

# Diplomarbeit

zur Erlangung des akademischen Grades  
eines  
Diplomingenieurs (FH)

Hochschule für angewandte Wissenschaften und Kunst  
Fachhochschule Hildesheim  
Fakultät Bauwesen  
Fachrichtung Holzingenieurwesen

**Roland Zajonz**  
Mat.-Nr. 354073  
Hildesheim

Thema der Diplomarbeit  
**Frequenzabhängige Betrachtungen zum Pflanzen-  
wachstum in Wintergärten in Abhängigkeit von den  
Eigenschaften verschiedener Verglasungen**  
SS 2006

1. Prüfer: Prof. Dr.-Ing. Hans-Peter Leimer
2. Prüfer: Dipl.-Ing. Helgo Heuer

## 1.1 Photosynthese

Grüne Pflanzen besitzen die Fähigkeit, aus Wasser und gasförmigem Kohlendioxid ( $\text{CO}_2$ ) der Luft Kohlenhydrate (Zucker und Stärke) aufzubauen und dabei Sauerstoff ( $\text{O}_2$ ) abzugeben. Für diesen Vorgang benötigen die Pflanzen Energie, die ihnen in Form von Strahlungsenergie durch das Sonnenlicht geliefert wird. Man bezeichnet diesen Vorgang als Photosynthese.

Voraussetzung für die Photosynthese ist die Absorption von Strahlung durch die Pigmentsysteme in der Pflanze. Allgemein bestehen die Funktionen der Photorezeptoren darin, Strahlung definierter Wellenlängen zu absorbieren und für den photochemischen Prozess nutzbar zu machen, transmittierte und reflektierte Strahlungsanteile sind dagegen photochemisch unwirksam.

Messungen an lebenden Pflanzen haben gezeigt dass diese den gesamten Bereich zwischen 400 - 720 nm für die Photosynthese nutzen. Dieser Bereich wird deswegen auch als photosynthetisch aktive Strahlung (PAR = photosynthetic active radiation) bezeichnet.

Die meisten Pflanzen besitzen Maxima in ihrer Photosyntheseempfindlichkeit im blauen (400 - 500 nm) und im hellroten (600-700 nm) Bereich, nutzen aber auch 50% der grünen Strahlung.

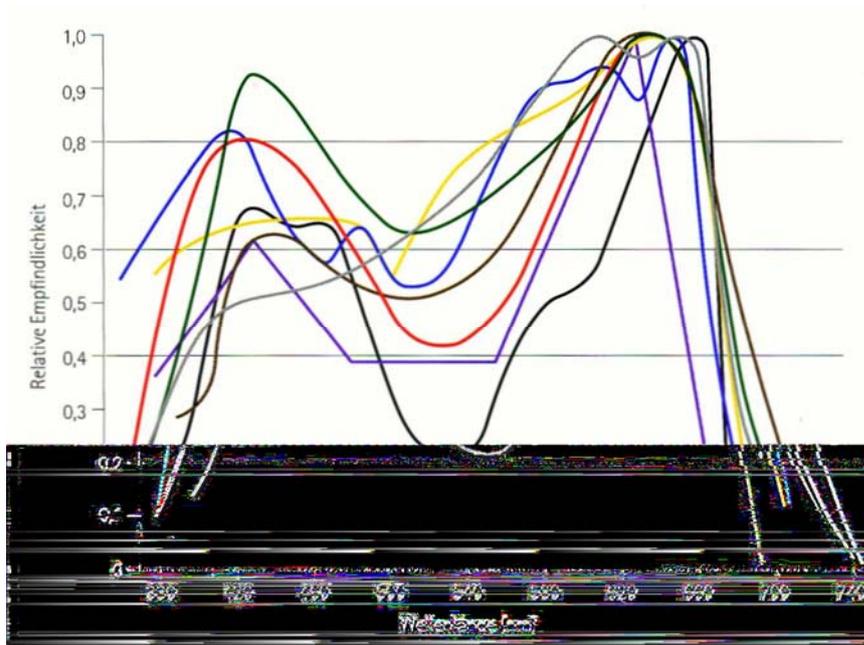


Abbildung 1 : Aktionsspektren der Photosynthese für verschiedene Pflanzenarten [5]

Die durch die Photosynthese (Assimilation) gebildeten Kohlenhydrate werden zur Stoffproduktion und zur Energiegewinnung in der Pflanze benötigt.

Im Prozess der Atmung (Dissimilation) werden Kohlenhydrate zu Kohlendioxid (CO<sub>2</sub>) und Wasser (H<sub>2</sub>O) wieder abgebaut und Energie freigesetzt.

Beide Prozesse finden gleichzeitig statt. Die Pflanze wächst nur, wenn die Assimilation größer als die Dissimilation ist (positive Stoffproduktion).

Beim sogenannten Kompensationspunkt sind die beiden Prozesse gleich groß. Am Kompensationspunkt ist die Photosyntheseaktivität genau so hoch, dass die Photosynthese gerade soviel CO<sub>2</sub> verbraucht, wie die Atmung der Pflanze erzeugt.

## 1.2 Wachstumsfaktoren

Die Photosyntheseaktivität einer Pflanze und somit das Wachstum hängt aber nicht allein von dem Lichtangebot ab. Von großer Bedeutung sind weitere Randbedingungen an die Umgebung der Pflanze, die Wachstumsfaktoren.

Es werden 6 Wachstumsfaktoren unterschieden:

- Licht
- Temperatur
- rel. Luftfeuchte
- Wasser
- Kohlendioxid
- Nährstoffe

Für das Wachstum einer Pflanze ist eine optimale Kombination dieser Wachstumsfaktoren notwendig. Dabei wirkt immer derjenige Faktor für das Wachstum begrenzend, welcher im Minimum vorliegt.

Sehr wichtig bei der Kombination der Wachstumsfaktoren ist die Funktion die von den Pflanzen erfüllt werden soll. Während bei der gärtnerischen Pflanzenproduktion ein möglichst schnelles Wachstum, also eine hohe Stoffproduktion der Pflanze gefordert wird, ist dieser Effekt bei der Verwendung von Pflanzen als Innenraumbegrünung nicht erwünscht. Dabei ist der Erhalt der Pflanze bei minimalen Zuwächsen ausreichend. Das heißt die Wachstumsfaktoren sollen so kombiniert werden dass der Kompensationspunkt möglichst knapp überschritten wird. Dieses Gleichgewicht zwischen CO<sub>2</sub> Aufnahme und CO<sub>2</sub> Abgabe lässt sich auch in Abhängigkeit eines einzelnen Wachstumsfaktors und bei Konstanz der übrigen ermitteln, beispielsweise als Lichtkompensationspunkt wenn der Wachstumsfaktor Licht verändert wird.

Die Einflüsse der einzelnen Wachstumsfaktoren und ihrer Kombinationen auf die Pflanze stellen aber ein äußerst komplexes System dar, das nur schwer zu beschreibende Wechselwirkungen aufweist. Es ist daher praktisch unmöglich dieses Multifaktorensystem als Ganzes quantitativ zu erfassen.

Wichtig ist hierbei, dass die Wachstumsfaktoren sehr stark von der Pflanzengattung und dem gewählten Standort abhängen. Können die optimalen Umgebungsbedingungen nicht permanent gewährleistet werden gerät die Pflanze unter mehr oder weniger starke physiologische Belastungen, sogenannten Stress.

Diese Zusammenhänge sollten bereits in der Anfangsphase der Planungen berücksichtigt werden, um im weiteren Planungsprozess Probleme zu vermeiden, die Funktionalität der Pflanzen im Innenraum dauerhaft zu gewährleisten und die Vorteile einer Bepflanzung im fertigen Gebäude auszuschöpfen.

### 1.2.1 Licht

Der Wachstumsfaktor Licht hat naturgemäß eine besondere Bedeutung, als Grundvoraussetzung für die Photosynthese.

Bei der Bewertung der Lichtverhältnisse am Pflanzenstandort ist eine Unterscheidung der Strahlungsquantität einerseits von der Strahlungsqualität andererseits wichtig.

#### 1.2.1.1 Einfluss der Strahlungsquantität

Die Ansprüche an die Strahlungsquantität sind nicht bei allen Pflanzen gleich. Sonnenpflanzen wachsen in der Natur bei vollem oder nahezu vollem Sonnenlicht. Sie haben in der Regel die Fähigkeit, sich an dunklere Bedingungen anzupassen.

Schattenpflanzen hingegen gedeihen am besten im Streulicht, sie sind optimal an schattige Bedingungen angepasst. Sie sind aber oft nicht in der Lage bei höheren Strahlungsintensitäten zu wachsen und leiden bei solchen Bedingungen unter Starklichtstress.

Daneben gibt es zahlreiche Pflanzen, die zwischen diesen Extremen liegen und sowohl bei mittleren als auch leicht erhöhten oder erniedrigten Lichtintensitäten wachsen können.

Werden Blätter zunehmender Beleuchtung ausgesetzt, steigt die Photosynthese zunächst proportional, dann aber immer langsamer bis zu einem Höchstwert an. Die Photosynthese ist dann lichtgesättigt, das heißt eine Zunahme der Lichtintensität führt zu keiner weiteren Steigerung der Photosyntheserate. Schattenpflanzen erreichen bereits bei 5 - 10 kLx die Lichtsättigung, während Sonnenpflanzen erst bei 50 - 80 kLx lichtgesättigt sind.

#### 1.2.1.2 Einfluss der Strahlungsqualität

Die Strahlungsqualität, das heißt die spektrale Zusammensetzung der Strahlung, hat neben der oben beschriebenen Intensität ebenfalls einen bedeutenden Einfluss auf das Wachstum und die Gestalt der Pflanzen.

Abhängig von der Strahlungsqualität die der Pflanze zur Verfügung steht sind vielfältige Auswirkungen auf die Gestalt der Gewächse bekannt.

Die Auswirkungen der Strahlung in den gewählten Wellenlängenbereichen und Ihre Verhältnisse zueinander soll im Folgenden kurz erläutert werden.

#### UV-B Strahlung (300 - 315 nm)

Die UV-B Strahlung wird weder von Wärmeschutzglas noch von Sonnenschutzglas transmittiert. Bei den Auswirkungen auf das Wachstum von Innenraumbegrünungen kann sie daher vernachlässigt werden, obwohl sie unter natürlichen Standortbedingungen in der Natur durchaus einen Einfluss auf das Pflanzenwachstum hat.

#### UV-A Strahlung und violette Strahlung (315 - 400 nm)

Dieser Teil des Strahlungsspektrums wird von Wärme- und Sonnenschutzgläsern stark absorbiert und nur ein kleiner Teil erreicht den Innenraum. Dieser Bereich des Tageslichtspektrums ist nicht relevant für das Pflanzenwachstum.

#### blaue Strahlung (400 - 500 nm)

Blaue Strahlung reduziert das Streckungswachstum und beeinflusst die Samenkeimung und das Blühen. Diese drei Wirkungen sind bei Pflanzen im Innenraum als vorteilhaft zu bewerten.

Blaue Strahlung erhöht aber auch die Photosyntheseaktivität einer Pflanze wenn die übrigen Wachstumsfaktoren es ermöglichen.

#### hellrote Strahlung (600 - 700 nm)

Ein hoher hellroter Anteil im der Pflanze zur Verfügung stehenden Spektrum führt zu einem geringeren Streckungswachstum. Das heißt, dass die Pflanzen sich weniger verzweigen und in ihrer Erscheinungsform kompakter sind. Auch das Blätterwachstum wird reduziert, die Blätter werden zwar dicker, sind aber kleiner.

Beide Auswirkungen sind für das Wachstum von Zimmerpflanzen vorteilhaft.

#### dunkelrote Strahlung (700 - 800 nm)

Die dunkelrote Strahlung fördert das Streckungswachstum der Pflanzen.

Die Gewächse werden lang, die Anzahl der Zweige nimmt zu. Unter dunkelroter Strahlung entwickeln sich große Blätter mit einer geringen Blattstärke.

Bei den beschriebenen Auswirkungen der Wellenlängenbereiche auf das Pflanzenwachstum zeigt sich, dass die hellroten und dunkelroten Strahlungsanteile einen genau gegenteiligen Einfluss auf die äußere Gestalt der Pflanzen haben. Die Größe der Pflanzen und ihre Wachstumsgeschwindigkeit sind wichtige Parameter bei der Auswahl und Kombination von Pflanzen für die Innenraumbegrünung.

Daher kommt bei der Auswahl der Verglasung diesem hellrot/dunkelrot Verhältnis (HR/DR) eine besondere Bedeutung zu. Dieses Verhältnis wird entscheidend von der Verglasung und ihren spektralen Transmissionseigenschaften beeinflusst. Im Kapitel 4.4 wird dies eingehend erläutert.

## 2 Mehrscheiben-Isoliergläser

Isoliergläser werden seit etwa 60 Jahren hergestellt. Im Bauwesen fanden in den letzten zwanzig Jahren beachtliche Verbesserungen der wärmedämmenden und optischen Eigenschaften von Verglasungen statt. Damit Wärmedämm- und Sonnenschutzgläser ihre Aufgaben erfüllen können, sollen sie unterschiedliche optische Eigenschaften in den verschiedenen Wellenlängenbereichen haben.

Eine typische Forderung ist die Kombination hoher Lichttransmission mit maximaler Reflexion für Wärmestrahlung.

### 2.1 Strahlungstechnische Glaseigenschaften

Die strahlungstechnischen Eigenschaften sind für Verglasungen von grundlegender Bedeutung, da sie deren einzigartige Eigenschaft im Bereich der Baustoffe, nämlich die Transparenz, beschreiben. Die beiden wichtigsten kennzeichnenden Größen aus bauphysikalischer Sicht sind der Gesamtenergiedurchlassgrad  $g$  ( $g$ -Wert) und der Lichttransmissionsgrad  $\tau_v$ .

### 2.2 Die strahlungstechnischen Eigenschaften beeinflussende Faktoren

In den vorangegangenen Abschnitten wurden einige wichtige Kennwerte von modernen Fenstern kurz beschrieben. Diese speziellen Eigenschaften werden verlangt, um den vielfältigen Anforderungen an die Verglasungen von zeitgemäßen Gebäuden gerecht zu werden. Diese sehr komplexen Aufgaben lassen sich nur noch mit speziellen, multifunktionalen Konstruktionen lösen. Es ist nicht immer einfach, bei der Vielzahl der Kombinationsmöglichkeiten der einzelnen Komponenten miteinander die Ursachen für die veränderten Kennwerte auszumachen.

### 2.2.1 Gläser (Substrate )

Im Bauwesen werden fast ausschließlich Silicatgläser verwendet die im Floatverfahren hergestellt werden.

Normalerweise sind diese Gläser im sichtbaren Spektralbereich völlig farblos.

Durch Zugabe von Zusätzen in die Glasschmelze kann eine gezielte Einfärbung des Glases erreicht werden. Diese Zusatzstoffe beeinflussen das Absorptionsvermögen des Glases, und somit die Transmission und Färbung im sichtbaren Bereich entscheidend. Enthält das Glas geringe Mengen von Bestandteilen aus Nebengruppen, z.B. Kupfer, Kobalt oder Nickel, so wird bereits kurzwelliges, relativ energiearmes Licht absorbiert. Das Glas zeigt damit im sichtbaren Bereich Verfärbungen, die von der Art des beigemischten Elementes abhängen.

Zur Einfärbung von Glas reichen bereits sehr geringe Mengen aus, Gläser unterschiedlicher Farbe unterscheiden sich nur in etwa 0,5 % ihrer Bestandteile. Die restliche chemische Zusammensetzung des Glases ist identisch.

Weitere Glasarten die in Mehrscheiben-Isoliergläsern Verwendung finden sind Weißglas und Grauglas.

Im UV- Bereich ist handelsübliches Glas lichtundurchlässig. Auch im Wellenlängenbereich über  $\lambda = 5000$  nm (fernes Infrarot) lässt Glas keine Strahlung passieren.

### 2.2.2 Beschichtungen

Die Beschichtungen bei Mehrscheiben-Isoliergläsern sind entscheidend, um den hohen physikalischen Anforderungen an das energetische Verhalten gerecht zu werden. Gleichzeitig sollen die Beschichtungen nur einen geringen Einfluss auf die lichttechnischen Kennwerte der Verglasung haben.

Wärme- und Sonnenschutzverglasungen unterscheiden sich hinsichtlich ihrer Beschichtungen vor allem bei der Position im Scheibenaufbau.

Bei Isoliergläsern werden Beschichtungen aus Edelmetallen oder Metalloxiden und in steigendem Umfang auch dünne, metallische Folien aufgebracht um die selektiven Eigenschaften der Verglasung dem Einsatzzweck entsprechend einzustellen.

In Abbildung 11 sind die qualitativen Anforderungen an die Beschichtungen von Wärme- und Sonnenschutzverglasungen dargestellt.

Ein optimales Sonnenschutzglas sollte eine hohe Lichttransmission im sichtbaren Spektralbereich ermöglichen und eine möglichst hohe Reflexion oder Absorption für Wärmestrahlung im nahen Infrarot besitzen. Die Verglasung wirkt auf Sonnenstrahlen selektiv. Solche Eigenschaften haben z.B. Grüngläser infolge ihrer hohen natürlichen Absorption bei  $\lambda = 1000$  nm. Bei Wärmeschutzgläsern sollen die Beschichtungen vor allem hohe Solargewinne ermöglichen, die Beschichtungen also möglichst viel Solarstrahlung passieren lassen. Bei den Beschichtungen von Wärmeschutzverglasungen wird vor allem ein niedriger Emissionsgrad für

Wärmestrahlung angestrebt um den hohen Anforderungen an den Wärmeschutz gerecht zu werden.

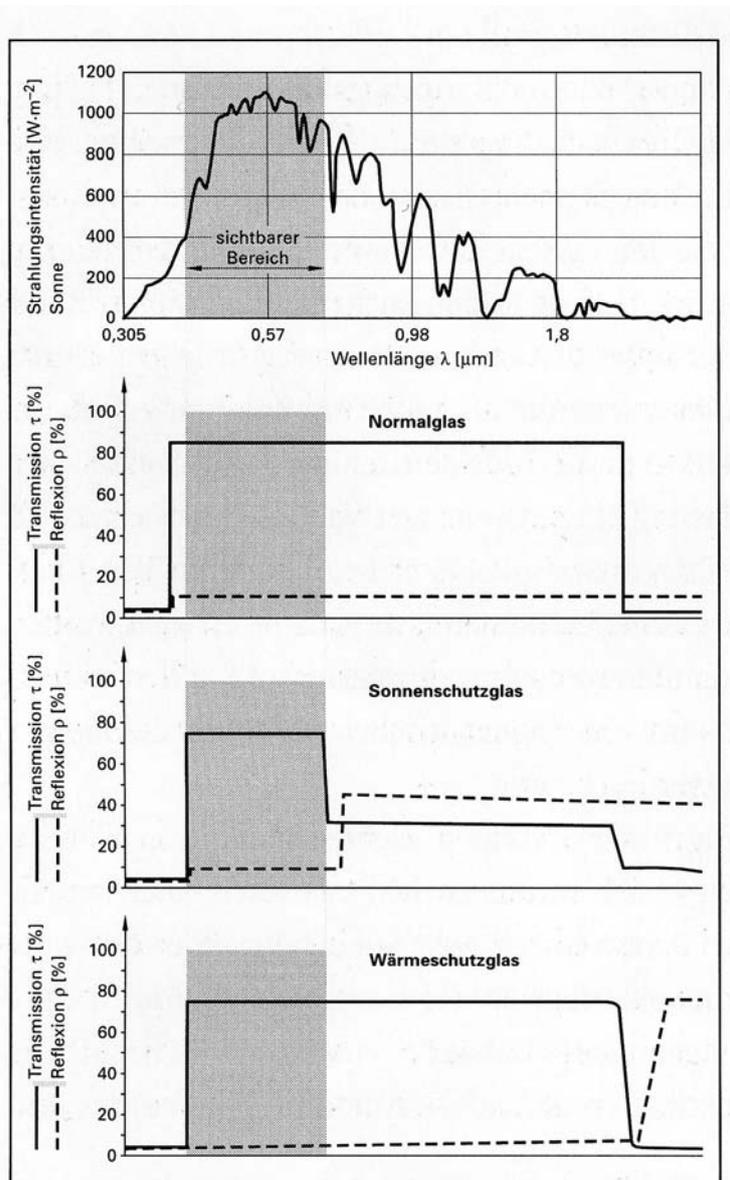


Abbildung 2 : Qualitative Anforderungen an Wärme- und Sonnenschutzgläser

### 2.2.3 Gasfüllungen des Scheibenzwischenraumes

Gase werden seit den 70er Jahren in immer größerem Umfang zur Füllung des Scheibenzwischenraumes verwendet um die Wärmedämmung der Fenster zu verbessern.

Die heute verwendeten Füllgase für den Scheibenzwischenraum bei Wärme- und Sonnenschutzverglasungen sind vorwiegend die Edelgase Argon (Ar) und in geringeren Mengen auch Krypton (Kr).

Für die Verwendung als Füllgas sind vor allem ihre, gegenüber Luft, sehr niedrige Wärmeleitfähigkeit und ihre chemische Stabilität von Bedeutung.

### 3 Solarstrahlung

Die Bestrahlungsstärke  $E_e$  der Sonne am äußeren Rand der Atmosphäre hat im Jahresgang einen mittleren Wert von ca. 1370 W/m<sup>2</sup>.

Die Strahlungsleistung ist von der Wellenlänge abhängig. Etwa 44% der einfallenden Strahlung entfallen auf den Bereich des sichtbaren Lichtes. 3% der Strahlungsleistung entfallen auf den Frequenzbereich der UV-Strahlung und ca. 53 % auf den Infrarotbereich.

Der momentane Wert der Strahlungsintensität auf der Erdoberfläche hängt vor allem von der Sonnenposition für die gegebene Zeit und von der geographischen Lage sowie den metrologischen Bedingungen ab.

### 4 Simulationsberechnungen der Beleuchtungsstärke

Die Beleuchtungsstärken im Innenraum wurden mit dem Programm ADELIN 3.0 / SUPERLITE simuliert.

Die Simulationsberechnungen wurden mit der Zielsetzung durchgeführt, die Beleuchtungsstärke in Innenräumen in Abhängigkeit von dem Transmissionsgrad der Verglasung und der Bauform zu ermitteln. Die Ergebnisse der Berechnungen wurden den Lichtbedürfnissen von Pflanzen gegenübergestellt.

Anhand dieses Vergleichs wurde versucht Planungsansätze zu formulieren, die es ermöglichen aufgrund der äußeren Abmessungen und der lichttechnischen Eigenschaften der Verglasung eine hinsichtlich ihrer Lichtbedürfnisse für die Innenraumbegrünung geeignete Pflanzenauswahl zu treffen.

#### 4.1 Modelle

Als Basismodell wurde ein Würfel mit einer Kantenlänge von 10 m gewählt. Diese Grundform wurde durch zwei weitere quaderförmige Bauformen ergänzt.

Modellnummer	Bezeichnung	Abmaße (l/b/h)	Grundfläche
1	Normal / N	10 / 10 / 10	100 m <sup>2</sup>
2	Breit / B	20 / 10 / 10	200 m <sup>2</sup>
3	Hoch / H	10 / 10 / 20	100 m <sup>2</sup>

Tabelle 1 : Abmaße der Simulationsmodelle

Für die Innenoberflächen der Modelle sowie die äußere Umgebung wurden folgende optischen Eigenschaften definiert.

Bauteil	Eigenschaften	Reflektionsgrad [%]	Material
Boden	opak, diffus reflektierend	7	feuchte Erde
Wände	opak, diffus reflektierend	40	Beton
Decken	opak, diffus reflektierend	30	grauer Anstrich
Umgebung	diffus reflektierend	30	

Tabelle 2 : Optische Eigenschaften der reflektierenden Innenoberflächen

Die beschriebenen Modelle wurden mit 4 Verglasungen kombiniert. Die Gläser wurden hinsichtlich ihrer Lichttransmissionsgrade ausgewählt. Ein Glas ist ein Wärmeschutzglas, die drei anderen Gläser gehören zur Gruppe der Sonnenschutzgläser.

Name	Typ	Lichttransmissionsgrad ( $\tau_v$ ) [%]
ARCON N 30	Wärmeschutz	73
ARCON sunbelt polaris	Sonnenschutz	65
ARCON sunbelt arctis	Sonnenschutz	52
ARCON sunbelt silber	Sonnenschutz	40

Tabelle 3 :Verwendete Verglasungen

Die 4 Fenstertypen wurden mit allen 3 Bauformen kombiniert.

## 4.2 Ergebnisse

Für die Ergebnisse der Berechnungen wurde die Beleuchtungsstärke ausgewählt, mit der Einheit Lux (lx). Die lichttechnische Größe Lux wurde in die strahlungsphysikalische Größe W/m<sup>2</sup> umgerechnet. Für die Umrechnung wurde der Faktor 4,0 verwendet.

$$4 \frac{W}{m^2} \cong 1000lx = 1klx$$

Die Kriterien nach denen die drei Bautypen und Verglasungen hinsichtlich ihrer Eignung für die Innenraumbegrünung bewertet wurden unterschieden sich nach den Lichtansprüchen von Pflanzen.

Für Pflanzen mit geringen Lichtansprüchen wurde eine Mindest-Strahlungsleistung von 2 W/m<sup>2</sup> ( 500 lx) festgelegt.[1]

Für Pflanzen mit einem hohen Lichtanspruch wurde eine Mindest-Strahlungsleistung von  $8 \text{ W/m}^2$  ( $2000 \text{ lx}$ ) festgelegt.

Der Referenzpunkt an dem die geforderte Bestrahlungsstärke erreicht werden musste wurde in die Nord-Süd Achse der Modelle gelegt. Die Entfernung von der Südfassade betrug  $2/3$  der Raumtiefe.

Die Modelle wurden bei der Auswertung durch Ihr Verhältnis der Grund- zur Glasfläche charakterisiert, die Werte stehen in Klammern hinter der Modellnummer.

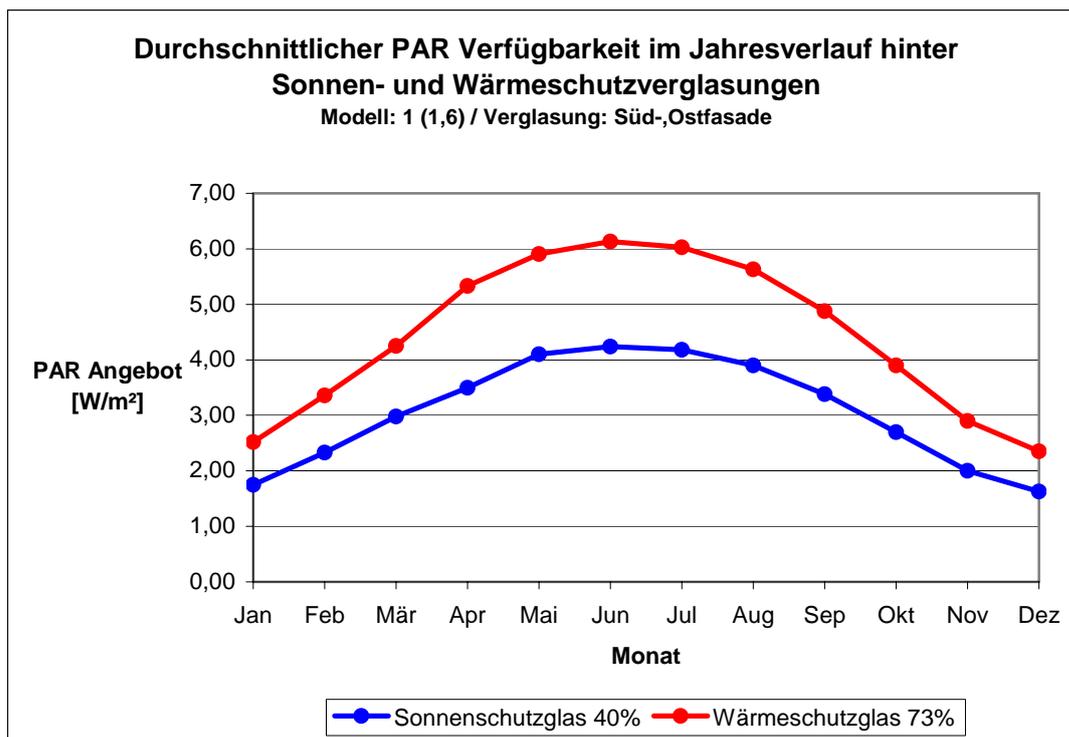


Abbildung 3 :PAR Bilanz bei einer Entfernung von 1m zur Glasfassade

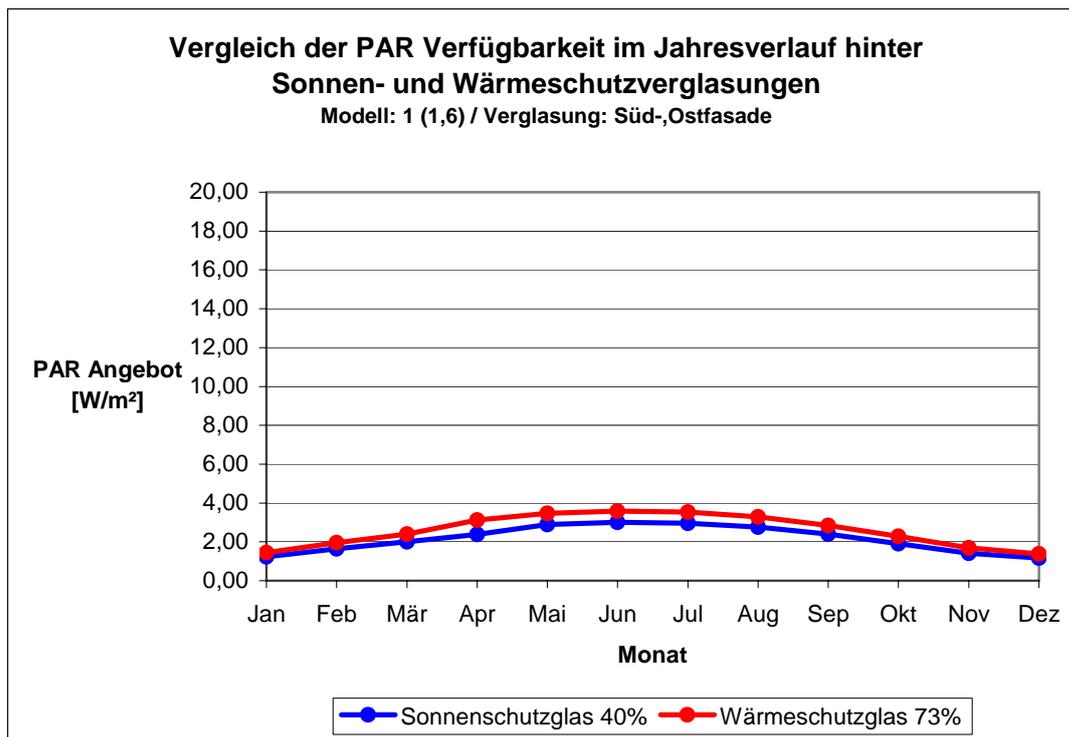


Abbildung 4 : PAR am Referenzpunkt, Entfernung zur Glasfassade 7,5 m

Bei der Modellierung und Rechnung der Varianten wurde besonderen Wert daraufgelegt Sonnenschutzgläser hinsichtlich ihrer Eignung für die Innenraumbegrünung zu beurteilen. Die Abbildungen 3 und 4 zeigen beispielhaft die PAR Verfügbarkeit bei verschiedenen Abständen zur Sonnenschutzverglasung.

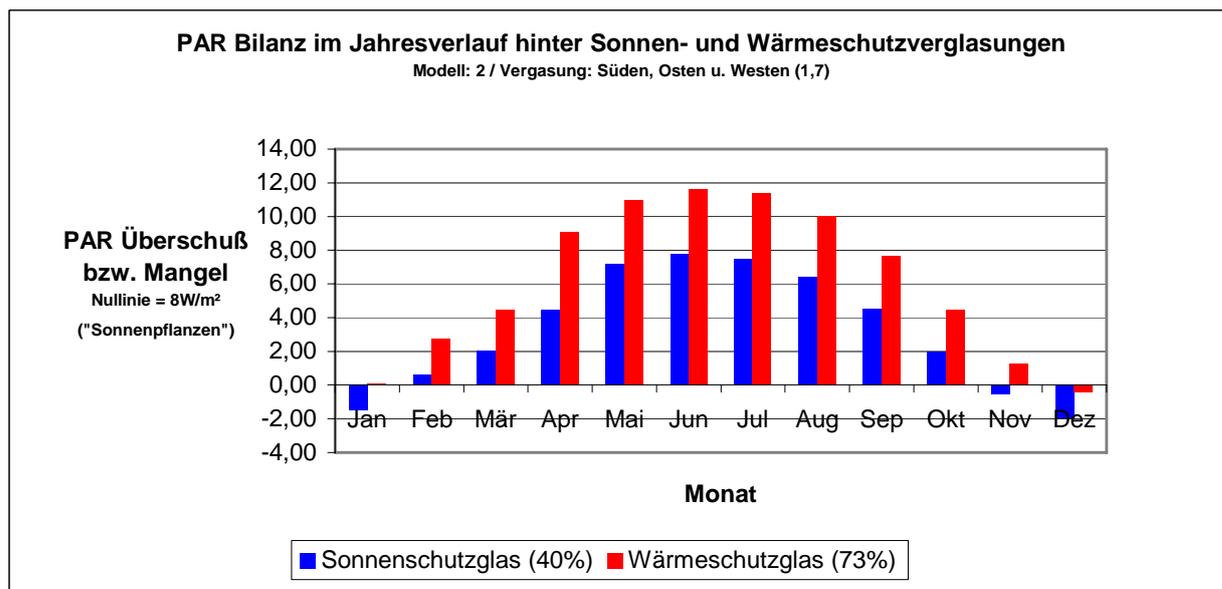


Abbildung 5: PAR Bilanz in der Mitte des Innenraumes bei Modell 2 (Fassadenabstand 5 m)  
 PAR-Bilanzierung:

Um die Lichtverhältnisse aller Modelle und möglichen Glasvarianten zu vergleichen wurden die Über und Unterschreitungen des PAR-Angebotes im Jahresverlauf aufgezeichnet und grafisch dargestellt. In Abbildung 5 ist ein solcher Verlauf exemplarisch dargestellt.

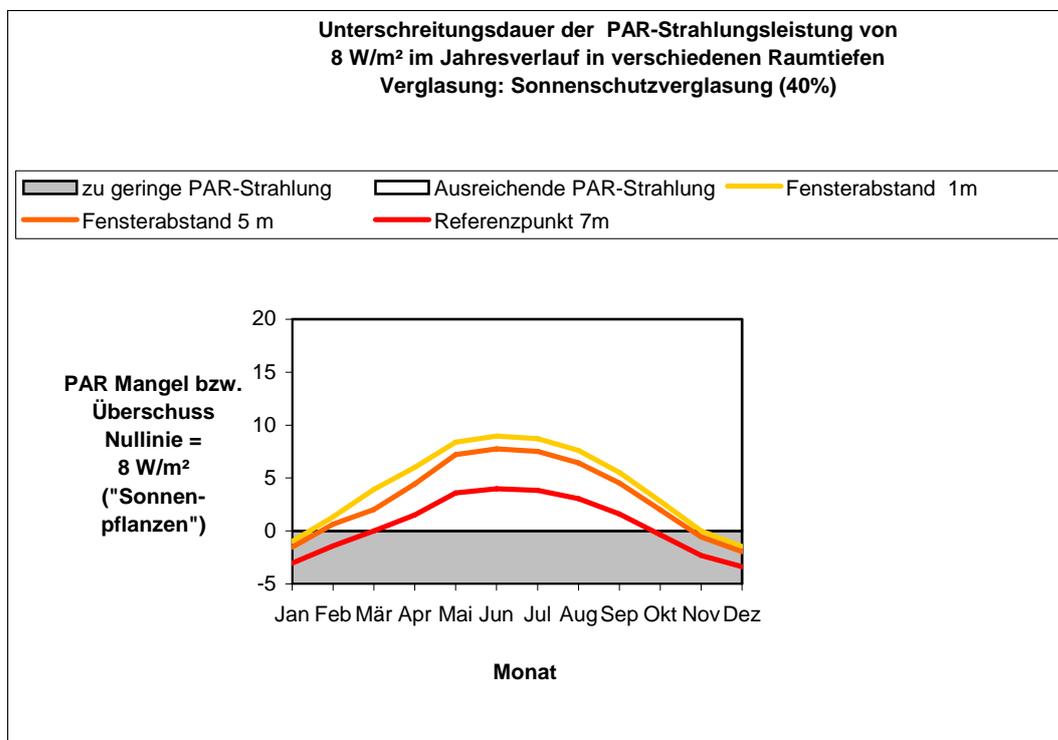


Abbildung 6 : PAR Angebot im Jahresgang im Vergleich zum Fassadenabstand

Die Berechnungen der PAR Strahlung wurden nichtdynamisch durchgeführt. Um aber eine möglichst exakte Aussage über die zeitliche Dauer eines möglichen Lichtmangels vorherzusagen zu können wurden die Ausgleichskurven erstellt.

Aufgrund des Schnittpunktes zwischen der PAR-Kurve mit der jeweiligen gewählten Nulllinie lassen sich bei der selben Bauform eine zeitliche Differenz von bis zu 6 Wochen zwischen der Unterschreitung der Nulllinie abschätzen.

Die Ergebnisse der PAR-Bilanzierung ergaben einige Hinweise auf eine "optimierte" Form des Wintergartens unter Berücksichtigung der Verglasung und der Lage im Gebäudekomplex.

Zwischen dem Verhältnisse aus Glasfläche zur Grundfläche (GI/Ga) und dem Vergleich der Lichttransmissionsgrade der eingebauten Verglasungen wurde Versucht eine Beziehung herzustellen. Im Sinne von Grenzwerten um grobe Fehlplanungen und eine eingeschränkte Funktionalität im fertigen Gebäude möglichst auszuschließen, aber die übrigen bauphysikalischen Anforderungen an eine moderne Glasfassade nicht außer Acht zulassen (z. B. zu hohe Wärmeverluste, el. Energieverbrauch vermindern) und die Flächen ins unendliche anwachsen zulassen.



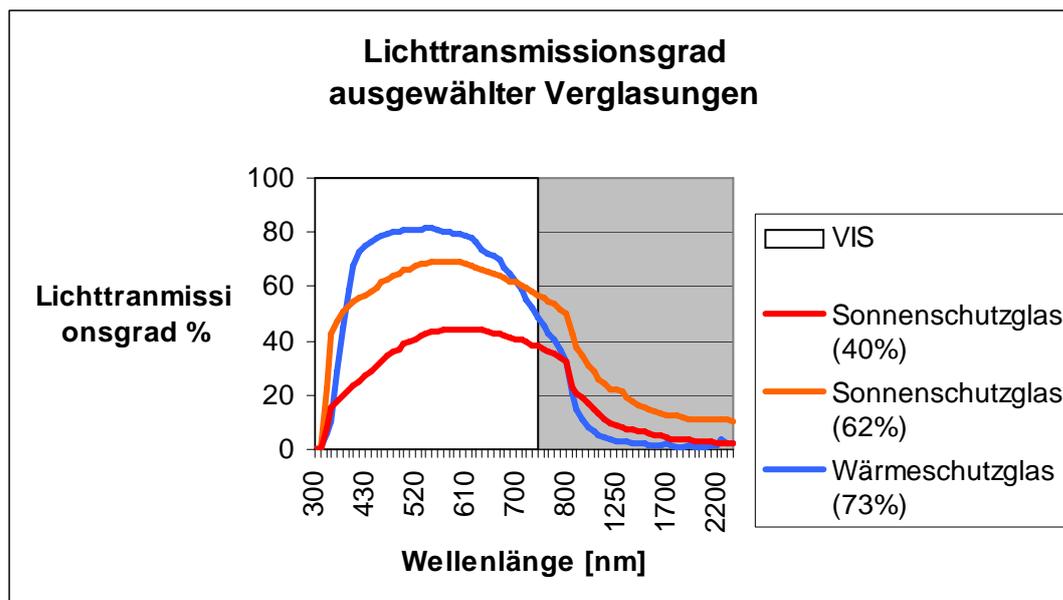


Abbildung 8 : Spektrale Transmission von beschichteten Gläsern

Eine wenig ausgeprägte, ab 700 nm einsetzende Absorptionskante wie sie in der Transmissionskurve der Beschichtung für ein Wärmeschutzglas zu erkennen ist wird aber als positiv für die Innenraumbegrünung bewertet. Bei diesem Verlauf der Transmission stellt sich ein hohes Verhältnis zwischen hellroter und dunkelroter Strahlung (HR/DR-Verhältnis) ein.

Durch ein möglichst hohes HR/DR-Verhältnis wird das Streckungswachstum eingeschränkt, kompakte Pflanzen entstehen.

Im Vergleich zum natürlichen Tageslicht steigt sowohl bei Sonnen- als auch bei Wärmeschutzgläsern das HR/DR - Verhältnis.

Die blaue Strahlung nimmt im Vergleich zu einem Standort im freien hinter Glas zu. Das liegt daran das die Wellen des blauen Spektralbereiches zwar kurzwelliger, aber trotzdem energiereicher als die hellroten Wellen sind.

Auch dieser Umstand kann positiv für das Wachstum der Pflanzen im Innenraum bewertet werden.

In Abbildung 8 ist die spektrale Transmission verschiedener beschichteter Einfachgläser zu sehen.

Aufgrund der Verläufe der spektralen Transmission ist gut zu erkennen das Beschichtungen von Sonnenschutzgläsern eine sehr gleichmäßige Transmission im Bereich der PAR - Strahlung haben. Die deutlich zuerkennende Absorptionsbande der Beschichtung liegt im nahen Infrarotbereich außerhalb des Bereichs der PAR.

Die Beschichtung für ein Wärmeschutzglas zeigt bereits eine deutlich reduzierte Transmission im hellroten Spektralbereich. Die Absorptionsbande ist weniger stark ausgeprägt, eine herabgesetzte Transmission bereits im Bereich der dunkelroten Strahlung zu erkennen.

Die vorliegenden Messergebnissen ergaben aber bei keiner Beschichtung eine für das Pflanzenwachstum gefährliche Einschränkung der spektralen Zusammensetzung. Darüber hinaus weisen langjährige Beobachtungen und praktische Erfahrungen mit der Pflanzenzucht hinter stark selektiven Beschichtungen darauf hin das die spektrale Zusammensetzung gegenüber der Strahlungsintensität einen weitaus geringeren Einfluss auf das Pflanzenwachstum hat. Auch künstliche Beleuchtungen mit einem eher ungünstigen Lichtspektrum haben sich in der gärtnerischen Pflanzenzucht erfolgreich durchgesetzt.

## 5 Analyse

Die Ergebnisse lassen aufgrund der sehr eingeschränkten Modellvarianten nur einige erste Ansätze erkennen. Ob eine Relation zwischen dem gewählten Glas- / Grundfläche Verhältnis und zu einem Mangel an PAR Strahlung im Innenraum besteht konnte aufgrund der beschränkten Datenmenge nicht geklärt werden. Eine eingehende mathematische Analyse war nicht möglich. Die Grundmodelle der Simulationen müssen dazu anders konfiguriert werden, die Abmaße der Modelle in einem engerem Gitter veränderbar sein.

Auch die Glas Auswahl hatte einen zu geringen Umfang.

Ein weiteres Problem war die fehlende allgemeingültige Modellierung eines Verschattungsfalles. Die Variationen waren zu vielfältig um eine Allgemeingültigkeit der Aussagen zu ermöglichen. Der Versuch mit einem Baum führte in Einzelfällen auch zu interessanten Ergebnissen, eine generelle Aussage war allerdings nicht möglich.

Der Verzicht auf dynamische Simulationen und die nicht Einbeziehung von direktem Licht einfall in die Rechnungen sind weitere Einschränkungen die eine Verifizierung der Ergebnisse nötig machen.

Die vorliegenden Betrachtungen wurden als "worst case" Szenario entwickelt. Aufgrund der anspruchsvollen Werte bezüglich der benötigten PAR Strahlung und einem sehr ungünstig gewähltem Referenzpunktes können aber bezüglich der Eignung von Sonnenschutzgläsern für die Innenraumbegrünung durchaus erste Abschätzungen erfolgen.

Die in der Literatur vertretene Meinung Sonnenschutzgläser seien für die Innenraumbegrünung grundsätzlich nicht geeignet kann bezweifelt werden.

Sowohl bei der Strahlungsquantität als auch bei der Qualität sind Sonnenschutzgläser durchaus in der Lage den Bedürfnissen der Pflanzen zu genügen.

Lediglich extreme Vertreter dieser Gruppe mit einem Lichttransmissionsgrad unter 45 % müssen kritisch betrachtet werden. Aber auch hinter diesen Gläsern kann, unter sehr beschränkten Auswahlmöglichkeiten bezüglich Pflanzenart und Pflanzenstandorte eine erfolgreiche Hege der Pflanzen langfristig sichergestellt werden.