsanlagen oder für eine Stimulierung des Marktes eingesetzt werden.

Eine Marktstimulierung erfolgt oft über einen garantierten Abnahmepreis bei der Einspeisung von Solarstrom ins Elektrizitätsnetz. Dessen Höhe und die damit verbundenen Konditionen hängen von der lokalen Politik ab und variieren von Region zu Region, weshalb ein internationaler Vergleich kaum möglich ist. Tabelle 3-1 zeigt die Einspeisevergütung für Deutschland je nach Platzierung und Kapazität der Solaranlage.

Seit März 2004 verfügt auch Spanien über ein attraktives Einspeisegesetz. Bis zu einer Kapazität von 100 kW werden 575% des durchschnittlichen Stromtarifs respektive 41,4 €-cent/kWh vergütet, darüber 460% respektive 21,6 €-cent/kWh. Die Vergütung ist auf 25 Jahre garantiert, danach werden unbegrenzt 80% ausbezahlt. Allerdings ist das Förderungsprogramm auf total 150 MW für Anlagen unter 100 kW und 200 MW für grössere Anlagen beschränkt. Übersteigt die installierte Kapazität diese Summen, so wird die Vergütung neu berechnet. Für bereits installierte Systeme bleibt die Vergütung unverändert (Photon 7/04).

4 Solares Energiesystems für Gewächshäuser

Das solare Energiesystem verbindet die Envelope Technologie (Abschnitt 2.4.2) mit dem Linsengewächshaus aus Abschnitt 3.2.3. In Abschnitt 4.1 werden die technischen Neuheiten des Systems vorgestellt, bevor in den beiden folgenden Abschnitten auf zwei ausgearbeitete Konstruktionsvarianten eingegangen wird. In Abschnitt 4.4 werden die verbindenden Systeme thematisiert.

4.1 Technische Neuheiten

4.1.1 Selektive Nutzung des Sonnenlichts

Je nach Region und Jahreszeit variiert der diffuse Lichtanteil zwischen 30 und 50%. Wie in Abschnitt 1.4.5 erläutert stagniert die Photosyntheseaktivität über 150 W/m^2 . Die diffuse Strahlung, welche von der Pflanze bevorzugt wird, genügt somit in südlichen Regionen weitgehend für das Pflanzenwachstum. Die Energie der direkten Strahlung, welche zur Überhitzung des Gewächshauses beiträgt, wird durch das solare Energiesystem in Elektrizität und speicherbare Wärme umgewandelt. Dass der diffuse Lichtanteil nicht fokussiert werden kann, ist für rein solartechnisch ausgelegte Systeme von Nachteil, für diese kombinierte Anwendung hingegen sehr passend. Hinter den konzentrierenden Linsen ermöglicht das transmittierte diffuse Licht ein optimiertes Pflanzenwachstum.



(Sunvention 2005)

Abbildung 4-1: Gewächshaus mit solarem Energiesystem

a) Photovoltaik

Das Potential konzentrierender Photovoltaik wurde in Abschnitt 3.1 und 3.2.2 diskutiert. Mit der CoolPhoton-Technologie von BSR Solar Technologies wird einerseits die Zelltemperatur tief gehalten und andererseits Niedertemperaturwärme gewonnen, indem die Zelle diagonal in einem mit Flüssigkeit durchflossenen Glassrohr positioniert wird (siehe Abbildung 4-2).



(eigene Fotos)

Abbildung 4-2: CoolPhoton-Technologie

b) Thermische Nutzung

Die abgeführte Wärme wird gespeichert und heizt nachts das Gewächshaus. Hinsichtlich der Attraktivität thermischer Solarenergieerzeugung kann statt der Photovoltaik auch ein thermischer Absorber im Fokus der Linse installiert werden. Für grosse Anlagen kann eine Elektrizitätserzeugung analog zu konventionellen thermischen Kraftwerken ins Auge gefasst werden, was in dieser Arbeit jedoch nicht untersucht wird.

c) Spektrale Modifikation

Um das Pflanzenwachstum zusätzlich zu fördern, kann durch Pigmente in der zirkulierenden Flüssigkeit (siehe Abbildung 4-8) oder ein selektiv filterndes Absorberrohr die spektrale

Zusammensetzung modifiziert werden, sodass ausschliesslich die von den Pflanzen gewünschten Wellenlängen transmittiert werden. Im Vergleich zum Liquid Radiation Filter Greenhouse (Abschnitt 2.4.2) ist der technische Aufwand für die Zirkulation bedeutend reduziert.

Zur Quantifizierung dieses Effekts sind pflanzenphysiologische Untersuchungen erforderlich, weshalb die Wirtschaftlichkeit dieser Option zu diesem Zeitpunkt noch nicht analysiert werden kann.

4.1.2 Fluorpolymer Folie

Die weit verbreiteten PE-Folien sind preiswert, müssen jedoch alle 3 bis 5 Jahre ausgewechselt werden. Damit verbunden sind nicht nur Montagearbeiten; hinsichtlich einer Ökobilanz ist auch der Energieaufwand in der Produktion und die Hektaren zu entsorgende Folie zu berücksichtigen¹³. Glas hingegen ist teuer, fragil und erfordert eine solide Gewächshausstruktur. Die UV-Strahlung, deren Absorption übliche Folien schädigt, wird von Fluorpolymerfolie transmittiert, was gleichzeitig Aroma und Farbe der Gewächshausenernte verbessert. Abbildung 4-3 zeigt die überlegene Beständigkeit der mechanischen und optischen Eigenschaften über 20 Jahre.

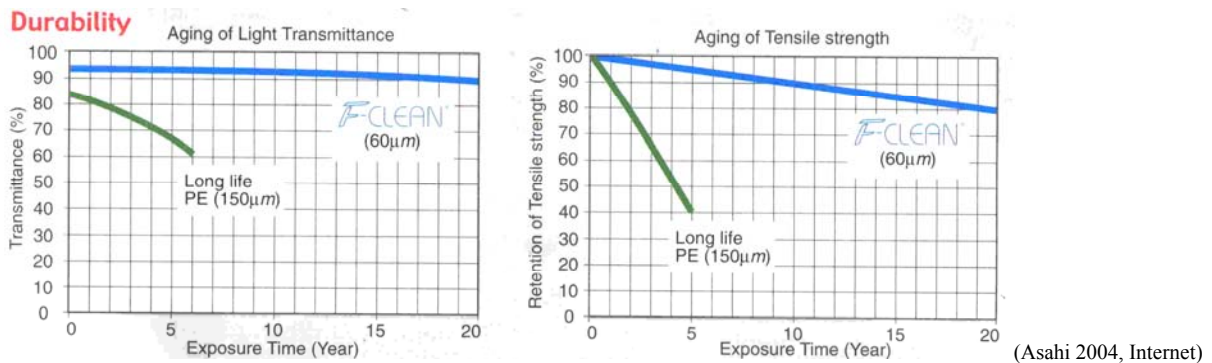


Abbildung 4-3: Beständigkeit von Fluorpolymerfolie

F-Clean ist die Marke der Fluorpolymerfolie von Asahi Glass für den Gewächshausmarkt. Da die Produktionsvolumen noch gering sind, liegen die Preise jedoch 3 bis 5 mal höher als jene von PE-Folien. Wegen der Langlebigkeit und hohen Transmission verwendet BSR Solar Technologies Fluorpolymerfolie für ihre Envelope Technologie und empfiehlt diese als Hülle des mit dem solaren Energiesystem ausgerüsteten Gewächshauses.

4.1.3 Leichtbau

Der Schutz der Gewächshaushülle erlaubt eine präzise und gleichzeitig preiswerte Leichtbaukonstruktion. Zwei Konstruktionsvarianten werden analysiert: Sunflower, welche den Pfad der Sonne der Elevation und dem Azimut nach folgt, sowie die lineare Anordnung Sunflower, welche nur einachsigt nachgeführt wird. Das Tracking-Prinzip der Sunflower kann mit jenem des Pyron Solarkraftwerk (siehe Abbildung 3-16) verglichen werden, in Abbildung 4-4 wird jedoch der Unterschied zwischen der Leichtbau Konstruktion und dem ungeschützten System von Pyron Solar ersichtlich.



(eigene Foto)



(Pyron Solar 2004, Internet)

Abbildung 4-4: Vergleich der Leichtbau-Konstruktion mit einem ungeschützten System

¹³ In Japan wurden 1972/1973 13 Millionen Tonnen Folie verbaut, deren Herstellung 294 Millionen Tonnen Erdöl benötigt (Vergleich Heizbedarf: 105 Millionen Tonnen, Mihara 1987, Internet).

4.2 Sunflower

4.2.1 Konstruktion

Linienreihen unterschiedlicher Länge werden auf einem Kreis arrangiert, welcher sich auf einem dreieckigen Rahmen dreht (Abbildung 4-5). Die Elevationsnachführung ist in Abbildung 4-6 erklärt: Ein auf der Linse montierter Sensor (1) gibt ein Signal an den für Azimut oder Elevation zuständigen Motor (2), sodass die Linse stets senkrecht zur Sonne steht. Eine Stange (3) verbindet die Reihen und richtet die Linsen parallel aus.



(eigene Fotos)

Abbildung 4-5: Azimutnachführung Sunflower

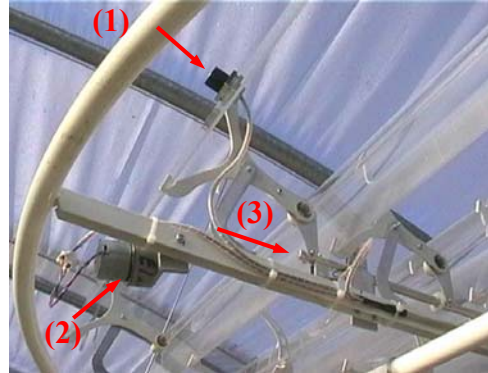


Abbildung 4-6: Elevationsnachführung Sunflower

Aufgrund der zweiachsigen Nachführung können sowohl lineare wie auch punktfokussierende Linsen eingesetzt werden. Für hocheffiziente Photovoltaik ist eine Punktfokussierung nahe liegend, um die teuren Zellen besser auszulasten.

Die wichtigen Masse der Konstruktion sind der Radius des Kreises (r), die Breite der Linsen (b) sowie der Abstand der Linsenreihen (d). Diese Parameter bestimmen die Anzahl Reihen pro Sunflower und damit den Füllfaktor des Kreises (Quadratmeter Linsen pro Kreisfläche). Die Kosten pro Quadratmeter Linse und pro Sunflowermodul¹⁴, sowie die gegenseitige Beschattung der Linsenreihen, welche den Energieoutput pro Linsenfläche und Absorber reduziert, müssen bei der Wahl dieser Parameter berücksichtigt werden.

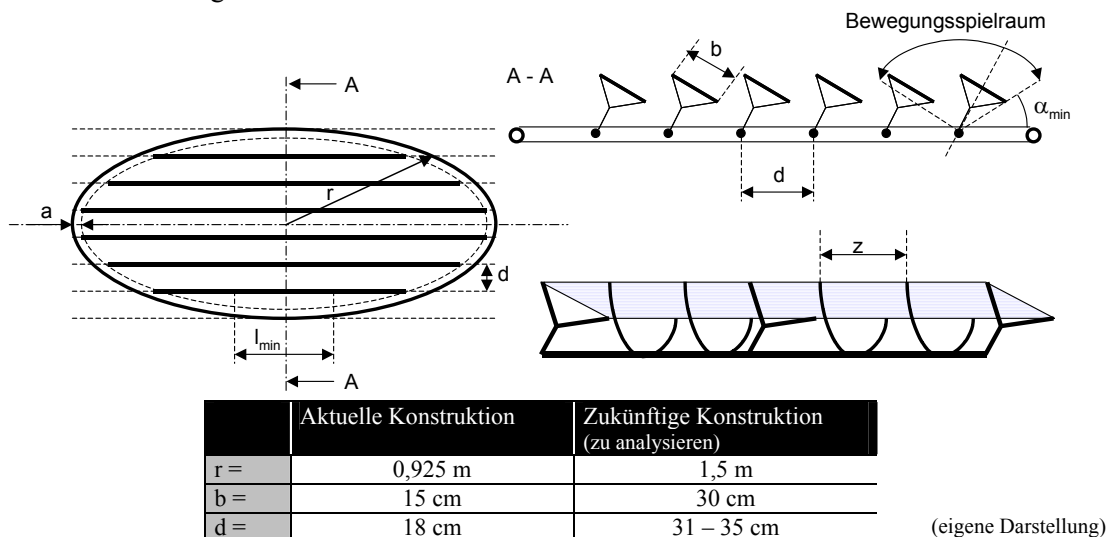


Abbildung 4-7: Masse der Sunflower

Einen weiteren Einfluss auf die nutzbare Strahlung hat der minimale Elevationswinkel α_{\min} , welcher in der aktuellen Konstruktion 20° beträgt. Die Definition einer minimalen Länge der Linsen l_{\min} und ein Abstand von den Linsen zum Rahmen (a) erlaubt eine automatische Berechnung der Anzahl Reihen und der Linsenfläche. Die hufeisenförmigen Zwischenhalter sind mit Abständen von $z \cong 30$ cm montiert, um ein Durchbiegen der Linsen und eine damit verbundene Abweichung der Fokuslinie zu vermeiden.

¹⁴ Rahmen, Sensor, Motor, Verbindungen sowie Installation und Unterhalt

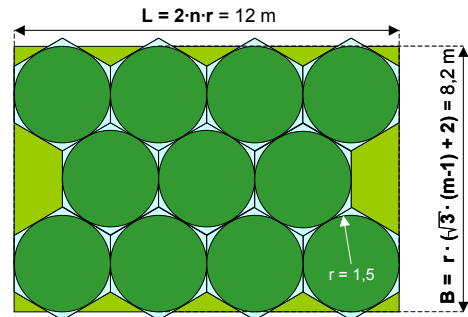
4.2.2 Anordnung

Um die Gewächshausfläche möglichst gut abzudecken, muss die passende Anordnung evaluiert werden. Der dreieckige Rahmen ist für eine bienenwabenartige Anordnung ausgelegt, welche eine dichtere Platzierung erlaubt als rechtwinklige Reihen und Kolonnen. Abbildung 4-8 zeigt die Anordnung im Versuchs-Gewächshaus. Abbildung 4-9 vermittelt einen Einblick in die Berechnung der in das Gewächshaus passenden Anzahl Sunflower bei gegebener Länge und Breite (siehe Berechnungen in Anhang 4).



Abbildung 4-8: Anordnung im Gewächshaus

(eigene Foto)



Anordnung 3

11 Stück auf 98 m² / 86 %

(eigene Darstellung)

Abbildung 4-9: Kalkulation der passenden Anzahl

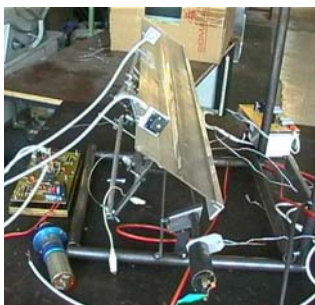
In Abhängigkeit der unbesetzten Lücken am Rande variiert der Füllfaktor der Kreisflächen im Verhältnis zu der gesamten Gewächshausfläche zwischen 70 und 90 %. Um den totalen Füllfaktor – Linsenfläche pro Gewächshausfläche – zu ermitteln, ist der Anordnungs-Füllfaktor mit dem Füllfaktor der Kreise zu multiplizieren.

Das hydraulische System zur Durchströmung der einzelnen Linsenreihen ist aufwändiger als jenes für die nachfolgend beschriebene lineare Konstruktion. Deshalb ist Sunflower primär für die Bestückung mit Photovoltaik empfohlen und weniger für die Hochtemperatur-Anwendung. Das Fluid dient lediglich der Kühlung und ist nicht der Träger der gesamten Energie.

4.3 Sunray

4.3.1 Konstruktion

Für die thermische Energiegewinnung eignet sich ein durchgehender Absorber besser; Verluste im Verteilungssystem werden reduziert. Aus diesem Grund wurde der lineare Sunray entwickelt. Da der Pfad der Sonne nur einachsiger nachvollzogen wird, nimmt die Strahlungsdichte aufgrund von Cosinusverlusten und Reflexion mit wachsender Abweichung der Strahlungsrichtung vom Lot auf die Linse ab. Da sich zudem die Brennweite bei Schrägeinfall ändert, wurde ein so genanntes 1.5-tracking System entwickelt. Abbildung 4-10 zeigt einen Funktionsprototypen.



(eigene Fotos)

Abbildung 4-10: Sunray Tracking



Abbildung 4-11: Montage des ersten Sunray

Die einachsige Nachführung und rotative Korrektur der Brennweite erfolgt ebenfalls über zwei Sensoren. Ein Modul misst zurzeit 6 m, es werden breitere Linsen als bei Sunflower verwendet (51 cm). Zur Stabilisierung sind die Linsen, wie in Abbildung 4-11 illustriert, gewölbt.

4.3.2 Anordnung

Die Reihen eignen sich zur geneigten Montage in der Südwand des Gewächshauses, können aber auch horizontal installiert werden. Die Beschattung hängt vom gewählten Abstand (d) und der Neigung φ ab, was wiederum eine Abwägung gegenüber dem Füllfaktor erfordert. Bei geneigter Montage sind Füllfaktoren über 100 % möglich (Linsenfläche / Gewächshausfläche).

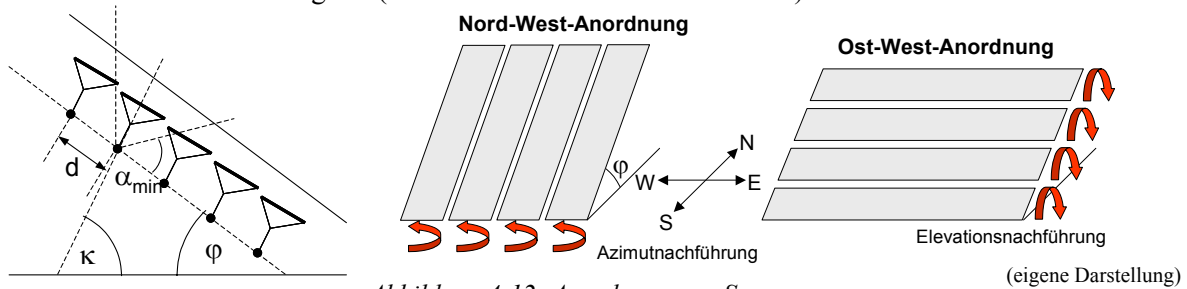


Abbildung 4-12: Anordnung von Sunray

Die Rotationsachse kann parallel zur Ost-West-Achse oder parallel zur Nord-Süd-Achse gewählt werden, wie in Abbildung 4-12 dargestellt. Die Azimutnachführung der Nord-Süd-Anordnung führt zu weniger Cosinus- und Reflexionsverlusten, bei der Ost-West-Anordnung tritt bei gleichem Abstand (d) hingegen weniger Beschattung auf (siehe Abschnitt 4.2). Während bei der Ost-West-Anordnung mehrere Module aneinander gekoppelt werden können, werden die Absorberrohre bei der Nord-Süd-Variante stets unterbrochen, da die Höhe des Gewächshauses beschränkt ist.

Der Minimalwinkel α_{\min} , wie in Abbildung 4-12 links für die Ost-West-Variante definiert, ist bei geneigter Anordnung weniger relevant, hingegen kritisch für die Nord-Süd-Variante. Ab einer gewissen Neigung können jedoch beide Varianten die Strahlung der sommerlichen Morgen- und Abendstunden, wenn die Sonne hinter der Ost-West-Achse auf- und untergeht, nicht auskosten.

Die geneigte Anordnung ist auf die Südwand beschränkt. Bei grösserer Nord-Süd Ausdehnung des Gewächshauses sind die Sunray horizontal zu installieren oder Sunflowers zu platzieren. Es ist auch zu berücksichtigen, dass das Gewächshaus möglicherweise aufgrund der topographischen Gegebenheiten (z.B. Hanglage) nicht ideal nach Süden ausgerichtet ist, wodurch die geneigte Anordnung an Attraktivität verlieren würde.

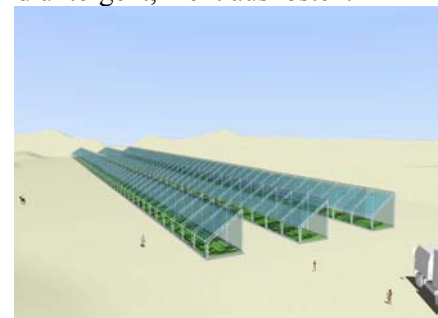


Abbildung 4-13: Langgezogene Gewächshäuser

(Sunvention 2005)

4.4 Systemverbindung

4.4.1 Gewächshaus-Layout

Abbildung 4-14 zeigt Möglichkeiten zur Anordnung von Sunflower und Sunray im Gewächshaus. Die geneigte Anordnung von Sunray lässt sich in lang gezogenen Gewächshäusern (siehe Abbildung 4-13) oder in Kombination mit Sunflower realisieren. Bei $36,5^\circ$ Neigung müssten sich Breite und Höhe in der lang gezogenen Variante ungefähr entsprechen¹⁵. Da eine Gewächshaushöhe über 5 m hinsichtlich der Luftzirkulation nicht erwünscht ist, wäre somit auch die Breite verhältnismässig schmal, was gängigen Standards widersprechen mag. Die Oberfläche und somit der Folienbedarf und Wärmeverlust wäre entsprechend erhöht. Eine um $36,5^\circ$ geneigte N-S-Anordnung der Sunray benötigt rund 5 m Höhe, für übliche Höhen bis zu 4m müssten kürzere Module konzipiert werden.

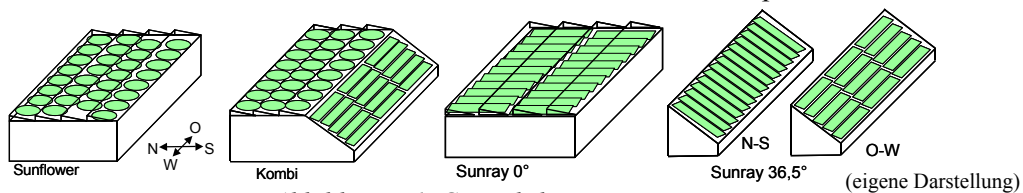


Abbildung 4-14 Gewächshaus-Layout

(eigene Darstellung)

¹⁵ Von der effektiven Höhe wird 1m abgezogen, um den Boden zugänglich zu halten.

Für breite Flächen sei hier eine sägezahnförmige Abstufung vorgeschlagen (Neigung 20°), was einerseits das Abfließen von Regenwasser ermöglicht und andererseits Reflexionsverluste bei tiefem Sonnenstand vermindert.

4.4.2 Thermo-hydraulisches System

Die Zirkulation der Kühlflüssigkeit (photovoltaische Anwendung) oder des Wärmeträgers (thermische Anwendung) erfordert ein hydraulisches System. Die gewonnene Wärme soll für Heizzwecke zur Verfügung stehen, wobei primär ein Ausgleich der Tag- und Nachttemperaturen angestrebt wird; eine saisonale Speicherung würde grosse Speicherkapazitäten und Isolation erfordern. Die Konzeption des Speichers ist noch offen. Entweder gibt das zirkulierende Medium seine Wärme an einen Wasserspeicher ab, oder tiefe Bodenschichten werden erwärmt, was die Auskühlung in der Nacht reduziert.

Sollte das Kühlmedium die Temperatur der Photovoltaikzellen auf 40°C beschränken, so wäre auch die Speichertemperatur entsprechend gering. Möglicherweise wäre es deshalb zweckmässig, einige Absorberreihen – z.B. die Sunrays in kombinierten Häusern – rein thermisch zu betreiben, um das auf 40°C vorerwärmte Medium auf höhere und für Heizzwecke geeignetere Temperaturen zu erhitzen. Eine Heizung mit niedriger Temperatur erfordert für die gleiche Wärmeabgabe grössere Wärmetauschflächen und eine erhöhte Zirkulation.

4.4.3 Elektronik und Regelung

Sowohl das thermisch-hydraulische System wie auch die Nachführung erfordert eine Regelung und benötigt einen gewissen Energieinput. An der Universität Darmstadt wird eine separate Diplomarbeit zu dem Regelungssystem durchgeführt. Als Richtwert wird hier ein Eigenbedarf des Systems von 2 kWh Elektrizität pro Quadratmeter und Jahr berücksichtigt.

Zur Netzeinspeisung ist die Umwandlung des von der Photovoltaik gelieferten Gleichstroms in Wechselstrom erforderlich. Die Aufwendungen zur Regelung werden proportional zur elektrischen Kapazität angenommen (Winter 1991, S. 383: power related Balance-of-System).

5 Solare Ausbeute

In Kenntnis der Konstruktionsparameter soll die energetische Leistung der verschiedenen Optionen ausgewertet werden. Abschnitt 5.1 präsentiert die relevanten Strahlungsdaten, welche den in Abschnitt 5.2 beschriebenen Berechnungen zugrunde liegen. Die Resultate werden in Abschnitt 5.3 diskutiert.

5.1 Strahlungsdaten

5.1.1 Geographische Unterschiede

Die Sonnenwinkel ändern sich mit dem Breitengrad und bestimmen im Zusammenspiel mit dem Wetter die Strahlungsmenge pro Quadratmeter Boden. In Abbildung 5-1 und Abbildung 5-2 ist der Pfad der Sonne von zwei wichtigen Gewächshausregionen verglichen: Almeria in Südspanien auf Breitengrad $36,5^\circ$ und die Niederlanden über 52° ¹⁶.

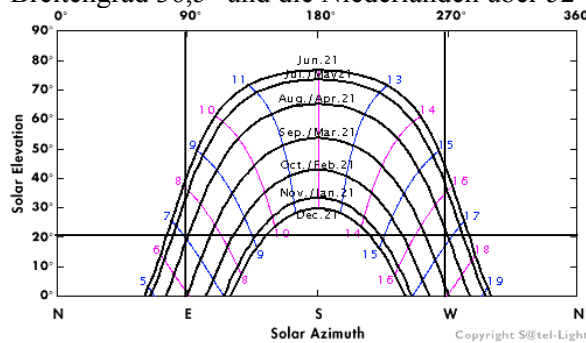


Abbildung 5-1: Pfad der Sonne in Südspanien

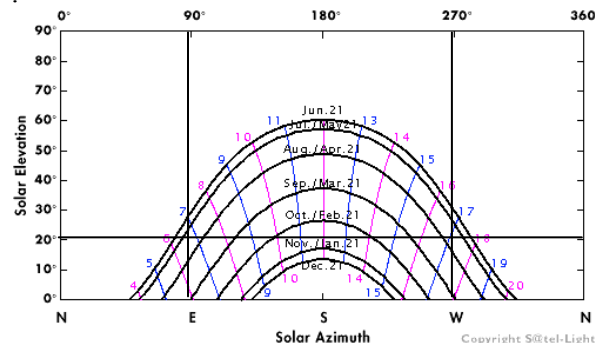


Abbildung 5-2: Pfad der Sonne in den Niederlanden

Es ist offensichtlich, dass die spanischen Bedingungen für das solare Energiesystem geeigneter sind als jene in den Niederlanden. Die horizontale Linie markiert den minimalen Elevationswinkel $\alpha_{\min} = 20^\circ$ für die aktuelle Sunflower Konstruktion. Während drei Monaten könnte in den Niederlanden die Strahlung nicht genutzt werden, während in Spanien die Sonne einiges züger den Minimalwinkel überschreitet. Die Gefahr der Überhitzung des Gewächshauses ist in nördlichen Regionen gering und der Wärmebedarf ist hoch. Deshalb liegt der Schwerpunkt dieser Studie auf Gewächshausregionen unter dem 40° Breitengrad: Mittelmeerländer, Japan und der Süden von Nordamerika.

Die aus dem Verlauf der Sonne resultierende tägliche Verteilung der Einstrahlung über das Jahr ist in Abbildung 5-3 für Südspanien dargestellt. Die Linien repräsentieren gleiche Strahlungsintensität; 700 W/m^2 direkte Strahlung werden in den Mittagsstunden von Juni und Juli erreicht.

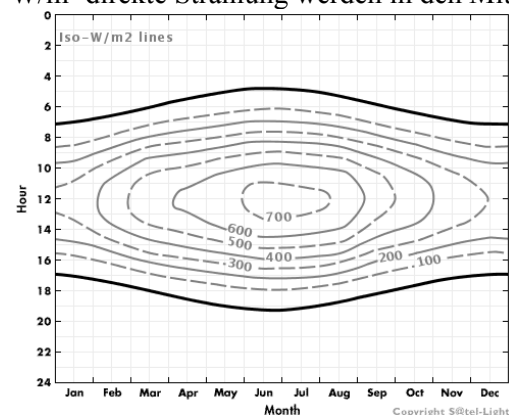


Abbildung 5-3: Direkte Strahlung in Almeria

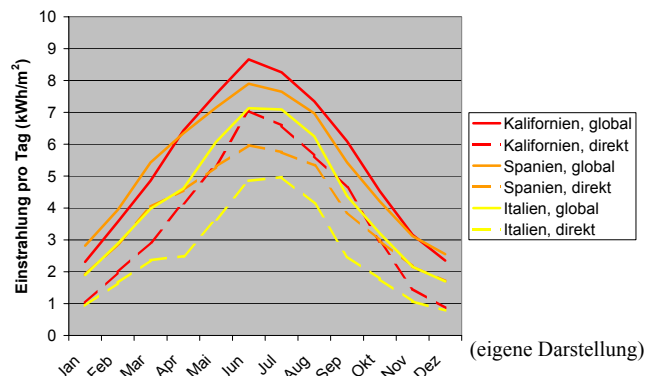


Abbildung 5-4: Vergleich Global- und Direktstrahlung

Abbildung 5-4 und Tabelle 5-1 vergleichen die globale und direkte Strahlung auf eine horizontale Fläche von Fresno (Kalifornien), Almeria (Spanien) und Castanzaro (Italien). Die Globalstrahlung beinhaltet auch die diffuse Strahlung, welche transmittiert und den Pflanzen zur Verfügung steht. Erwartungsgemäss nimmt der Anteil der Direktstrahlung mit der Entfernung vom Äquator ab

¹⁶ Alle europäischen Daten stammen von www.satel-light.com und basieren auf halbstündlich erhaltenen Meteosat Satellitenbilder, gemittelt über die Jahre 1996 bis 2000

(Castanzaro 58%), doch sind auch lokale Einflüsse relevant, wie der Vergleich von Fresno und Almeria auf gleicher Höhe zeigt. Die globale Strahlung ist zwar in Kalifornien höher – insbesondere im Sommer – doch die von dem konzentrierenden System nutzbare direkte Strahlung liegt in Spanien leicht höher.

Tabelle 5-1: Vergleich Global- und Direktstrahlung

	Fresno, Kalifornien	Almeria, Spanien	Castanzaro, Italien
Breitengrad	36,4°	36,5°	38,5°
Globalstrahlung	1984 kWh/m ² a	1934 kWh/m ² a	1634 kWh/m ² a
Direktstrahlung	1360 kWh/m ² a	1414 kWh/m ² a	950 kWh/m ² a
% Direktstrahlung	66 %	73 %	58 %
Datenquelle	www.nrel.gov	www.satel-light.com	www.satel-light.com

5.1.2 Kalkulation Sonnenwinkel

Die Sonnenwinkel können approximativ berechnet werden (Winter 1991, S.22). Elevations- und Azimutwinkel werden von der Europäischen Datenbank geliefert, jedoch nicht für die amerikanischen Daten. Für den Elevationswinkel, welcher bei der Sunflower für den Schattenwurf verantwortlich ist, gilt nach Winter die folgende Formel:

$$\sin \alpha = \cos \delta \cdot \cos \Phi \cdot \cos \omega + \sin \delta \cdot \sin \Phi$$

- α : Elevationswinkel
- Φ : Breitengrad
- δ : Deklination, $\delta \in [-23,44^\circ; 23,44^\circ]$
- ω : Stundenwinkel, $\omega = 0$ bei Sonnhöchststand und $\omega > 0$ am Nachmittag.

Die Winkel, welche für die Beschattung und Reflexion bei Sunray relevant sind, müssen vom Sonnenvektor (s_x, s_y, s_z) abgeleitet werden (siehe Winter 1991, S.24). Details zu den Berechnungen befinden sich in Anhang 5.

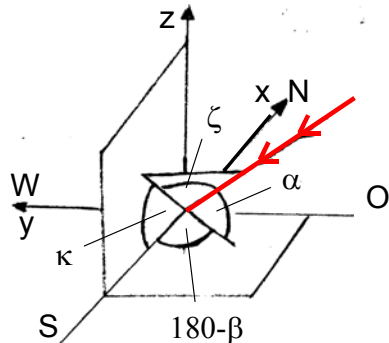


Abbildung 5-5: Winkel für O-W-Sunray

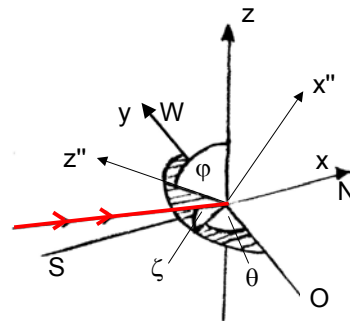


Abbildung 5-6: Winkel für N-S-Sunray

(eigene Darstellungen)

$$\tan \kappa = \frac{s_z}{-s_x} = \frac{\cos \delta \cdot \cos \Phi \cdot \cos \omega + \sin \delta \cdot \sin \Phi}{\cos \delta \cdot \sin \Phi \cdot \cos \omega - \sin \delta \cdot \cos \Phi}$$

$$\tan \theta = \frac{s_z''}{-s_y} = \frac{\cos \delta \cdot \cos(\Phi - \varphi) \cdot \cos \omega + \sin \delta \cdot \sin(\Phi - \varphi)}{-\cos \delta \cdot \sin \omega}$$

$$\cos(\zeta_{E-W} + \pi/2) = (s_x, s_y, s_z) \cdot (0, 1, 0) = s_y = \cos \delta \cdot \sin \omega$$

$$\cos(\zeta_{N-S} + \pi/2) = (s_{x'}, s_y, s_{z'}) \cdot (1, 0, 0) = s_{x'} = -\cos \delta \cdot \sin(\Phi - \varphi) \cdot \cos \omega + \sin \delta \cdot \cos(\Phi - \varphi)$$

Für eine geneigte Ost-West-Anordnung von Sunray ist die Neigung φ von κ abzuziehen, um den Schattenwinkel zu erhalten. Je kleiner die Differenz zwischen φ und dem Breitengrad Φ , umso geringer der Schattenwurf. Für $\varphi = \Phi$ bleibt der Reflexionswinkel ζ_{N-S} über den Tag konstant und variiert nur der Deklination entsprechend um $\pm 23,44^\circ$. Wenn $s_{z'}$ negativ wird, kann das System das Sonnenlicht nicht nutzen, da die Linsen gegen hinten gedreht werden müssten.

5.2 Datenverarbeitung

5.2.1 Parameter-Sheet

Mit Hilfe der erarbeiteten Microsoft Excel Tabellenkalkulation kann der Energieoutput pro Quadratmeter Linse und Gewächshaus berechnet werden. Abbildung 5-7 zeigt einen Auszug aus dem Parameter-Sheet des Rechenmodells. Auszufüllen sind die grünen Felder.

Die in das Gewächshaus passende Anzahl Sunflower und Sunray wird in Abhängigkeit der in Abschnitt 4.2 und 4.3 diskutierten Parameter berechnet. Im abgebildeten Beispiel sind 8 Ost-West-Sunray Reihen in der Südwand installiert. Mit einer dem Breitengrad entsprechenden Neigung werden vier der 20 Meter Breite beansprucht. Die verbleibenden 16 m sind mit Sunflowers analog zu der in Abbildung 4-9 gezeigten Anordnung besetzt. Der Kreis-Füllfaktor der 3m-Durchmesser Sunflower beträgt 83%, multipliziert mit dem Anordnungs-Füllfaktor (85%) ergibt sich ein totaler Füllfaktor von 71%.

Parameter Gewächshaus		
Länge (Ost-West)	L	100 m
Breite (Nord-Süd)	B	50 m
Fläche total	F	5000 m ²
Höhe	H	4 m
Minimale Starthöhe Sunray	H _{st}	1 m
Bebaute Höhe	H _{SR}	3,0 m
Neigung der Sunray-Fläche	φ	36,5 °
Maximale Breite Sunray	B _{SRmax}	4,05 m
Breite Sunray	B _{SR}	4 m
Breite Sunflower	B _{SF}	46,0 m
Grundfläche Sunflower	F _{SR}	4600 m ²
Grundfläche Sunray	F _{SF}	400 m ²
Oberfläche mit Fluorpolymer		5600 m ²
nur über Energiesystem	V 1	5098 m ²
inkl. Vorder- und Rückwand	V 2	5598 m ²
inkl. Seitenwände	V 3	5986 m ²

Bestückung Sunflower		
Anzahl in der Länge		33 Stück
Anzahl in der Breite		17 Stück
Anzahl Sunflower im GH		553 Stück
Gesamte Linsenfläche		3260 m ²
Füllfaktor Linsen/Kreis ; Kreise/GH		83% 85%
Füllfaktor Sunflower (Linsen/GH)		71% 3

Bestückung Sunray		
Anzahl Module nebeneinander		16 Stück
Anzahl Reihen	n _{row}	8 Stück
Anzahl von Modulen im Gewächshaus		128 Stück
Gesamte Linsenfläche		392 m ²
Füllfaktor Sunray		98%

Ausrichtung Sunray	Parallel Ost-West	▼
Standort	Spanien, Almeria	▼

Parameter Sunflower			
	Abkürzu	Wert	Einheit
Distanz der Linsenreihen	d	0,33	m
Breite der Linsen	b	0,3	m
Radius Sunflower	r	1,5	m
Totale Linsenlänge	l	19,65	m
Linsenfläche	f	5,895	m ²
minimal Winkel	α _{min}	20	°
minimale Linsenlänge	l _{min}	0,3	m
Radiuskorrektur Linsenposition	a	0,075	m
Distanz Zwischenhalter Linsen	z	0,305	m
Anzahl Linsenreihen		9	Stück

(eigene Darstellung)

Parameter Sunray			
	Abkürzu	Wert	Einheit
Distanz der Linsenreihen		0,60	m
Breite der Linsen		0,51	m
Länge eines Linsenmoduls	l _{Modul}	6	m
Linsenfläche		3,06	m ²
minimal Winkel (bei horizontalem Einsatz)		0	Grad
Abstände zwischen Modulen	a	0,02	m
Genutzte Länge		96	m

Abbildung 5-7: Auszug aus Parameter-Sheet

Ein Schalter ermöglicht die Auswahl der Lokation – zur Auswahl stehen Fresno, Almeria und Castanzaro. Ebenso kann die Orientierung des Sunrays gewählt werden.

Das Modell schlägt einen Wert für die benötigte Fluorpolymerfläche vor, um das System abzudecken. Wenn der Gewächshausbesitzer die Folie nicht ersetzen möchte, kann dieser Wert gleich Null gesetzt werden. Gleichzeitig müssen jedoch auch die Transmissions- und Streuungseigenschaften der Folie – wie im folgenden Abschnitt diskutiert – angepasst werden.

5.2.2 Materialeigenschaften

Der Energiefluss von der Sonne bis ins Elektrizitätsnetz wird von verschiedenen Effizienzen und Materialeigenschaften beeinflusst, wie in Abbildung 5-8 dargestellt. Ein gewisser Strahlungsanteil

geht bei der Transmission durch die Gewächshaushülle verloren, ein Teil der direkten Strahlung wird gestreut und kann somit nicht mehr energetisch genutzt werden. Mit PE-Folie würden rund 45% des Lichtes gestreut (siehe Abschnitt 2.2.2), was den Energieoutput drastisch reduzieren würde. Rechts oben in Abbildung 5-8 ist die berücksichtigte Winkelabhängigkeit der Hüllentransmission in Anlehnung an Abbildung 1-5 gezeigt. Aufgrund des tiefen Brechungsindex der Fluorpolymerfolie verringert sich die Transmission erst bei grosser Abweichung vom Lot. Relevant ist der Einfallswinkel auf die Folie, welcher von der Kontur des Gewächshauses abhängig ist. Das diffuse Licht, sowie der Teil des direkten Lichtes, welcher zwischen den Linsen durchscheint (entsprechend dem Füllfaktor), steht der Photosynthese zur Verfügung. Die Transmissionsverluste sind vom Reflexionswinkel ζ abhängig.

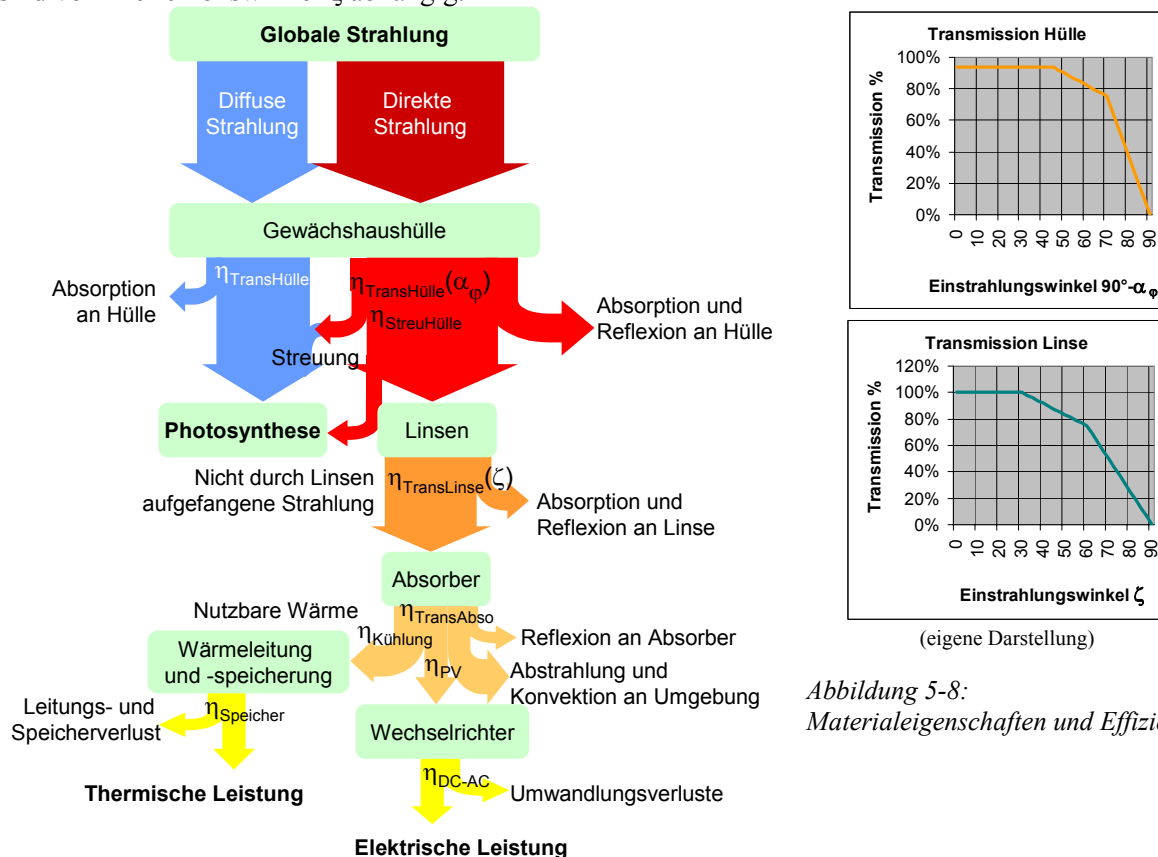


Abbildung 5-8: Materialeigenschaften und Effizienz

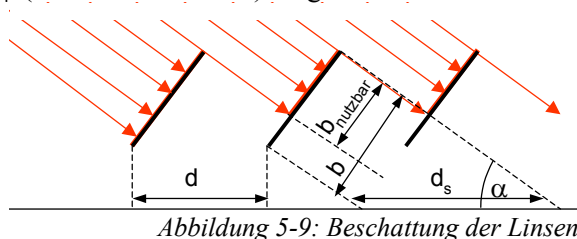
Tabelle 5-2 zeigt die verwendeten Werte und Quellen. Die Eigenschaften des Absorbers können dem Verwendungszweck angepasst werden. Für Gallium-Arsenid-Zellen kann die Effizienz der PV-Zelle η_{PV} auf 35% gesetzt werden (Boeing Spectrolab 2005, Internet). Soll ein rein thermisches System betrachtet werden, so kann die PV-Effizienz gleich Null gesetzt werden und eine höhere thermische Effizienz $\eta_{Kühlung}$ angenommen werden. Die Umwandlung der Wärme in Elektrizität liegt jedoch ausserhalb des hier behandelten Systems; zudem ist eine lineare Outputrechnung für thermische Kraftwerke ungenügend (erforderliche Mindesttemperatur etc). Das Rechenmodell ist deshalb primär für Photovoltaik konzipiert; die gewonnene Wärme dient der Versorgung des Gewächshauses.

Tabelle 5-2: Materialeigenschaften und Effizienz

Abkürzung	Text	Wert	Quelle
$\eta_{TransHülle}$	Transmission Folie (max)	94 %	Asahi Glass
$\eta_{StreuHülle}$	Streuung	5 %	Asahi Glass
$\eta_{TransLinse}$	Transmission Linse (max)	85 %	Jungbecker Technologies
$\eta_{TransAbso}$	Transmission PV-Module	95 %	BSR Solar Technologies
η_{PV}	Effizienz PV-Zelle bei 40°C	15 %	Solartech
$\eta_{Kühlung}$	Thermische Effizienz CoolPhoton	75 %	BSR Solar Technologies
η_{DC-AC}	Effizienz Wechselrichter	90 %	Solarbuzz
$\eta_{Speicher}$	Effizienz Wärmespeicher/-leitung	75 %	BSR Solar Technologies

5.2.3 Elevations- und Azimutverluste

Wenn die Apparaturfläche senkrecht zur Strahlung gestellt wird, erhöht sich die Strahlungsdichte bedeutend gegenüber einer horizontalen Anordnung (siehe Abschnitt 3.1.2). Mehr als die horizontale Strahlungsmenge steht jedoch nicht zur Verfügung, die geneigte Apparaturfläche wirft einen Schatten, welcher je nach gewähltem Reihenabstand den Energieinput auf die folgende Reihe reduziert. Wenn der Reihenabstand schmaler ist als die beschattete Fläche d_s , so tritt Beschattung auf. In Abbildung 5-9 steht α stellvertretend für den Schattenwinkel; für Sunray muss hingegen θ (Nord-Süd-Variante) respektive $\kappa-\varphi$ (Ost-West-Variante) eingesetzt werden.



(eigene Darstellung)

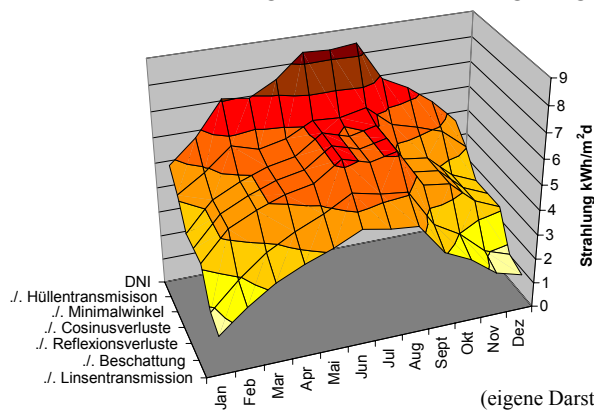
Bedingung für Schattenwurf: $d_s = b / \sin(\alpha) > d$
Nutzbare Breite $b_{\text{nutzbar}} = d \cdot \sin(\alpha)$

Das Modell rechnet die nutzbare Strahlung für jede Tagesstunde in jedem Monat aus, unter Berücksichtigung der entsprechenden Beschattung sowie Cosinus- und Reflexionsverluste (siehe Abschnitt 3.1.2). Die resultierende Energieausbeute wird im folgenden Abschnitt diskutiert. Der detaillierte Rechenablauf kann in Anhang 5 eingesehen werden.

5.3 Energieoutput

Den Ausführungen in diesem Abschnitt liegen die spanischen Strahlungsdaten zu Grunde. Im Vordergrund stehen die unterschiedlichen Gestaltungsmöglichkeiten des solaren Energiesystems. Die regionalen Unterschiede wurden in Abschnitt 5.1.1 thematisiert. Zwei Faktoren sind zu analysieren: Konstruktionsparameter und Varianten der Anordnung. Bei der Optimierung beider muss berücksichtigt werden, dass nicht nur der Energieoutput, sondern auch die damit verbundenen Kosten die Wirtschaftlichkeit beeinträchtigen.

Die Verluste – von der direkten Strahlung auf eine ideal nachgeführte Fläche aussen (DNI) bis zur nutzbaren Strahlung auf der Linsenfläche – sind in Abbildung 5-10 für Sunflower und in Abbildung 5-11 für Ost-West ausgerichtete, um $36,5^\circ$ geneigte Sunray illustriert.



(eigene Darstellung)

Abbildung 5-10: Verluste Sunflower Ø3m

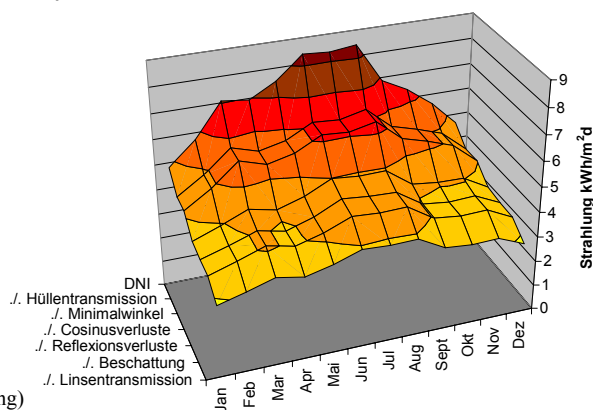


Abbildung 5-11: Verluste O-W-Sunray 36,5°

Die Verluste der Hüllentransmission sind für beide Systeme identisch. Bei Sunflower wird ein Teil der Strahlung aufgrund des Minimalwinkels von 20° abgeschnitten, dafür entfallen die azimutbedingten Cosinus- und Reflexionsverluste. Beschattung tritt bei dem O-W-Sunray aufgrund der geneigten Anordnung im Gegensatz zu Sunflower kaum auf. Die Linsentransmission ist wiederum identisch. Von Interesse ist auch die Verteilung des Energieoutputs über das Jahr. Speziell bezüglich des Wärmeoutputs ist die relativ ausgeglichene Bereitstellung der Energie eines geneigten Sunray geeigneter als der im Winter stark reduzierte Output der Sunflower.

Tabelle 5-3 vergleicht den Wärmeoutput, wobei speziell der Anteil des Winterhalbjahres von Interesse ist. Es ist fraglich, ob der sommerlastige Output von Sunflower alleine den winterlichen Wärmebedarf des Gewächshauses decken kann.

In den folgenden beiden Abschnitten werden die Verluste nach Azimut (Cosinus- und Reflexionsverluste), Elevation (Minimalwinkel und Beschattung) und Transmission (Hülle und Linse) zusammengefasst und die Konstruktionsoptionen mit einander verglichen.

Tabelle 5-3: Vergleich Wärmeoutput

$\frac{kWh_{th}}{m^2_{GH}}$	total Jahr	Winterhalbjahr Okt-März	
Sunflower	327	112	34%
Sunray O-W 0°	364	127	35%
Sunray N-S 0°	357	105	30%
Sunray O-W 36,5°	519	240	46%
Sunray N-S 36,5°	586	271	46%

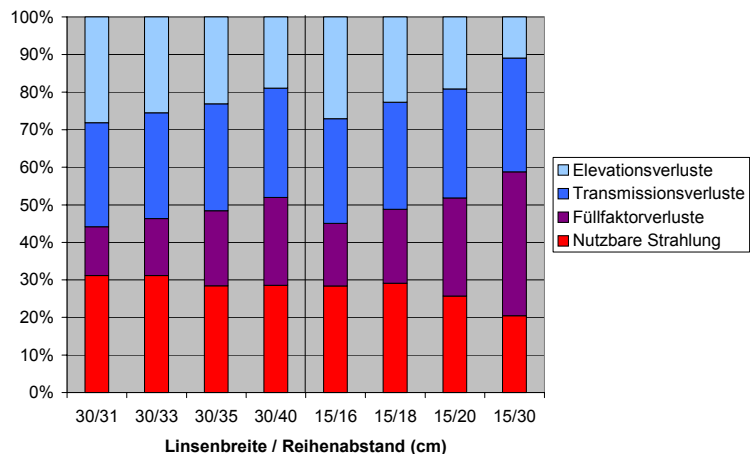
5.3.1 Sunflower

Die nutzbare Strahlung für verschiedene Radien, Linsenbreiten und Reihenabstände der Sunflower werden in Abbildung 5-12 verglichen. 100% stehen für die 2454 kWh direkte Strahlung auf eine ideal nachgeführte Fläche pro Quadratmeter und Jahr. Die Beschattungsverluste nehmen mit zunehmendem Reihenabstand ab, die Transmissionsverluste bleiben unverändert bei rund 28%¹⁷. Von der Linsenfläche der Variante mit 30 cm breiten Linsen und 33 cm Reihenabstand können 46% respektive 1138 kWh/m²a genutzt werden, bei 40 cm Abstand sind es über 50%. Von Interesse ist jedoch auch die aufgefangene Strahlung pro Quadratmeter Gewächshaus. Das Beispiel bezieht sich auf ein Gewächshaus 50 x 20 m. Der Füllfaktor der Kreise nimmt mit dem Reihenabstand ab, was die nutzbare Strahlung pro Gewächshausfläche reduziert.

b / d	Ø SF (=2r)	# rows	$\frac{kWh_{DC}}{m^2_{GHa}}$	$\frac{kWh_{DC}}{m^2_{Lins a}}$
30/31	3	9	109	154
30/33	3	9	109	162
30/35	3	7	99	169
30/40	3	7	100	182
15/16	1,85	9	99	158
15/18	1,85	9	102	171
15/20	1,85	7	90	181
15/30	1,85	5	71	206

(eigene Darstellung)

Abbildung 5-12: Nutzbare Strahlung Sunflower



Die 30 cm Linsen sind auf einem Rahmen mit 3 m Durchmesser platziert. Die Sunflower mit 15 cm Linsenbreite hat 1,85 m Durchmesser. Der anordnungsbedingte Füllfaktor unterscheidet sich nur gering (81% für Ø3m / 85% für Ø1,85m). Aufgrund eines höheren Kreis-Füllfaktors ist der Strahlungsinput pro Gewächshausfläche für die grössere Sunflower-Variante generell höher.

5.3.2 Sunray

Bei Sunray ist vor allem der Einfluss von Orientierung und Neigung interessant. Die effektiv überbaute Breite nimmt mit zunehmender Neigung ab, doch um den Output pro Quadratmeter Gewächshaus vergleichen zu können, wurde eine Referenzfläche von 6,1 m Breite und 96,5 m Länge gewählt und die Zahl der Module konstant gehalten¹⁸ (O-W: 10 Reihen x 16 Kolonnen / N-S: 1 Reihe x 160 Kolonnen). Linsen von 51 cm Breite und ein Reihenabstand von 60 cm sollen betrachtet werden.

Abbildung 5-13 bestätigt die Behauptung von Abschnitt 4.3.1, dass bei dem Nord-Süd-Sunray zwar weniger Reflexions- und Cosinusverluste auftreten, hingegen mehr Beschattung als in der Ost-West-Version auftritt.

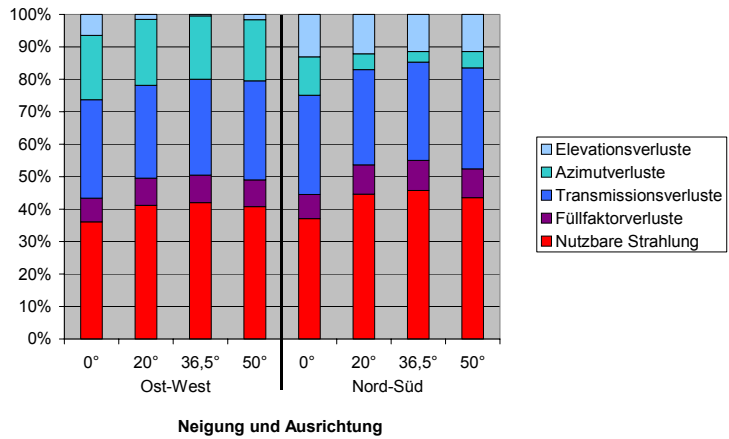
¹⁷ Angenommen wurde eine Dachneigung von 20°

¹⁸ Würde nur die effektiv überbaute Breite berücksichtigt, so wäre bei 36,5° und 50° ein „Füllfaktorgewinn“ zu verzeichnen.

	Neigung	m eff. Breite	$\frac{kWh_{DC}}{m^2_{GHa}}$	$\frac{kWh_{DC}}{m^2_{Linsa}}$
E-W	0°	6	126	152
E-W	20°	5,6	144	173
E-W	36,5°	4,8	147	177
E-W	50°	3,9	143	171
N-S	0°	6	130	156
N-S	20°	5,6	156	187
N-S	36,5°	4,8	160	192
N-S	50°	3,9	152	183

(eigene Darstellung)

Abbildung 5-13: Nutzbare Strahlung
Sunray



Erwartungsgemäss vermindern sich die Verluste je geringer die Differenz ist zwischen Neigung und Breitengrad. 1350 kWh/m²a, respektive 55%, können pro Linsenfläche mit der geneigten Nord-Süd-Variante erreicht werden, 50% (1238 kWh/m²a) mit der Ost-West Anordnung.

Aufgrund der dichten Anordnung ist der Elektrizitätsoutput pro Gewächshausfläche signifikant höher als bei Sunflower. Für die vergleichbare horizontale Anordnung ist der Output pro Linsenfläche hingegen bei Sunflower höher. Geneigte Sunray können pro Linsenfläche mehr Strahlung nutzen.

5.3.3 Systemvergleich

Um das solare Energiesystem mit anderen solaren Systemen vergleichen zu können, sind im folgenden die relevanten Werte einiger Varianten zusammengefasst.

Tabelle 5-4: Vergleich Elektrizitätsoutput

		Kalifornien	Spanien	Italien
GHI	Global horizontal	1984	1934	1634
DNI	Direkt senkrecht	2224	2454	1640
Sunflower Ø1,85m*	Nutz. Strahlung _{GH}	716	715	477
50 x 20 m	AC / m ² _{Linse}	150	150	99
FF = 60 % (70% · 85%)	AC / m ² _{GH}	90	90	59
Sunflower Ø3m**	Nutz. Strahlung _{GH}	766	765	510
50 x 20 m	AC / m ² _{Linse}	143	143	94
FF = 67 % (83% · 81%)	AC / m ² _{GH}	96	96	63
Sunray O-W 0°	Nutz. Strahlung _{GH}	811	852	539
50 x 20 m	AC / m ² _{Linse}	126	133	83
FF = 81 %	AC / m ² _{GH}	102	107	67
Sunray N-S 0°	Nutz. Strahlung _{GH}	853	834	559
50 x 20 m	AC / m ² _{Linse}	141	138	92
FF = 81 %	AC / m ² _{GH}	107	105	70
Sunray O-W 36,5°	Nutz. Strahlung _{GH}	1112	1213	772
100 x 5 m	AC / m ² _{Linse}	144	157	99
FF = 98 %	AC / m ² _{GH}	141	154	97
Sunray N-S 36,5°	Nutz. Strahlung _{GH}	1288	1372	894
100 x 5 m	AC / m ² _{Linse}	161	171	111
FF = 102 %	AC / m ² _{GH}	163	174	113

* b=15 cm / d=18 cm

** b=30 cm / d=33 cm

Sunray: b=55 cm / d=60 cm

Erstaunlich ist der generell tiefere Output pro Gewächshausfläche der zweiachsig nachgeführten Sunflower gegenüber dem einachsigen System. Sunflower vermeidet zwar Azimuthverluste, doch die Beschattung ist signifikant höher: Der für den Schattenwurf verantwortliche Elevationswinkel α bleibt tiefer als dessen Projektionen κ oder θ , welche für Sunray relevant sind.

In die kleinen Differenzen zwischen dem kalifornischen und spanischen Output sollte nicht zu viel hineininterpretiert werden, da die Sonnenwinkel für Kalifornien im Gegensatz zu den spanischen nur approximativ berechnet wurden. In Italien, nur 2 Breitengrade nördlicher, kann hingegen bedeutend weniger Energie genutzt werden.

Tabelle 5-5 vergleicht einen dem Breitengrad entsprechend geneigten N-S-Sunray mit einer vergleichbaren Konstruktion ohne Gewächshaus¹⁹ und der verbreiteten unkonzentrierten und nicht-nachgeführten Photovoltaik (spanische Daten).

Tabelle 5-5: Vergleich von Photovoltaiksystemen

kWh/m ²	Flate-plate PV ²⁰		Konzentrierende PV mit Spiegel		N-S-Sunray 36,5° in Gewächshaus	
Globalstrahlung horizontal (GHI)	1934		1934		1934	
./. diffuse Strahlung			-520	-27%	-520	-27%
Direktstrahlung horizontal			1414		1414	
./. Transmission und Streuung					-202	-14%
Direktstrahlung horizontal im GH					1212	
+ Gewinn aufgrund Neigung 36,5°	+197	+10%				
+ Gewinn aufgrund Nachführung			+940	+66%	+658	+54%
Einstrahlung auf die Apparaturfläche	2131		2354		1870	
./. Reflexionsverluste	-36	-2 %				
./. Konzentrationsverluste (Spiegel/Linse)			-187	-8%	-280	-15%
Nutzbare Strahlung (ohne Schatten)	2095		2167		1590	
inklusive Schatten, d = 60 cm			1696	-22%	1350	-15%
d = 1 m			1928	-11%	1514	-5%
d = 5 m			2116	-2%	1590	-0%
Gleichstrom-Output	251	12%	302	14%	190	14%
Wechselstrom-Output (90%)	226	◆	271	◆	171	◆

Für eine offene Konzeption ohne Gewächshaushülle können weite Abstände gewählt werden, um die Beschattungsverluste zu minimieren. Bei 5m Reihenabstand tritt noch 2% Beschattung auf, bei der Anordnung im Gewächshaus ging dieser Anteil mit flacher Einstrahlung bereits bei der Hüllentransmission verloren.

Der Beschattungsverlust in Funktion des Reihenabstandes ist in Abbildung 5-14 dargestellt. Mit zunehmendem Reihenabstand nimmt zwar die nutzbare Strahlung pro Linsenfläche zu, die genutzte Strahlung pro Gewächshausfläche sinkt hingegen stark. Damit geht auch eine Verminderung des positiven Einflusses auf das Gewächshausklima einher: Bei dem gewählten schmalen Reihenabstand von 60 cm können gut 60% der Strahlung aufgefangen werden, während der Kühleffekt bei grossen Abständen vernachlässigbar wird. Zudem ist bei weiten Abständen mehr Folie pro Linsenfläche erforderlich.

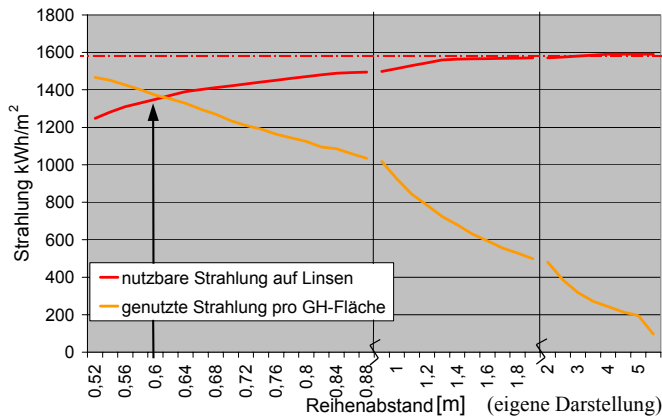


Abbildung 5-14: Nutzbare Strahlung in Funktion des Reihenabstandes

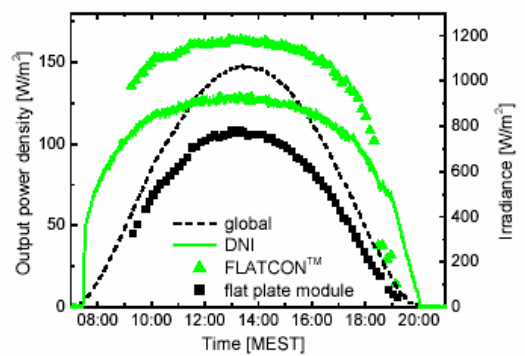


Abbildung 5-15: Globalstrahlung gegenüber DNI (Fraunhofer 2005, Internet)

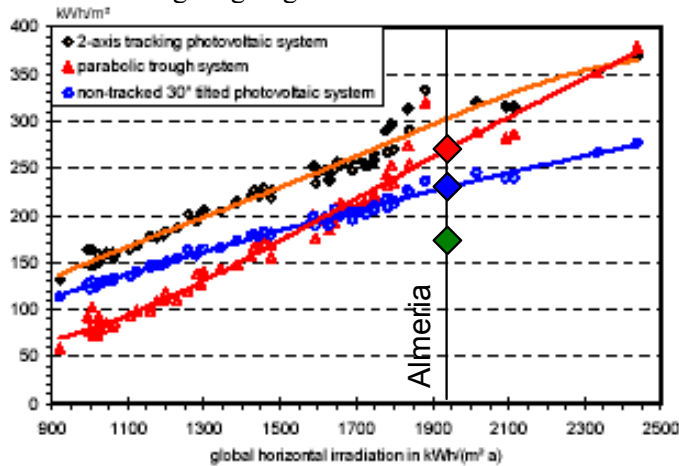
Erstaunen mag die Tatsache, dass die Strahlung auf die Apparaturfläche für ein konzentrierendes System – welches nur Direktstrahlung nutzen kann – höher ist als für ein unkonzentrierendes System, welches auch den diffusen Lichtanteil nutzen kann. Abbildung 5-15 zeigt den hohen Elektrizitätsoutput des in Abschnitt 3.2.2 erwähnten Flatcon Systems im Tagesverlauf. Die Fläche unter dem Verlauf der Direktstrahlung auf eine ideal nachgeführte Fläche (DNI) ist grösser als jene

¹⁹ Einachsiger dem Azimut nachgeführter, um 36,5° geneigter Spiegel. (Berechnung im Rahmen der Studie „Cool Photon, an Actively-Cooled Concentrating PV-System“, welche parallel zu dieser Arbeit entstanden ist.)

²⁰ Nicht-konzentrierende, nicht-nachgeführte Photovoltaik

unter der Globalstrahlungskurve, was die Überlegenheit nachgeführter konzentrierender Systeme belegt.

Winter gibt 1991 für thermische Solarkraftwerke einen jährlichen Output von 280-300 kWh_{el}/m² an und 140 kWh_{el}/m²a für Photovoltaik in Zentraleuropa (Winter 1991, S.13). Die Simulationsergebnisse von Quaschnig für verschiedene solare Systeme sind in Abbildung 5-16 illustriert. Vertikal ist der Wechselstrom-Output pro Quadratmeter Apparaturfläche abgebildet, horizontal ist die Globalstrahlung auf eine horizontale Fläche. Die eigenen Resultate für Almeria aus Tabelle 5-5 wurden der Abbildung beigelegt.



(Quaschnig 2003, ergänzt mit eigenen Resultaten)

Abbildung 5-16: Elektrizitätsoutput verschiedener Systeme

Über 1700 kWh/m²a Globalstrahlung liefert das thermische Parabolspiegelkraftwerk dank dem abnehmenden Diffusanteil und steigender Effizienz mehr Energie als geneigte, nicht nachgeführte Photovoltaik. Dessen einachsige Nachführung und die Effizienz bei 1934 kWh/m²a entspricht etwa jener der betrachteten ungeschützten konzentrierenden Photovoltaik. Der aufgrund von Transmissionsverlusten tiefere Output des Gewächshaus-Systems muss durch eine preiswerte Leichtbau-Konstruktion oder agronomischen Zusatznutzen ausgeglichen werden.

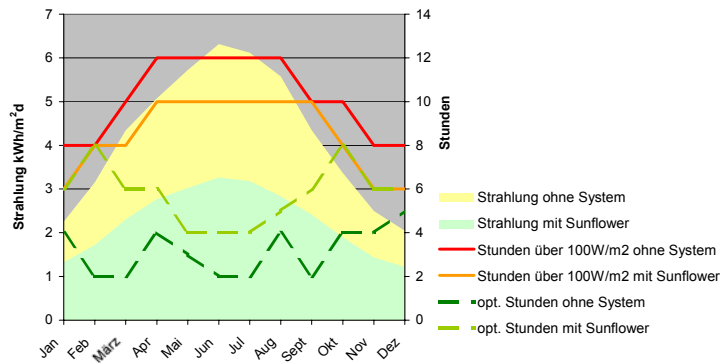
5.4 Gewächshausklima

Ohne fundierte Feldversuche kann der positive Einfluss auf das Gewächshaus nur mit theoretischen Berechnungen abgeschätzt werden. Bisherige Untersuchungen an Gewächshäusern mit Flüssigkeitsfiltern und Linsendächern (siehe 2.4.2 und 2.4.3) verzeichnen jedoch viel versprechende Ergebnisse:

- Mit dem INRA-Solargewächshaus mit durchflossener filtrierender Hülle konnte zwischen März und Juli nahezu der gesamte **Wärmebedarf intern gedeckt** werden und verbesserte mikroklimatische Bedingungen wurden registriert (Chiapale 1981, S.387).
- Versuche in Griechenland weisen im Linsengewächshaus mit thermischen Absorbern auf eine **Temperaturreduktion von 3 bis 5°C** hin (e-mail Tripanagnostopoulos, 20.12.04, Anhang 3).
- Ein mehr als **verdoppeltes Pflanzenwachstum** wurde in einem israelischen Versuchs Liquid Radiation Filter Greenhouse gemessen (Carmel 1991, S.120).

In den eigenen Berechnungen wurde die Strahlungsmenge auf die Gewächshauskultur mit und ohne Energiesystem berechnet. Für das Referenzgewächshaus wurde eine Hüllentransmission von 80% angenommen. In den sommerlichen Mittagsstunden erreicht der Strahlungsinput 750 W/m². Bei gleicher äusserer Einstrahlung ist der Input in ein mit Sunflower ausgerüstetes Gewächshaus um über 40% reduziert (ca. 420 W/m²): Lediglich das diffuse Licht und ein je nach Füllfaktor variierender Anteil Direktlicht, welches zwischen den Linsen durchscheint, dringt bis zu den Pflanzen vor. Der hohe Diffusanteil mag sich positiv auf die Pflanzen auswirken.

Abbildung 5-17 stellt den Strahlungsinput für die grosse Sunflower Variante mit 33 cm Reihenabstand dar, Abbildung 5-18 jenen für die kleine Variante mit 30 cm Abstand (15 cm Linsen). Gelb ist jeweils der Input ohne solares Energiesystem dargestellt. Gemäss Abbildung 5-12 liefert letztere Variante einen hohen Elektrizitätsoutput pro Linsenfläche, die Überhitzungsgefahr wird aber nur geringfügig reduziert.



(eigene Darstellung)

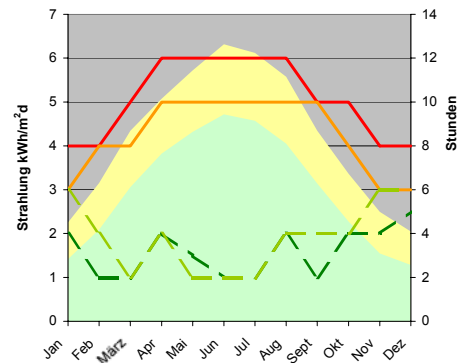


Abbildung 5-18: Strahlungsinput Sunflower 15/30

Abbildung 5-17: Strahlungsinput Sunflower 30/33

In Anlehnung an die Ausführungen in Abschnitt 1.4.5 wird angenommen, dass 100 W/m² für eine zufriedenstellende Photosyntheseleistung erwünscht sind. Da die Photosyntheseaktivität bei höherer Einstrahlung stagniert und die Gefahr der Überhitzung zunimmt, wurde ein optimaler Strahlungsbereich zwischen 100 und 300 W/m² definiert. Die obenstehenden Abbildungen zeigen, dass mit dem Energiesystem täglich rund 2 Stunden mehr unter 100 W/m² liegen (rote gegenüber orange Linie), was nicht erwünscht ist. Dieser Effekt wird aber von einer Mehrzahl an Stunden übertroffen, welche unter 300 W/m² gesenkt werden können. Die grünen Linien zeigen die Stunden im optimalen Strahlungsbereich. Für die Variante mit weiten Reihenabständen ist keine signifikante Zunahme der Stunden festzustellen, für die 30/33-Variante sind hingegen täglich durchschnittlich drei zusätzliche Stunden im optimalen Bereich festzustellen.

Die gleiche Berechnung wurde für Sunray durchgeführt, welcher aufgrund des höheren Füllfaktors eine höhere Strahlungsreduktion mit sich bringt. Tabelle 2-1 zeigt die Veränderung der Strahlungsverhältnisse in einem Gewächshaus mit 20 m Breite, wovon 4 m mit um 36,5° geneigten O-W-Sunray und der Rest mit Sunflower (30/33) ausgestattet sind.

Tabelle 5-6: Modifikation Strahlungsverhältnisse

	Ohne System	Sunflower Fläche		Sunray Fläche		Mittelwert GH
Jährlicher Strahlungsinput [kWh/m ²]	1548	780	-50%	621	-60%	-52%
Strahlungsinput Sommer (Apr-Sept) [kWh/m ²]	1012	490	-52%	378	-63%	-54%
Tagesstunden über 100 W/m ² , Jahr	10	8	-1	8	-2	
Tagesstunden über 100 W/m ² , Sommer	12	10	-2	9	-3	
Stunden im opt. Strahlungsbereich, Jahr	3	6	+3	8	+5	+3,3
Stunden im opt. Strahlungsbereich, Sommer	3	5	+2	9	+6	+3,4

Erfreulicherweise ist die Strahlungsreduktion im Sommer höher (-54%) als im Winterhalbjahr (-48%). Die Übertragbarkeit dieser Berechnungen auf die Praxis sei jedoch dahingestellt, sie sind lediglich als Richtgrösse für die Parameterwahl zu verstehen. Um den effektiven Einfluss auf den Wärmehaushalt des Gewächshauses zu beurteilen müsste die Wärmeabgabe des Systems²¹ und das Aussenklima berücksichtigt werden.

²¹ Die meisten der in Abbildung 5-8 illustrierten Verluste führen zu einer Wärmeabgabe an das Umfeld.

6 Wirtschaftlichkeit

Aus Kapitel 5 kann gefolgert werden, dass der Elektrizitätsoutput im Vergleich zu anderen Solarsystemen aufgrund von Transmissionsverlusten geringer ist; gleichzeitig kann aber die thermische Belastung des Gewächshauses signifikant reduziert werden. In diesem Kapitel ist zu untersuchen, ob dieser agronomische Zusatznutzen oder tiefere Investitionskosten das System trotz verminderter Energieausbeute zu einer attraktiven Solartechnologie machen.

Da die Gewächshausindustrie sehr komplex und vielfältig ist, wird nicht die Wirtschaftlichkeit des ganzen Gewächshauses analysiert, sondern nur die zusätzlichen Investitionen und Rückflüsse des solaren Energiesystems. Die Basisvariante ist der Bau eines konventionellen Gewächshauses oder ein bestehendes Gewächshaus. Da die üblichen Folien alle 3-5 Jahre ersetzt werden müssen, wird nur die Preisdifferenz zwischen PE- und Fluorpolymerfolien einberechnet.

Analysiert wird ein mit konzentrierender Photovoltaik ausgerüstetes Energiesystem unter spanischen Rahmenbedingungen. Die Kosten beziehen sich auf Serienproduktion (kumulierte Produktionsmenge 1 ha²², siehe Erfahrungskurve Abbildung 6-2).

6.1 Investitionskosten

6.1.1 Stückkosten

Kostenschätzungen für konzentrierende Photovoltaik sind mit einer grossen Unsicherheit behaftet (Quaschnig 2003, Internet). Da kaum publizierte Daten oder Industriedurchschnitte vorliegen, müssen hier Angaben ausgewählter Hersteller und Schätzungen als Basis genügen. Die Kosten für Photovoltaikanlagen werden üblicherweise in Modulkosten, Balance-of-System Kosten und Installation eingeteilt.

a) Modulkosten

Als Modul wird üblicherweise ausschliesslich die Platte mit Abdeckung bezeichnet, auf welcher die Solarzellen platziert sind; Halterung und Nachführung werden den Balance-of-System Kosten zugerechnet. Beim betrachteten System ist Nachführung, Halterung und Photovoltaikzelle jedoch eng miteinander verbunden, weshalb als Modul eine Sunflower oder ein Sunray bezeichnet wird. Tabelle 6-1 zeigt die zur Zeit verfügbaren Kosten für die spezifischen Teile von Sunflower und Sunray.

Tabelle 6-1: Einheitskosten

Part	Einheit	Sunflower	Sunray	Quelle
Fresnel-Linsen	€/m ²		30	Jungbecker
PV-Absorber (CoolPhoton)	€/m	b=15cm b=30cm	10 15	Solartech
Rahmenkonstruktion	€/module	r=0,925m r=1,5m	160 220	BSR Solar Technologies
Nachführung	€/module		48	BSR Solar Technologies
Montage	€/module		50	BSR Solar Technologies
Fluorpolymer Folie	€/m ²		(7 -) 12	Asahi Glass

Es resultieren die folgenden Kosten pro Modul und pro Quadratmeter Linsenfläche:

Tabelle 6-2: Modulkosten

	Linsen- fläche	Modul- kosten [€]	Kosten pro Linse [€/m ²]
Sunflower 15/18 & 1,85m	1,88 m ²	414	220
Sunflower 30/33 & 3m	5,90 m ²	652	110
Sunray 51 l _{modul} =6m	3,06 m ²	523	171

²² Eine mittelgrosser Gewächshausbetrieb umfasst rund eine Hektare.

Die Modulkosten pro Linsenfläche sind für die 30/33 Sunflower am tiefsten. Mit nur geringem Mehraufwand gegenüber der 15/18 Variante kann bedeutend mehr Linsenfläche pro Modul platziert werden.

Die genannten Absorberkosten gelten für Siliziumzellen mit 15% Wirkungsgrad. Verglichen werden sollten auch Triple Junction Zellen mit einer Effizienz von 35%. Boeing Spectrolab gibt den Preis mit 0,5 €/ W_{peak} an, was bei 30 cm breiten Linsen zu Absorberkosten von 45 €/m führt. Verwendet würden in diesem Fall punktfokussierende Linsen, weshalb nur Sunflower eingesetzt werden kann.

b) Balance-of-System (BOS)

Balance-of-System Kosten sind teilweise leistungsbezogen, teilweise sind sie proportional zu der verbauten Apparaturfläche. Leistungsbezogene Kosten umfassen die Elektronische Regelung und Umwandlung in Wechselstrom. Verkabelung, Halterung und Fundament hingegen sind flächenbezogen. Beim betrachteten System kann die Struktur des Gewächshauses genutzt werden, und der tragende Rahmen wurde bereits in den Modulkosten berücksichtigt. Zusätzliche Kosten verursacht das thermo-hydraulische System: Sowohl ein thermischer Speicher, als auch ein Leitungssystem ist erforderlich.

Je nach Nachführung und Konzentrationssystem werden die BOS-Kosten in der Literatur auf 40-160 €/ m^2 und 0,12-1 €/ W_{peak} geschätzt (Winter 1991, S.383). In dieser Arbeit werden leistungsbezogene Kosten von 0,4€/ W_{peak} und 50€ pro Quadratmeter Gewächshaus²³ angenommen.

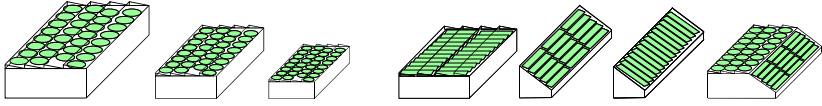
c) Installation und Overhead

Die obigen Kosten verstehen sich als Herstellkosten ohne Overhead. 15% der Summe wird für Administration und die Finanzierung des Herstellers aufgeschlagen. In der Literatur sind Installationskosten von 5,4% erwähnt. Um der speziellen Installation im Gewächshaus gerecht zu werden, werden 10% für Installation und Transport zu den Selbstkosten addiert.

6.1.2 Systemkosten

Die Investitionskosten und Leistungen der in Abschnitt 4.4.1 erwähnten Anordnungen sind in der folgenden Tabelle dargestellt. Aus den ersten drei Kolonnen geht der Einfluss der Grösse hervor. Die Kosten pro Quadratmeter Linse steigen, da sich BOS- und Folienkosten auf weniger Module aufteilen. Da aber gleichzeitig der Anteil der Lücken am Rand zunimmt, sinkt der Füllfaktor und damit die Investitionskosten pro Quadratmeter Gewächshaus. Entsprechend nimmt der Energieoutput pro Gewächshausfläche ab, während der Output pro Linsenfläche konstant bleibt.

Tabelle 6-3: Investitionskosten

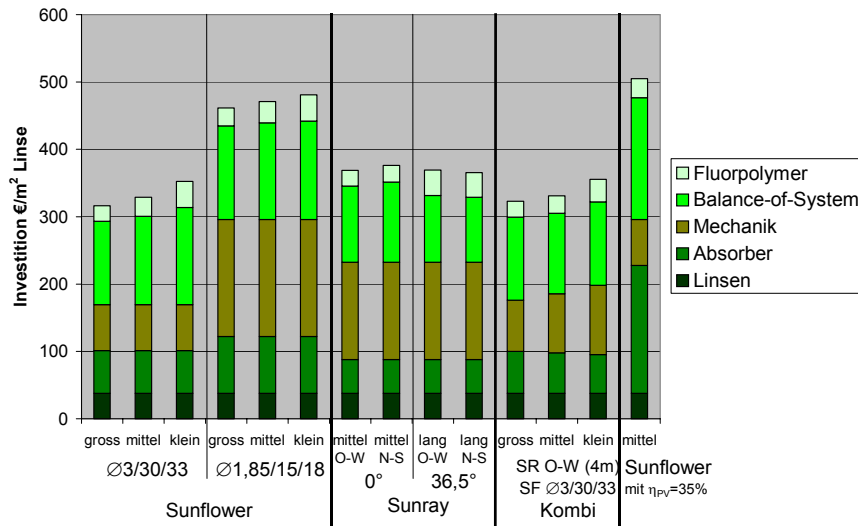


Gewächshaus		Sunflower Ø3/30/33			Ø1,85/15/18	Sunray 0°	Sunray 36,5°		Kombi	SF $\eta_{PV}=35\%$
		gross	mittel	klein	mittel	mittel N-S	O-W	N-S	mittel O-W	mittel
Fläche	m^2	5000	1000	300	1000	1000	500	500	1000	1000
Länge	m	100	50	30	50	50	100	100	50	50
Breite	m	50	20	10	20	20	5	5	20	20
Anzahl Sunflower		618	114	30	318				96	114
Anzahl Sunray						249	160	166	64	
Investitionskosten		1.151.909	220.975	62.319	281.208	286.825	180.872	185.657	252.086	339.161
Investition/ m^2 Linse	€/ m^2	316	329	352	471	376	369	365	331	505
Investition/ m^2 GH	€/ m^2	230	221	208	281	287	362	371	252	339
Elektrizitätsoutput	MWh	522	96	25	90	105	77	87	111	227
Kapazität	kW	267	49	13	44	55	34	35	55	115
Elektrizität/ m^2 Linse	kWh/ m^2	143	143	143	150	138	157	171	146	338
Elektrizität/ m^2 GH	kWh/ m^2	104	96	84	90	105	154	174	111	227
Wärme/ m^2 GH	kWh/ m^2	355	327	287	306	357	519	586	378	218

²³ Entspricht je nach Füllfaktor 50-85 € pro Quadratmeter Apparaturfläche. Für die anfallenden BOS-Kosten (Verkabelung, thermo-hydraulisches System) scheint eine Proportionalität zur überbauten Gewächshausfläche zweckmässiger als ein Bezug zur Linsenfläche.

Die vierte Kolonne steht für den Vergleich der grossen Sunflower gegenüber der kleineren mit 1,85m Durchmesser. Die Investitionskosten steigen um 27%, während der Elektrizitätsoutput nur um 6% abnimmt. Die Version mit 3 m Durchmesser ist unter den getroffenen Annahmen der kleineren vorzuziehen. Auch der erhöhte Aufwand für horizontale Sunray führt nicht zu einem signifikant erhöhten Output. Die geneigten Sunray hingegen ermöglichen einen gesteigerten Elektrizitätsoutput pro Linsenfläche und Quadratmeter Gewächshaus. Die Kombination – 4 m Sunray, 16 m Sunflower – bewegt sich entsprechend in der Mitte zwischen Kolonne 2 und 6.

Abbildung 6-1 zeigt die Aufteilung der Kosten für die verschiedenen Optionen. Während der Kostenanteil des Absorbers bei die Siliziumzellen unter 20% liegt, steigt dieser bei den hocheffizienten Zellen auf nahezu 40%. Wie aus der letzten Spalte der obigen Tabelle hervorgeht, wird der Mehraufwand von 53% mit einer Verdoppelung des Outputs belohnt.



(eigene Darstellung)

Abbildung 6-1: Aufteilung der Investitionskosten

Je nach Konstruktionsparameter und Gewächshausgrösse bewegen sich die Investitionskosten zwischen 300 und 500 € pro Quadratmeter Apparaturfläche, respektive 200 bis 400 € pro Quadratmeter Gewächshaus.

6.1.3 Vergleich zu anderen Systemen

Wie aus Tabelle 2-2 hervorgeht, investiert ein Gewächshausbesitzer üblicherweise je nach Region, Grösse und Konstruktionsweise zwischen 25 und 50 € pro Quadratmeter Gewächshaus. Die oben errechneten Kosten für ein solares Energiesystem übersteigen diesen Rahmen um ein vielfaches. Im Vergleich zu anderen solaren Systemen erscheint das analysierte System hingegen relativ preiswert. Die folgenden Werte beziehen sich auf die Apparaturfläche und stammen aus einer Studie von Quaschnig 2003.

- Nicht-nachgeführte, unkonzentrierte Photovoltaik: 720 €/m²
- Zachsigt-nachgeführte, unkonzentrierte Photovoltaik: 900 €/m²
- Thermisches Parabolspiegelkraftwerk: 450 €/m²

Eine andere übliche Vergleichsgrösse bezieht sich auf die Spitzenleistung des Kraftwerks (€/W_{peak}). Für die konventionellen Photovoltaikmodule wird zurzeit mit 5,6 €/W_{peak} gerechnet (Solarbuzz 2005, Internet). Für das Flatcon-System wurden 2,43 €/W_{peak} berechnet, was sich jedoch auf eine noch nicht erreichte Serienproduktion bezieht (Fraunhofer 2003, Internet). Die vergleichbare mit den Gallium-Arsenid-Zellen bestückte Sunflower kommt auf rund 3 €/W_{peak}, was weniger als Nachteil gegenüber Flatcon interpretiert werden sollte, als vielmehr zeigt, dass die Grössenordnung stimmt und relativ konservative Annahmen getroffen wurden. Es ist kaum anzunehmen, dass die schwere, in Abbildung 3-15 gezeigte Konstruktion preiswerter herstellbar ist als die Leichtbau-Sunflower. Bei einer Ausstattung mit Siliziumzellen liegen die Kosten zwischen 4,3 und 5,4 €/W_{peak}. Eine Betrachtung nach Spitzenleistung berücksichtigt jedoch nicht den Kapazitätsfaktor, respektive wie viel Wattstunden pro Watt Spitzenleistung produziert werden. Die Kosten pro W_{peak} für den geneigten Sunray liegen

vergleichsweise hoch, doch da die Produktion über das Jahr weit ausgeglichener ist als bei anderen Anordnungen, liegen die Kosten pro kWh relativ tief.

6.2 Geldflüsse

Die Zu- und Abflüsse von liquiden Mitteln, welche aus dem Betrieb des solaren Energiesystems resultieren, werden abdiskontiert, sodass deren Barwert mit den Investitionskosten verglichen werden kann. Liegt der Barwert der Geldflüsse unter Berücksichtigung der Renditeansprüche über den Investitionskosten, so spricht man von einem positiven Kapitalwert (Seiler 2000-II, S.389). Die interne Verzinsung (IRR) liegt somit über der vom Investor geforderten.

Als Abflüsse sind die Aufwendungen für den Unterhalt zu berücksichtigen. Rückflüsse resultieren aus dem Verkauf der Elektrizität. Im Vergleich zum Betrieb des Gewächshauses ohne solares Energiesystem können zudem Abflüsse für den Zukauf von Brennstoffen und den regelmässigen Ersatz der Folie eingespart werden. Unter Umständen kann ein agronomischer Zusatznutzen quantifiziert und mit einbezogen werden. Diese Geldflüsse fallen während der Lebensdauer des Systems an, welche auf 20 Jahre geschätzt wird.

6.2.1 Unterhalt

Quaschnig beziffert den Barwert des Unterhalts eines zweiachsigen-nachgeführten, unkonzentrierten Photovoltaiksystems auf 270 €/m², ohne Nachführung auf 200 €/m² (Quaschnig 2003, Internet) Wird ein jährlich konstanter Aufwand angenommen, so ergeben sich bei dem gewählten Diskontsatz von 7% und 30 Jahren Laufzeit ein jährlicher Unterhaltsaufwand von 2,42% respektive 2,24% der Investitionskosten. Thermische Kraftwerke erfordern mehr Unterhalt, weshalb für das Parabolspiegelkraftwerk 3,22% angenommen wurden (Barwert 180 €/m²).

Die Berechnungen des Fraunhofer Instituts gehen von 1% Unterhaltskosten für konventionelle Photovoltaik und 2% für das konzentrierende Flatcon System aus. Für das solare Energiesystem sollen ebenfalls 2% angenommen werden, zumal die Unterhaltsarbeiten aufgrund einer verminderten Verschmutzung unter der Gewächshaushülle geringer sein sollten. In der Literatur werden Unterhaltskosten zwischen 0,1 und 4 €-cent/kWh erwähnt (Winter 1991, S.323). Die 2% der Investitionskosten entsprechen ungefähr den 4 €-cent/kWh.

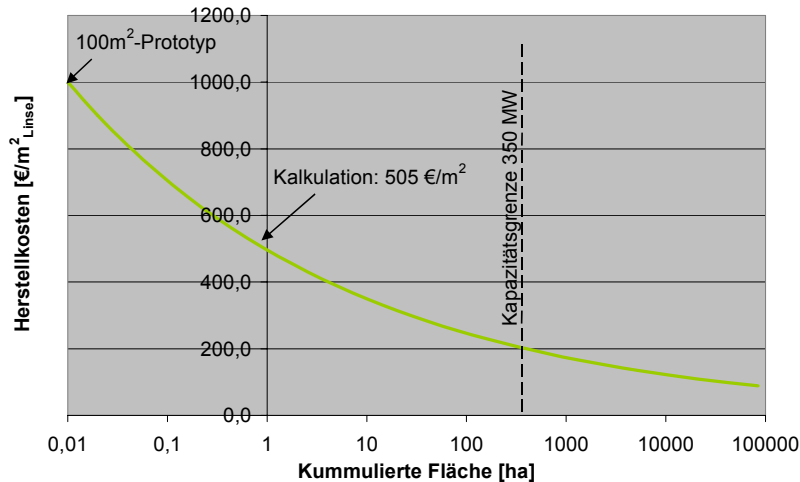
6.2.2 Elektrizitätsverkauf

Bei einem Eigenbedarf von rund 15 kWh/m²a (Carbon Trust 2004, Internet) genügen zur Deckung desselben etwa 10 bis 20% der bereitgestellten Elektrizität. Für die Netzeinspeisung von Solarstrom gelten je nach Region unterschiedliche Bedingungen und Abnahmepreise (siehe Abschnitt 3.3.2). Für die Analyse der spanischen Verhältnisse können bis zu einer Kapazität von 100 kW 0,41 €/kWh angenommen werden, für grössere Anlagen 0,21 €/kWh. 100 kW-Kapazität entsprechen bei Siliziumzellen etwa einem Gewächshaus von 100x20m. Bei Gallium-Arsenid-Zellen ist die Grenze bereits bei 50x20m erreicht.

Mit Gallium-Arsenid-Zellen beträgt die Kapazität pro Hektare rund 1 MW. Die Beschränkung des spanischen Förderungsprogramms erlaubt somit maximal²⁴ 150 ha zu 0,41 €/kWh und 200 ha zu 0,21 €/kWh Vergütung, was im Hinblick auf die spanische Gewächshausfläche von 33'750 ha als äusserst klein erscheint. Der jährliche Elektrizitätsoutput würde hingegen bereits rund 700 GWh betragen, was etwa der doppelten Solarstromproduktion aus Photovoltaik von 2001 entsprechen würde (386 GWh). Es ist anzunehmen, dass mit dem damit verbundenen Fortschritt auf der Erfahrungskurve²⁵ bis dahin die Selbstkosten soweit gesenkt werden können, dass der Betrieb auch ohne staatliche Subvention wirtschaftlich ist. Bei einem Elektrizitätspreis von 0,1 €/kWh könnte bereits mit einer Halbierung der Herstellkosten eine Rentabilität von 10% erzielt werden.

²⁴ bei Verwendung von Gallium-Arsenid-Zellen, abhängig vom Bau anderer Solaranlagen

²⁵ Annahme, dass sich die Selbstkosten mit jeder Verdoppelung der Produktionsmenge um 20-30% reduzieren (Seiler-III 2000, S.273).



(eigene Darstellung)

Abbildung 6-2: Erfahrungskurve 10%

Abbildung 6-2 zeigt die Erfahrungskurve mit nur 10% Kostenreduktion. Bereits ab 100 ha kumulierte Fläche liegen die Kosten unter $250 \text{ €/m}^2_{\text{Linse}}$ respektive 170 € pro Quadratmeter Gewächshausfläche.

6.2.3 Wärmeeinsparung

Wie im Abschnitt 2.3.4 diskutiert werden um Breitengrad $35\text{-}40^\circ$ jährlich rund 350 kWh Heizenergie pro Quadratmeter Gewächshausfläche benötigt. Summarisch kann somit die gesamte Abwärme der Photovoltaikkühlung intern genutzt werden und vermindert somit den Brennstoffaufwand. Bereitstellung und Bedarf mögen sich hingegen nicht stets decken, die Deckung im Winter ist nicht garantiert und im Sommer besteht möglicherweise ein Überschuss. In einer konservativen Betrachtung wird deshalb lediglich die thermische Energie in den Monaten September bis April als Einsparung berücksichtigt. Der Gaspreis liegt in Spanien bei rund $1,5 \text{ €-cent/kWh}$ (EIA 2002, Internet); entsprechende Einsparungen ergeben sich pro kWh Wärme, welche vom solaren Energiesystem bereitgestellt wird.

6.2.4 Agronomischer Zusatznutzen

Für Evaporationskühlung wird jährlich zwischen $0,5$ und 2 €/m^2 aufgewendet²⁶. Erübrigt sich deren Betrieb aufgrund des reduzierten Strahlungsinputs, so können diese Kosten eingespart werden. Möglicherweise erhöhen sich wegen den modifizierten Strahlungsbedingungen auch die Ernteerträge. Der Ernteertrag pro Quadratmeter liegt für Peperoni und Tomaten zwischen 3 und 6 € bei variablen Kosten von rund 2 €/m^2 (näheres siehe Anhang 2). Ein allfälliger Mehrertrag in der Ernte könnte somit ebenfalls $2\text{-}3 \text{ €/m}^2$ mit sich bringen.

Weitere ein bis zwei Euro pro Quadratmeter Gewächshausfläche liesse sich durch den vermiedenen Kohlendioxid-Ausstoss einsparen, sofern entsprechende Lenkungsmaßnahmen eingeführt werden (siehe Abschnitt 2.3.4).

Da diesbezügliche Aussichten sehr unsicher sind, wird der agronomische Zusatznutzen des Systems mit 1 €/m^2 Gewächshausfläche angesetzt.

6.3 Rentabilität

Die Renditeerwartung ist abhängig vom Risiko, welches mit der Investition verbunden ist. Da die Technologie mit einiger Unsicherheit behaftet ist, soll im folgenden mit einem hohen Diskontsatz von 15% gerechnet werden.

6.3.1 Vergleich Investitionsvarianten

Tabelle 6-4 vergleicht den Kapitalwert der in Tabelle 6-3 charakterisierten Investitions-Optionen. In der ersten Kolonne wird lediglich der Elektrizitätsverkauf bei $0,41 \text{ €/kWh}$ berücksichtigt, in den folgenden beiden Kolonnen werden die Barwerte aus Wärmeeinsparung ($0,015 \text{ €/kWh}$) und aus

²⁶ $12\text{-}14 \text{ kWh}_{\text{el}}/\text{m}^2_{\text{GH}}$ (e-mail Teitel 20.12.04), Kosten je nach Elektrizitäts- und Wasserpreis.

agronomischem Zusatznutzen (1€/m²) hinzuaddiert. Zur Berechnung der Elektrizitätskosten wurde eine Finanzierung zu 6% angenommen.

Die kleine Sunflower-Variante sowie der horizontal angeordnete Sunray erreichen bei 15% Diskontrate keinen positiven Kapitalwert, der Elektrizitätspreis liegt um 0,3 €/kWh. Je kleiner das Gewächshaus, umso geringer der Kapitalwert von der grossen Sunflower; doch auch beim kleinsten Gewächshaus (300m²) wird der Kapitalwert positiv, wenn die Wärmeeinsparung mit mitberücksichtigt wird. Trotz den höchsten Investitionskosten sind mit den hocheffizienten Solarzellen deutlich tiefere Elektrizitätskosten sowie höhere Kapitalwerte möglich. Attraktiv erscheint auch der geneigte N-S-Sunray, doch diese schmale Gewächshausform mag möglicherweise in der Praxis ungeeignet sein. In der Kombination zu Sunflower sind sie hingegen eine Bereicherung. Diese Kombi-Variante und die Sunflower mit Gallium-Arsenid-Zellen sollen im nächsten Abschnitt mit anderen solaren Systemen verglichen werden.

Tabelle 6-4: Kapitalwert und Elektrizitätskosten

	€/m ² _{GH}	Invest.	Kapitalwert			€/kWh
			nur Elektr. Verkauf	inkl. Wärme	inkl. agron. Nutz.	
Sunflower 3/30/33	gross	230	10	28	34	23,7
"	mittel	221	0	31	37	24,6
"	klein	208	-15	11	18	26,5
Sunflower 1,85/15/18	mittel	281	-84	-55	-49	33,6
N-S-Sunray 0°	mittel	287	-51	-18	-11	29,3
O-W-Sunray 36,5°	lang	362	-9	40	46	25,3
N-S-Sunray 36,5°	lang	371	32	88	94	22,9
Kombi	mittel	252	4	40	46	24,3
Sunflower η _{PV} =35%	mittel	339	203	223	230	16,0

6.3.2 Vergleich zu anderen Systemen

Die bereits erwähnten alternativen Optionen zur Nutzung der Solarenergie seien wiederum dem solaren Energiesystem für Gewächshäuser gegenübergestellt. Da in der Studie von Quaschnig eine Diskontrate von 7% einkalkuliert ist und die Geldflüsse über 30 Jahre betrachtet werden, müssen einige Werte umgerechnet werden. Grün hervorgehoben ist die Betrachtung über 20 Jahre mit einem Diskontsatz von 15%.

Tabelle 6-5: Wirtschaftlichkeit von solaren Systemen

€/m ² _{Apparatur}	solares Energiesystem für GH				alternative solare Systeme					
	Sunflower mit η _{PV} =15%		Sunflower mit η _{PV} =35%		nicht nachgeführte PV		2achsige nachgeführte PV		thermisches Kraftwerk*	
Zeitraum / Diskontsatz	20j/15%	30j/7%	20j/15%	30j/7%	20j/15%	30j/7%	20j/15%	30j/7%	20j/15%	30j/7%
Investition	-330		-505		-720		-900		-450	
Unterhalt	2% Invest./a		2% Invest./a		2,24% Invest./a		2,42% Invest./a		3,22% Invest./a	
Barwert	-41	-82	-63	-125	-101	-200	-136	-270	-91	-180
Elektrizitätsverkauf €/kWh	145 kWh/m ²		338 kWh/m ²		220 kWh/m ²		310 kWh/m ²		270 kWh/m ²	
Barwert 0,41	372	738	867	1.720	565	1.119	796	1.577	693	1.374
Barwert 0,21	191	378	444	881	289	573	407	808	355	704
		-85*		-131*						
Liquidationswert	0%	30%	0%	30%	30%	0%	30%	0%	30%	0%
Barwert	0	13	0	20	13		16		8	
Kapitalwert bei 0,41 €/kWh	1	254	299	979	-243	200	-224	407	160	744
Kapitalwert bei 0,21 €/kWh	-181	-106	-124	140	-518	-346	-612	-362	-178	74
Wärmeeinsparung €/kWh	564 kWh/m ²		325 kWh/m ²							
Barwert 0,015	53	105	31	61						
Agron. Nutzen	1 €/m ²		1 €/m ²							
Barwert	6	12	6	12						
Kapitalwert	60	371	336	1.052						
Elektrizitätskosten inklusive Zusatznutzen	0,244 €/kWh		0,160 €/kWh		0,311 €/kWh		0,281 €/kWh		0,175 €/kWh	
Pay Back Period 0,41 €/kWh	6,2 Jahre		3,9 Jahre		9,7 Jahre		8,5 Jahre		4,7 Jahre	
Pay Back Period 0,21 €/kWh	13,8		8,3		23,9		20,8		10,7 Jahre	
IRR bei 0,41 €/kWh	15,0%		25,1%		8,9%		10,5%		21,0%	
IRR bei 0,21 €/kWh	3,8%		10,3%		1,0%		1,9%		7,8%	

* Nach 20 Jahren erneute Investition von 240 €/m²

** Angaben für Kraftwerk mit 30 MW_{Kap}, Mindestgrösse erforderlich

Wie in Abschnitt 3.3.1 betrachtet, bewegen sich die Elektrizitätskosten unkonzentrierter Photovoltaik für die betrachteten Strahlungsverhältnisse um 0,3 €/kWh. Bei dem reduzierten Einspeisetarif können

diese Systeme somit nicht wirtschaftlich arbeiten. Die Sunflower mit Siliziumzellen bewegt sich gerade an der Grenze, doch inklusive Zusatznutzen liegen die Kosten wie bei der Variante mit Gallium-Arsenid-Zellen und dem thermischen Kraftwerk unter 21 €-cent.

In der Berechnung der internen Verzinsung (IRR) und der Pay Back Period²⁷ wurden nur die Rückflüsse aus dem Elektrizitätsverkauf berücksichtigt. Die interne Verzinsung ist für die Gallium-Arsenid-Sunflower mit 25% am höchsten, innerhalb von 4 Jahren zahlt sich diese Option unverzinst zurück. Auch die Silizium-Sunflower ist den anderen Systemen überlegen; das thermische Parabolspiegelkraftwerk lässt sich erst ab Kapazitäten über 100 kW realisieren, weshalb die 41 €-cent Vergütung nicht Anwendung finden kann.

Die Rentabilität erscheint unwahrscheinlich hoch, resultiert jedoch aus der grosszügigen Einspeisevergütung, welche auf die Kosten konventioneller Photovoltaik ausgelegt ist. Die Gestehungskosten für Strom aus konzentrierender Photovoltaik mit Gallium-Arsenid-Zellen wird bereits 1997 mit 16 €-cent angegeben (Swanson 1997, S.278), und auch für das Flatcon System werden dieselben Kosten pro kWh für Südspanien berechnet (Fraunhofer 2005, Internet). Durch die Wärmeeinsparung und den agronomischen Zusatznutzen lassen sich diese Ansätze noch weiter senken. Positive Auswirkungen auf das Pflanzenwachstum könnten die Attraktivität des solaren Energiesystems noch weiter steigern, sodass das System auch ohne staatliche Subventionen wirtschaftlich betrieben werden kann.

6.3.3 Empfehlung zur Produktstrategie

a) Produktvarianten

Sofern sich die Sunflower mit Gallium-Arsenid-Zellen wie vorgesehen realisieren lässt, ist dies das interessanteste Produkt. Bei Sunray ist diese punktfokussierende Anwendung nicht möglich. Dennoch erscheint die dem Breitengrad entsprechend geneigte Anordnung attraktiv für die Südwand – falls diese effektiv genau nach Süden ausgerichtet ist. Sofern es die Gewächshaushöhe erlaubt, ist die Nord-Süd-Variante aufgrund der hohen solaren Ausbeute sinnvoll für Photovoltaik. Für die hier nicht betrachtete Hochtemperatur-Anwendung eignet sich der durchgehende Absorber der Ost-West-Variante hingegen besser.

Je nach Breitengrad ändert sich die Beschattung, was mit einer Anpassung der Reihenabstände kompensiert werden könnte. Bei Sunray, wo nur die einzelnen Module unterschiedlich montiert werden müssen, erscheint dies sinnvoll. Bei Sunflower variieren hingegen mit dem Reihenabstand die Linsenlänge und Reihenanzahl, was stets Konstruktionsänderungen mit sich bringen würde. Um in der Startphase eine rationelle Produktion zu ermöglichen, sei hier nur eine Variante empfohlen: Die Sunflower mit 3m Durchmesser, 30 cm Linsenbreite und 33 cm Reihenabstand.

b) Gewächshausausstattung

Bei der Konzeption eines dem solaren Energiesystem angepassten Gewächshauses (Neubau-Marktsegment) ist die kombinierte Anordnung mit geneigten Sunray in der Südwand und Sunflower in der verbleibenden Breite anzustreben. Um einen guten Füllfaktor der Sunflower zu ermöglichen, ist der Breitenwahl eine geeignete Anordnung der Sunflower zugrunde zu legen. 20m Breite mit 4m Sunflower erlauben einen Sunflower-Füllfaktor von 71%; schmalere Gewächshäuser liegen unter 70%.

Beim Nachrüsten von Gewächshäusern müssen bestehende Strukturelemente berücksichtigt werden. Lassen sich Sunflower und Sunray nicht zufrieden stellend platzieren, so ist ein Umbau der Struktur in Erwägung zu ziehen. Im Verhältnis zu den investierten Mitteln würden die Kosten um höchstens 10% zunehmen. Ohne passende Anordnung ist die Energieausbeute pro Gewächshausfläche hingegen gering, und der positive Effekt auf die Strahlungsverhältnisse würde weitgehend ausbleiben.

²⁷ Zeitraum, in welchem sich die Investition unverzinst zurückzahlt. Die Summe der Rückflüsse entspricht den Abflüssen (Seiler 2000-II, S. 392).

7 Markteinführung

7.1 Voraussetzungen

7.1.1 Neuer Marktzugang

Die Kernkompetenz von BSR Solar Technologies – aus deren Aktivitäten die Idee des solaren Energiesystems hervorgeht und welche die personelle Grundlage von Sunvention stellt – liegt in der Forschung und Entwicklung im Bereich Solartechnologie. Angeboten werden somit gewissermassen nicht physische Produkte, sondern Erkenntnisse aus Forschung und Entwicklung, welche von industriellen Partnern in marktfähige Produkte umgesetzt werden sollen. Ziel der mit EBF GmbH gegründeten Unternehmung Sunvention ist die eigenständige Vermarktung der aus der Entwicklungsaktivität resultierenden Produkte. Einerseits ist somit ein neuer, direkter Marktzugang zu erarbeiten, andererseits sind passende Produktionskapazitäten zu erschliessen, da die eigene Werkstatt bislang auf den Prototypenbau ausgelegt ist.

Es ergibt sich eine Vielzahl von Kooperationsmöglichkeiten, um ein Produkt zu produzieren und zu verbreiten (Seiler-IV 2001, S.558):

- **Lizenzproduktion:** Ein Produzent erwirbt gegen eine finanzielle Entschädigung das Recht zur Produktion und Distribution des Produktes in einem zugewiesenen Marktgebiet.
- **Lohnherstellung:** Einem Produzenten wird ein Produktionsauftrag erteilt und er wird nach Aufwand entschädigt. Der Auftraggeber (Sunvention) übernimmt die Vermarktung.
- **Eigene Produktion:** Das Produkt wird in der eigenen Werkstatt gefertigt und selbstständig vermarktet.
- **Joint Ventures:** Mit einem Produzenten wird eine gemeinsame Unternehmung zur Produktion und Vermarktung geschaffen, respektive ein Produzent beteiligt sich an Sunvention und stellt seine Produktionskapazität zur Verfügung.

Zentral ist die Frage, wer die Montage und Installation der Sunflower respektive der Sunray übernimmt. Dies könnte ein Gewächshaushersteller, ein Hersteller von solaren Anlagen oder ein anderweitig produzierendes Unternehmen übernehmen, oder die eigenen Kapazitäten wären entsprechend zu erweitern. Ein externer Produzent verfügt bereits über Absatzwege zum Gewächshaus- respektive Solarmarkt und zu entsprechenden Zulieferern. Je nach Kooperationsvereinbarung sind von Sunvention oder vom Produzenten Beziehungen zu Lieferanten von Linsen, Photovoltaik, sowie von mechanischen Teilen und Fluorpolymer-Folien aufzubauen.

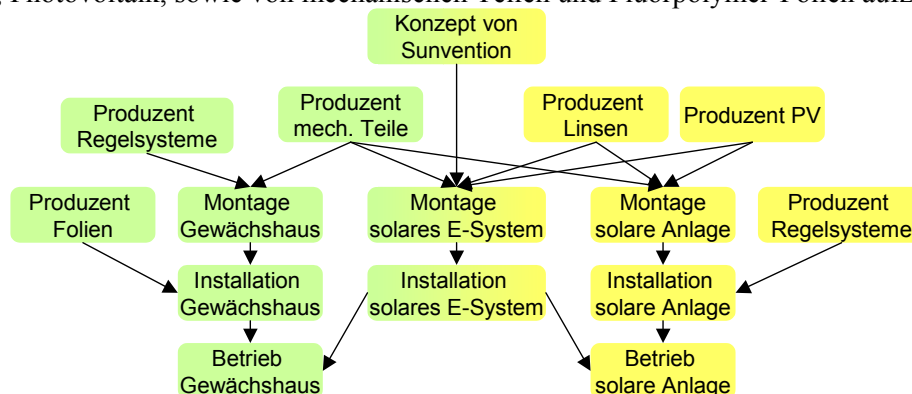


Abbildung 7-1: Wertschöpfungskette

Die Suche eines geeigneten Partners mit Gewächshaus-Kenntnissen sei als nächster Schritt Richtung Markteinführung empfohlen. Dieser kann ein Anforderungsprofil von Seiten Gewächshaus aufstellen, und zusammen ist das Potential des solaren Energiesystems zu ermitteln.

7.1.2 Dreifältiges Kernprodukt

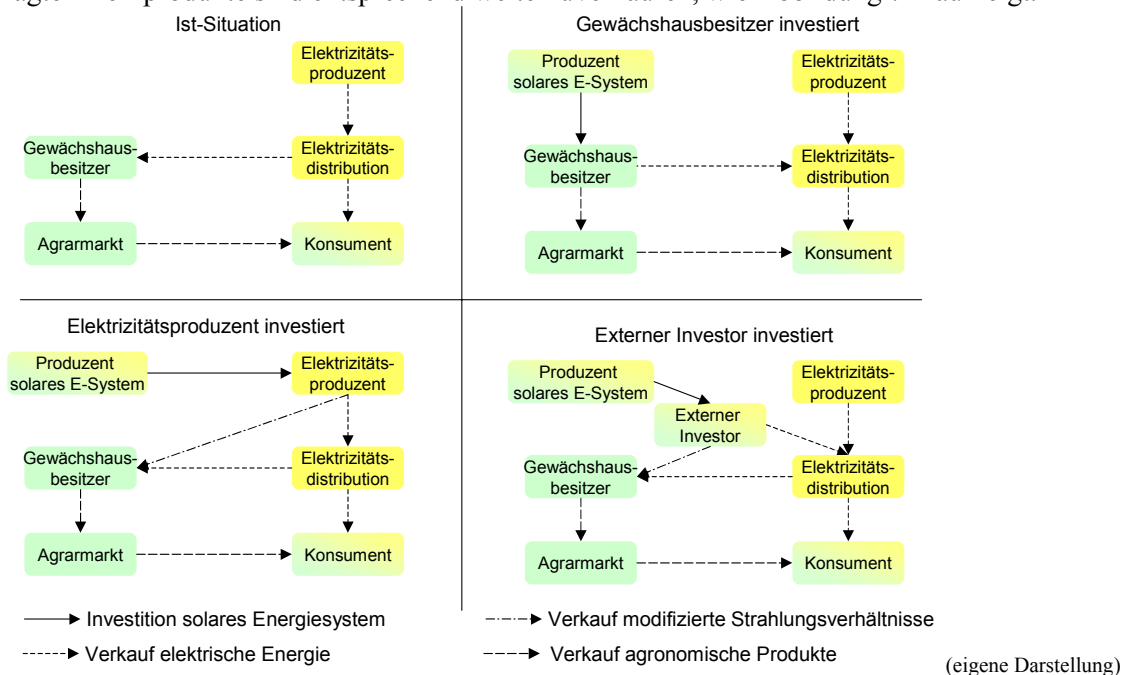
Der Produktbegriff kann auf drei Ebenen verstanden werden (Seiler-IV 2001, S.200):

- **Kernprodukt:** Zugrunde liegendes Kundenbedürfnis, Kaufmotiv (nicht materiell, sondern Funktion).
- **Formales Produkt:** Konkrete physische Einheit, die unmittelbar als Kaufobjekt erkannt wird.
- **Erweitertes Produkt:** Gesamtheit der Vorteile, die der Käufer mit dem formalen Produkt erwirbt oder erfährt (inklusive damit verbundene Dienstleistungen).

Die Sunflower respektive Sunray kann als das formale Produkt bezeichnet werden und wurde in Kapitel 4 entsprechend charakterisiert. Das Kaufmotiv ist hingegen nicht der Besitz eines solaren Energiesystems, sondern resultiert aus dem Kundenbedürfnis nach:

- Modifikation von Klimafaktoren²⁸ im Gewächshaus oder
- Elektrischer oder thermischer Energie.

Mit dem formalen Produkt sind somit mehrere Kernprodukte verbunden, die unter Umständen von unterschiedlichen Kunden nachgefragt werden. Hinsichtlich der erforderlichen Investition könnte als weiteres Kundenbedürfnis auch die Nachfrage nach nachhaltigen Investitionsmöglichkeiten beigezogen werden. Als ökologieorientierte Anlagemöglichkeiten werden heute primär Fonds mit Unternehmen gehandelt, welche die Richtlinien des Umweltmanagements (z.B. gemäss ISO 14000) verfolgen. Dies garantiert lediglich, dass die Tätigkeit auf Umweltverträglichkeit hin untersucht und optimiert wird. Ob hingegen die Tätigkeit selbst ökologisch zweckmässig ist, bleibt dahingestellt²⁹. Investitionsmöglichkeiten in ökologisch förderliche Tätigkeiten sind hingegen beschränkt. („Doing the right things, not only doing things right“.) Im Hinblick auf die Frage, wer schlussendlich die Investition tätigt, kommen somit nicht nur Gewächshausbesitzer oder Elektrizitätsproduzenten in Frage, sondern auch externe ökologisch sensibilisierte Investoren. Die nicht vom Investor nachgefragten Kernprodukte sind entsprechend weiterzuverkaufen, wie Abbildung 7-2 aufzeigt.



Die Funktion des externen Investors kann auch von Sunvention übernommen werden. Sunvention hat in jedem Fall die Bedürfnisse von Gewächshausbesitzer und Energieanbieter zu koordinieren, um das gesamte Potential der Technologie auszuschöpfen. Eine einseitig energetisch genutzte Anlage ohne Gewächshaus mag zum Erlangen erster Praxiserfahrung zweckmässig sein, doch zur Erzielung

²⁸ insbesondere Strahlung und Temperatur

²⁹ Der ökologieorientierte UBS Equity Fund beinhaltet unter anderem Beteiligungen an 3M, Unilever und Intel (UBS 2000, Internet). Deren Tätigkeiten werden zwar nach ISO 14000 gehandhabt, tragen hingegen nicht aktiv zu einer nachhaltigen Entwicklung bei.

maximaler Rückflüsse ist der Energieproduzent von der Symbiose mit dem Gewächshaus zu überzeugen.

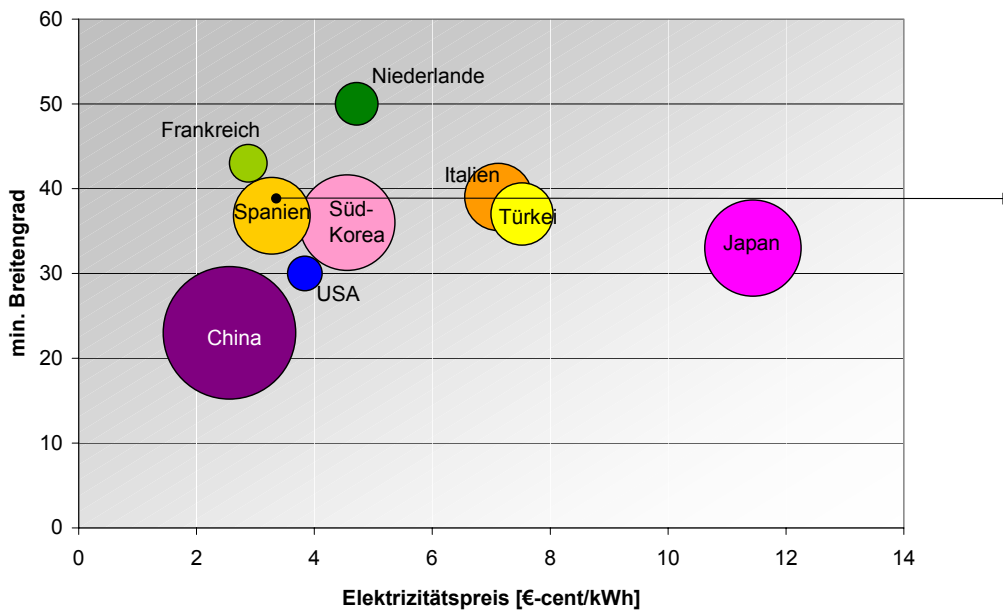
Zweckmässig mag eine Vereinbarung sein, wo ein externer Investor oder Elektrizitätsproduzent die Anlage im Gewächshaus finanziert und vom Gewächshausbesitzer eine Entschädigung für die gelieferte Wärme und den agronomischen Zusatznutzen (3 bis 10 €/m² Gewächshaus) einkassiert. Anstelle der finanziellen Entschädigung könnte der Gewächshausbesitzer auch mit der Wartung des Systems beauftragt werden, sofern das nötige Know-How dazu vorhanden ist. Damit entfällt für den Investor der Unterhaltsaufwand (4 bis 7 €/m² Gewächshaus) und der Gärtner gilt die verbesserten klimatischen Bedingungen mit eigener Arbeitsleistung ab.

Diese Aspekte des erweiterten Produkts sind mit potentiellen Anwendern (Frühaufnehmer / Schlüsselkunden) und Investoren zu diskutieren, um die Bedürfnisse aller Beteiligten optimal aufeinander abzustimmen.

7.2 Marktattraktivität

7.2.1 Geographische Segmentierung

Entscheidend für die Attraktivität eines Landes sind die Höhe der erzielbaren Erträge aus dem Verkauf des Solarstroms, die solaren Strahlungsverhältnisse, sowie die Verhältnisse auf dem Gewächshausmarkt. Mit der Nähe zum Äquator steigert sich im allgemeinen die solare Ausbeute, weshalb auf der vertikalen Achse in Abbildung 7-3 der tiefste Breitengrad des betreffenden Landes aufgetragen ist. Da keine Übersicht über Einspeiseregulungen für Solarstrom existiert, wird als Massstab für die Erträge aus der Netzeinspeisung der Elektrizitätspreis für industrielle Abnehmer verwendet (horizontale Achse). Die Kreisfläche repräsentiert die Gewächshausfläche des Landes.



(Elektrizitätspreise gemäss EIA 2004, Internet / Breitengrad gemäss Atlas / Gewächshausflächen siehe Tabelle 2-1)

Abbildung 7-3: Marktattraktivität

Je höher der Elektrizitätspreis und je tiefer der Breitengrad, umso attraktiver sind die Verhältnisse. Länder über dem 40. Breitengrad – z.B. Frankreich und die Niederlande – sind für konzentrierende Solartechnologie wenig attraktiv³⁰. Von den Elektrizitätspreisen her erscheint Japan sehr attraktiv. Die in den Mittagsstunden bezahlten Spitzenpreise ermöglichen bereits ohne spezielle Förderung eine kostendeckende Solarstromproduktion. Werden staatliche Förderprogramme mitberücksichtigt, so ändert dies die Attraktivität eines Landes um Faktoren. Wie der Pfeil für Spanien andeutet, liegen die 41 respektive 21 €-cent/kWh weit über dem Rand der Graphik. Solange solche Programme vorliegen, ist deren Nutzung zweckmässig, um mit dem Fortschritt auf der Erfahrungskurve (siehe Abbildung 6-2) Investitionskosten zu erreichen, welche den Betrieb auch in nicht-subventionierten Märkten wirtschaftlich machen.

³⁰ siehe Abbildung 3-19, GHI üblicherweise unter 1400 kWh/m²a

Die heutige Gewächshausfläche zeigt zwar das potentielle Marktvolumen, doch genügen bereits weit kleinere Flächen, um Umsätze in Millionenhöhe zu erwirtschaften³¹. Deshalb können auch Nischenmärkte wie die Vereinigten Arabischen Emirate aufgrund der Überhitzungsproblematik sehr interessant sein (Gewächshausfläche 1450 ha, Breitengrad 23°). Ähnliches gilt für den Süden der USA; die Bedingungen für die Netzeinspeisung wären dort noch näher zu untersuchen.

Auch der Süden Chinas erstreckt sich bis zum nördlichen Wendekreis, was maximale Einstrahlung verspricht. Die tiefen Elektrizitätspreise und politische Unsicherheiten mindern jedoch die Attraktivität dieses grössten Gewächshausmarktes. Langfristig ist ein Markteinstieg in Asien – speziell in Japan – nicht auszuschliessen, doch im Hinblick auf mangelnde Marktkenntnisse scheint der nahe spanische Markt mit seinem staatlichen Förderprogramm als Pionier-Region am geeignetsten.

(eigene Foto)



Abbildung 7-4: Gewächshäuser vor Peking

7.2.2 Kundenorientierte Segmentierung

Das solare Energiesystem erfordert vom Gewächshausbesitzer eine Offenheit für die neue Technologie und eine gewisse Investitionsbereitschaft. Letztere mag auch von einem Elektrizitätsproduzenten oder externen Investor übernommen werden. Dennoch eignen sich nicht alle Gewächshäuser gleichermaßen für den Einsatz des solaren Energiesystems. Die Gewächshausstruktur mag nicht den Anforderungen entsprechen (Holzlatten), oder die Einteilung kann ungeeignet sein. Ein Ersetzen des Hüllenmaterials durch Fluorpolymer ist in jedem Fall zu empfehlen; mit Ausnahme von Blankglas ist die Streuung der üblicherweise verwendeten Materialien zu hoch.

Hinsichtlich erster Versuchsanlagen mögen Hortikultur-Forschungsinstitute einen kleinen, aber durchaus interessanten Markt darstellen. Der potentielle positive Einfluss auf das Gewächshausklima weckt das wissenschaftliche Interesse. Das effektive Potential der Technologie kann empirisch erforscht werden, was die Grundlage für einen glaubwürdigen Auftritt auf dem Markt schafft.

8 Schlussfolgerung

8.1 Zielerreichung

(Vergleiche die vier Punkte der Aufgabenstellung, Abschnitt 1.1.2)

a) *Nutzbare Energie und Einfluss auf das Gewächshausklima*

Zur Berechnung der nutzbaren Energie wurde ein Rechenmodell erarbeitet, mit dessen Hilfe sich die solare Ausbeute für verschiedene Regionen berechnen lässt. Analysiert wurden drei Regionen (Spanien, Italien und Kalifornien). Für weitere Regionen sind die entsprechenden Strahlungsdaten aufzutreiben und in das Modell einzugeben.

Ein Vergleich des Elektrizitätsoutput mit vergleichbaren Systemen lässt die Ergebnisse als plausibel erscheinen. Der Einfluss auf das Gewächshausklima ist schwierig abzuschätzen; die theoretischen Berechnungen sind mit Feldversuchen zu verifizieren.

b) *Marktanalyse und Marktattraktivität*

Ein Einblick in die Verhältnisse auf dem Gewächshausmarkt ist in Kapitel 2 skizziert. Einige offene Fragen – insbesondere zu Betriebskosten – konnten trotz Anfragen an Gewächshaus-Experten nicht vollständig geklärt werden. Für eine erste Annäherung müssen die dokumentierten Erkenntnisse genügen.

Die Marktattraktivität der Solarenergienutzung hängt stark von der staatlichen Förderung ab. Ein internationaler Überblick ist schwierig, und die Bedingungen können je nach politischer Entwicklung kurzfristig ändern. Die durchgeführte Analyse erhebt keinerlei Anspruch auf Vollständigkeit, sondern ist lediglich Resultat der Daten, welche in der beschränkten Zeit aufgetrieben werden konnten.

³¹ Investitionskosten pro Hektare zwischen 2 und 4 Millionen € (siehe Tabelle 6-3)

c) Wirtschaftlichkeit

Die Kostenannahmen sind mit grosser Unsicherheit behaftet. Die resultierenden Elektrizitätskosten sind jedoch mit ähnlichen Studien vergleichbar. Einige Konstruktionsvarianten und Grösseneffekte wurden analysiert, für weitere Varianten soll das erarbeitete Rechenmodell Hilfe leisten. Die rein solar-thermische Anwendung kann aufgrund der höheren technischen Komplexität mit dem linearen Modell nicht fundiert untersucht werden, weshalb sich die Arbeit auf die photovoltaische Anwendung konzentriert.

In Spanien erfüllt das System unter den getroffenen Annahmen die Rentabilitätsanforderungen. Es ist jedoch nicht auszuschliessen, dass sich die Verhältnisse verändert haben, bis die Entwicklungsarbeiten abgeschlossen sind.

d) Produktstrategie und Kundenanalyse

Der Schwerpunkt der Arbeit liegt auf den oben genannten Punkten. Die resultierenden Empfehlungen zu Produktstrategie und Kundenzugang konnten nur kurz zusammengefasst werden. Für nähere Betrachtungen ist ein verstärkter Kontakt zu Gewächshausindustrie und Produzenten erforderlich. Die vorliegende Arbeit möge dabei als Informationsbasis dienen.

8.2 Ausblick

a) Attraktivität der Technologie

Das solare Energiesystem übertrifft die in der Zwischenpräsentation besprochenen Ziele. Dank grosszügiger Einspeisevergütung liegt die interne Verzinsung (IRR) bei 15% bis 25%, und die Investition zahlt sich in weniger als 7 Jahren zurück. Ob die Strahlungsdichte und das Pflanzenwachstum den Erwartungen gerecht wird, sollte in Zusammenarbeit mit Hortikultur-Instituten abgeklärt werden. Dass der heute energieaufwändige Gewächshausbetrieb zukünftig einen Energieüberschuss verkaufen kann, scheint hingegen durchaus plausibel. Zweckmässig eingesetzt ist das System jedoch nur in äquatornahen Zonen. Zur Problemlösung in kühlen Regionen kann das System keinen Beitrag leisten.

b) Umsetzung

Die Realisierung dieses Potentials erfordert einen Dialog zwischen Solar- und Gewächshausmarkt. Um konkrete Schritte zur Markteinführung unternehmen zu können, müssen die Entwicklungsarbeiten zumindest vorläufig abgeschlossen werden. Ausstehend ist insbesondere ein Konzept zur Wärmespeicherung und -bereitstellung. Ein funktionales Produkt sollte getestet und dessen Herstellung mit potentiellen Produzenten diskutiert werden. Um die Umsetzung nicht zu verzögern, ist das Produkt vom Entwicklungsprozess loszulösen. Neue Ideen und zusätzliche Applikationen tragen zur langfristigen Attraktivität der Unternehmung als Innovationsquelle bei, sollten jedoch erst nach erfolgreicher Markteinführung angegangen werden.

c) Nachhaltigkeit

Die Umstellung der Energieproduktion von fossilen auf erneuerbare Quellen ist ein wichtiger Schritt zu einer nachhaltigen Entwicklung der Menschheit. Dies bedeutet jedoch nicht, dass alle mit der Solartechnologie verbundenen Aktivitäten nachhaltig sind. Die in Forschung und Entwicklung einflussenden Ressourcen tragen erst mit der Produkteinführung zur langfristigen Aufrechterhaltung der Produktionskapazität und der Stabilität der Ökosysteme bei.

Während der Vorbereitung einer Pilotanlage fallen beispielsweise einige mobilitätsbedingte Emissionen an, welche sich erst mit der erfolgreichen Inbetriebnahme rechtfertigen lassen. Zudem sind die Lebensphasen aller eingesetzten Materialien zu berücksichtigen. Die Fluoropolymer-Hülle mag ein viel versprechender Beitrag zur Kostenreduktion solartechnischer Anlagen sein. Wird sie jedoch nicht sachgemäss wiederverwertet, trübt die damit verbundene Umweltbelastung die Bilanz.

Es ist zu hoffen, dass aus den langjährigen Entwicklungsarbeiten bald ein zukunftsweisendes Produkt ausgekoppelt werden kann. Möge dessen Erfolg zum langfristigen Bestand beitragen – sowohl der Unternehmung – als auch der Erde.

9 Verzeichnisse

9.1 Literaturverzeichnis

9.1.1 Literatur

- Brockhaus in fünf Bänden, 8., neu bearbeitete Auflage, F.A. Brockhaus GmbH, Mannheim, 1993/1994/1995
- Calatrava J. u.a.: *“Productivity and Cultivation Costs Analysis in Plastic Greenhouses in the Nijar (Almeria) Area”*, in (*“Proceedings of the Fifth International Symposium on Protected Cultivation in Mild Winter Climates: Current Trends for Sustainable Technologies”*, Acta Horticulturae 559, International Society for Horticultural Science, Cartagena-Almeria (Spain), 2001
- Chiapale, J.P.: *“La Serre Solaire INRA-CEA: Resultats Pysiques”*, in *“Energy in protected cultivation”*, Acta Horticulturae 115, International Society for Horticultural Science, Montfavet (France), 1981
- Duden: *“Das Fremdwörterbuch”*, Dudenverlag, Mannheim, 1990
- El-Shiati, A.M: *“Experience with Greenhall: A Protected Vegetable Production System”* in *“International Symposium on Strategies for Market Oriented Greenhouse Production”*, Acta Horticulturae 434, International Society for Horticultural Science, Alexandria (Egypt), 1996
- Faschini, A.: *“Feasibility Study on a Medium-Size Central PV Plant Working with Low-Concentration Sub-System”*, Report EUR 8193 EN, Commission of the European Communities, Brüssel, 1982
- Hanan, J.: *“Greenhouses: Advanced Technology for Protected Horticulture”*, CRC Press LLC, Boca Raton (Florida), 1998
- Mortimer, C.: *“Chemie: Das Basiswissen der Chemie”*, 6. neubearbeitete und erweiterte Auflage, Georg Thieme Verlag, Stuttgart, 1996
- Pasternack, D. u.a.: *“A Versatile Solar System for Environmental Control in Greenhouses”* in *“International Symposium on Strategies for Market Oriented Greenhouse Production”*, Acta Horticulturae 434, International Society for Horticultural Science, Alexandria (Egypt), 1996
- Pollet I.V./ Eykens P.G.M./ Pieters J.G.: *“PAR Scattering by Greenhouse Covers and its Effect on Plant Growth”* (Ghent University, Belgium) in *“Proceedings of the International Conference and British-Israeli Workshop on Greenhouse Techniques toward the 3rd Millennium”*, Acta Horticulturae 534, International Society for Horticultural Science, Haifa (Israel), 2000
- Reuss, M./ Müller, J.: *„Einsatz von Photovoltaik zur Stromversorgung von Gewächshäusern“*, in *„Photovoltaik-Anwendungen im Agrarbereich“*, BMFT/BML-Statusseminar, Arbeitspapier 208, Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e.V., Darmstadt, 1994
- Seiler, A.: *„Financial Management: BWL in der Praxis II“*, 2. Auflage, Orell Füssli Verlag, Zürich, 2000
- Seiler, A.: *„Planning: BWL in der Praxis III“*, Orell Füssli Verlag, Zürich, 2000
- Seiler, A.: *„Marketing: BWL in der Praxis IV“*, 6., überarbeitete Auflage, Orell Füssli Verlag, Zürich, 2001
- Swanson, R.: *„Straight Talk about Concentrators“* in *„Future Generation Photovoltaic Technologies“*, American Institute of Physics, New York, 1997
- Tripanagnostopoulos: *„Illumination aspects for Greenhouses”*, University of Patras, Patras, 2004
- Vatansever, A.: *„Greenhouses Oriented to the Sun“* in *„Proceedings of the International Conference on Heliotechnique and Development“*, Development Analysis Associates Inc, Massachusetts (USA), 1976

- Von Zabeltitz, C./ Baudoin W.O.: „Greenhouses and shelter structures for tropical regions“, *FAO Plant Production and Protection Paper 154, Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rom, 1999*
- Willits, D.H.: “Constraints and Limitations in Greenhouse Cooling: Challenges for the next Decade”, (North Carolina State University, USA) in “Proceedings of the International Conference and British-Israeli Workshop on Greenhouse Techniques toward the 3rd Millennium”, *Acta Horticulturae 534, International Society for Horticultural Science, Haifa (Israel), 2000*
- Winter, C.-J./ Sizmann, R.L./ Vant-Hull L.L.: „Solar Power Plants: Fundamentals, Technology, Systems, Economics“, *Springer Verlag, Heidelberg, 1991*
- Yusuf Taha Guma u.a.: “Production and Marketing of Vegetables in the United Arab Emirates with Reference to Greenhouse Industry” in “International Symposium on Strategies for Market Oriented Greenhouse Production”, *Acta Horticulturae 434, International Society for Horticultural Science, Alexandria (Egypt), 1996*

9.1.2 Internet

- AgriLINK NZ Ltd: “Energy Use and Carbon Dioxide Emissions in the New Zealand Vegetable & Flower Greenhouse Industries”, 2004, <http://www.agrilink.co.nz/Articles.aspx> , konsultiert am 27.12.04
- Asahi Glass Green-Tech Co.Ltd., Tokio, Japan: <http://www.f-clean.com>, konsultiert am 24.11.04
- Attra Sustainable Agriculture Information Service, B. Bellows: "Solar Greenhouses", 2003, <http://www.attra.org/attra-pub/solar-gh.html>, konsultiert am 22.11.04
- Boeing Spectrolab: <http://www.spectrolab.com> , konsultiert am 20.01.05
- Carbon Trust: ECG091 “Energy Benchmarks and Saving Measures for Protected Greenhouse Horticulture in the UK”, 2004, <http://www.thecarbontrust.co.uk/energy> , konsultiert am 27.12.04
- Entech Inc.: <http://www.entechsolar.com>, konsultiert am 22.11.04
- Envi s.r.o.: <http://www.envi.cz>, konsultiert am 03.12.04
- EIA Energy Information Administration: Official Energy Statistics from the U.S. Government <http://www.eia.doe.gov> , konsultiert am 06.01.05
- Fraunhofer Institut, Lerchmüller / Bett: „Flatcon Konzentration-PV-Technologie“ Otti-Symposium 2005, <http://www.ise.fraunhofer.de> , konsultiert am 28.01.05
- IEA International Energy Association <http://www.iea.org> , konsultiert am 23.12.2004
- IGC International Greenhouse Company USA: <http://www.igcusa.com> , konsultiert am 06.01.05
- IPCC International Panel on Climate Change: “Third Assessment Report 2001 – Climate Change”: <http://www.ipcc.ch> , konsultiert am 06.01.05
- ISHS International Society for Horticultural Systems: <http://www.ishs.org> , konsultiert am 24.11.04
- Merck: <http://www.merck.de> , konsultiert 05.01.05
- Mihara, Y.: “Energy Savings and Protected Cultivation in Japan”, *ISHS Acta Horticulturae 1987*, http://www.actahort.org/books/87/87_45.htm , konsultiert am 27.12.04
- NREL National Renewable Energy Laboratory: <http://www.nrel.gov> , konsultiert am 19.12.04
- Pyron Solar, La Jolla, Kalifornien USA: <http://www.pyronsolar.com>, konsultiert am 16.12.04
- Quaschnig, V.: „Specific Cost Development of Photovoltaic and Concentrated Solar Thermal Systems Depending on the Global Irradiance“, *ISES Solar World Congress 2003*, <http://www.volker-quaschnig.de> , konsultiert am 05.01.05
- Satel-Light Strahlungsdatenbank: <http://www.satel-light.com>, konsultiert am 02.12.04
- Solarbuzz, Portal to the World of Solar Energy: <http://www.solarbuzz.com> , konsultiert am 22.12.04
- UBS Union Bank of Switzerland: <http://www.ubs.com> , konsultiert am 08.02.05

9.1.3 Interne Quellen und Broschüren

- Bomin Solar GmbH & Co KG: "Basic Concept For Saudi-Arabic/German Greenhouse Development Project", Lörrach, 1981
- Carmel / Kleinwächter: „European-Israeli Cooperation in Solar Technology“ (Projektbericht), Eurosolar e.V., Bonn, 1994
- Colsmann-Freyberger, C.: „CoolPhoton: An Actively-Cooled Concentrating PV-System“, Sunvention, Lörrach 2005
- Hoechst AG: "Neue Wege im Einsatz von Fluorkunststoffen für transparente Überdachungen", aus „Technische Rundschau“ 51/52 1983, Frankfurt 1983
- Kleinwächter, J.: „Envelope Power Greenhouse: Energy and Crop“ Sunvention, Lörrach, 2005
- Kleinwächter, J.: "Fluoropolymer in Solar Technology: High Performance Solutions", Fluoroplast World Congress 2004, BSR Solar Technologies GmbH, Zürich, 2004
- Photon: Das Solarstrom-Magazin, Aachen, CD Ausgaben 2004
- Photon: Das Solarstrom-Magazin, Aachen, Ausgabe 2/2005
- Ruther, O.: „Der kontinuierliche Ökomanipulierte Pflanzenbau“, Ruthner Pflanzentechnik AG, Wien, 1982

9.2 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1-1: Vertiefungsgrad	7
Abbildung 1-2: Aufbau Diplomarbeit	7
Abbildung 1-3: Sonnenpfad Winter und Sommer	8
Abbildung 1-4: Strahlungsdichte auf nachgeführte Fläche	8
Abbildung 1-5: Einfallswinkel und Transmission $[\eta_{\text{reflex}}(\zeta)]$	8
Abbildung 1-6: Spektrale Zusammensetzung	9
Abbildung 1-7: Absorptionsspektrum Chlorophyll	9
Abbildung 1-8 Aufteilung zwischen diffuser und direkter Strahlung	9
Abbildung 1-9: Jährliche Strahlungsmenge nach Breitengrad	10
Abbildung 1-10: Strahlungsbedarf der Photosynthese	10
Abbildung 2-1: Blumen im Gewächshaus	11
Abbildung 2-2: Temperaturbereich Gemüseanbau	11
Abbildung 2-3: Salatanbau im Gewächshaus	11
Abbildung 2-4: Glashaus mit Sägezahndach	12
Abbildung 2-5 Folienhaus mit Rundbogenkonstruktion	12
Abbildung 2-6: Anbau im Erdboden	12
Abbildung 2-7: Anbau auf Pflanztischen	12
Abbildung 2-8: Einflussfaktoren Pflanzenwachstum	13
Abbildung 2-9: Tagesverlauf Gewächshausklima (Almeria)	13
Abbildung 2-10: Verdunstungskühlung	13
Abbildung 2-11: Blatt- und Lufttemperatur	14
Abbildung 2-12: Beschattung	14
Abbildung 2-13: Gewächshaus in den Tropen	15
Abbildung 2-14: Jahreszeitlich optimierte Gewächshauskontur	15
Abbildung 2-15: Solargewächshaus mit separierter Kollektorfläche	15
Abbildung 2-16: Funktionsschema Liquid Radiation Filter Greenhouse	16
Abbildung 2-17: Linsengewächshaus	16
Abbildung 3-1: Solare Energieumwandlung	17
Abbildung 3-2: Cosinus- und Reflexionsverluste	18
Abbildung 3-3: Parabolspiegel und Fresnel-Linse	18
Abbildung 3-4: Dampferzeugung mit Envelope-System	20
Abbildung 3-5: Dachintegrierte Photovoltaik	18
Abbildung 3-6: Fixe und nachgeführte Photovoltaik	18
Abbildung 3-7: Spiegelfeld mit zentralem Absorber	18
Abbildung 3-8: thermisches Parabolspiegel-Kraftwerk	18

Abbildung 3-9: Dish-Stirling.....	19
Abbildung 3-10: Aufwindkraftwerk.....	19
Abbildung 3-11: Energieträger Elektrizitätsproduktion.....	19
Abbildung 3-12: Lineares Fresnel-PV-Modul von Entech.....	19
Abbildung 3-13: Aufbau Entech-Modul.....	19
Abbildung 3-14: Punktfokussierung von Flatcon.....	20
Abbildung 3-15: Nachführ-Vorrichtung von Flatcon.....	20
Abbildung 3-16: Pyron Solar Prototyp.....	20
Abbildung 3-17: Fluorpolymer-Dom.....	20
Abbildung 3-18: Kostenvergleich PV vs. Thermal.....	21
Abbildung 3-19: Kostenvergleich Flatcon – Flachmodul PV.....	21
Abbildung 3-20: Staatliche Photovoltaikbudgets.....	21
Abbildung 4-1: Gewächshaus mit solarem Energiesystem.....	22
Abbildung 4-2: CoolPhoton-Technologie.....	22
Abbildung 4-3: Beständigkeit von Fluorpolymerfolie.....	23
Abbildung 4-4: Vergleich der Leichtbau-Konstruktion mit einem ungeschützten System.....	23
Abbildung 4-5: Azimutnachführung Sunflower.....	24
Abbildung 4-6: Elevationsnachführung Sunflower.....	24
Abbildung 4-7: Masse der Sunflower.....	24
Abbildung 4-8: Anordnung im Gewächshaus.....	25
Abbildung 4-9: Kalkulation der passenden Anzahl.....	25
Abbildung 4-10: Sunray Tracking.....	25
Abbildung 4-11: Montage des ersten Sunray.....	25
Abbildung 4-12: Anordnung von Sunray.....	26
Abbildung 4-13: Langgezogene Gewächshäuser.....	26
Abbildung 4-14: Gewächshaus-Layout.....	26
Abbildung 5-1: Pfad der Sonne in Südspanien.....	28
Abbildung 5-2: Pfad der Sonne in den Niederlanden.....	28
Abbildung 5-3: Direkte Strahlung in Almeria.....	28
Abbildung 5-4: Vergleich Global- und Direktstrahlung.....	28
Abbildung 5-5: Winkel für O-W-Sunray.....	29
Abbildung 5-6: Winkel für N-S-Sunray.....	29
Abbildung 5-7: Auszug aus Parameter-Sheet.....	30
Abbildung 5-8: Materialeigenschaften und Effizienz.....	31
Abbildung 5-9: Beschattung der Linsen.....	32
Abbildung 5-10: Verluste Sunflower Ø3m.....	32
Abbildung 5-11: Verluste O-W-Sunray 36,5°.....	32
Abbildung 5-12: Nutzbare Strahlung Sunflower.....	33
Abbildung 5-13: Nutzbare Strahlung Sunray.....	34
Abbildung 5-14: Nutzbare Strahlung in Funktion des Reihenabstandes.....	35
Abbildung 5-15: Globalstrahlung gegenüber DNI.....	35
Abbildung 5-16: Elektrizitätsoutput verschiedener Systeme.....	36
Abbildung 5-17: Strahlungsinput Sunflower 30/33.....	37
Abbildung 5-18: Strahlungsinput Sunflower 15/30.....	37
Abbildung 6-1: Aufteilung der Investitionskosten.....	40
Abbildung 6-2: Erfahrungskurve 10%.....	42
Abbildung 7-1: Wertschöpfungskette.....	45
Abbildung 7-2: Potentielle Investoren.....	46
Abbildung 7-3: Marktattraktivität.....	47
Abbildung 7-4: Gewächshäuser vor Peking.....	48

9.3 Tabellenverzeichnis

Tabelle 2-1: Gewächshausflächen.....	11
Tabelle 2-2: Gewächshauskosten.....	12
Tabelle 3-1: Einspeisevergütung Deutschland.....	21
Tabelle 5-1: Vergleich Global- und Direktstrahlung.....	29
Tabelle 5-2: Materialeigenschaften und Effizienz.....	31
Tabelle 5-3: Vergleich Wärmeoutput.....	33
Tabelle 5-4: Vergleich Elektrizitätsoutput.....	34
Tabelle 5-5: Vergleich von Photovoltaiksystemen.....	35
Tabelle 5-6: Modifikation Strahlungsverhältnisse.....	37
Tabelle 6-1: Einheitskosten.....	38
Tabelle 6-2: Modulkosten.....	38
Tabelle 6-3: Investitionskosten.....	39
Tabelle 6-4: Kapitalwert und Elektrizitätskosten.....	43
Tabelle 6-5: Wirtschaftlichkeit von solaren Systemen.....	43

9.4 Anhang

Anhang 1:	Systemumfeld und –abgrenzung
Anhang 2:	Details Gewächshäuser
Anhang 3:	Korrespondenz
Anhang 4:	Klimazonen
Anhang 5:	Rechenmodell
Anhang 6:	SWOT-Analyse