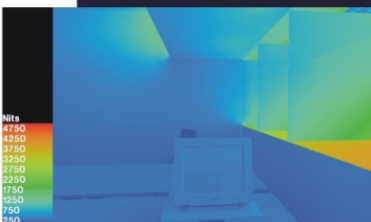


Untersuchung zur Tageslichtnutzung in den feucht-heißen Tropen am Beispiel Rio de Janeiros

Michael Laar



Dissertation
an der Fakultät Architektur
der Bauhaus Universität Weimar

Untersuchung zur Tageslichtnutzung in den feucht- heißen Tropen am Beispiel Rio de Janeiros

Dissertation

zur Erlangung des akademischen Grades

Doktor-Ingenieur

an der Fakultät Architektur

der

Bauhaus-Universität Weimar

vorgelegt von

Michael Laar

geb. 31.03.1965

Weimar, 2002

Gutachter: Prof. Dr. rer. nat. habil. Hans-Joachim Gronau

Prof. Dr.-Ing. Friedrich Wilhelm Grimme

Prof. Dr.-Ing. Kurt Kießl

Tag der Disputation: 30.07.2002

Danksagung

Mein besonderer Dank gilt Herrn Professor Dr. Jochen Gronau für seine zahlreichen hilfreichen Hinweise und Anmerkungen während des gesamten Verlaufes der Dissertation.

Äußerst dankbar bin auch Herrn Professor Dr.-Ing. Friedrich Wilhelm Grimme für seine kontinuierliche Begleitung der Dissertation, seine logistische Unterstützung und den Freiraum, den er mir für diese Arbeit geschaffen hat.

Herr Professor Dr. Hartmut Gaese motivierte und unterstützte diese Arbeit von Beginn an. Auch ihm gilt mein herzlicher Dank.

Weiterhin danke ich meinen australischen Kollegen Philip Greenup und Ian Edmonds für die wertvollen Diskussionen zu dem Thema Tageslichtnutzung in den Tropen und Subtropen.

Darüber hinaus gilt mein Dank den Herrn Eisele und Dr. Schmidt der Firma Siteco für die auch auf die Entfernung gut funktionierende Siview-Hotline.

Auf dem Weg zu dieser Dissertation erhielt ich viele wertvolle Inspirationen von den Kollegen Ken Yeang, Dick Aynsley, Mauro Nogueira, Oscar Niemeyer, Mauro Almada und Carmen Stangenhaus. Ihnen ein herzliches Dankeschön.

Dem DAAD sei gedankt für seine Unterstützung im Rahmen eines PROBRAL-Projektes.

Meiner Frau Eleana danke ich für ihre Geduld und das Verständnis während der letzten Monate.

Nicht zuletzt möchte ich mich herzlich bei meiner lieben Familie bedanken, die mir die Grundlage für meine Ausbildung gab und auf die ich immer zählen konnte.

Rio de Janeiro, 8.8.2002

Inhaltsverzeichnis

1.	Einleitung	1
2.	Geschichtliche Entwicklung der Architektur in Rio de Janeiro	5
2.1.	Autochthone Architektur der Indios	6
2.2.	Kolonialarchitektur (1565 – 1808)	7
2.3.	Klassizismus (1808 – 1870)	12
2.4.	Historismus und Eklektizismus (1870 – 1940)	12
2.5.	Jugendstil (um 1900)	15
2.6.	Art Deco (1925 – 1950)	15
2.7.	Klassische Moderne (1928 – 1960)	18
2.8.	1960 bis zur Gegenwart	21
2.9.	Zusammenfassung und Fazit	24
3.	Tageslicht in den Tropen	28
3.1.	Allgemein	29
3.1.1.	Sonnenstandsdiagramm	29
3.1.2.	Maximale Sonnenhöhen	29
3.1.3.	Photometrisches Strahlungsäquivalent K	30
3.2.	Beschreibung des Tageslichtes in Rio de Janeiro	32
3.2.1.	Beleuchtungsstärke	32
3.2.1.1.	Horizontale Beleuchtungsstärke bei klarem Himmel & Sonne nach CIE/DIN	32
3.2.1.2.	Eigene Messungen	33
3.2.1.3.	Beleuchtungsstärke auf geneigten Flächen E_f	37
3.2.2.	Leuchtdichteverteilung	40
3.2.2.1.	Eigene Messungen für verschiedene Himmelszustände	40
3.2.2.2.	Leuchtdichteverteilung bei bedecktem Himmel nach CIE/DIN	41
3.2.2.3.	Vergleich eigener Messwerte mit Leuchtdichtewerten nach CIE/DIN	42
3.3.	Quantitative Bestimmung des Tageslichtangebots	47
3.3.1.	Sonnenscheinwahrscheinlichkeit	47
3.3.2.	Wahrscheinlichkeit verschiedener Himmelszustände	48
3.3.3.	Bedeckter Himmel in den Tropen (Tropical Overcast Sky)	51

3.4.	Fazit „Tageslicht in den Tropen“	53
4.	Visueller Komfort	55
4.1.	Physiologischer Komfort	57
4.1.1.	Beleuchtungsstärke	57
4.1.1.1.	Brasilianische Vorschriften	57
4.1.1.2.	Internationaler Vergleich	58
4.1.1.3.	Grenzwertermittlung für die vertikale Beleuchtungsstärke E_{VIC} an Bildschirmen	58
4.1.2.	Tageslichtquotient D	64
4.1.3.	Leuchtdichte	64
4.1.3.1.	Literaturauswertung	64
4.1.3.2.	Untersuchung der Leuchtdichte des Himmelsgewölbes, der Blendungswahrnehmung und der Reflexionen am Bildschirm	70
4.1.3.2.1.	Leuchtdichte von Tageslicht und die Wahrnehmung von Blendung	71
4.1.3.2.2.	Reflexblendung auf Bildschirmen	74
4.1.3.2.3.	Leuchtdichte im Blickfeld	75
4.2.	Psychologischer Komfort	81
4.2.1.	Außenbezug	81
4.2.2.	Lichtdynamik	81
4.2.3.	Farbwiedergabe	81
4.2.4.	Tageslichtautonomie	81
4.3.	Fazit „Visueller Komfort“	82
5.	Tageslichtkontrollsysteme	84
5.1.	RADIANCE – Beschreibung	84
5.2.	Methodik der eigenen Simulationen	87
5.2.1.	Sonnenhöhen γ_S	87
5.2.2.	Orientierung	87
5.2.3.	Himmelszustände	88
5.2.4.	Raumgeometrie	89
5.2.5.	Materialoberflächen des Raumes	89
5.2.6.	Umgebung	89
5.2.7.	Raumnutzungsvarianten	90
5.2.8.	Beleuchtungsstärke	91
5.2.8.1.	Messpunkte	91

5.2.8.2.	Grenzwerte für die Beleuchtungsstärke	94
5.2.9.	Leuchtdichte	96
5.2.9.1.	Grenzwerte für die Leuchtdichte	96
5.2.10.	Ergebnisdarstellung	97
5.3.	Tageslichtkontrollsysteme	102
5.3.1.	Feststehende Systeme	103
5.3.1.1.	Auslegungskriterien	103
5.3.1.1.1.	Häufigkeitsbetrachtung der Sonnenhöhe für verschieden orientierte Fassaden	103
5.3.1.1.2.	Auswertung der Sonnenhöhenwahrscheinlichkeit nach Fassadenorientierung für den Standort Rio de Janeiro	105
5.3.1.1.3.	Wichtung	107
5.3.1.1.4.	Notwendigkeit	108
5.3.1.1.5.	Anzahl der Reflexionen	108
5.3.1.2.	Sonnenschutzverglasungen	109
5.3.1.2.1.	Sonnenschutzverglasungen ohne zusätzlichen Sonnen- und Blendschutz	110
5.3.1.2.2.	Sonnenschutzverglasungen mit geregelter innenliegender Jalousie	112
5.3.1.3.	Thermobrise 335 – feststehend	119
5.3.1.4.	Lichtschwerter und Finnen	122
5.3.1.4.1.	Innenliegende Lichtschwerter	122
5.3.1.4.2.	Außenliegende Lichtschwerter	125
5.3.1.4.3.	Kombination innen- und außenliegender Lichtschwerter	125
5.3.1.4.4.	Externe Finnen	127
5.3.2.	Kombination feststehender und beweglicher Komponenten	132
5.3.2.1.	Horizontales innenliegendes Lichtschwert & außenliegende geregelte Jalousie	132
5.3.2.2.	Innenliegendes um 5° geneigtes Lichtschwert und außenliegende geregelte Jalousie	135
5.3.2.3.	Internes und externes Lichtschwert & außenliegender geregelter Jalousie	138
5.3.2.4.	Laser Cut Panel	142
5.3.2.4.1.	Vertikal im Oberlicht mit innenliegendem Lichtschwert	142
5.3.2.4.2.	LCP geneigt vor dem Oberlicht mit innenliegendem Lichtschwert	145
5.3.3.	Bewegliche Systeme	149
5.3.3.1.	Jalousien	149
5.3.3.2.	Tageslichtjalousien	156

5.3.4.	Auswertung – Systemvergleich	159
5.3.4.1.	Beleuchtungsstärke E_{PDCS5} bei klarem Himmel & Sonne	159
5.3.4.2.	Beleuchtungsstärke E_{PDCS10} bei klarem Himmel & Sonne	162
5.3.4.3.	Beleuchtungsstärke E_{PDTOSx} bei bedecktem Himmel in den Tropen	166
5.4.	Tageslichtautonomie TA_x	168
5.4.1.	Tageslichtautonomie bei klarem Himmel & Sonne	169
5.4.2.	Tageslichtautonomie bei bedecktem Himmel	171
5.4.3.	Häufigkeit der Sonnenhöhe $H_{\gamma(\alpha)}$ in Abhängigkeit der Himmelsrichtung	172
5.4.4.	Auswertungsergebnisse	173
5.4.5.	Bewertung	174
5.4.6.	Einfluss der gewählten Nennbeleuchtungsstärke E_N auf die Tageslichtautonomie TA_x	175
5.4.7.	Fazit	178
5.4.8.	Einfluss der Möblierung auf die Tageslichtautonomie TA_x	179
5.4.9.	Korrekturfaktor F_{SIMU}	183
6.	Energetische Bewertung	184
6.1.	Überblick Gesamtenergieverbrauch eines Bürogebäudes	184
6.2.	Augenblickliche Situation in Rio de Janeiro	185
6.3.	Kunstlichteinsparung	186
6.4.	Beeinflussung der Kühllast	194
6.4.1.	Ermittlung der tageslichtbedingten Kühllast	194
6.4.2.	Ermittlung der kunstlichtbedingten Kühllast	199
6.5.	Nutzenergie/Endenergie	200
6.5.1.	Nutzenergieanalyse	201
6.5.2.	Endenergieanalyse	203
7.	Zusammenfassung und Ausblick	205
	Bibliographie	207
	Anhang	
I.	Anhang I	
I.1.	Weitere Grundeinstellungen im Programm Siview/RADIANCE	213
I.2.	Optimierung der Wahl des Parameters „Ambiance Value“ –	

	eine kritische Betrachtung	214
I.3.	Materialien	215
I.4.	Horizontalbeleuchtungsstärke E_H bei klarem Himmel und Sonne	215
II.	Anhang II – Auslegungen: Konzepte und konkrete Auslegungen	
II.1.	Auslegungskonzept für feststehende Thermobrise	217
II.1.1.	Konkrete Auslegung für eine Westfassade	218
II.2.	Auslegungskonzepte für Lichtschwerter	219
II.2.1.	Internes Lichtschwert	219
II.2.2.	Interne Finnen	223
II.2.3.	Geneigtes internes Lichtschwert	224
II.2.3.1.	Auslegung für eine Nordfassade in Rio de Janeiro	227
II.2.4.	Auslegungskonzept für das interne und externes Lichtschwert & Jalousie	227
II.2.5.	Auslegungskonzept für das interne Lichtschwert in Verbindung mit externem Lichtschwert	230
II.2.6.	Internes Lichtschwert mit integrierten Finnen	231
II.2.7.	Auslegung für eine unverschattete Nordfassade in Rio de Janeiro: internes und externes Lichtschwert & Jalousien	232
II.2.8.	Auslegungskonzept: Kombination internes & externes Lichtschwert, externe Finnen und einer Sonnenblende	234
II.2.9.	Auslegung für die Kombination internes & externes Lichtschwert, externe Finnen und einer Sonnenblende	237
II.3.	Auslegungskonzept: Geneigte LCPs in Verbindung mit internem Lichtschwert & Jalousien	239
II.3.1.	Konkrete Auslegung für eine unverschattete Nordfassade in Rio de Janeiro: geneigtes LCP mit internem Lichtschwert & Jalousien	242
III.	Anhang III – Vertikale Beleuchtungsstärke am Bildschirm	
III.1.	Sonnenschutzglas $\tau_{vis} = 10\%$ mit geregelter Jalousie	243
III.2.	Sonnenschutzglas $\tau_{vis} = 22\%$ mit geregelter Jalousie	244
III.3.	Sonnenschutzglas $\tau_{vis} = 47\%$ mit geregelter Jalousie	245
III.4.	Thermobrise feststehend	246
III.5.	Auslegung für eine unverschattete Nordfassade in Rio de Janeiro: internes und externes Lichtschwert & Finnen	247
III.6.	Horizontales Lichtschwert	248
III.7.	5° geneigtes internes Lichtschwert	249

III.8.	Internes und externes Lichtschwert mit Jalousie	250
III.9.	Vertikales LCP im Oberlicht mit innenliegendem Lichtschwert	251
III.10.	LCP mit $\alpha_{LCP} = 15^\circ$ und einem horizontalen internen Lichtschwert	252
III.11.	Standard-Jalousie – außenliegend und geregelt	253
III.12.	Tageslichtjalousie	254
III.13.	Horizontales Lichtschwert & externe Jalousien in einem möblierten Raum	255
IV.	Anhang IV - Jalousien	
VI.1.	Vertikale Beleuchtungsstärke nach DIN 5034	257
IV.2.	Steuerung von Jalousien	258
IV.3.	Transmission τ_J einer Jalousie	260
IV.4.	Transmissionswert τ_J in Abhängigkeit der Sonnenhöhe γ_S und des Reflexionsgrades α_J	263
	Curriculum Vitae	269

Formelzeichen und Abkürzungen

Anmerkung: es werden nur die im Hauptteil verwendeten Formelzeichen und Abkürzungen aufgeführt. Die im Anhang verwendeten werden bei erstem Gebrauch erläutert.

α_F	Azimut der Fassade, in [°]
α_J	Reflexionsgrad einer Lamelle
α_M	Azimut der Messrichtung, in [°]
α_N	Neigung des internen Lichtschwertes, in [°]
α_S	Azimut der Sonne, in [°]
α_{S-B}	Azimutbereich der Sonne, in [°]
Δ	im Index verwendet, bezeichnet es die Azimutdifferenz zwischen dem Azimut der Fassade und dem der Sonne
ΔAz	Betrag der Azimutdifferenz zwischen dem Azimut der Fassade und dem der Sonne, in [°]
$\Delta|\alpha_F - \alpha_S|$	Betrag der Azimutdifferenz zwischen dem Azimut der Fassade und der Sonne, in [°]
γ_F	Neigungswinkel der vertikalen Fläche gegen die Horizontale, in [°]
γ_J	Lamellenneigung, in [°]
γ_S	Sonnenhöhe, in [°]
γ_{S-B}	Sonnenhöhenbereich, in [°]
γ_{TLJ}	Lamellenstellung der Tageslichtjalousie, in [°]
η	Lichtausbeute bei Kunstlicht, in [lm/W]
τ_J	Transmissionswert einer Jalousie, in [%]
τ_{sol}	Transmission der Solarstrahlung, in [%]
τ_{vis}	Transmission im sichtbaren Bereich, in [%]
ρ_U	Reflexionsgrad des Bodens
$a_{G(\alpha;\gamma)}$	Anteil der Sonnenhöhenhäufigkeiten im definierten Himmelsgewölbeausschnitt ($\alpha;\gamma$) für die jeweils berechnete Formel an der Summe der Jahresbüroarbeitszeiten (ohne Subtraktion des

	Wochenendes), in [h/a]
B_{JB}	Jahresbedarf an künstlicher Beleuchtung, wenn keine Tageslichtnutzung erfolgt, in [Wh/m ² a]
B_{KL}	Jahresbedarf an Kunstlicht nach Berücksichtigung der Tageslichtnutzung, in [Wh/m ² a]
CIE	Commission International d'Eclairage
CSS	Clear Sky & Sun – klarer Himmel mit Sonne (nach CIE)
D	Tageslichtquotient
D/W	Verhältnis zwischen der Schnitttiefe im LCP und dem Abstand der Laserschnitte untereinander
$E_{B,F}$	vertikale Beleuchtungsstärke durch die Bodenreflexion, in [lx]
E_{e0}	Bestrahlungsstärke der extraterrestrischen Sonnenstrahlung, in [lx]
E_F	Beleuchtungsstärke auf geneigter Fläche, in [lx]
E_g	die horizontale Beleuchtungsstärke als Summe von E_S und E_H , in [lx]
E_H	die durch das Himmelsgewölbe verursachte horizontale Beleuchtungsstärke, in [lx]
$E_{H,F}$	vertikale Beleuchtungsstärke durch das Himmelsgewölbe, in [lx]
$E_{HCSS(\gamma_s)}$	horizontale Beleuchtungsstärke bei klarem Himmel mit Sonne (CIE Clear Sky & Sun) in Abhängigkeit von der Sonnenhöhe γ_s , in [lx]
$E_{HOCS(\gamma_s)}$	horizontale Beleuchtungsstärke bei einem bedecktem Himmel (CIE Overcast Sky) in Abhängigkeit von der Sonnenhöhe, in [lx]
$E_{HTOS(\gamma_s)}$	horizontale Beleuchtungsstärke bei einem bedecktem Himmel in den Tropen (Tropical Overcast Sky) in Abhängigkeit von der Sonnenhöhe γ_s , in [lx]
E_N	horizontale Nennbeleuchtungsstärke, in [lx]
$E_{PDCSX(\Delta;\gamma)}$	das Beleuchtungsstärkepotential eines Tageslichtkontrollsystems in x Meter von der Fassade, gültig für eine Sonnenhöhe γ_s und einer Azimutdifferenz Δ zwischen Fassade und Sonne und CIE Clear Sky & Sun. Die Werte $E_{PDCSX(\Delta;\gamma)}$ sind standortunabhängig, in [lx] (ausführliche Definition unter Punkt 5.2.8.1. „Messpunkte“)
$E_{PDTOSX(\Delta;\gamma)}$	das Beleuchtungsstärkepotential eines Tageslichtkontrollsystems in x Meter von der Fassade, gültig für eine Sonnenhöhe γ_s und einer Azimutdifferenz Δ zwischen Fassade und Sonne und bedecktem Himmel in den Tropen, in [lx] (ausführliche Definition unter Punkt 5.2.8.1. „Messpunkte“)

E_S	die durch die Sonne erzeugte horizontale Beleuchtungsstärke, in [lx]
$E_{S,F}$	vertikale Beleuchtungsstärke durch die Sonne, in [lx]
E_{VHG1}	Beleuchtungsstärke an der Wand im Hintergrund des Bildschirms, in [lx] (ausführliche Definition unter Punkt 5.2.8.1. "Messpunkte")
$E_{VI1/2}$	vertikale Beleuchtungsstärke parallel zur Fassade in Position 1 oder 2 (ausführliche Definition im Kapitel „Tageslichtkontrollsysteme“, Abschnitt „Messpunkte“), in [lx]
$E_{VIC1/2}$	die vertikale Beleuchtungsstärke am Bildschirm in Position 1 oder 2 (ausführliche Definition im Kapitel „Tageslichtkontrollsysteme“, Abschnitt „Messpunkte“), in [lx]
$F_{2,5*i}$	Fläche, für die die jeweilige Tageslichtautonomie gültig ist, in [m ²]
F_{Mx}	Minderungsfaktor der zu erwartenden Tageslichtautonomie durch Möblierung, wenn die bekannte Tageslichtautonomie auf unmöblierten Simulationen beruht. Der Möblierungsfaktor ist von der Raumtiefe abhängig; ist F_{Mx} nicht bekannt, so wird er auf 1 gesetzt
F_{OL}	die Fläche des Oberlichts, in [m ²]
F_{SF}	die Fläche des Sichtfensters, in [m ²]
F_{SIMUx}	der Korrekturfaktor F_{SIMU} korrigiert bei simulationsprogrammspezifischen Abweichungen das Beleuchtungsstärkepotential $E_{PDCSX(\Delta;\gamma)}$.
$F_{TOS(\gamma)}$	der Korrekturfaktor in der CIE-Formel für tropische bedeckte Himmel
GMT	Greenwich Mean Time
$H_\gamma(\alpha)$	Sonnenhöhenhäufigkeit H_γ in einem definierten Himmelsgewölbeausschnitt im Jahresverlauf.; der berücksichtigte Zeitraum entspricht der Bürozeit 8 ⁰⁰ – 18 ⁰⁰ , in [h/a]
h_B	ist die Jahressumme aller Stunden in der betrachteten Bürozeit (mit Wochenenden!), in [h/a]
$h_{B'}$	ist die Jahressumme aller Stunden in der betrachteten Bürozeit (ohne Wochenenden!), in [h/a]
I_L	installierte Kunstlichtleistung, in [W/m ²]
I_n	Bewölkungsindex: Verhältnisses zwischen der tatsächlich gemessenen horizontalen Globalstrahlung und der theoretischen horizontalen Globalstrahlung bei klarem Himmel und Sonne
I_{NCS}	der Anteil an klarem Himmel im Jahresverlauf
I_{NTOS}	der Anteil an bewölktem Himmel im Jahresverlauf
I_{TOS}	der gewichtete Bewölkungsindex für den jeweiligen Standort

K_H	photometrisches Strahlungsäquivalent für die Himmelsstrahlung, [lm/W]
$K_{H,S(\gamma_S)}$	photometrisches Strahlungsäquivalent für einen klaren Himmel mit Sonne in Abhängigkeit von der Sonnenhöhe γ_S , in [lm/W]
K_{Hbd}	photometrisches Strahlungsäquivalent für den bedeckten Himmel, in [lm/W]
$K_{S(\gamma_S)}$	photometrisches Strahlungsäquivalent für die Sonnenstrahlung in Abhängigkeit von der Sonnenhöhe γ_S , in [lm/W]
$L(\gamma)$	Leuchtdichte von Himmelspunkten, die um den Winkel γ vom Horizont entfernt sind, in [cd/m ²]
LCP	Laser Cut Panel
LSex21°	externes Lichtschwert mit einer Neigung von 21°
LSi0°	internes Lichtschwert mit einer Neigung von 0° (horizontal)
LSi5°	internes Lichtschwert mit einer Neigung von 5°
L_{so}	Bereich der minimalen und maximalen Leuchtdichte, in [cd/m ²]
$L_{TOS(\gamma)}$	Leuchtdichte von Himmelspunkten bei bedecktem Himmel, die um den Winkel γ vom Horizont entfernt sind, in [cd/m ²]
L_z	Zenitleuchtdichte, in [cd/m ²]
$Q'_{OLCS(\Delta;15^\circ* i)}$	die vertikale Beleuchtungsstärke im Oberlichtbereich direkt hinter der Fassade bei klarem Himmel und Sonne in einer durch ΔAz und durch die Sonnenhöhe γ_S definierten Situation, in [lx]
$Q'_{OLTOS(\Delta;15^\circ* i)}$	die vertikale Beleuchtungsstärke im Oberlichtbereich direkt hinter der Fassade bei bedecktem Himmel in den Tropen in einer durch ΔAz und durch die Sonnenhöhe γ_S definierten Situation, in [lx]
$Q'_{SFCSCS(\Delta;15^\circ* i)}$	die vertikale Beleuchtungsstärke im Sichtfensterbereich direkt hinter der Fassade bei klarem Himmel und Sonne in einer durch ΔAz und durch die Sonnenhöhe γ_S definierten Situation, in [lx]
$Q'_{SFTOS(\Delta;15^\circ* i)}$	die vertikale Beleuchtungsstärke im Sichtfensterbereich direkt hinter der Fassade bei bedecktem Himmel in den Tropen in einer durch ΔAz und durch die Sonnenhöhe γ_S definierten Situation, in [lx]
Q_{TL}	die durch das Tageslicht verursachte Wärmelast im Jahresverlauf während der gewählten Bürozeit. hier: von 8 - 18 Uhr, in [Wh/m ² a]]
Q_{TLCS}	die durch das Tageslicht theoretisch bei klarem Himmel und Sonne in den Tropen verursachte Wärmelast im Jahresverlauf während der gewählten Bürozeit. hier: von 8 - 18 Uhr, in [Wh/m ²]
Q_{TLTOS}	die durch das Tageslicht theoretisch bei bedecktem Himmel in den Tropen verursachte Wärmelast im Jahresverlauf während der gewählten Bürozeit. hier: von 8 - 18 Uhr, in [Wh/m ² a]]

R	Umrechnungsfaktor, abhängig von γ_F und Δ Azimut Fassade – Sonne (Tabellenwert)
TAKO	eigens entwickeltes Programm zur Ermittlung der Tageslichtautonomie
TAKO-Cool	eigens entwickeltes Programm zur Ermittlung der Energiebilanz unter Berücksichtigung von elektrischer Energie für das Kunstlicht und die Kühlung (Kühllast durch Kunstlicht und Tageslicht)
TA _x	Tageslichtautonomie in der Entfernung x Meter von der Fassade, in [%]
TA _{xCS}	die Tageslichtautonomie in x Meter von der Fassade während der Bürozeit von 8 - 18 Uhr bei klarem Himmel und Sonne, in [%]
TA _{xTOS}	die Tageslichtautonomie in x Meter von der Fassade während der Bürozeit von 8 - 18 Uhr bei bedecktem Himmel in den Tropen, in [%]
TKS	Tageslichtkontrollsystem
TLJ	Tageslichtjalousie
TOS	Tropical Overcast Sky –bedeckter Himmel in den Tropen (ausführliche Definition siehe unter 3.3.3.)
TOS _(RIO)	bedeckter Himmel in den Tropen - Standort Rio de Janeiro
t _{SE}	der maximale horizontale Abstand zwischen Fassade und Auftreffpunkt des einfallenden Lichtstrahls auf dem Lichtschwert, in [m]
t _{SG}	Eindringtiefe direkter Strahlung in Abhängigkeit von Sonnenhöhe γ_S und Neigung α_N des internen Lichtschwerts, in [m]
W _{γ_S}	Sonnenhöhenhäufigkeit im Jahresverlauf für verschiedene Öffnungswinkel, in [h/a] (ausführliche Definition unter 5.3.1.1.)

1. Einleitung

In dem Tropengürtel zwischen dem Wendekreis des Krebses und dem Wendekreis des Steinbocks befinden sich etwa 1/3 der weltweiten Landmassen, ca. 50 Millionen km².

Die Landmasse wird von einer Küstenlinie mit über 60.000 km Länge eingefasst. Innerhalb dieser Grenzen leben 1,7 Milliarden Menschen, etwa 1/3 der Weltbevölkerung. Über 100 Länder liegen völlig oder teilweise in dieser sich schnell entwickelnden Zone.

Während in Europa seit den Ölkrisen in den siebziger Jahren des 20. Jahrhunderts beachtliche Anstrengungen unternommen wurden den Energieverbrauch im Gebäudesektor zu senken, wird dieses Thema erst seit wenigen Jahren in tropischen und subtropischen Ländern diskutiert.

Der durchschnittliche Energieverbrauch in den Bürogebäuden vieler tropischer Länder ist entsprechend hoch: so liegt in den ASEAN-Staaten (ohne Brunei) der durchschnittliche Verbrauch bei 246 kWh/m² a [1], in Rio de Janeiro bei 340 kWh/m² a [2].

An den Ergebnissen einer Untersuchung in Rio de Janeiro [3] lässt sich dabei der hohe Anteil der künstliche Beleuchtung ablesen: sie ist mit 37% am Gesamtenergieverbrauch beteiligt, ohne dabei ihre thermische Komponente und die damit zusammenhängende Kühllast berücksichtigt zu haben. Bei dem generell sehr hohen Tageslichtangebot in den Tropen erscheint daher eine Untersuchung und Optimierung der Tageslichtnutzung als ein vielversprechender Ansatz, den Energiebedarf in tropischen Bürogebäuden deutlich zu senken.

In einem ersten Schritt gilt es, durch eine Analyse der Architekturentwicklung vor Ort Ansätze zur klimatischen Anpassung der Architektur im Einzelnen und zur Tageslichtnutzung im Speziellen zu untersuchen.

In einem zweiten Schritt müssen einige für die Tageslichtnutzung grundlegende Parameter überprüft werden. Erste Voruntersuchungen haben ergeben, dass es bisher so gut wie keine tropenspezifischen Aussagen zur Tageslichtnutzung gibt. Somit ist als Vorbereitung für die Untersuchung von Tageslichtnutzung in den Tropen eine Überprüfung der horizontalen Be-

leuchtungsstärke bei klarem Himmel, der Leuchtdichte des Himmelskörpers bei bedecktem Zustand und der Blendungsempfindlichkeit der Bewohner in den Tropen zu untersuchen.

Für die Fassadenauslegung von Bürogebäuden, auf die sich die Untersuchung konzentrieren wird, ist eine klare Aussage zu den einzuhaltenden Komfortbedingungen notwendig. Diese gilt es zu definieren, und falls in den einschlägigen Vorschriften nicht vorhanden oder nicht auf die Tropen anwendbar, zu entwickeln.

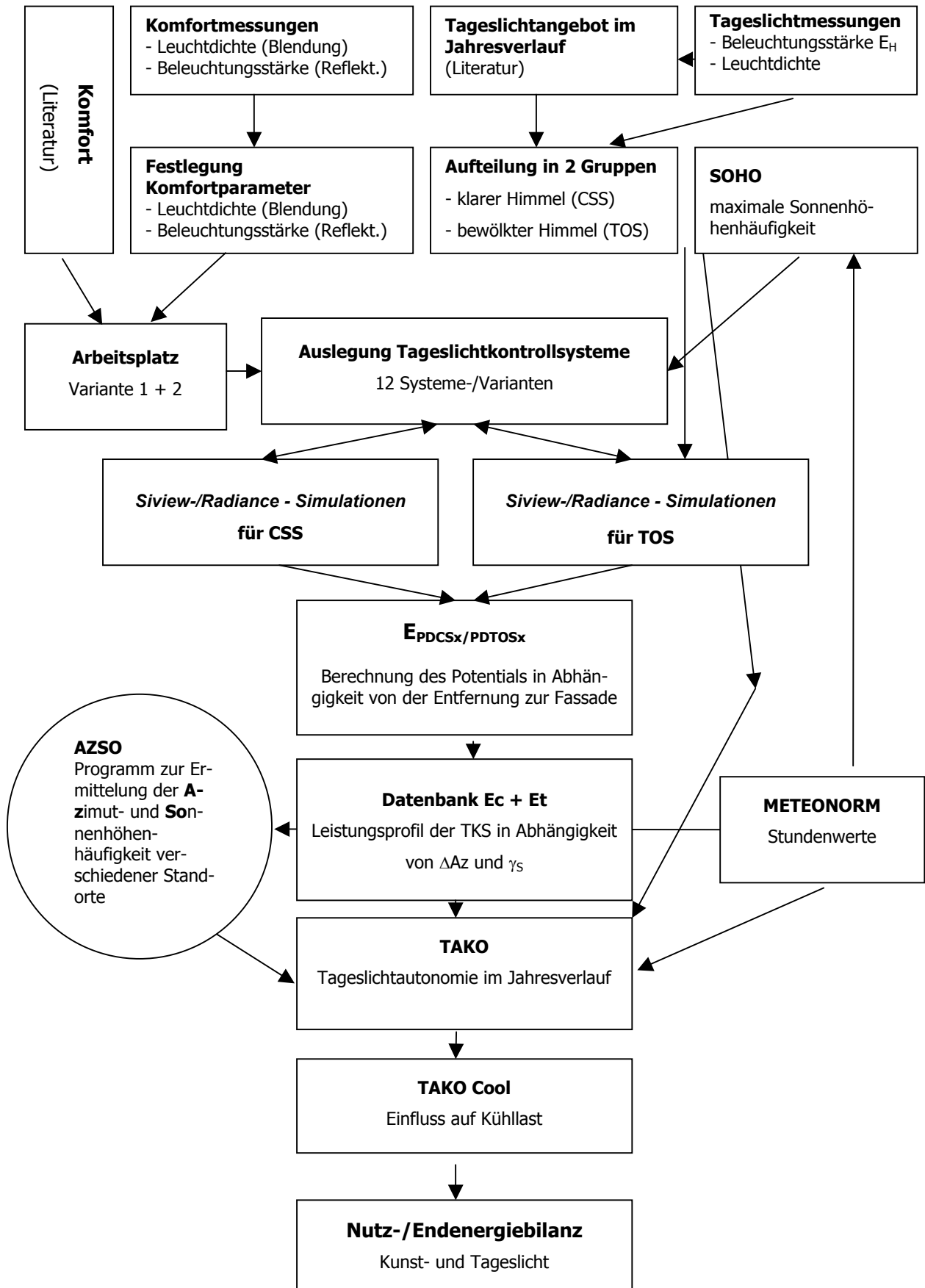
Darauf aufbauend gilt es, ein Auslegungskonzept für Tageslichtlenksysteme in Verbindung mit Verschattungssystemen, also für Tageslichtkontrollsysteme, zu erarbeiten.

Bisher sind dynamische Simulationen von komplexen Tageslichtkontrollsystemen nicht möglich. Um nun eine möglichst genaue Aussage über die mögliche Verbesserung der Tageslichtnutzung in tropischen Bürogebäuden durch entsprechende Maßnahmen an der Fassade zu erhalten, gilt es eine universell einsetzbare Methodik zu entwickeln, die eine Auswertung hochwertiger Simulationsergebnisse auf einer Stundenbasis für einen typischen Jahresverlauf ermöglicht. Dabei sind sowohl die Auswirkung auf den Kunstlichtverbrauch als auch auf die Kühllast zu berücksichtigen.

Als Standort für die Untersuchung wird die brasilianische Millionenstadt Rio de Janeiro gewählt.

Übersicht

Abbildung 1.1.



2. Geschichtliche Entwicklung der Architektur in Rio de Janeiro

Der Mensch hat in der Entwicklung seiner Architektur immer versucht, sich den lokalen Gegebenheiten – der Topographie, dem Klima und den vorhandenen Materialien - anzupassen. Ein besonderer Ausdruck dieser Anpassung kann in der autochthonen Architektur abgelesen werden: seien es die Eskimos im Eis mit dem Iglu, die Araber im trocken-heißen Klima mit der Kombination aus Windfängern und Springbrunnen zur Luftbefeuchtung der Atriumgebäude oder die Malaien im feucht-heißen Klima mit den Pfahlbauten im Kampong (Photo 2.1.). Je nach Entwicklungsstand fand eine mehr oder weniger ausgeprägte Anpassung an das Klima statt. Durch die Kolonisation vieler Regionen kann häufig ein Bruch festgestellt werden, der teils zu neuen Lösungen führte, wie zum Beispiel bei den Queenslander (Photo 2.2.) im tropischen Teil Australiens, teils aber zu einer einfachen Übernahme der im Mutterland üblichen Architektur. Im folgenden wird nun die Entwicklung der Architektur in Rio de Janeiro, einschließlich der präkolumbianischen Zeit, skizzenhaft dargestellt und mit einigen typischen Beispielen illustriert. Besonderes Augenmerk wird dabei der Anpassung an das lokale Klima und der Frage nach einer eigenständigen Architekturentwicklung gewidmet.



Photo 2.1. Traditionelles Wohnhaus in
Malaysia



Photo 2.2. Queenslander
/Townsville

Die geschichtliche Entwicklung der Architektur in Rio de Janeiro kann in folgende Abschnitte eingeteilt werden:

- autochthone Architektur der Indios
- Kolonialarchitektur
- Klassizismus
- Historismus und Eklektizismus
- Jugendstil
- Art Deco

- klassische Moderne
- Internationaler Stil
- Postmoderne
- Gegenwart



Abbildung 2.1. Dorf der Tupinikin während eines Angriffes, Zeichnung von de Brey [69]

2.1. Die autochthone Architektur der Indios

Bei Ankunft der ersten Weißen im Jahre 1502 war der spätere Bundesstaat Rio de Janeiro von einer Vielzahl von Indio-völkern besiedelt. Man spricht davon, dass mindestens 20 verschiedene Sprachen existierten [4].

Die beiden wichtigsten Sprachfamilien, Tupí und Puri, vereinen die Stämme, die den größten Einfluss auf die ethnische Bildung der Region hatten.

Die Tupí, welche die Küste besiedelten, hatten den ersten Kontakt mit den portugiesischen Kolonisatoren und den französischen Expeditionen. Dadurch gilt ihre Kultur als relativ gut dokumentiert.

Sie lebten in Dörfern mit vier bis acht Hütten, die einen rechteckigen Grundriss aufwiesen und keine internen Unterteilungen, wie Zwischenwände, hatten. Sie wurden im Kreis aufgestellt und durch einen Zaun oder Palisaden geschützt (siehe Abbildungen 2.1. und 2.2.). Die Dörfer waren im allgemeinen auf fruchtbaren Böden gelegen, oft am Ufer eines Flusses und in der Nähe des Waldes, um sowohl den Ackerbau, als auch Jagd und Fischerei zu ermöglichen.

Die Indios der Sprachfamilie der Puri sind weniger gut erforscht. Der Stamm der Goitacá, der ebenfalls an der Küste siedelte, und aufgrund seines Widerstandes gegen die Kolonisierung restlos ausgerottet wurde, wohnte in kleinen Strohhütten.

Die Gemeinschaftshütten (bras. Malocas) der Coroados, welche bis zu 40 Personen beherbergten, wurden von Spix und Martius, die Brasilien von 1817 bis 1820 bereisten, folgendermaßen beschrieben:

„Die Wände, bestehend aus leichten Latten, die mit Lianen zusammengebunden und manchmal mit Lehm verputzt waren, hatten auf zwei Seiten Öffnungen in Männergröße, die durch bewegliche Türen aus Palmblättern geschützt waren“ [4]. Das von Spix und Martius besuchte Dorf bestand aus Hütten, die auf vier Stützen aufgebaut waren. Die Coroados schliefen in Baumwollhängematten, während andere Stämme Hängematten aus Pflanzenfasern des Imbaúba nutzten.

Kleidung wurde von den Indios keine benutzt, so dass man nach heutigen Maßstäben von einem clo-Faktor 0 sprechen kann.

Alle im Bundesstaat Rio de Janeiro lebenden Indio-Stämme starben aus, so dass es keine aktuellen, noch bewohnten Beispiele der autochthonen Architektur der Indios gibt. Aufgrund der vorhandenen Beschreibungen und ähnlicher, in anderen Regionen Brasiliens heute noch üblicher Behausungen, lässt sich feststellen, dass die kulturelle Entwicklung der Ureinwohner bei dem Eintreffen der Europäer noch nicht weit fortgeschritten war. Die Gebäude waren schnell zu errichten und entsprachen somit der Lebensweise dieser Jäger und Sammler, die nur in geringem Umfang Subsistenzlandwirtschaft in Form von Wanderfeldbau betrieben. Die „Ocas“ (bras. für Indianerhütten) nahmen Grundfunktionen wie Schutz vor Witterung und wilden Tieren wahr. Von einer gezielten Verbesserung des Innenraumkomforts durch architektonische Maßnahmen, wie zum Beispiel in Südost-Asien geschehen, sind keine Beispiele bekannt.

2.2. Die Kolonialarchitektur (1565 – 1808)

Die erste Expedition, welche die Küste des heutigen Bundesstaates Rio de Janeiro erkundete, entdeckte 1502 die Guanabara-Bucht.

Die Bezeichnung Kolonialarchitektur bezieht sich auf den Zeitraum zwischen der Stadtgründung im Jahre 1565 und dem Eintreffen des vor Napoleon geflüchteten portugiesischen Hofes in Rio de Janeiro im Jahre 1808 [5]. Innerhalb dieses Zeitraums

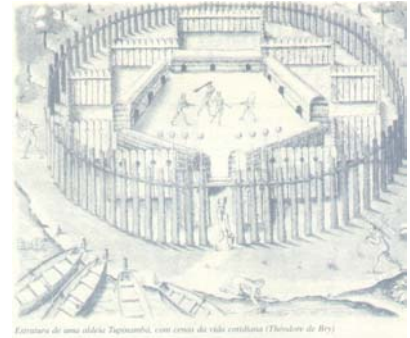


Abbildung 2.2. Struktur eines Dorfes der Tupinambá, Zeichnung von Théodore de Brey [69]



Photo 2.3. N.S. da Glória do Outeiro



Photo 2.4. N.S. da Glória do Outeiro



Photo 2.5. São Bento



Photo 2.6. Ordem Terceira do Carmo

gab es keine nennenswerte Änderung in der Art zu planen und zu bauen. Die Baustile, die aus der Metropole Lissabon in die Kolonie eingeführt wurden, unterlagen Anpassungen, die auf die lokale Verfügbarkeit von Materialien, dem niedrigen Ausbildungsstand der Arbeitskräfte und nicht zuletzt den begrenzten finanziellen Mitteln der Kolonie zurückzuführen sind.

Die Grundlage des verwendeten Stiles hatte ihre Wurzeln in Portugal, das seine nationale Identität in der Zeit der Romanik entwickelte: laut Alvim [6] führte dieses zu der Vorliebe der Portugiesen für die Schwere, die Strenge, die Einfachheit und das Statische.

Es finden sich in Rio de Janeiro Beispiele des portugiesischen Manierismus, so zum Beispiel die Fassade der Kirche „Nossa Senhora da Glória do Outeiro“, erbaut von 1714 – 1739 (Photos 2.3. und 2.4.).

Als markantes Beispiel für den Barock kann sicherlich das vergoldete Innere der Kirche São Bento (1633 – 1690/1669 – 1800 (Innenraum)) gelten (Photo 2.5.).

Das Rokoko findet sich in Rio de Janeiro hauptsächlich in den Innenräumen von Kirchen wieder, wie z.B. in der Kirche „Ordem Terceira do Carmo“ (ab 1761/Schnitzereien 1785) (Photo 2.6.).

Die profane Architektur fand ihren Ausdruck in ein- und zweigeschossigen Stadthäusern (casas térreas und sobrados), Palästen und Landsitzen.

Die Stadthäuser hatten einen sehr tiefen und schmalen Grundriss, verursacht durch die Form der ausgewiesenen Baugrundstücke. Durch diese Geometrie wurde der Erschließungsaufwand gering gehalten. In der Regel befand sich ein Raum an der Straßenfront und ein Raum an der Gebäuderückseite, verbunden durch einen Korridor. Von diesem Korridor gingen kleine Räume, Alkoven genannt, ab, die weder belichtet noch belüftet waren. Hatte das Gebäude zwei Geschosse, so befanden sich im Erdgeschoss Läden, Lagerräume, Küche und der

Schlafräum der Sklaven. Auch hier war der innenliegende Bereich weder natürlich belichtet noch belüftet. Die erdgeschossigen Fußböden bestanden aus gestampftem Lehm, die Wände aus Stein und/oder Lehm, Zwischenwände aus lehmverputztem Holzflechtwerk, die Decken aus Holzbalken, die mit Brettern belegt waren¹.

Das Haus des Gouverneurs, heute als „Paço Imperial“ bezeichnet, wurde 1743 als Regierungssitz der „Capitania“² eingeweiht und kann als herausragendes Beispiel der Kolonialarchitektur Brasiliens angesehen werden (Photos 2.7. und 2.8.). Mit der Ernennung Rio de Janeiro zur Hauptstadt Brasiliens im Jahre 1763 und mit der Flucht des portugiesischen Königs 1808 nach Rio de Janeiro symbolisierte dieses Gebäude das Machtzentrum Brasiliens. Zahlreiche Veränderungen und Erweiterungen fanden im Lauf der Jahre statt. Seine natürliche Belichtung und Querlüftung ist durch zwei innenliegende Höfe gewährleistet. Dieses Gebäude bietet auch im Hochsommer ein angenehmes Innenraumklima.



Photo 2.7. Paço Imperial



Photo 2.8. Paço Imperial

Die Landhäuser waren in der Regel durch eine überdachte Veranda an der Frontseite, einem innenliegenden Hof und großer Einfachheit im Detail charakterisiert.

Ein wichtiges Element zur Verbesserung des Innenraumkomforts wurden in vielen profanen Gebäuden in diesem Zeitraum integriert: das Muxarabi.

Muxarabis

Muxarabis werden in Brasilien Balkone genannt, die oberhalb der Brüstung allseitig mit hölzernem Gitterwerk geschlossen sind. Das Gitterwerk besteht aus flachen, rechteckigen Holzrippen, die rechtwinklig übereinander gelegt und befestigt werden. Diagonal eingebaut, ermöglichen sie eine ungehinderte Durchlüftung und einen freien Durchblick von Innen nach Au-

¹ Privatauskunft von Prof. M. Almada, FAU-UFRJ

² die Kolonie Brasilien war in die Verwaltungseinheiten „Capitania“ eingeteilt



Photo 2.9. Muxarabi

Ben. Von Außen nach Innen ist kein Einblick möglich. Eine weitere wichtige Funktion ist die des Blendschutzes, die sowohl aufgrund der in den Tropen hohen Leuchtdichte als auch der Reflexion der gegenüberliegenden meist weißen Hauswänden notwendig war. Die Muxarabi ist ein eindeutig städtisches Element, im ländlichen Bereich übernahmen Veranden die geschilderten Funktionen.

Durch die Araber auf der iberischen Halbinsel eingeführt, finden sich sowohl dort wie auch in den durch Spanien und Portugal kolonisierten Ländern zahlreiche Beispiele. In trockenheißen Zonen wurden in diese Öffnungen zusätzlich Fäden gehängt, die durch Tontöpfe feucht gehalten wurden und so für eine zusätzliche Kühlung sorgten.

Muxarabis waren laut Albernaz et al [7] bis zum Anfang des 19. Jahrhunderts in den Bundesstaaten São Paulo, Rio de Janeiro und Minas Gerais weit verbreitet. Pinto [8] beschreibt weitere Beispiele für Muxarabis in Olinda und Recife (Bundesstaat Pernambuco).

Sie wurden in Rio de Janeiro Anfang des 19. Jahrhunderts vom Generalintendanten der Polizei Paulo Fernandes Vianna verboten, als neue Materialien wie Eisengitter und Glas auf den Markt kamen und die Muxarabis plötzlich als ästhetisch minderwertig angesehen wurden.

Es existiert allerdings auch das Gerücht³, dass der portugiesische König, als er mitsamt seines Hofes vor Napoleon von Lissabon nach Rio de Janeiro fliehen musste, sich über das „maurische“ Aussehen der Häuser Rios beschwerte und kurzweg die Muxarabis als Architekturelement in Brasilien durch Vianna verbieten ließ.

Pinto [8] beschreibt den Effekt dieses Verbots und der Entfernung der Muxarabis: „Das Innenleben des Hauses war plötzlich nach Außen gekehrt. Er zitiert dabei Lima [9]: „nackte, spie-

³ Private Aussage von Prof. Mauro Neves Nogueira/FAU-UFRJ, sowie weiterer Kollegen aus der Architektur

lende Kinder, die Frauen in halboffenen Gewändern und Schuhen ohne Socken,.."

In Rio de Janeiro findet sich noch ein Exemplar, in dem Beco do Boticário, Laranjeiras. (Photo 2.9.) Es handelt sich um ein Gebäude im Stile des Neokolonialismus. Es gibt jedoch eine gute Vorstellung über ein architektonisches Element, das bis auf ein vollständig erhaltenes originales Beispiel in Diamantina/Minas Gerais [10], völlig aus Brasilien verschwunden ist.

Lúcio Costa fasst in seinem Beitrag „documentação necessária“ von 1937 (in: [11]) die Einstellung der modernen brasilianischen Architekten gegenüber der Kolonialarchitektur stellvertretend zusammen: „Unser Haus präsentiert sich fast immer schmucklos und arm, verglichen mit der Üppigkeit der italienischen „palazzi“ und „ville“, der Schlösser in Frankreich und der englischen „mansions“ aus der gleichen Epoche, der reichen und eitlen Erscheinung vieler hispano-amerikanischer Stammsitze und Paläste, oder auch der palastartigen und geschneigten noblen portugiesischen Residenzen. Insgesamt bestätigt sich, dass es keinerlei Wert als architektonisches Werk besitzt,... . Daher bestände Interesse sie [die koloniale Architektur - der Autor] besser kennen zu lernen, nicht um die Wiederholung ähnlichen Leichtsinns und ähnlicher Verirrungen zu vermeiden – das würde ihr zuviel Bedeutung zukommen lassen -

Zusammenfassend lässt sich in diesem Zeitraum weder eine eigene lokale Stilentwicklung noch eine über Portugal bekannte hinausgehende Klimaanpassung feststellen.



Photo 2.10. Hospício de Alienados de Pedro II



Photo 2.11. Real Gabinete Português de Leitura



Photo 2.12. Jockey Club

2.3. Klassizismus (1808 – 1870)

Durch die Flucht des portugiesischen Hofes nach Rio de Janeiro im Jahre 1808 und der Öffnung der Häfen nahm der Einfluss aus Europa zu. In der Stadt, die bis zu diesem Zeitpunkt rund 50.000 Einwohner zählte, musste nun innerhalb kürzester Zeit Wohnraum für 15.000 neue Bewohner geschaffen werden.

Die klassizistische Architektur, die unter den Neubürgern als modern und zivilisiert galt, fand somit raschen und umfangreichen Einzug in Rio de Janeiro, zumal mit diesem Stil vertraute portugiesische Architekten den Hof begleitet hatten.

Eine französische Mission gründete 1816 auf Wunsch des brasilianischen Kaisers die Akademie der schönen Künste und der Architekt Grandjean de Montigny bildete ab 1826 die ersten brasilianischen Architekten aus.

Ab 1822 von Portugal unabhängig - Brasilien wurde unter dem Sohn des portugiesischen Königs als Kaiserreich proklamiert - wurde in der Architektur eine „internationale“ Sprache, angelehnt an die Akademie der schönen Künste in Paris, „gesprochen“. In dieser Zeit entstanden zahlreiche klassizistische Gebäude, wie zum Beispiel das „Hospício de Alienados de Pedro II“ (1842 – 1852) (siehe Photo 2.10.). Dieses Krankenhaus wurde bereits von einem in Rio de Janeiro ausgebildeten Architekten, Domingos J. Monteiro, geplant.

Obwohl es einige Tendenzen gab, auf brasilianisch-portugiesische Techniken und Materialien zurückzugreifen, fand auch in dieser Phase der brasilianischen Architekturgegeschichte in Rio de Janeiro weder eine eigenständige künstlerische Entwicklung noch eine gezielte Anpassung an das Klima statt.

2.4. Historismus und Eklektizismus (1870 – 1940)

In die Zeit des Überganges von Klassizismus zum Historismus und Eklektizismus fällt die Abschaffung der Sklaverei (1888) und die Ausrufung der Republik (1889). Die dominierende Stilrichtung innerhalb des Eklektizismus war der klassizistische

Eklektizismus, das heißt man führte den Klassizismus in einer modifizierten Form fort. Ornamente wurden hinzugefügt, mit Schiefer oder Metall verkleidete Kuppeln aufgesetzt und Ecken abgerundet. Diese Stilvariante fand sich besonders bei Palästen und offiziellen Gebäuden wieder.

Ferner finden sich einige Beispiele im neogotischen Stil, und seiner portugiesischen Variante, des manuelinischen Stiles. Beispiel hierfür ist das „Real Gabinete Português de Leitura“ (Photo 2.13.).

Durch den Einfluss der französischen Mission, der sich in allen Kulturbereichen stark bemerkbar machte, kam es zu zahlreichen Gebäuden im Stile Ludwigs XVI, wie zum Beispiel der Jockey Club (Photo 2.12.). Ein weiteres wichtiges Beispiel des französischen Einflusses ist die Nationalbibliothek (Photo 2.13.) und das städtische Theater (Photo 2.14.), das klare Referenzen zu der Pariser Oper von Charles Garnier aufweist [12].

Zahlreiche weitere Varianten des Historismus und Eklektizismus sind in Rio de Janeiro zu finden, oftmals durch Immigranten der jeweiligen Länder projiziert.

Neokolonialismus

Der Neokolonialismus stellt eine Besonderheit in der brasilianischen Architekturgeschichte dar: er wurde durch den brasilianischen Nationalismus der 20er Jahre begründet, der die Einflüsse aus dem Ausland ablehnte und die Kolonialarchitektur als die originäre brasilianische Architektur empfand. Ein heute noch existierendes Beispiel dieses Stiles ist das Ensemble „Beco do Boticário“. Es handelt sich dabei um Wohnhäuser, bei denen Materialien aus Abbruchhäusern wiederverwendet wurden (Photo 2.15.). Unter anderem findet sich an einem der Gebäude das einzige noch erhaltene Muxarabi Rio de Janeiros wieder (Photo 2.9.). Architekten dieses Ensembles waren unter anderem Lúcio Costa und Warchavchik, die später als Modernisten berühmt werden sollten.



Photo 2.13 Nationalbibliothek



Photo 2.14. Städtisches Theater



Photo 2.15. Beco do Boticário



Photo 2.16. Universitätshospital
„Gaffrée e Guinle“



Photo 2.17. Universitätshospital
„Gaffrée e Guinle“

Dieser Stil erreichte seinen Höhepunkt 1922 mit der Feier zum 100. Jahrestag der Unabhängigkeit. Ein typisches Beispiel aus dieser Zeit stellt das Universitätskrankenhaus „Gaffrée e Guinle“ von 1923 dar (Photo 2.16. und 2.17.).

Beeinflusst durch die „offizielle“ Architektur, getragen von gut ausgebildeten Handwerkern und einer oft industriellen Fertigung der dekorativen Elemente, entwickelte sich eine Architektur des Volkes, ein wahrhaftiger Eklektizismus, bei dem es nicht um Stiltheorien ging, sondern um die Frage, wer das „schönste“ und „individuellste“ Haus erbaut hatte. Zahlreiche Beispiele aus dieser Zeit sind heute noch erhalten.

A sanca de ventilação – das Ventilations-Gesims

Mit der Ernennung des Ingenieurs Pereira Passos zum Bürgermeister von Rio de Janeiro im Jahre 1903 fand in der chronisch von Gelbfieber, Cholera und Beulenpest geplagten Stadt eine neue Gesetzgebung Einzug. Diese sollte unter anderem die Hygiene der Häuser und dabei insbesondere die natürliche Belüftung verbessern: zu 5 m hohen Zimmerdecken [11], eine Vergrößerung der Fenster und Türen und insbesondere die Einführung der „sanca de ventilação“ – des Ventilationsgesims. Um die Ventilation im Gebäude zu erhöhen, wurde das Gesims zwischen Decke und Innenwänden perforiert[12].

A bandeira de ventilação – das Ventilations-Oberlicht

Ein vergittertes Oberlicht an der Außenfassade in Deckenhöhe sollte die Warmluft im Deckenbereich abziehen lassen und die Luftbewegung im Innenraum erhöhen. Dieses Lüftungsoberlicht, das überwiegend im Erdgeschoss eingesetzt wurde, ist ein sehr ortstypisches Element Rio de Janeiros (Photo 2.18.). Möglicherweise kam die Anregung aus der früheren Hauptstadt Salvador da Bahia, wo man ähnliche Elemente bereits in der barocken Altstadt Pelourinho finden kann.



Photo 2.18. Ventilationsoberlicht

Die Architektur der Ingenieure

Dieser Architekturstil erlangte in Rio de Janeiro nie die Bedeutung, die er in Europa genoss. Die wenigen realisierten Beispiele bestanden aus in Europa importierten und in Rio de Janeiro zusammengesetzten Elementen, wie im Falle des 1950 abgerissenen städtischen Marktes, von dem nur noch ein Eckturm existiert.

2.5. Jugendstil Art Deco (um 1900)

Im Jugendstil wurden relativ wenige, aber durchaus interessante Gebäude errichtet. Das Gebäude „Casa Franklin“ aus dem Jahr 1911 ist ein prominenter Stellvertreter dieses Stils in Rio de Janeiro (siehe Photo 2.19.). Eine besondere weitergehende Anpassung an das Klima kann nicht festgestellt werden.

2.6. Art Deco (1925 bis 1950)

Rio de Janeiro weist dagegen eine Vielzahl von Gebäuden im Stile des Art Deco auf. Wenn man nun diesen Stil in drei Tendenzen aufteilt, einer ersten, nüchternen und geometrischen, nahe dem modernen Rationalismus befindlichen, einer zweiten, stärker dekorativ geprägten und durch den Jugendstil beeinflussten und einer dritten, stromlinienförmigen, dynamischen, vom Expressionismus inspirierten, so findet sich die erste und dritte Tendenz vorwiegend in Wohn- und Apartmenthäusern sowie in Kinos wieder. Die zweite Tendenz findet sich in einigen Bürohäusern und Kirchen wieder. Diese sehr dekorative Variante entwickelte in Brasilien mit dem Marajó – Stil eine eigene Version. Sie findet ihren Ausdruck in erster Linie in dekorativen Elementen, die mit ihren geometrischen und labyrinthähnlichen Formen an der nativen Keramikunst der Indios der Amazonas – Insel Marajó angelehnt sind, an Reliefs und Statuen, welche die Indios, sowie die Fauna und Flora des Amazonas-Regenwaldes darstellen. Ebenso wurden Gebäude mit indianischen Namen getauft [13] (Photos 2.20. und 2.21.).



Photo 2.19. Casa Franklin



Photo 2.20. Marajó-Stil



Photo 2.21. Edifício Tahy



Photo 2.22. Edifício "A Noite"



Photo 2.23. Palácio de Comércio



Photo 2.24. Palácio de Comércio

Die meisten Werke des Art Deco entstanden in Rio de Janeiro in den Jahren von 1930 – 1940.

Hervorzuheben ist dabei das erste Hochhaus Rio de Janeiros mit 22 Stockwerken, das 1929 geplante und wenig später ausgeführte „Edifício A Noite“ (Gebäude „die Nacht“). Das Gebäude wurde in der damals für Rio de Janeiro neuen Technologie des Stahlbetons ausgeführt und stellte zu diesem Zeitpunkt das höchste Gebäude in Lateinamerika dar [14] (Photo 2.22.).

Als das ausdrucksvollste Bauwerk dieser Größenordnung im Stil des Art Deco gilt der 1937 errichtete Palast des Handels (Palácio de Comércio, Photo 2.23.). Dieses von den Architekten Sajous und Rendu geplante Gebäude beherbergt in seinem Foyer ein Relief von A. Feyhoffer mit der Darstellung von Szenen der Produktion und des Handels, mit einem besonderem Schwerpunkt auf tropische Motive (Fauna und Flora, siehe Photo 2.24.). Interessant ist an diesem Gebäude die Lösung des Sonnenschutzes: gegen tiefstehende Sonne durch die gegenüberliegende Bebauung geschützt, wird die transparente Fläche zwischen den Pilastern an der Nordfassade durch eine etwa 10 cm tiefes, schmiedeeisernes Gitterwerk gegen die direkte Einstrahlung der Sonne weitgehend geschützt (Photo 2.25.): es erinnert damit stark an den 1984 fertiggestellten Dayabumi-Komplex in Kuala Lumpur/Malaysia. Der Sonnenschutz dieses 35-Stockwerke hohen Wolkenkratzers besteht aus einem dreidimensionalen Gitterwerk, das an die orientalmoslemische Ornamentik angelehnt ist [15].

Das erste Gebäude mit zentraler Klimaanlage war das 1935 von Roberto Prentice geplante „Edifício Standard“, ein klassisches Beispiel der nüchternen, geometrischen Variante des Art Deco (Photos 2.26. und 2.27.).

Als Sonnenschutz werden externe Rollläden der Variante „Copacabana“ verwendet. Diese Variante, anfangs aus Holz, später auch aus Kunststoff und Aluminium, lässt sich durch eine

bewegliche seitliche Führung ausstellen, so dass die Querlüftung verbessert wird (Photo 2.28.).

Die Namensgebung ist vermutlich auf den erstmalig massenhaften Einsatz dieser Variante in dem zu dieser Zeit schnellwachsenden Stadtteil Copacabana zurückzuführen.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass der Art Deco - Stil den Übergang Rio de Janeiros in die Moderne einläutete, sowohl durch seine Formgebung als auch durch seine Höhenentwicklung in einer bis zu diesem Zeitpunkt weitestgehend zweigeschossigen Stadt. Eine Anpassung des Baustils an die Kultur des Landes fand in der Entwicklung der Marajó - Stilvariante begrenzt statt. Eine Auseinandersetzung mit dem lokalen Klima erfolgte nur sehr bedingt.



Photo 2.25. Palácio de Comércio



Photo 2.26. Edifício Standard



Photo 2.27. Edifício Standard



Photo 2.28. Sonnenschutz
"Copacabana"

2.7. Die klassische Moderne (1928 bis 1960)

Die klassische Moderne begann in Brasilien 1928 mit der „Casa Paulistana“ des Architekten Gregori Warchavchik und erreichte ihren Höhepunkt 1960 mit der Einweihung der neuen Hauptstadt Brasilia [16]. Unterstützt durch staatliche Aufträge, motiviert durch den politischen Wunsch einer Überführung des Agrarstaates Brasilien in eine Industriemacht, einer sehr guten Wirtschaftslage und dem Erfolg der Ausstellung „Brazil builds“ in dem Museum für Moderne Kunst in New York (1943) konnte sich dieser Stil nach anfänglich großen Widerständen gegen seine Konkurrenz, den Neo-Kolonialismus und dem Art Deco, durchsetzen. Einen wesentlichen Schub erhielt die Moderne in Brasilien auch durch die Vorgabe für die Internationale Messe in New York (1939 – 1940), die diesen neuen Stil für ausländische Repräsentationen vorschrieb. Bis zu diesem Zeitpunkt galt der Neokolonialismus als der staatsvertretende Baustil, der im Ausland obligatorisch angewendet werden musste. Der von Lúcio Costa und Oscar Niemeyer geplante brasilianische Pavillon nahm einige der wesentlichen Elemente der brasilianischen Moderne vorweg: die Freiheit der Rampe, die Flexibilität der Volumina, den feststehenden Sonnenschutz, die Verwendung der Kurve als Element des Ausdrucks und der Unterschiedslosigkeit/Indifferenz des internen und externen Raumes [16].



Photo 2.29. ABI



Photo 2.30. ABI – fixe Brise Soleil

Die klassische Moderne in Rio de Janeiro

Der Stadt Rio de Janeiro kam eine grundlegende Bedeutung bei der Einführung und Durchsetzung der klassischen Moderne und ihrer Anpassung an das tropische Klima zu. Als Hauptstadt Brasiliens (bis 1961) bestimmte sie wesentlich die kulturellen Strömungen des Landes. So kann es nicht verwundern, dass ein Großteil der brasilianischen Modernisten ihren Sitz in dieser Stadt hatten. Im folgenden wird eine kleine Auswahl von Bürogebäuden aus dieser Phase der brasilianischen Architektur vorgestellt.

Das erste Bürogebäude in Rio de Janeiro im Stil der klassischen Moderne wurde von den Brüdern Roberto geplant. Der Sitz des brasilianischen Presseverbandes (Associação Brasileira de Imprensa ABI) wurde von 1936 bis 1938 errichtet (Photo 2.29.). Das zehnstöckige Gebäude wird an den zur Straße liegenden, nach Nord und Ost orientierten Fassaden von feststehenden vertikalen Brise Soleil gegen die Sonnenstrahlung geschützt (Photo 2.30.). Im Inneren bildet ein Korridor zwischen der Fassade und einer die Büroräume abtrennende Glaswand einen thermischen Puffer. Durch horizontale Glaslamellen im Oberlichtbereich der Glaswände werden die Büroräume be- und entlüftet.

Die ersten beweglichen vertikalen Brise Soleil wurden von Oscar Niemeyer 1937 in seinen ersten Projekt, der „Obra do Berço“, einem Tageskinderhort, realisiert.

Das wohl international bekannteste Gebäude aus dieser Zeit, das Ministerium für Erziehung und Gesundheit (Ministério de Educação e Saúde MES), wurde von einer Gruppe junger „Modernen“ unter der Leitung Lúcio Costas ab 1936 geplant und bis 1943 fertiggestellt. Zu der Gruppe zählten Affonso Reidy, Carlos Leão, Jorge Moreira, Ernani Vasconcelos und Oscar Niemeyer. Nachdem Costa mit dem anfänglichen Entwurf nicht zufrieden war, wurde Le Corbusier als Berater eingeladen und verbrachte vier Wochen in Rio de Janeiro. Das Resultat ist eine klare Nord – Süd – Orientierung des Hauptgebäudes, mit einer vollverglasteten Südfassade (Photo 2.33.) und einer durch feststehende vertikale und bewegliche horizontale Brise Soleil gegen die Sonnenstrahlung geschützten Nordfassade (Photo 2.31.). Die brasilianische Architektengruppe ersetzte im Laufe des Projektes die fixe, aus Beton zu fertigende horizontale Brise Soleil durch eine bewegliche, aus Asbestzement gefertigte [17]. Der Kippmechanismus der horizontalen Brise Soleil erlaubt drei verschiedene Stellungen, eine 30° positiv geneigte, eine horizontale und eine 30° negativ geneigte Stellung (Photo 2.32.).



Photo 2.31. MES - Nordfassade



Photo 2.32. MES – Brise Soleil



Photo 2.33. MES - Südfassade



Photo 2.34. Edifício Seguradora

Die Wirksamkeit der Brise Soleil des MEC

In einer mit Hilfe von Radiance – Simulationen durchgeführten Untersuchung wurde die Wirksamkeit dieses beweglichen Sonnenschutzes untersucht. Es wurden dabei die drei möglichen Stellungen an zwei Tagen (21. Juni und 21. Dezember), zu drei unterschiedlichen Zeitpunkten (9.00, 12.00 und 16.00 – ohne Berücksichtigung der Sommerzeit) und bei zwei Himmelszuständen (klarer Himmel und Sonne, CIE bedeckter Himmel) simuliert. Ziel war es herauszufinden, wie eine Änderung der üblichen Stellung von 30° positiv (siehe Photo 2.31.) sich auf die Qualität und Quantität der Tageslichtbeleuchtung auswirken würde. Es wurde dabei eine freie Grundrissfläche angenommen, die etwa 2,0 m hohen Zwischenwände (Stockwerkshöhe ca. 3,90 m) wurden bei der Simulation vernachlässigt.

Das Ergebnis erbrachte eine mögliche Vermeidung von Kunstlicht, das in der Regel durchgehend angeschaltet ist, für das gesamte Stockwerk in 83% der untersuchten Fälle. Dabei wird von einer völligen Vermeidung von Direktstrahlung ausgegangen. Eine Tageslichtumlenkung durch die horizontalen Brise Soleil findet aufgrund des niedrigen Reflektionsgrades jedoch nicht statt [18].



Photo 2.35. Edifício Bristol



Photo 2.36. Cobogó

Ein weiteres wichtiges Element der natürlichen Gebäudeklimatisierung stellt die Kombination der halbhohen Trennwände mit den durch Kurbeln in der Vertikalen zu öffnenden Schiebefenstern dar, was eine ausgezeichnete Querlüftung ermöglicht.

Die Brüder Roberto entwickelten für das Gebäude Seguradora, das zwischen 1949 und 1951 geplant und ausgeführt wurde, einen ausgeklügelten teils fixen, teils beweglichen Sonnenschutz (Photo 2.34.). Dieser Sonnenschutz, der ca. 1 m vor der Glasfassade befestigt war, konnte von den Nutzern gegen direkten Sonneneinfall und bei Blendungsproblemen der jeweiligen Situation angepasst werden [19].

Aufgrund des hohen Wartungsaufwandes wurde dieses Sonnenschutzsystem jedoch in der Zwischenzeit demontiert.

Ein weiteres für Rio de Janeiro typisches Element stellt der „cobogós“ dar, ein keramischer Filter, der hauptsächlich im Wohnungsbau eingesetzt wurde und als moderne Form der Muxarbi-Elemente bezeichnet werden kann. Die Beispiele zeigen den Einsatz dieser Elemente durch Lúcio Costa im Edifício Bristol (Photo 3.35.) und Affonso Reidy am Museum für Moderne Kunst (Photo 3.36.).

2.8. 1960 bis zur Gegenwart

Mit der Verlegung der Hauptstadt von Rio de Janeiro nach Brasília im Jahre 1960 wurde eine neue Phase in der Architekturentwicklung eingeleitet. Die staatlichen Aufträge zum Bau neuer repräsentativer Gebäude, die in vorangegangenen Jahrhunderten und Jahrzehnten wesentliche Impulse in der Einführung neuer architektonischer Stile gab, blieben aus. An ihre Stelle traten internationale Investoren, die in ihrem Gepäck den „Internationalen Stil“ mitbrachten. Dieser fand erstmals in dem von Mindlin 1957 geplanten Hochhaus „Edifício Avenida Central“ (Photo 2.37.) seinen Ausdruck: Stahlbau löste Stahlbeton ab, eine zentrale Klimatisierung löste das bio-klimatische Konzept ab und das „Turm auf Platte“ – Konzept löste die Blockbebauung ab. Dieser Gebäudetyp prägte die Bürohausarchitektur der 60er und 70er Jahre.

Weitere Beispiele für diese Architekturphase sind das Gebäude der Bank für ökonomische und soziale Entwicklung BNDES aus dem Jahre 1968 (Photo 2.38.) und das Gebäude „Cândido Mendes“ aus dem Jahre 1978 (Photo 2.39.), dessen in die Fassade integrierter Sonnenschutz nur sehr bedingt wirksam ist.

Eine interessante Lösung des Architekturbüros MMM Roberto kann an der Ostfassade der brasilianischen Akademie der Lite-



Photo 2.37. Edifício Avenida

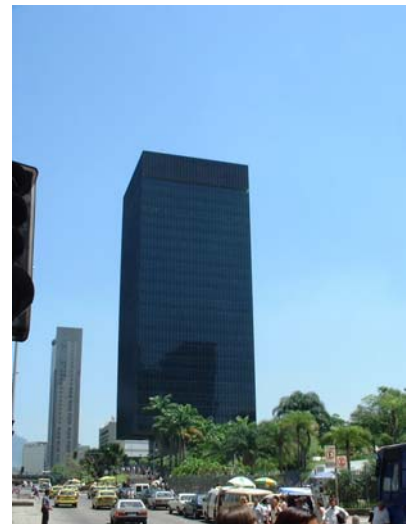


Photo 2.38. Edifício BNDES

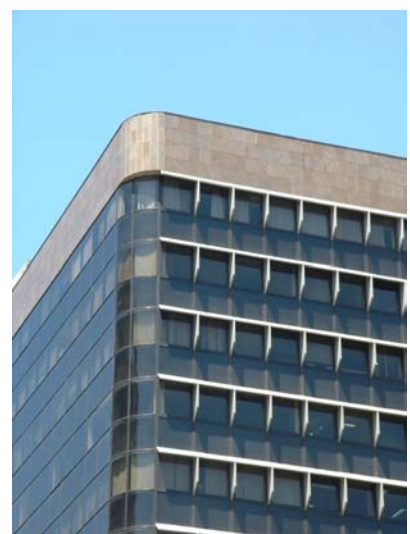


Photo 2.39. Edifício Cândido Mendes

ratur (Academia Brasileira de Letras, Photos 2.40. – 2.42.), ein Projekt von 1972, realisiert 1979, beobachtet werden: hier wurden dreidimensionale, plastische Fensteröffnungen geformt, um das Eindringen der direkten Solarstrahlung zu verhindern (Photo 2.41.). Die Südfassade besteht aus einer gläsernen Vorhängefassade, während die Nordfassade durch bewegliche Brise Soleil geschützt ist. Warum diese jedoch wie die restlichen opaken Fassadenelemente schwarz sind, lässt sich nur schwer ergründen (Photo 2.42.).



Photo 2.40. Academia Brasileira de Letras



Photo 2.41. Ostfassade



Photo 2.42. Nordfassade

Die geschilderten Projekte zeigen die intensive Auseinandersetzung der brasilianischen Modernisten mit dem lokalen Klima. Man kann in diesem Zusammenhang sicherlich auch von einer „bio-klimatischen“ Moderne sprechen.

Interessant ist in diesem Zusammenhang, dass die künstliche Klimatisierung in Rio de Janeiro bereits seit den 20er Jahren bekannt war. Lúcio Costa beschrieb bei einem später veröffentlichten Vortrag über bioklimatische Architektur [5], wie er Anfang der 20er Jahre das erste Carrier-System in Copacabana/Rio de Janeiro für einen Bauherrn installieren ließ.

Trotz der offensichtlich vorhandenen technischen Möglichkeiten in Form von Klimaanlage legten die Modernisten großen Wert auf eine Klimaanpassung ihrer Architektur.

Ein eigenes regionales Vokabular spricht Segre [14] den brasilianischen Modernisten jedoch ab.

Die Postmoderne

In der Folgezeit fand in Rio de Janeiro die Postmoderne Einzug (Photo 2.43.). Die Bürogebäude in diesem Stil werden aufgrund der darin eingesetzten Gebäudeleittechnik und der darin verlegten Glasfasern als „Intelligent“ bezeichnet. Sie negieren aber jedwede klimatische oder regionale Anpassung und weisen nicht annähernd die kreative Qualität der klassischen Moderne Rio de Janeiros auf.

Ausnahmen davon gibt es in Brasilien derzeit wenige: von Salvador da Bahia aus entwirft João Filgueiras Lima, der „Lelé“, bio-klimatische Krankenhäuser für ganz Brasilien. Er wurde von Lúcio Costa im Gegensatz zu Niemeyer, den er als „Criador“ als „Erschaffender“ charakterisiert, als „Konstrukteur“ – einer Verbindung von Künstler und Techniker - bezeichnet [20].

In Minas Gerais betätigt sich Severiano Porto als Architekt mit einer starken Tendenz zu einer an das Klima angepassten Architektur, unter Einsatz lokaler Materialien und lokaler handwerklicher Traditionen. Wie „Lelé“ stammt der Architekt aus Rio de Janeiro, wo er wie dieser die Architekturausbildung durchlief [21].

In Rio de Janeiro ist es nach wie vor Oscar Niemeyer, der letzte noch lebende große Modernist Brasiliens, der in seinen Werken Ansätze einer ans Klima angepassten Bauweise verfolgt. Jüngstes Beispiel ist das Museum für zeitgenössische Kunst in Niterói, bei dem er durch die negative Neigung der Fassaden eine starke Eigenverschattung dieser erzeugt (Photo 2.44.).

Ein interessanter Ansatz, die „traditionelle“ Shopping Center Architektur – große geschlossene Kisten mit künstlichem Klima – durch ein neues Konzept zu ersetzen, lässt sich bei dem Shopping Center „Downtown“ im Stadtteil Barra da Tijuca beobachten (Photo 2.45.). Das Architekturbüro LPC setzte auf eine Kleinstadtstruktur, zu deren architektonischer Umsetzung sie eine Reihe weiterer Architekten einlud, um so ein möglichst



Photo2.43. Edifício Rio Branco 1

Photo 2.44. Museum für zeitgenössische Kunst



Photo 2.45. Shopping Center Downtown



Photo 2.46. Edifício Mourisco



Photo 2.47. Edifício Manhattan Tower

vielfältiges Fassadenspiel zu erreichen. In Verbindung mit verschieden gestalteten Straßen und Plätzen entstand ein interessanter städtischer Raum, der die faszinierende Landschaft der Umgebung mit einbindet. Allerdings leidet das Projekt nach eigener Anschauung unter drei Aspekten:

1. es sind nur Läden, Büros und Gastronomiebetriebe zugelassen. Eine Wohnnutzung ist nicht möglich. Das erwünschte städtische Straßenleben findet daher nur sehr eingeschränkt statt.
2. „Downtown“ stellt eine fußgängerfreundliche Insel in einem Stadtteil dar, der nach Plänen von Lucio Costa aus dem Jahr 1969 autogerecht gestaltet wurde. Um diese „Insel“ zu erreichen, ist ein Fahrzeug unabdingbar.
3. Der von den Architekten projektierte Sonnenschutz wurde von den Bauherrn aus Kostengründen gestrichen. Die 1998 gepflanzte Vegetation wird auf Jahre hinaus nicht den erwünschten Effekt auf das Mikroklima erzeugen können. Folge davon ist eine starke Überhitzung des Ensembles um die Mittagszeit, was die Qualität des öffentlichen Raumes stark beeinträchtigt.

Der architektonische Ausdruck wird heute deutlich von aktuellen Tendenzen aus den USA beeinflusst, insbesondere durch Florida. Gebäude wie das „Mourisco“ aus dem Jahre 2000 (Photo 2.46.) oder das Gebäude „Manhattan Tower“ (Photo 2.47.) sprechen für sich.

2.9. Zusammenfassung und Fazit

In den 500 Jahren seit der Entdeckung Brasiliens durch die Portugiesen folgte die Architekturentwicklung in weiten Teilen den Vorbildern aus der „alten“ Welt. Anfangs geprägt durch eine vereinfachte Form der in Portugal üblichen Renaissance, später Barock und Rokoko, kam mit der Übersiedelung des portugiesischen Hofes der Klassizismus nach Brasilien.

Der Beginn des Historismus und Eklektizismus fiel mit dem Beginn der Republik zusammen, stark durch den französischen kulturellen Einfluss geprägt.

Der Art Deco in den 20er und 30er Jahren des 20. Jahrhunderts stellte den Übergang zur klassischen Moderne dar, die ihren Höhepunkt 1960 mit der Einweihung der neuen Hauptstadt Brasilia hatte. Der anschließende Internationale Stil, einschließlich der Postmoderne amerikanischer Prägung, ist bis zum heutigen Tage die allgemein verwendete Architektursprache.

Der erste Versuch, einen eigenen, nationalen Stil zu entwickeln, war mit dem Ende des Neokolonialismus, der von einem seiner Vertreter, Lúcio Costa, als großer „Irrtum“ bezeichnet wurde [11], sehr schnell gescheitert.

Ein zweiter Versuch einer eigenen architektonischen Sprache fand sehr begrenzt mit dem Marajó-Stil, einer Variante des Art Deco, statt. Auch dieser Variante kam keine Bedeutung zu, zumal sie ausschließlich dekorativen Charakter hatte.

Grosse Bedeutung, ja Weltruhm, erlangte die brasilianische Variante der tropischen klassischen Moderne. Zwar kam auch hier der Anstoß aus Europa, prinzipiell durch Le Corbusier, aber sowohl die Entwicklung einer eigenen Formensprache, als auch die Zusammenarbeit großer Architekten mit dem „modernen“ Landschaftsarchitekten Burle Marx und Künstlern wie Portinari und Werneck und die Anzahl der in diesem Stil erbauten Gebäude lassen von einem bedeutenden Beitrag Brasiliens in der Architekturgeschichte sprechen.

Wie weit die Militärdiktatur (1964 – 1985) zu dem Abbruch der eigenständigen brasilianischen Architekturentwicklung beigetragen hat, kann nur vermutet werden. Tatsache ist, dass die Intelligenz Brasiliens in das innere oder äußere Exil ging, was unter anderem in Frankreich einige interessante Projekte Oscar Niemeyers entstehen ließ.

Die bioklimatische Qualität der Gebäude war anfangs von den portugiesischen Vorgaben geprägt – die relativ dicken Mauern

der Kolonialzeit waren statische Notwendigkeiten zu einer Zeit, in der nicht die Mathematik sondern die Empirie das Bauwesen bestimmte.

Eigene Entwicklungen einer klimatisch angepassten Architektur fanden erstmals durch Perreira Passos ab 1908 statt, der die Ventilationssimse und –oberlichter zur Verbesserung der natürlichen Belüftung einführte.

Auch lässt sich in diesem Zeitraum eine stetige Zunahme der Fensterfläche im Verhältnis zur geschlossenen Fassade feststellen: So finden sich in vielen Stadthäusern, die um 1900 gebaut wurden, bereits fast durchgehende Fensterbänder (siehe Abbildung 2.3.). Entgegen der modernen Architektur waren die Fensterelemente in Funktionen aufgeteilt: eine kleine verglaste Fläche zur Raumbelichtung und zum visuellen Kontakt mit der Außenwelt und Lüftungslamellen aus Holz im übrigen Bereich. Lúcio Costa vergleicht die damit entstehenden Innenräume mit Veranden, die er als die für das tropische Klima als die angenehmsten Aufenthaltsräume empfindet [11].

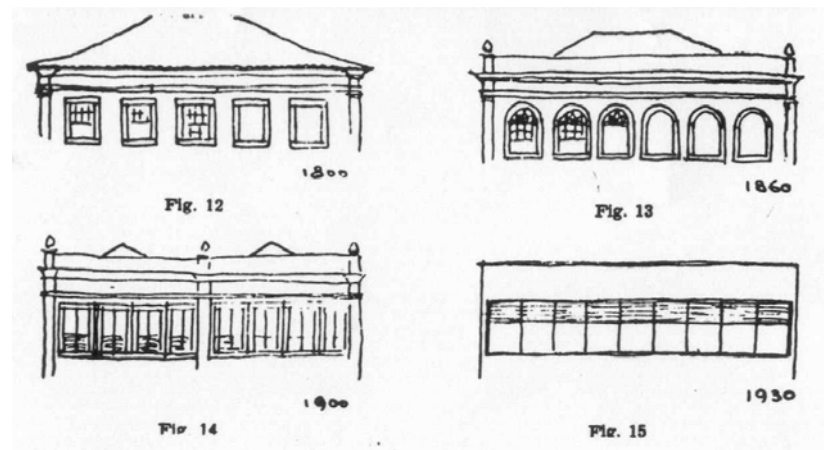


Abbildung 2.3. Entwicklung der Fenster von 1800 – 1930 [11]

Die weitestgehende Anpassung an das Klima fand in der klassischen Moderne statt, mit dezidierten Überlegungen zum Sonnenschutz und zur natürlichen Belüftung und der entsprechenden Entwicklung von Konzepten und Elementen.

In der Gegenwart kann man im Bürogebäudebereich bei voll- und einfachverglasten Fassaden ohne externen Sonnenschutz,

Außenwandstärken von 14 cm (verputzter Beton- oder Hochlochziegel) und durchgehend künstlicher Klimatisierung und Beleuchtung eine vollkommene Vernachlässigung der Prinzipien klimagerechter Architektur attestieren.

3. Tageslicht in den Tropen

Nach dem kurzen geschichtlichen Abriss der Architekturentwicklung in Rio de Janeiro beschäftigt sich dieses Kapitel mit dem Tageslicht an diesem Standort.

Neben der Darstellung allgemeiner Daten wie zum Beispiel dem Sonnenstandsdiagramm werden in diesem Kapitel zwei wichtige Grundlagen für die Auslegung der Tageslichtkontrollsysteme erarbeitet:

- 1) die Beschreibung des Tageslichtes in den Tropen am Beispiel Rio de Janeiros mit Schwerpunkt auf der Überprüfung der Gültigkeit internationaler Formeln nach CIE für den Standort Rio de Janeiro und
- 2) die quantitative Bestimmung des Tageslichtangebotes in Rio de Janeiro.

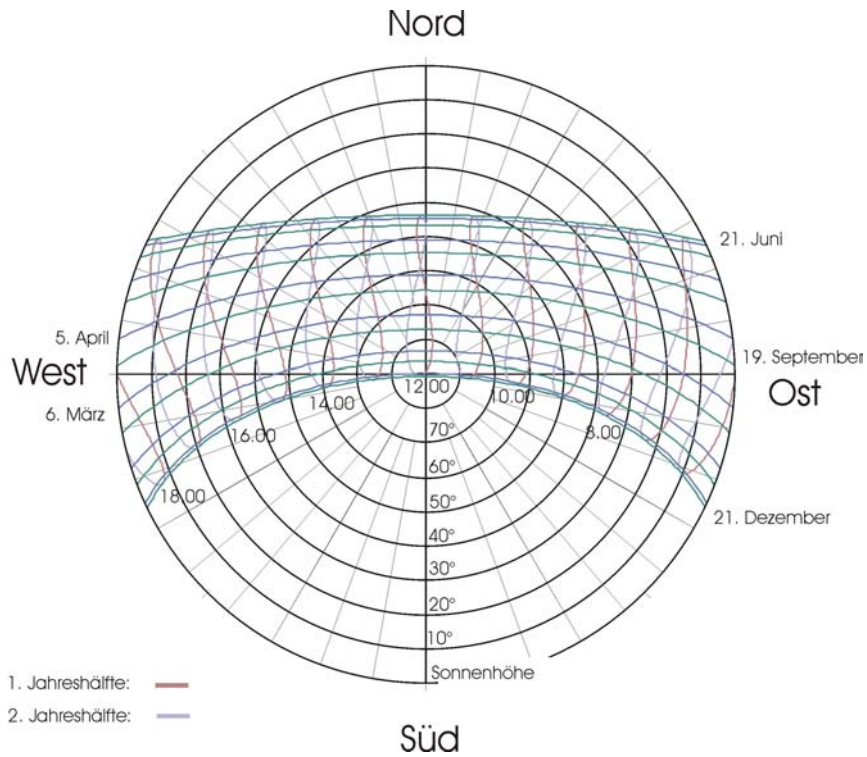
In der einschlägigen Literatur fehlen bisher klare Hinweise auf Unterschiede und Gemeinsamkeiten des Himmels in den Tropen im Vergleich mit dem Himmel in den gemäßigten Breiten. Aynsley und Edmonds [22] stellen in ihrem Artikel „Daylighting in the Tropics“ unter anderem fest, dass dieses Thema bisher kaum untersucht wurde und dass es insbesondere an Daten zur Leuchtdichteverteilung des tropischen Himmels mangelt. Hopkinson et al [23] geben in dem Kapitel „Daylight and Sunlight in Tropical Regions“ ihres Buches „Daylighting“ zwar einige generelle Informationen zum Thema, halten diese jedoch sehr allgemein.

Für die Beschreibung des Tageslichtes in den Tropen gilt es daher zunächst, die Gültigkeit der für das Tageslicht üblichen Algorithmen nach DIN/CIE zu überprüfen. Dafür wurden eigene Messungen durchgeführt – horizontale Beleuchtungsstärkemessungen für einen klaren Himmel mit Sonne und Leuchtdichtemessungen für verschiedene Himmelszustände, wobei der Schwerpunkt auf der Untersuchung des bedeckten Himmels lag.

Für die quantitative Bestimmung des Tageslichtangebotes im Jahresverlauf wurden Literaturquellen ausgewertet. Diese dadurch gewonnenen Werte zum Tageslichtangebot in Rio de Janeiro bilden die Grundlage für die Ermittlung der möglichen Tageslichtautonomie durch die in der Folge zu entwickelnden Tageslichtkontrollsysteme.

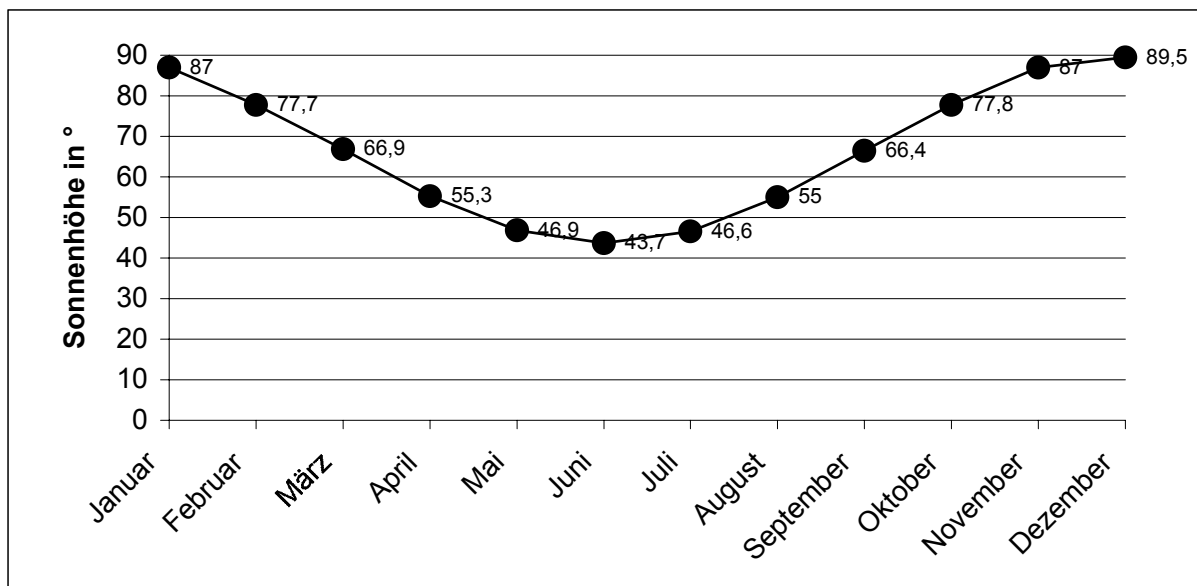
3.1. Allgemein

3.1.1. Sonnenstandsdiagramm



Grafik 3.1. Sonnenstandsdiagramm für den Standort 22,9° südlicher Breite und 43,3° westlicher Länge, GMT + 3.00 [39]

3.1.2. Maximale Sonnenhöhen



Grafik 3.2. Maximale Sonnenhöhe γ_s a 21. jeden Monats [39]

3.1.3. Photometrisches Strahlungsäquivalent K

Das photometrische Strahlungsäquivalent (lm/W) des Tageslichtes entspricht der Lichtausbeute η [lm/W] des Kunstlichtes. Wie bei Kunstlicht ist dieser Wert entscheidend für die thermische Belastung des Innenraumes, welche die Nutzung von Licht immer bedeutet. Kann die thermische Komponente der Beleuchtung in gemäßigten, sowie in polaren und subpolaren Breiten zumindest über einen größeren Zeitraum des Jahres als (primärenergetisch teure) Heizungsergänzung angesehen werden, so führt diese Komponente in den feucht-warmen Tropen immer zu erhöhten Kühllasten, die es zu minimieren gilt.

Das photometrische Strahlungsäquivalent K wird beeinflusst durch die Sonnenhöhe, die Trübheit der Atmosphäre und den Wasserdampfgehalt der Atmosphäre.

Bei der Untersuchung des photometrischen Strahlungsäquivalents werden 3 unterschiedliche Himmelszustände als Grundlage genommen:

- a) bedeckter Himmel
- b) diffuser Himmel (wolkenlos)
- c) und direktes Sonnenlicht

Durch die Variation von Sonnenstand und atmosphärischen Verhältnissen gibt es keine feste Proportion zwischen Solarstrahlung und Tageslicht [24].

Littlefair [25] vergleicht die Angaben verschiedener Autoren. Die Angaben für das photometrische Strahlungsäquivalent liegt für bedeckte Himmel danach bei 60 – 128 lm/W , für die diffuse Strahlung klarer Himmel bei 84 – 146 lm/W und für die Direktstrahlung der Sonne bei 50 – 110 lm/W .

Für die eigenen weiteren Untersuchungen werden die Werte der DIN 5034 verwendet:

Für bedeckten Himmel: $K_{\text{Hbd}} = 115 \text{ lm/W}$

Für klaren Himmel: $K_{\text{H}} = 125 \text{ lm/W}$

für klaren Himmel mit Sonne in Abhängigkeit von der Sonnenhöhe $K_{\text{H},S(\gamma_S)}$:

Sonnenhöhe γ_S	15°	30°	45°	60°	70°	90°
$K_{S(\gamma_S)}$ in [lm/W]	67	91	99	101	101	102
$K_{\text{H},S(\gamma_S)}$ in [lm/W]	91	103	107	108	111	125

Tabelle 3.1. photometrisches Strahlungsäquivalent für klaren Himmel mit Sonne in Abhängigkeit von der Sonnenhöhe γ_S

Die in Tabelle 3.1. angeführten Werte für $K_{H,S(\gamma_S)}$ sind das Ergebnis folgender Berechnung:

$$K_{H,S(\gamma_S)} = F'_{H(\gamma_S)} * 125 \text{ lm/W} + F'_{S(\gamma_S)} * K_{S(\gamma_S)}$$

$$F'_{H(\gamma_S)} = (100 / (E_{H,F(\gamma_S)} + E_{S,F(\gamma_S)}) * E_{H,F(\gamma_S)}) / 100$$

$$F'_{S(\gamma_S)} = 1 - F'_{H(\gamma_S)}$$

Dabei ist:

$K_{H,S(\gamma_S)}$	photometrisches Strahlungsäquivalent für klaren Himmel und Sonne in Abhängigkeit der Sonnenhöhe γ_S
$K_{S(\gamma_S)}$	photometrisches Strahlungsäquivalent für die Sonnenstrahlung in Abhängigkeit von γ_S
$F'_{H(\gamma_S)}$	der Anteil der Himmelsstrahlung an der Gesamtstrahlung auf eine vertikale Fläche in Abhängigkeit von γ_S
$F'_{S(\gamma_S)}$	der Anteil der Sonnenstrahlung an der Gesamtstrahlung auf eine vertikale Fläche in Abhängigkeit von γ_S
$E_{H,F(\gamma_S)}$	vertikale Beleuchtungsstärke durch Himmelsstrahlung in Abhängigkeit von γ_S (nach Näherungsformel (31) in DIN 5034 Teil 2)
$E_{S,F(\gamma_S)}$	vertikale Beleuchtungsstärke durch Sonnenstrahlung in Abhängigkeit von γ_S (nach Näherungsformel (30) in DIN 5034 Teil 2)

Generell hat die Azimutdifferenz $\Delta|\alpha_F - \alpha_S|$ Einfluss auf die vertikale Beleuchtungsstärke. Im folgenden wird jedoch die direkte Sonnenstrahlung nur für $\Delta Az = 0^\circ$ und $\Delta Az = 45^\circ$ berücksichtigt. Die dabei festgestellten Unterschiede in E_F liegen unter 2%. Auf eine Differenzierung wird daher verzichtet.

Der Strahlungsanteil durch die Bodenreflexion wird vernachlässigt.

3.2. Beschreibung des Tageslichts in Rio de Janeiro

Im folgenden werden die international üblichen Formeln nach CIE auf ihre Anwendbarkeit für den Standort Rio de Janeiros hin untersucht. Ferner werden tropenspezifische Unterschiede herausgearbeitet.

3.2.1. Beleuchtungsstärke

3.2.1.1. Horizontalbeleuchtungsstärke E_g bei klarem Himmel und Sonne nach CIE/DIN

Die Horizontalbeleuchtungsstärke durch die Sonne E_s , durch den Himmel E_H und durch Sonne und Himmel E_g hängen von der Sonnenhöhe γ_S ab. Eine sehr genaue Berechnungsmöglichkeit wird in [26] angegeben (siehe Anhang I.2.).

Da jedoch ein wesentlicher Wert, der Trübungsfaktor nach Linke, für Rio de Janeiro nicht bekannt ist, wird die Näherungsformel nach [26] verwendet:

$$E_s = [85.000 * \sin^2\gamma_S + 6.500 * \sin^2(2 \gamma_S)] * lx \quad (1)$$

und

$$E_H = 280 * \arctan(\gamma_S / 18,9) * lx \quad (2)$$

Sie gelten für eine mittlere Trübung von $T = 4,9$

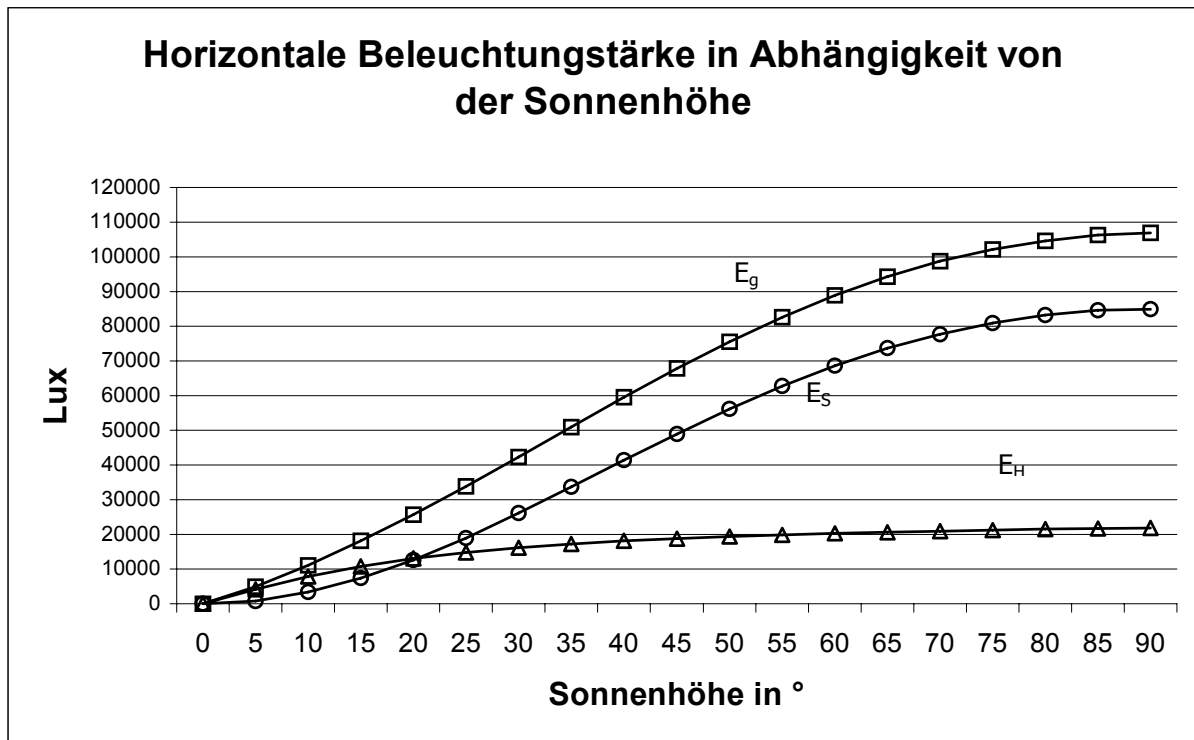
$$E_g = E_s + E_H \quad (3)$$

Dabei ist:

E_s die durch die Sonne erzeugte horizontale Beleuchtungsstärke

E_H die durch das Himmelsgewölbe verursachte horizontale Beleuchtungsstärke

E_g die horizontale Beleuchtungsstärke als Summe von E_s und E_H



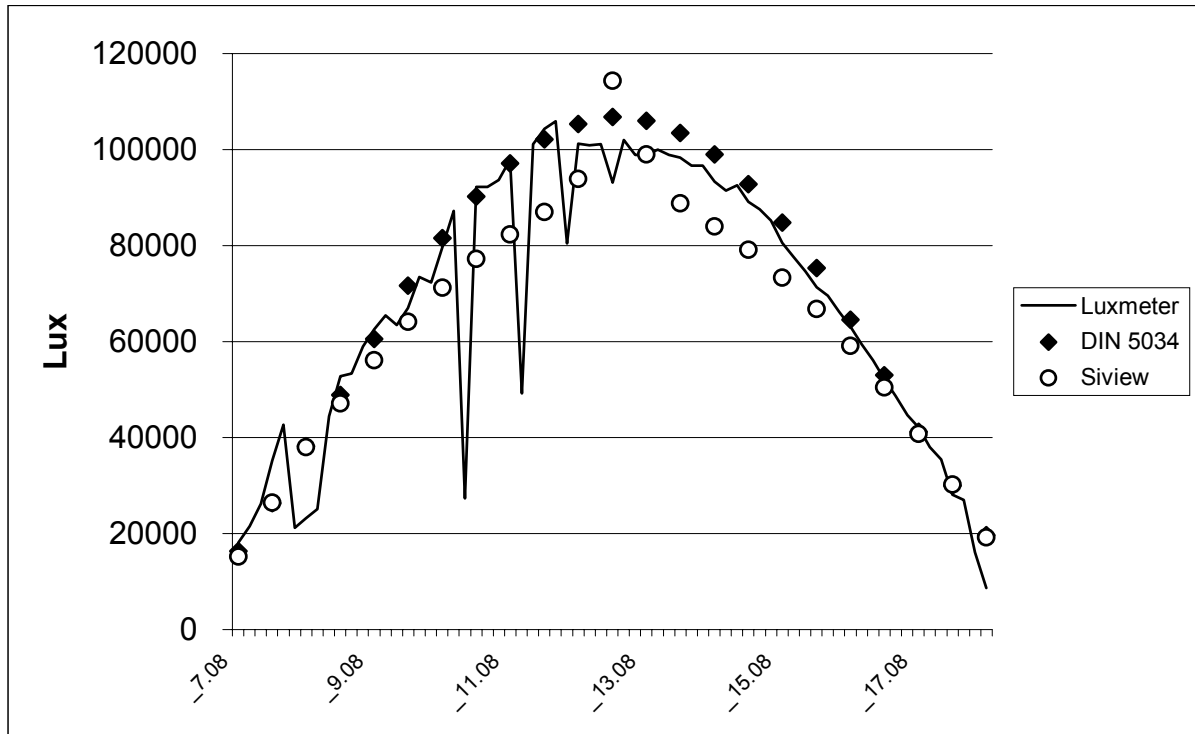
Grafik 3.3. Horizontale Beleuchtungsstärke in Abhängigkeit von der Sonnenhöhe bei klarem Himmel, nach vereinfachten Formeln (1), (2), (3)

3.2.1.2. Eigene Messungen

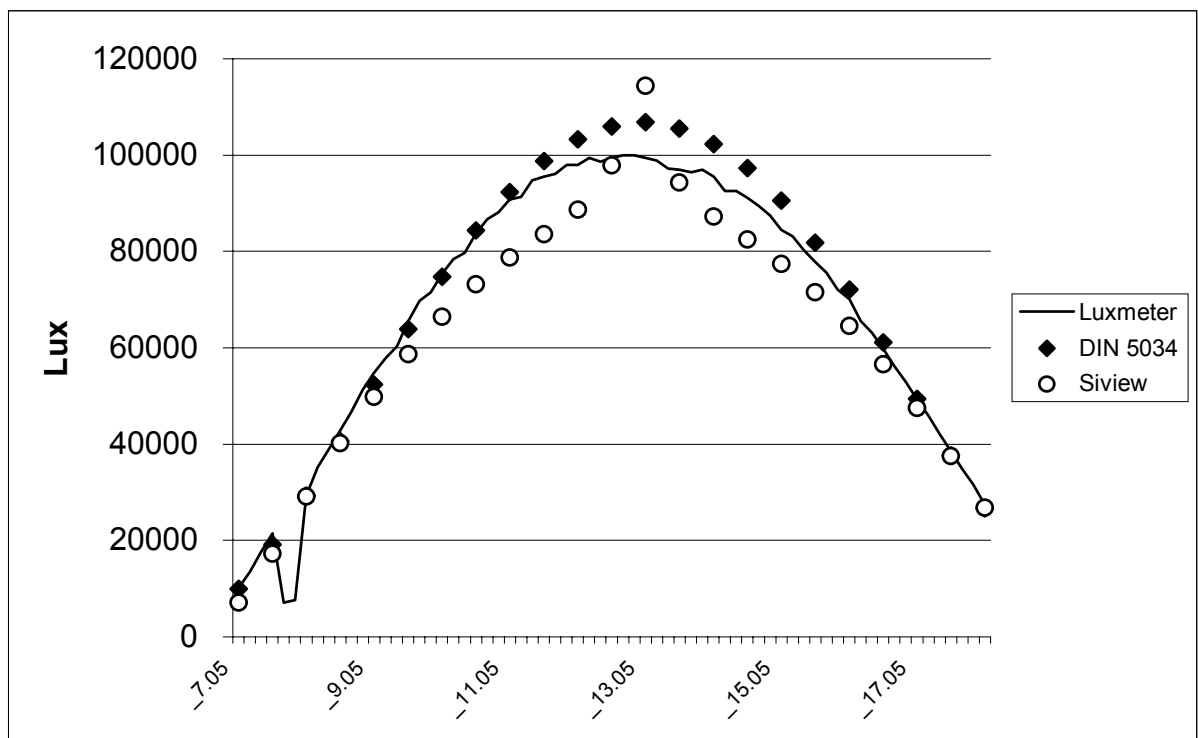
In den Monaten November und Dezember 2000 sowie in den Monaten Januar und Juni 2001 wurden eigene Messungen in Rio de Janeiro durchgeführt. Die horizontale Beleuchtungsstärke E_g wurde durch einen Datalogger alle 10 Minuten registriert und aufgezeichnet. Der Horizont war im Azimut von 225° bis 315° (Westen) für Sonnenhöhen γ_S unter 8° verschattet. Es wurde ein Luxmeter der Klasse II verwendet.

Ziel der Messungen war die Überprüfung der Übereinstimmung der vor Ort vorzufindenden horizontalen Beleuchtungsstärke E_g bei klarem Himmel und Sonne mit den entsprechenden Ergebnissen bei Verwendung der in DIN 5034 Teil 2 angegebenen Näherungsformel.

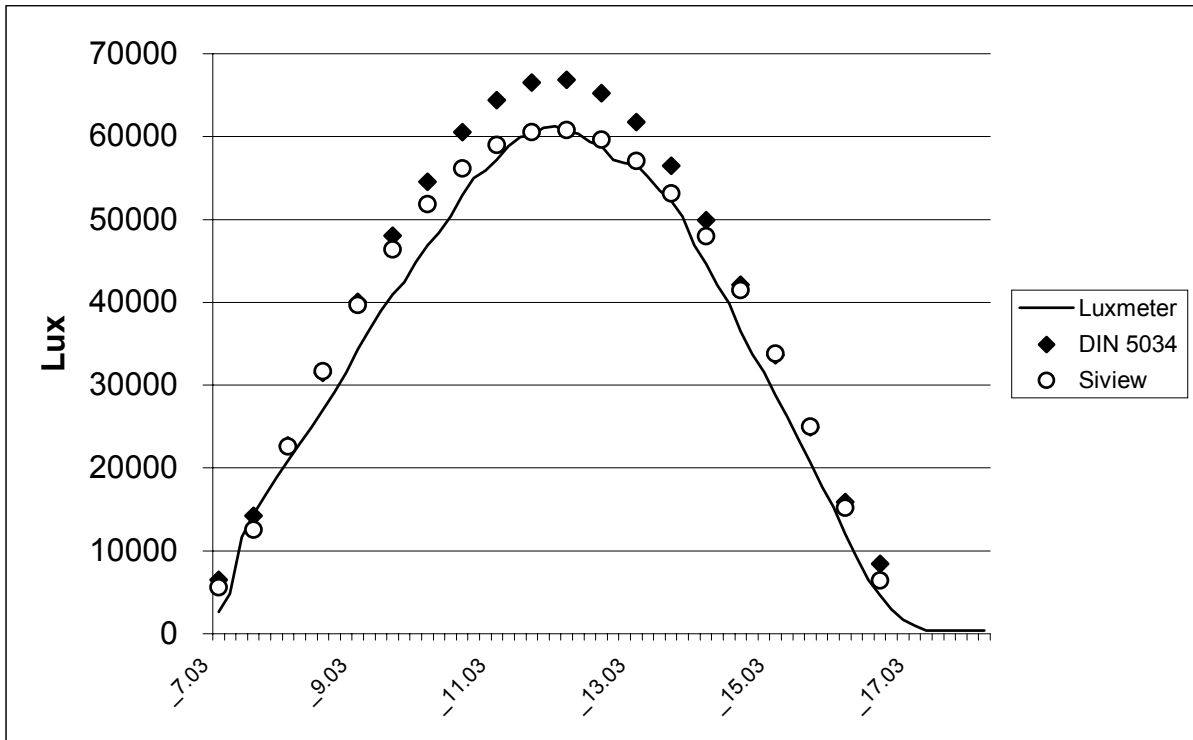
Im folgenden werden die ausgewerteten Daten von überwiegend sonnigen Tagen mit den berechneten Werten nach CIE/DIN verglichen. Ferner wird durch den von Siview/Radiance verwendeten Algorithmus die horizontale Beleuchtungsstärke für die entsprechenden Sonnenhöhen errechnet und in die Grafik vergleichend eingebunden.



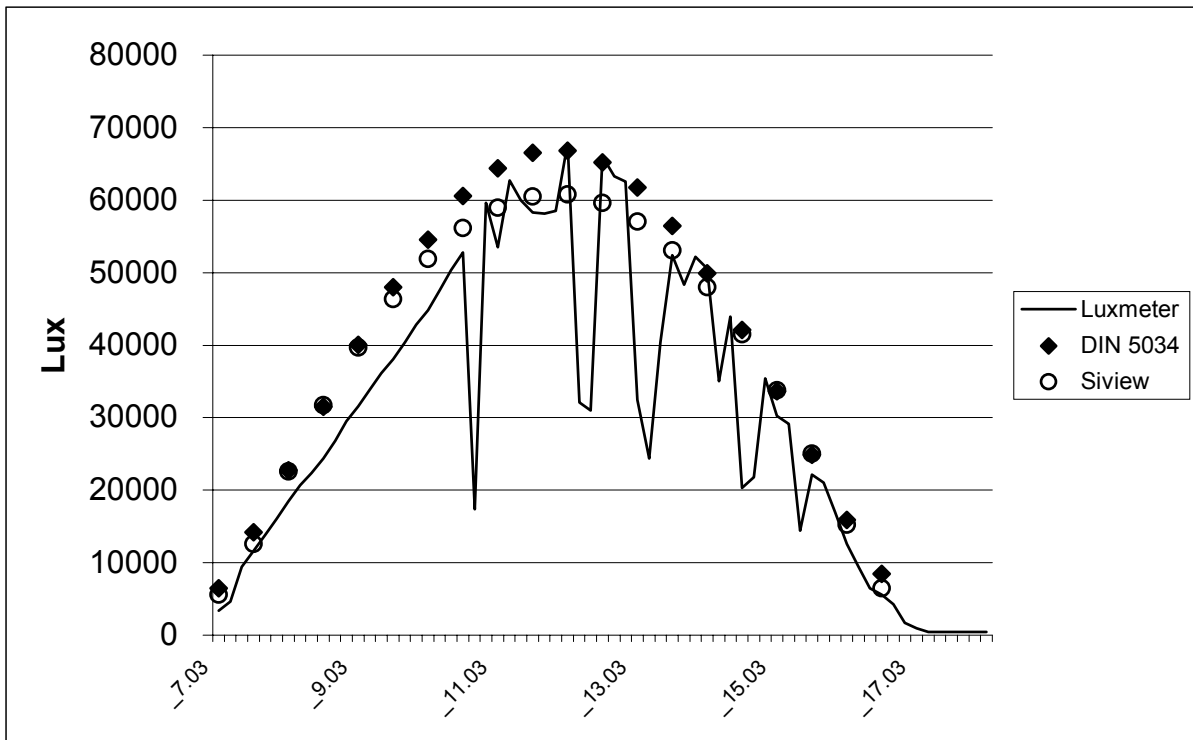
Grafik 3.4. Vergleich der Messung vom 3.12.2000 mit DIN 5034 und Siview, unter Berücksichtigung der Sommerzeit (GMT - 2.0)



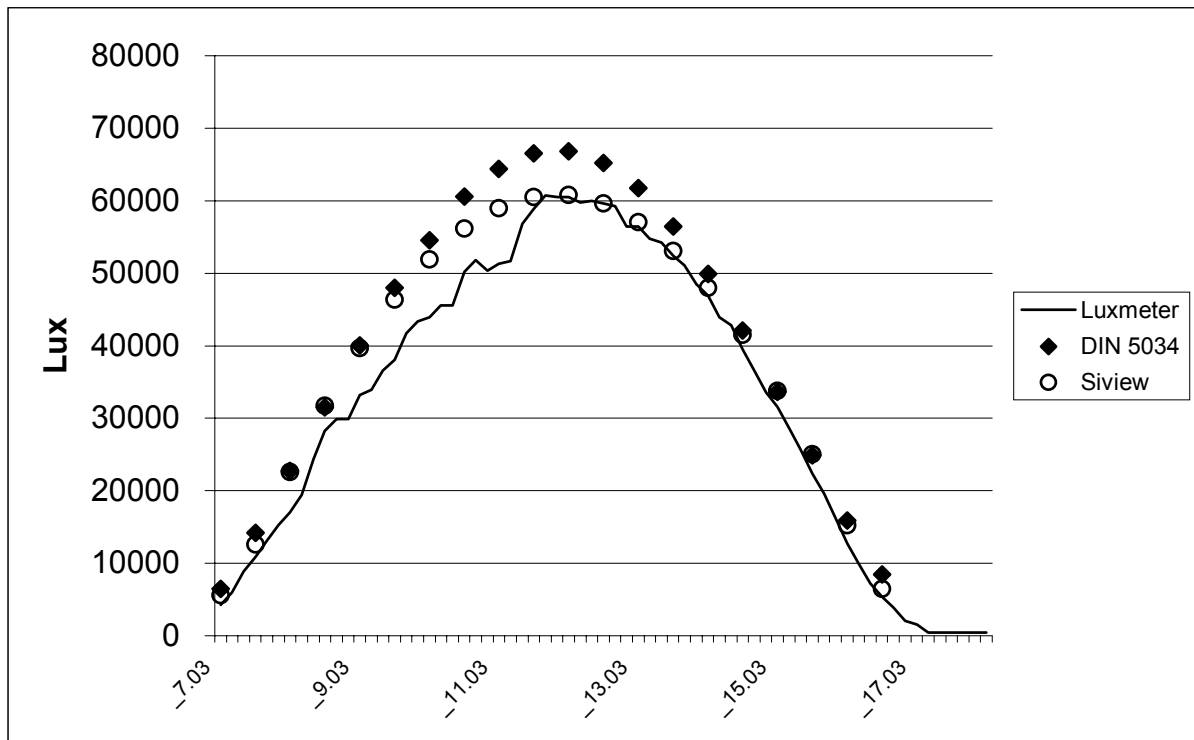
Grafik 3.5. Vergleich der Messung vom 11.01.2001 mit DIN 5034 und Siview, unter Berücksichtigung der Sommerzeit (GMT - 2.0)



Grafik 3.6. Vergleich der Messung vom 6.6.2001 mit DIN 5034 und Siview (GMT – 3.0)



Grafik 3.7. Vergleich der Messung vom 7.6.2001 mit DIN 5034 und Siview (GMT –3.0)



Grafik 3.8. Vergleich der Messung vom 8.6.2001 mit DIN 5034 und Siview (-3.0)

Analyse: Die Ergebnisse der Messungen stimmen mit den errechneten Werten nach DIN 5034 Teil 2 gut überein. Die mit dem von Siview/Radiance verwendeten Algorithmus ermittelten Werte weisen bei größeren Sonnenhöhen Unterschreitungen von bis zu 15% (in Relation zur DIN), bei der maximalen Sonnenhöhe im Dezember und Januar eine Überschreitung von bis zu 7% auf.

Lediglich in der Mittagszeit liegen die Messwerte in der Regel etwas unter den berechneten Werten nach DIN. Da die berechneten Werte jedoch auch zur Mittagszeit durchaus erreicht werden, wie beispielsweise am 7.6.2001, liegt die Vermutung nahe, dass der jeweilige Wasserdampfgehalt der Luft für die Unterschreitung der berechneten Werte durch die Messwerte verantwortlich sein könnte.

Fazit

Die gute Übereinstimmung der Messwerte mit den berechneten Werten nach DIN 5034 Teil 2 lässt eine Verwendung der Näherungsformel zu.

Die Tatsache, dass die durch Siview/Radiance ermittelten Werte in größeren Sonnenhöhen Mess- und DIN-Werte unterschreiten, wird durch die für die Auslegung und Evaluierung notwendige Zusammenlegung der Gruppen für klaren Himmel T4 und T5 ($0.70 \leq I_N \leq 1.00$; siehe 3.4.3. „bedeckter Himmel in den Tropen“) kompensiert. Dadurch, dass die maximalen

Sonnenhöhen von über 85° in Rio de Janeiro im Jahresdurchschnitt sehr selten sind, kann auch dieser „Ausreißer“ vernachlässigt werden.

3.2.1.3. Beleuchtungsstärke auf geneigten Flächen E_F

Die Beleuchtungsstärke auf vertikale Flächen E_F spielt bei der Auslegung von Tageslichtkontrollsystemen eine wesentliche Rolle. Im folgenden werden daher die Zusammensetzung und mögliche Besonderheiten hinsichtlich der Situation in den Tropen untersucht. Auf eigene Messungen wurde verzichtet, da die Messung der horizontalen Beleuchtungsstärke eine gute Übereinstimmung mit den Rechenwerten ergab.

Die Beleuchtungsstärke auf geneigten Flächen E_F (Neigungswinkel γ_F gegen die Horizontale) setzt sich aus einem vom Himmel ($E_{H,F}$), einem von der Sonne ($E_{S,F}$) und einem durch Reflexion am Boden ($E_{B,F}$) erzeugten Anteil zusammen [26]:

$$E_F = E_{H,F} + E_{S,F} + E_{B,F}$$

Für die einzelnen Anteile gilt:

$$E_{H,F} = E_H * R(\gamma_S, \gamma_F, |\alpha_S - \alpha_F|)$$

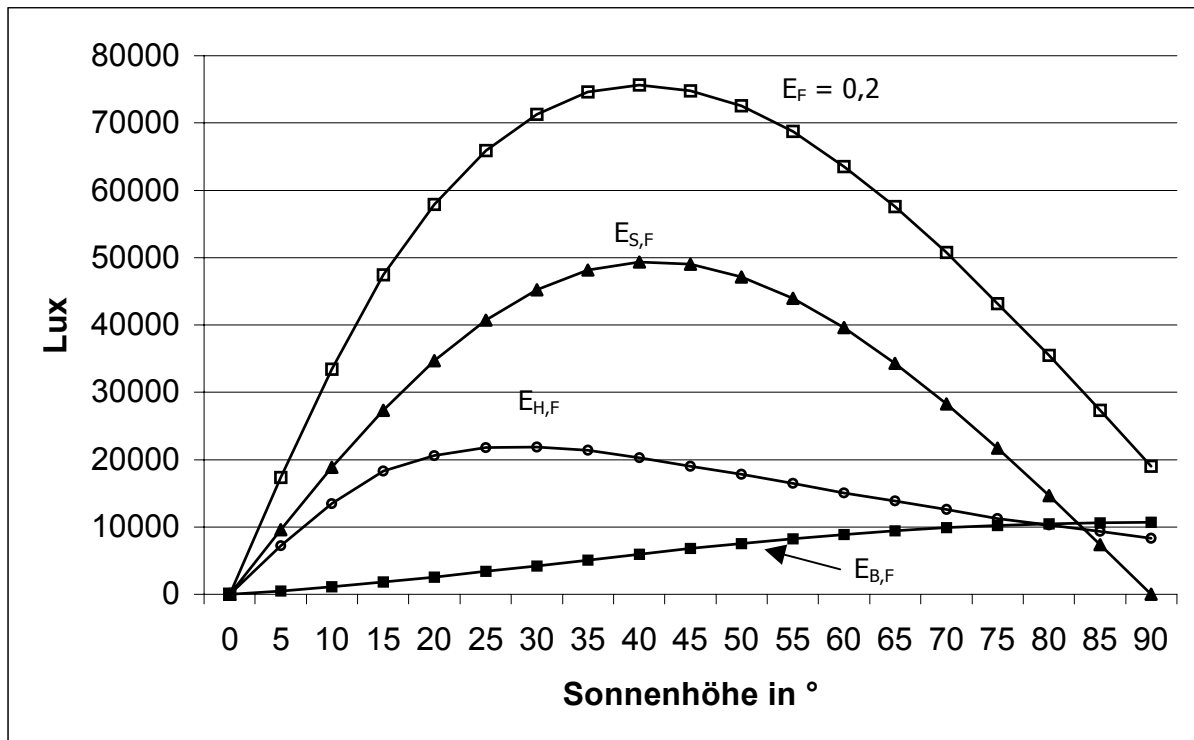
$$E_{S,F} = E_S * (\cos \gamma_F + \sin \gamma_F * \cos |\alpha_S - \alpha_F| / \tan \gamma_S)$$

$$E_{B,F} = E_g * 0,5 * o_U * (1 - \cos \gamma_F)$$

dabei sind:

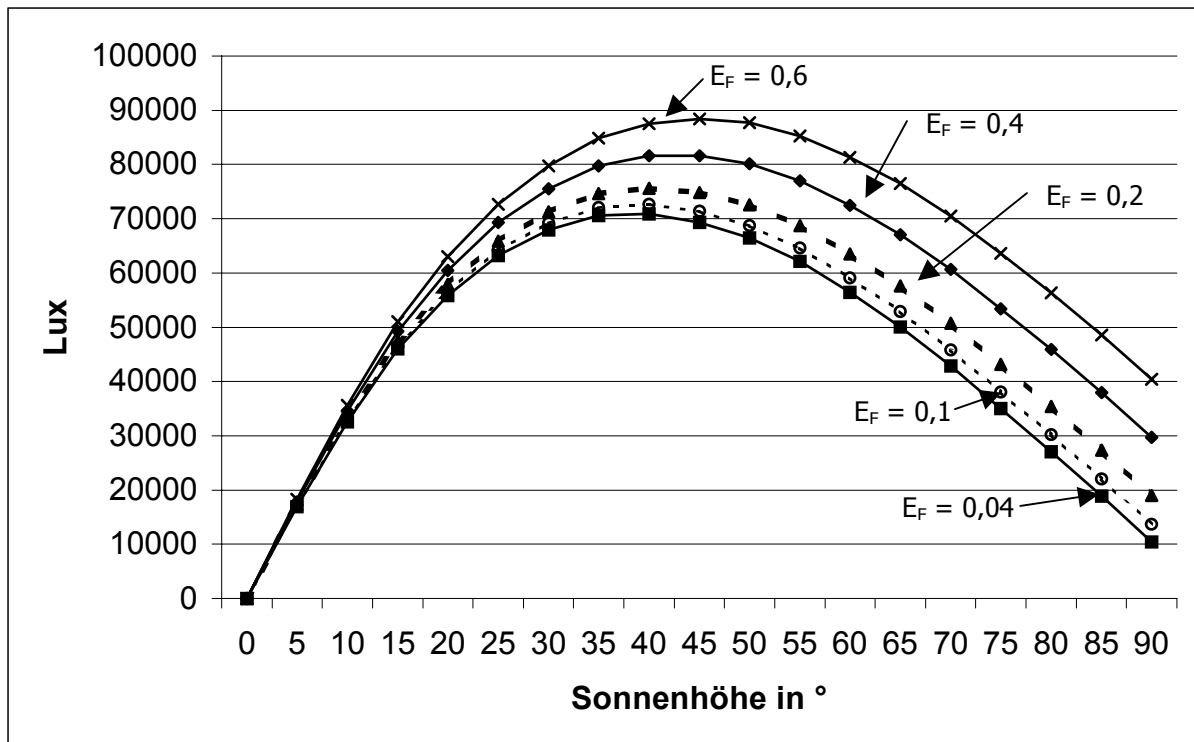
$E_{H,F}$	vertikale Beleuchtungsstärke durch das Himmelsgewölbe
$E_{S,F}$	vertikale Beleuchtungsstärke durch die Sonne
$E_{B,F}$	vertikale Beleuchtungsstärke durch die Bodenreflexion
γ_F	Neigungswinkel der vertikalen Fläche gegen die Horizontale
R	Umrechnungsfaktor, abhängig von γ_F und Δ Azimet Fassade – Sonne (Tabellewert)
o_U	Reflexionsgrad des Bodens
α_S	Azimet der Sonne
α_F	Azimet der Fassade

Für $o_U = 0,2$; $\gamma_F = 90^\circ$; $\alpha_S = \alpha_F = 0$ und $0^\circ < \gamma_S < 90^\circ$ ergibt sich folgende Grafik:



Graphik 3.9. Zusammensetzung der vertikalen Beleuchtungsstärke E_F aus $E_{S,F}$, $E_{B,F}$ und $E_{H,F}$ in Abhängigkeit der Sonnenhöhe γ_S

Im folgenden wird der Einfluss der Bodenreflexion auf die vertikale Beleuchtungsstärke E_F überprüft. Für $\rho_U = 0,04/0,1/0,2/0,4$; $\gamma_F = 90^\circ$; $\alpha_S = \alpha_F = 0$ und $0^\circ < \gamma_S < 90^\circ$ ergibt sich folgende Grafik:



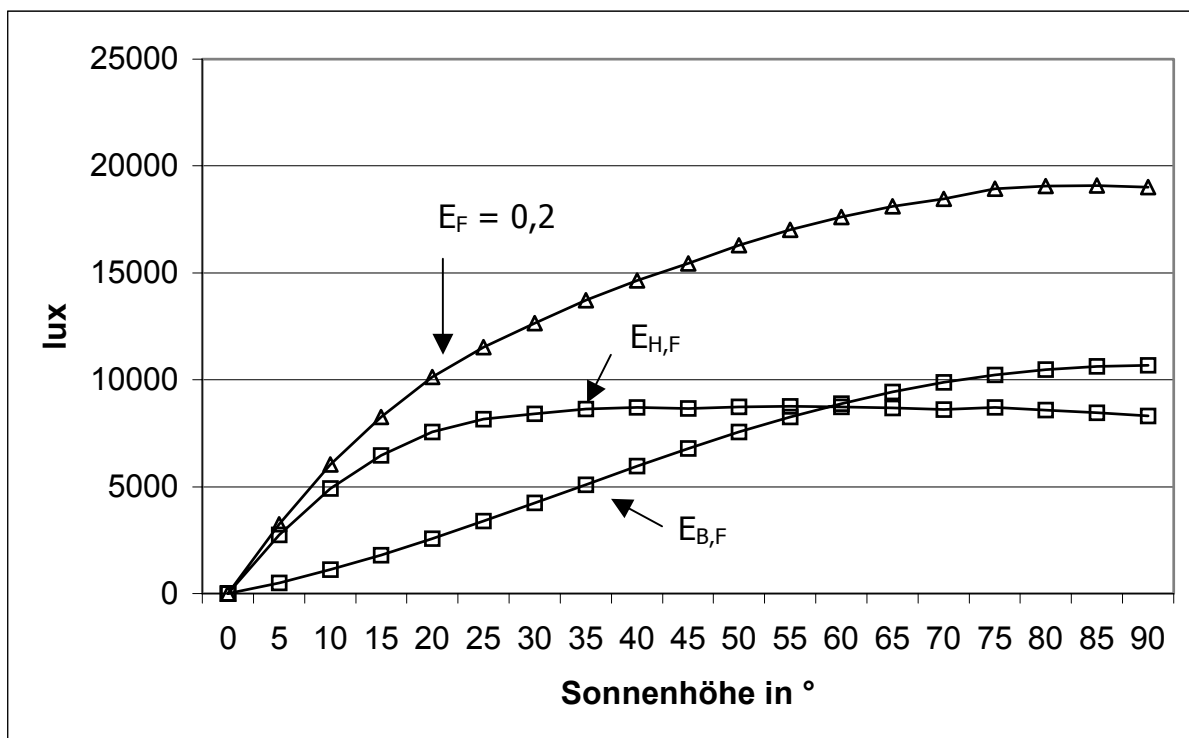
Graphik 3.10. Vertikale Beleuchtungsstärke bei $|\alpha_S - \alpha_F| = 0^\circ$; verschiedene Bodenreflexionsgrade

Die Unterschiede insbesondere zwischen dem allgemein verwendeten Standard von $\rho_U = 0,2$ und einem mit $\rho_U = 0,6$ sehr hellen Reflexionsgrad, wie er in den Tropen häufig auf Dächern (Schutz vor Solarstrahlung) vorzufinden ist, sind beachtlich: bei einer Sonnenhöhe $\gamma_S = 45^\circ$ beträgt der Unterschied 18%, bei einer Sonnenhöhe $\gamma_S = 90^\circ$ liegt die vertikale Beleuchtungsstärke für $E_{F(\rho_U = 0,6)}$ um 113% über dem entsprechenden Wert für $E_{F(\rho_U = 0,2)}$.

Da dieses Phänomen insbesondere bei größeren Sonnenhöhen auftritt, gilt es, diesen damit für die Tropen sehr relevanten Aspekt sowohl bei der Planung des Außenraumes (soweit wie möglich) als auch bei der Auslegung des Blendschutzes zu berücksichtigen.

Die maximale vertikale Beleuchtungsstärke wird bei Sonnenhöhen zwischen 40° und 45° erreicht, abhängig von der jeweiligen Bodenreflexion.

Im folgenden wird der Einfluss der Bodenreflexion von E_F bei einer Azimutdifferenz $\Delta|\alpha_S - \alpha_F| = 90^\circ$ untersucht:



Grafik 3.11. Vertikale Beleuchtungsstärke für $\Delta|\alpha_S - \alpha_F| = 90^\circ$; $\rho_U = 0,2$

Auch bei dieser Grafik wird ein deutlicher Unterschied zwischen den niedrigen und hohen Sonnenständen und damit zwischen den gemäßigten Breiten und den Tropen sichtbar: während bei niedrigen Sonnenhöhen die diffuse Strahlung des Himmelsgewölbes den Hauptanteil an der vertikalen Beleuchtungsstärke E_F stellt, so nimmt der Anteil der Strahlung durch die Bodenreflexion stetig zu und übertrifft im absoluten Wert schließlich den Beleuchtungsstärkeanteil durch das Himmelsgewölbe.

Die vertikale Beleuchtungsstärke nimmt mit zunehmender Sonnenhöhe zu.

Fazit

Der Bodenreflexion ρ_U (richtiger wäre: Horizontalreflexion, das würde auch tiefer liegende Dächer mit einschließen) kommt aufgrund der in den Tropen auftretenden hohen Sonnenständen eine wichtige Rolle zu. Dieses gilt es bei der Planung mit Tageslichtkontrollsystemen in den Tropen besonders zu berücksichtigen.

3.2.2. Leuchtdichtevertelung

Diffuslicht-Anteil: anders als bei Majoros [27] beschrieben, kann der Diffuslichtanteil in den Tropen zu starken Blendungsproblemen führen. Es werden daher im folgenden verschiedene Himmelszustände hinsichtlich ihrer Leuchtdichte untersucht.

Besonderes Augenmerk wird dabei auf den bedeckten Himmel gelegt, da dieser Himmelszustand auch aufgrund eigener Beobachtung als kritisch angesehen werden muss.

Von einer detaillierteren Untersuchung der Leuchtdichte des klaren Himmels wurde abgesehen, da die Messergebnisse der horizontalen Beleuchtungsstärke E_H keine gravierenden Abweichungen zu den mit den Formeln nach CIE/DIN berechneten Ergebnissen aufwiesen. Auch die eigene Beobachtung ergab keine Hinweise auf mögliche Blendungsprobleme.

3.2.2.1. Eigene Messungen für verschiedene Himmelszustände

Um eine realistische Vorstellung von der für die Auslegung von Tageslichtkontrollsystemen vorhandenen Leuchtdichte verschiedener Himmelszustände zu bekommen, wurden von Dezember 2000 bis März 2001 Messungen mit einem handgehaltenen Photometer (Genauigkeit $\pm 2\%$, Öffnungswinkel 1°) vorgenommen. Die Messungen sind Grundlage für Aussagen über Blendung sowie Reflexionen auf Bildschirmen (siehe Kapitel „visueller Komfort“). Die Messungen wurden von einem Arbeitsplatz mit Fensteröffnung nach Süden (Messrichtung $\alpha_M = 194^\circ$) durchgeführt. Dabei wurde die Leuchtdichte am Horizont ($\gamma = 1^\circ$), sowie bei $\gamma = 15^\circ$ und $\gamma = 30^\circ$ gemessen.

Es gilt an dieser Stelle festzuhalten, dass die Messungen keine integralen Messungen über größere Himmelsausschnitte darstellen. Es wurde jedoch Wert darauf gelegt, bei den verwendeten Messwerten diejenigen zu verwenden, denen ein weitestgehend homogener Himmelszustand zugrunde lag.

Eine Ausnahme stellt der teilweise bewölkte Himmel dar: hier wurde bewusst eine besonders helle Stelle gemessen, da diese Blendungserscheinungen hervorrufen könnte.

Visuelle Beschreibung	Tag und Uhrzeit	$\gamma_M = 1^\circ$	$\gamma_M = 15^\circ$	$\gamma_M = 30^\circ$
klarer blauer Himmel	24.02.2001: 14 Uhr	6.000 cd/m ²	2.900 cd/m ²	2.200 cd/m ²
blauer Himmel mit leichtem Wolken-schleier	20.02.2001: 13 Uhr	6.000 cd/m ²	5.000 cd/m ²	4.500 cd/m ²
klarer blauer Himmel mit diesigem Horizont	16.02.2001: 11.30 am	6.500 cd/m ²	5.600 cd/m ²	4.600 cd/m ²
diesiger Himmel	16.02.2001: 13.30	5.700 cd/m ²	5.700 cd/m ²	4.700 cd/m ²
teilweise bewölkt	04.02.2001: 12 Uhr	10.100 cd/m ²	18.400 cd/m ³	20.200 cd/m ²
stark bewölkt	22.02.2001: 13.30	8.000 cd/m ²	12.000 cd/m ²	15.000 cd/m ²

Tabelle 3.2. Leuchtdichtewerte für typische Himmelszustände in Rio de Janeiro im Februar 2001

Die Auswirkungen der festgestellten Leuchtdichte wird im Kapitel „Visueller Komfort“ untersucht.

3.2.2.2. Leuchtdichteverteilung bei bedecktem Himmel nach CIE/DIN

Die in der Norm DIN 5034 verwendete Formel entspricht dem „Moon and Spencer Overcast Sky“ [27], der als CIE Overcast Sky normiert ist.

$$L(\gamma) = L_z * (1 + 2 * \sin \gamma) / 3$$

dabei ist:

$L(\gamma)$ Leuchtdichte von Himmelspunkten, die um den Winkel γ vom Horizont entfernt sind,

L_z Zenitleuchtdichte;

$$L_z = (123 + 8594 * \sin \gamma_s) * \text{cd/m}^2$$

Dieser Formel nach kann die Leuchtdichte $L_{(\gamma)}$ maximal = 8717 cd/m² (= $L_{z\text{max}}$) betragen.

Laut Roy et al [28] werden die Breitengrade zwischen dem 50° nördlich und dem 50° südlich jedoch für den bedeckten Himmel nicht ausreichend richtig dargestellt.

3.2.2.3. Vergleich eigener Messwerte mit Leuchtdichtewerten nach CIE/DIN

Zweifel an der Gültigkeit der für CIE Overcast Sky vorgegebenen Formeln zur Leuchtdichteberechnung des Himmelsgewölbes führten zu einem eigenen Messprogramm, das von Januar bis Dezember 2001 durchgeführt wurde. Die relativ geringe Anzahl der Messwerte ist auf das seltene Vorhandensein eines gleichmäßig bewölkten Himmels zurückzuführen. Es wurden nur Messungen vorgenommen, wenn ausschließlich diffuse Strahlung vorhanden war. Kriterium hierfür war die fehlende Schattenbildung an den umliegenden Fassaden.

Die Messmethodik wurde unter dem Punkt „Eigene Messungen“ bereits näher ausgeführt.

Die Messungen wurden unregelmäßig, da abhängig von einer weitgehend homogenen Bedeckung, und in Zeitabständen von in der Regel mindestens einer Stunde durchgeführt. Nur in wenigen Ausnahmefällen wurden kürzere Messabstände zugelassen: Grund war dann durchgehend eine starke Änderung der Leuchtdichte trotz gleichbleibend homogener Bedeckung. An den Messtagen wurden in der Regel 1 – 4 Messungen vorgenommen.

Messgenauigkeit: die Abweichung aufgrund der Handmessung wird mit $\pm 2^\circ$ angenommen.

Das bedeutet für die jeweiligen Winkel folgende maximale prozentuale Abweichung:

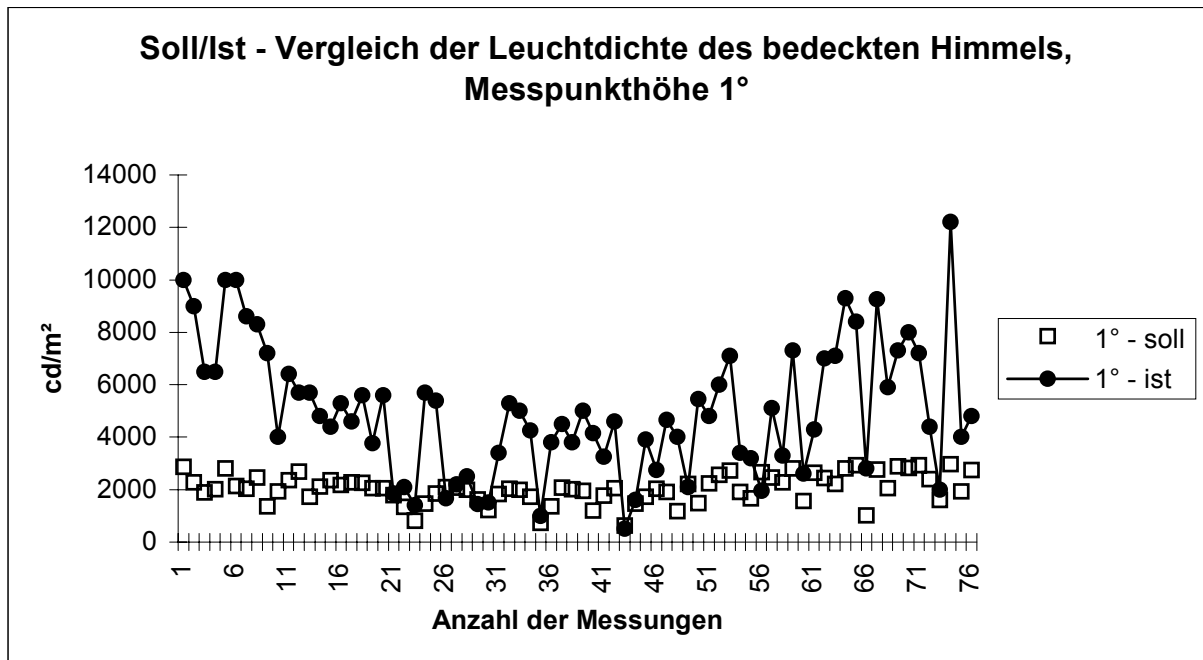
Abweichung/ γ_M	1°	15°	30°
- 2°	-	- 5%	-3%
+ 2°	+ 28°	+3%	+ 3%

Tabelle 3.3. Zu erwartender Messfehlerbereich aufgrund der Handmessung

Durch Markierungen am Fensterrahmen wurde das Einhalten des gewünschten Messwinkels weitestgehend gewährleistet.

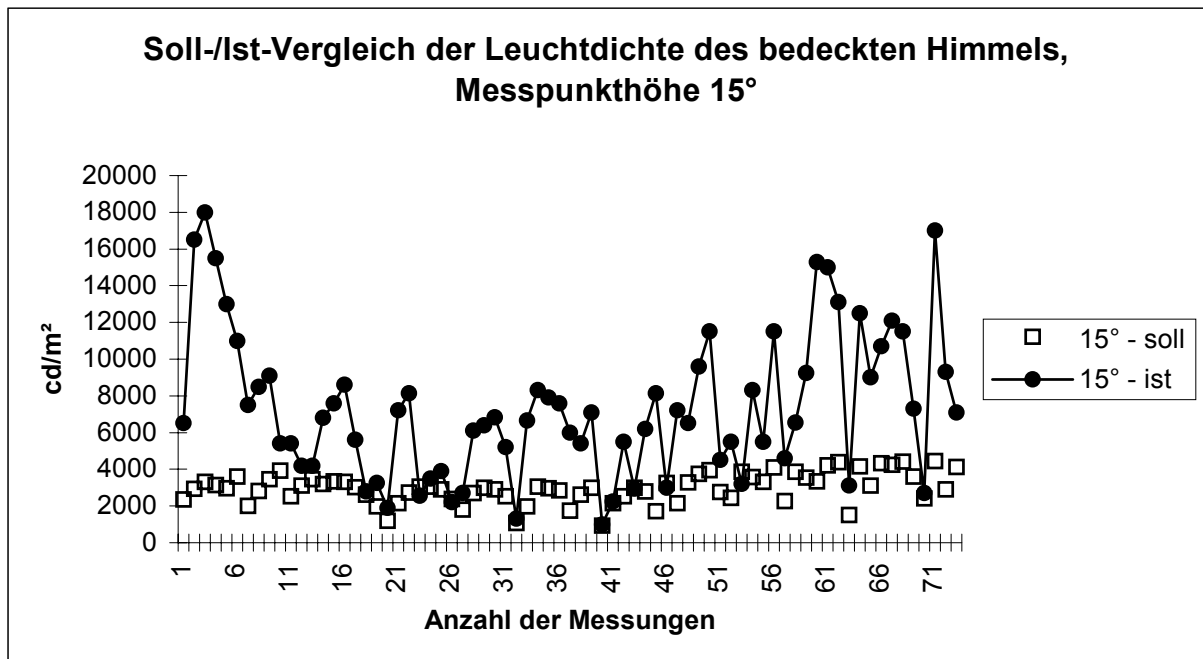
Auswertung der eigenen Messergebnisse (Ist) und Vergleich mit den rechnerisch nach DIN 5034 Teil 2 ermittelten zu erwartenden Leuchtdichtewerte (Soll)

Für Messpunkthöhe $\gamma_M = 1^\circ$:



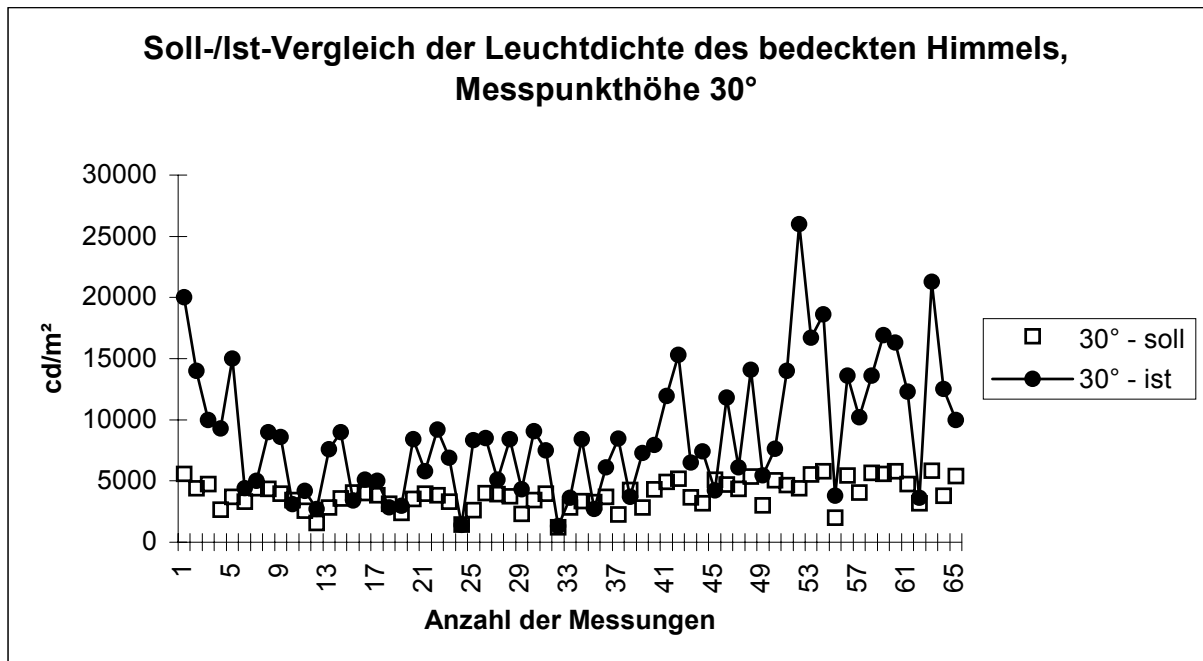
Grafik 3.12. Gemessene und errechnete Leuchtdichte des Himmelsgewölbes bei gleichmäßig bedecktem Himmel für $\gamma_M = 1^\circ$;

Für Messpunkthöhe $\gamma_M = 15^\circ$:



Grafik 3.13. Gemessene und errechnete Leuchtdichte des Himmelsgewölbes bei gleichmäßig bedecktem Himmel für $\gamma_M = 15^\circ$;

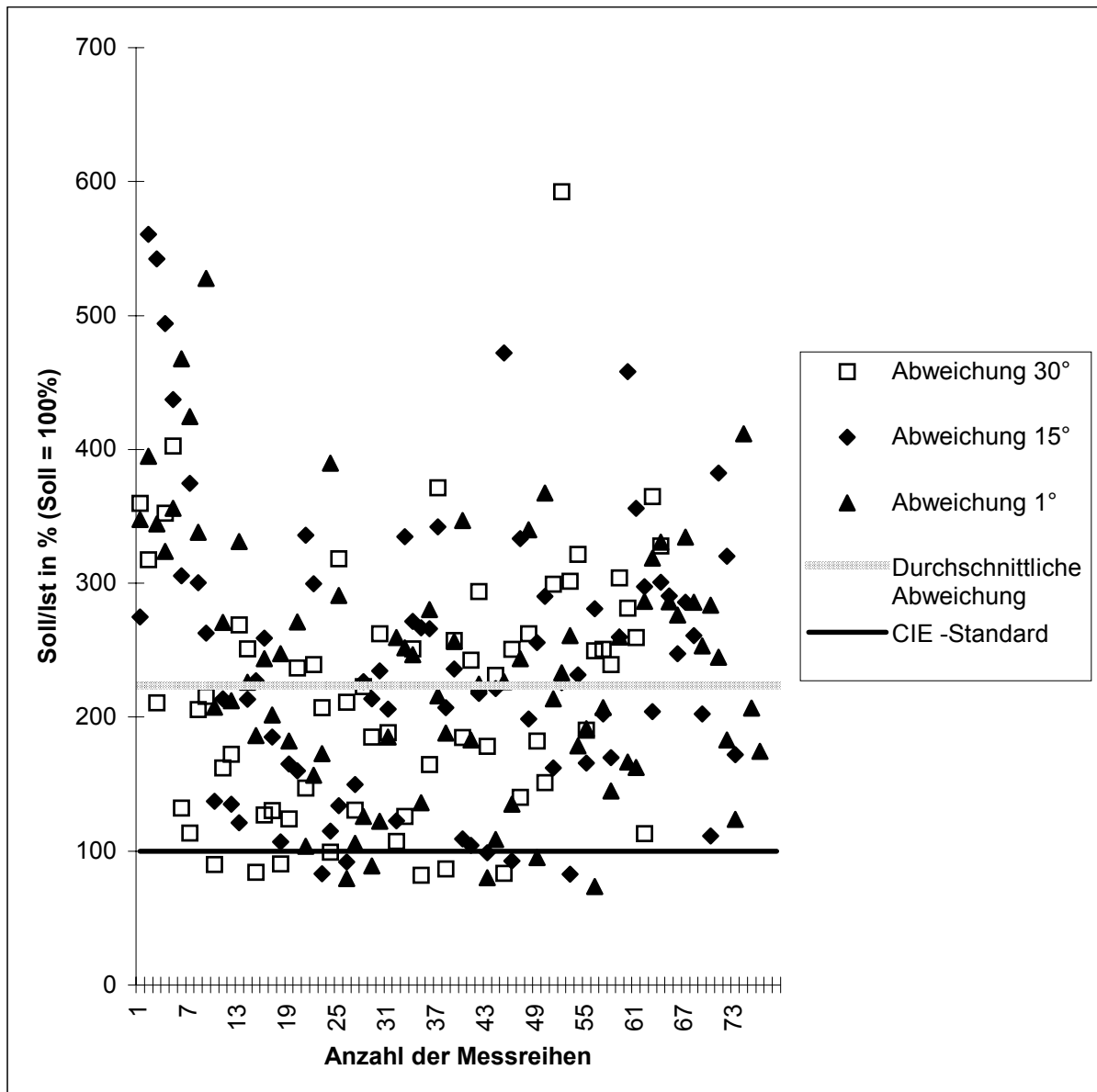
Für Messpunkthöhe $\gamma_M = 30^\circ$:



Grafik 3.14. Gemessene und errechnete Leuchtdichte des Himmelsgewölbes bei gleichmäßig bedecktem Himmel für $\gamma_M = 30^\circ$;

	Messpunkthöhe $\gamma_M = 1^\circ$	Messpunkthöhe $\gamma_M = 15^\circ$	Messpunkthöhe $\gamma_M = 30^\circ$
Anzahl der Messwerte	76	74	65
Maximale negative Abweichung	-27%	-17%	-18%
Maximale positive Abweichung	427%	461%	592%
Durchschnittliche Abweichung	+143%	+111%	+118%

Tabelle 3.4. Auswertung der Ist-/Soll-Abweichung (Soll-Wert entspricht 100%, die angegebenen Prozentzahlen stellen den tatsächlichen Unterschied zwischen Soll- und Ist-Wert dar)



Grafik 3.15. durchschnittliche Abweichung in % (Soll-Wert entspricht 100%, die angegebenen Prozentzahlen stellen den tatsächlichen Unterschied zwischen Soll- und Ist-Wert dar)

Analyse der Messungen

Es sind generell große Abweichungen zwischen der zu erwartenden Leuchtdichte nach CIE/DIN 5034 (Soll) und der tatsächlichen gemessenen Leuchtdichte (Ist) festzustellen. Die Abweichungen liegen im Durchschnitt bei 124%. Die in sich großen Unterschiede zwischen maximalen und minimalen Abweichungen sind auf verschiedene Faktoren zurückzuführen:

- die Bewölkung ist praktisch nie homogen: von einer leichten Schleierbewölkung, die in dieser Auswertung nicht berücksichtigt wurde, da optisch zu nahe am klaren Himmel, bis hin zu einer schwarzen Gewitterbewölkung (hierbei traten die geringsten Abweichungen vom Sollwert auf), fallen sehr unterschiedliche Leuchtdichten an

- die Tendenz abnehmender Abweichungen von Dezember bis Juni (Sommer bis Winter) ist auffällig: es könnte ein Indiz für höhere Abweichungen bei hohen Sonnenständen sein, da in der Regel eher um die Mittagszeit, also bei maximalen Sonnenhöhen, gemessen wurde. Ein weiterer Grund liegt möglicherweise in dem im Sommer höheren Wassergehalt der Luft.
- möglicherweise liegen die Probleme auch in der Kombination der Rotationssymmetrie des CIE-Modells und der Messung in nur eine Himmelsrichtung (Messrichtung $\alpha_M = 194^\circ$; Nord = 0°)

Fazit

Trotz der angesprochenen Ungenauigkeiten erfüllen die durchgeführten Messungen die beiden vordringlichsten Ziele:

- 1) es wurde der Anfang für eine Datenbank gelegt, die den bedeckten Himmel für den tropischen Standort Rio de Janeiro beschreibt und Anhaltspunkte hinsichtlich möglicher Blendung durch den vom Arbeitsplatz aus sichtbaren Himmel gibt (siehe Kapitel „Visueller Komfort“). Durch das relativ häufige Auftreten hoher und sehr hoher Leuchtdichten während der Messperiode gilt es, diesem Aspekt bei der Auslegung von Tageslichtkontrollsystemen eine besondere Bedeutung zukommen zu lassen.
- 2) die Zweifel von Roy et al [28] hinsichtlich der Gültigkeit des entsprechenden CIE – Modells wurden klar bestätigt.

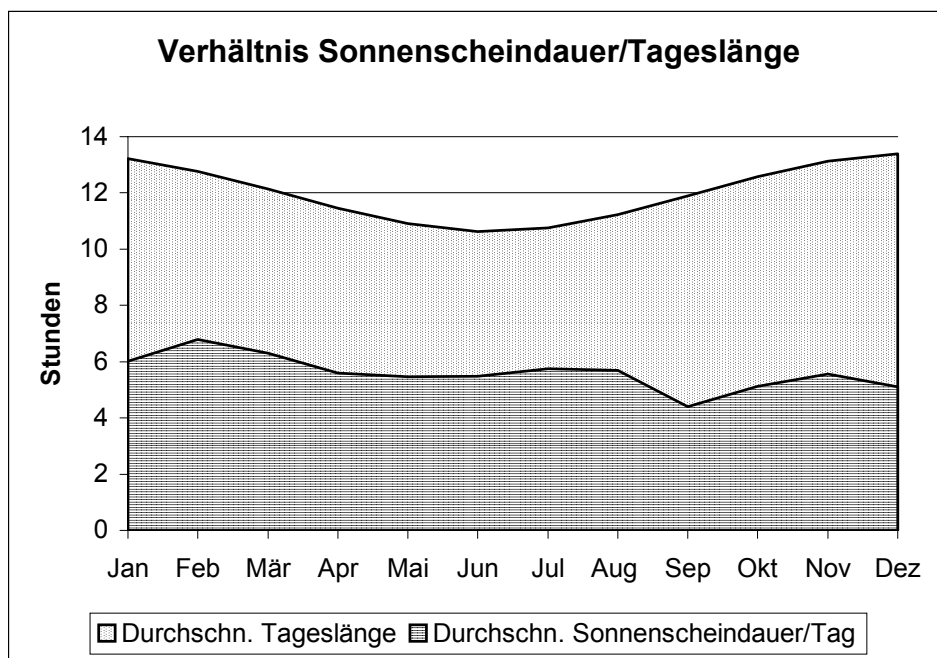
3.3. Quantitative Bestimmung des Tageslichtangebots

3.3.1. Sonnenschein-Wahrscheinlichkeit

Der Standort Rio de Janeiro verfügt über ein sehr gutes Tageslichtangebot mit 2046 Sonnenstunden pro Jahr. Diese verteilen sich relativ gleichmäßig über alle Monate, wie Tabelle 3.5. zeigt. Die Solarstrahlung beträgt im Jahr durchschnittlich 1679 kWh/m². Grundlage dieser Daten sind Messungen über 12 Jahre, von 1978 bis 1989 [31].

Jan	Feb	Mär	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez
6.02	6.79	6.29	5.60	5.46	5.49	5.74	4.70	4.40	5.12	5.56	5.10

Tabelle 3.5. durchschnittliche tägliche Sonnenscheindauer¹ in Stunden [31]



Grafik 3.16. Durchschnittliche tägliche Sonnenscheindauer in Stunden in Relation zur durchschnittlichen monatlichen Tageslänge [31]

¹ der Autor konnte keine Aussage darüber treffen, ob der Schwellenwert für die Bestrahlungsstärke 120 W/m² (seit 1982) oder 200 W/m² betrug

3.3.2. Wahrscheinlichkeit verschiedener Himmelszustände

Corbella [32] erarbeitete 1997 auf Grundlage der Daten für Rio de Janeiro, die er bereits für [31] verwendete, eine Aussage über die monatliche Wahrscheinlichkeit verschiedener Himmelszustände. Er errechnete das Verhältnis zwischen der tatsächlich gemessenen horizontalen Globalstrahlung und der theoretischen horizontalen Globalstrahlung bei klarem Himmel. Auf Grundlage dieser Ergebnisse werden fünf Bereiche des Bewölkungsindex, wie in Spalte 2 der Tabelle 3.6. aufgeführt, definiert.

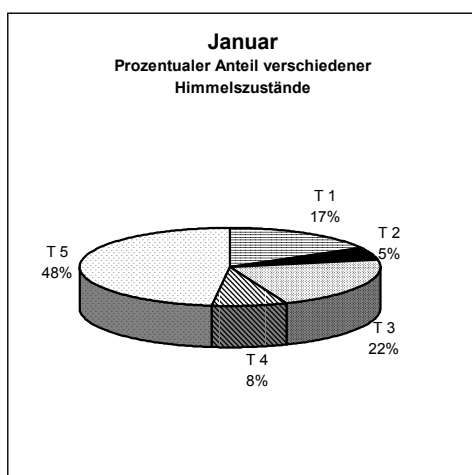
Es werden 5 Himmelszustände festgelegt:

Himmelstyp	Bereich des Bewölkungsindex	Zustand des Himmels
T 1	$0.00 \leq I_n < 0.05$	stark bewölkt
T 2	$0.05 \leq I_n < 0.20$	bewölkt
T 3	$0.20 \leq I_n < 0.70$	teilweise bewölkt
T 4	$0.70 \leq I_n < 0.90$	klar
T 5	$0.90 \leq I_n < 1.00$	total klar

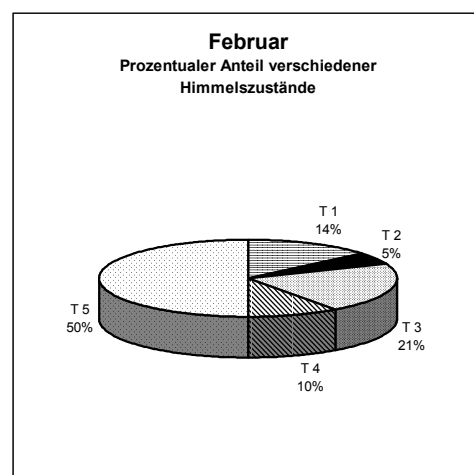
Tabelle 3.6. Definition der Himmelstypen in Abhängigkeit vom Bewölkungsindex [32]

$I_n = 1$, wenn tatsächlich gemessene Globalstrahlung = theoretischer Globalstrahlung

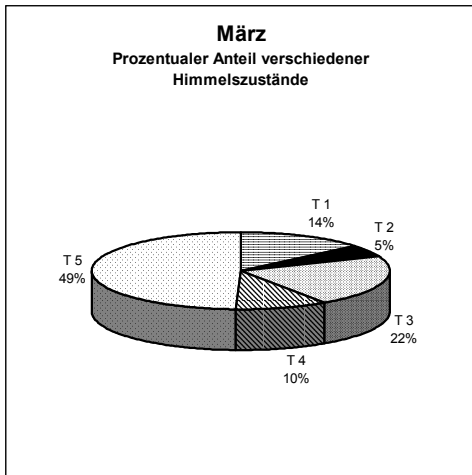
Im folgenden wird die prozentuale Verteilung der jeweiligen Himmelszustände für die einzelnen Monate grafisch dargestellt:



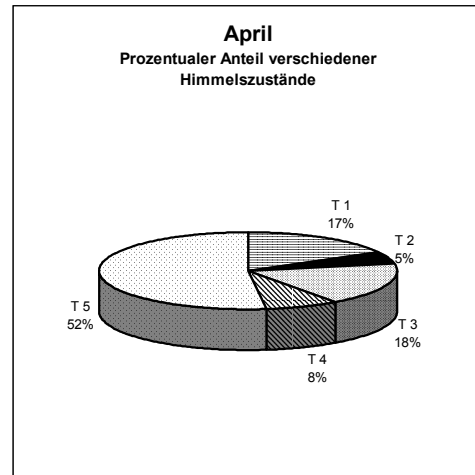
Grafik 3.17. Januar



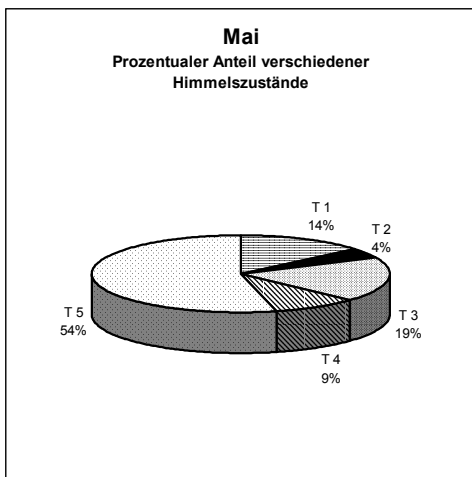
Grafik 3.18. Februar



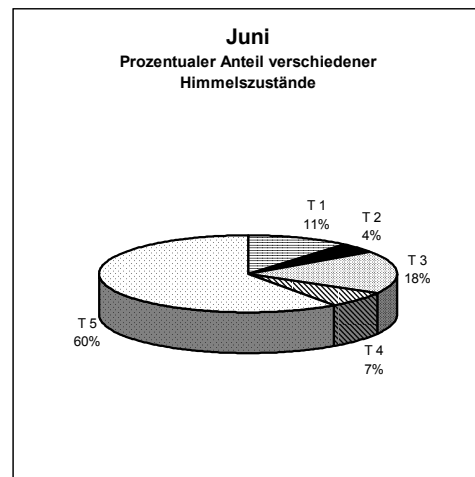
Grafik 3.19. März



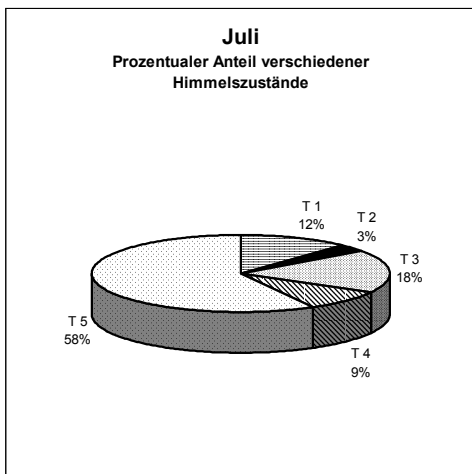
Grafik 3.20. April



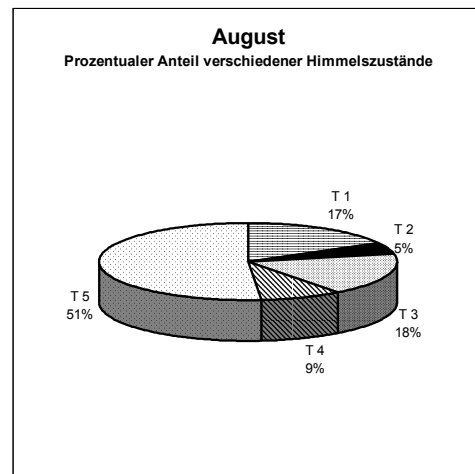
Grafik 3.21. Mai



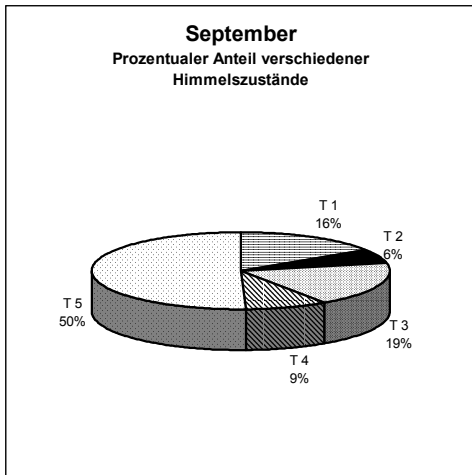
Grafik 3.22. Juni



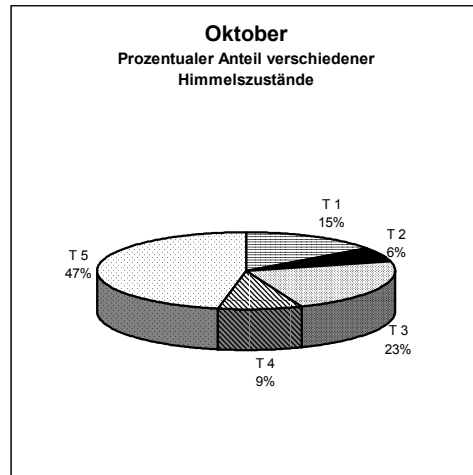
Grafik 3.23. Juli



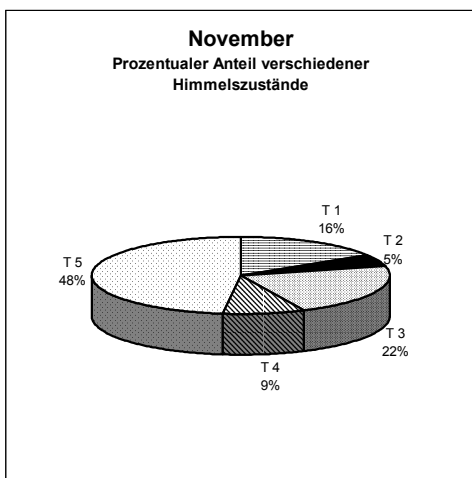
Grafik 3.24. August



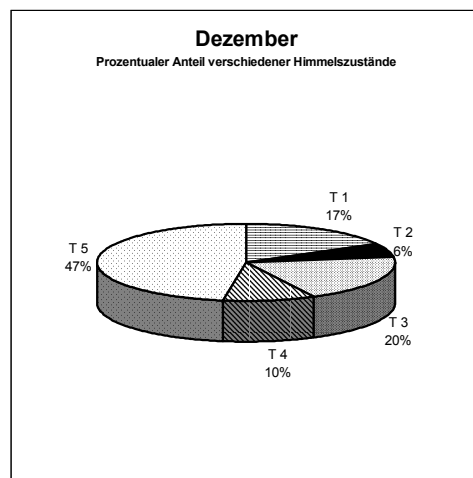
Grafik 3.25. September



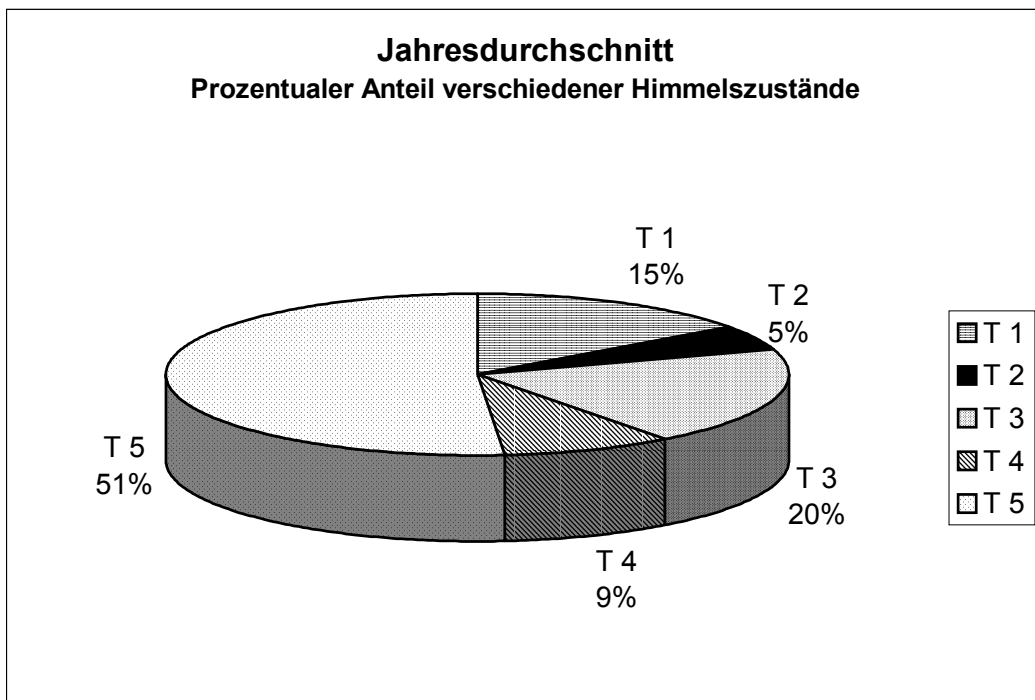
Grafik 3.26. Oktober



Grafik 3.27. November



Grafik 3.28. Dezember



Grafik 3.28. Prozentualer Anteil der verschiedenen Himmelszustände im Jahresdurchschnitt

In den vorangegangenen Grafiken wird deutlich, dass die monatlichen Unterschiede relativ gering sind. Der Jahresdurchschnitt kann damit als Grundlage für die im folgenden durchgeführte Aufteilung der Himmelszustände in 2 Gruppen – klarer Himmel mit Sonne und bedeckter Himmel – durchgeführt werden. Diese Aufteilung ist für eine quantitative Aussage über die Tageslichtautonomie der Tageslichtkontrollsysteme notwendig.

Anmerkung:

Anders als in vielen Städten in Äquatornähe, in denen in der Regel vormittags ein wolkenloser bis leicht bewölkter Himmel dominiert, der sich am Nachmittag bedeckt und wo es am Spätnachmittag zu kurzen, heftigen Regengüssen kommt, sind in Rio de Janeiro keine typischen tageszeitlich bedingten Himmelszustände zu beobachten.

3.3.3. Bedeckter Himmel in den Tropen (TOS Tropical Overcast Sky)

Die vorliegenden Angaben zur Tageslichtverfügbarkeit von Corbella [32] legen nahe, einen für die Auslegung von Tageslichtkontrollsystemen in den Tropen geeigneten bedeckten Himmel zu definieren. Dadurch wird auch die Berechnung der Tageslichtautonomie TA_x auf der Grundlage der von Corbella bereitgestellten Daten möglich.

In einem 1. Schritt werden zunächst die Himmelstypen T1 – T5 auf 2 Gruppen aufgeteilt:

- a) die bewölkten Himmel T1, T2 und T3 mit einem Gesamtbereich des Bewölkungsindex I_N von $0.00 \leq I_N < 0.70$ bilden die Gruppe T_{TOS} – bedeckte Himmel in den Tropen
- b) Die Himmelstypen T4 und T5 mit einem Gesamtbereich des Bewölkungsindex I_N von $0.7 \leq I_N < 1.00$ bilden als klare Himmel die Gruppe T_{CSS} . Durch die Relation der Bewölkungsindexe für T4 und T5 von 1:2 und einer prozentualen Verteilung von 18% : 100% (für Rio de Janeiro [32]), sowie zu einer wesentlichen Vereinfachung der Berechnungen wird zur Berechnung der Gruppe T_{CSS} die CIE – Formel für klare Himmel mit Sonne verwendet

In einem 2. Schritt wird durchschnittlicher Bewölkungsindex I_{TOS} für die Gruppe T_{TOS} berechnet. Die Berechnung von I_{TOS} findet durch eine Wichtung (gewogenes Mittel) mit den Jahresmitteln der Gruppen T1 bis T3 statt:

Es gilt:

$$I_{TOS} = \frac{\sum I_{nT1} * (I_{nT1max} / 2) + \sum I_{nT2} * (I_{nT1max} + I_{nT2max} / 2) + \sum I_{nT3} * (I_{nT2max} + I_{nT3max} / 2)}{(\sum I_{nT1} + \sum I_{nT2} + \sum I_{nT3})}$$

Auf Grundlage der Werte von Corbella (siehe Grafik Jahresmittel) ergibt sich daher für den Standort Rio de Janeiro ein durchschnittlicher Bewölkungsindex $I_{TOS(Rio)}$ wie folgt:

$$I_{TOS(Rio)} = (0,025 * 15\% + 0,125 * 5\% + 0,45 * 20\%) / (15\% + 5\% + 20\%) = 0,25$$

Diese Wichtung ist ortsabhängig und muss für jeden Standort neu durchgeführt werden.

Da die Relation zwischen CIE Clear Sky & Sun und CIE Overcast Sky nicht linear ist, besteht die Notwendigkeit, den Faktor $E_{HTOS(\gamma_S)}$ der jeweiligen Sonnenhöhe γ_S anzupassen.

dabei gilt:

$$E_{HCSS(\gamma_S)} = 100\%$$

$$E_{HTOS(\gamma_S)} = E_{HCSS(\gamma_S)} * I_{TOS}$$

$E_{HCSS(\gamma_S)}$	horizontale Beleuchtungsstärke bei klarem Himmel mit Sonne (CIE Clear Sky & Sun) in Abhängigkeit von der Sonnenhöhe, in [lx]
$E_{HOCS(\gamma_S)}$	horizontale Beleuchtungsstärke bei einem bedecktem Himmel (CIE Overcast Sky) in Abhängigkeit von der Sonnenhöhe, in [lx]
$E_{HTOS(\gamma_S)}$	horizontale Beleuchtungsstärke bei einem bedecktem Himmel in den Tropen (Tropical Overcast Sky) in Abhängigkeit von der Sonnenhöhe, in [lx]
I_{TOS}	der gewichtete Bewölkungsindex für den jeweiligen Standort

Für $I_{TOS(Rio)}$ ergibt sich damit folgendes $E_{HTOS(\gamma_S)}$:

γ_S	15°	30°	45°	60°	75°	90°
$E_{HCSS(\gamma_S)}$ in lx	17278	41615	61454	76340	87080	114323
$E_{HTOS(\gamma_S)}$ in lx	4320	10404	15364	19085	21770	28581

Tabelle 3.7. $E_{HTOS(\gamma_S)}$ für Rio de Janeiro; die Werte $E_{HCSS(\gamma_S)}$ wurden durch die *Siview* errechnet

Grundlage für die Berechnung des bedeckten Himmels in den Tropen stellt die CIE/DIN – Formel für bedeckte Himmel dar:

$$L_{(\gamma)} = L_Z * (1 + 2 * \sin \gamma) / 3$$

Es wird der Faktor $F_{TOS(\gamma_S)}$ in die Formel eingeführt. Er stellt sicher, dass die horizontale Beleuchtungsstärke bei bedecktem Himmel $E_{HTOS(\gamma_S)}$ immer I_{TOS} der horizontalen Beleuchtungsstärke $E_{HCSS(\gamma_S)}$ bei klarem, sonnigen Himmel beträgt.

Die dafür gültige Formel lautet dann:

$$L_{TOS(\gamma)} = L_Z * F_{TOS(\gamma)} * (1 + 2 * \sin \gamma) / 3$$

dabei ist:

$L_{TOS(\gamma)}$ Leuchtdichte von Himmelspunkten, die um den Winkel γ vom Horizont entfernt sind, in $[cd/m^2]$

L_Z die Zenitleuchtdichte, in $[cd/m^2]$

$F_{TOS(\gamma)}$ der Korrekturfaktor für tropische bedeckte Himmel

Aus dem Verhältnis zwischen dem Ergebnis der CIE-Formel für bedecktem Himmel $E_{HOCS(\gamma_S)}$ und dem ermittelten Wert $E_{HTOS(\gamma_S)}$ ergibt sich der Faktor $F_{TOS(\gamma_S)}$:

γ_S	15°	30°	45°	60°	75°	90°
$E_{HOCS(\gamma_S)}$ in lx	5093	9571	13435	16377	18221	18880
$E_{HTOS(\gamma_S)}$ in lx	4320	10404	15364	19085	21770	28581
$F_{TOS(\gamma)}$	0,85	1,09	1,14	1,17	1,20	1,51

Tabelle 3.8. Korrekturfaktor F_{TOS} für Rio de Janeiro; die Werte $E_{HOCS(\gamma_S)}$ wurden durch *Siview* errechnet

3.4. Fazit „Tageslicht in den Tropen“

Der Vergleich der Messergebnisse für die horizontale Beleuchtungsstärke mit den errechneten Werten nach DIN/CIE für klaren Himmel und Sonne ergab eine ausreichend gute Übereinstimmung. Die Übereinstimmung der Messwerte und der durch den Siview/Radiance ermittelten Ergebnisse kann aus den unter dem entsprechenden Kapitel aufgeführten Gründen als zufriedenstellend angesehen werden.

Die großen Unterschiede zwischen den Mess- und Rechenwerten bei der Leuchtdichte bei bedecktem Himmel sollten in Zukunft zu einer genaueren Untersuchung dieses Phänomens

führen. Die direkten Auswirkungen hinsichtlich der Blendwirkung wird im Kapitel „Visueller Komfort“ näher untersucht.

Durch die Einführung des „bedeckten tropischen Himmels“ (Tropical Overcast Sky TOS) werden bewölkte und bedeckte Himmel zusammengefasst. Zusammen mit der Festlegung der Gruppe „klare Himmel“ wird aufgrund der Vereinfachung die Grundlage für eine quantitative Bewertung (Tageslichtautonomie) der Tageslichtkontrollsysteme gelegt.

4. Visueller Komfort

Nach der Beschreibung des Tageslichtes in Rio de Janeiro und der Bestimmung des Tageslichtangebots ist nun eine Untersuchung und Definition des visuellen Komforts notwendig.

Die meisten Empfehlungen für die Belichtung mit Tageslicht in Tropen weisen auf die unerwünschte thermische Komponente hin und schlagen daher kleine Fensteröffnungen vor. Als Größenordnung werden 15-20% der Außenwandfläche angegeben [33]. Damit werden Flächen in Fensternähe gut belichtet, weiter entfernt liegende Raumteile liegen dagegen im Dämmerlicht. Lichtintensive Aufgaben können am Fenster verrichtet werden, in der Regel reicht das Rücken eines Stuhles und gegebenenfalls eines Tisches. Blendungen kann man ebenfalls problemlos ausweichen, indem man sich vom Fenster entfernt oder die Fensteröffnungen über dem Augenhorizont anordnet. In anderen Beispielen der vernakularen Architektur werden die Dächer mit einem großen Vorsprung versehen, um so die aufgrund ihres thermischen Eintrags ungewünschte Solarstrahlung von den Hauswänden fern zu halten. Auf der so entstandenen Veranda können wiederum lichtintensive Tätigkeiten wahrgenommen werden [34].

Dabei wird in der Regel jedoch von Wohnhäusern ausgegangen. Die Flächennutzung in Wohnhäusern unterscheidet sich jedoch grundlegend von der in Bürogebäuden üblichen: die in Wohnhäusern vorhandene Flexibilität ist in Bürogebäuden aus Gründen der Wirtschaftlichkeit nicht gegeben. Insbesondere durch die Arbeit an Bildschirmen reagiert der Nutzer sehr empfindlich auf Blendung und mangelhafte Gleichmäßigkeit bei der Beleuchtung.

Der visuelle Komfort spielt für das menschliche Wohlbefinden und die menschliche Produktivität eine ganz wesentliche Rolle. Dabei kann zwischen physiologischem und psychologischem Komfort unterschieden werden:

Der physiologische Komfort hängt von den biologisch-technischen Parametern ab. Das heißt physiologische Blendung, Kontrast, Gleichmäßigkeit der Beleuchtung und Beleuchtungsstärke werden berücksichtigt. Somit steht die Sehleistung im Mittelpunkt. Dagegen wird der psychologische Komfort durch Farben, Materialien, Lichttemperatur, Tageslichtdynamik und psychologischer Blendung beeinflusst.

William Lam, der sich in seinem Buch „Sunlighting as formgiver for architecture“ [35] mit den unterschiedlichen Faktoren der Beleuchtung auseinandersetzt, unterscheidet zwischen den „Activity needs for visual information“ und den „biological information needs“. Die Kriterien

für „Activity needs“, die die zu „beleuchtenden“ Tätigkeiten nach Priorität und Häufigkeit sowie nach Art analysieren, führen zu einer quantitativen Aussage über die notwendige Beleuchtung. Die „biological needs“ berücksichtigen die Notwendigkeiten der zeitlichen und räumlichen Orientierung, der Erfüllung des Sicherheitsbedürfnisses, der Anforderungen hinsichtlich der Kommunikationszonen und definierten Privatbereichen. Dadurch lässt sich der Grad des visuellen Komforts einschätzen.

Die Grundfunktionen des Auges bestehen u.a. aus der Fähigkeit zur Unterscheidung von Leuchtdichtedifferenzen, das Wahrnehmen von Formen sowie die Geschwindigkeit der Wahrnehmung von Leuchtdichteunterschieden und Formen. „Dabei hängen die Werte der Grundfunktionen entscheidend davon ab, an welches mittlere Leuchtdichteniveau sich das Auge adaptiert hat [36]. Durch die bei eigenen Messungen festgestellten hohen Leuchtdichtewerte (siehe Kapitel „Tageslicht in den Tropen“) gilt es zu untersuchen, ob in den Tropen andere maximal tolerierbare Leuchtdichtewerte gelten als in gemäßigten Breitegraden.

Es gilt dabei heutzutage insbesondere die Anforderungen für Bildschirmarbeitsplätze zu berücksichtigen, da diese in zunehmenden Umfang als Standardarbeitsplatz anzusehen sind. Aufgrund der Tatsache, dass der Bildschirm durch seine in der Regel gläserne Oberfläche zu Spiegelungen neigt, gilt es eine besonders sorgfältige Auslegung der Beleuchtung, sowohl für Kunst- als auch für Tageslicht, durchzuführen.

Es sind bisher keine Untersuchungen bekannt, die sich speziell mit dem Thema „Tageslicht in den Tropen“ beschäftigen. Um nun verschiedene Tageslichtkontrollsysteme zu bewerten, ist somit nötig, zunächst alle bekannten Parameter auf ihre „Tropentauglichkeit“ hin zu überprüfen und in einigen Fällen eigene Untersuchungen durchzuführen.

Die nun folgende Darstellung hat zum Ziel, die für die qualitative und quantitative Bewertung von Tageslichtsituationen in Büroräumen notwendigen Parameter zu diskutieren und festzulegen.

4.1. Physiologischer Komfort

4.1.1. Beleuchtungsstärke

Die Beleuchtungsstärke ist der am häufigsten benutzte Parameter, wenn es darum geht, einen Mindeststandard für die Beleuchtung zu definieren. In vielen Ländern stellt die Beleuchtungsstärke den einzigen Parameter zur Beurteilung von Innenraumbeleuchtung dar.

4.1.1.1. Brasilianische Vorschriften

Der brasilianische Verband für technische Normen (ABNT-Associação Brasileira de Normas Técnicas) stellt in der Norm NBR 5413 „Iluminância de interiores“ (Innenraumbeleuchtung) sehr detailliert die Anforderungen für die Innenraumbeleuchtung auf. Dabei wird, wenn nicht anders vom Planer vorgegeben, die Messhöhe mit 0,75 cm angegeben. Für spezielle Tätigkeiten, die hohe Beleuchtungsstärken am Arbeitsplatz fordern, kann eine individuelle Arbeitsplatzbeleuchtung zugeschaltet werden.

Die minimale Beleuchtungsstärke darf nicht weniger als 1/10 der Beleuchtungsstärke am Arbeitsplatz betragen, selbst wenn die Empfehlung niedrigere Grenzen vorsieht.

Es wird empfohlen, dass in keinem der Punkte die Beleuchtungsstärke weniger als 70% des in der NBR 5382 – Überprüfung der Beleuchtungsstärke in Innenräumen – festgelegten Wertes beträgt.

In Tabelle 1 der Norm werden die Beleuchtungsstärken nach visuellen Aufgaben festgelegt.

In Tabelle 2 der Norm werden 3 Faktoren gewichtet, die für eine angemessene Beleuchtung von Bedeutung sind: Alter (<40, 40-55,>55 Jahre), Geschwindigkeit und Präzision (ohne Bedeutung, Wichtig, Kritisch) und der Reflexionsgrad im Hintergrund der Aufgabe (>70%, 30-79%, <30%). Über diese Wichtung wird anschließend einer der drei für die jeweiligen Räume angegebene Beleuchtungsstärkewerte ausgewählt.

Für Büros sind dabei folgende Werte ausschlaggebend:

Bürotyp	Unterer Wert in [lx]	Mittelwert in [lx]	Oberer Wert in [lx]	NBR 5413 Kapitel
Buchhaltung, Sachbearbeitung	750	1000	1500	5.3.14
Zeichenbüro, Ingenieurbüro	750	1000	1500	5.3.14
Skizzen, Zeichnungen	300	500	750	5.3.14
Bildschirmarbeitsplatz	300	500	750	5.3.70

Tabelle 4.1. Beleuchtungsstärke für verschiedene Bürotätigkeiten in Brasilien [37]

Die brasilianische Norm NBR 5382 legt für verschiedene Kunstlichtsituationen in rechteckigen Räumen die jeweilige Messmethodik fest. Die Messhöhe beträgt nach der NBR 5382 80 cm, nach der NBR 5413 sind es 75 cm. Mit Hilfe der Messergebnisse wird die mittlere Beleuchtungsstärke errechnet.

4.1.1.2. Internationaler Vergleich

Die Minimalanforderungen für Beleuchtungsstärke in Büroräumen sind weltweit ähnlich. Die Unterschiede reflektieren die jeweilige Priorität, so die Arbeitseffizienz gegenüber der Energieeinsparung. Damit sind die hohen Beleuchtungsstärken der US-Amerikaner zu erklären, bei denen an erster Stelle die Arbeitseffizienz steht, während bei den anderen zum Vergleich herangezogenen Ländern ein Kompromiss zwischen Energieeffizienz und Arbeitseffizienz gebildet wurde.

	Computerarbeitsplätze in [lx]	Schreibmaschinen in [lx]	Zeichnen in [lx]	Bürräume allgemein
Deutsche Norm [38]	500	500	750	500 - 1000
US Norm [41]	1500	1500	2000	1000
Brasilianische Norm [35]	-----	300-750	750 - 1500	750 - 1500
Australische Norm ¹ [42]	320 - 600	320	600	320

Tabelle 4.2. Anforderung an Beleuchtungsstärke in Büroräumen, verschiedene Länder

4.1.1.3. Grenzwert für die vertikale Beleuchtungsstärke E_{VIC} am Bildschirm

Für die Auslegung des Sonnenschutzes ist ein klarer Grenzwert für die vertikale Beleuchtungsstärke am Bildschirm E_{VIC} notwendig. Simulationen mit Jalousien haben ergeben, dass sich auch bei einer völligen Ausblendung der direkten Sonnenstrahlung durch eine entsprechende Stellung der Lamellen hohe vertikale Beleuchtungsstärken ergeben können (siehe Anhang IV). Durch ein weiteres Schließen der Jalousien, das deutlich über die reine Vermeidung der direkten Sonnenstrahlung hinausgeht, muss die vertikale Beleuchtungsstärke entsprechend reduziert werden. Allerdings bedeutet eine Reduzierung der vertikalen Beleuchtungsstärke gleichzeitig eine oft deutliche Verschlechterung der Ausleuchtung der Raumtiefe mit Tageslicht. Es gilt daher, einen praktikablen Kompromiss zwischen der Begrenzung der

¹ in der australischen Norm werden Werte für die sogenannte „maintenance illuminance“ angegeben, d.h. Minimalwerte, die an jeder Stelle zu jeder Zeit eingehalten werden müssen.

Reflexe am Bildschirm und dem Wunsch nach einer guten Tageslichtnutzung auch in der Raumentiefe zu finden.

Bartenbach [43] schlägt eine Begrenzung der vertikalen Beleuchtungsstärke E_v auf 100 – 120 lx vor, ausgehend von herkömmlichen Röhrenmonitoren.

Methodik

Um einen klaren Grenzwert für die vertikale Beleuchtungsstärke E_{VIC} am Bildschirm festlegen zu können, wurden mit 3 verschiedenen Monitortypen, einem TFT 14,1" – Bildschirm (Laptop), einem TFT 15,1" - Monitor und einem 14" Röhrenmonitor (Samsung SyncMaster 3Ne/Baujahr Okt.1996), Versuche durchgeführt. Alle 3 Bildschirme wurden dabei abwechselnd von einem Laptop aus bedient und als Arbeitsmittel verwendet, um so eine realistische Situation unter üblichen Arbeitsbedingungen als Grundlage der Beurteilung zu erreichen. Es wurden mehrere Messreihen in den Monaten Februar, September und Oktober 2001 durchgeführt.

Die unterschiedlichen Beleuchtungsstärken am TFT 14,1"-Bildschirm wurden durch ein Drehen in Richtung der Tageslichtquelle Fenster erzeugt.

Für den Röhrenmonitor war diese Vorgehensweise aufgrund der hohen Reflexempfindlichkeit nicht möglich. Sobald sich das Fenster im Bildschirm abbildete wurde der Reflex zu stark, selbst bei einer relativ niedrigen Beleuchtungsstärke von $E_{VICmax} = 156$ lx. Die Variation in der Beleuchtungsstärke ergab sich daher durch die sich im Tagesverlauf ändernde äußere vertikale Beleuchtungsstärke E_{va} . Der größere TFT – Monitor wurde mit der gleichen Systematik überprüft.

Die Untersuchungen wurden jeweils an zwei unterschiedlichen Bildschirmhintergründen durchgeführt:

- a) Positiv-Darstellung (weißer Hintergrund), üblich in Textverarbeitungs- und Tabellenkalkulationsprogrammen, und
- b) Negativ-Darstellung (schwarzer Hintergrund), üblich bei der Verwendung von CAD-Programmen.

Neben der vertikalen Beleuchtungsstärke im Reflexionsfleck am oberen linken Bildschirmrand (E_{Vcmax}) wurde die vertikale Beleuchtungsstärke in Bildschirmmitte (E_{VIC}), an der Wand hinter dem Bildschirm (E_{VCH}) und parallel zur Fassade (E_{VI}) gemessen.

Für die Messungen wurde ein handgehaltenes Klasse 2 Luxmeter verwendet.

Die Ergebnisse der Beleuchtungsstärkemessung wurden für Werte über 1000 lx auf 50er Schritte auf- oder abgerundet.

Ergebnisse

a) Positiv-Darstellung (weißer Hintergrund)				
E_{VCmax} im Reflexions- Flecken	E_{VC} in Bildschirm- Mitte	E_{VCH} im Hinter- grund	E_{VI} am Arbeitsplatz parallel zur Fassade	Bemerkung
Röhrenbildschirm				
750	500	400	1400	ok
1150	700	600	3000	leichte Reflexion, insgesamt ok
1600	1100	800	4400	Reflexion links oben, Augenirritation, Licht- druck durch E_{VI}
1750	1200	1110	5500	unangenehme Reflexion, E_{VI} sehr unange- nehm = als Lichtdruck spürbar und ther- misch unangenehm
14,1" TFT - Schirm				
1300	1120	1120	5.200	keine Reflexe, E_{VI} stört kaum
1500	1200	1120	6.000	keine Reflexe, E_{VI} als Wärmestrahlung un- angenehm spürbar
1970	1650	1150	6.500	keine Reflexe, E_{VI} = Wärmestrahlung
2000	1200	1150	6.500	Kontrast am Monitor wird schwach, E_{VI} = unangenehme Wärmestrahlung, wurde als für E_{VIC} als Grenzbereich empfunden
2600	2450	1900	6.500	Monitor noch lesbar, aber zu hell; Wärme- und Lichtdruck von links
15,1" TFT - Schirm				
1800	1750	1500	7000	ok; leicht spürbare Wärmestrahlung
1900	1700	1500	6000	ok
2000	1750	1700	6500	ok leicht spürbare Wärmestrahlung
2100	1700	1600	7000	ok leicht spürbare Wärmestrahlung
2200	1800	1600	7700	ok, leicht spürbare Wärmestrahlung
2500	2400	1800	7000	ok, leicht spürbare Wärmestrahlung
3100	2900	2200	9600	Kontrast schwächer, Licht- und Wärmedruck
3400	3000	2000	13500	Leichte Reflexe, zu hell, spürbare Licht- und Wärmestrahlung
4200	4000	2700	16500	Reflexe, zu hell, starke Licht- und Wärme- strahlung

Negativ-Darstellung (schwarzer Hintergrund)				
Röhrenbildschirm				
380	260	200	760	ok
750	500	380	1400	ok
950	840	380	1400	Spiegelung
1040	650	1370	5000	Arbeiten noch möglich, aber unangenehm – nur kurzzeitig möglich; E_{VI} = starke Lichtstrahlung
1140	720	600	3.000	Arbeiten noch möglich, aber unangenehm
1618	1080	800	4400	Eigenspiegelung; hohe unangenehme Lichtstrahlung durch E_{VI} ;
1750	1200	1110	5500	Arbeiten noch möglich, aber sehr unangenehm; E_{VI} = starke Licht- und Wärmestrahlung
14,1" TFT - Bildschirm				
1300	1120	1120	5.200	ganz leichte Reflexe, keine Störung
1500	1200	1120	6.000	leichte Reflexe, E_{VI} erzeugt leichte Licht- und Wärmestrahlung
1540	630	1150	6.500	visueller Komfort ok; E_{VI} = Wärme
1980	1660	1150	6.500	Reflexe bereits zu stark; E_{VI} unangenehm (Lichtdruck + Wärme)
15,1" TFT - Bildschirm				
500	500	400	1800	gut
1300	1100	1100	4000	ok, jedoch bereits leichte Reflexe am Monitor
1900	1600	1600	7000	ok, leichte Reflexe am Monitor
2000	1700	1400	7000	Reflexe
2400	2000	1800	7700	Reflexe, Arbeit noch möglich
3500	3200	2300	9500	relativ starke Reflexe, spürbare Licht- und Wärmestrahlung

Tabelle 4.3. Messungen der vertikalen Beleuchtungsstärke in lux am Monitor

Fazit

Zwischen den drei Bildschirmen bestehen große qualitative Unterschiede.

Die TFT-Bildschirme sind weitaus weniger empfindlich hinsichtlich der Reflexe als die konventionellen Röhrenbildschirme. Bei den verwendeten TFT-Schirmen wurde eine weitgehende Reflexionsfreiheit festgestellt, die Verwendung des untersuchten Röhrenmonitor war dagegen durch die Reflexionsempfindlichkeit deutlich eingeschränkt. Es ergab sich ein Reflexionsfeld von $\pm 50^\circ$ links und rechts der Blickachse (siehe Abbildung 4.1.).

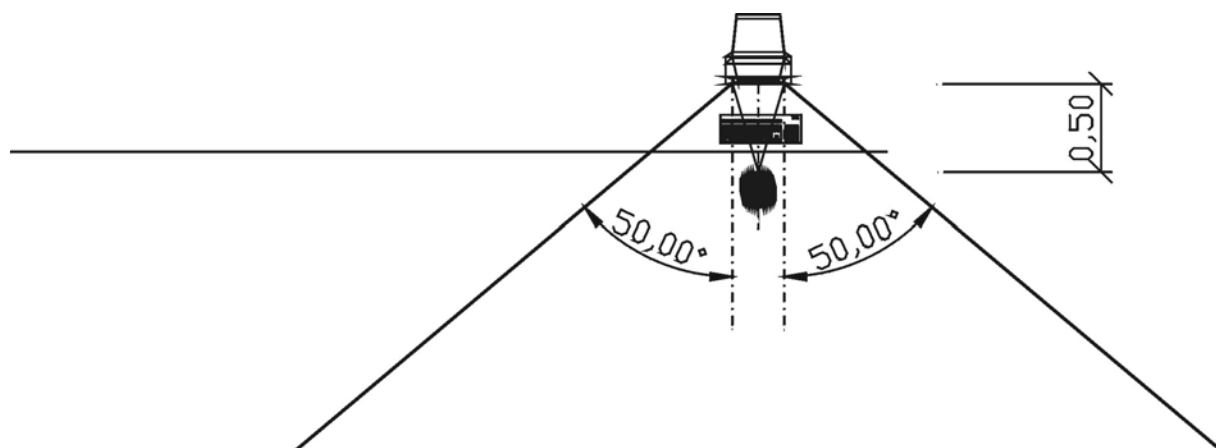


Abbildung 4.1. „Reflex-Einzuugsgebiet“ des getesteten 14" - Röhrenmonitors

Dieses Feld sollte unter allen Umständen von hellen Flächen mit hoher Leuchtdichte wie Fenster freigehalten werden.

Der größere TFT-Schirm ist dem kleineren hinsichtlich der Grenze für E_{VIC} etwas überlegen, hier sind deutlich höhere Werte zulässig. Das kann jedoch auch an der größeren Helligkeit des 15,1" – Monitors (144 cd/m^2 in Monitormitte bei weißem Hintergrund) liegen, gegenüber 105 cd/m^2 , (annähernd zeitgleiche Messung) beim 14,1"-TFT-Monitor.

Die Festlegung der Grenzwerte für die vertikale Beleuchtungsstärke E_{VIC} kann nicht absolut erfolgen. Die Grenzen werden neben den gemessenen Beleuchtungsstärken E_{VICmax} an den Reflexionsflecken am Bildschirm auch durch die Beleuchtungsstärke an den übrigen Flächen im Bildschirm sowie durch die vertikale Beleuchtungsstärke E_{VCH} des Hintergrundes des Arbeitsplatzes beeinflusst. Auch die Einstellung des Monitors hinsichtlich der Helligkeit und des Kontrastes beeinflussen die Grenzen zwischen Komfort und mangelhaftem Komfort. Ferner gilt es zu berücksichtigen, dass die Untersuchungen an einem realen Arbeitsplatz in Fenster-nähe durchgeführt wurde, so dass die Toleranz größer sein dürfte als bei Untersuchungen unter Kunstlichtbedingungen im Labor. Problematischer als die reine vertikale Beleuchtungsstärke E_{VIC} sind Reflexe, die durch sehr helle Objekte im Hintergrund ausgelöst werden, so z.B. die sonnenbeschienenen Fassaden von Nachbargebäuden. Die folgenden Empfehlungen sind in diesem Zusammenhang zu sehen.

Bei dem direktem Vergleich zwischen dem konventionellen Röhrenbildschirm und den TFT-Bildschirmen führte die Arbeit am Röhrenbildschirm durch leichtes Flimmern zu Unbehagen, so dass dieses als weiterer Irritationsfaktor berücksichtigt werden muss. Ferner fiel bei den Untersuchungen auf, dass eine hohe vertikale Beleuchtungsstärke E_{VI} zu Unbehagen führte, eine Erkenntnis, die auch bei den Leuchtdichteuntersuchungen zutraf. Die damit auftretende asymmetrische Beleuchtungssituation, in der sich jedes Auge versucht, auf eine andere Beleuchtungsstärke zu adaptieren, ist äußerst unangenehm. Diese Asymmetrie wurde z.B. bei $E_{VI} = 5000 \text{ lx}$ und $E_{VICH} = 1350 \text{ lx}$ festgestellt.

Empfehlung

	a) Positiv - Darstellung		b) Negativ - Darstellung	
	E_{VICmax}	E_{VI}	E_{VICmax}	E_{VI}
Röhrenmonitor	1.000 lx	5.000 lx	500 lx	4.000 lx
14,1" TFT - Schirm	2.000 lx	5.000 lx	1.500 lx	5.000 lx
15,1" TFT - Schirm	2.500 lx	5.000 lx	2.000 lx	5.000 lx

Tabelle 4.4. Empfehlungen für die maximale vertikale Beleuchtungsstärke am Bildschirm (E_{VICmax}) und parallel zur Fassade im Kopfbereich (E_{VI})

Es muss an dieser Stelle darauf hingewiesen werden, dass die durchgeführten Untersuchungen zwar unter regulären Arbeitsbedingungen durchgeführt wurden, es aber keine Optimierung in der Arbeitsleistung durch verschiedene vertikale Beleuchtungsstärken untersucht wurden. Daher sind die Empfehlungen als Orientierungswerte zu betrachten.

Als Grenzwert für den 14,1" TFT-Monitor im Fall a) ergab sich eine maximal empfehlenswerte Beleuchtungsstärke $E_{VIC} = 2.000$ lx, für den 15,1" – TFT-Monitor ein Wert von $E_{VIC} = 2.500$ lx, für Röhrenmonitore ein Wert von $E_{VIC} = 1.000$ lx. Im Fall b) liegt die empfehlenswerte maximale Beleuchtungsstärke für 14,1" TFT-Schirme bei 1.500 lx, bei dem 15,1"-TFT-Monitor bei 2.000 lx und bei dem untersuchtem Röhrenmonitor bei 500 lx.

Die TFT-Schirme sind damit deutlich besser für höhere vertikale Beleuchtungsstärken geeignet als Röhrenschirme und ihr Einsatz so insbesondere für fensternahe Arbeitsplätze angezeigt, zumal sie nicht der Einschränkung durch das Reflexionsfeld unterliegen.

Die empfohlenen Grenzwerte für E_{VI} vom 4000 bzw. 5000 Lux entsprechen einer Wärmestrahlung von etwa 44 bzw. 55 W/m² (Umrechnung: 1 W/m² ~ 92 lx – DIN 5034 Teil 2). Damit liegen sie nur knapp über dem Bereich I (≤ 35 W/m²) und am unteren Ende des Bereiches II (> 35 W/m² und < 300 W/m²; bei Lufttemperaturen von 15 – 25°C; bei einer Einstrahlung auf mehr als 50% der Körperoberfläche) der Beurteilung der Wärmestrahlung nach DIN 33403 Teil 3 [44]. Für den Bereich I ist kein arbeitsbelastender Einfluss durch die Wärmestrahlung anzunehmen. Das entspricht annähernd den eigenen Messungen, zudem bei einem Arbeitsplatz in Fensternähe nur ein geringer Anteil der Körperoberfläche dieser Wärmestrahlung ausgesetzt ist.

mestrahlung ausgesetzt ist. Diese können somit für die Auslegung der Tageslichtkontrollsysteme verwendet werden.

4.1.2. Tageslichtquotient D

Der Tageslichtquotient ist eine in Europa wichtige Größe bei der Beurteilung von Tageslichtsystemen. In Brasilien wird dieses Kriterium bisher nicht berücksichtigt.

Der Tageslichtquotient D bezieht sich auf einen bedeckten Himmel nach CIE. Nun wurden bei eigenen Messungen (siehe Kapitel „Tageslicht in den Tropen“) deutliche Abweichungen von der für die Leuchtdichte bei bedecktem Himmel nach CIE errechneten Werten festgestellt. Da die Messungen jedoch nur für 1° , 15° und 30° vorgenommen wurden und insbesondere die Zenithleuchtdichte fehlt, können diese Werte für die Bestimmung des Tageslichtquotienten nicht herangezogen werden.

Da D zudem für eine Raumtiefe wie die des in der Folge angenommenen virtuellen Raumes von 10,0 m nicht vorgesehen ist, wird auf die Berücksichtigung des Tageslichtquotienten verzichtet.

4.1.3. Leuchtdichte

Die Leuchtdichte spielt hinsichtlich der Blendung eine wichtige Rolle. Es werden im folgenden einige in der einschlägigen Literatur zu findende Ansätze zur Blendungsbewertung diskutiert und eigene Messreihen beschrieben. Ziel ist es dabei, eine für die Bewertung der Tageslichtkontrollsysteme praktikable Methodik zu erarbeiten, um mögliche Blendungssituationen beurteilen zu können.

4.1.3.1. Literaturlauswertung

Kontrast

Bei Baker et al [29] werden für den Kontrast folgende Verhältnisse als Grenzwerte angestrebt:

- zwischen Aufgabe und dunklerer Umgebung 3:1
- zwischen Aufgabe und entfernten dunkleren Flächen 10:1
- zwischen Lichtquelle und Umgebung 20:1
- maximaler Kontrast (Ausnahme Dekoration) 40:1
- Hervorheben von Einzelobjekten 50:1

Diese von Baker genannten Werte basieren vermutlich wiederum auf Erfahrungen aus Mitteleuropa, worauf die Festlegung eines maximalen Kontrastes von 10:1 zwischen Aufgabe und entfernten dunkleren Flächen hinweist. In den Tropen unter Tageslichtbedingungen stellen eher zu helle Flächen ein Problem dar. Die Relationen können aber zunächst einmal so verwendet werden, da es die allgemeine Adaptionsfähigkeit der Augen betrifft.

Gleichmäßigkeit

Für die Gleichmäßigkeit der Leuchtdichten im Gesichtsfeld schlägt Hentschel [9] ein Leuchtdichteverhältnis zwischen Arbeitsfläche, näherer Umgebung und weiterer Umgebung einschließlich Decken und Wänden von 10:3:1 vor. Dabei gilt es auch hier zu berücksichtigen, dass diese Empfehlung die Auslegung für Kunstlicht und mitteleuropäische Augenadaptation zur Grundlage hat, wenn auch diese Tatsache nicht ausdrücklich erwähnt wird. Das lässt sich unter anderem daran erkennen, dass von einer dunkleren Umgebung ausgegangen wird, während bei der Auslegung für Tageslicht in den Tropen die oft zu großen Leuchtdichten der Umgebung ein Problem darstellen. Interessant sind die genannten Werte jedoch aufgrund ihrer Bandbreite, die auf eine relativ hohe Unempfindlichkeit des menschlichen Auges hinsichtlich größerer Leuchtdichteunterschiede hinweisen.

Physiologische Blendungsarten

(engl.: Disability Glare) [9]

- 1) *Absolutblendung*: die bei höchsten Leuchtdichten im Gesichtsfeld stets vorhandene Blendung, die sich nicht durch Erhöhen des Leuchtdichteniveaus aufheben lässt. Sie tritt laut Hentschel bei Leuchtdichten von etwa 10.000 cd/m² und mehr auf. Diesen Wert gilt es bei den eigenen Messungen zu überprüfen, da eine Adaption der Augen an hohe Leuchtdichten in den Tropen beobachtet werden kann.
- 2) *Relativblendung*: die in der Beleuchtungstechnik häufigste Form der Blendung durch zu große Lichtkontraste im Gesichtsfeld. Durch Anhebung der mittleren Leuchtdichte kann sie gemildert werden.
- 3) *Infeldblendung/Umfeldblendung*: Blendung, bei der der blendende und der wahrzunehmende Gegenstand dicht benachbart sind (Infeld) oder bei der die Blendlichtquelle peripher im Gesichtsfeld (Umfeld) liegt.
- 4) *Direktblendung*: Blendung, die durch unmittelbare Einwirkung von Blendlichtquellen auf das Auge hervorgerufen wird.
- 5) *Reflexblendung*: Blendung, die durch spiegelnde Reflexion von leuchtenden Objekten verursacht wird, insbesondere dann, wenn sich Reflexbilder dem Sehobjekt überlagern

oder in seiner Nähe auftreten. Dabei muss keine Blendung im engeren Sinn auftreten. Wohl aber können die Sehobjekte beim Überlagern des Reflexbildes einer Lichtquelle durch Herabsetzen des Leuchtdichtekontrastes unsichtbar werden.

Psychologische Blendung

die psychologische Blendung (engl. Discomfort Glare) bezieht sich im Gegensatz zur physiologischen Blendung, die eine Beeinträchtigung der Sehfunktion beschreibt, auf eine Störempfindung. Dabei können beide Blendungsarten gleichzeitig auftreten. Die psychologische Blendung in Innenräumen wird näherungsweise durch eine Blendkonstante G beschrieben, die von der Blendleuchtdichte L , dem Raumwinkel der Blendlichtquelle, der Umfeld-(Adaptations-) Leuchtdichte und einem Positionsfaktor abhängt [36].

Eine quantitative Bewertung der psychologischen Blendung durch Tageslicht wird von Baker et al in [29] beschrieben. Dabei gilt es zu berücksichtigen, dass das von ihm vorgestellte Tageslichtblendungsindexsystem DGI (Daylight Glare Index) für Blendungen, die durch das Himmelsgewölbe verursacht werden, ausgelegt wurde. Blendungen durch den Einsatz von Tageslichtlenksystemen, die eine Blendquelle ähnlich einer Lampe darstellen können, werden bei diesem System nicht berücksichtigt [45].

Nazzal [46] geht so weit, dass er die existierenden Blendungsbewertungsformel für Tageslicht generell ablehnt, da sie in Testkammern mit gleichförmigen Lichtquellen erarbeitet wurden, was nicht den realen Situationen mit Tageslicht entspricht. Die von Nazzal vorgeschlagene neue Tageslicht-Blendungs-Evaluierungsmethode mag eine Verbesserung darstellen, wird der Realität aber auch nicht gerecht:

- 1) er misst die durch das Fenster einfallende Beleuchtungsstärke E_v , die er anschließend in die Leuchtdichte L_{Fenster} umrechnet. Er geht davon von einem freien Horizont aus, der sehr häufig so nicht vorkommt. Einzelne reflektierende Objekte mit sehr hohen Leuchtdichten, die trotz ihrer oft kleinen Oberfläche den visuellen Komfort massiv beeinträchtigen können, verschwinden im Durchschnitt der integral gemessenen vertikalen Beleuchtungsstärke.
- 2) die Messung der Adaptationsleuchtdichte findet ebenfalls senkrecht zum Fenster statt – das widerspricht klar allen Empfehlungen, Bildschirmarbeitsplätze parallel zum Fenster anzuordnen. Dadurch wird außer acht gelassen, dass eine stark asymmetrische Leuchtdichteverteilung, d.h. heißt, ein Auge unterliegt einer deutlich anderen Leuchtdichteadaptationsnotwendigkeit, wesentlich zu einem mangelhaften visuellen Komfort beiträgt.

Baker benennt 8900 cd/m^2 als Standardwert für die Himmelleuchtdichte, da dieser Wert nur an 25% der jährlichen Arbeitszeit überschritten werden würde [29]. Für Rio de Janeiro trifft das nach eigenen Messungen (siehe Kapitel Tageslicht in den Tropen) und der Auswertung von Corbella [32] in etwa auch zu. Allerdings ist diese Angabe als maximaler Grenzwert unbrauchbar, da er für 20 – 25% der Bürozeit nicht relevant ist. Eine Auslegung der Fassade, insbesondere mit feststehenden Tageslichtkontrollsystemen, ist damit also nicht möglich.

Hubbuch [47] beschäftigt sich bei seinen Kriterien für die „Tageslichtsignatur“ auch mit dem Blendschutz. Für eine sehr gute Erfüllung des Blendschutzes dürfen im Blickfeld eines EDV-Arbeitsplatzes keine Leuchtdichten $\leq 400 \text{ cd/m}^2$ auftreten. Darüber hinaus ist sehr guter Blendschutz individuell und lokal, das heißt, er deckt nur einen Teil des Fensters ab oder ist im Raum aufgestellt. Guter Blendschutz erfüllt laut Hubbuch die Bedingung 400 cd/m^2 , ist aber nicht lokal.

Als Erkenntnis aus einem Beispiel aus der Praxis erarbeitete Hubbuch [47] folgende Prioritätenabfolge für die Positionierung von Bildschirmen:

Erste Priorität: Bildschirme 90° zum Fenster platzieren. Falls das nicht ganz möglich,
zweite Priorität: kleine Stellwände beim Bildschirm, wenn dieses nicht möglich, dann als dritte Priorität: die Anbringung eines kleinen, individuellen Blendschutzes am Fenster.

Ward [48] beschreibt eine Möglichkeit, über Radiance eine Bestimmung des visuellen Komforts hinsichtlich Blendung vorzunehmen. Allerdings werden dabei nur Möglichkeiten der Auswertung angeboten: die auf der Arbeit von Guth [49] beruhende „Visual comfort probability (VCP)“ und der auf Einhorn [50] beruhende CIE Blendungs- Index. Beide Bewertungsmethoden basieren jedoch auf Untersuchungen mit Kunstlicht und sind somit für die Tageslichtthematik, insbesondere mit Hinblick auf die Tropen, nicht sinnvoll einzusetzen. Ähnliches gilt für das UGR-Verfahren [38], [51], das ebenfalls für Kunstlichtsituationen entwickelt wurde.

Bartenbach [43] beschreitet einen anderen Weg, um zu Aussagen hinsichtlich von Blendung, bzw. komfortablen Leuchtdichteverhältnisse zu kommen.

Untersuchungen für Bildschirmarbeitsplätze haben ergeben, dass für eine belastungsfreie stabile Wahrnehmung optimale Leuchtdichteverhältnisse zwischen Infeld und Umfeld² erforderlich sind. Bartenbach unterteilt das Umfeld in architektonische Komponenten:

² Infeld und Umfeld: in der einschlägigen Literatur gibt es verschiedene Definitionen hinsichtlich der Abgrenzung und Eingrenzung von Infeld und Umfeld: Loe et al. [52] unterscheiden zwischen der „Task lighting area“, die den Arbeitsplatz/Schreibtisch beschreibt und dem „Building lighting“, was einem 40° breiten Blickband entspricht, das seinen Mittelpunkt in Augenhöhe hat. Hentschel [36] zitiert verschiedene Forscher, die bei der Untersuchung der Unterschiedsempfindlichkeit mit unterschiedlichen Definitionen des Umfeldes arbeiten[S. 64/Bild 3.6): Jainski mit einem Testfeld von 1° und

- die Schreibtische (primäres Umfeld)
- die Wände (sekundäres Umfeld)
- die Raumdecke (sekundäres Umfeld)
- der Fußboden (sekundäres Umfeld)
- die Beleuchtungskörper (im sekundären Umfeld)
- die Fenster (sek. und tertiäres Umfeld)

Die Untersuchungen durch Bartenbach [43] kamen für die einzelnen Bereiche zu folgenden Erkenntnissen:

- a) Schreibtische: Um stabile Wahrnehmungsbedingungen und gute Sehleistungen wie z.B. Scharfsehen, Farbsehen, Kontrastsehen und Tiefensehen gewährleisten zu können, ist laut Bartenbach eine Infeldleuchtdichte von 100 cd/m^2 notwendig (das gilt für Augen, die an Mitteleuropäische Helligkeiten adaptiert sind. Die Helligkeiten und Leuchtdichten sind in den Tropen bis zu 2x so hoch, so dass es vermutlich eine größere Toleranz hinsichtlich höherer Leuchtdichten gibt. Das betrifft aber vermutlich – hierzu sind keine Untersuchungen bekannt – nicht die Minimalanforderungen). Die in DIN 5035 angeführte Minimalforderung von 500 lx Beleuchtungsstärke kann das bei geringen Reflexionsgraden, d.h. bei dunklen Schreibtischoberflächen, nicht aufrecht erhalten werden. Bei zu hellen Oberflächen, d.h. zu hohen Reflexionsgraden, kann es zu Blendungserscheinungen kommen. In beiden Fällen können zu hohe lokale Helligkeitsunterschiede auftreten, die notwendige Konstanz geht verloren.
- b) Wandflächen: die Wandflächen werden als sekundäre Lichtquellen angenommen, deren Helligkeit nach dem Leuchtdichtemodell für stabile Wahrnehmungsbedingungen etwa $1/3$ der Infeldhelligkeit (weißer Bildschirm, Belege, Manuskripte etc.) aufweisen. Bei einer angenommenen Infeldhelligkeit von 90 bis 180 cd/m^2 müsste eine Wandleuchtdichte von 30 bis 60 cd/m^2 eingehalten werden. Dabei wird wiederum von mitteleuropäischen Verhältnissen ausgegangen. Für den Bildschirm wird eine maximale vertikale Beleuchtungsstärke von $100 - 120 \text{ lx}$ vorgeschlagen.
- c) Raumdecke: Durch die hohe Empfindlichkeit der Randbereiche der Netzhaut, auf denen in der Regel der Deckenanteil des Raumes abgebildet wird, für hohe absolute und relative Helligkeiten, ist eine genaue Betrachtung dieses Bereiches von besonderer Bedeutung. Wohlbefinden und Leistungsgüte werden stark herabgesetzt, wenn durch hohe Leuchtdichten von über 200 cd/m^2 ein psychophysiologischer Lichtdruck von oben erzeugt wird [55] (mitteleuropäische Adaption). Dabei gilt es, die Unterschiede zwischen Einzelräumen

und Großraumbüros zu beachten: durch das perspektivische Sehen ist der Anteil der Deckenfläche am gesamten sekundären Umfeld bei Großraumbüros in der Regel deutlich größer als bei Einzelräumen.

- d) Fußboden: durch seinen möglichen Einfluss auf die vertikale Beleuchtungsstärke, die ausschlaggebend für die Bildschirmarbeit ist, sind zu stark glänzende Fußböden zu vermeiden. Es gilt, auch den Fußboden in die Leuchtdichteabstimmung mit einzubeziehen.
- e) Leuchten im Umfeld: werden in dieser Arbeit nicht berücksichtigt, da sie im Zusammenhang mit Tageslichtnutzung keinen primären Einfluss haben.
- f) Fenster/Fassaden: dieser Bereich wird bei der Bartenbach-Untersuchung nicht ausdrücklich behandelt. Lediglich hinsichtlich der Sitzposition werden folgende Aussagen getroffen: es wird festgestellt, dass eine Sitzposition, die eine Blickrichtung parallel zum Fenster zur Folge hat, eine ca. 51% bessere mittlere Arbeitsleistung zur Folge hat.

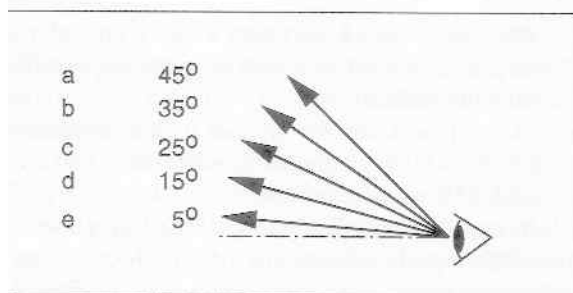


Abbildung 4.2. Leuchtdichtegrenzwerte in Abhängigkeit von der Position der Lichtquelle in Relation zur Blickachse [29]

Figure 15 - Acceptable luminance levels as a function of position in the field of vision:
 (a) 2500 cd/m², (b) 1800 cd/m², (c) 1250 cd/m²,
 (d) 850 cd/m², (e) 580 cd/m².

Baker et al [29] geben maximale Leuchtdichten in Abhängigkeit der vertikalen Position der betrachteten Fläche im Blickfeld des Betrachters an (siehe Abbildung 4.2.). Diese Leuchtdichtewerte sind ebenfalls vermutlich für gemäßigte Klimata festgelegt worden.

CIE definiert Blendung als Zustand, in der die Sicht/der Blick durch Unbehagen oder in einer Verminderung der Wahrnehmung von Details oder Gegenständen gekennzeichnet ist, ausgelöst durch eine ungünstige Leuchtdichteverteilung, eine zu hohe Leuchtdichte oder durch extreme Kontraste [29].

Die möglicherweise beste Beschreibung von Blendung hinsichtlich des Tageslichts stammt von William Lam [35]: „Eine sonnenbeleuchtete Oberfläche wird wahrscheinlich als ange-

nehm und glitzernd wahrgenommen, während eine Lampe mit gleicher Leuchtdichte als blendend empfunden werden würde. Während ein Blick zu einem Fenster im erstem Moment als blendend empfunden werden kann (z.B. wenn man nur die Silhouette eines Gesichtes erkennen kann), so wird der Blick aus diesem Fenster nicht als blendend empfunden. Um zu verstehen, was Blendung ist, müssen wir erkennen, dass Blendung eine Wahrnehmung ist, und Wahrnehmungen sind Interpretationen von Informationen, kein Gefühl, Der Zusammenhang - die Relevanz oder Irrelevanz einer Szene eher als die Leuchtdichtewerte – bestimmt „Blendung“.

4.1.3.2. Untersuchung der Leuchtdichte des Himmelsgewölbes, der Blendungswahrnehmung und der Reflexionen am Bildschirm

In den Tropen am Beispiel Rio de Janeiro stellt man fest, dass die Einheimischen so gut wie nie Sonnenbrillen tragen, während europäische Touristen von der hohen Leuchtdichte sowohl an unbewölkten wie auch an bewölkten Tagen stark geblendet werden. Eine Adaption der Augen an höhere Leuchtdichten scheint daher in den Tropen stattzufinden. Es heißt allgemein, dass man ca. 30 Tage benötigt, um sich an die höheren Leuchtdichten zu gewöhnen. Das sind sehr empirische Werte, es gibt zu diesem Thema noch keine konkreten wissenschaftlichen Aussagen.

Da in der Literatur keine verwertbaren Aussagen zu dem Thema Leuchtdichte, Blendung und Reflexionen auf dem Bildschirm für die Tropen gibt, führte der Autor von Januar 2001 bis Januar 2002 eine Reihe von Messungen und Untersuchungen durch, um zu orientierenden Werten zu kommen, die bei der Bewertung verschiedener Tageslichtkontrollsysteme für den Einsatz in den Tropen die notwendige Grundlage bieten.

In der Studie wurden 3 Situationen untersucht:

- 1) die Leuchtdichte des Himmelsgewölbes und die daraus resultierende Wahrnehmung der Blendung
- 2) die Wirkung verschiedener Bildschirmhintergründe auf Reflexionen und Reflexblendung auf Bildschirmen und
- 3) die Auswirkung verschiedener Leuchtdichteniveaus im Blickfeld

Die Untersuchung wurde unter realen Arbeitsplatzbedingungen in Rio de Janeiro durchgeführt. Verglichen mit einem künstlich kontrollierten Umfeld, z.B. eines Kunsthimmels, hat dieses Vor- und Nachteile. Die Nachteile wie wechselnde Himmelszustände wurden durch eine detaillierte Beschreibung des jeweiligen Zustands bei den einzelnen Messungen begrenzt. Ein weiterer Nachteil, die Abhängigkeit von externen Bedingungen ohne die Möglichkeit einer Auslotung der exakten Grenzen zwischen fehlendem Wohlbefinden durch hohe Leuchtdichtewerte und tatsächlicher Blendung wurden teilweise aufgehoben durch zahlreiche Messungen unter verschiedensten Himmelszuständen.

Die Vorteile dieser Untersuchung unter realistischen Tageslicht- und Arbeitsbedingungen sind

- 1) die Konzentration auf die zu erledigende Aufgabe, was „hypochondrische Effekte“, das soll heißen eine übermäßige Konzentration auf die Frage – stört's schon? - ausschließt, die bei Tests in künstlichem Umfeld auftreten können;
- 2) positive Einflüsse wie Ausblick, Geräusche und wechselnde Himmelsbedingungen, die für das menschliche Wohlbefinden notwendig sind, werden berücksichtigt werden.

Ferner befinden sich alle künstlichen Himmel in Städten mit gemäßigttem Klima [29] – die Adaption des Auges an tropische Leuchtdichten wird an diesen Standorten nicht berücksichtigt.

Die folgenden Betrachtungen konzentrieren sich auf seitlich beleuchtete Räume; Räume, die durch Oberlichter beleuchtet werden, sind nicht Gegenstand der Untersuchung.

4.1.3.2.1. Leuchtdichte von Tageslicht und die Wahrnehmung von Blendung

Methodik

Regelmäßige Messungen auf einer täglichen Basis mit einem hochwertigen handgehaltenen Photometer (Genauigkeit $\pm 2\%$, Öffnungswinkel 1°) wurden in dem Zeitraum vom Januar 2001 bis April 2001 durchgeführt, um die Grenzwerte zu ermitteln, die den Übergang von visuellem Komfort zur mangelndem Komfort und zwischen mangelndem Komfort zu physiologischer Blendung darstellen. Die Messungen wurden zwischen 7 Uhr morgens und 17 Uhr nachmittags durchgeführt. Dabei wurden in erster Linie Messungen bei hohen und sehr ho-

hen Leuchtdichten am Himmelsgewölbe durchgeführt. Die Messungen wurden in südlicher Richtung (Magnetisch $\alpha_M = 175^\circ$ vorgenommen. Der geografische Süden weist eine Abweichung von 19° in westlicher Richtung auf, daher ergibt sich eine geografisch exakte Messrichtung von $\alpha_M = 194^\circ$. Grund für die Wahl der Messrichtung war die Vermeidung der Messung der direkten Solarstrahlung. Die Leuchtdichte wurde am Horizont (1°), sowie in 15° und 30° über dem Horizont gemessen.

Zwei typische Blendsituationen wurden untersucht:

- 1) eine permanent hohe Leuchtdichte im vollem Gesichtsfeld mit ausreichend Zeit, das Auge an die hohe Leuchtdichte so weit wie möglich zu adaptieren
- 2) eine hohe Leuchtdichte
 - a. als Ergebnis einer nahen weißgestrichenen Dachfläche (als Beispiel für kleinere Flächen im Außenbereich mit hoher Leuchtdichte im Gesichtsfeld)
 - b. am Himmelsgewölbe, wirksam bei einer Kopfdrehung um 90° mit Blick auf den Horizont/Atlantik und einer sofortigen Rückwendung zur Aufgabe am Bildschirm;

In Fall 1) wird die absolute Grenze der möglichen Adaption des Auges an hohe Leuchtdichten untersucht, mit dem Ziel festzustellen, ob ein messbarer Unterschied in der Adaption eines Auges an die üblichen Leuchtdichten in den gemäßigten Breiten und die der Tropen existiert. In Fall 2) ist das Auge an eine Infeldleuchtdichte von ca. 80 cd/m^2 (Bildschirm) und eine Umfeldleuchtdichte von ca. 250 cd/m^2 (Wand hinter dem Bildschirm) adaptiert. Durch die schnelle Drehung des Kopfes besteht keine Zeit für eine Adaption an wesentlich höhere Leuchtdichten. Diese Untersuchung hat zum Ziel, die Grenzwerte zwischen visueller Behaglichkeit – Unbehaglichkeit und Behinderung/Blendung in einer typischen Arbeitsplatzsituation in den Tropen, in der Blendung auch ohne direkten Augenkontakt mit der Sonne stattfinden kann, festzustellen.

Die Blendungsempfindlichkeit des Autors wurde verglichen mit der von 11 Kollegen bei 4 verschiedenen Anlässen. Alle Teilnehmer lebten in Rio de Janeiro, ihre Augen waren an die ortsüblichen Leuchtdichten adaptiert. Die Blendungsempfindlichkeit war fast identisch, wobei es festzuhalten gilt, dass das Alter der Teilnehmer zwischen 25 und 39 Jahren lag. Für ältere Personen ist eine höhere Empfindlichkeit zu erwarten, da im Alter die Augenadaptation in der Regel langsamer stattfindet.

Ergebnisse: Visuelle Unbehaglichkeit und Blendung als Minimalwerte aller Test-ergebnisse

Die folgenden Werte beschreiben den jeweiligen Beginn von Unbehaglichkeit bzw. Blendungsempfinden (Wahrnehmung des Autors) als die absoluten Minimalwerte von über 200 Einzelmessungen. Die Werte stellen Orientierungswerte dar, um mögliche visuelle Unbehaglichkeit und Blendung bereits im Vorfeld bei der Planung zu berücksichtigen. In einigen Fällen wurden auch etwas höhere Werte als die nun folgenden als akzeptabel empfunden, der Unterschied war jedoch nie größer als maximal 10%.

Fall 1)

Grenze zwischen Behaglichkeit und Unbehaglichkeit:	15.000 cd/m ²
Grenze zwischen Unbehaglichkeit und Stör-Blendung:	20.000 cd/m ²

Fall 2)

a) Grenze zwischen Behaglichkeit und Unbehaglichkeit:	16.000 cd/m ²
Grenze zwischen Unbehaglichkeit und Stör-Blendung:	21.000 cd/m ²
b) Grenze zwischen Behaglichkeit und Unbehaglichkeit:	12.000 cd/m ²
Grenze zwischen Unbehaglichkeit und Stör-Blendung:	16.500 cd/m ²

Schlussfolgerung für Tageslichtleuchtdichte und Blendungswahrnehmung

Die veröffentlichten maximalen Leuchtdichtewerte, bei denen noch mit keiner Blendung zu rechnen ist, beziehen sich auf Untersuchungen mit Kunstlicht. So fordert z.B. Hentschel [36] eine Begrenzung der Leuchtdichte auf 10.000 cd/m², von wo an es unmöglich sei, die Blendwirkung durch ein Anheben der allgemeinen Leuchtdichte zu vermeiden.

Die Empfehlung Hubbuchs [47], mit einem Blendschutz die Leuchtdichte durch Tageslicht an der Fassade auf maximal 400 cd/m² zu reduzieren, erscheint nach den durchgeführten Untersuchungen zumindest hinsichtlich der Wirkung auf die Augen als für die Tropen deutlich zu niedrig angesetzt zu sein. Die Auswirkung der Leuchtdichte auf Reflexionen am Bildschirm wird im nächsten Schritt untersucht.

Die Feststellung, dass eine Adaption des Auges an höhere Leuchtdichten in den Tropen stattfindet, kann zwar auf Grundlage dieser Untersuchung noch nicht abschließend getroffen werden. Allerdings weisen die bisher durchgeführten Untersuchungen in diese Richtung. Ein

gültiger Nachweis muss noch mit einer repräsentativen Anzahl von Versuchspersonen durchgeführt werden, die aus einem gemäßigten Klima in die Tropen einreisen und deren Augen zunächst noch nicht adaptiert sind. Nach einem Zeitraum von mindestens 4 Wochen muss dieser Versuch dann mit dieser Personengruppe wiederholt werden.

4.1.3.2.2. Reflexblendung auf Bildschirmen

In der EN ISO 9241-6 [53] wird ein Grenzwert für alle Gegenstände festgelegt, die Reflexionen auf Bildschirmen hervorrufen könnten (Lampen, Fenster, reflektierende Oberflächen):

Die Leuchtdichte sollte nicht mehr als 2000 cd/m² für Klasse I und II Bildschirme und nicht mehr als 200 cd/m² für Klasse III – Bildschirme betragen.

Für Blendschutzelemente empfiehlt die EN ISO 9241-6 [53] eine Begrenzung auf 100 cd/m², falls ein Teil dieser Elemente Reflexionen auf Bildschirmen verursachen könnte.

Methodik

Um verschiedene mögliche Situationen zu untersuchen, die zu Reflexionen und Blendung am Bildschirm führen können, wurde am 26. Februar 2001 eine Versuchsreihe in Rio de Janeiro durchgeführt. Der verwendete Monitor war ein 15,1" TFT-Modell. Der Bildschirm war 92° zur Horizontalen geneigt. Der Teil des Himmelsgewölbes, welcher sichtbare Reflexionen auf dem ausgeschalteten Bildschirm hervorrief, hatte eine Leuchtdichte von 5.500 cd/m² am Horizont (1°), 3.400 cd/m² bei 30° und 2.560 cd/m² bei 45°. Der Hintergrund des Bildschirms (die Wand) hatte eine Leuchtdichte von ca. 200 cd/m².

Drei Aufstellpositionen wurden überprüft:

0° - Blick parallel zum Fenster, 30° und 45° zum Fenster. Die Leuchtdichtemessungen wurden in allen Positionen zunächst am ausgeschalteten Bildschirm durchgeführt und anschließend am eingeschalteten mit jeweils zwei unterschiedlichen Bildschirmhintergründen: a) Negativ-Darstellung - ein schwarzer Hintergrund, üblich bei der Verwendung von CAD-Programmen und b) Positiv-Darstellung - ein weißer Hintergrund, üblich in Textverarbeitungs- und Tabellenkalkulationsprogrammen.

In Fall a) betrug die Leuchtdichte des Bildschirmhintergrundes 5 – 14 cd/m² für das Zeichenfeld und 110 cd/m² für die Befehlsleisten. In Fall b) hatte das Textfeld eine Leuchtdichte von 166 – 187 cd/m² und 110 cd/m² bei den Befehlsleisten.

Die vertikale Beleuchtungsstärke E_v wurde mit einem Klasse 2 Luxmeter gemessen.

Ergebnisse

Position zum Fenster	E_v am Bildschirm	Leuchtdichte am abgeschalteten Monitor	Visuelle Analyse für Fall a) Negativ-Darstellung	Visuelle Analyse für Fall b) Positiv-Darstellung
0°	870 lx	4,7 – 17,5 cd/m ²	leichte Reflexe sichtbar, keine Blendung	keine Reflexe sichtbar, keine Blendung
30°	1,280 lx	8,1 – 128,4 cd/m ²	Starke Reflexe sichtbar, Blendung	leichte Reflexe sichtbar, keine Blendung
45°	1,350 lx	8,9 – 140,0 cd/m ²	Starke Reflexe, starke Blendung	Reflexe sichtbar, keine Blendung

Tabelle 4.5. Reflexionen und Blendungswirkung durch Tageslicht an einem TFT-Monitor (klarer Himmel, keine direkte Solarstrahlung im Arbeitsplatzbereich)

Schlussfolgerung für Reflexblendung auf Bildschirmen aufgrund der Leuchtdichte

Die Ergebnisse bestätigen nicht die maximalen Leuchtdichtewerte, die die EN ISO 9241-6 vorschreibt. Gründe hierfür sind:

- 1) ein moderner TFT – Monitor ist wesentlich weniger anfällig hinsichtlich der Reflexion als ältere Monitor-Modelle
- 2) die Vorschläge konzentrieren sich in erster Linie auf Kunstlicht: die Wahrnehmung von hohen Leuchtdichten durch Tageslicht ist anders, da größere Flächen etc.

Die von dieser Studie abgeleiteten Empfehlungen lauten:

- 1) die beste Blickachse für Arbeitsplätze nahe an Fenster/Fassade stellt die zur Fassade parallele dar.
- 2) die Benutzung eines weißen Bildschirmhintergrundes ist zu bevorzugen, da dieser wesentlich unempfindlicher hinsichtlich von Reflexionen auf Bildschirmen ist.

4.1.3.2.3. Leuchtdichte im Blickfeld

Diese Untersuchung entstand aus einer Situation heraus, die bei Beginn der Erforschung von Tageslicht in den Tropen und dessen Nutzung in der Architektur durch den Autor noch nicht zu übersehen war: es stellte sich als unmöglich heraus, konkrete Daten zu dem Thema Leuchtdichte, Beleuchtungsstärke und Blendung in den Tropen zu finden. Die Ergebnisse der durchgeführten Untersuchung beschreiben nun einige Parameter, die für eine Bewertung verschiedener Tageslichtkontrollsysteme notwendig sind, insbesondere hinsichtlich der Blendungsproblematik.

Als einziger Autor schlägt Hubbuch [47] eine maximale Leuchtdichte im Blickfeld bei Bildschirmarbeitsplätzen vor: für ihn liegt die Grenze bei 400 cd/m².

Methodik

Um verschiedene Situationen zu überprüfen, die möglicherweise Blendung aufgrund hoher Leuchtdichten durch Tageslicht hervorrufen, wurde im Februar 2001 eine weitere Versuchsreihe durchgeführt. Dabei wurde ein 14,1"-Monitor (Laptop) verwendet, der 92° zur Horizontalen geneigt war.

In Anlehnung an [29] wurde als Infeld ein virtueller Blickkegel mit einem Öffnungswinkel von 40° angenommen, dessen Mittellinie um 10° nach unten geneigt wurde.

Vier Sitzpositionen in Relation zum Fenster wurden überprüft: 90° (Blickachse senkrecht zum Fenster), 45°, 30° and 0° (parallel zum Fenster).

Die Leuchtdichte wurde zunächst in allen Sitzpositionen am ausgeschalteten Monitor gemessen, und zwar die jeweilige minimale und maximale Leuchtdichte (L_{50}). Anschließend wurden Messungen am eingeschalteten Bildschirm mit 2 unterschiedlichen Bildschirmhintergründen durchgeführt: a) Negativ-Darstellung und b) Positiv-Darstellung. In Fall a) hatte der Bildschirmhintergrund eine Leuchtdichte von 5 – 14 cd/m² im Zeichenfeld und 110 cd/m² in den Funktionsleisten. In Fall b) hatte das Textdokument eine Leuchtdichte von etwa 166 - 187 cd/m² und 110 cd/m² bei den Funktionsleisten.

Um einen Überblick über die vorkommenden Leuchtdichten im Infeld zu bekommen, wurden die hellsten und die dunkelsten Stellen gemessen. Die durchschnittliche Leuchtdichte im Infeld wurde anschließend anhand der auf den größten Flächen gemessenen Leuchtdichten geschätzt.

Ergebnisse

	Position zum Fenster	E_{VIC} [lx]	L_{50} [cd/m ²]	Leuchtdichte im Infeld [cd/m ²]	Visuelle Analyse für Fall a)	Visuelle Analyse für Fall b)
A1	90°	611	8.3 – 24.2	1,600 – 18.700 durchschnittl. Leuchtdichte 3.250	Unbehagen aufgrund zwischen durchschnittlicher Leuchtdichte und maximaler Leuchtdichte, die bei 25 – 30° auftritt	Leichtes Unbehagen aufgrund maximaler Leuchtdichten, die bei 25 – 30° auftreten

B1	A4	A3	A2
45°	90° /Blendschutz durch Gardine.: 660 cd/m ²	90°	90°
909	104	170	413
7.1 – 31.2	2.7 – 7.2	3.3 – 5.8	8.5 – 9.6
358 – 16,600 Durchschnitt Zentrum links 6,250; Zentrum-rechts: 450	580 – 6.800 Durchschnitt vom linken bis zum rechten Zentrum: 800	70 – 10.500	1.780- 17.450 durchschnittliche Leuchtdichte bei ca. 7,500
Unbehagen aufgrund hoher Unter- schiede in den Leuchtdichten	kein Unbehagen	Unbehagen aufgrund sehr niedriger Leuchtdichtewerte auf dem Bildschirm und sehr hoher auf kleinen Flächen im Gesichtsfeld (bis zu 10.500 cd/m ²)	starkes Unbehagen aufgrund sehr niedriger Leuchtdichte- werte auf dem Bildschirm und einer maximalen Leuchtdichte von 17.450 cd/m ² auf kleinen Flächen im Gesichtsfeld
leichtes Unbehagen auf dem linken Auge	kein Unbehagen	sehr geringes Unbehagen aufgrund hoher Leuchtdichten auf kleinen Oberflächen im Gesichtsfeld (bis zu 10.500 cd/m ²)	Unbehagen aufgrund hoher Leuchtdichtewerte von 17.450 cd/m ² auf kleinen Flächen im Gesichtsfeld

C2	C1	B3	B2
15°	15°	45°	45°
870	1600	163	440
5.2 – 14.5	7.3 – 33.3	2.0 – 3.5	5.1 – 13.3
173 – 2.000 Durchschnitt von Zentrum-links 1.500; Durchschnitt von Zentrum-rechts 300	180 – 19.250 Durchschnitt von Zentrum-links 4.770 Durchschnitt von Zentrum-rechts 420	46 – 4.850 Durchschnitt Zentrum-links 2,100; Durchschnitt Zentrum-rechts 150	344 – 21.150 Durchschnitt Zentrum-links 9,000; Durchschnitt Zentrum-rechts: 350
Unbehagen auf linkem Auge, ausgelöst durch hohe Leuchtdichte eines sonnenbeschiedenen Elements auf der gegenüberliegenden Fassade mit bis zu 17.000 cd/m ² auf 75° von der Blickachse), Arbeit möglich, aber mittelfristig Ermüdung zu erwarten	leichtes Unbehagen aufgrund leichter Reflexe auf dem Bildschirm und großer Leuchtdichtekontraste; Arbeit möglich, aber unangenehm	kein Unbehagen	Unbehagen auf linkem Auge, keine Blendung aber schnelle Ermüdung zu erwarten
Unbehagen auf linkem Auge, ausgelöst durch hohe Leuchtdichte eines sonnenbeschiedenen Elements auf der gegenüberliegenden Fassade mit bis zu 17.000 cd/m ² auf 60° von der Blickachse), Arbeit möglich, aber mittelfristig Ermüdung zu erwarten	kein Unbehagen	kein Unbehagen	Unbehagen auf linkem Auge, keine Blendung aber schnelle Ermüdung zu erwarten

D3	D2	D1
0°	0°	0°
	Blendsch. durch Gardinen: 660 cd/m ²	
2320	380	1340
11.2 – 107.5	1.4 – 1.8	4.8 – 20.5
112 – 17.760 Durchschnitt Zentrum-links 6,700 Zentrum-rechts 350	9 – 1.060 Durchschnitt Zentrum-links 120; Durchschnitt Zentrum-rechts 60	27 – 1.780 Durchschnitt von Zentrum-links 1.200 Durchschnitt von Zentrum-rechts 250
leichtes Unbehagen aufgrund leichter Reflexe und großer Leuchtdichteunterschiede im Blickfeld; Arbeit möglich, aber nicht angenehm	kein Unbehagen	Unbehagen auf linkem Auge, ausgelöst durch hohe Leuchtdichte eines sonnenbeschiedenen Elements auf der gegenüberliegenden Fassade mit bis zu 17.000 cd/m ² auf 90° von der Blickachse), Arbeit möglich, aber langfristig Ermüdung zu erwarten
kein Unbehagen	kein Unbehagen	Unbehagen auf linkem Auge, ausgelöst durch hohe Leuchtdichte eines sonnenbeschiedenen Elements auf der gegenüberliegenden Fassade mit bis zu 17.000 cd/m ² auf 90° von der Blickachse), Arbeit möglich, aber langfristig Ermüdung zu erwarten

Tabelle 4.6. Blendung durch Tageslicht im Blickfeld von Computerarbeitsplätzen (klarer Himmel, keine direkte Solarstrahlung)

Schlussfolgerungen für Leuchtdichte durch Tageslicht im Blickfeld von Computerarbeitsplätzen

Die bereits in den vorhergehenden Untersuchungen getroffene Feststellung, dass der Bildschirmhintergrund eine wichtige Rolle bei der Blendungsproblematik spielt, wird bestätigt. Während es dabei um Reflexionsblendung ging, handelt es sich nun um visuelle Unbehaglichkeit bis hin zur Blendung aufgrund großer Unterschiede im Leuchtdichteniveau zwischen dem Bildschirm und dem Blickfeld. In Fall b) - die Untersuchungen für A1, A2, A3, B1, B3,

C1 and D1 – stellt der schwarze Bildschirmhintergrund einen klaren Nachteil dar. Dieser Nachteil tritt in allen Positionen auf, ist aber in der 90° - Position am gravierendsten.

Grosses visuelles Unbehagen lösen asymmetrische Leuchtdichten auf, wenn ein Auge sehr hohen Leuchtdichten ausgesetzt ist. In den Versuchen B1b and B2a&b handelt es sich um Leuchtdichten von über 16.600 cd/m² im zentralen Blickfeld. In den Untersuchungen C2a&b und D2a&b sind die maximalen Leuchtdichtewerte ähnlich hoch, befinden sich aber bereits außerhalb des zentralen Blickfeldes. Daraus ist zu schließen, dass das Wahrnehmungsfeld für Blendungen durch sehr hohe Leuchtdichtewerte vergrößert werden muss.

In der Untersuchung D1b ist der Unterschied der Leuchtdichtespitzen sehr groß, es wird aber kein Unbehagen empfunden. Der Grund liegt in der hohen vertikalen Beleuchtungsstärke. Diese scheint die hohen Leuchtdichteunterschiede auszugleichen.

Die höchsten Werte, die weder Blendung noch visuelles Unbehagen bewirken, finden sich in D1 (0°) mit 17.760 cd/m², C1 (15°) mit 19.250 cd/m², B3 (45°) mit 4.850 cd/m² und A4 (90°) mit 6.800 cd/m². Die Spitzenwerte bei D1 and C1 wurden durch kleine Oberflächen wie einer kleinen Dachfläche hervorgerufen, während die Unbehagen und Blendung hervorgerufenen Werte in C2 and D2 durch große Oberflächen erzeugt wurden (gegenüberliegende Fassade). Die Größe der Blendfläche beeinflusst also die Blendwirkung.

Schlussfolgerungen

Die festgestellte Adaption der Augen an die durch das Tageslicht verursachten hohen Leuchtdichten in den Tropen machen eine Neubewertung der Grenzen für visuelles Unbehagen und Blendung notwendig. Es müssen zwei unterschiedliche Blendungssituationen unterschieden werden: eine wird durch Reflexionen am Bildschirm, die den notwendigen Kontrast vermindern, ausgelöst und folgt in allen Breitengraden den gleichen Gesetzmäßigkeiten. Die Empfehlungen der EN ISO 9241-6 müssen dabei jedoch zumindest für die beschriebene Situation mit Tageslicht und TFT-Monitoren hinterfragt werden.

Die zweite Blendungssituation wird durch hohe Leuchtdichten und/oder – wie in der Untersuchungsreihe festgestellt – durch eine Asymmetrie der Leuchtdichte im Blickfeld erzeugt. Dabei wurde festgestellt, dass hohe Leuchtdichten im Blickfeld unter bestimmten Umständen akzeptabel sind. Die Grenzen, die von Hubbuch [65] und Hentschel [9] vorgeschlagen werden, erscheinen als für die Tropen zu niedrig.

Die beschriebene Untersuchung kann jedoch nur als ein erster Schritt gesehen werden, die für die Tropen spezifische Tageslichtsituation und insbesondere die Wahrnehmung des Menschen darauf zu beschreiben. Aspekte wie die begrenzte Zahl der Testpersonen und die Begrenzung der Altersgruppe lässt es eine erweiterte Untersuchung zu diesem Thema notwendig erscheinen.

4.2. Psychologischer Komfort

4.2.1. Außenbezug

Der Außenbezug ermöglicht dem Menschen eine räumliche und zeitliche Orientierung.

Als sehr guten Außenbezug definiert Hubbuch [47] eine Sicht nach außen, sowohl vom fensternahen Arbeitsplatz als auch vom Teamarbeitsplatz aus. Es darf dabei keine Farbverschiebung auftreten. Als gut wird eine Sicht nach außen mit nicht wahrnehmbarer Farbverschiebung bezeichnet.

4.2.2. Lichtdynamik

Es wird vermutet, dass die Lichtdynamik zur psycho-biologischen Aktivierung des Menschen beiträgt. Eine entsprechende Untersuchung für Kunstlicht wird an der ETH Zürich durchgeführt [54]. Beim Tageslicht ist die Lichtdynamik sowohl im Tages- wie Jahresverlauf vorhanden.

4.1.2.3. Farbwiedergabe

Durch die Evolution ist das Auge optimal an das Tageslicht angepasst – das macht sich insbesondere auch bei der Farbwiedergabe bemerkbar. Hertel, Dirk et al beschreiben in „Eine Lichtquelle mit flexiblem Spektrum“ [55] den hohen Aufwand, der bei Kunstlicht notwendig ist, um eine möglichst hohe Lichtausbeute mit einer guten „natürlichen“ Farbwiedergabe zu verbinden.

4.1.2.4. Tageslichtautonomie

Eine sehr gute Tageslichtautonomie wird laut Hubbuch [47] bei einem Wert von 75% für ein Büro erreicht. Das bedeutet eine Einschaltzeit der künstlichen Beleuchtung von weniger als 700 Stunden bei 2.750 Jahresbetriebsstunden. Als gut wird ein Wert von 60% bezeichnet, d.h. weniger als 1.100 Stunden pro Jahr Einschaltzeit.

NEFF [56] hält für eine intensive Tageslichtnutzung, bei der für mitteleuropäische Verhältnisse bei 80% der Arbeitsplätze das Kunstlicht mindestens während 70% der Arbeitszeit abgeschaltet werden kann (als Standardarbeitszeit wird der Zeitraum von 8.00 Uhr bis 18.00 Uhr angesehen), einen Tageslichtquotienten von mindestens 4% für notwendig.

Für die Tropen ist generell eine höhere Tageslichtautonomie zu erwarten: Grund hierfür ist die im Jahresverlauf geringere Schwankung der Tageslänge. Das Tageslichtangebot deckt in den Tropen die Standardarbeitszeit von 8.00 Uhr bis 18.00 Uhr ab.

Die von Hubbuch [47] und NEFF [56] verwendeten Definitionen erscheinen aufgrund der Standardgroßraumbüros mit großen Raumtiefen als für die Tropen nicht ohne weiteres verwendbar, da die Tageslichtautonomie wesentlich von der untersuchten Raumtiefe abhängt: je tiefer der Raum, desto geringer die durchschnittliche Tageslichtautonomie.

Man kann nun die Zielwerte für die Tageslichtautonomie für 2 unterschiedliche Ansätze festlegen:

- 1) Ein Zielwert, der für den gesamten Raum gilt, oder
- 2) Zielwerte für fassadennahe und fassadenferne Zonen.

Der erste Ansatz erscheint sinnvoll für Büroräume mit einer maximalen Tiefe von 5,0 m. Für diesen Ansatz können die Werte von Hubbuch verwendet werden, d.h. eine Tageslichtautonomie von 75% kann als sehr gut, eine Tageslichtautonomie von 60% als gut bezeichnet werden. Diese Werte gelten jeweils für möblierte Räume.

Im Rahmen des zweiten Ansatzes können diese Werte für die fensternahe Zone bis zu 5,0 m Tiefe verwendet werden. Für fensterferne Zonen ab 5,0 m sollte eine Tageslichtautonomie von 50% als sehr gutes Ergebnis, bzw. 40% als gutes Ergebnis angestrebt werden. Alle Werte gelten für möblierte Räume.

4.3. Fazit „Visueller Komfort“

Für das Ziel, angenehme mit Tageslicht beleuchtete Räume zu schaffen, so oft wie möglich und für den größten Teil des Gebäudeinneren [57], gilt als Voraussetzung, dass zunächst eine klare quantitative und qualitative Festlegung der Kriterien für Tageslichtbeleuchtung festgelegt werden muss.

In den vorausgehenden Abschnitten wurden eine Reihe von Literaturstellen zum Thema visueller Komfort ausgewertet und diskutiert. Als Ergänzung wurde eigene Messreihen und

Evaluierungen durchgeführt. Dabei wurde klar, dass die in der Regel in Mitteleuropa erarbeiteten Grundlagen nicht einfach auf die Tropen zu übertragen sind.

Die erarbeiteten eigenen Grenzwerte können als Orientierungswerte verwendet werden, solange keine bessere Basis für die Tropen vorhanden ist. Insbesondere die Betrachtung der Leuchtdichte und damit verbunden der Blendung bedarf weiterer Untersuchungen.

Die aus diesem Kapitel resultierenden Orientierungswerte, die für die weiteren Betrachtungen verwendet werden, werden im Kapitel „Tageslichtkontrollsysteme“ im Abschnitt „Methodik der Simulationen“ zusammengefasst.

5. Tageslichtkontrollsysteme

Nach der Untersuchung der Tageslichtverhältnisse und der Parameter des visuellen Komfort am Standort Rio de Janeiro beschäftigt sich dieses zentrale Kapitel zunächst mit einer Schematisierung und Evaluierung von Tageslichtkontrollsystemen. Der bewusst gewählte Ausdruck „Tageslichtkontrollsysteme“ bringt die komplexen Anforderungen zum Ausdruck, welche die Nutzung des Tageslichtes generell, nicht nur in den Tropen, stellt. Bei der Beurteilung der Tageslichtkontrollsysteme werden nicht nur die Quantität des in den Innenraum gelangenden Tageslichtes berücksichtigt. Ein besonderes Augenmerk wird auf die „Qualität“ des einfallenden Tageslichtes gelegt, d.h. konkret werden enge, unter dem Kapitel „Visueller Komfort“ erarbeitete Maßstäbe angelegt, die im folgenden exakt festgelegt werden.

Ferner werden bei der quantitativen Bewertung tatsächlich zu erwartende Beleuchtungsstärken und keine auf ein Vergleichssystem bezogene Prozente wie z.B. bei Kaase et al [45] und Aizlewood [58] erarbeitet. Grund hierfür ist eine klare anwendungsorientierte Aussage, die erkennen lässt, wie weit das jeweilige Tageslichtkontrollsystem die Ansprüche an die Tageslichtnutzung erfüllen kann.

Diese Systeme bestehen aus einer Tageslichtlenk- und einer Verschattungskomponente. Dabei gilt es zu berücksichtigen, dass alle Elemente, die nicht zu einem völligen Ausschluss des Tageslichtes führen, eine Tageslichtlenkfunktion haben, so z.B. die Teilumlenkung durch die Oberfläche von Jalousien.

Neben grundsätzlichen Erläuterungen findet eine Beschreibung der jeweiligen Systeme statt.

Anschließend werden die Ergebnisse der RADIANCE – Simulationen für einige ausgewählte Systeme vorgestellt und diskutiert.

Diese Ergebnisse bilden die Datenbasis für das Programm TAKO, das die zu erwartende Tageslichtautonomie der einzelnen Systeme für den Jahresverlauf auf Stundenbasis ermittelt.

5.1. RADIANCE - Beschreibung

Das Lichtsimulations-Programm Siview [40] der Fa. Siteco stellt eine Verknüpfung der Programme Radiance und AutoCAD dar.

Radiance [59] ist ein ursprünglich Unix-basiertes Tages- und Kunstlichtsimulationsprogramm, das mit dem Backraytracing-Verfahren arbeitet. „Bei diesem Verfahren wird die Geometrie

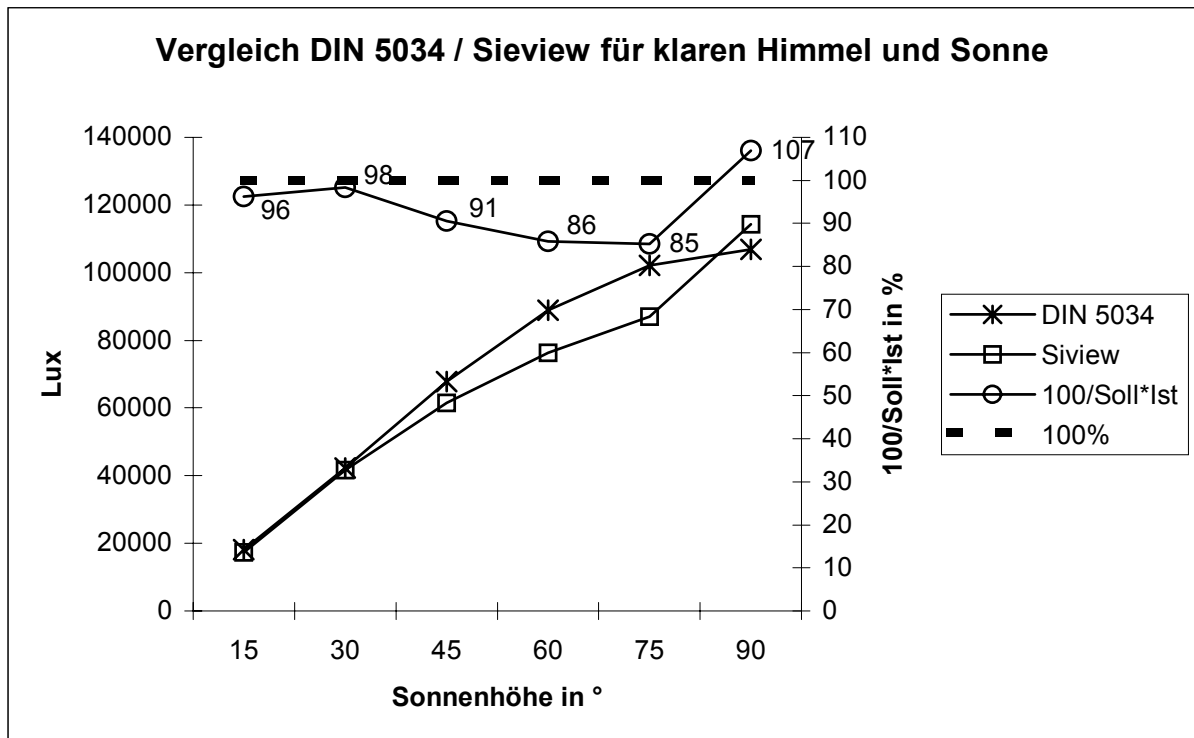
mittels einzelner Lichtstrahlen pixelweise abgetastet. Sobald ein Lichtstrahl auf eine Oberfläche trifft, wird seine physikalische Beschreibung entsprechend Farbe, Oberflächenbeschaffenheit, Reflexions- und Transmissionseigenschaften des Oberflächenmaterials geändert. Das heißt: der Strahl wird (direkt oder diffus) reflektiert oder transmittiert, seine Intensität wird verringert und seine Farbe möglicherweise verändert. Dann wird der reflektierte (transmitierte) Strahl ebenso weiterverfolgt. Raytracing ist ein inhärent korrekter Algorithmus zur Berechnung von Beleuchtung. Auf Kosten der Rechenzeit kann praktisch jeder Detaillierungsgrad erreicht werden. Spiegeln Reflexionen und damit auch eine Blendungsvorhersage oder komplex geformte Spiegeloptiken stellen kein prinzipielles Problem für diese Methodik dar. Die Basisgröße des Ergebnisses ist die Leuchtdichte. Ein mittels Strahlverfolgung erstelltes Computerbild zeigt eine Leuchtdichteverteilung, die einer Fotografie der Szenerie entspricht. Raytracing-Verfahren eignen sich daher gut für leuchtdichte-basierte Lichtplanungsverfahren. (...) Der Hauptnachteil dieser Verfahren liegt darin, dass die gesamte Berechnung neu durchgeführt werden muss, wenn sich der Betrachterstandort und/oder die Blickrichtung verändern. Für konventionelle Lichtplanungsaufgaben sind allerdings nur einige wenige Einzelstrahlen, die typischerweise von den Gitterpunkten auf einer Arbeitsebene ausgehen und deren numerische Werte festgestellt werden, ausreichend.“ [60]

Dieses Verfahren hat gegenüber dem zweiten verbreiteten Verfahren, dem sogenannten Radiosity-Verfahren (Strahlungsverfahren), den Vorteil, dass die dargestellte Leuchtdichteverteilung der vom Auge und der Kamera wahrgenommenen Beleuchtung entspricht und sich komplexe Tageslichtkomponenten und auch Blendungserscheinungen untersuchen lassen. Bei dem Radiosity-Verfahren wird die Beleuchtungsstärkeverteilung dargestellt. Allerdings ermöglicht Radiosity nach einer einmaligen Simulation eine problemlose Veränderung der Beobachterposition.

Siview/Radiance - Validierung

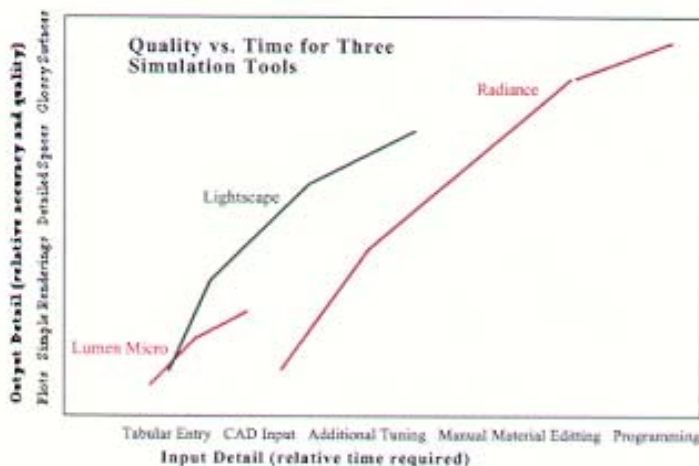
Bei einer im Rahmen der IEA Task 21 durchgeführten Softwarevalidierung [61] „wurden die Programme RADIANCE, SUPERLITE, GENELUX, ADELIN und Leso-Dial zur Berechnung verschiedener fest vorgegebener Raumgeometrien genutzt und diese Räume im Modell unter den Bedingungen künstlicher Himmel gemessen. Für drei grundlegende Raumgeometrien wurden die Reflexionseigenschaften der Oberflächen variiert.

Die Ergebnisse zeigen, dass zur Berechnung der Beleuchtungsverhältnisse im Innenraum eine sorgfältige Modellierung der Himmelsbereiche erfolgen muss, die durch die Fenster sichtbar sind.



Grafik 5.1. horizontale Beleuchtungsstärke E_H bei klarem Himmel mit Sonne in Abhängigkeit von der Sonnenhöhe – Vergleich der Ergebnisse nach DIN 5034 und der mit Radiance/Siview erzeugten Werte

Direkte Strahlungsanteile werden im Raum mit einer Genauigkeit von ca. 5% simuliert. Die reflektierten Strahlungsanteile hängen stark von den optischen Eigenschaften der Materialien ab. Für perfekt diffus reflektierende Oberflächen wurden zufriedenstellende Rechengenauigkeiten (Abweichungen kleiner 10%) in Fensternähe erreicht. Bei gleichen Materialien trafen in tiefen Raumbereichen zu niedrige Simulationsergebnisse auf. Dies ist darauf zurückzuführen, dass die Annahme der perfekt diffusen Reflexion für die Modellmessungen falsch ist und der Einfluss der Raumbereiche sehr wichtig ist. Schließlich wurde deutlich, dass Modellierung und Wahl der Simulationsparameter großen Einfluss auf die Qualität der Ergebnisse hat.



Wichtige Größen sind hierbei die Beschreibung von Lichtquellen, die Photometrie der Materialien, die Gebäudegeometrie und Programmoptionen.“ [61]

Grafik 5.2. Vergleich dreier Lichtsimulationsprogramme hinsichtlich Qualität und Eingabeaufwand [50]

Trotz der in dieser Untersuchung festgestellten Schwachstellen gilt dieses Programm als die bisher beste Möglichkeit, komplexe Tageslichtsituationen darzustellen (siehe auch Grafik 5.2.).

AutoCAD stellt das zur Zeit weltweit verbreitetste Computer Aided Design Programm dar, hergestellt und vertrieben durch die Fa. Autodesk. AutoCAD fungiert als Eingabeoberfläche für die lichtspezifisch zu analysierende Geometrie. Vorhandene AutoCAD-Zeichnungen können verwendet werden, müssen aber in der Regel überarbeitet werden und gegebenenfalls von 2D auf 3D erweitert werden.

5.2. Methodik der eigenen Simulationen

Die Methodik der Simulationen ist so angelegt, dass ein möglichst universeller Einsatz der Ergebnisse ermöglicht wird. Aus den gewonnenen Ergebnissen wird das Profil des Tageslichtkontrollsystems entwickelt. Es enthält die durchschnittliche Beleuchtungsstärke bei 2,5 m, 5,0 m, 7,5 m und 10,0 m, jeweils für CIE „Clear sky & sun“ (CSS, diese Werte sind weltweit einsetzbar) und „Tropical Overcast Sky Rio“ ($TOS_{(Rio)}$, diese Werte gelten für Rio und sollten für jeden Standort neu simuliert werden). Ferner werden zur Kontrolle der maximalen vertikalen Beleuchtungsstärke am Bildschirm die Werte für E_{VIC1} und E_{VIC2} angegeben.

5.2.1. Sonnenhöhen γ_s

Die Systeme werden systematisch auf ihre Wirkung bei Sonnenhöhen von $15^\circ < \gamma_s < 90^\circ$ in Schritten von 15° untersucht. In Fällen von feststehenden Systemen, die speziell für eine Orientierung ausgelegt wurden, kann auf die Simulation von Sonnenständen verzichtet werden, wenn diese nicht vorkommen können. So werden bei feststehenden Systemen, die für eine definierte Fassadenorientierung und den Standort Rio de Janeiro exemplarisch ausgelegt werden, nur die in Frage kommenden Sonnenhöhen und Azimutwerte untersucht.

Dieses wird im Einzelfall bei den untersuchten Systemen erläutert.

5.2.2. Orientierung

Um eine möglichst universelle Nutzung der Ergebnisse zuzulassen, wird ein System verwendet, das die Azimutdifferenz ΔAz zwischen der Fassade (α_F) und der Sonne (α_S) zur Grundlage hat. Dabei wird ein Halbkreis von $0^\circ - 180^\circ$ in 45° -Schritten untersucht.

Im folgenden wird die Aussagekraft der Ergebnisse für die kritischen Azimutdifferenz $\Delta = 45^\circ$ und -45° für den fassadennahen Bereich untersucht. Es werden dabei die Ergebnisse der

vertikalen Beleuchtungsstärken E_{VI1} , E_{VIC1} , E_{VHG1} (Definition dieser Messstellen siehe Kapitel „Visueller Komfort“) und die horizontale Beleuchtungsstärke E_{PDCS5} verglichen.

Abweichung von Simulationen zwischen $\Delta \alpha_S - \alpha_F = 45^\circ$ (NNW) und $\Delta \alpha_S - \alpha_F = -45^\circ$ (NNO):

	Beispiel 1: Brise 335 (geregelt)			Beispiel 2: Jalousie (geregelt)		
	NNO	NNW	Abweichung in %	NNO	NNW	Abweichung in %
E_{VI1}	4514	4556	+1	3839	3965	+3
E_{VIC1}	1885	1769	-6	1575	1594	+1
E_{VHG1}	2257	2115	-6	2131	2052	-4
E_{PDCS5}	487	511	+5	436	442	+1

Tabelle 5.1. Beispiel 1: Brise 335 mit $\gamma_B = -30^\circ$, $\gamma_S = 30^\circ$; Beispiel 2: Normal-Jalousie mit $\gamma_J = 45^\circ$, $\gamma_S = 45^\circ$ (γ_J gibt die Neigung der Jalousie an)

	Beispiel 1: Jalousie (geregelt)			Beispiel 2: Tageslicht-Jalousie		
	NNO	NNW	Abweichung in %	NNO	NNW	Abweichung in %
E_{VI1}	3242	3085	-5	2691	2466	-8
E_{VIC1}	1406	1378	-2	1483	1560	+5
E_{VHG1}	1724	1718	0	2115	2111	0
E_{PDCS5}	362	369	+2	490	479	-2

Tabelle 5.2. Beispiel 1: Jalousie mit $\gamma_J = 50^\circ$, $\gamma_S = 30^\circ$; Beispiel 2: Tageslicht-Jalousie mit $\gamma_{TLJ} = 5^\circ$, $\gamma_J = 65^\circ$, $\gamma_S = 45^\circ$

Fazit

Die Abweichungen, die bei den simulierten Werten zwischen einem Sonnenazimut von 45° in NNO und in NNW festgestellt wurden, sind gering. Der Grund dafür liegt in der Ausblendung der Direktstrahlung durch die Tageslichtkontrollsysteme. Die geringe Abweichung erlaubt somit, dass die in der Folge simulierten Werte für einen Sonnenazimut von Nord über Ost nach Süd an der Nord-Südachse gespiegelt werden können. Die ermittelten Ergebnisse für z.B. einen $\Delta Az = 90^\circ$ wird somit auch für ein $\Delta Az = -90^\circ$ verwendet.

Die „West-Werte“ werden daher nicht separat ermittelt.

5.2.3. Himmelszustände

Es werden die im Kapitel „Tageslicht in den Tropen“ definierten Himmelszustände den Simulationsrechnungen zugrundegelegt:

- 1) CIE Clear Sky and Sun (CSS) und

2) Tropical Overcast Sky für Rio de Janeiro ($TOS_{(Rio)}$)

5.2.4. Raumgeometrie

Für den virtuellen Modellraum wurde eine Raumbreite von 5,0 m und eine Raumtiefe von 10,0 m angenommen. Die lichte Raumhöhe beträgt 3,0 m. Als Brüstungshöhe werden 0,75 m angenommen.

5.2.5. Materialoberflächen des Raumes

Die verwendeten Reflexionsgrade orientieren sich an den von der EN 12464 [38] empfohlenen Werten: für die Decke beträgt der Reflexionsgrad daher 0,8, für die Wände beträgt er 0,7 und für den Boden 0,3. Von den empfohlenen Maximalwerten (0,9) wird abgesehen, da diese auf Dauer ohne aufwendige Pflege nur schwer aufrechterhalten werden können. Für die Arbeitsflächen wird der von Bartenbach [43] vorgeschlagene Wert 0,46 verwendet: der Vergleich der Arbeitsleistung bei drei verschiedenen Reflexionsgraden, schwarz ($\rho=0,08-0,18$), weiß ($\rho=0,80-0,85$) und hellgrau ($\rho=0,35-0,45$), brachte deutliche Unterschiede zu Tage: bei hellgrau wurde eine 15% höhere Arbeitsleistung festgestellt im Vergleich zu schwarz, weiß schnitt geringfügig besser ab als schwarz.

Für opake Oberflächen wird das Radiance-Material „plastic“ eingesetzt.

Der Wert „specularity“ wird auf 0 (matt) gesetzt. Der Wert für „roughness“ wird ebenfalls mit 0 (glatt) festgelegt. Der als für „plastic“ als sinnvoll anerkannte Bereich liegt bei „specularity“ zwischen 0,0 und 0,07 und bei „roughness“ zwischen 0 und 0,2 [62].

Für die transparenten Elemente in der Fassade (Fenster) wird, wenn nicht anders angegeben, das Radiance-Material „glass“ mit einer Transmission von 85% (Transmissivity 0,93) angenommen. Dieser Wert liegt im Bereich einer klaren Doppelverglasung bzw. einer Einfachverglasung von 6 mm ($\tau_{vis} = 0,883$ [63], bzw. 0,87 (HELIOS)), die leicht verschmutzt ist. Fensterrahmen werden aus Vereinfachungsgründen nicht berücksichtigt.

5.2.6. Umgebung

Es wird bei der Simulation von einem freien Horizont ausgegangen. Die Bodenreflexion ist mit 20% konstant. Generell funktioniert die angewandte Methodik auch mit teilweise oder völlig verbautem Horizont.

Weitere Grundeinstellungen im Programm Siview/RADIANCE finden sich in Anhang

I.1., I.2., I.3.

5.2.7. Raumnutzungsvarianten

Da die Ergebnisse der Simulationen sowohl für quantitative wie für qualitative Bewertungen herangezogen werden, ist die Festlegung von Grenzwerten für die vertikale Beleuchtungsstärke in Fassadennähe notwendig. Wie im Kapitel „Visueller Komfort“ erarbeitet, hängen die jeweiligen Grenzwerte maßgeblich von den verwendeten Monitoren ab. Um möglichst reale Bedingungen zu simulieren, wurden zwei Raumnutzungsvarianten / Bildschirmqualitätsvarianten entwickelt.

Variante 1: TFT-Bildschirme in Fassadennähe

Bei dieser Variante werden die Grenzwerte für TFT-Schirme bereits in unmittelbarer Nähe zur Fassade wirksam.

Es wird dabei von einer hohen Bürobesetzung ausgegangen. Dieser Zustand ist in Brasilien häufig anzutreffen. Um 10 Arbeitsplätze auf 50 m² unterzubringen, muss auch der fassaden-nahe Bereich für Arbeitsplätze genutzt werden (siehe Abbildung 5.1.). Die Position ist zwar allgemein üblich, führt aber aufgrund der hohen Direkt- und Diffusstrahlung und damit verbunden zu Blend- und Wärmeproblemen in den Tropen in der Regel zu einer Totalverschattung. Die Innenraumbeleuchtung findet dann ausschließlich über Kunstlicht statt. Aufgrund der generell kritischen Position werden in den Simulationen die ermittelten Grenzwerte für den wesentlich unempfindlicheren TFT-Bildschirm verwendet.

Variante 2: Röhrenmonitore

Bei Variante 2 wird die Bürobesetzungsdichte deutlich verringert. Insbesondere wird ein ausreichender Abstand zwischen den Arbeitsplätzen und der Fassade eingehalten. Mit dieser gewählten Anordnung lassen sich konventionelle Röhrenmonitore einsetzen (Abbildung 5.2.).

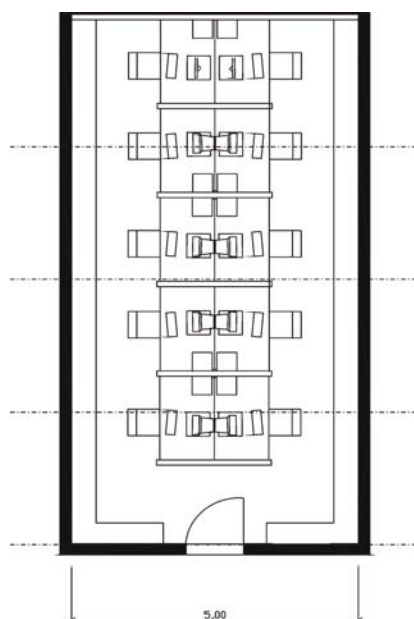
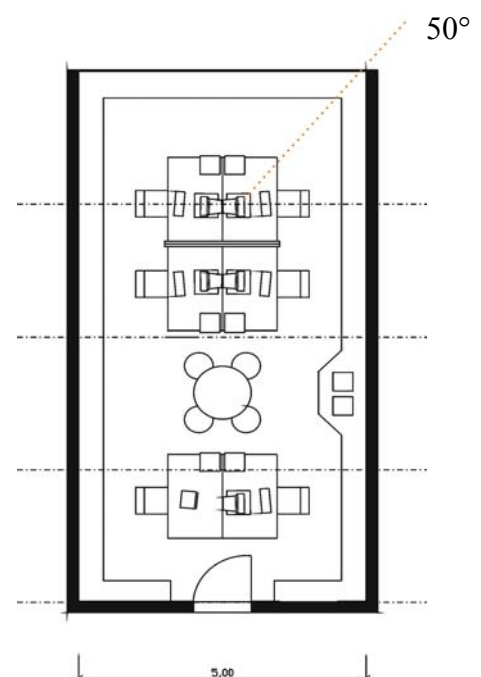


Abbildung 5.1. Grundriss Variante 1

Abbildung 5.2. Grundriss Variante 2



5.2.8. Beleuchtungsstärke

Für die Beleuchtungsstärkesimulationen wird der virtuelle Modellraum zunächst unmöbliert verwendet.

Um den Einfluss der Möblierung abschätzen zu können, werden einzelne Situationen auch mit einem nach Variante 2) möblierten Raum simuliert. Das Verhältnis zwischen unmöblierten und möblierten Raum kann anschließend als Faktor $F_{M2,5}$, F_{M5} , $F_{M7,5}$ und F_{M10} in TAKO eingesetzt werden (siehe Abschnitt „Tageslichtautonomie“).

5.2.8.1. Messpunkte

Horizontale Beleuchtungsstärke

Die Messpunkte für eine generelle Beurteilung der Tagslichtsituation liegen nach der brasilianischen Norm NBR 5382 auf einer Arbeitshöhe von 0,80 m.

In die Tiefe des Raumes wird in Raummitte jeden Meter ein Messpunkt gesetzt. Mit den Ergebnissen lässt sich der Tageslichtabfall mit zunehmender Raumtiefe darstellen.

Um das Potential der Tageslichtkontrollsysteme in Abhängigkeit von der Raumtiefe zu ermitteln, werden in den Abständen 2,5 m, 5,0 m, 7,5 m und 10,0 m jeweils Messpunkte parallel zur Fassade angeordnet.

Die Messpunkte befinden lateral 0,5 m von der Wand entfernt, die restlichen 4,0 m in der Breite werden durch 3 Messlinien unterteilt. Es werden damit pro fassadenparalleler Messlinie 5 Messpunkte eingerichtet. Das Potential $E_{PD\text{CSx}(\Delta;\gamma\text{s})}$ für klaren Himmel und Sonne und $E_{PD\text{TOS}(\Delta;\gamma\text{s})}$ für bedeckten Himmel wird durch die Addition der jeweiligen Werte, z.B. E_{5-1} bis E_{5-5} (siehe Abbildung 5.3.) und die anschließende Division durch die Anzahl der berücksichtigten Messpunkte errechnet:

es gilt:

$$E_{PD\text{CSx}(\Delta;\gamma\text{s})} = \sum_{i=1}^5 E_{x-i} / i \quad \text{für Simulationen mit CSS}$$

$$E_{PD\text{TOSx}(\Delta;\gamma\text{s})} = \sum_{i=1}^5 E_{x-i} / i \quad \text{für Simulationen mit TOS}$$

Auf ein herkömmliches Messgitter wurde bewusst verzichtet. Die mit dieser Messmethodik zu ermittelnde Beleuchtungsstärke-Verteilung mit Minima und Maxima und die darauf abzuleitende Innenraumbeluchtungsqualität mag bei Kunstlicht sinnvoll sein, bei Tageslicht und einer Raumgeometrie wie der des virtuellen Modellraums (große Raumtiefe) macht dieses

keinen Sinn. Es wurden auch bewusst die Messstellen auf das notwendige Minimum beschränkt, um die Rechenzeiten zu reduzieren.

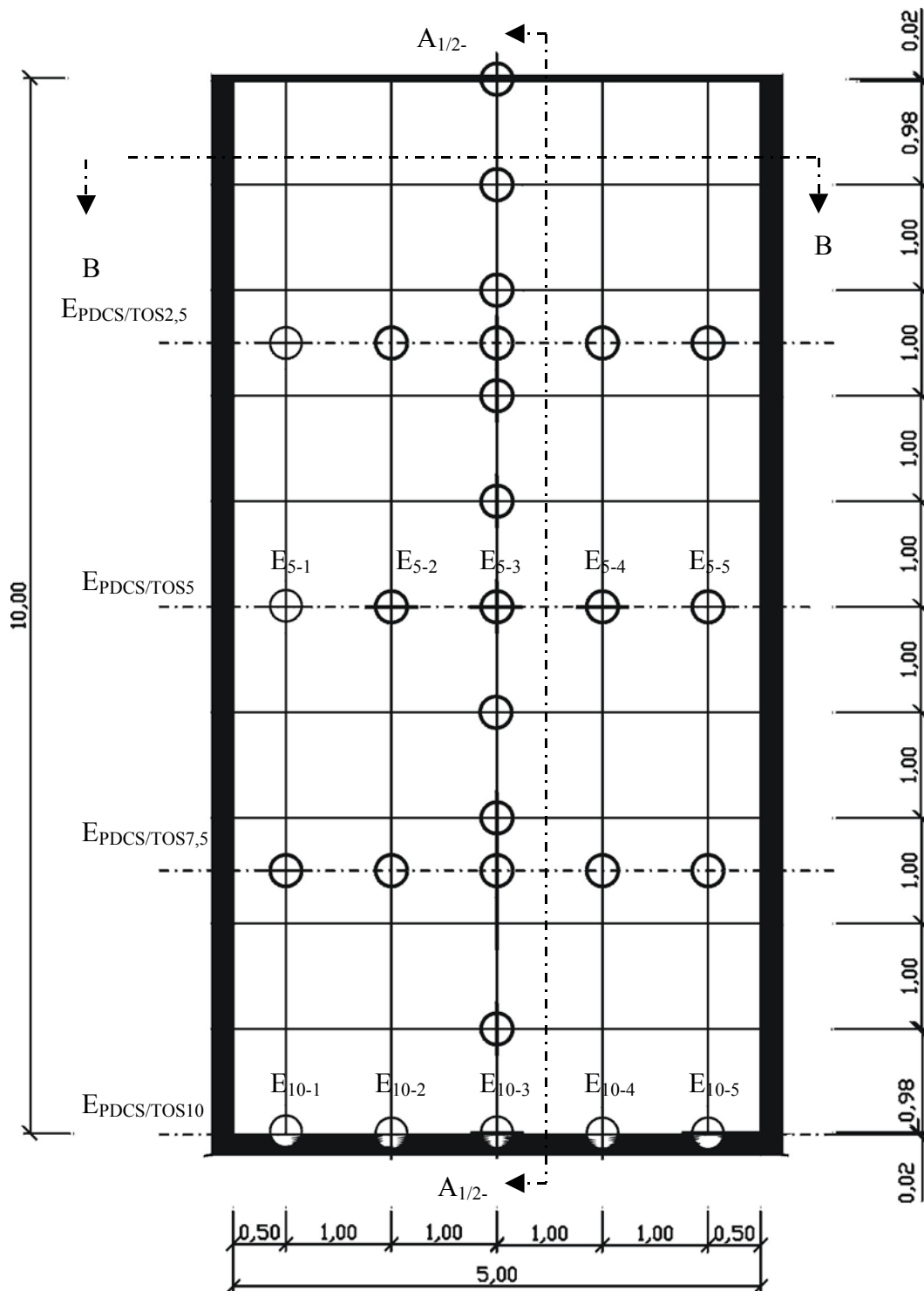


Abbildung 5.3.: horizontale Lage der Messpunkte

Vertikale Beleuchtungsstärke am Bildschirm

Zusätzlich zu dem horizontalen Messraster werden vertikale Messpunkte festgelegt. Dabei werden zwei Positionierungsmöglichkeiten des Bildschirmes berücksichtigt.

- a) Variante 1: der Bildschirmmittelpunkt und damit die Messpunkte befindet sich in einem Abstand vom 1,00 m von der Fassade entfernt. Ein Messpunkt befindet sich in einer Höhe von 1,10 m direkt vor dem Bildschirm, der andere befindet sich vor der seitlichen Wand in einer Höhe von 1,35 m (siehe Abbildung 5.4.). Durch die Auswertung dieser beiden vertikalen Messpunkte sind Bewertungen hinsichtlich des Kontrastes der Beleuchtungsstärke zwischen Sehaufgabe (Bildschirm) und Hintergrund (Wand) möglich.

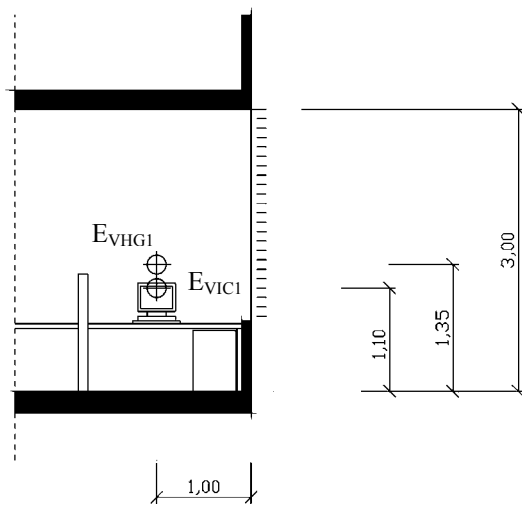


Abbildung 5.4. Teil-Schnitt A1-A1
– Messpunkte in Variante 1

- b) Variante 2: der Bildschirmmittelpunkt und damit die Messpunkte befindet sich in einem Abstand vom 2,5 m von der Fassade (siehe Abbildung 5.5.). Es wird dabei von einem Raumkonzept ausgegangen, das bewusst Ablageflächen und einen Erschließungsgang zwischen Fassade und Arbeitsplatz legt, um so die visuelle und thermische Qualität des Arbeitsplatzes zu verbessern, bzw. höhere vertikale Beleuchtungsstärken EVI im Innenraum der Fassade zu ermöglichen.

Die Messpunkthöhen von 1,10 m und von 1,35 m entsprechen der Variante 1.

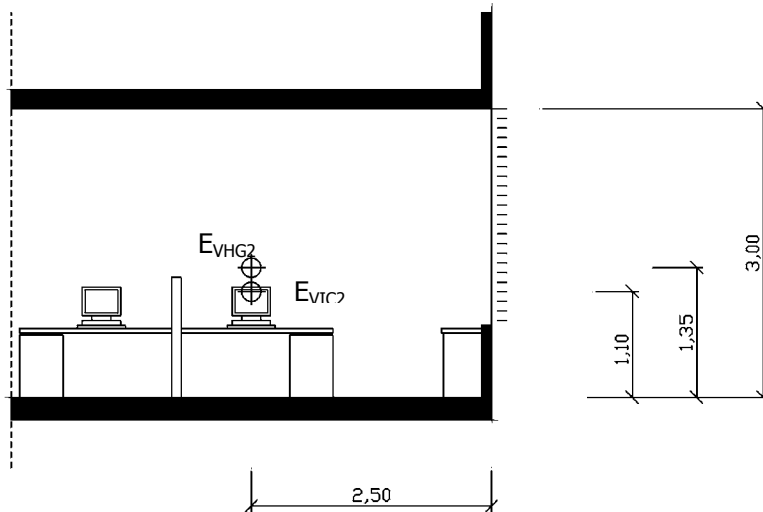


Abbildung 5.5. Teilschnitt A2-A2 - Lage der vertikalen Messpunkte in Variante 2

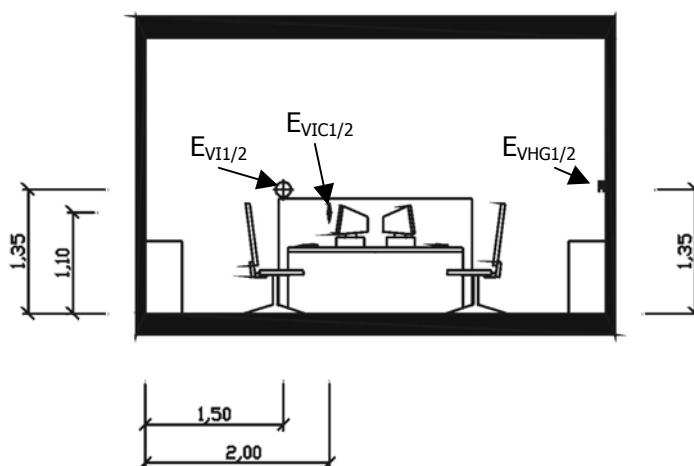


Abbildung 5.6. Schnitt B – B durch den Raum „Variante 2“ mit Angabe der Messpunkte, deren angegebene Höhen für beide Varianten gültig sind

5.2.8.2. Grenzwerte für die Beleuchtungsstärke

Ein wesentliches Ziel der Simulationen ist neben der quantitativen Aussage – wie viel Tageslicht kommt in welcher Raumtiefe an – eine Aussage zur Qualität der Beleuchtung mit Tageslicht. Es wurden daher über eigene Messungen (siehe Kapitel „visueller Komfort“) Grenzwerte ermittelt. Diese gilt es einzuhalten, will man sichergehen, dass auch die Nutzung des gesamten Raumes mit den hinsichtlich der Beleuchtung sensiblen Computerarbeitsplätzen möglich ist.

Wie unter „Raumnutzungsvarianten“ beschrieben, werden zwei Szenarien bei der Untersuchung berücksichtigt:

Variante 1 mit einem TFT-Monitor in unmittelbarer Fassadennähe (1,0 m) und Variante 2 mit einem Röhren-Monitor in einer Distanz von ca. 2,5 m von der Fassade.

Die Tageslichtkontrollsysteme werden generell mit Hilfe der Grenzwerte ausgelegt. Bei den Grenzwerten handelt es sich um:

- 1) E_{VIC1} dieser Wert gibt die maximale vertikale Beleuchtungsstärke am Bildschirm 1 an, mit der noch problemlos gearbeitet werden kann.
Für Variante 1 wird ein Grenzwert 2000 lux gewählt. Bei der Auslegung der Tageslichtkontrollsysteme wird darauf geachtet, dass der Wert für E_{VIC1} maximal + 10% von dem Grenzwert abweicht.
- 2) E_{VIC2} gibt die maximale Beleuchtungsstärke am Bildschirm in Variante 2 wieder. Der Grenzwert beträgt 1000 lux.
- 3) E_{VI1} gibt die vertikale Beleuchtungsstärke in Kopfhöhe am fensternahen Arbeitsplatz bei Variante 1 wieder. Dieser Wert bewertet die thermische Komponente des Tageslichtes (die Wirkung selektiver Glasbeschichtungen wird an dieser Stelle nicht berücksichtigt). In Variante 1 wird dieser Grenzwert mit 5.000 lx festgesetzt. Dieser Grenzwert basiert auf eigenen Messungen in Rio de Janeiro. Der in der DIN 33403 Teil 3 [44] empfohlene untere Grenzwert für thermische Strahlung von 35 W/m² erscheint als für die Tropen zu niedrig. Es wird daher an dem eigenen, unter tropischen Bedingungen ermittelten, Grenzwert von 5000 lx (ca. 46 W/m²) festgehalten.
- 4) E_{VI2} entspricht dem Wert E_{VI1} für Variante 2. Es gilt der Grenzwert von 5000 lx.
- 3) $E_{VHG1/2}$ gibt die vertikale Beleuchtungsstärke an der Wand im Hintergrund des Bildschirms/Blickachse senkrecht zum Bildschirm wieder. Dieser Wert wird zur Bewertung des Kontrastes im Blickfeld verwendet. Da dieser Wert sich jedoch aufgrund der Auslegung des Modellraumes und der strengen Grenzwerte $E_{VIC1/2}$ und $E_{VI1/2}$ in allen untersuchten Fällen sehr nahe an den Werten für $E_{VIC1/2}$ liegt, wird dieser Wert zwar in den Simulationen ermittelt, nicht aber in den Ergebnissen ausgewiesen.

Generell wurde bei den Simulationen versucht, nahe an die Grenzwerte heranzukommen. Das hat zwei Gründe: zum einen leistet auch das Sichtfenster einen wesentlichen Beitrag zur Tageslichtnutzung: Der durch das Sichtfenster eintretende Teil belichtet insbesondere die ersten Meter, die durch das in vielen Fällen als Blendschutz notwendige interne Lichtschwert

verschattet werden (diese Situation wird in den Auslegungen der Tageslichtkontrollsysteme mit Oberlicht genauer dargestellt). Zum anderen wird durch ein möglichst helles Sichtfenster der Kontrast zum Oberlicht gemindert: Das Oberlicht erhält durch die Nutzung der diversen Tageslichtsysteme eine hohe Leuchtdichte, was zu Blendungen durch die dann auftretenden Kontraste führen kann. Ein helles Sichtfenster kann an dieser Stelle Abhilfe schaffen.

5.2.9. Leuchtdichte

Für die Leuchtdichtemessungen wird der virtuelle Modellraum möbliert verwendet. Die Leuchtdichte wird über eine Falschfarbendarstellung in Radiance überprüft.

Es werden zwei Situationen untersucht:

- 1) Die absolute Leuchtdichte sowie die Leuchtdichteunterschiede im Blickfeldzentrum mit einer Sichtachse parallel zur Fassade am fassadennahen Arbeitsplatz. Das Blickfeldzentrum entspricht dabei in etwa einem Kegel mit einem Öffnungswinkel von 40° [47]. In dieser Blickachse wird ferner das Blickfeld/Gesichtsfeld, das horizontal auf 180° zur Blickachse und vertikal auf 60° oberhalb und unterhalb des Horizonts beschränkt ist [47], berücksichtigt.
- 2) Die absolute Leuchtdichte sowie der Leuchtdichteunterschied zwischen dem Oberlicht und dem Sichtfenster mit der Blickachse senkrecht zur Fassade.

Die Simulationen werden dabei auf zu erwartende Extremsituationen begrenzt.

5.2.9.1. Grenzwerte für die Leuchtdichte

Für die Situation 1) sollte die Leuchtdichte $< 10.000 \text{ cd/m}^2$ sein (siehe eigene Untersuchung in „Visueller Komfort“). Als maximaler Leuchtdichteunterschied wird das Verhältnis 10:1 zugelassen (Sehaufgabe und (dunklerer) Hintergrund [29]).

Für die Situation 2) sollte die Leuchtdichte des Oberlichtes unter 10.000 cd/m^2 liegen. Das Leuchtdichteverhältnis zwischen Oberlicht und Sichtfenster sollte den Wert 20:1 nicht überschreiten (Lichtquelle und Umgebung [29]).

Den genannten Grenzwerten liegen die in eigenen Untersuchungen ermittelten Orientierungswerte sowie Leuchtdichteverhältnisse aus der einschlägigen Literatur zugrunde.

Aufgrund der im Kapitel „Visueller Komfort“ beschriebenen Probleme wird die Leuchtdichtemessung zur Beurteilung, nicht aber zur Auslegung der Tageslichtkontrollsysteme verwendet.

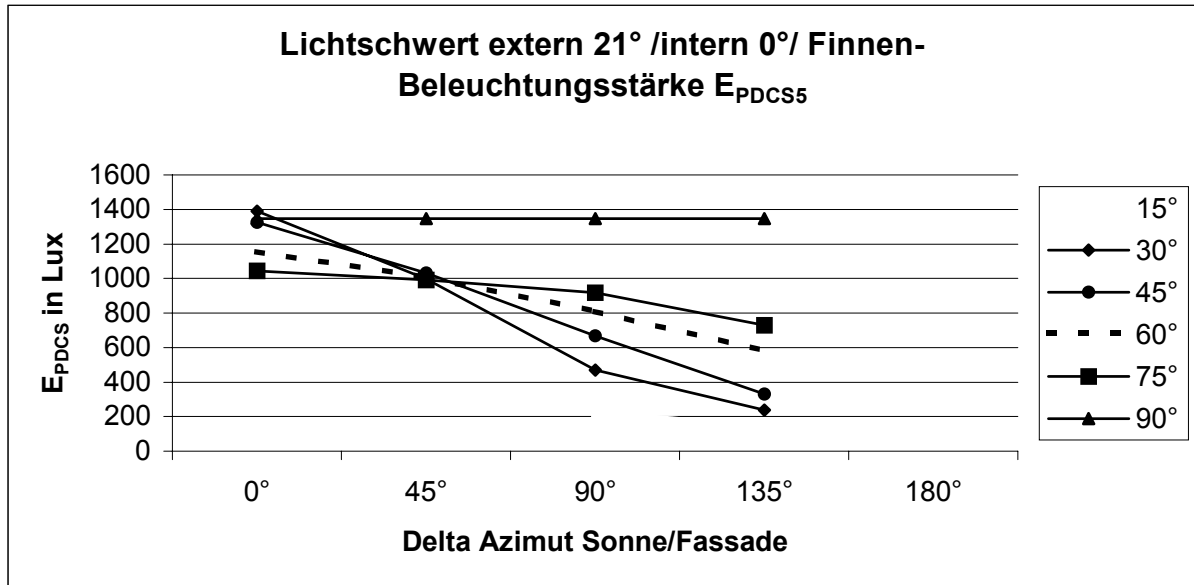
5.2.10. Ergebnisdarstellung

Die Simulationsergebnisse werden folgendermaßen dargestellt:

für klaren Himmel und Sonne (CSS):

Kurvengrafiken mit der Darstellung der Werte E_{PDCS5} und E_{PDCS10} in Abhängigkeit von Sonnenhöhe γ_S und Azimutdifferenz $\Delta|\alpha_S - \alpha_F|$.

Beispiel:

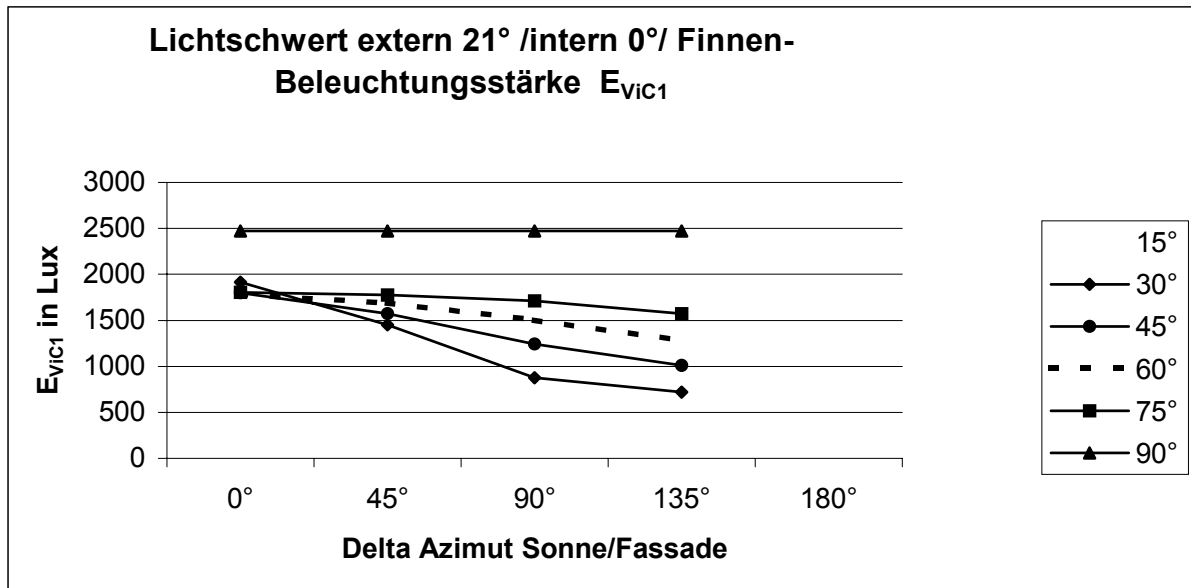


Grafik 5.3. Beispiel für die Ergebnisdarstellung des Tageslichtpotentials eines Systems

Anhand dieser Darstellung lässt sich das Tageslichtpotential des jeweiligen Tageslichtkontrollsystems ablesen. Die Legende weist die jeweilige Sonnenhöhe aus. Aus dieser Grafik lässt sich zudem ablesen, für welche Positionen keine Simulationen durchgeführt wurden. In dem Beispiel ist das bei einer Azimutdifferenz von 180° bei allen Sonnenhöhen und bei den Azimutdifferenzen von 0° und 45° bei einer Sonnenhöhe von 15° der Fall. Diese Positionen treten in Rio de Janeiro für den Auslegungsfall nicht auf.

Kurvengrafiken mit der Darstellung der Werte E_{VIC1} und E_{VIC2} in Abhängigkeit von Sonnenhöhe γ_S und Azimutdifferenz $\Delta|\alpha_S - \alpha_F|$ dienen der Überprüfung, inwieweit die Systeme die festgelegten Grenzen für E_{VIC1} einhalten. Bei dem hier gezeigten Beispiel kann so eine Abweichung für eine Sonnenhöhe von 90° festgestellt werden. Diese tritt aufgrund der Zusammensetzung des Systems aus feststehenden Komponenten auf (nähere Angaben dazu bei der entsprechenden Systembeschreibung). Da diesen Grafiken in erster Linie eine Kontrollfunktion zukommt, werden sie in Anhang III dargestellt.

Beispiel:



Grafik 5.4. Beispiel für die auftretende vertikale Beleuchtungsstärke am Bildschirm bei einem definierten System

Falschfarbendarstellung der Leuchtdichteverteilung für ausgewählte Extremsituationen

Beispiel:

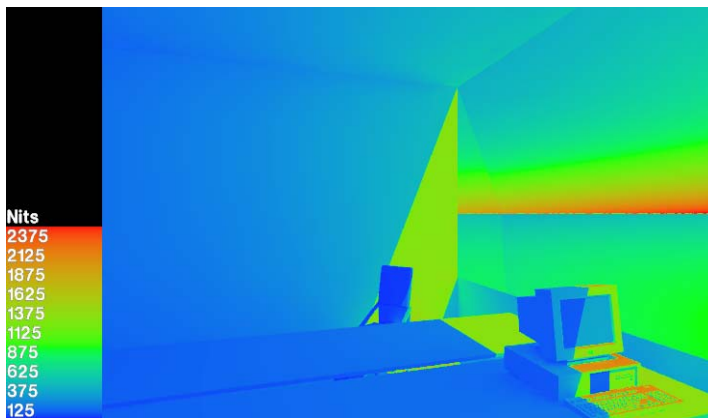


Bild 5.1. Leuchtdichteverteilung: Wärmeschutzverglasung mit $\tau_{sol} = 6\%$; $\Delta|\alpha_S - \alpha_F| = 45^\circ$, $\gamma_S = 60^\circ$

Anhand der Falschfarbendarstellung werden mögliche Blendungssituationen evaluiert. Es wird dabei die Sonnenhöhe $\gamma_S = 45^\circ$ (In Ausnahmefällen auch 60°) untersucht. Dies entspricht der in der Methodik verwendeten Sonnenhöhe, bei der die höchste vertikale Beleuchtungsstärke auftritt (siehe auch Grafik 3.9). Für den Azimut werden die Werte $\Delta Az = 0^\circ$ oder 5° oder 45° verwendet. Auswahlkriterium ist jeweils die Überprüfung möglicher kritischer Bereiche. So wird zum Beispiel bei außenliegenden Finnen $\Delta Az = 13^\circ$ verwendet, da die auf den Finnen auftretende Leuchtdichte zu Blendungserscheinungen führen könnte. Im Fall der

Laser Cut Panel LCP wird mit $\Delta Az = 5^\circ$ gearbeitet, um die Umlenkung an der Decke sichtbar zu machen und mögliche Probleme mit Leuchtdichtekontrasten zu überprüfen. Die in den Grafiken verwendete Einheit „Nits“ entspricht cd/m^2 .

Aus Illustrierungsgründen finden bei der Darstellung unterschiedliche Möblierungen Verwendung, es geht bei diesen Darstellungen jedoch ausschließlich um die Untersuchung der Leuchtdichte und der Leuchtdichtekontraste der Fassadenebene. Es werden bewusst Röhrenmonitore eingesetzt, obwohl die Auslegung für TFT-Monitore stattfindet. Mit dem Einsatz der Röhrenmonitore soll auf die Problematik der Spiegelungen aufmerksam gemacht werden.

Photorealistische Darstellung einer typischen Beleuchtungssituation je Tageslichtkontrollsystem

Beispiel:



Bild 5.2. Sonnenschutzverglasung ohne Jalousien mit $\tau_{\text{sol}} = 47\%$;
 $\Delta|\alpha_S - \alpha_F| = 45^\circ$; $\gamma_S = 30^\circ$

Bei den Simulationen wird eine reine Tageslichtsituation untersucht. Dadurch kann aufgrund der großen Raumtiefe bei der entsprechenden Perspektive der Eindruck relativ dunkler Räume entstehen. Dabei werden die Grenzen der Computersimulationen sichtbar: die Fähigkeit des Auges, sich dynamisch unmittelbar auf andere Leuchtdichten einzustellen, kann graphisch an „Standbildern“ nicht abgebildet werden, was den Wert dieser Simulationen zwar einschränkt, nicht jedoch überflüssig macht.

Die Simulationsergebnisse für klaren Himmel und Sonne sind standortunabhängig.

für bedeckten Himmel (TOS):

durch die Rotationssymmetrie bei der Berechnung des bedeckten Himmels sind nur 6 Simulationen zur Beschreibung des Tageslichtpotentials notwendig. Aufgrund der damit geringeren Anzahl an Ergebnissen wurde eine andere, detailliertere Darstellung gewählt:

Tabelle mit der Darstellung der Werte $E_{\text{PD}TOSx}$ in Abhängigkeit von Sonnenhöhe γ_s , sowie den Werten $E_{\text{VIC}1}$ und $E_{\text{VIC}2}$

Beispiel:

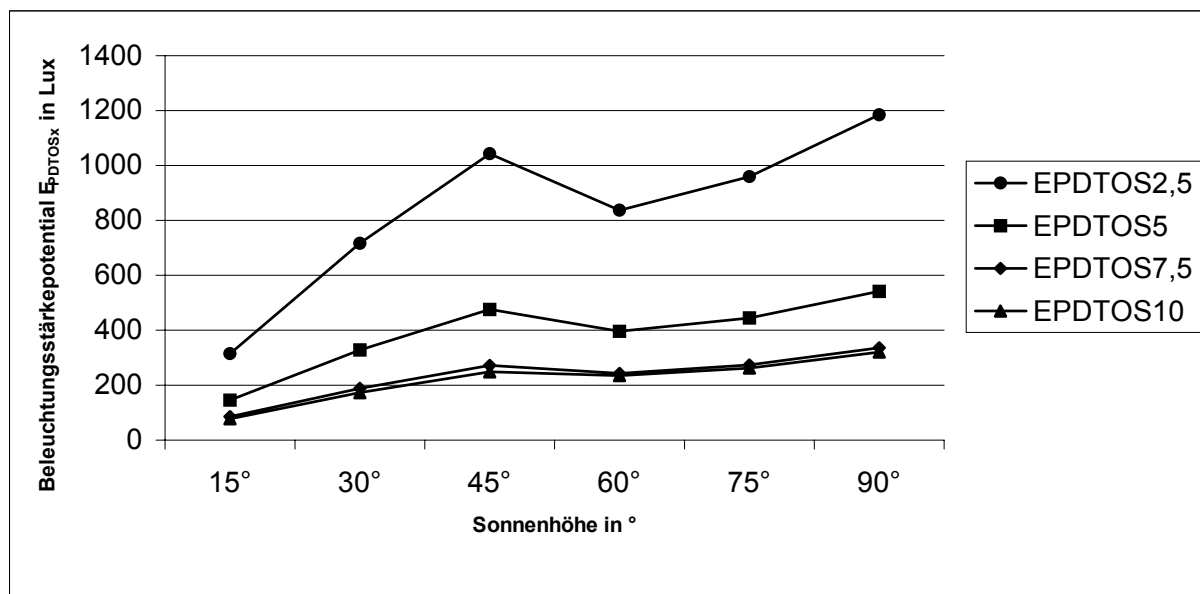
γ_s/γ_j	15°/e	30°/e	45°/e	60°/0°	75°/0°	90°/0°
$E_{\text{PDCS}2,5}$	315	717	1042	836	960	1185
$E_{\text{PDCS}5}$	146	329	475	397	445	542
$E_{\text{PDCS}7,5}$	85	189	272	242	274	335
$E_{\text{PDCS}10}$	77	173	249	234	263	320
$E_{\text{VIC}1}$	552	1264	1840	1095	1242	1556
$E_{\text{VIC}2}$	280	636	925	695	789	974

Tabelle 5.3. Beispiel der Darstellung der Werte $E_{\text{PD}TOSx}$, $E_{\text{VIC}1}$ und $E_{\text{VIC}2}$

In der Kopfzeile sind die Sonnenhöhe γ_s und der korrespondierende Neigungswinkel der Jalousie γ_j angegeben. Dabei steht e. für eingezogene Jalousie.

Kurvengrafiken mit der Darstellung der Werte $E_{\text{PD}TOSx}$ in Abhängigkeit von Sonnenhöhe γ_s

Beispiel:



Grafik 5.5. Beleuchtungsstärkepotential $E_{\text{PD}TOSx}$ für bedeckte Himmelszustände (TOS)

Die Ordinate weist dabei die horizontale Beleuchtungsstärke $E_{\text{PDCS}x}$ aus. Auf der Abszisse sind die Sonnenhöhe γ_s und - falls die Jalousie Bestandteil des Systems ist - der korrespondierende Neigungswinkel der Jalousie γ_j angegeben.

Die Werte für bedeckten Himmel (TOS) gelten nur für den Standort Rio de Janeiro oder einem Standort mit gleichen Himmelszuständen hinsichtlich des bedeckten Himmels (siehe Kapitel „Tageslicht in den Tropen“).

Die Werte für $E_{\text{PDCS/TOS2,5}}$, $E_{\text{PDCS/TOS5}}$, $E_{\text{PDCS/TOS7,5}}$ und $E_{\text{PDCS/TOS10}}$ für beide Himmelszustände finden Eingang in eine entsprechende Matrix des Programms „TAKO“ und bilden die Grundlage für die Ermittlung der Tageslichtautonomie TA_x .

5.3. Tageslichtkontrollsysteme

Im folgenden werden eine Reihe von Tageslichtkontrollsystemen vorgestellt. Zunächst werden die für einen Einsatz notwendigen Kriterien erläutert. Die entwickelten Auslegungskriterien und die angewandte Methodik sind dabei universell für jeden Standort einsetzbar.

Anschließend erfolgt eine Auslegung für den Standort Rio de Janeiro, wobei dabei für verschiedene Systeme bereits die Fassadenorientierung festgelegt werden muss. Diese konkreten Fassadenauslegungen werden anschließend unter Berücksichtigung der unter dem Abschnitt „Grenzwerte für Beleuchtungsstärke“ genannten Kriterien mit Radiance simuliert. Die Systematik der Simulationen wird unter „Methodik der eigenen Simulationen“ geschildert.

Typen

- 1) Bei dem Einsatz von Tageslichtkontrollsystemen muss zunächst zwischen Systemen für den Fassadenbereich und Systemen für den Dachbereich unterschieden werden. Die im folgenden vorgestellten Untersuchungen beschränken sich auf den Fassadenbereich, da in Bürogebäuden (=Mehrgeschossbau) der Nutzen von Tageslichtkontrollsystemen im Dachbereich vergleichsweise unbedeutend ist.
- 2) Eine weitere Unterscheidung muss zwischen feststehenden (starr) Systemen und beweglichen Systemen getroffen werden, sowie einer Kombination aus beiden.
- 3) Ferner kann zwischen zweidimensionalen und dreidimensionalen Systemen unterschieden werden.

Wirkungsweise

Bei der Wirkungsweise gibt es fünf hauptsächliche Unterscheidungskriterien:

- 4) Reduzierung der Transmission im sichtbaren und/oder im nicht sichtbaren Bereich
- 5) zwei- oder dreidimensionale Umlenkung des Tageslichtes
- 6) Umlenkung von Direkt-, Diffus- oder beider Strahlungsarten
- 7) Umlenkung mit oder ohne Ausblendung der Direktstrahlung
- 8) Umlenkung mit oder ohne (Voll-)Verschattung

5.3.1. Feststehende Systeme

Feststehende Tageslichtkontrollsysteme bestanden in der Vergangenheit aus Absorptions-/Reflexionsgläsern, Finnen, Lichtschwertern oder baulichen Elementen wie Balkonen oder Muxarabis, die hauptsächlich der Verschattung dienten.

In den letzten Jahren kamen eine Reihe neuer Elemente zu dieser Gruppe dazu: Laser Cut Panels LCP, Plexiglas Daylight, „Köster“-Jalousien, Okalux-Spiegel-Lamellen, Lichtwellenleiter, Micro-Raster, Holographisch-Optische Elemente HOE, Prismensysteme sowie anidolische Systeme.

Die Vorteile dieser Systeme liegen unter anderem in ihrem einfachen Unterhalt und niedrigerem Anschaffungspreis. Nachteilig ist die fehlende Möglichkeit der Anpassung der Systeme an den jeweiligen Sonnenstand und damit eine schwierige Regulierung des einfallenden Tageslichts. Daher werden sie häufig in Verbindung mit beweglichen Systemen, wie z.B. Jalousien, eingesetzt.

Um eine optimale Nutzung der Systeme zu gewährleisten, ist eine sehr genaue Planung ihres Einsatzes notwendig.

5.3.1.1. Auslegungskriterien für feststehende Tageslichtkontrollsysteme

5.3.1.1.1. Häufigkeitsbetrachtung der Sonnenhöhe für verschieden orientierte Fassaden

Für eine Optimierung von feststehenden Tageslichtlenksystemen ist es notwendig, die Sonnenhöhe, für die das System optimiert werden soll, festzulegen. Dabei gilt es zunächst die Häufigkeit der jeweiligen Sonnenhöhen nach Fassadenorientierung und Standort zu errechnen. Die im folgenden abgebildeten Grafiken sind das Ergebnis der Auswertung des entsprechenden Algorithmus nach DIN 5034 Teil 2. Mit diesem Algorithmus wurde der stündliche Sonnenstand im Jahresverlauf für Rio de Janeiro berechnet (8760 Stundenwerte). Die Sommerzeit wurde dabei nicht berücksichtigt. Es wurde von einem freien Horizont ausgegangen. Es wurden dabei jeweils 3 Öffnungswinkel (siehe Grafik 5.6.) untersucht, um somit die horizontale Eindringtiefe der Sonnenstrahlen bei der Quantifizierung der Sonnenhöhen zu berücksichtigen. Die maximale horizontale Eindringtiefe der Sonnenstrahlen hängt von der Raumbreite und dem horizontalen Einfallswinkel der Strahlen ab.

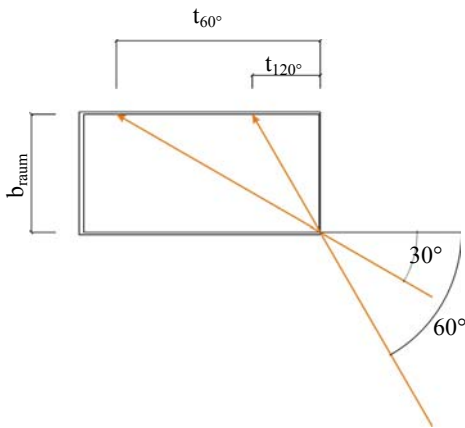


Abbildung 5.7. Grundriss zur Darstellung der Eindringungstiefe der Direktstrahlung

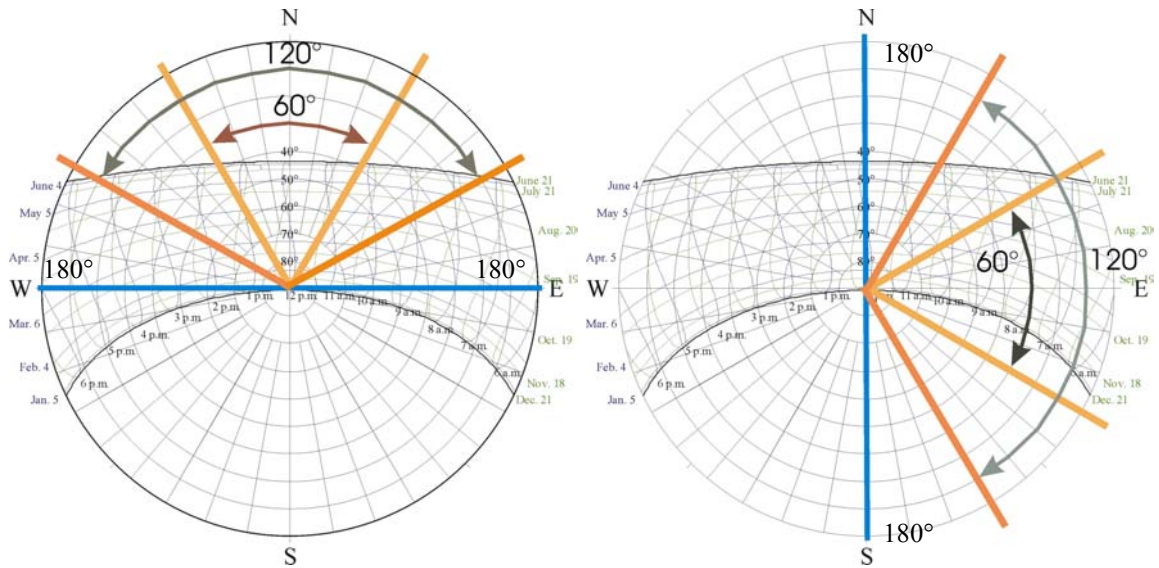
Es gilt:

$$t_{|\alpha_F - \alpha_S|} = \tan(90^\circ - |\alpha_F - \alpha_S|) * b_{\text{raum}}$$

Sonnenhöhenhäufigkeit W_{γ_S} :

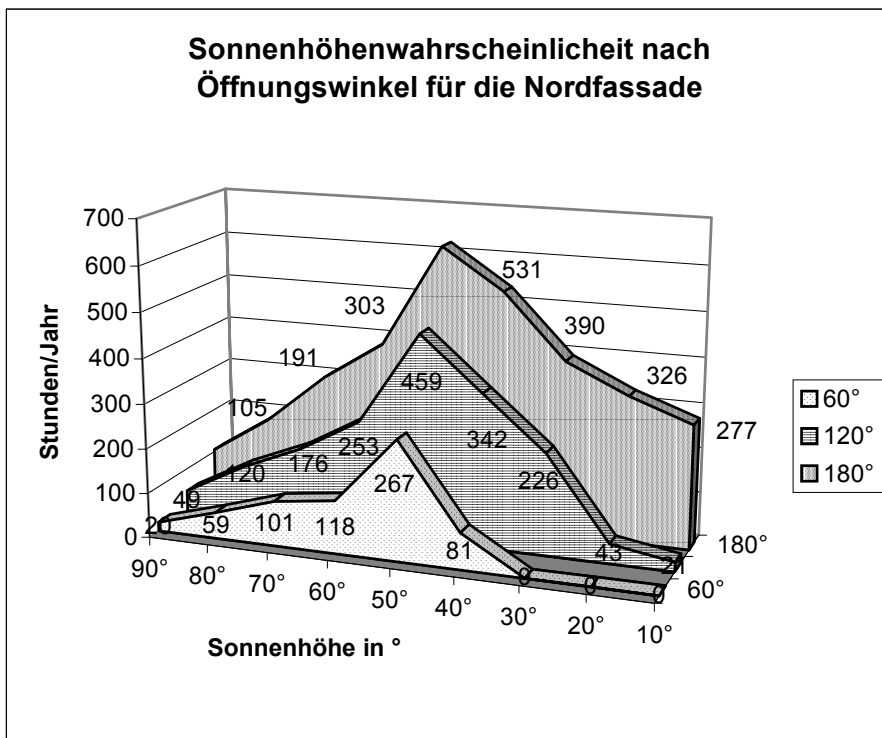
Orientierung/ Öffnungswinkel	Sonnenhöhe γ_S								
	90°	80°	70°	60°	50°	40°	30°	20°	10°
Nord									
60°	20	59	101	118	267	81	0	0	0
120°	49	120	176	253	459	342	226	43	21
180°	105	191	303	392	620	531	390	326	277
NO/NW									
60°	38	59	87	96	180	222	135	157	50
120°	92	134	157	299	483	340	268	248	180
180°	102	171	215	373	569	463	268	311	256
Ost/West									
60°	62	68	62	152	142	184	150	270	256
120°	72	102	103	219	235	304	268	311	256
180°	92	134	157	278	386	340	268	311	256
SO/SW									
60°	0	0	0	0	0	0	0	64	76
120°	46	48	40	123	112	118	134	154	206
180°	66	84	93	166	201	214	268	311	256
Süd									
60°	0	0	0	0	0	0	0	0	0
120°	0	0	0	0	0	0	0	0	0
180°	49	32	63	136	132	136	189	246	254

Tabelle 5.4. Sonnenhöhenhäufigkeit W_{γ_S} in Stunden/Jahr für verschiedene Öffnungswinkel in Abhängigkeit der Fassadenorientierungen γ_F , Werte für Rio de Janeiro

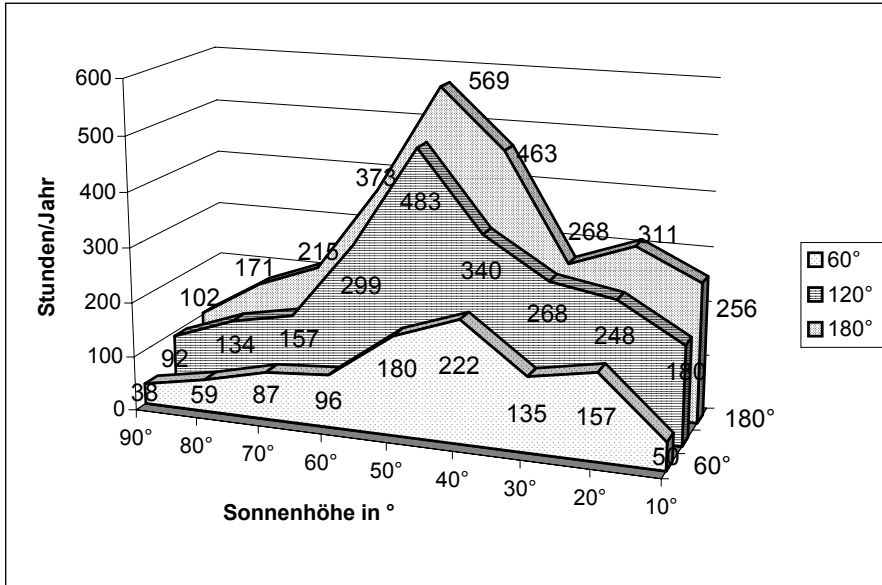


Grafik 5.6. Öffnungswinkel für die Ost- und Nordfassade

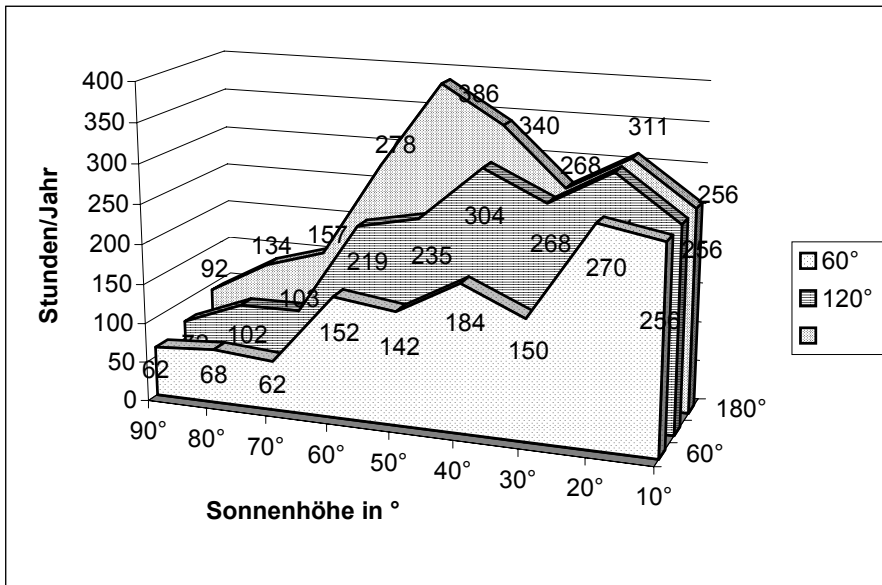
5.3.1.1.2. Auswertung der Sonnenhöhenwahrscheinlichkeit nach Fassadenorientierung für den Standort Rio de Janeiro



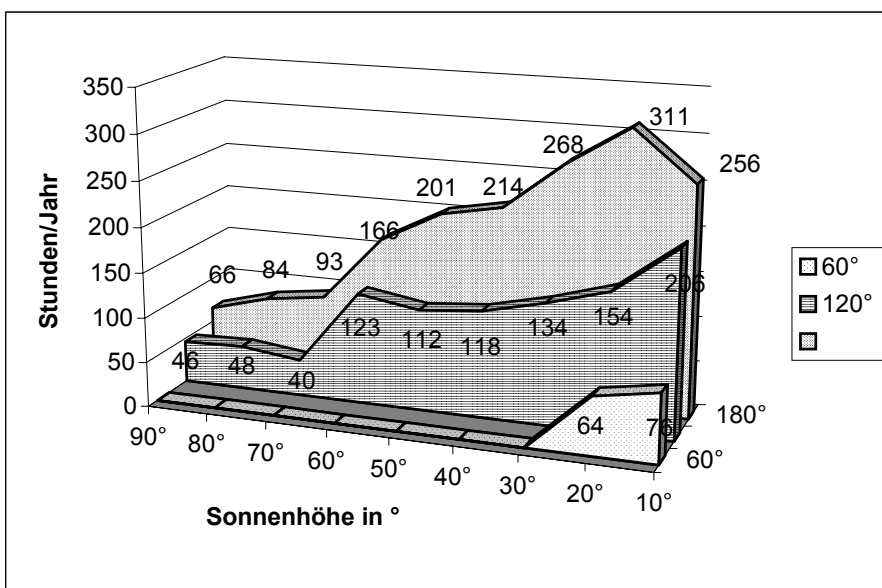
Grafik 5.7. Häufigkeit der Sonnenhöhe im Jahresverlauf für die Nordfassade: Vergleich eines Öffnungswinkels von 60°, 120° und 180° (ohne Berücksichtigung der Sommerzeit)



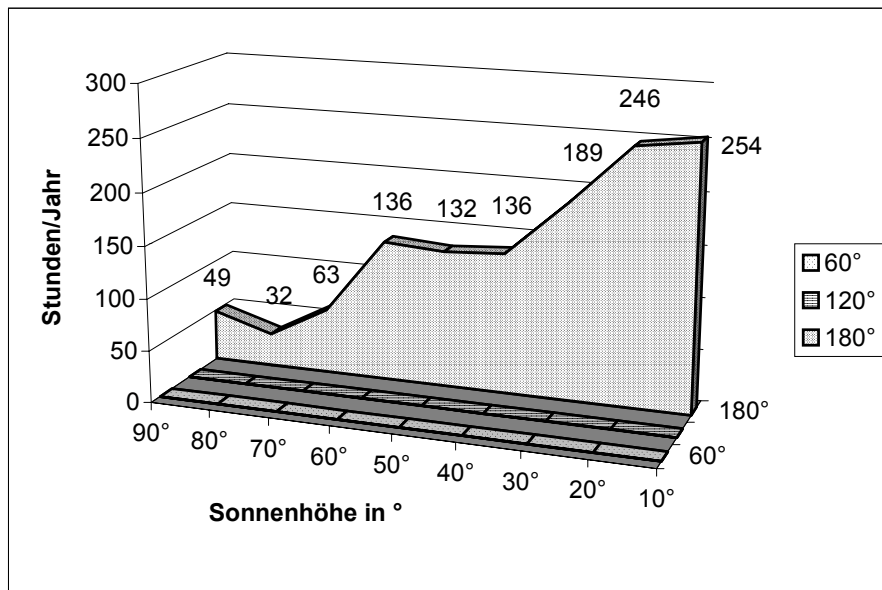
Grafik 5.8. Häufigkeit der Sonnenhöhe im Jahresverlauf für die Nordostfassade: Vergleich von Öffnungswinkeln mit 60°, 120° und 180° (ohne Berücksichtigung der Sommerzeit)



Grafik 5.9. Häufigkeit der Sonnenhöhe im Jahresverlauf für die Ost-/Westfassade: Vergleich eines Öffnungswinkels von 60°, 120° und 180° (ohne Berücksichtigung der Sommerzeit)



Grafik 5.10. Häufigkeit der Sonnenhöhe im Jahresverlauf für die Südostfassade: Vergleich eines Öffnungswinkels von 60°, 120° und 180° (ohne Berücksichtigung der Sommerzeit)



Grafik 5.11. Häufigkeit der Sonnenhöhe im Jahresverlauf für die Südostfassade: Vergleich eines Öffnungswinkels von 60°, 120° und 180° (ohne Berücksichtigung der Sommerzeit)

5.3.1.1.3. Wichtung

Um die aufgrund der im Jahresverlauf auftretenden Sonnenhöhen γ_{Sx} optimale Neigung zum Beispiel des äußeren Lichtschwertes festzulegen, werden die Werte W_{γ_S} aus Tabelle 5.4 gewichtet und nach folgendem Muster ausgewertet:

Teil 1: Bewertung des jeweiligen Sonnenstandes γ_{Sx} :

$$W_{\gamma_{Sx\max 1}} = 3 * W_{\gamma_{Sx} (60^\circ)} + 2 * W_{\gamma_{Sx} (120^\circ)} + 1 * W_{\gamma_{Sx} (180^\circ)}$$

Durch die Faktoren 3, 2 und 1 wird der jeweiligen Eindringtiefe in Abhängigkeit vom Öffnungswinkel Rechnung getragen.

Teil 2: Bewertung der Sonnenstände $\gamma_{Sx} + 10^\circ$ (Wichtung jeweils 0,5 der in Teil 1 verwendeten Faktoren):

$$W_{\gamma_{Sx\max 2}} = 1,5 * W_{\gamma_{Sx-10^\circ} (60^\circ)} + 1 * W_{\gamma_{Sx-10^\circ} (120^\circ)} + 0,5 * W_{\gamma_{Sx-10^\circ} (180^\circ)} + 1,5 * W_{\gamma_{Sx+10^\circ} (60^\circ)} + 1 * W_{\gamma_{Sx+10^\circ} (120^\circ)} + 0,5 * W_{\gamma_{Sx+10^\circ} (180^\circ)}$$

In diesem Teil wird die Häufigkeit „benachbarter“ Sonnenhöhen berücksichtigt.

Die Summe der Ergebnisse aus Teil 1 und Teil 2 werden für die jeweiligen Sonnenhöhenwinkel γ_S nach einer Maximalwertsuche schließlich ausgewertet.

Es gilt:

$$W_{\gamma_{Sx\max}} = W_{\gamma_{Sx\max 1}} + W_{\gamma_{Sx\max 2}}$$

5.3.1.1.4. Notwendigkeit

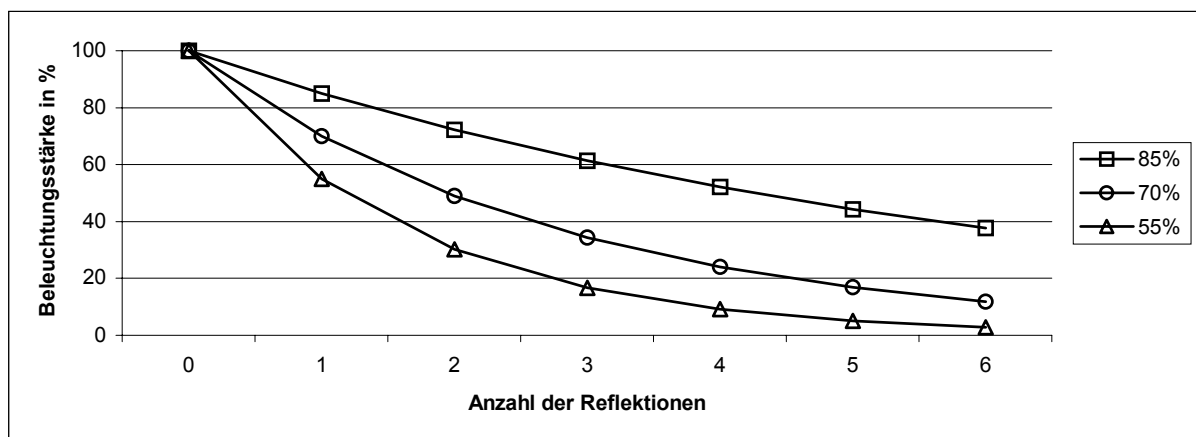
Neben der Häufigkeit der Sonnenhöhen, die auf den ersten Blick für eine möglichst effiziente Auslegung der Systeme ausschlaggebend zu sein scheinen, gilt der tatsächlichen Notwendigkeit einer Tageslichtlenkung zu bestimmten Zeitpunkten ein besonderes Augenmerk. So gilt zum Beispiel für niedrige Sonnenstände, die auf der Nordfassade relativ selten auftreten, dass der Sonnenschutz fast vollständig geschlossen werden muss. Dadurch wird die natürliche Beleuchtung fast vollständig unterbunden. Für diese Fälle kann es sinnvoll sein, die im Oberlicht eingesetzten feststehenden Systeme entsprechend auszulegen. Auch die jeweilige vertikale Beleuchtungsstärke auf der Fassade, die bei einer Sonnenhöhe von 45° ihr Maximum erreicht (siehe Kapitel „Tageslicht in den Tropen“), gilt es zu berücksichtigen.

Für die Analyse ist eine genaue Untersuchung des gesamten Fassadensystems und des Innenraumes notwendig. Es werden in der Folge für verschiedene Systeme und Systemkombinationen Kenngrößen ermittelt, die für die Auslegung der Systeme hilfreich sind.

Für den virtuellen Modellraum jedoch, bei dem bei einer Raumtiefe von 10,0 m sehr selten das Erreichen der Sollbeleuchtungsstärke E_n zu erwarten ist, wird daher die Wichtung als Grundlage für die Auslegung genommen.

5.3.1.1.5. Anzahl der Reflexionen

Je nach Reflexionsgrad der Reflexionsflächen wie Wände, Decken oder auch Lichtschwerer verliert ein Lichtstrahl mit jeder Reflexion einen Teil seiner Energie (siehe Grafik 5.12). Diese Lichtenergie wird in Wärmeenergie umgewandelt, was insbesondere in den Tropen hinsichtlich des thermischen Komforts problematisch sein kann. Es gilt daher, den Lichtstrahl möglichst effizient – d.h. mit wenigen Reflexionen - auf möglichst reflexiven Flächen in die Tiefe des Raumes umzulenken. Je effizienter das Licht verteilt werden kann, desto stärker kann der Lichteinfall (und damit der Wärmeeintrag) reduziert werden.



Grafik 5.12. Einfluss der Anzahl der Reflexionen bei den Reflexionsgraden 0,55, 0,70 und 0,85 der Wände und Decken auf die Beleuchtungsstärke

5.3.1.2. Sonnenschutzverglasungen

Für die Untersuchung des Tageslichtverhaltens werden 4 in Brasilien übliche Reflexions-/Absorptionsverglasungen berücksichtigt:

- a) Sonnenschutzverglasung Suncool Classic Silver 10/23 - 6 mm
 $\tau_{\text{sol}}=0,095$, $g=0,22$, sekundärer Wärmedurchgang $q_i = 1,127$; U-Wert $5,7 \text{ W/m}^2\text{K}$,
 Absorption in Scheibe = $0,44$; $\tau_{\text{vis}} = 0,10$
 Fa. Pilkington [76]
- b) Sonnenschutzverglasung Suncool Classic Silver 20/34 - 6 mm
 $\tau_{\text{sol}}=0,174$, $g=0,305$, sekundärer Wärmedurchgang $q_i = 1,131$; U-Wert $5,71 \text{ W/m}^2\text{K}$,
 Absorption in Scheibe = $0,44$; $\tau_{\text{vis}} = 0,22$
 Fa. Pilkington [76]
- c) Sonnenschutzdoppelverglasung
 Antisun Blue 54/62 6 mm, Argon 12 mm, Klarglas 6 mm,
 $\tau_{\text{sol}}=0,39$, $g=0,49$, U-Wert $2,70 \text{ W/m}^2\text{K}$, $\tau_{\text{vis}} = 0,47$
 Fa. Pilkington [76]
- d) Klarglas 6 mm
 $\tau_{\text{sol}}=0,85$, $g=0,873$, U-Wert $5,7 \text{ W/m}^2 \text{ K}$, $\tau_{\text{vis}} = 0,87$

Es werden damit die Transmissionswerte für den sichtbaren Bereich der Strahlung τ_{vis} von 0,1 (Variante a) , 0,22 (Variante b) und 0,47 (Variante c) für die Simulationen verwendet.

Dabei ist darauf hinzuweisen, dass die Variante c) als Doppelverglasung einen zwar wachsenden, insgesamt aber noch sehr geringen Marktanteil hat. Ihr Einsatz wird zur Zeit in erster Linie aus Gründen des Schallschutzes in Erwägung gezogen. Die Eigenschaften der Gläser ist den entsprechenden technischen Informationsschriften der Hersteller entnommen.

Für die Radiance-Simulationen wird das Element „glass“ verwendet. Die Transmissionswerte τ_{vis} -Werte wurden entsprechend in „Transmissivity–Werte t_n umgerechnet [64]:

$$t_n = [\sqrt{(0.8402528435 + 0.0072522239 * \tau_{\text{vis}} * \tau_{\text{vis}}) - 0.9166530661}] / 0.0036261119 / \tau_{\text{vis}}$$

Als Brechungsindex wird 1,52 verwendet.

5.3.1.2.1. Sonnenschutzverglasungen ohne zusätzlichen Sonnen- und Blendschutz

Sonnenschutzverglasungen werden in der Regel als gute Lösung sowohl für Verminderung der Solarstrahlung als auch für die Vermeidung von Blendung durch Sonnenlicht angesehen. Im folgenden wird die Wirkung von Sonnenschutzverglasungen mit unterschiedlichen Transmissionsgraden (τ_{vis}) in photorealistischen Darstellungen untersucht:



Bild 5.3. Sonnenschutzverglasung mit $\tau_{\text{vis}} = 47\%$; $\Delta|\alpha_S - \alpha_F| = 45^\circ$; $\gamma_S = 30^\circ$



Bild 5.4. Sonnenschutzverglasung mit $\tau_{\text{vis}} = 22\%$; $\Delta|\alpha_S - \alpha_F| = 45^\circ$; $\gamma_S = 45^\circ$



Bild 5.5. $\tau_{\text{vis}} = 10\%$,
Sonnenhöhe
 $\gamma_S = 45^\circ$,
 $\Delta|\alpha_S - \alpha_F| = 45^\circ$

Überprüfung der Leuchtdichte

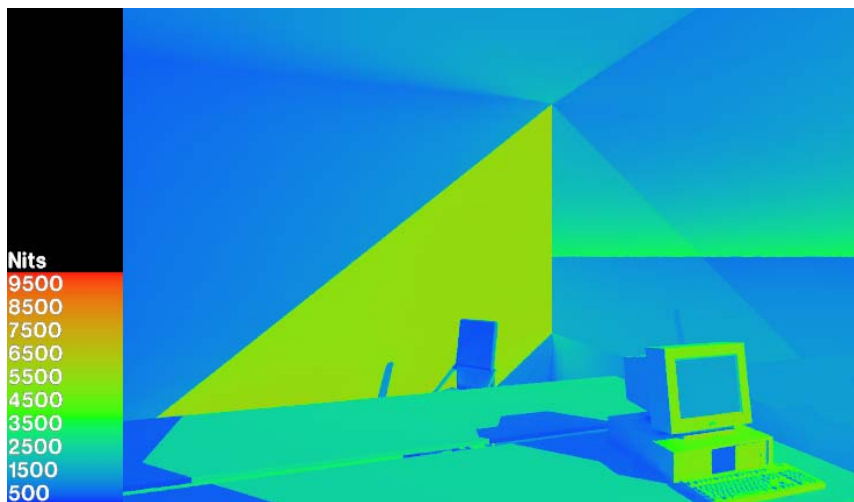


Bild 5.6. Sonnenschutzver-
glasung mit $\tau_{\text{vis}} =$
 47% ; $\Delta|\alpha_S - \alpha_F| =$
 45° ; $\gamma_S = 30^\circ$

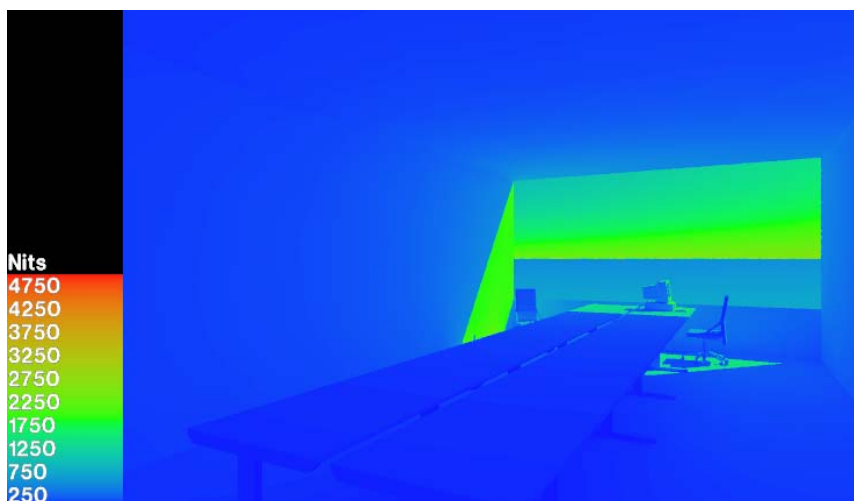


Bild 5.7. Sonnenschutzver-
glasung mit $\tau_{\text{vis}} =$
 22% ; $\Delta|\alpha_S - \alpha_F| =$
 45° ; $\gamma_S = 45^\circ$

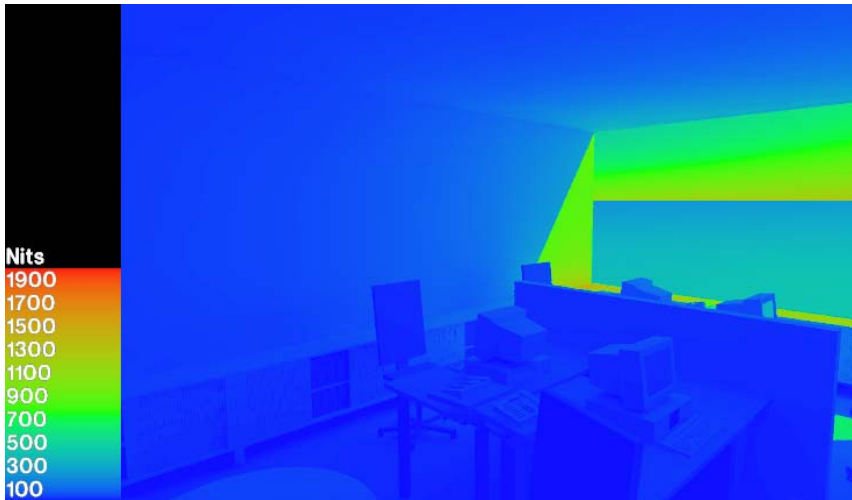


Bild 5.8. $\tau_{vis} = 10\%$,
 Sonnenhöhe
 $\gamma_S = 45^\circ$,
 $\Delta|\alpha_S - \alpha_F| = 45^\circ$

Fazit

Es lässt sich direkter, wenn auch gegenüber Normalglas gedämpfter, Kontrast in allen Fällen feststellen. Die Arbeit am Bildschirm wird dadurch definitiv stark beeinträchtigt, wobei nicht die absoluten Leuchtdichten, sondern die Leuchtdichtekontraste auf dem Bildschirm zu Problemen (Reflexe) führen können. Werden Sonnenschutzgläser ohne weitere Maßnahmen wie z.B. Jalousien oder Vorhänge eingesetzt, so muss durch die Planung der Büromöblierung ausgeschlossen werden, dass direkter Sonnenlichteinfall auf den Bildschirm möglich ist.

In der Regel wird man jedoch ein internes Blendschutzsystem einsetzen, um die gewünschte Gebäudeästhetik zu erlangen. Die Wirkung wird für die drei ausgewählten Sonnenschutzgläser im folgenden durch Simulationen ermittelt.

5.3.1.2.2. Sonnenschutzgläser mit geregelter innenliegender Jalousie

Um den gewünschten visuellen Komfort zu erreichen, wird der Lichteinfall durch eine innenliegende Jalousie geregelt. Das Thema „Jalousie“ wird in Anhang IV näher behandelt. Dabei wird auch auf die Vorteile der Regelung gegenüber der Steuerung detailliert eingegangen.

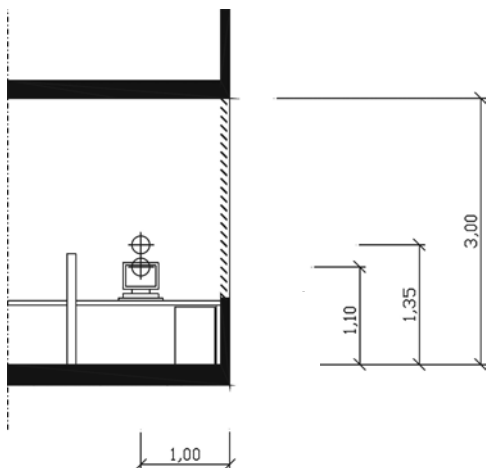


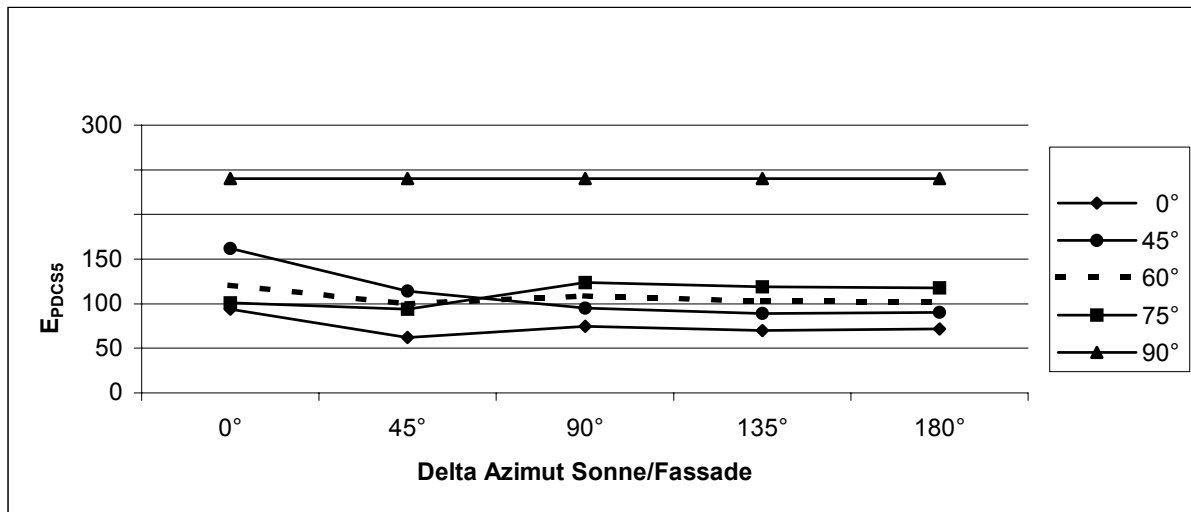
Abbildung 5.8. Systemschnitt Fassade – Sonnenschutzverglasung mit innenliegendem Sonnenschutz

Simulationsergebnisse für $\tau_{vis} = 10\%$ mit geregelter Jalousie

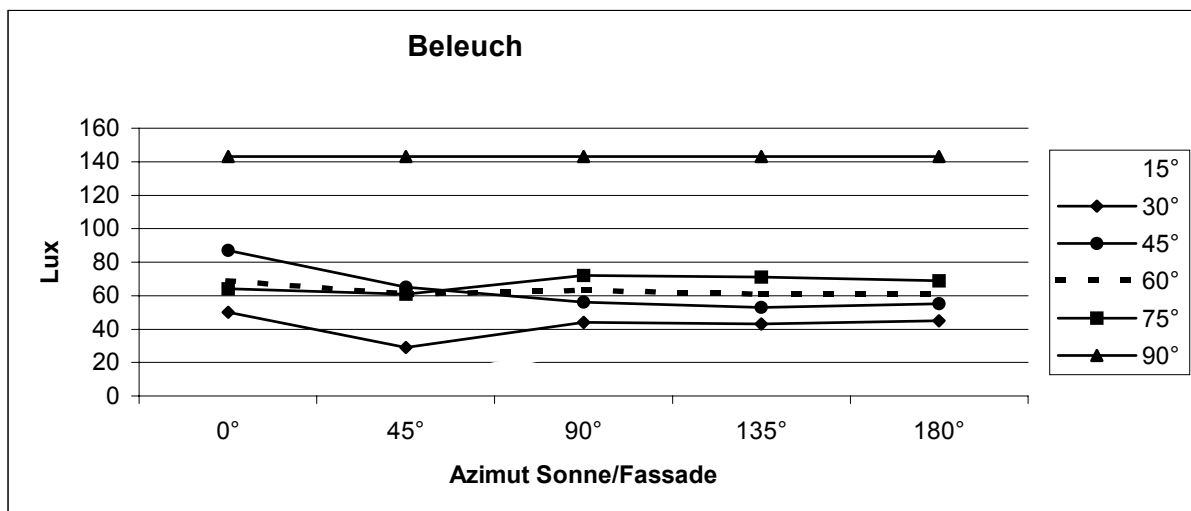
A) für klare Himmel mit Sonne (CIE Clear Sky & Sun)

Sonnenhöhe γ_s	Delta Azimut Fassade/Sonne				
	0°	45°	90°	135°	180°
15°	60°	60°	eingezogen	e.	e.
30°	30°	30°	e.	e.	e.
45°	0°	0°	e.	e.	e.
60°	0°	0°	e.	e.	e.
75°	0°	0°	e.	e.	e.
90°	e.				

Tabelle 5.5. Lamellenneigung der Jalousie in Abhängigkeit von γ_s und Azimutdifferenz ΔAz



Grafik 5.13. Beleuchtungsstärke E_{PDCS5} - Sonnenschutzglas mit $\tau_{vis} = 10\%$ mit geregelten Jalousien



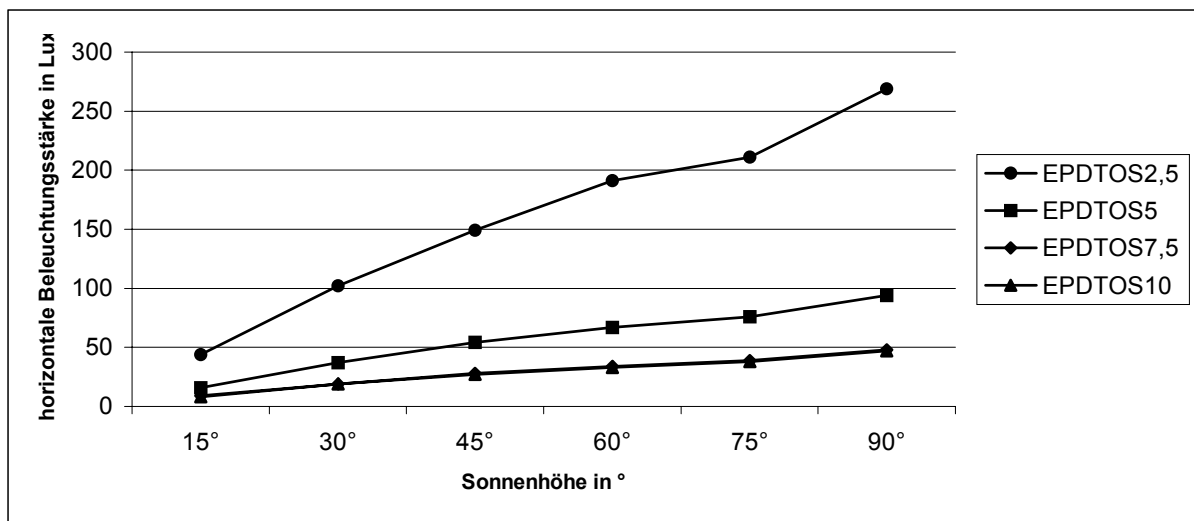
Grafik 5.14. Sonnenschutzglas mit $\tau_{vis} = 10\%$ mit geregelten Jalousien, Beleuchtungsstärke E_{PDCS10}

Anmerkung: Die Grafiken der Kontrollwerte E_{VIC1} und E_{VIC2} befinden sich in Anhang III.1.

B) für bewölkte Himmel in den Tropen ($TOS_{(RIO)}$)

γ_s/γ_j	15°/e	30°/e	45°/e	60°/0°	75°/0°	90°/0°
$E_{PDCS2,5}$	44	102	149	191	211	269
E_{PDCS5}	16	37	54	67	76	94
$E_{PDCS7,5}$	9	19	28	34	39	48
E_{PDCS10}	8	19	27	33	38	47
E_{VIC1}	57	130	190	236	268	340
E_{VIC2}	30	69	101	126	143	182

Tabelle 5.6. Tageslichtpotential und vertikale Beleuchtungsstärken bei bedecktem Himmel. Die Lamellenneigung γ_j wird in der Kopfzeile hinter der Sonnenhöhe γ_s angegeben (e=eingezogen).



Grafik 5.15. Beleuchtungsstärke E_{PDTOSx} bei bedecktem Himmel

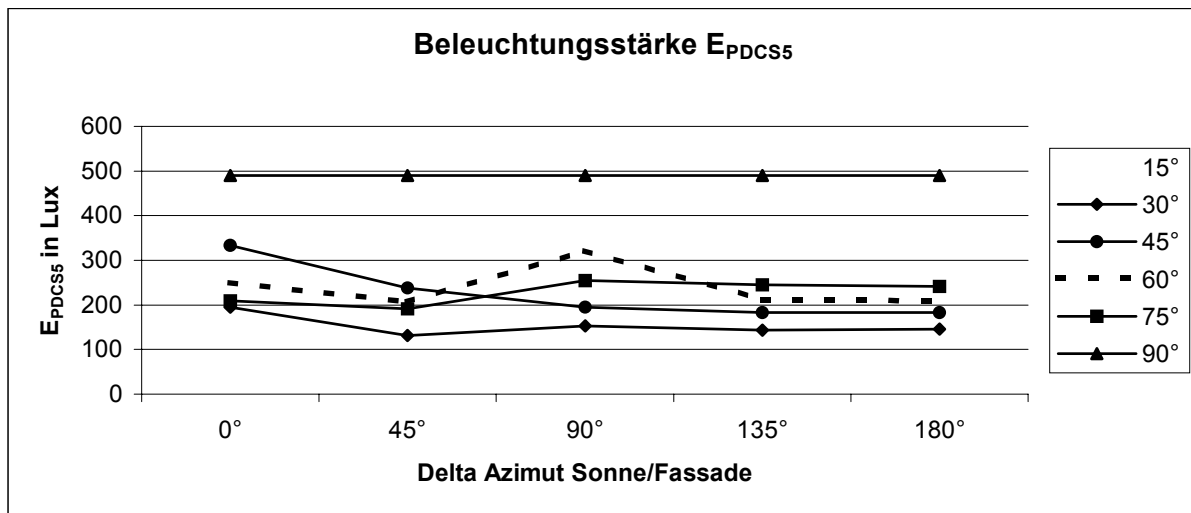
Simulationsergebnisse für $\tau_{vis} = 22\%$ mit geregelter Jalousie

Im folgendem wird durch den Einsatz von innenliegenden Jalousien die Beleuchtungsstärke $E_{VIC1max}$ auf 2.000 lx begrenzt. Das entspricht der in Kapitel „visueller Komfort“ erarbeiteten Empfehlung für TFT-Schirme.

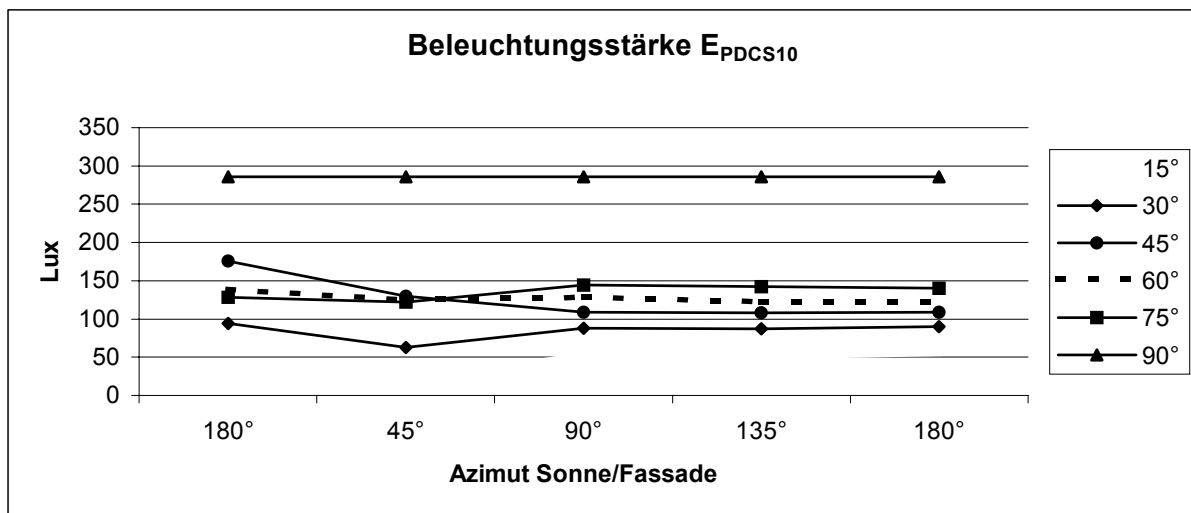
A) für klare Himmel mit Sonne (CIE Clear Sky & Sun)

Sonnenhöhe γ_s	Delta Azimut Fassade/Sonne				
	0°	45°	90°	135°	180°
15°	60°	60°	eingezogen	e.	e.
30°	30°	30°	e.	e.	e.
45°	0°	0°	e.	e.	e.
60°	0°	0°	e.	e.	e.
75°	0°	0°	e.	e.	e.
90°	e.				

Tabelle 5.7. Lamellenneigung der Jalousie in Abhängigkeit von γ_s und Azimutdifferenz ΔAz



Grafik 5.16. Sonnenschutzglas mit $\tau_{vis} = 22\%$ mit geregelten Jalousien, Beleuchtungsstärke E_{PDCS5}



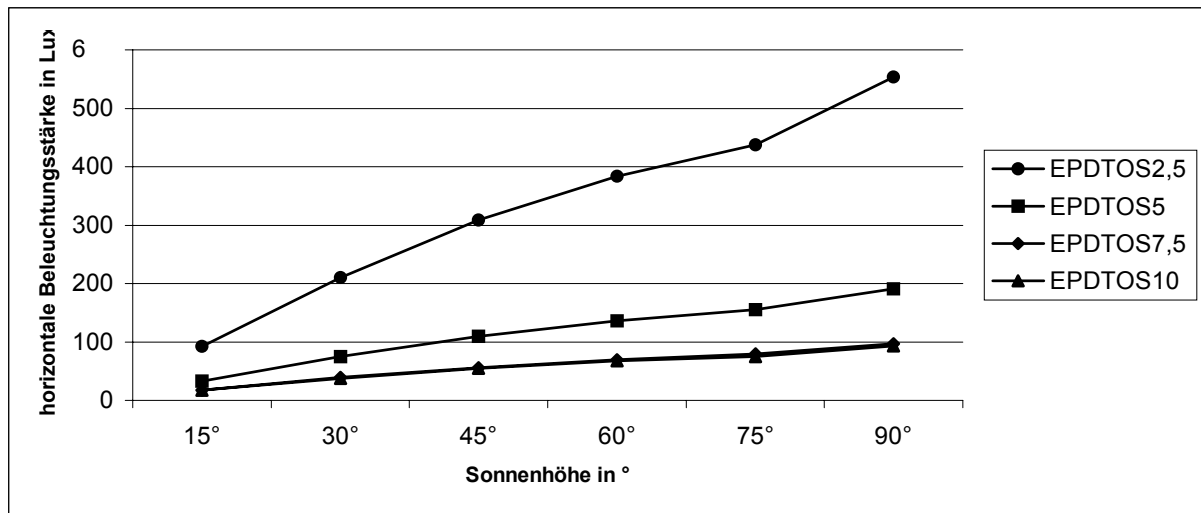
Grafik 5.17. Sonnenschutzglas mit $\tau_{vis} = 22\%$ mit geregelten Jalousien, Beleuchtungsstärke E_{PDCS10}

Anmerkung: Die Grafiken der Kontrollwerte E_{VIC1} und E_{VIC2} befinden sich in Anhang III.2.

B) für bewölkte Himmel in den Tropen ($TOS_{(RIO)}$)

γ_S/γ_J	15°/e	30°/e	45°/e	60°/0°	75°/0°	90°/0°
$E_{PDCS2,5}$	92	210	309	384	437	553
E_{PDCS5}	33	75	110	136	155	191
$E_{PDCS7,5}$	17	39	56	69	79	97
E_{PDCS10}	17	37	55	68	75	93
E_{VIC1}	111	278	404	505	572	721
E_{VIC2}	63	144	211	262	298	375

Tabelle 5.8. Tageslichtpotential und vertikale Beleuchtungsstärken bei bedecktem Himmel. Die Lamellenneigung γ_J wird in der Kopfzeile hinter der Sonnenhöhe γ_S angegeben (e=eingezogen).



Grafik 5.18. Beleuchtungsstärke E_{PDTOSx} bei bedecktem Himmel

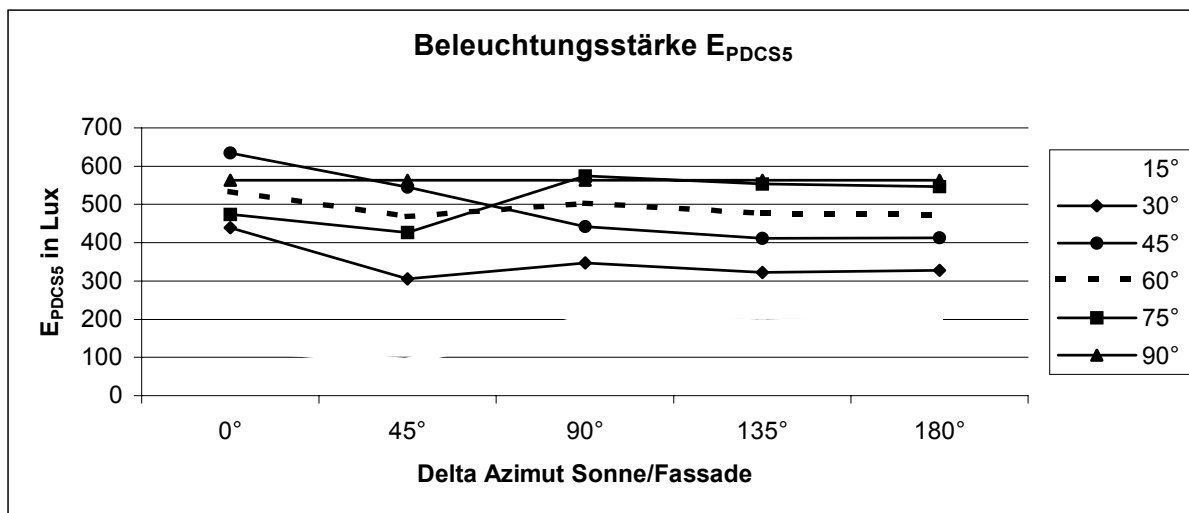
Simulationsergebnisse für $\tau_{vis} = 47\%$ mit geregelter Jalousie

Im folgendem wird durch den Einsatz von innenliegenden Jalousien die Beleuchtungsstärke $E_{VIC1max}$ auf 2.000 lx begrenzt. Das entspricht der in Kapitel „visueller Komfort“ erarbeiteten Empfehlung für TFT-Schirme.

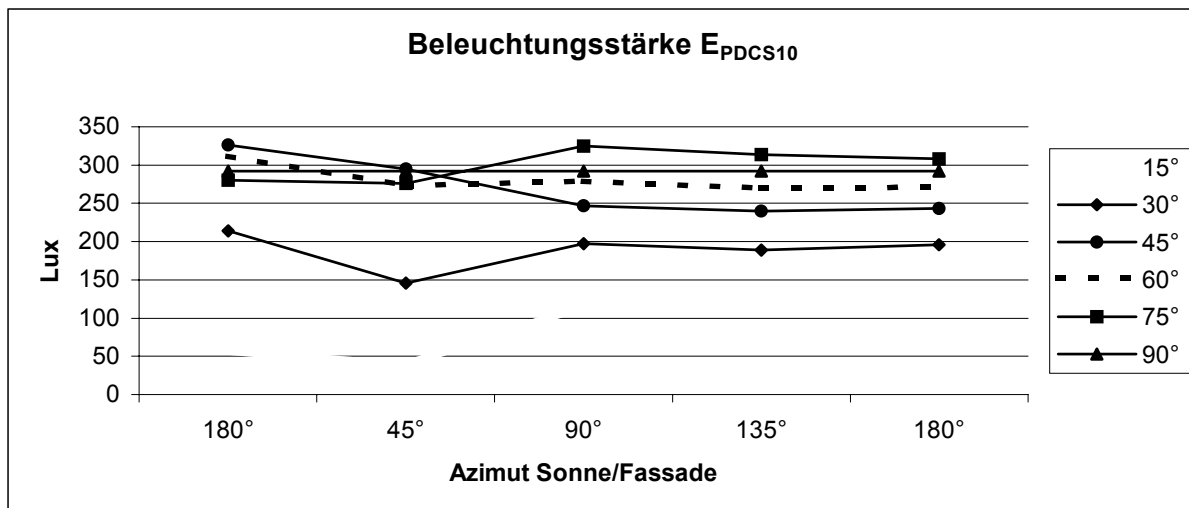
A) für klare Himmel mit Sonne (CIE Clear Sky & Sun)

Sonnenhöhe γ_s	Delta Azimut Fassade/Sonne				
	0°	45°	90°	135°	180°
15°	60°	60°	eingezogen	e.	e.
30°	30°	30°	e.	e.	e.
45°	10°	0°	e.	e.	e.
60°	0°	0°	e.	e.	e.
75°	0°	0°	e.	e.	e.
90°	20°				

Tabelle 5.9. Lamellenneigung der Jalousie in Abhängigkeit von γ_s und Azimutdifferenz ΔAz



Grafik 5.19. Sonnenschutzglas mit $\tau_{vis} = 47\%$ mit geregelten Jalousien, Beleuchtungsstärke E_{PDCS5}



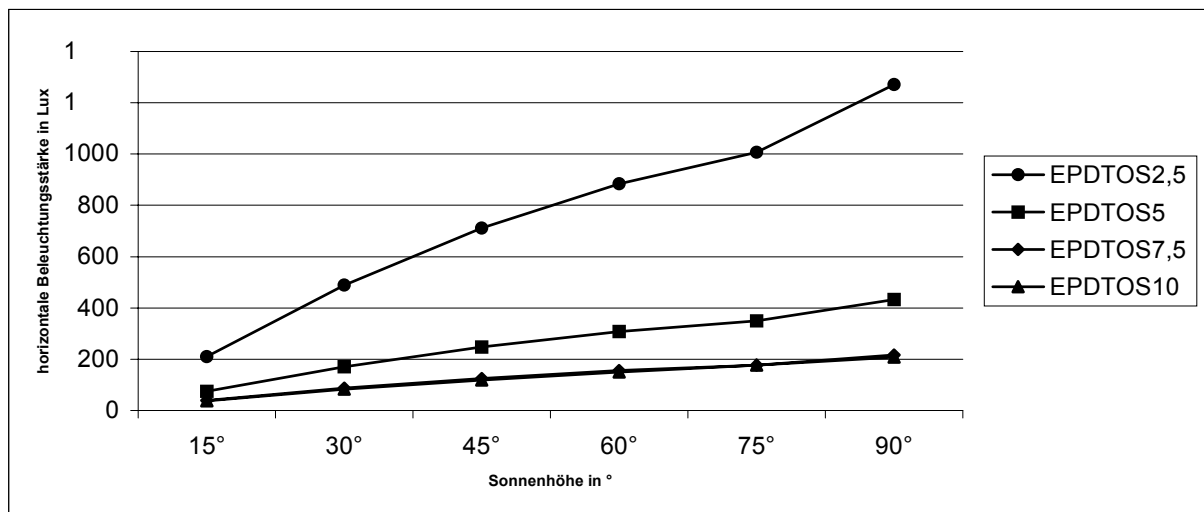
Grafik 5.20. Sonnenschutzglas mit $\tau_{vis} = 47\%$ mit geregelten Jalousien, Beleuchtungsstärke E_{PDCS10}

Anmerkung: Die Grafiken der Kontrollwerte E_{VIC1} und E_{VIC2} befinden sich in Anhang III.3.

B) für bewölkte Himmel in den Tropen ($TOS_{(R10)}$)

$\gamma_S \gamma_J$	15°/e	30°/e	45°/e	60°/0°	75°/0°	90°/0°
$E_{PDCS2,5}$	210	488	711	885	1007	1271
E_{PDCS5}	75	170	248	308	349	433
$E_{PDCS7,5}$	39	87	125	155	176	217
E_{PDCS10}	37	83	118	150	176	208
E_{VIC1}	288	663	965	1204	1374	1725
E_{VIC2}	146	335	488	609	691	868

Tabelle 5.10. Tageslichtpotential und vertikale Beleuchtungsstärken bei bedecktem Himmel. Die Lamellenneigung γ_J wird in der Kopfzeile hinter der Sonnenhöhe γ_S angegeben (e=eingezogen).



Grafik 5.21. Beleuchtungsstärke E_{PDTOSx} bei bedecktem Himmel

5.3.1.3. Thermobrise 335 - feststehend

Die unter dem Handelsnamen „Thermobrise 335“ in Brasilien erhältlichen Verschattungselemente werden aus Stahl oder Aluminium gefertigt angeboten. Für die thermische und akustische Verbesserung werden die Profile mit Polyurethan ausgeschäumt.

Die Elemente werden horizontal (Nordorientierung) oder vertikal (Süd-/Ost-/Westorientierung) eingebaut. Die Abstände der Elemente untereinander sind frei wählbar. Die Elemente werden in über 100 verschiedenen Farben angeboten.

Im folgenden wird die feststehende Variante untersucht. Der Reflexionsgrad wird dafür mit 0,5 festgelegt.

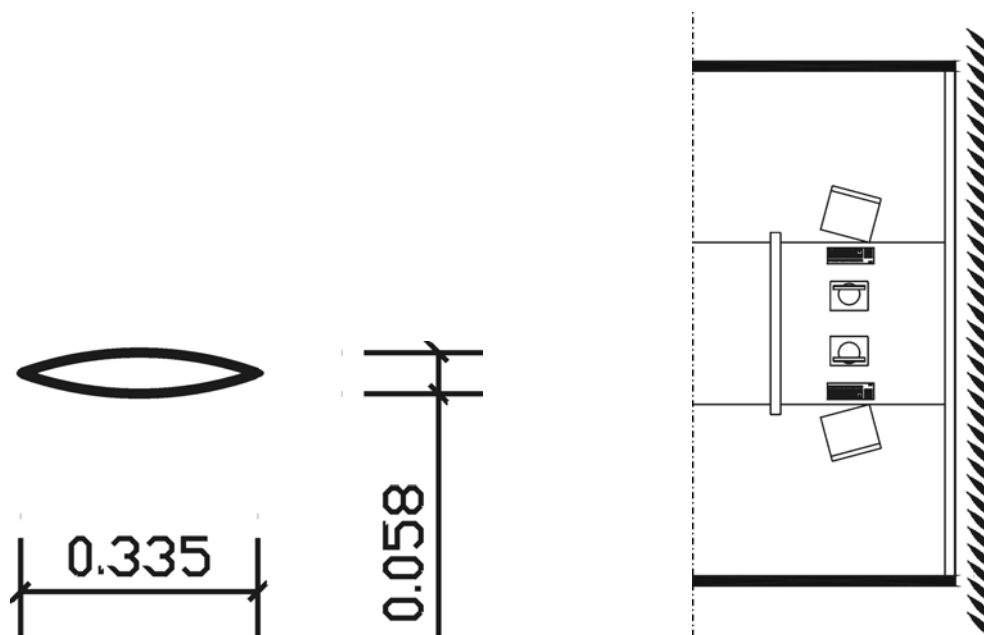


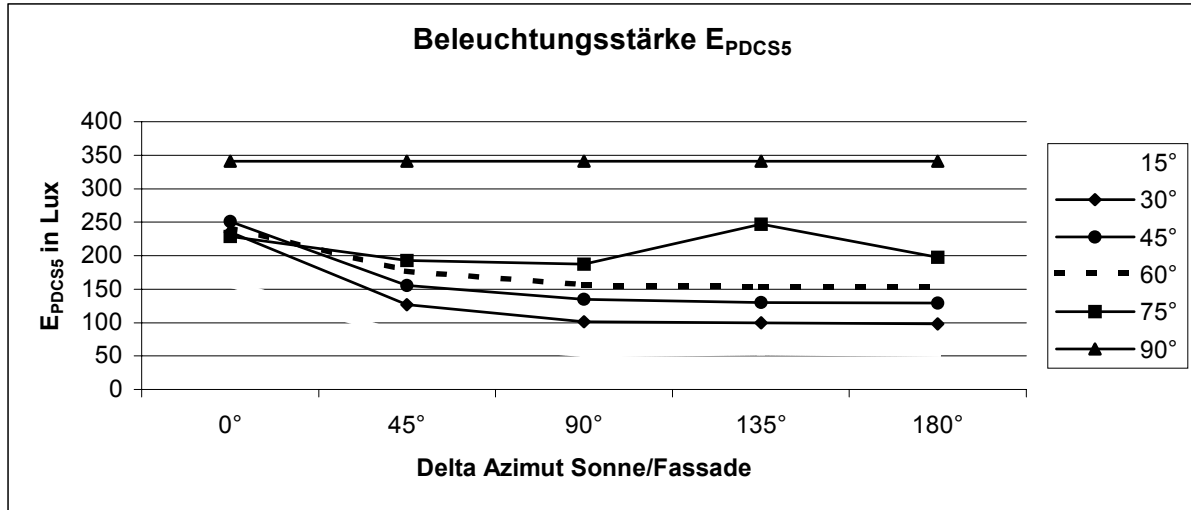
Abbildung 5.9. Detail Brise 335 und Grundriss mit Thermobrise 335 in vertikaler Position

Auslegung Westfassade Rio de Janeiro: Auslegungskonzept und konkrete Auslegung siehe Anhang II.1. und II.1.1.

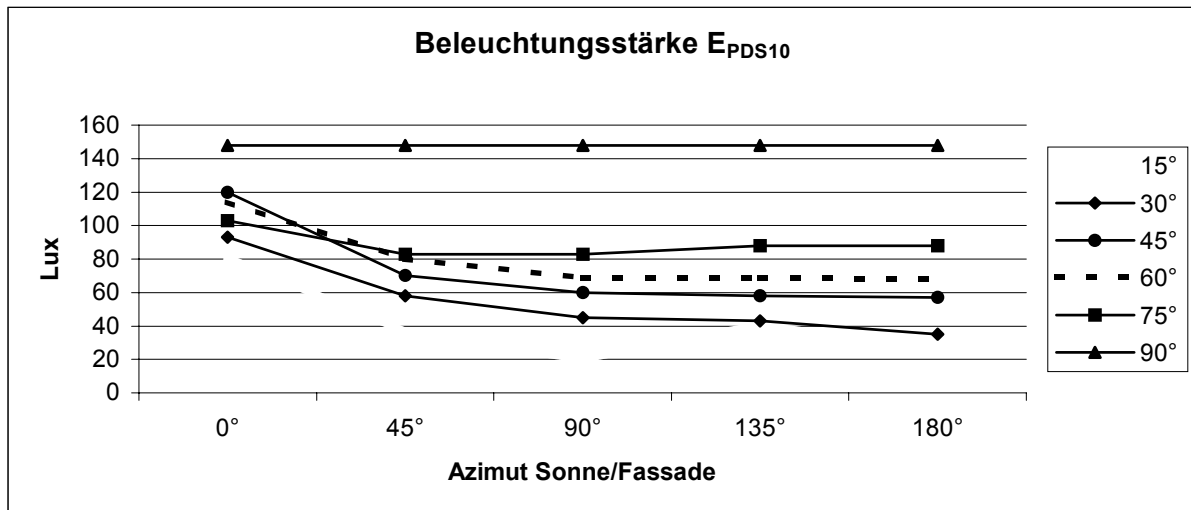
Simulationsergebnisse

für Variante 1 ($E_{VIC1max} = 2.000 \text{ lx}$, $E_{VI1max} = 5.000 \text{ lx}$)

A) für klare Himmel mit Sonne (CIE Clear Sky & Sun)



Grafik 5.22. Feststehende vertikale Brise 335, Beleuchtungsstärke E_{PDCS5}



Grafik 5.23. Feststehende vertikale Brise 335, Beleuchtungsstärke E_{PDCS10}

Anmerkung: Die Grafiken der Kontrollwerte E_{VIC1} und E_{VIC2} befinden sich in Anhang III.4.



Bild 5.9. Vertikale Brise $\Delta|\alpha_S - \alpha_F| = 0^\circ, \gamma_S = 45^\circ$

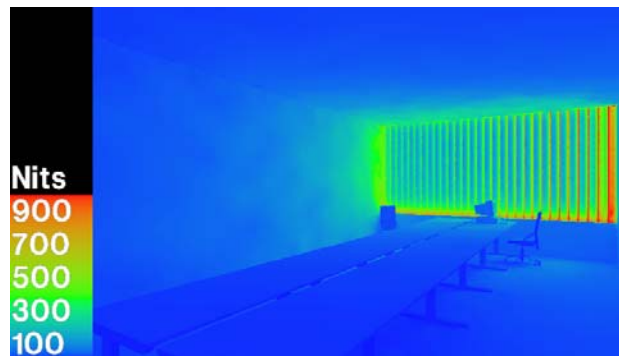


Bild 5.10. Leuchtdichteverteilung



Bild 5.11. $\gamma_S = 45^\circ$, $\Delta|\alpha_F - \alpha_S| = 0^\circ$

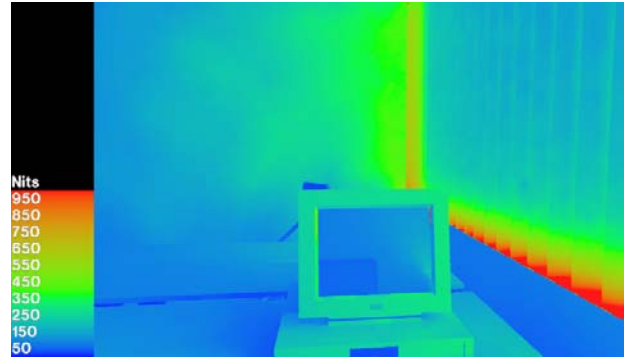


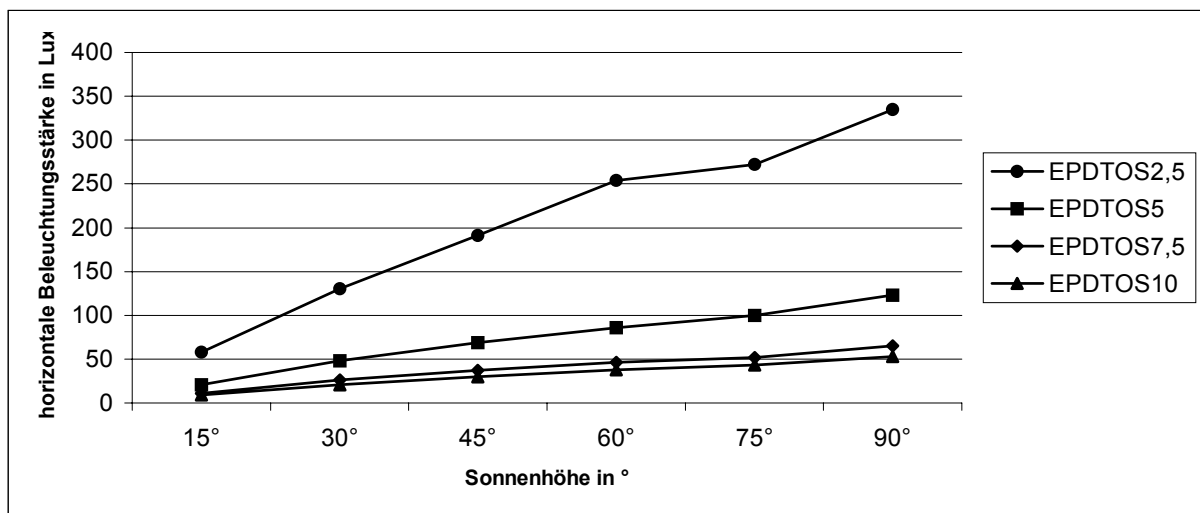
Bild 5.12. Leuchtdichteverteilung

Fazit Leuchtdichte: es sind keine Blendungsprobleme zu erwarten.

B) für bewölkte Himmel in den Tropen ($TOS_{(RIO)}$)

	15°	30°	45°	60°	75°	90°
$E_{PDCS2,5}$	58	130	191	254	272	335
E_{PDCS5}	21	48	69	86	100	123
$E_{PDCS7,5}$	11	26	37	46	52	65
E_{PDCS10}	9	21	30	38	43	53
E_{VIC1}	110	261	421	454	494	636
E_{VIC2}	40	88	127	170	191	224

Tabelle 5.11. Tageslichtpotential und vertikale Beleuchtungsstärken bei bedecktem Himmel



Grafik 5.24. Beleuchtungsstärke E_{PDTOSx} bei bedecktem Himmel

5.3.1.4. Lichtschwerter und Finnen

Lichtschwerter wurden bereits in den 50er Jahren von Hopkinson [65] hinsichtlich ihrer Kontrolle und Verteilung von diffusem Himmelslicht sowie auf ihre Blendschutzwirkung hin untersucht. Dabei wurde speziell ein möglicher Einsatz für Krankenhäuser und Schulen überprüft. Für den Einsatz in den Tropen sind die durchgeführten Untersuchungen jedoch wenig aussagekräftig. Zum einen wurde der Blendungsindex nur in der Mitte des Testraumes ermittelt. Für eine Büronutzung ist jedoch eine Überprüfung an der Fassade notwendig (das gilt prinzipiell für alle Klimata). Zum anderen wurden die Lichtschwerter darauf ausgelegt, eine möglichst gute Tageslichtverteilung zu gewährleisten. Dieses muss jedoch in den Tropen als zweitrangig angesehen werden, da hier die Vermeidung direkter Sonneneinstrahlung allererste Priorität hat, sowohl aus Gründen des thermischen Komforts als auch aus Gründen des Blendungsschutzes. Somit gilt es, die Geometrie des Lichtschwertes auf Grundlage des Sonnenschutzes festzulegen und anschließend hinsichtlich der Tageslichtverteilung zu optimieren.

Die von Hopkinson in den Modellen eingesetzten Lichtschwerter aus Glas-Spiegeln mit einem Reflexionsgrad von 95% sind in der gebauten Realität noch nicht dauerhaft zu erreichen. Es wird im folgenden zunächst die Auslegung und die Einsatzbereiche innenliegender Lichtschwerter untersucht.

In einem zweiten Schritt wird die Auslegung außenliegender Lichtschwerter erarbeitet.

Den Abschluss des Kapitels bildet die Untersuchung von außenliegenden Finnen als vertikale Verschattungselemente, so dass der Einsatz eines kompletten dreidimensionalen feststehenden Tageslichtkontrollsystems auf seine Effizienz hin untersucht werden kann.

5.3.1.4.1. Innenliegende Lichtschwerter

Rein innenliegende Lichtschwerter sind selten, da sie in den gemäßigten Breiten aufgrund des relativ geringen Tageslichtangebots nur wenig Tageslicht in die Tiefe des Raumes lenken können. In den Tropen lässt sich mit diesem Element das Problem der Blendung an der Fassade nur für das verhältnismäßig kleine Oberlicht lösen. Es findet keine wirksame Verschattung an der Außenfassade statt. Nur durch den Einsatz von Sonnenschutzelementen im Bereich des Sichtfensters lässt sich das fensternahe Blendungsproblem und das Problem des hohen solaren Energieeintrages lösen.

Der Einsatz von innenliegenden Lichtschwertern übernimmt in Verbindung mit Tageslichtlenkelementen im Oberlicht die wichtige Rolle des Sonnen- und Blendschutzes. Für die Tropen gilt, dass der Einsatz dieser Tageslichtlenkelemente in sonnenbeschienenen Fassaden nur in Verbindung mit einem internen Lichtschwert oder einem Microraster [77] (eine Bartenbach-Entwicklung, letztendlich eine Miniaturausgabe der Verbindung von Lichtschwertern und Finnen) denkbar ist. Simulationen mit Laser Cut Panels und Plexiglas Daylight-Elementen [66], bei denen die Tageslichtqualität mit und ohne internen Lichtschwertern untersucht wurde, ergaben eindeutig die Notwendigkeit der Lichtschwerter.

Auslegung innenliegender Lichtschwerter

Die Auslegung innenliegender Lichtschwerter ist von ihren beiden Hauptfunktionen abhängig:

1. Vermeidung von Blendung durch das Oberlicht und
2. Lichtumlenkung in die Tiefe des Raumes

Um beide Ziele zu erreichen, sind eine Reihe von Parametern zu berücksichtigen, die in der Regel bei jeder Auslegung unterschiedlich sind:

Raumgeometrie

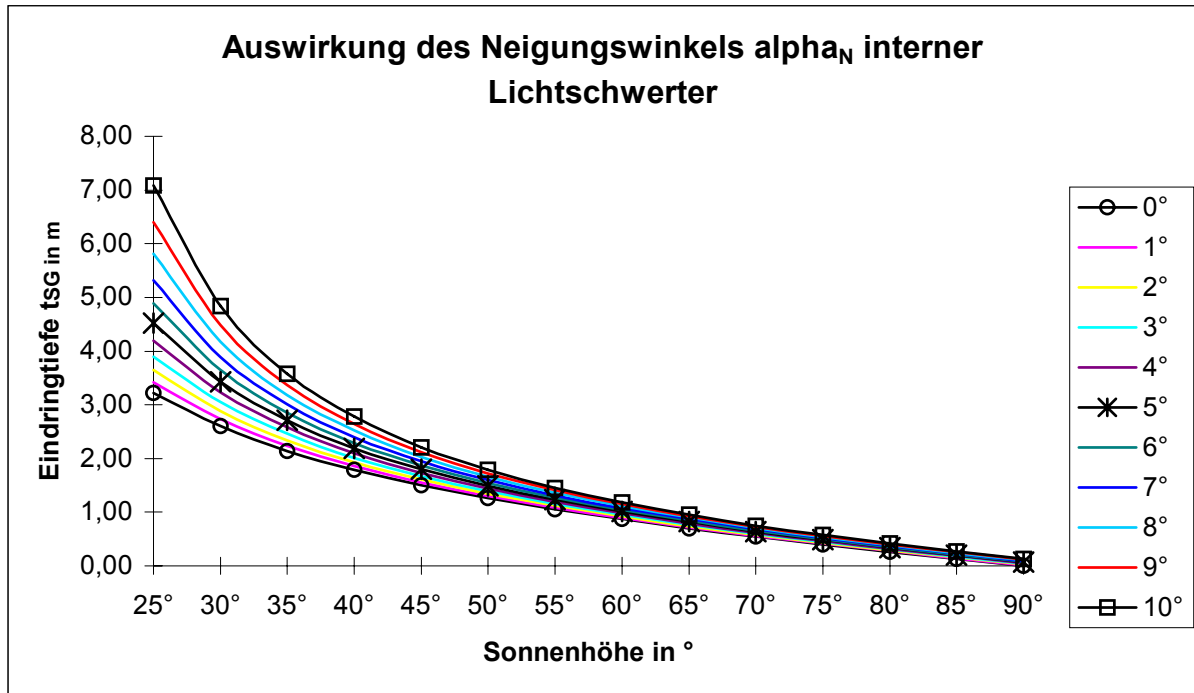
-je breiter der Raum, desto größer die Möglichkeit des Einfalls direkter Sonnenstrahlung bei niedrigen Sonnenständen

Parameter des Lichtschwertes innen

- Größe (Breite x Länge)
- Neigung
- Form
- Oberflächenreflexionsgrad oben und unten
- Verschmutzungsneigung, Reinigungsaufwand

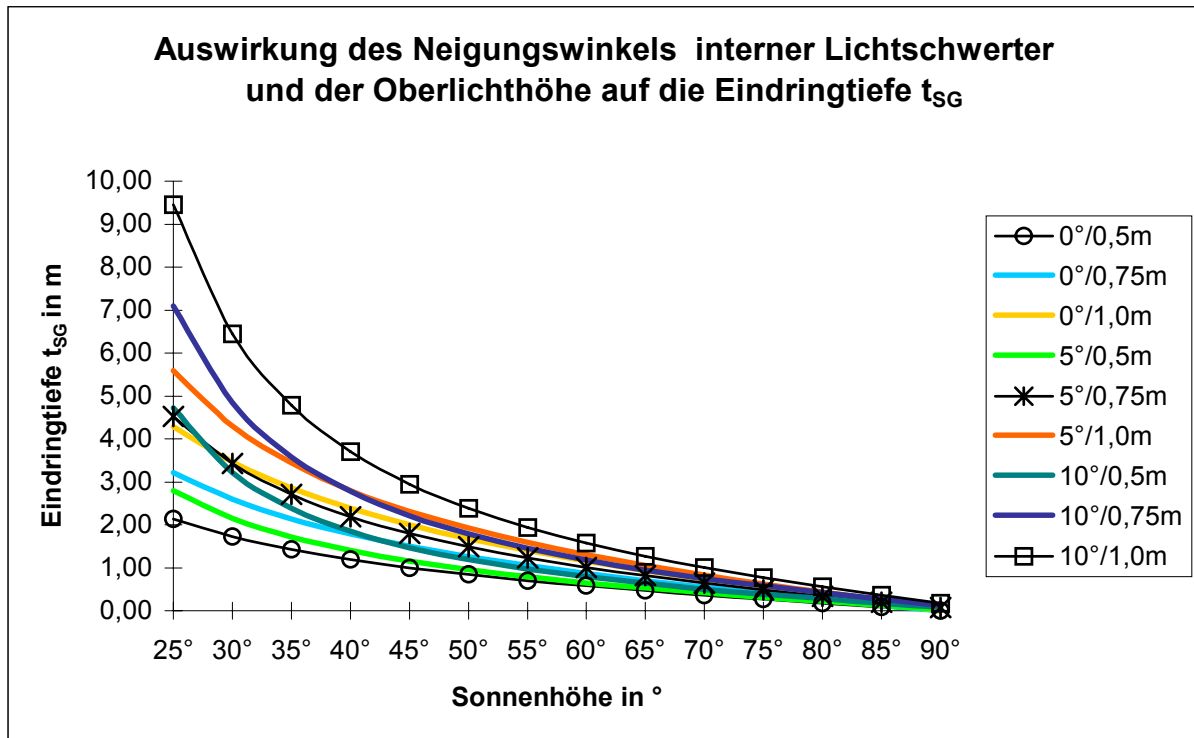
Das ausführliche Auslegungskonzept befindet sich in Anhang II.2.1.

Auf Grundlage der entwickelten Formeln (siehe Anhang II.2.1.) wird im folgenden die Auswirkung verschiedener Neigungsgrade und Sonnenhöhen auf die Eindringtiefe t_{SG} untersucht. Als Oberlichthöhe h_{OL} werden dabei 0,75 m angenommen:



Grafik 5.25. Eindringtiefe t_{SG} direkter Strahlung in Abhängigkeit von Sonnenhöhe γ_S und der Neigung α_N des internen Lichtschwerter

Die Auswertung ergibt, dass sich die Neigung des internen Lichtschwerter erwartungsgemäß insbesondere bei niedrigen Sonnenständen bemerkbar macht. Bei sehr hohen Sonnenständen spielt die Neigung für die Direktstrahlung keine Rolle mehr.



Grafik 5.26. Eindringtiefe t_{SG} direkter Strahlung in Abhängigkeit von Sonnenhöhe γ_S , der Neigung α_N des internen Lichtschwerter und der Oberlichthöhe h_{ol}

Die in Grafik 5.26 dargestellte Abhängigkeit der Eindringtiefe t_{SG} zeigt deutliche Unterschiede auch bei höheren Sonnenständen auf.

Bei beiden Variationsmöglichkeiten gilt es jedoch zu berücksichtigen, dass sowohl mit einer Zunahme der Oberlichthöhe als auch mit einer Neigung des internen Lichtschwertes die jeweilige Tiefe t_{SE} entsprechend zunehmen muss, um so den notwendigen Schutz vor Direktstrahlung zu gewährleisten.

Anmerkung: Bei geneigten internen Lichtschwertern gilt es, die Einschränkung der Fensteröffnungsmöglichkeiten zu berücksichtigen.

5.3.1.4.2. Außenliegende Lichtschwerter

Außenliegende Lichtschwerter gehören zu den ältesten Tageslichtlenkungssystemen. Aufgrund des Prinzips – eine reflektierende, mehr oder weniger horizontale Fläche, die das Licht in den Innenraum lenkt – zählt es noch heute in seiner einfachen Variante zu den technisch problemlos umzusetzenden Tageslichtkontrollsystemen. Dabei verbindet das außen liegende Lichtschwert zwei Eigenschaften: die Tageslichtlenkung und die besonders für die Tropen wichtige Verschattung. Dieser Aspekt, der in den gemäßigten Breiten eher negativ zu bewerten ist, da damit oftmals zuviel Tageslicht ausgesperrt wird, sorgt in den Tropen in Verbindung mit einer Jalousie oder vertikalen Finnen zur Vermeidung einer direkten Sonneneinstrahlung. Damit können Blendungserscheinungen und thermische Komfortprobleme an fasadennahen Arbeitsplätzen vermieden werden.

Allerdings führt der Einsatz eines außenliegenden Lichtschwertes ohne eine innenliegende Komponente zu Blendungs- und thermischen Komfortproblemen durch das Oberlicht. Setzt man zu einer Lösung dieser Probleme Sonnenschutzglas in den Oberlichtbereich ein, so verschlechtert sich die Tageslichtsituation im Innenraum.

5.3.1.4.3. Kombination innen-/außenliegende Lichtschwerter

Aufgrund der tropenspezifischen Rahmenbedingungen und der damit ausgelösten Probleme wie Blendung und Überhitzung des Innenraumes kann die Kombination aus einem innen- und einem außenliegenden Lichtschwert als die beste Option gelten.

Wichtig ist dabei die richtige Dimensionierung und die Berücksichtigung der Reflexionseigenschaften über die Zeit, sowie ein möglichst geringer Wartungsaufwand. Die notwendige War-

tung/Säuberung gilt es durch konstruktive Maßnahmen einfach zu gestalten (z.B. inneres Lichtschwert: Gelenk an Fensterseite und Abhängung an Innenseite).

Neben der einfachen Variante eines Lichtschwertes – einer planen horizontalen oder leicht geneigten Fläche – wurden inzwischen weitere Systeme entwickelt, so z.B. ein anidolisches Lichtschwert durch eine Arbeitsgruppe an der Queensland University of Technology in Brisbane/Australien. Dieses System hat eine innen- und eine außenliegende Komponente.

Bewertungsparameter für den Einsatz von Lichtschwertern

Externe Parameter

- Breitengrad und Orientierung und damit verbunden die Sonnenhöhen im Tages- und Jahresverlauf (Minima und Maxima)
- Sonnenscheindauer
- Jährliche Leuchtdichtevertelung
- Externe Verschattung durch Topographie, Vegetation oder Verbauung
- Reflexionsgrade der relevanten Flächen im Außenraum

Interne Parameter

- Raumgeometrie: Tiefe, Höhe und Breite
- Oberflächenreflexionsgrade der Wände, Decken, Böden und Möbel
- Fenstergröße und –geometrie
- Verglasungsart: Transmissions-, Reflexions- und Absorptionskoeffizienten
- Interne Verbauungen

Parameter des Lichtschwertes außen

- Größe (Breite x Länge)
- Neigung
- Form
- Oberflächenreflexionsgrad oben und unten
- Verschmutzungsneigung, Reinigungsaufwand
- Regenwasserablauf

5.3.1.4.4. Externe Finnen – die Ergänzung der Lichtschwerter um eine vertikale Komponente

Lichtschwerter werden in den Tropen idealerweise durch außenliegende vertikale Finnen ergänzt. Durch dieses dann dreidimensionale System ist es möglich, die direkte Sonneneinstrahlung völlig zu vermeiden, was aus Gründen des Blendschutzes unabdingbar ist. Die außenliegenden Finnen ersetzen somit die Jalousie.

Dieses dreidimensionale System wurde bereits in der Internationalen Moderne angewendet, insbesondere durch Le Corbusier, der diese Elemente als Brise Soleil bezeichnete. Allerdings waren diese Elemente als reiner Sonnenschutz gedacht.

In Rio de Janeiro gibt es zahlreiche Beispiele dieses architektonischen Elements, so z.B. das MEC und das ABI (siehe Kapitel Geschichtlicher Hintergrund – „Moderne in Rio de Janeiro“).

Die in den 30-er, 40-er und 50-er Jahren häufig verwendeten Elemente weisen jedoch einige Nachteile auf:

- 1) Dauerhaftigkeit: die in der Regel aus dünnen Stahlbetonelementen gefertigten Finnen sind insbesondere aufgrund der salzhaltigen Luft in Rio de Janeiro anfällig für Korrosion der Bewehrung, was rasch zu Abplatzungen führt;
- 2) Leuchtdichtkontraste: durch ihre opake Bauweise werfen sie entweder harte Schlag Schatten oder blenden bei direkter Bestrahlung, eine üblicherweise helle Oberfläche vorausgesetzt;
- 3) Tageslicht: als starrer, opaker Sonnenschutz vermindert dieses dreidimensionale System die Tageslichtnutzung, zumal die vertikalen Elemente traditionell nicht zur Tageslichtlenkung eingesetzt werden;
- 4) Thermische Komponente: in der Regel durchgehend mit der Fassade verbunden, findet ein Wärmeaustausch zwischen den Bauteilen statt; ferner wird die natürliche Belüftung der Fassade beeinflusst (dieses nicht unbedingt negativ)

Ziel der Weiterentwicklung

Ziel der Weiterentwicklung dieses traditionellen Bauelementes der brasilianischen Architektur ist eine Vermeidung der Nachteile bei gleichzeitiger Beibehaltung der Vorteile:

- 1) keine direkte Sonneneinstrahlung
- 2) weitestgehend wartungsfrei, da feststehend
- 3) benutzerfreundlich, da feststehend
- 4) relativ freier Ausblick

Parameter für Finnen

- Größe (Höhe, Breite, Tiefe)
- Geometrie
- außenliegend und/oder innenliegend
- Reflexions-, Absorptions- und gegebenenfalls Transmissionskoeffizienten
- Verschmutzungsneigung

Die Fassadenorientierung spielt eine entscheidende Rolle: durch die tiefstehende Sonne bei Sonnenauf- und Sonnenuntergang sind ost- und westorientierte Fassaden für dieses starre System weniger gut geeignet (siehe auch feststehende Brise 335).

Optimal geeignet ist dagegen die Nordfassade, da selbst im Winter die Sonnenhöhe nicht unter $44,06^\circ$ fällt.

Eingeschränkt geeignet ist die Südfassade: durch ein entsprechend ausgelegtes dreidimensionales System kann die zwischen dem 23. September und dem 21. März einfallende Sonnenstrahlung wirksam abgeblockt werden. Durch die damit verbundenen niedrigen Sonnenstände wirkt das Lichtschwert jedoch kaum, es wird in erster Linie das Zenitlicht umlenken.

Weitere wichtige Faktoren sind bei der Anbringung der außenliegenden Lichtschwerter zu beachten:

- 1) thermische Brücken gilt es zu vermeiden
- 2) die in den Tropen vorkommenden Starkniederschläge sind zu berücksichtigen
- 3) Heißluftpolster an der Fassade, bzw. eine Verschlechterung der natürlichen Belüftungsmöglichkeiten sind zu vermeiden

Kombination: internes & externes Lichtschwert, externe Finnen und Sonnenblende für eine Nordfassade in Rio de Janeiro

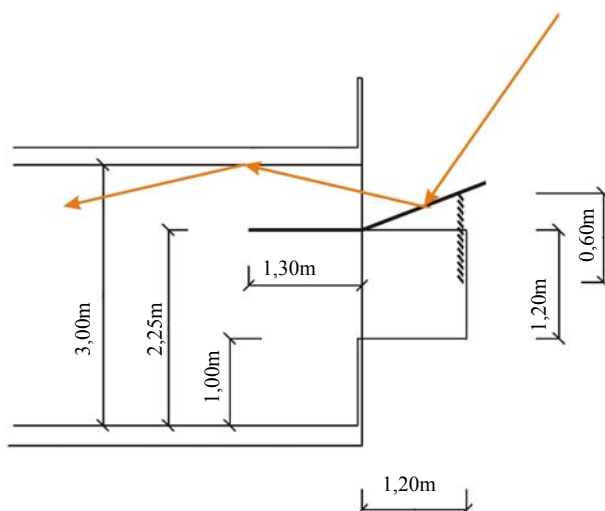


Abbildung 5.10. Vertikalschnitt durch die Fassade

Auslegung : Auslegungskonzept und konkrete Auslegung siehe Anhang II.2.8. und II.2.9.

Internes und externes Lichtschwert & Finnen – Simulationsergebnisse

Reflexionsgrad der außenliegenden Finnen: 0,70

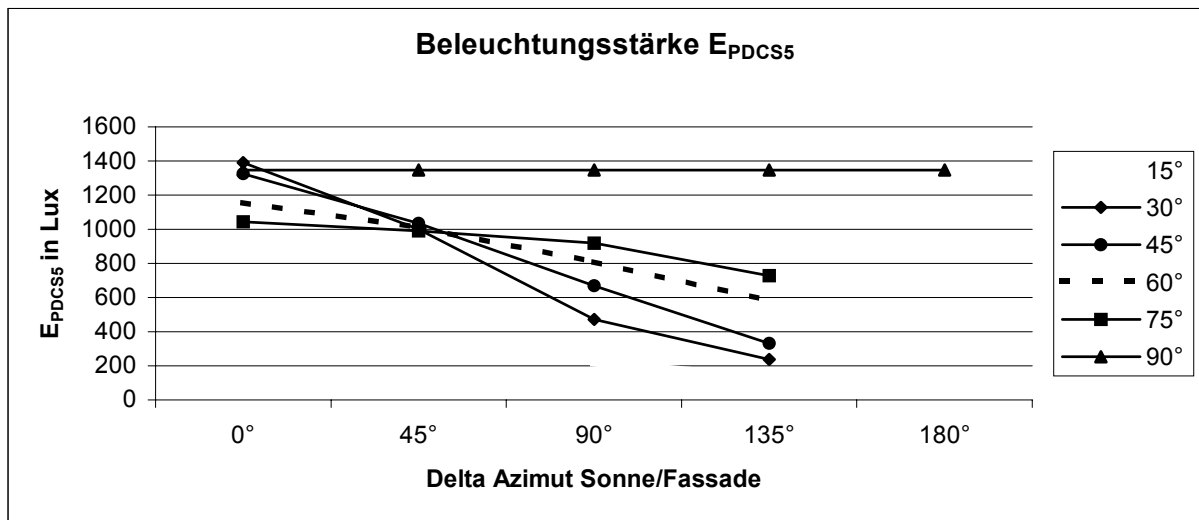
Reflexionsgrad der innenliegenden Finnen: 0,92

Reflexionsgrad des außenliegenden Lichtschwertes: 0,74

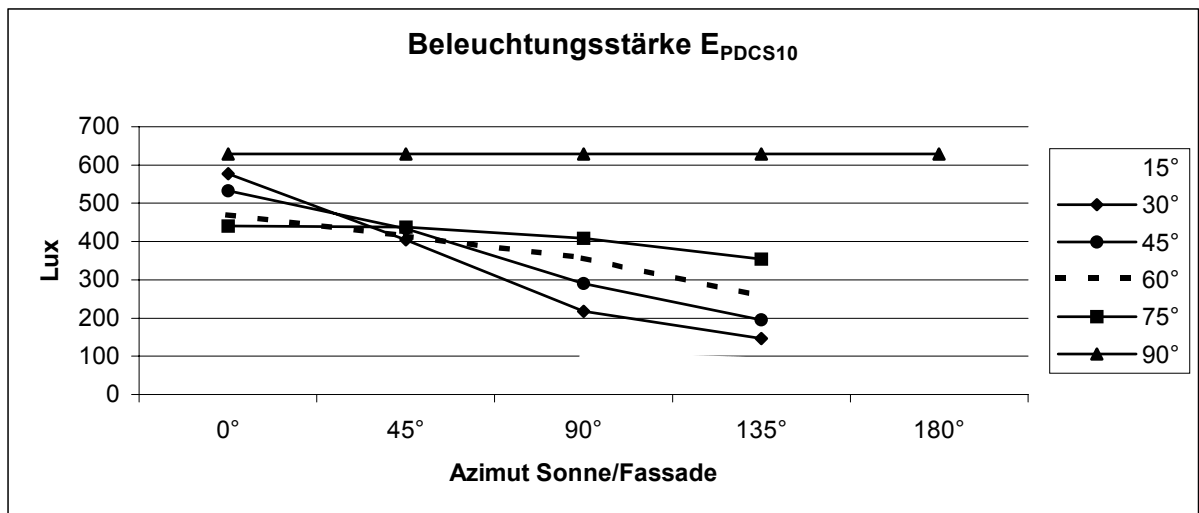
Reflexionsgrad des innenliegenden Lichtschwertes: 0,85

Reflexionsgrad der Sonnenblende: 0,26

A) für klaren Himmel mit Sonne (CIE Clear Sky & Sun)



Grafik 5.27. Innen- und außenliegendes Lichtschwert mit Finnen, Beleuchtungsstärke E_{PDCS5}



Grafik 5.28. Innen- und außenliegendes Lichtschwert mit Finnen, Beleuchtungsstärke E_{PDCS10}

Anmerkung: Die Grafiken der Kontrollwerte E_{VIC1} und E_{VIC2} befinden sich in Anhang III.5.

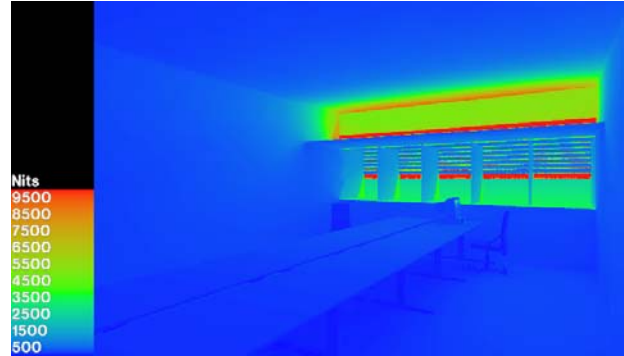
Bild 5.13. $\gamma_s = 60^\circ$; $\Delta Az = 13^\circ$ 

Bild 5.14. Leuchtdichteverteilung

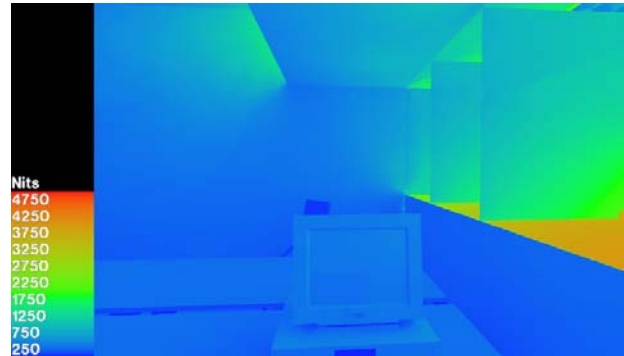
Bild 5.15. $\gamma_s = 60^\circ$, $\Delta Az = 13^\circ$ 

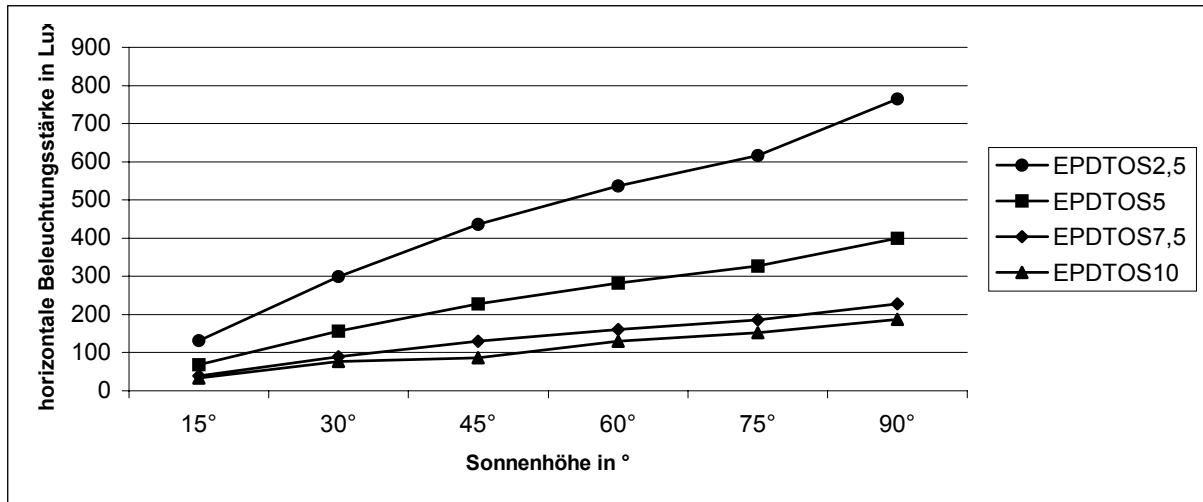
Bild 5.16. Leuchtdichteverteilung

Fazit Leuchtdichte: wie in Bild 5.14. erkennbar, bewegt man sich bei dieser Lösung sicherlich in einem Grenzbereich, da sich die Leuchtdichte im Oberlichtbereich bereits im Bereich von 10.000 cd/m^2 bewegt. Wobei es sich um kleine Flächen hoher Leuchtdichte handelt. Der Arbeitsplatz direkt an der Fassade ist gut gegen Blendsituationen geschützt. Durch die fehlende Möglichkeit einer Steuerung/Regelung des Sonnen- und Blendschutzes gilt es bei dieser Variante besonders die in Kapitel 3.2.2.3. festgestellte hohe Leuchtdichte bei bedecktem Himmel in den Tropen zu berücksichtigen. Aufgrund der externen Finnen wird allerdings der direkte Blick auf das Himmelgewölbe im Bereich des Sichtkegels auf der Blickachse parallel zur Fassade vermieden, so dass von einem guten Blendschutz ausgegangen werden kann.

B) für bewölkte Himmel in den Tropen ($TOS_{(Ri0)}$)

γ_s/γ_j	15°	30°	45°	60°	75°	90°
$E_{PDCS2,5}$	131	299	436	537	616	765
E_{PDCS5}	69	156	228	282	327	400
$E_{PDCS7,5}$	39	89	130	161	186	228
E_{PDCS10}	33	77	86	130	152	187
E_{VIC1}	122	255	367	451	512	598
E_{VIC2}	96	213	308	379	435	527

Tabelle 5.12. Tageslichtpotential und vertikale Beleuchtungsstärken bei bedecktem Himmel. Die Lamellenneigung γ_j wird in der Kopfzeile hinter der Sonnenhöhe γ_s angegeben (e=eingez.)



Grafik 5.29. horizontale Beleuchtungsstärke bei bedecktem Himmel in den Tropen in Abhängigkeit von der Sonnenhöhe

5.3.2. Kombination feststehender und beweglicher Komponenten

Im folgenden werden verschiedene im vorhergehenden Kapitel vorgestellte feststehende Komponenten mit außenliegenden geregelten Jalousien kombiniert.

5.3.2.1. Innenliegendes horizontales Lichtschwert und außenliegende geregelte Jalousie

Das Lichtschwert wurde für eine Nordfassade in Rio de Janeiro, d.h. für Sonnenhöhen $\geq 30^\circ$ ausgelegt (siehe auch Grafik AII.4. Sonnenstandsdiagramm in Anhang II). Das Oberlicht hat eine lichte Höhe 0,75 m. Damit ergibt sich eine Lichtschwerttiefe von 1,30 m. Das Lichtschwert wird mit „plastic“ und einem Reflexionsgrad von 0,85 simuliert.

Da der Aufwand für innenliegende LS-Finnen relativ groß ist und die Direktstrahlung nur an wenigen Stunden im Jahr und in wenig problematischen Bereichen stattfindet, wird im folgenden die Kombination aus einem internen Lichtschwert sowie einer geregelten Jalousie simuliert.

Auslegung für Rio de Janeiro: Auslegungskonzept und konkrete Auslegung siehe Anhang II.2.1.

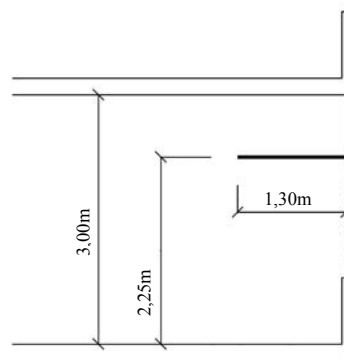


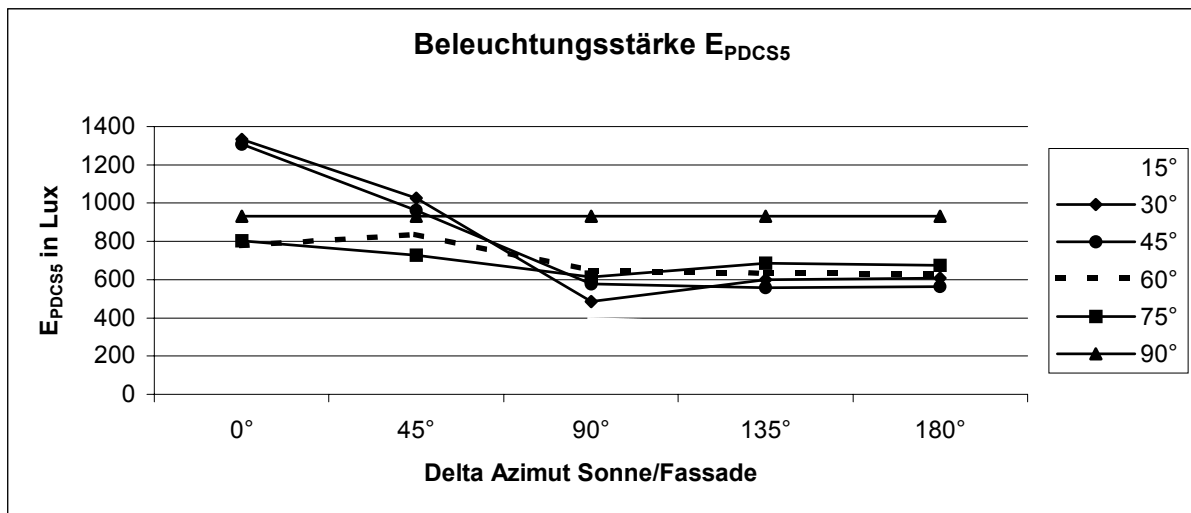
Abbildung 5.11. Vertikalschnitt durch die Fassade des Modellraums

Simulationsergebnisse

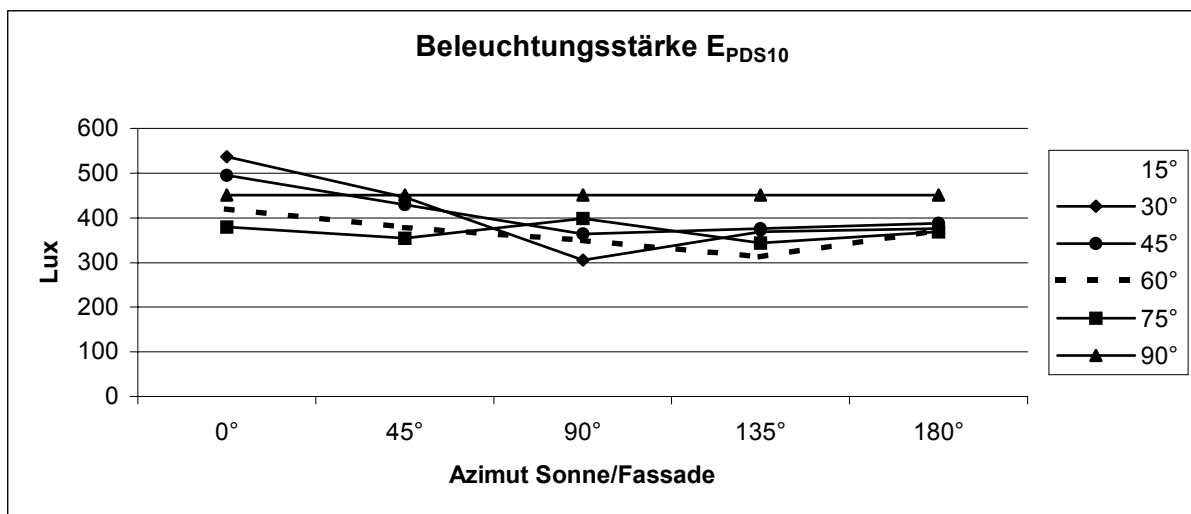
A) für klare Himmel mit Sonne (CIE Clear Sky & Sun)

Sonnenhöhe γ_s	Delta Azimut Fassade/Sonne				
	0°	45°	90°	135°	180°
15°	...	...	eingezogen	e.	e.
30°	55°	35°	0°	e.	e.
45°	45°	35°	25°	0°	0°
60°	40°	35°	25°	20°	0°
75°	35°	35°	10°	10°	0°
90°	45°				

Tabelle 5.13. Lamellenneigung der Jalousie in Abhängigkeit von γ_s und Azimutdifferenz ΔAz



Grafik 5.30. Innenliegendes Lichtschwert mit geregelter Jalousie, Beleuchtungsstärke E_{PDCS5}



Grafik 5.31. Innenliegendes Lichtschwert mit geregelter Jalousie, Beleuchtungsstärke E_{PDCS10}

Anmerkung: Die Grafiken der Kontrollwerte E_{VIC1} und E_{VIC2} befinden sich in Anhang III.6.



Bild 5.17. $\gamma_S = 45^\circ$, $\Delta|\alpha_F - \alpha_S| = 5^\circ$, $\gamma_J = 45^\circ$

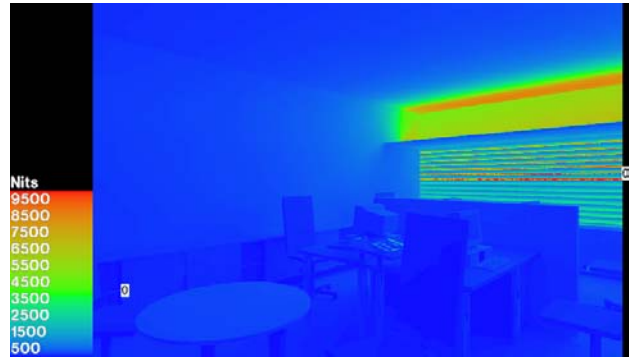


Bild 5.18. Leuchtdichtebild



Bild 5.19. Lichtschwert innen mit $\gamma_N = 0^\circ$,
 $\gamma_S = 45^\circ$, $\Delta Az = 5^\circ$



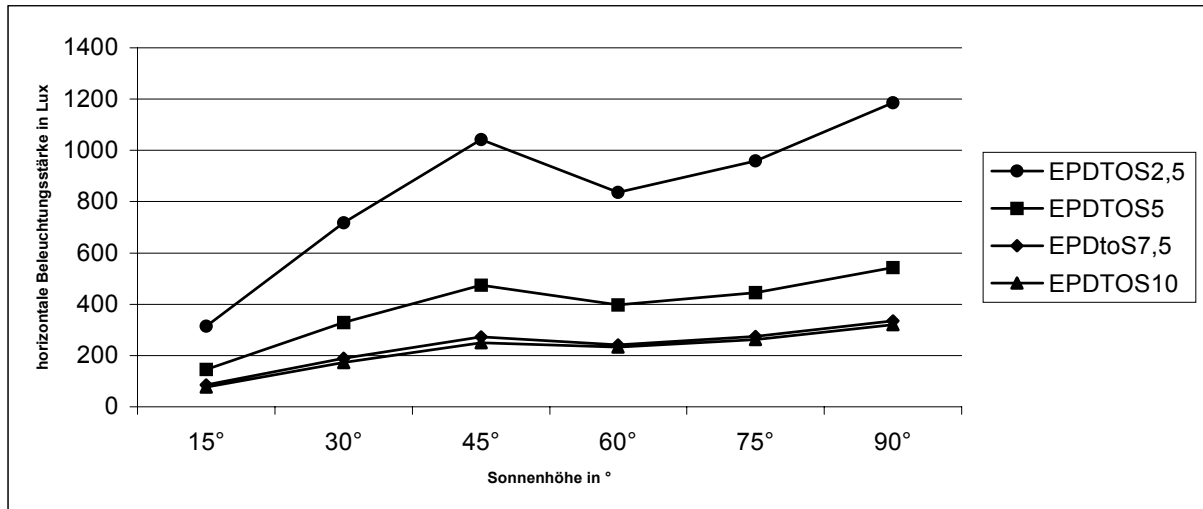
Bild 5.20. Leuchtdichtebild

Fazit Leuchtdichte: es sind keine Blendungsprobleme zu erwarten.

B) für bewölkte Himmel in den Tropen ($TOS_{(RIO)}$)

γ_S/γ_J	15°/e	30°/e	45°/e	60°/0°	75°/0°	90°/0°
$E_{PDCS2,5}$	315	717	1042	836	960	1185
E_{PDCS5}	146	329	475	397	445	542
$E_{PDCS7,5}$	85	189	272	242	274	335
E_{PDCS10}	77	173	249	234	263	320
E_{VIC1}	552	1264	1840	1095	1242	1556
E_{VIC2}	280	636	925	695	789	974

Tabelle 5.14. Tageslichtpotential und vertikale Beleuchtungsstärken bei bedecktem Himmel. Die Lamellenneigung γ_J wird in der Kopfzeile hinter der Sonnenhöhe γ_S angegeben (e=eingez.)



Grafik 5.32. horizontale Beleuchtungsstärke bei bedecktem Himmel in den Tropen in Abhängigkeit von der Sonnenhöhe

5.3.2.2. Innenliegendes um 5° geneigtes Lichtschwert und außenliegende geregelte Jalousie

Das Lichtschwert wurde für Sonnenhöhen $\geq 30^\circ$ ausgelegt. Die Neigung α_N beträgt 5° . Das Oberlicht hat eine lichte Höhe 0,75 m. Nach der in Anhang II durchgeführten Auslegung ergibt sich eine Lichtschwerttiefe von 1,54 m.

Das Lichtschwert wird mit „plastic“ und einem Reflexionsgrad von 0,85 simuliert. Der Sonnenschutz für den Sichtfensterbereich wird durch eine außenliegende Jalousie gewährleistet.

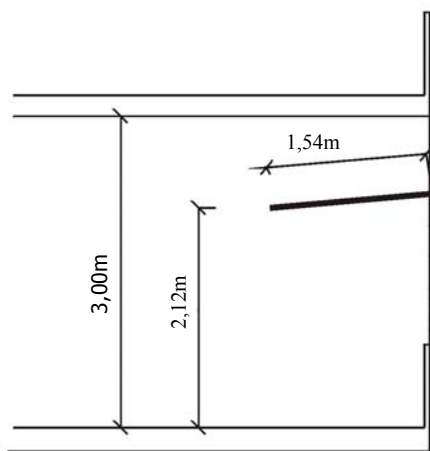


Abbildung 5.12. Fassadenschnitt durch den Modellraum

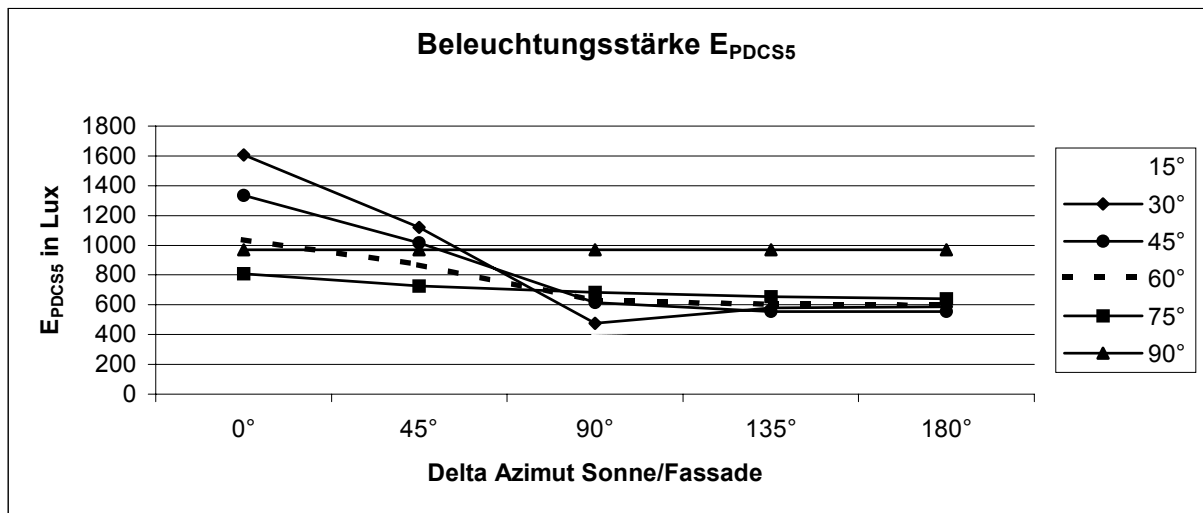
Auslegung für Rio de Janeiro: Auslegungssystematik und konkrete Auslegung siehe Anhang II.3.

Simulationsergebnisse

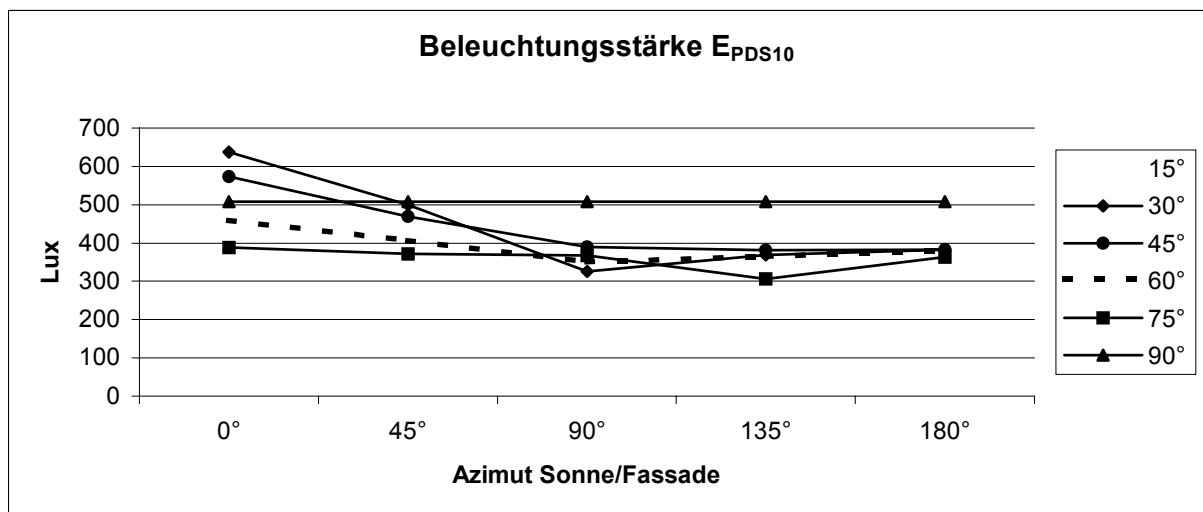
A) für klare Himmel mit Sonne (CIE Clear Sky & Sun)

Sonnenhöhe γ_s	Delta Azimut Fassade/Sonne				
	0°	45°	90°	135°	180°
15°	...	...	eingezogen	e.	e.
30°	50°	35°	0°	e.	e.
45°	45°	35°	0°	0°	0°
60°	40°	35°	20°	15°	15°
75°	35°	35°	25°	25°	25°
90°	45°				

Tabelle 5.15. Lamellenneigung der Jalousie γ_j in Abhängigkeit von γ_s und Azimutdifferenz ΔAz



Grafik 5.33. Innenliegendes Lichtschwert mit geregelter Jalousie, Beleuchtungsstärke E_{PDCS5}



Grafik 5.34. Innenliegendes Lichtschwert mit geregelter Jalousie, Beleuchtungsstärke E_{PDS10}

Anmerkung: Die Grafiken der Kontrollwerte E_{VIC1} und E_{VIC2} befinden sich in Anhang III.7.

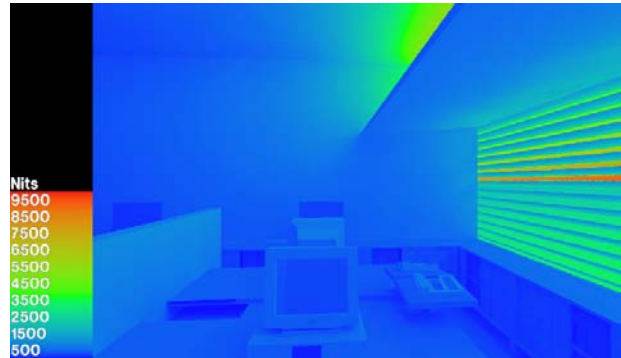
Bild 5.21. $\gamma_S = 45^\circ$, $\Delta Az = 0^\circ$ 

Bild 5.22. Leuchtdichteverteilung

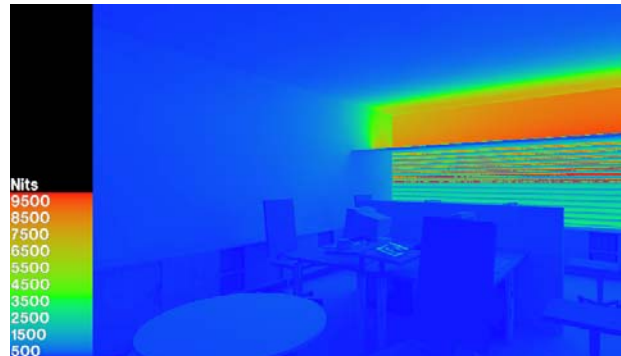
Bild 5.23. $\gamma_S = 45^\circ$, $\Delta Az = 0^\circ$ 

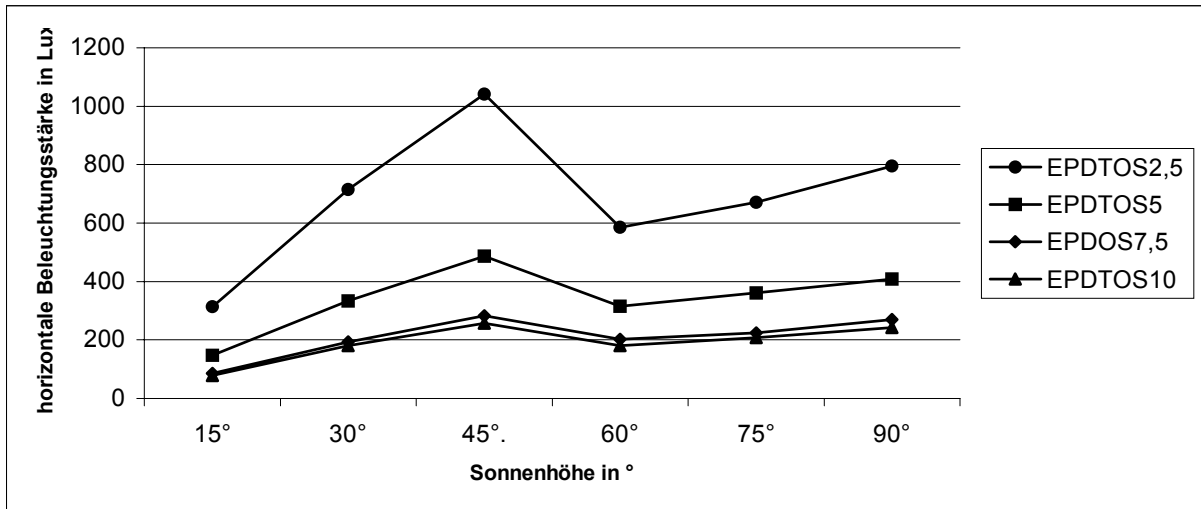
Bild 5.24. Leuchtdichteverteilung

Fazit Leuchtdichte: wie in Bild 5.24. erkennbar, bewegt man sich bei dieser Lösung sicherlich in einem Grenzbereich, da sich die Leuchtdichte im Oberlichtbereich bereits im Bereich von 10.000 cd/m^2 bewegt.

B) für bewölkte Himmel in den Tropen ($TOS_{(RIO)}$)

	15°/e	30°/e	45°/e.	60°/0°	75°/0°	90°/0°
$E_{PDCS2,5}$	313	714	1041	586	671	796
E_{PDCS5}	147	334	487	316	362	408
$E_{PDCS7,5}$	86	194	282	202	225	269
E_{PDCS10}	79	180	257	180	208	242
EVIC1	562	1280	1864	699	793	886
EVIC2	280	637	929	478	532	624

Tabelle 5.16. Tageslichtpotential und vertikale Beleuchtungsstärken bei bedecktem Himmel. Die Lamellenneigung γ_j wird in der Kopfzeile hinter der Sonnenhöhe γ_S angegeben (e=eingez.)



Grafik 5.35. horizontale Beleuchtungsstärke bei bedecktem Himmel in den Tropen in Abhängigkeit von der Sonnenhöhe

5.3.2.3. Externes und internes Lichtschwert und außenliegende geregelte Jalousie

Die ausführliche Auslegungskonzept sowie der konkreten Auslegung für die Nordfassade siehe Anhang II.4. und II.7.

Da der Aufwand für innenliegende LS-Finnen relativ groß ist und die Direktstrahlung nur an wenigen Stunden im Jahr und in wenig problematischen Bereichen stattfindet, wird im folgenden die Kombination aus externen und internem Lichtschwert sowie einer geregelten Jalousie simuliert.

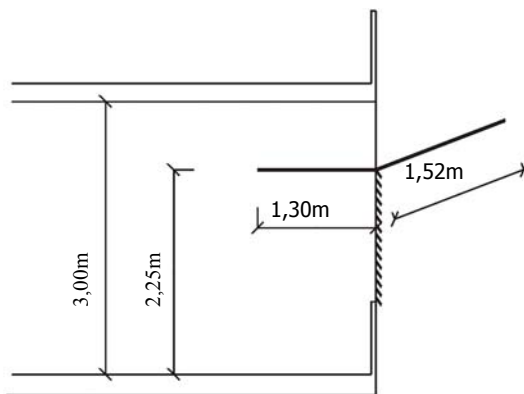


Abbildung 5.13. Vertikaler Schnitt

Simulationsergebnisse

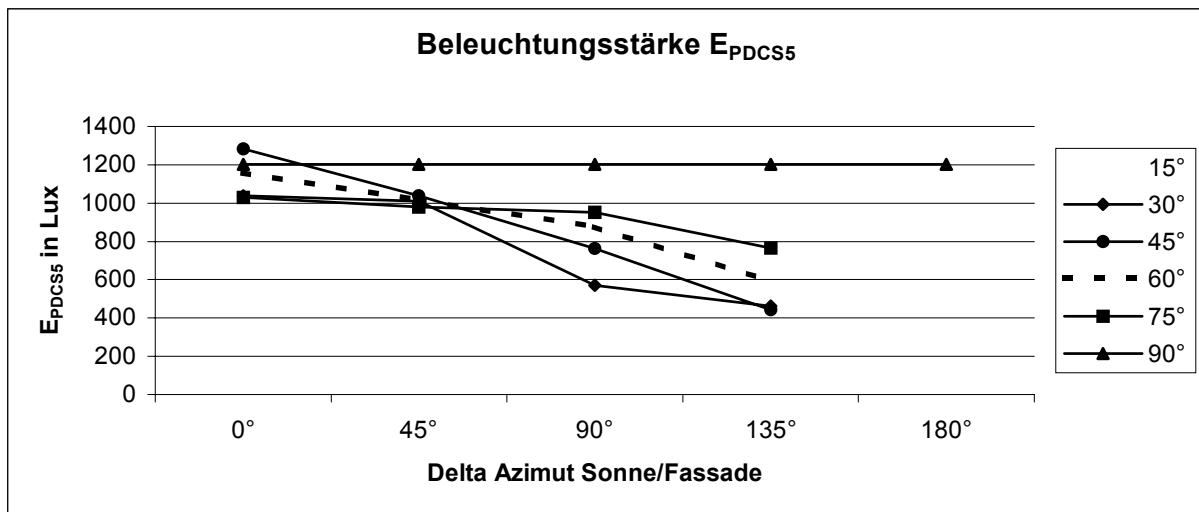
Reflexionsgrad des außenliegenden Lichtschwertes: 0,74

Reflexionsgrad des innenliegenden Lichtschwertes: 0,85

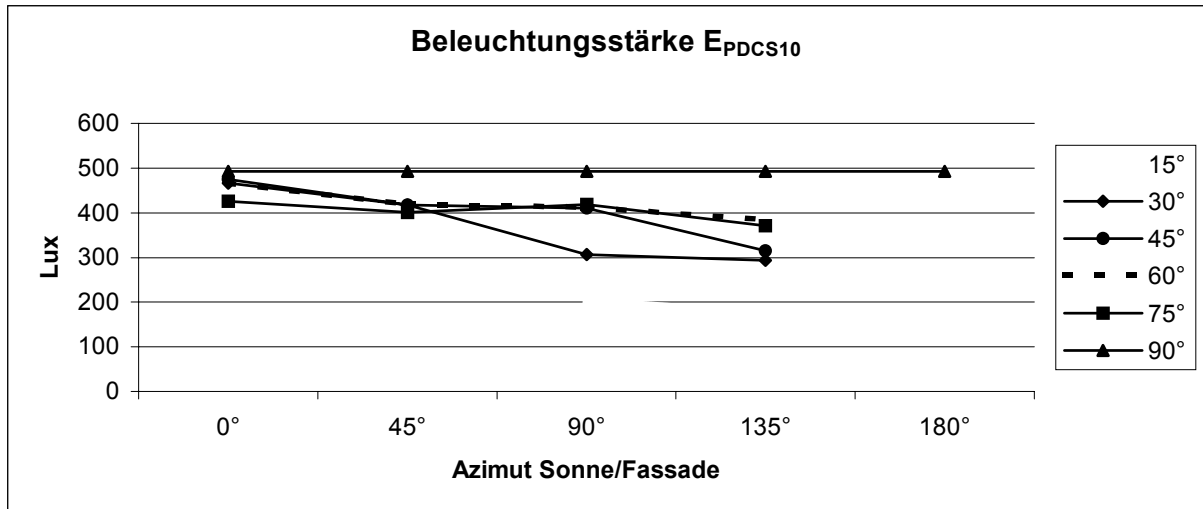
A) für klare Himmel mit Sonne (CIE Clear Sky & Sun)

Sonnenhöhe γ_s	Delta Azimut Fassade/Sonne				
	0°	45°	90°	135°	180°
15°	...	...	eingezogen	e.	...
30°	50°	30°	0°	e.	...
45°	35°	25°	0°	0°	...
60°	25°	25°	10°	0°	...
75°	30°	30°	25°	25°	...
90°	45°				

Tabelle 5.17. Lamellenneigung der Jalousie in Abhängigkeit von γ_s und Azimutdifferenz ΔAz



Grafik 5.36. Innen- und außenliegendes Lichtschwert mit geregelter Jalousie, Beleuchtungsstärke E_{PDCS5}



Grafik 5.37. Innen- und außenlieg. Lichtschwert mit geregelter. Jalousie, Beleuchtungsstärke E_{PDCS10}

Anmerkung: Die Grafiken der Kontrollwerte E_{VIC1} und E_{VIC2} befinden sich in Anhang III.8.



Bild 5.26. $\gamma_S = 60^\circ$, $\Delta Az = 0^\circ$

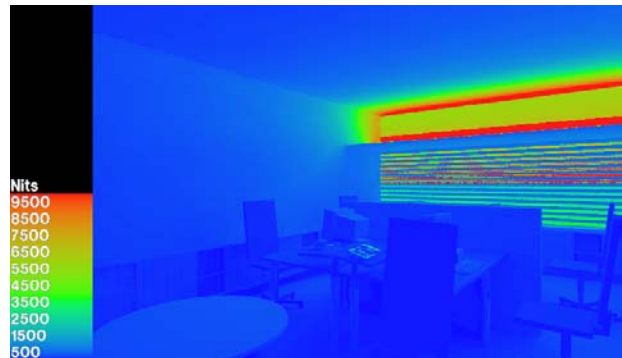


Bild 5.27. Leuchtdichteverteilung



Bild 5.28. $\gamma_S = 60^\circ$, $\Delta|\alpha_F - \alpha_S| = 0^\circ$



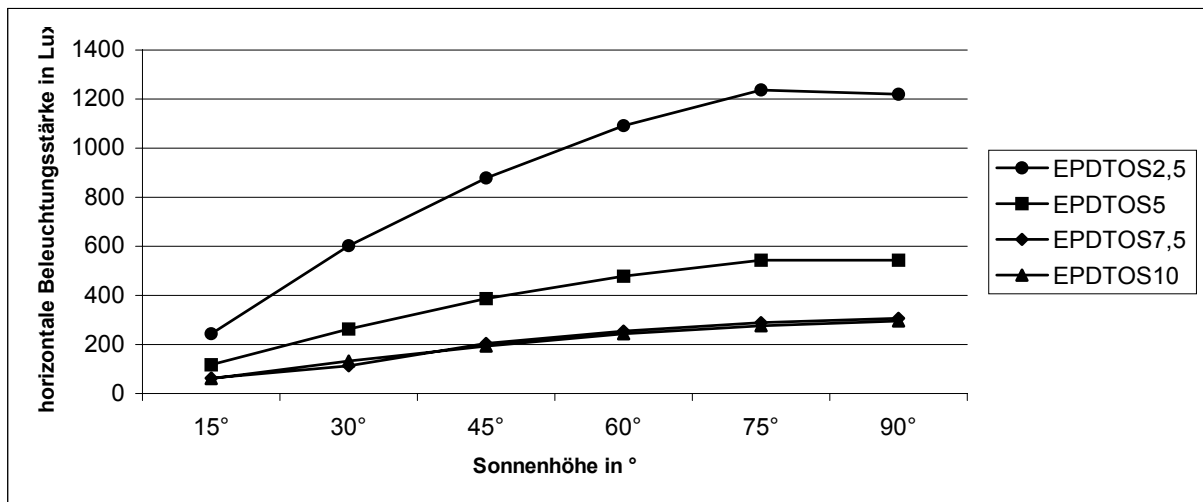
Bild 5.29. Leuchtdichteverteilung

Fazit Leuchtdichte: wie in Bild 5.27. erkennbar, bewegt man sich bei dieser Lösung sicherlich in einem Grenzbereich, da sich die Leuchtdichte im Oberlichtbereich bereits im Bereich von 10.000 cd/m^2 bewegt.

B) für bewölkte Himmel in den Tropen ($TOS_{(Rio)}$)

γ_S/γ_J	15°/e	30°/e	45°/e	60°/e	75°/e	90°/0°
$E_{PDCS2,5}$	243	602	879	1092	1238	1219
E_{PDCS5}	117	264	386	478	544	543
$E_{PDCS7,5}$	63	112	205	255	289	306
E_{PDCS10}	60	132	193	243	276	296
E_{VIC1}	386	856	1237	1539	1742	1346
E_{VIC2}	206	460	672	832	953	902

Tabelle 5.18. Tageslichtpotential und vertikale Beleuchtungsstärken bei bedecktem Himmel. Die Lamellenneigung γ_J wird in der Kopfzeile hinter der Sonnenhöhe γ_S angegeben (e=eingez.)



Grafik 5.38. horizontale Beleuchtungsstärke bei bedecktem Himmel in den Tropen in Abhängigkeit von der Sonnenhöhe

5.3.2.4. Laser Cut Panel LCP

Einführung

Das Laser Cut Panel (LCP) wird durch Laserschnitte in dünne Acrylglasplatten hergestellt. Der Laserschnitt in der Acrylglasplatte wirkt wie Spiegel, der einen Teil des einfallenden Lichts umlenkt. Die Menge der umgelenkten Lichtstrahlen wird durch die Tiefe der Schnitte und deren Abstand untereinander ebenso bestimmt, wie durch den Einfallswinkel der Lichtstrahlen, dem Schnittwinkel und einer möglichen Neigung des LCPs.

Der für die folgenden Radiance-Simulationen verwendete Algorithmus wurde unter dem Titel "RADIANCE algorithm to simulate laser cut panel light redirecting elements" veröffentlicht [67]. Die Materialart "prism2", die für den Algorithmus verwendet wird, erlaubt nur zwei Umlenkungen des Lichtstrahls. Für den Fall des LCP, bei dem 3 Umlenkungen möglich sind, werden durch den Algorithmus automatisch die beiden höheren Werte erkannt und verwendet.

LCPs sind einer konventionellen Verglasung ähnlich, sowohl in der Materialstärke von 6 mm als auch in der Durchsicht. Sie werden in konventionellen Fenstern, Oberlichtern, Atrien und Lichtkuppeln verwendet. In der Regel werden die LCPs zwischen Glasscheiben eingebettet, um das Material so gegen Verschmutzung und Beschädigungen zu schützen.

Da nur ein Teil der einfallenden Direktstrahlung umgelenkt wird (siehe Abbildung 5.14.), ist der Einsatz eines internen Lichtschwertes notwendig.

Geometrie

Die Optimierung der Geometrie hängt von unterschiedlichen Faktoren ab:

- Raumtiefe
- Sonnenhöhe, für die es gilt zu optimieren
- die Einbaulage des LCPs

5.3.2.4.1. Vertikal im Oberlicht mit innenliegendem Lichtschwert - Simulationen

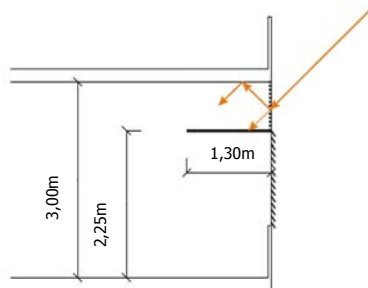


Abbildung 5.14. Fassadenschnitt mit vertikalem LCP im Oberlicht

Das interne Lichtschwert wurde für Sonnenhöhen $\geq 30^\circ$ ausgelegt.

Die Neigung des inneren Lichtschwertes beträgt 0° . Das Oberlicht hat eine lichte Höhe 0,75 m. Damit ergibt sich eine Lichtschwerttiefe von 1,30 m. Das Lichtschwert wird mit „plastic“ und einem Reflexionsgrad von 0,85 simuliert.

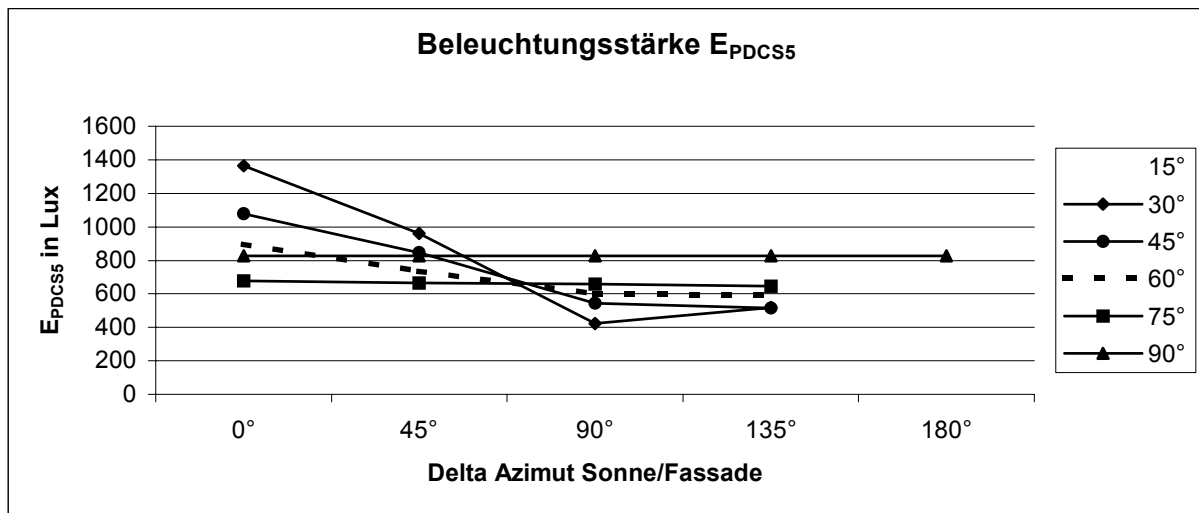
D/W = 0,33; Float 2 = 1,5; Float 3-7 = 0

Simulationsergebnisse

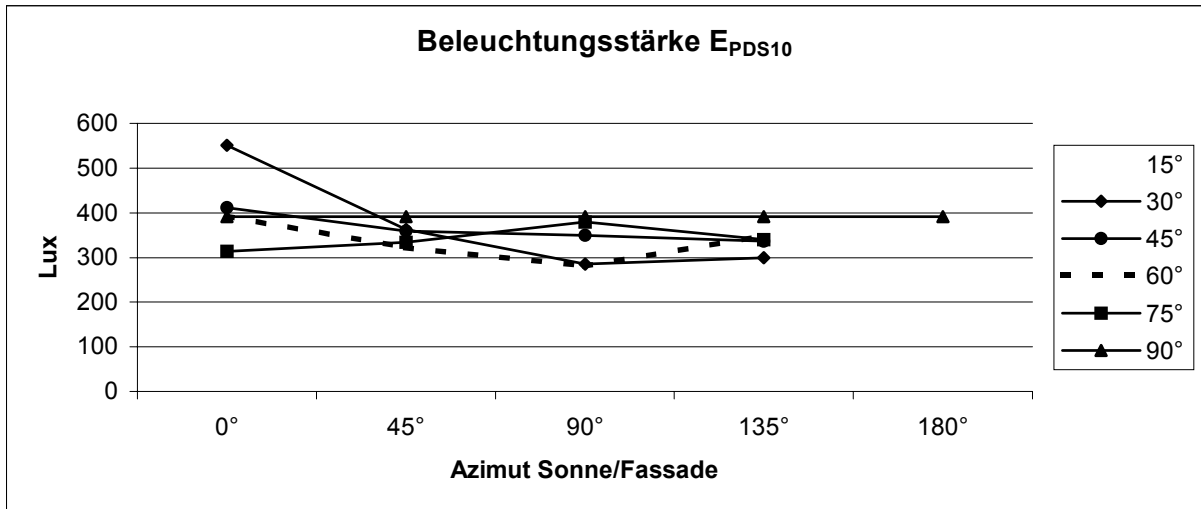
A) für klare Himmel mit Sonne (CIE Clear Sky & Sun)

Sonnenhöhe γ_s	Delta Azimut Fassade/Sonne				
	0°	45°	90°	135°	180°
15°	eingezogen	e.	...
30°	45°	35°	0°	e.	...
45°	45°	35°	0°	0°	...
60°	35°	35°	15°	10°	...
75°	35°	30°	20°	20°	...
90°	45°				

Tabelle 5.19. Lamellenneigung der Jalousie in Abhängigkeit von γ_s und Azimutdifferenz ΔAz



Grafik 5.39. Vertikales LCP im Oberlicht, internes LS, geregelte Jalousie, Beleuchtungsstärke E_{PDCS5}



Grafik 5.40. Vertikales LCP im Oberlicht, internes LS, geregelte Jalousie, Beleuchtungsstärke E_{PDS10}

Anmerkung: Die Grafiken der Kontrollwerte E_{VIC1} und E_{VIC2} befinden sich in Anhang III.9.



Bild 5.30. $\gamma_S = 45^\circ$, $\Delta|\alpha_F - \alpha_S| = 5^\circ$, $\gamma_J = 45^\circ$

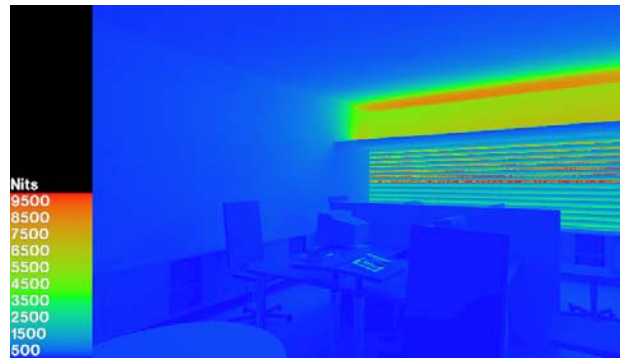


Bild 5.31. Leuchtdichteverteilung



Bild 5.32. $\gamma_S = 45^\circ$, $\Delta|\alpha_F - \alpha_S| = 5^\circ$, $\gamma_J = 45^\circ$



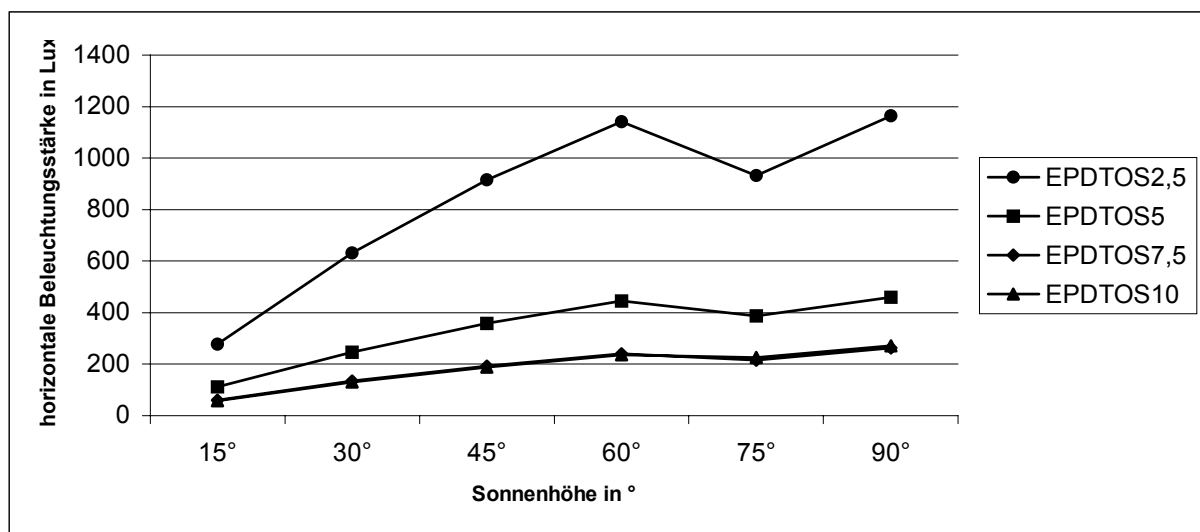
Bild 5.33. Leuchtdichteverteilung

Fazit Leuchtdichte: es sind keine Blendungsprobleme zu erwarten.

B) für bewölkte Himmel in den Tropen ($TOS_{(RIO)}$)

γ_s/γ_j	15°/e	30°/e	45°/e	60°/e	75°/e	90°/0°
$E_{PDCS2,5}$	277	631	915	1141	931	1164
E_{PDCS5}	112	247	359	446	387	459
$E_{PDCS7,5}$	61	134	193	240	215	262
E_{PDCS10}	59	130	189	237	226	272
EVIC1	480	1096	1593	1983	1203	1485
EVIC2	222	506	734	913	702	867

Tabelle 5.20. Tageslichtpotential und vertikale Beleuchtungsstärken bei bedecktem Himmel. Die Lamellenneigung γ_j wird in der Kopfzeile hinter der Sonnenhöhe γ_s angegeben (e=eingez.)



Grafik 5.41. horizontale Beleuchtungsstärke bei bedecktem Himmel in den Tropen in Abhängigkeit von der Sonnenhöhe

5.3.2.4.2. LCP geneigt vor dem Oberlicht mit innenliegendem Lichtschwert

Um eine möglichst effiziente Nutzung der LCP zu gewährleisten, können die Elemente auch geneigt in die Fassade integriert werden. Damit vergrößert sich der horizontale Anteil der Paneele und die bei hohen Sonnenständen auftretende Totalreflexion auf der Glashaut wird reduziert.

Auslegungskonzept und konkrete Auslegung geneigter LCPs in Verbindung mit internem Lichtschwert & Jalousien siehe Anhang II.3. und II.3.1.

Simulationsergebnisse für LCP mit $\alpha_{LCP} = 15^\circ$ und horizontalem internen Lichtschwert

Das Lichtschwert wurde für Sonnenhöhen $\geq 30^\circ$ ausgelegt.

Die Neigung des inneren Lichtschwertes beträgt 0° . Das Oberlicht hat eine lichte Höhe 0,75 m. Damit ergibt sich eine Lichtschwerttiefe von 1,30 m. Das Lichtschwert wird mit „plastic“ und einem Reflexionsgrad von 0,85 simuliert. Die obere Brüstung hat einen Reflexionsgrad von 0,7. $D/W = 0.291$; Float 2 = 1,5; Float 3-7 = 0

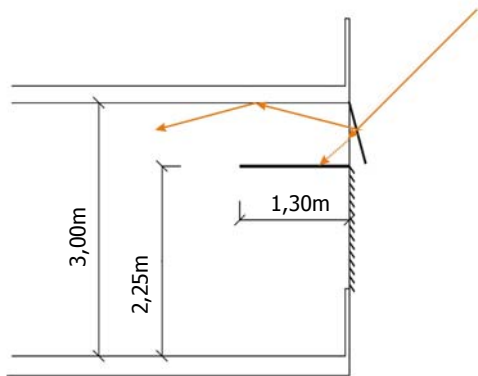
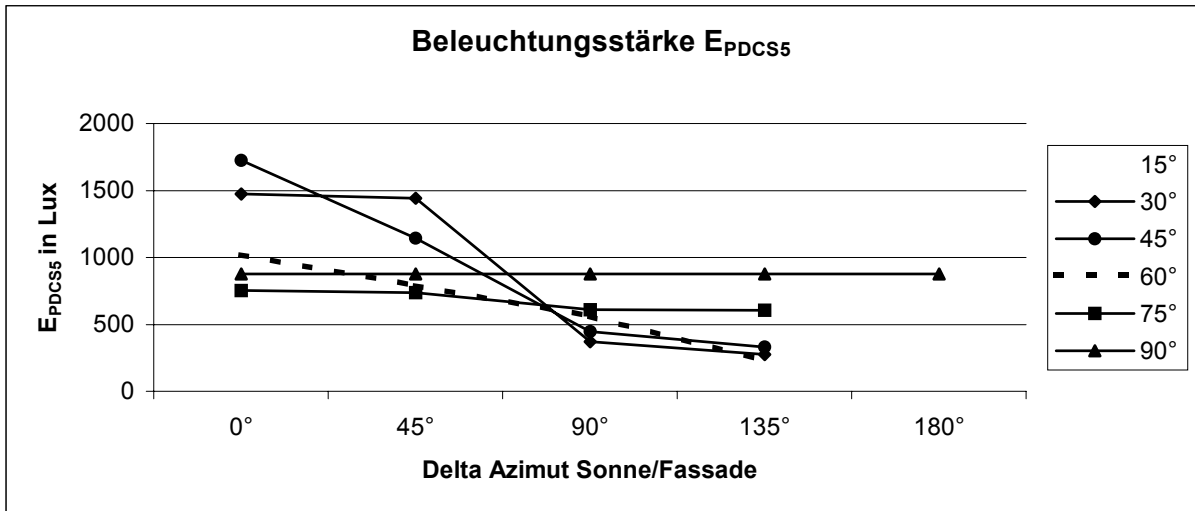


Abbildung 5.15. Vertikalschnitt durch die Fassade

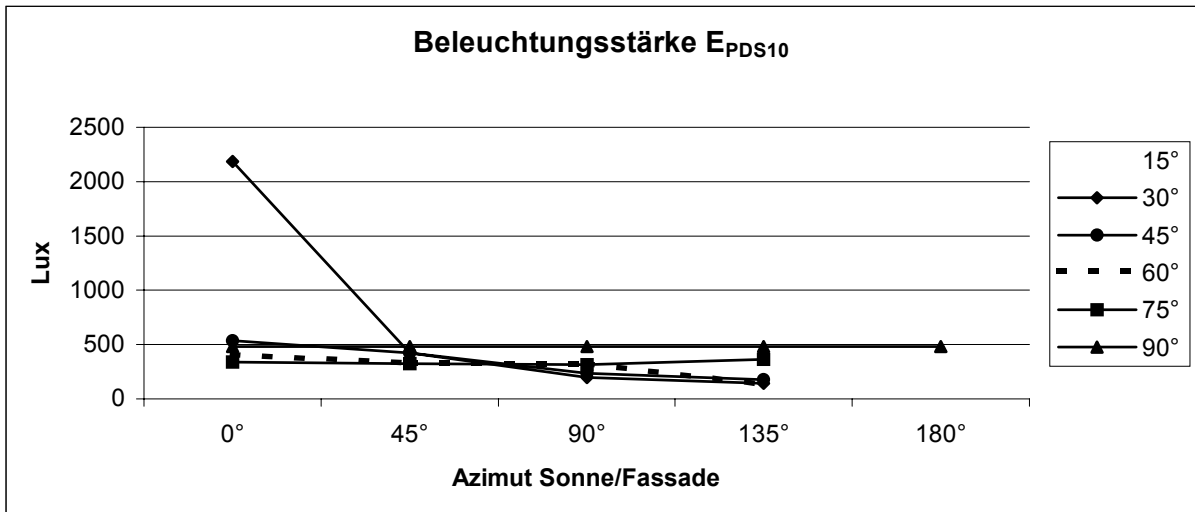
A) für klare Himmel mit Sonne (CIE Clear Sky & Sun)

Sonnenhöhe γ_s	Delta Azimut Fassade/Sonne				
	0°	45°	90°	135°	180°
15°	eingezogen	e.	...
30°	45°	45°	e.	e.	...
45°	50°	35°	e.	e.	...
60°	35°	35°	10°	0°	...
75°	35°	30°	20°	10°	...
90°	45°				

Tabelle 5.21. Lamellenneigung der Jalousie in Abhängigkeit von γ_s und Azimutdifferenz ΔAz



Grafik 5.42. LCP 15° mit internem Lichtschwert und mit geregelter Jalousie, Beleuchtungsstärke E_{PDCS5}



Grafik 5.43. LCP 15° mit internem Lichtschwert und mit gereg. Jalousie, Beleuchtungsstärke E_{PDCS10}

Anmerkung: Die Grafiken der Kontrollwerte E_{VIC1} und E_{VIC2} befinden sich in Anhang III.10.



Bild 5.34. $\gamma_S = 45^\circ$, $\Delta|\alpha_F - \alpha_S| = 5^\circ$, $\gamma_J = 45^\circ$



Bild 5.35. Leuchtdichteverteilung



Bild 5.36. $\gamma_S = 45^\circ$, $\Delta|\alpha_F - \alpha_S| = 5^\circ$, $\gamma_J = 45^\circ$

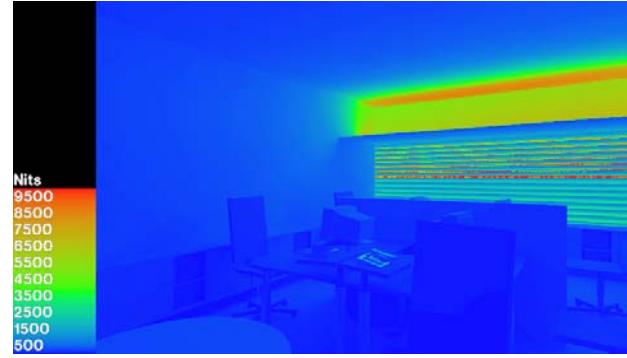


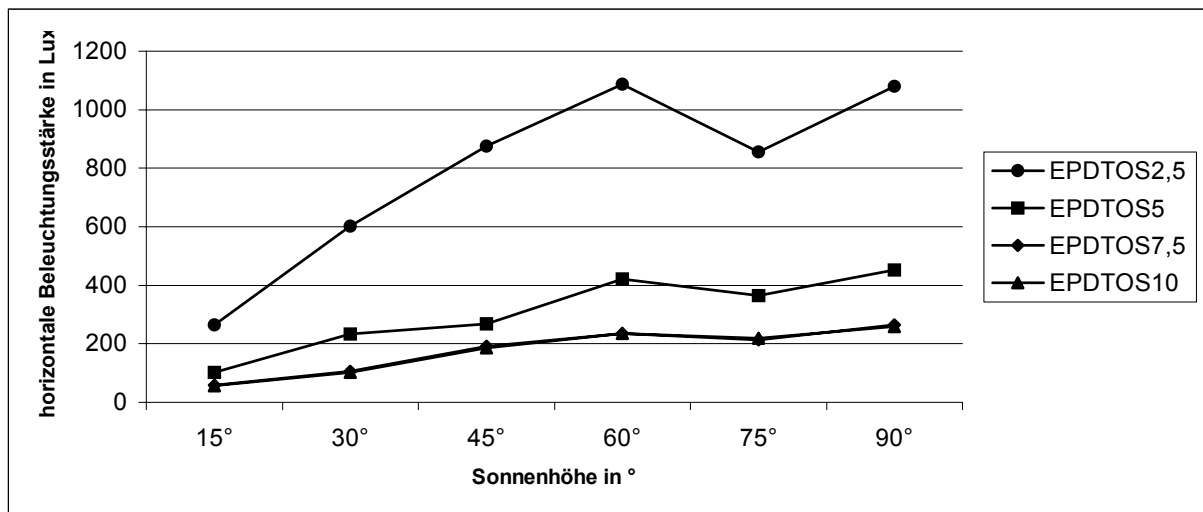
Bild 5.37. Leuchtdichteverteilung

Fazit Leuchtdichte: es sind keine Blendungsprobleme zu erwarten.

B) für bewölkte Himmel in den Tropen (TOS_(RIO))

γ_S/γ_J	15°/e	30°/e	45°/e	60°/e	75°/e	90°/0°
$E_{PDCS2,5}$	264	602	876	1087	856	1080
E_{PDCS5}	103	233	268	421	365	452
$E_{PDCS7,5}$	59	105	192	236	214	264
E_{PDCS10}	57	103	186	235	219	259
E_{VIC1}	446	1014	1472	1832	1139	1396
E_{VIC2}	214	490	711	885	692	846

Tabelle 5.22. Tageslichtpotential und vertikale Beleuchtungsstärken bei bedecktem Himmel. Die Lammellenneigung γ_J wird in der Kopfzeile hinter der Sonnenhöhe γ_S angegeben (e=eingez.)



Grafik 5.44. horizontale Beleuchtungsstärke bei bedecktem Himmel in den Tropen in Abhängigkeit von der Sonnenhöhe

5.3.3. Bewegliche Systeme

Bewegliche Systeme bestehen durch die Möglichkeit die Lichtmenge und – abhängig vom eingesetzten System - die Richtung des einfallenden Lichtes exakt zu regeln.

Zu den beweglichen Systemen zählen Jalousien, Raffstores sowie nachgeführte Systeme wie Tageslichtjalousien, Laser Cut Panels LCPs, Prismen- und Spiegelsysteme.

Ihr Nachteil liegt im erhöhten Wartungsaufwand und in den in der Regel relativ hohen Investitionskosten.

In Rio de Janeiro erlangten die Architekten M. & M. & M. Roberto große Bekanntheit durch die von ihnen entwickelten Sonnenschutzsysteme (Photo 2.34.), wie sie z.B. im „Edifício Seguradoras“ im Jahr 1949 zum Einsatz kamen [19]. Allerdings wurden die Sonnenschutzrichtungen in den Folgejahren von der Fassade entfernt. Grund hierfür war angeblich der hohe Wartungsaufwand.

Typen

Im folgenden werden folgende bewegliche Systeme untersucht:

- Jalousien
- Tageslichtjalousien

Steuerung und Regelung

Der große Vorteil von Jalousien ist ihre Steuer- bzw. Regelbarkeit. Dabei gibt es verschiedene Ansätze:

1. die manuelle Einstellung durch den Nutzer
2. eine automatische Einstellung durch
 - a. eine astronomische Steuerung oder
 - b. eine Regelung durch innenliegende Tageslichtsensoren

Im folgenden Kapitel werden die unterschiedlichen Ansätze am Beispiel von Jalousien untersucht.

5.3.3.1. Jalousien

Jalousien sind aufgrund ihrer Flexibilität hinsichtlich Sonnen- und Sichtschutz kaum zu übertreffen. Sie bieten bei richtiger Handhabung einen ausgezeichneten Blendschutz, sind unabhängig der Fassadenorientierung einsetzbar und gestatten bei Sonnenhöhen $\gamma_s > 45^\circ$ einen freien, bei niedrigeren Sonnenständen einen reduzierten Ausblick (siehe Transmissionsgrad

τ_{90°). Der Wartungsaufwand und die Unterhaltskosten sind in der Regel gering, aber existent. Die Nutzerfreundlichkeit ist bei einer Automatisierung sehr hoch, bei manuellem Betrieb in Bürogebäuden problematisch. Die Investitionskosten sind abhängig vom jeweiligen Modell und insbesondere von der Position der Jalousie in der Fassade – 1) vor der Fassade als Außenjalousie, 2) zwischen der Verglasung oder 3) im Innenraum. Thermisch gesehen sind die Varianten 1) zu bevorzugen, von den Investitionskosten die Variante 3) und von der Wartung/Reinigung die Variante 2).

Die häufigste Anwendung findet in Rio de Janeiro derzeit die innenliegende Variante (siehe Photo 5.2.), wobei eine Automatisierung bisher kaum realisiert wurde. Diese thermisch gesehen sehr schlechte Variante, die immer mit durchgehender Nutzung des Kunstlichtes verbunden ist, führt unter anderem zu dem sehr hohen Energieverbrauch in den Bürogebäuden Rios.

Die Standard-Jalousie wird als Grundlage für alle vergleichenden Untersuchungen von Tageslichtkontrollsystemen verwendet werden. Sie ist aufgrund ihrer Flexibilität in allen Orientierungen einsetzbar.

Außenliegende Jalousien

Die Untersuchung der Jalousie als Tageslichtkontrollsystem beziehungsweise als Komponente eines solchen konzentriert sich in erster Linie auf außenliegende Jalousien. Die Gründe hierfür liegen im besseren thermischen Komfort und in der Unabhängigkeit von einer Doppelverglasung, die im Fall von integrierten Jalousien notwendig wäre, aber in tropischen Ländern keinen Standard darstellt.

1. Die manuelle Einstellung durch den Nutzer findet erfahrungsgemäß in Büroräumen in den Tropen kaum statt – es wird in der Regel vollverschattet, d.h. der Sonnenschutz vollkommen geschlossen und das Kunstlicht eingeschaltet. Auch bei angenehmen äußeren Lichtbedingungen wird diese Kombination in den allerwenigsten Fällen geändert. (siehe Photo 5.1.).



Photo 5.1. Typischer außenliegender Sonnenschutz in Rio de Janeiro mit durchgehender Nutzung des Kunstlichtes



Photo 5.2. Typischer innenliegender Sonnenschutz in Rio de Janeiro mit durchgehender Nutzung des Kunstlichtes

2a. Die astronomische Steuerung aufgrund des Sonnenstandes, gegebenenfalls in Verbindung mit einem Tageslichtsensor im Außenbereich zur Steuerung bei bewölktem Himmel, ist eine Möglichkeit, die aufgrund ihrer Einfachheit interessant erscheint.

In einer Reihe von Untersuchungen wurden die Anforderungen an die vertikale Beleuchtungsstärke im Innenraum in Fassadennähe mit der vertikalen Beleuchtungsstärke an der Fassade in Abhängigkeit von der Sonnenhöhe γ_S untersucht (siehe Anhang IV.1). Im folgenden wurde die trigonometrische Auslegungssystematik definiert, um das Eindringen von Direktstrahlung im Raum zu vermeiden (siehe Anhang IV.2.).

Anschließend wurde die Transmission τ_J einer Jalousie im Zusammenhang zwischen Sonnenhöhe γ_S , Lamellenneigung γ_J und dem Reflexionsgrad α_J einer Jalousie untersucht (siehe Anhang IV.3.).

Die Ermittlung des Transmissionswert τ_J in Abhängigkeit der Sonnenhöhe γ_S und des Reflexionsgrades α_J wurde als nächster Schritt durchgeführt (siehe Anhang IV.4.).

Fazit Steuerung und Regelung

Die in verschiedenen durchgeführten Untersuchungen ermittelten Ergebnisse führen zu der Erkenntnis, dass aufgrund der Vielzahl der Einflüsse auf den Transmissionsgrad τ_J eine einfache astronomische Steuerung der Jalousien den Anforderungen von Bildschirmarbeitsplätzen nicht gerecht werden kann. Durch die sehr hohen vertikalen Beleuchtungsstärken reicht es nicht aus, ausschließlich das direkte Sonnenlicht abzublocken. Es muss, mit Ausnahme sehr niedriger Sonnenstände und der damit verbundenen weitgehenden Schließung der Jalousien, bei allen Sonnenständen ein Teil der diffusen Strahlung ebenfalls ausgeblendet werden.

Durch die Kombination zwischen hohen vertikalen Beleuchtungsstärken an der Fassade und relativ niedrigen zulässigen vertikalen Beleuchtungsstärken im Innenraum $E_{V\text{max}}$ ist eine sehr genaue Steuerung der Jalousien notwendig.

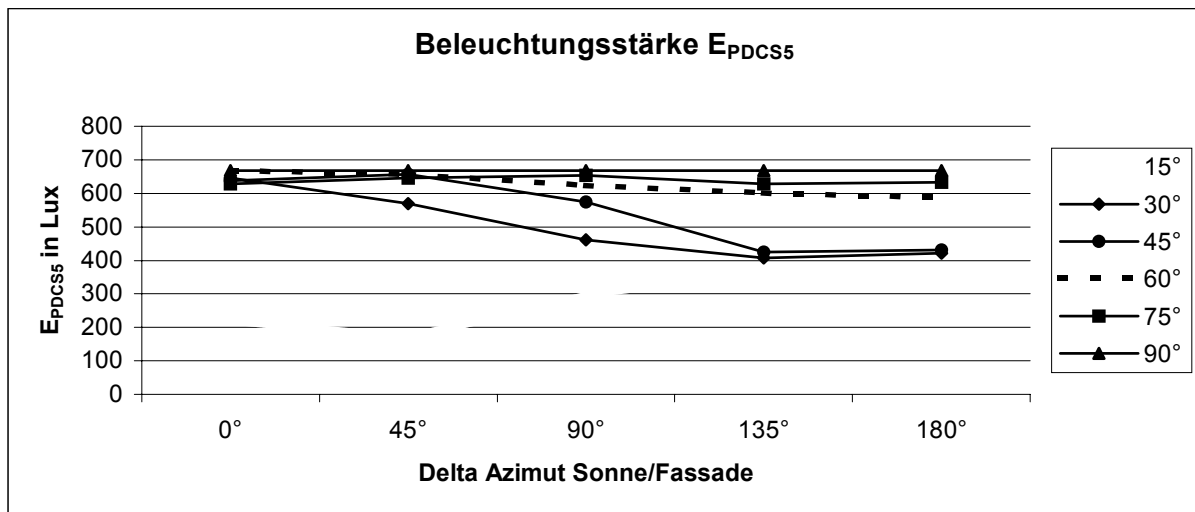
Durch die von Kaase et al [45] konstatierte Steuerungsgenauigkeit für Außenjalousien von $\pm 5^\circ$ und weitere vom Nutzer nicht zu beeinflussende Parameter wie Verbauung (Abschattung und/oder Reflexion durch helle/gläserne Fassaden) erscheint die als 2b) angesprochene Regelung als deutlich geeigneter als eine Steuerung. Dabei gilt es, den vertikalen Sensor (vertikale Messung, da der empfindlichste Wert die vertikale Beleuchtungsstärke am Bildschirm darstellt) integral über eine repräsentative Fläche messen zu lassen, um so eine mögliche „Streifenwirkung“ des Lichteinfalls zu kompensieren.

Simulationsergebnisse

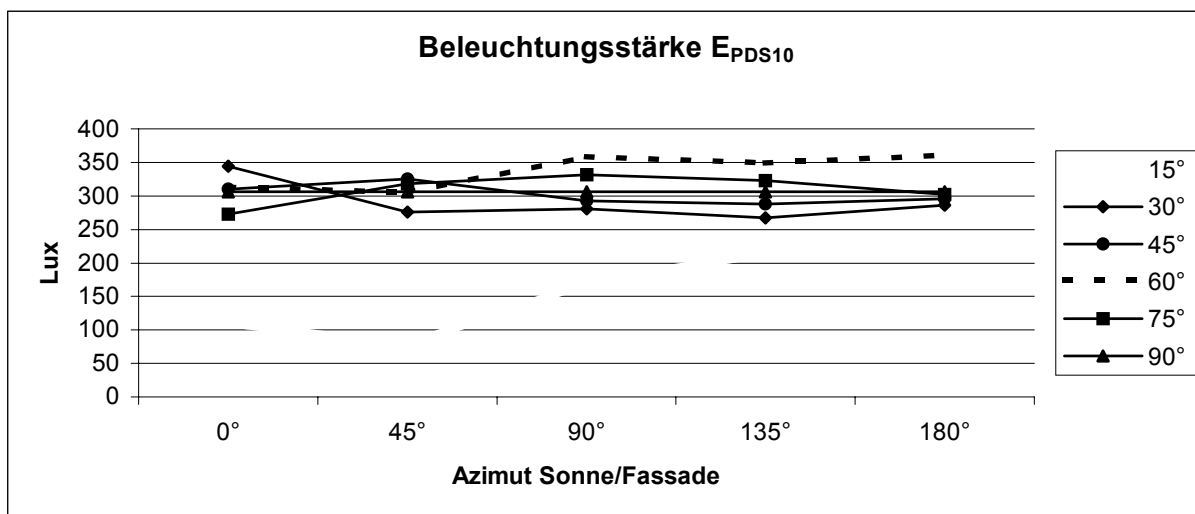
A) für klaren Himmel und Sonne (CIE CSS)

Sonnenhöhe γ_s	Delta Azimut Fassade/Sonne				
	0°	45°	90°	135°	180°
15°	60°	60°	eingezogen	e.	e.
30°	35°	30°	0°	0°	0°
45°	35°	45°	0°	0°	0°
60°	30°	25°	10°	10°	10°
75°	30°	25°	20°	20°	20°
90°	40°				

Tabelle 5.23. Lamellenneigung der Jalousie in Abhängigkeit von γ_s und Azimutdifferenz ΔAz



Grafik 5.45. geregelte Jalousien, Beleuchtungsstärke E_{PDCS5}



Grafik 5.46. geregelte Jalousien, Beleuchtungsstärke E_{PDCS10}

Anmerkung: Die Grafiken der Kontrollwerte E_{VIC1} und E_{VIC2} befinden sich in Anhang III.11.

Bild 5.38. $\gamma_S = 45^\circ$, $\Delta|\alpha_F - \alpha_S| = 0^\circ$ 

Bild 5.39. Leuchtdichteverteilung

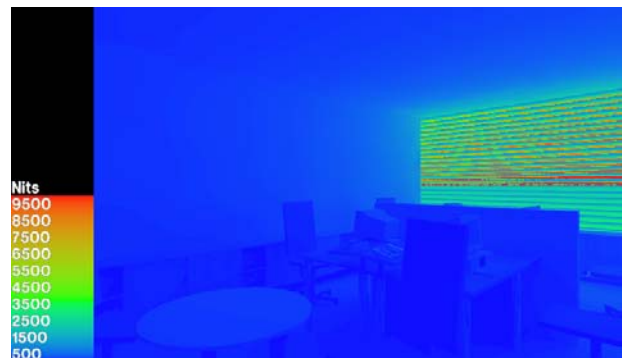
Bild 5.40. $\gamma_S = 45^\circ$, $\Delta|\alpha_F - \alpha_S| = 0^\circ$ 

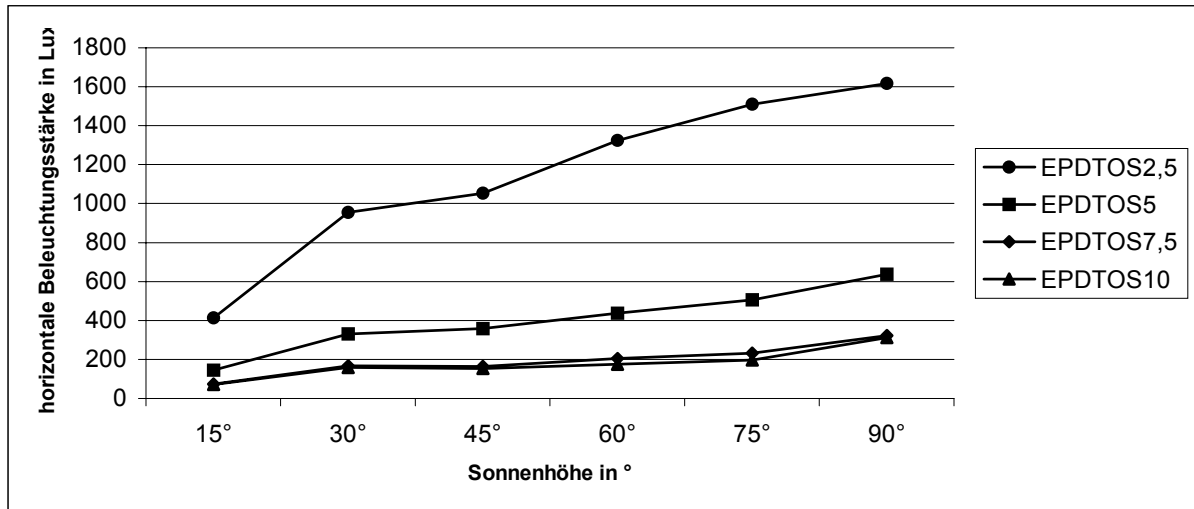
Bild 5.41. Leuchtdichteverteilung

Fazit Leuchtdichte: es sind keine Blendungsprobleme zu erwarten.

B) für bewölkte Himmel in den Tropen ($TOS_{(RIO)}$)

γ_S/γ_J	15°/e.	30°/e.	45°/0°	60°/0°	75°/0°	90°/0°
$E_{PDCS2,5}$	414	954	1054	1324	1509	1617
E_{PDCS5}	146	330	359	437	505	638
$E_{PDCS7,5}$	74	166	163	205	233	322
E_{PDCS10}	70	158	153	175	197	313
E_{VIC1}	584	1350	1248	1555	1760	1825
E_{VIC2}	294	677	707	890	1006	1129

Tabelle 5.24. Tageslichtpotential und vertikale Beleuchtungsstärken bei bedecktem Himmel. Die Lamellenneigung γ_J wird in der Kopfzeile hinter der Sonnenhöhe γ_S angegeben (e=eingez.)



Grafik 5.47. horizontale Beleuchtungsstärke bei bedecktem Himmel in den Tropen in Abhängigkeit von der Sonnenhöhe

5.3.3.2. Tageslichtjalousie

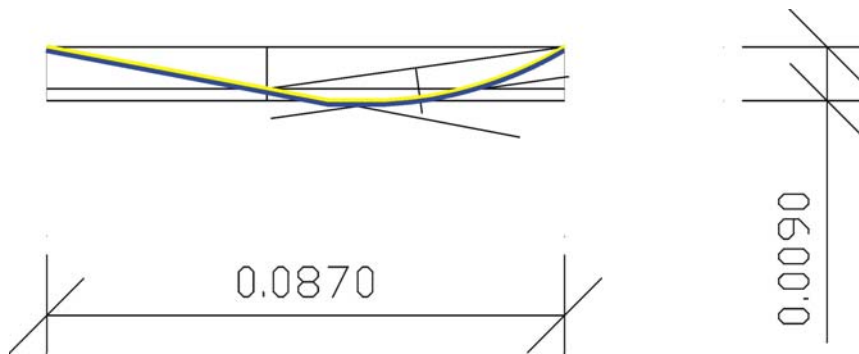


Abbildung 5.17. Schnitt einer Tageslichtjalousie 609 der Firma Hüppe (Zeichnung nach Muster)

Die Tageslichtjalousie ist aus Lamellen zusammengesetzt, die oben hoch reflektiv sind und unten einen Reflexionsgrad erhalten, der Blendung vermeidet. Für die Simulation wurde für oben ein Reflexionsgrad $\alpha_{TLJo} = 0,92$ und für unten ein Wert von $\alpha_{TLJu} = 0,5$ gewählt. Die Tageslichtlenkjalousie wird im Oberlichtbereich innen angebracht. Das Sichtfenster ist durch eine Standard-Jalousie geschützt. Für beide Lamellenseiten wurde das Radiance – Material „plastic“ definiert. Die Werte für „roughness“ und „specularity“ wurden auf 0 (glatt, matt) gesetzt. Der Versuch, die obere Lamellenseite als Radiance-Material „mirror“ zu definieren, scheiterte an der Unfähigkeit des Radiance-Programmes eine größere Zahl von gekrümmten Spiegelflächen zu rechnen.

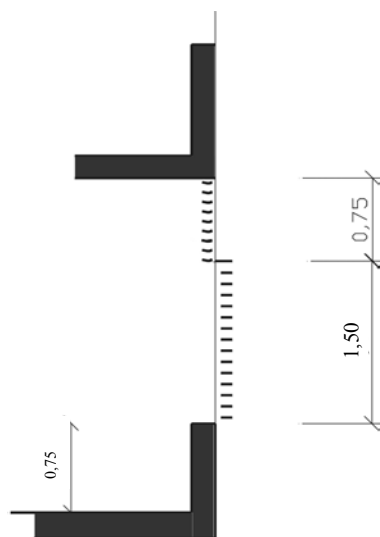


Abbildung 5.18. Schnitt einer Fassade mit einer innenliegenden Tageslichtjalousie 609 und einer außenliegenden Normaljalousie

Anmerkung:

Für eine Optimierung der Lamellenstellungen kommen oftmals mehrere Varianten in Frage. So wurden für $\gamma_S = 45^\circ$ und die Kombination $\gamma_J = 55^\circ / \gamma_{TLJ} = 30^\circ$ praktisch identische Werte erzielt, wie mit der Kombination $\gamma_J = 65^\circ / \gamma_{TLJ} = 5^\circ$.

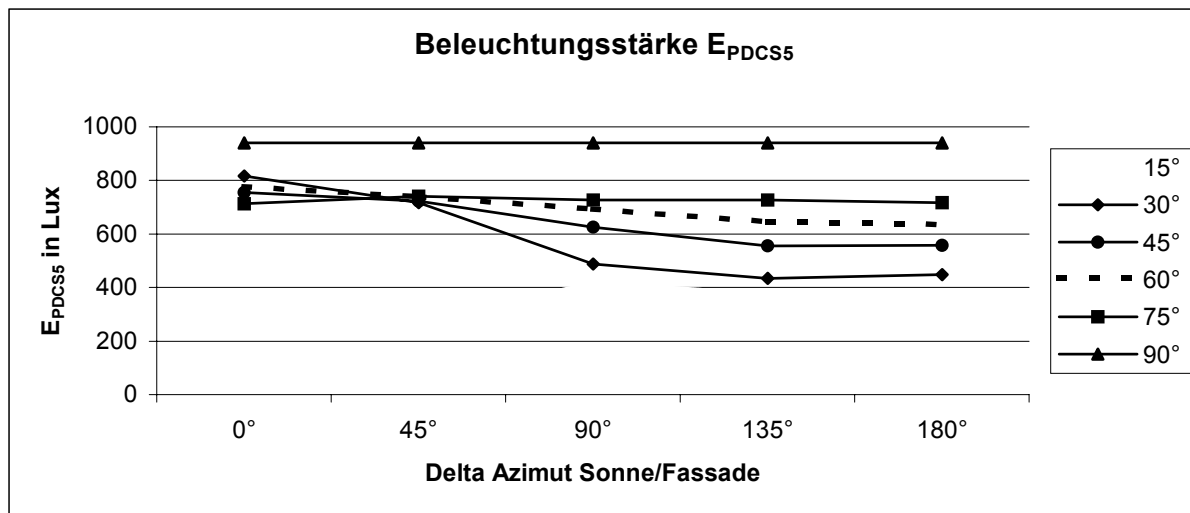
Simulationsergebnisse

Variante 1 ($E_{VIC1max} = 2.000 \text{ lx}$, $E_{VI1max} = 5.000 \text{ lx}$), optimierte Version

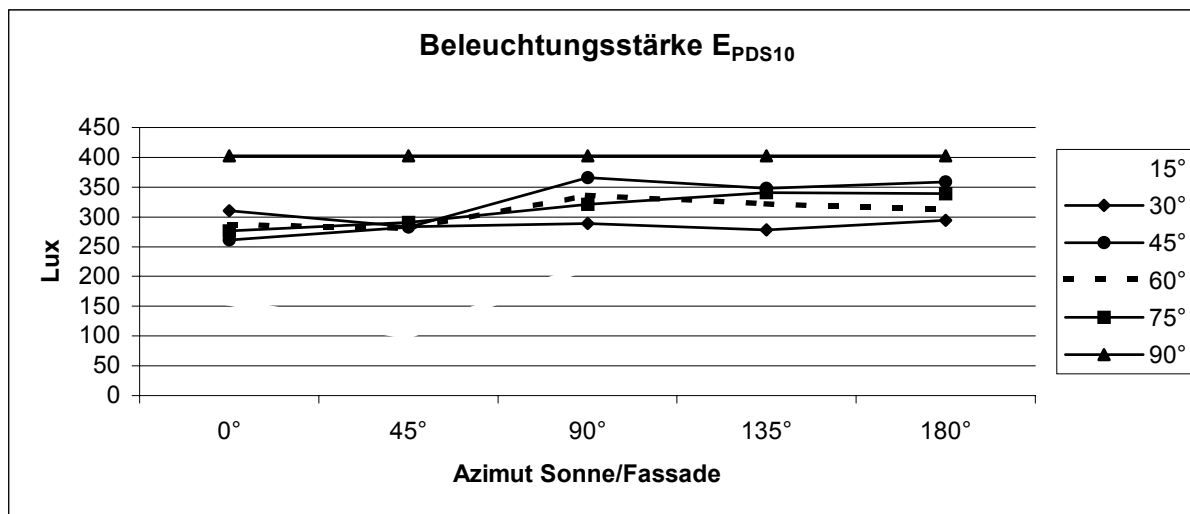
A) für klare Himmel mit Sonne (CIE Clear Sky & Sun)

Sonnenhöhe γ_s	Delta Azimut Fassade/Sonne				
	0°	45°	90°	135°	180°
15°	60°/60°	60°/60°	eingezogen/e.	e./e.	e./e.
30°	65°/30°	45°/30°	0°/0°	0°/0°	0°/0°
45°	80°/15°	45°/30°	0°/0°	0°/0°	0°/0°
60°	65°/5°	55°/0°	20°/0°	20°/0°	20°/0°
75°	55°/0°	45°/0°	30°/0°	25°/0°	25°/0°
90°	55°/0°				

Tabelle 5.25. Lamellenneigung der Jalousie in Abhängigkeit von Sonnenhöhe γ_s und Azimutdifferenz ΔAz ; die erste Zahl bezieht sich auf die Jalousie im Sichtfensterbereich, die zweite Ziffer auf die Tageslichtjalousie



Grafik 5.48. Tageslichtjalousie, Beleuchtungsstärke E_{PDCS5}



Grafik 5.49. Tageslichtjalousie, Beleuchtungsstärke E_{PDCS10}

Anmerkung: Die Grafiken der Kontrollwerte E_{VIC1} und E_{VIC2} befinden sich in Anhang III.12.



Bild 5.42. Tageslichtjalousie $\gamma_s = 45^\circ, \Delta Az=0^\circ$

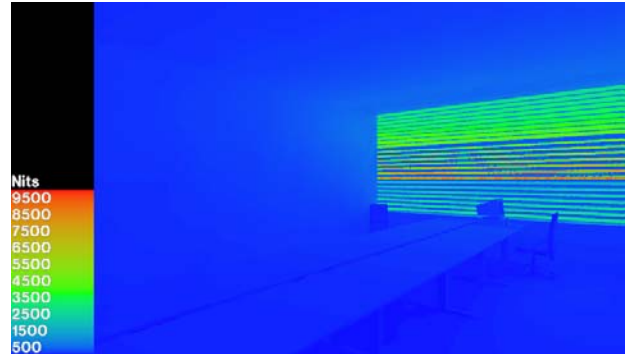


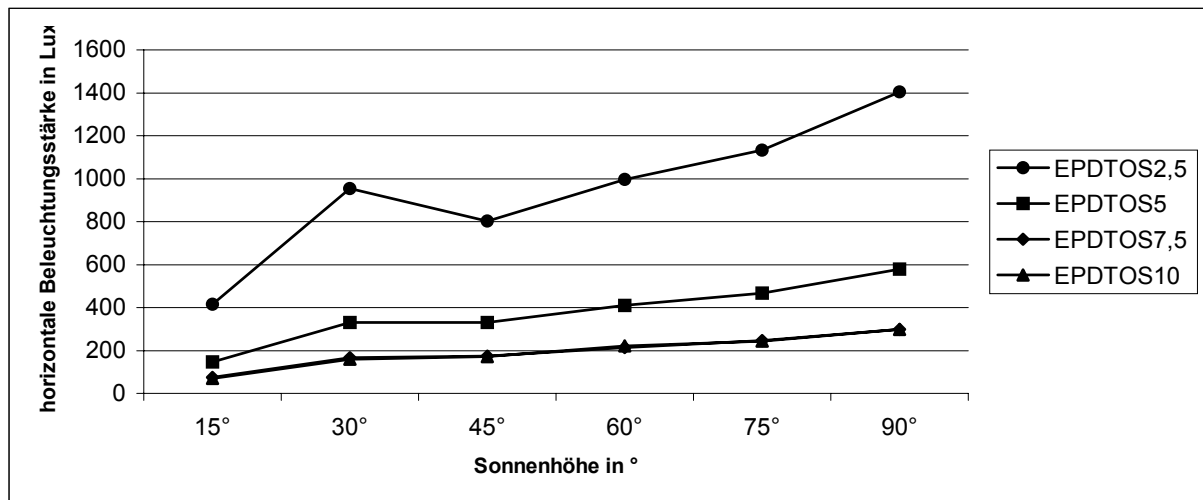
Bild 5.43. Leuchtdichteverteilung

Fazit Leuchtdichte: es sind keine Blendungsprobleme zu erwarten.

B) für bewölkte Himmel in den Tropen ($TOS_{(RIO)}$)

γ_s	15°	30°	45°	60°	75°	90°
$E_{PDCS2,5}$	414	954	803	996	1132	1404
E_{PDCS5}	146	330	331	409	466	579
$E_{PDCS7,5}$	74	166	175	214	246	298
E_{PDCS10}	70	158	172	220	244	298
E_{VIC1}	584	1350	922	1165	1312	1588
E_{VIC2}	287	633	578	719	813	985

Tabelle 5.26. Tageslichtpotential und vertikale Beleuchtungsstärken bei bedecktem Himmel. Die Lamellenneigung γ_j wird in der Kopfzeile hinter der Sonnenhöhe γ_s angegeben (e=eingez.)



Grafik 5.50. horizontale Beleuchtungsstärke bei bedecktem Himmel in den Tropen in Abhängigkeit von der Sonnenhöhe

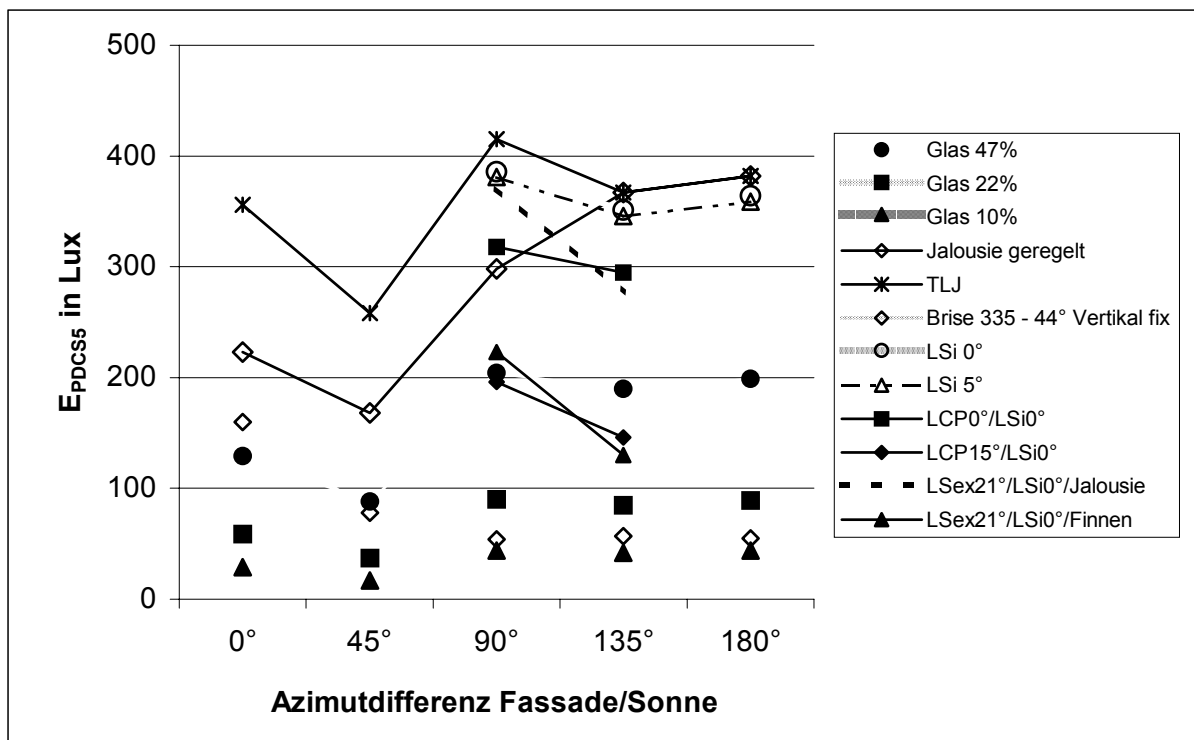
5.3.4. Auswertung - Systemvergleich

Die Systeme werden im folgenden hinsichtlich der erreichten durchschnittlichen Beleuchtungsstärke E_{PDCS5} in 5,0 m und E_{PDCS10} in 10,0 m Entfernung von der Fassade verglichen. Der Vergleich findet für die jeweils untersuchten Sonnenhöhen γ_S statt, also für $\gamma_S = 15^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ, 75^\circ$ und 90° . Um eine Bewertung hinsichtlich der Orientierung zu ermöglichen, wird das System der Azimutdifferenz ΔAz zwischen der Fassade und der Sonne von 0° bis 180° verwendet.

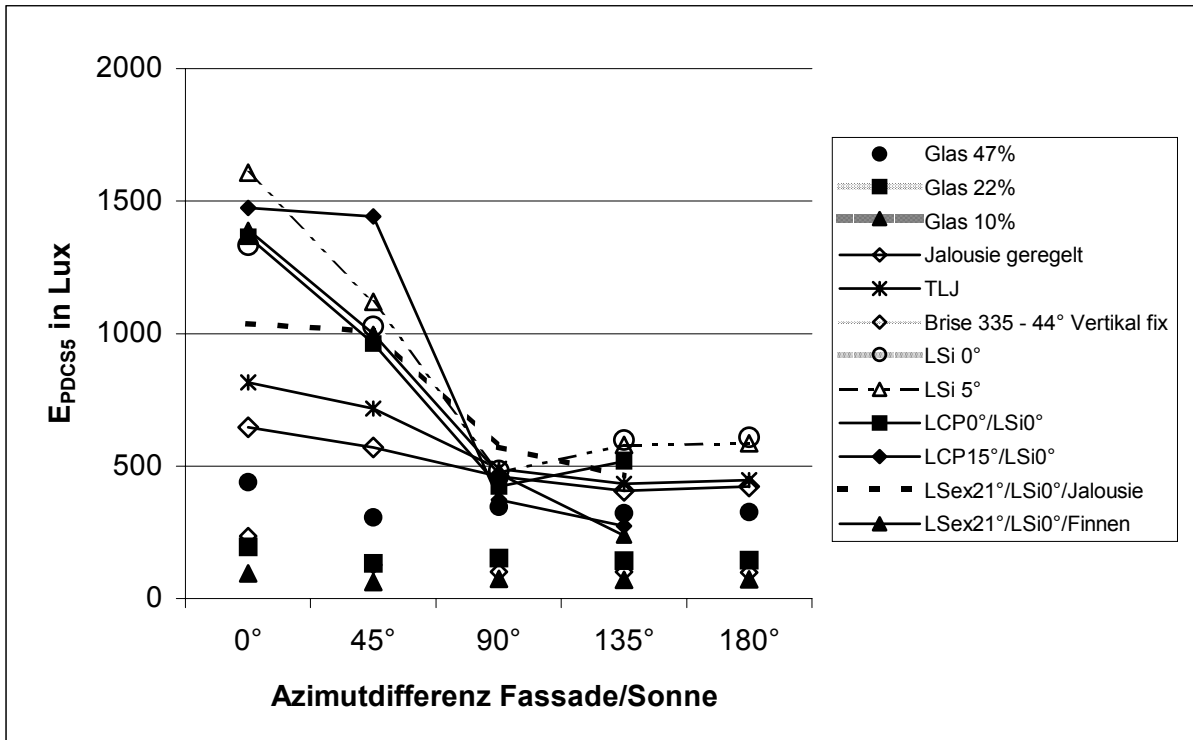
Es werden dabei nur die Beleuchtungsstärken E_{DCS5} und E_{DCS10} angegeben, wenn die unter 5.2.8.2. definierten Grenzwerte E_{VIC1} und E_{V11} für die Variante 1 (TFT-Bildschirmarbeitsplatz direkt am Fenster) eingehalten werden. Ebenfalls zum Ausschluss führen Kontraste, wie sie z.B. bei getöntem Glas auftreten, d.h. die Direktstrahlung wird zwar gedämpft, führt aber trotzdem zu einem Schattenwurf (siehe Bilder 5.3., 5.4., 5.5.).

5.3.4.1. Beleuchtungsstärke E_{PDCSx} bei klarem Himmel und Sonne

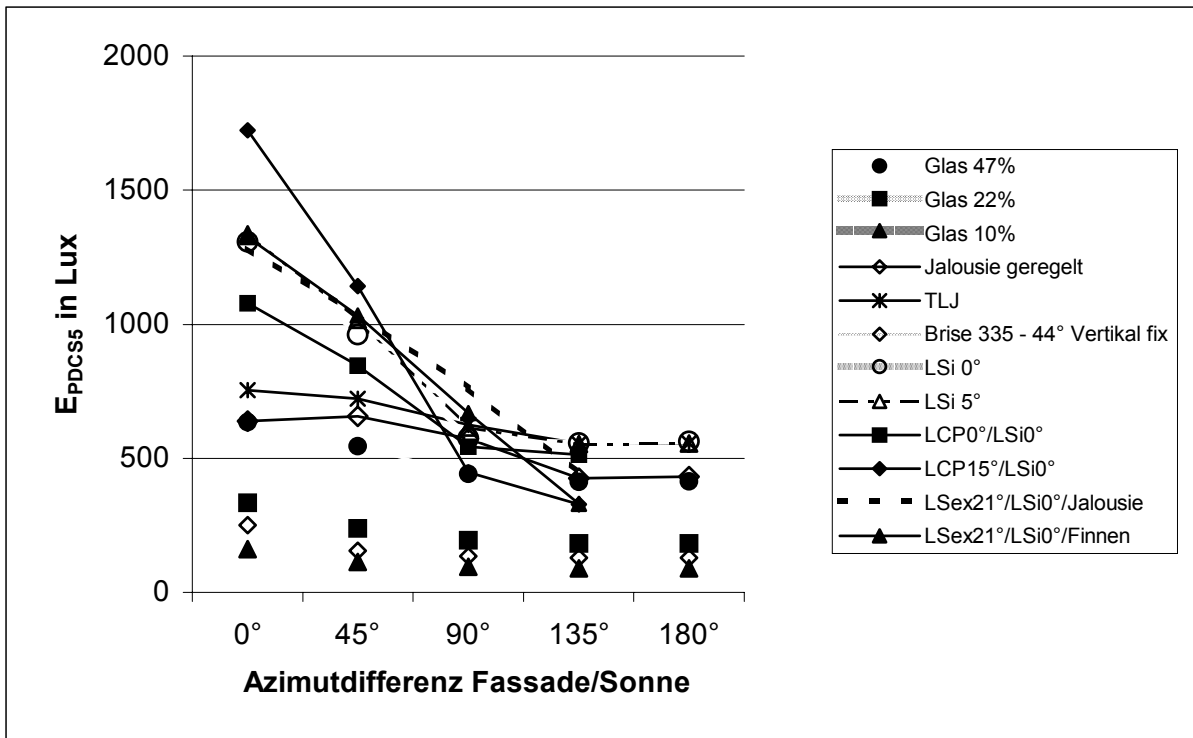
Beleuchtungsstärke E_{PDCS5}



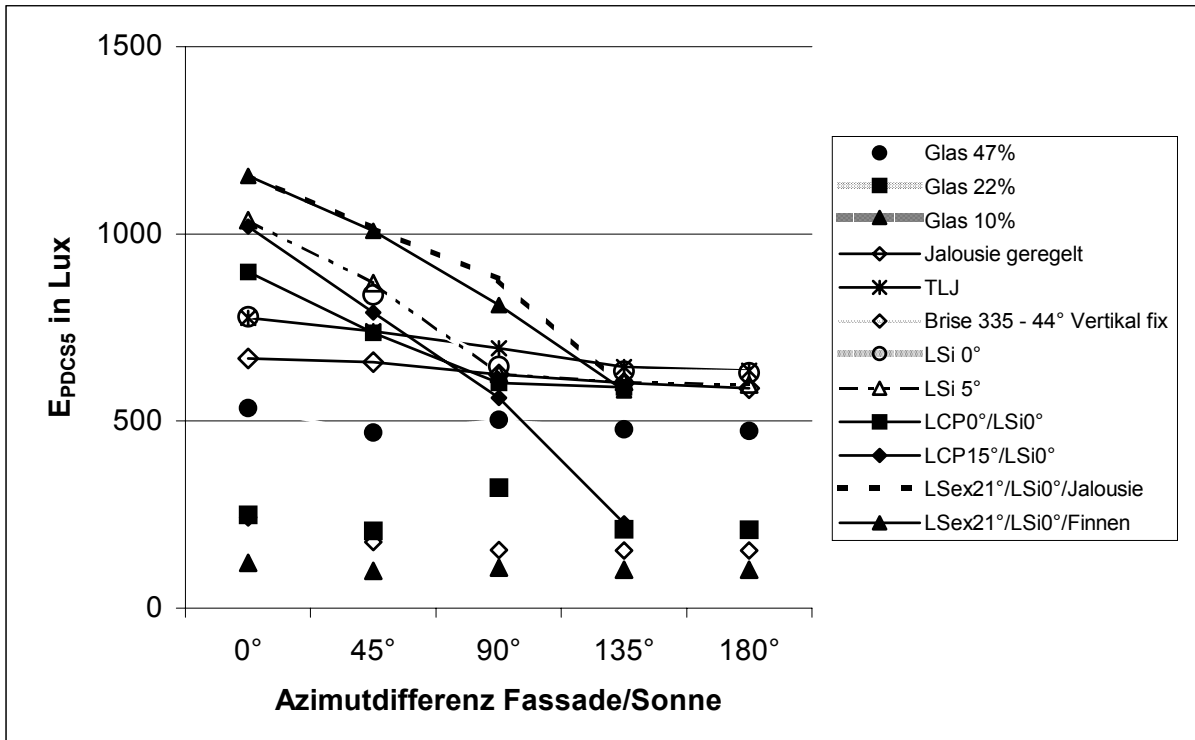
Grafik 5.51. Systemvergleich für Sonnenhöhe 15° / E_{PDCS5}



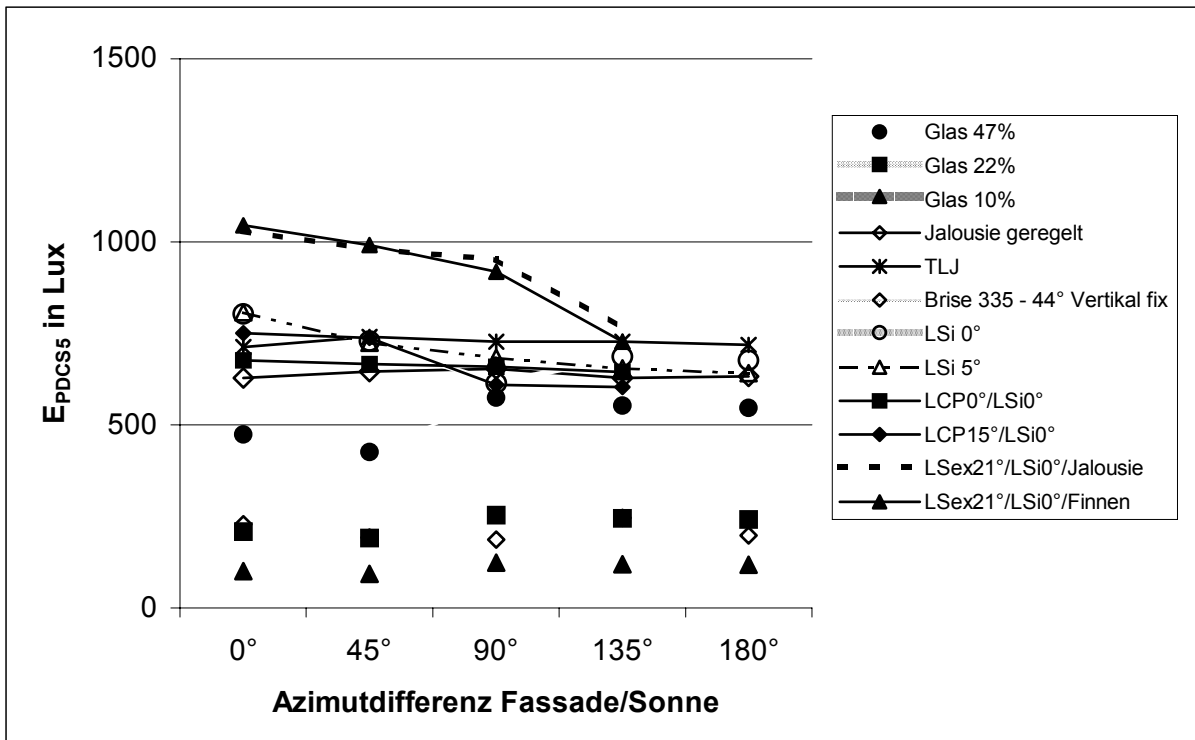
Grafik 5.52. Systemvergleich für Sonnenhöhe 30° / E_{PDCS5}



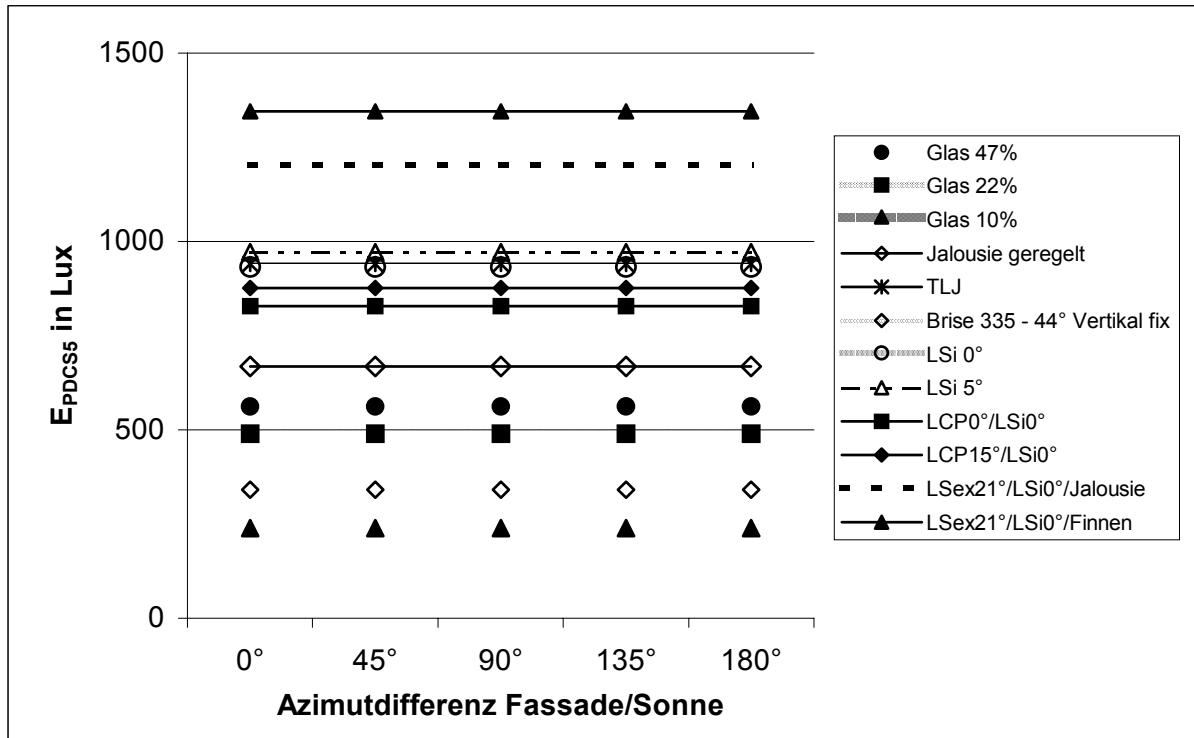
Grafik 5.53. Systemvergleich für Sonnenhöhe 45° / E_{PDCS5}



Grafik 5.54. Systemvergleich für Sonnenhöhe 60° / E_{PDCS5}

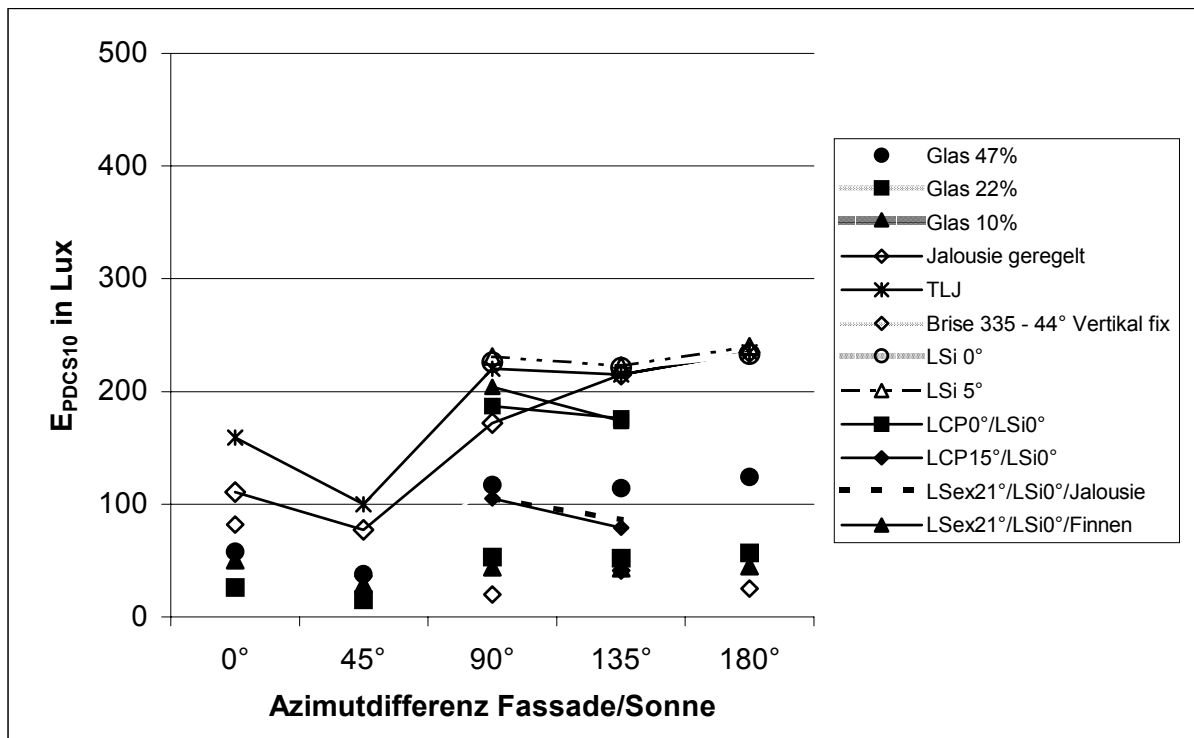


Grafik 5.55. Systemvergleich für Sonnenhöhe 75° / E_{PDCS5}

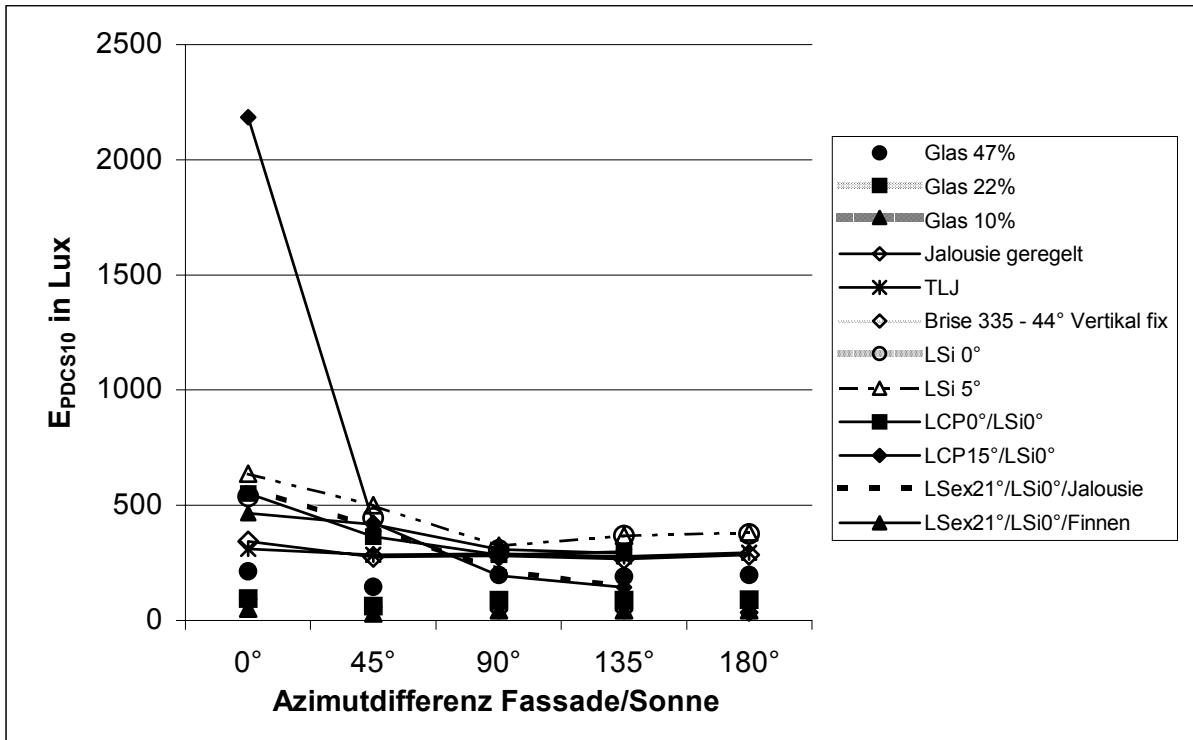


Grafik 5.56. Systemvergleich für Sonnenhöhe 90° / E_{PDCS5}

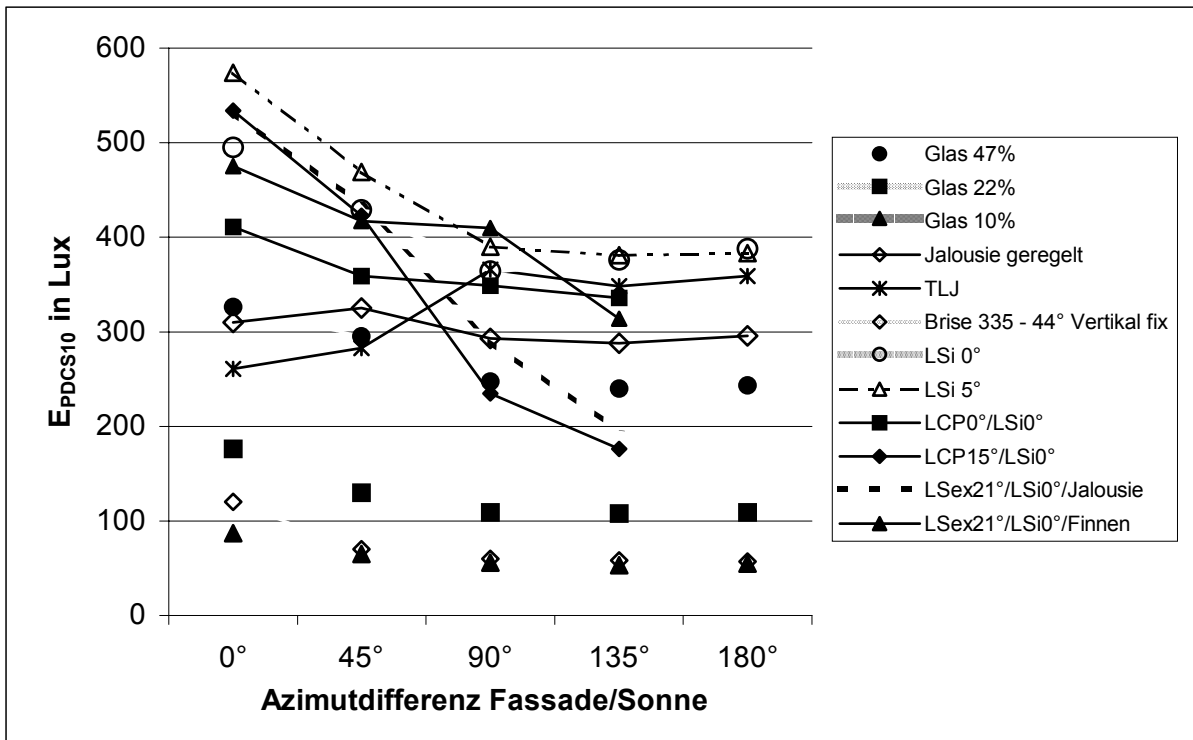
5.3.4.2. Beleuchtungsstärke E_{PDCS10} bei klarem Himmel und Sonne



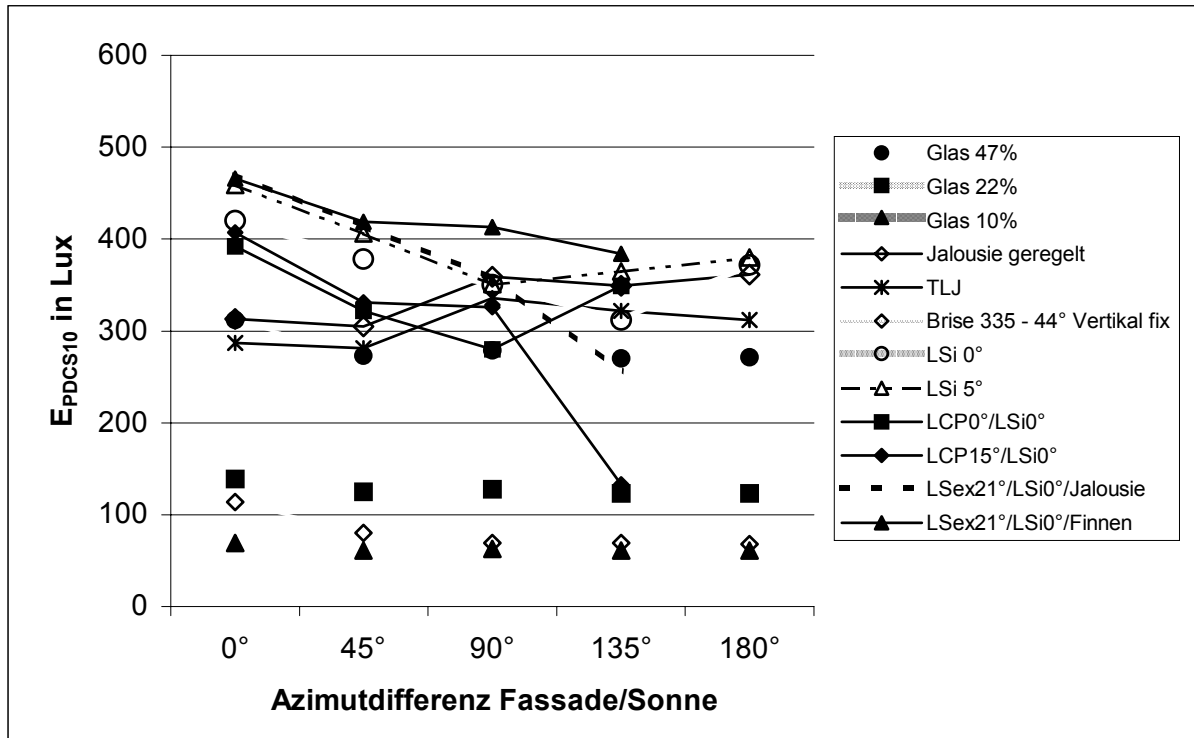
Grafik 5.57. Systemvergleich für Sonnenhöhe 15° / E_{PDCS10}



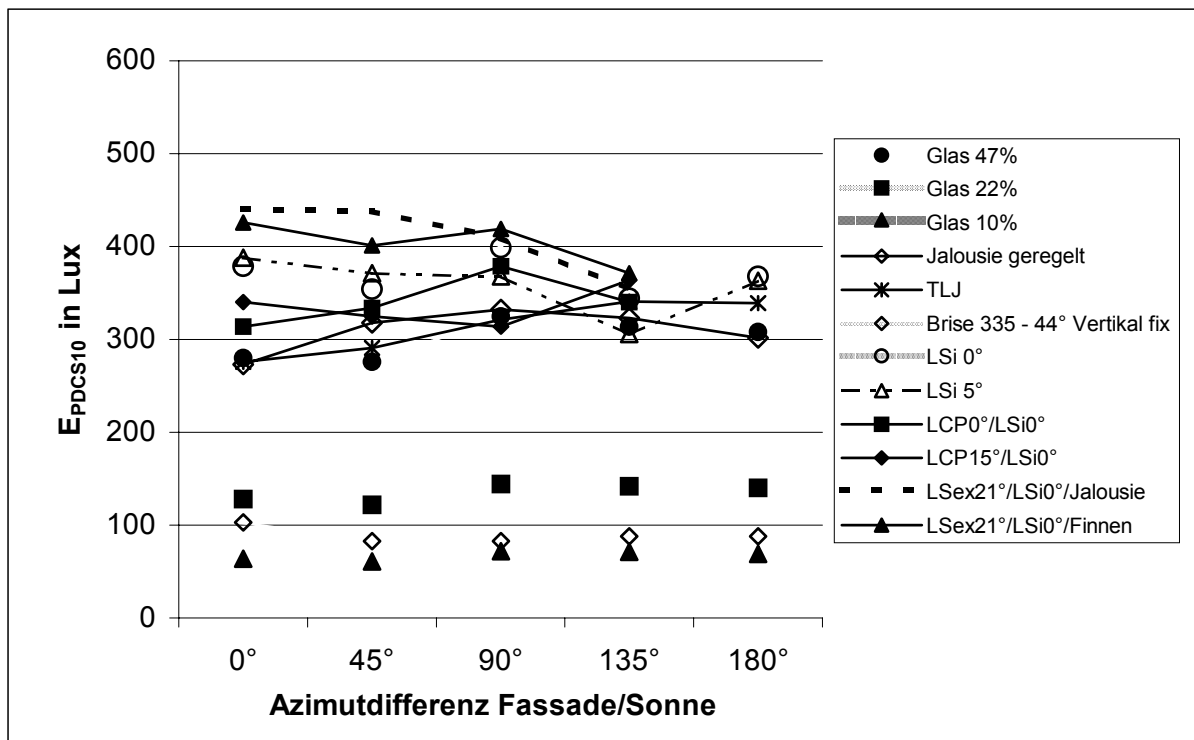
Grafik 5.58. Systemvergleich für Sonnenhöhe 30° / E_{PDCS10}



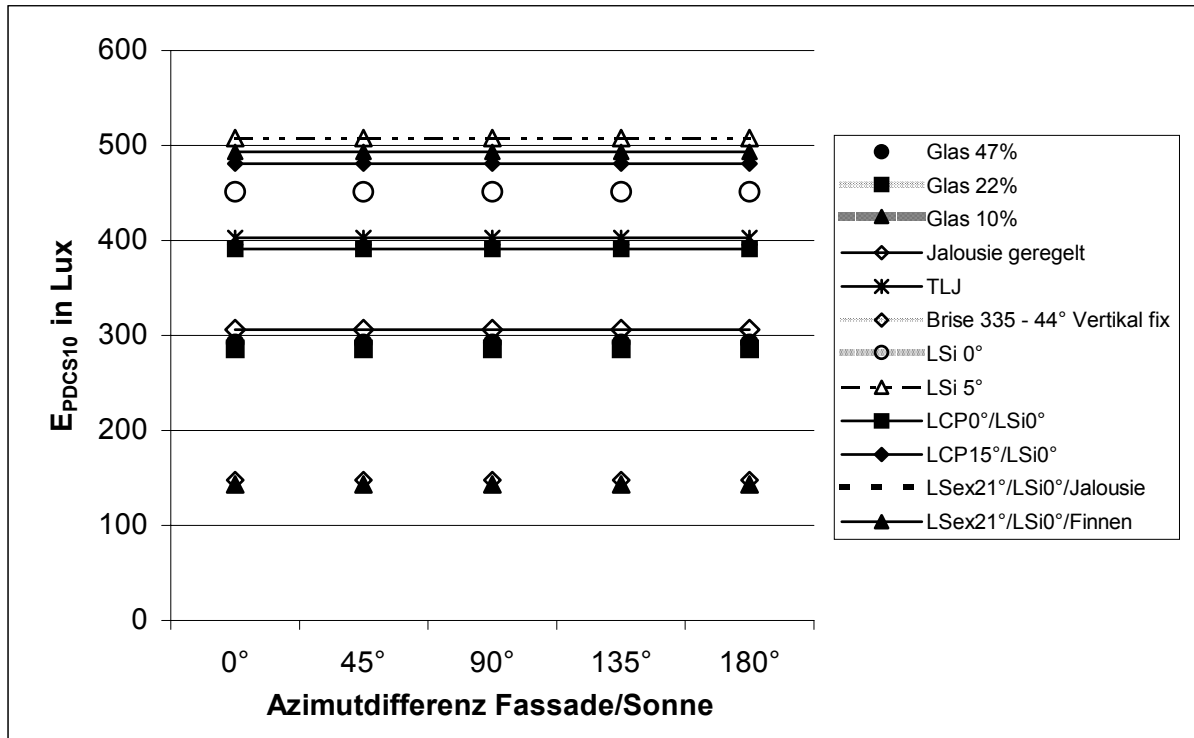
Grafik 5.59. Systemvergleich für Sonnenhöhe 45° / E_{PDCS10}



Grafik 5.60. Systemvergleich für Sonnenhöhe 60° / E_{PDCS10}



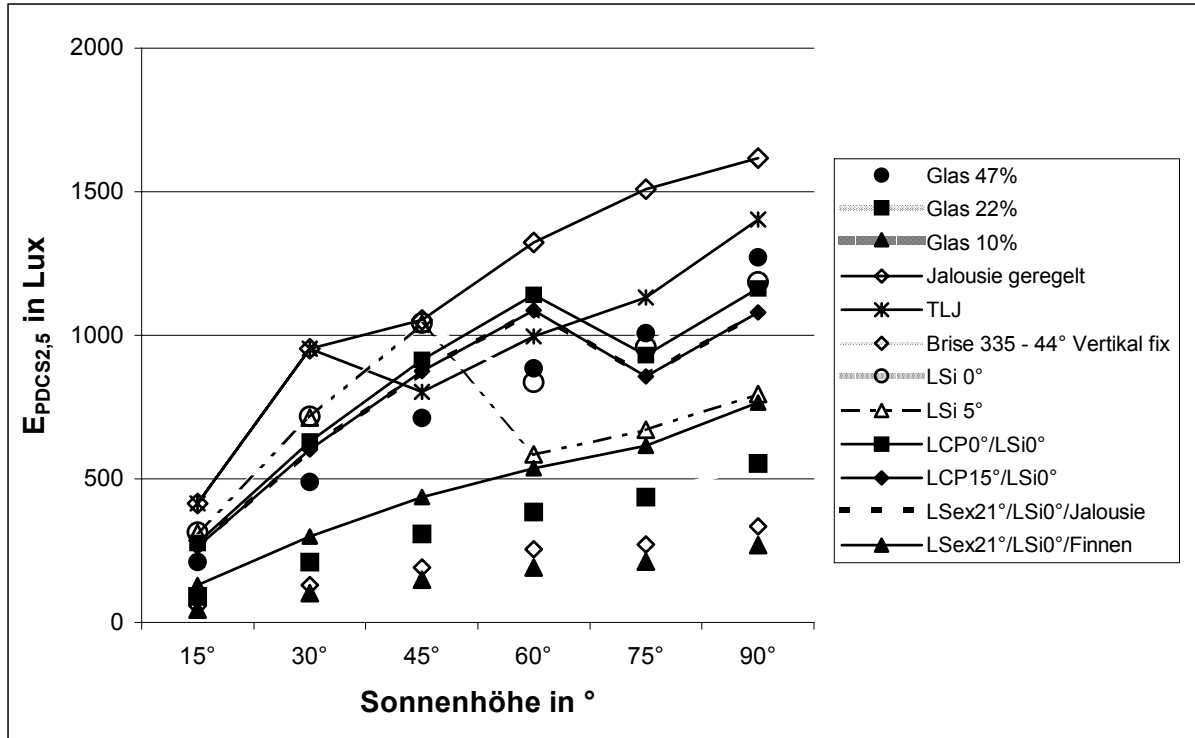
Grafik 5.61. Systemvergleich für Sonnenhöhe 75° / E_{PDCS10}



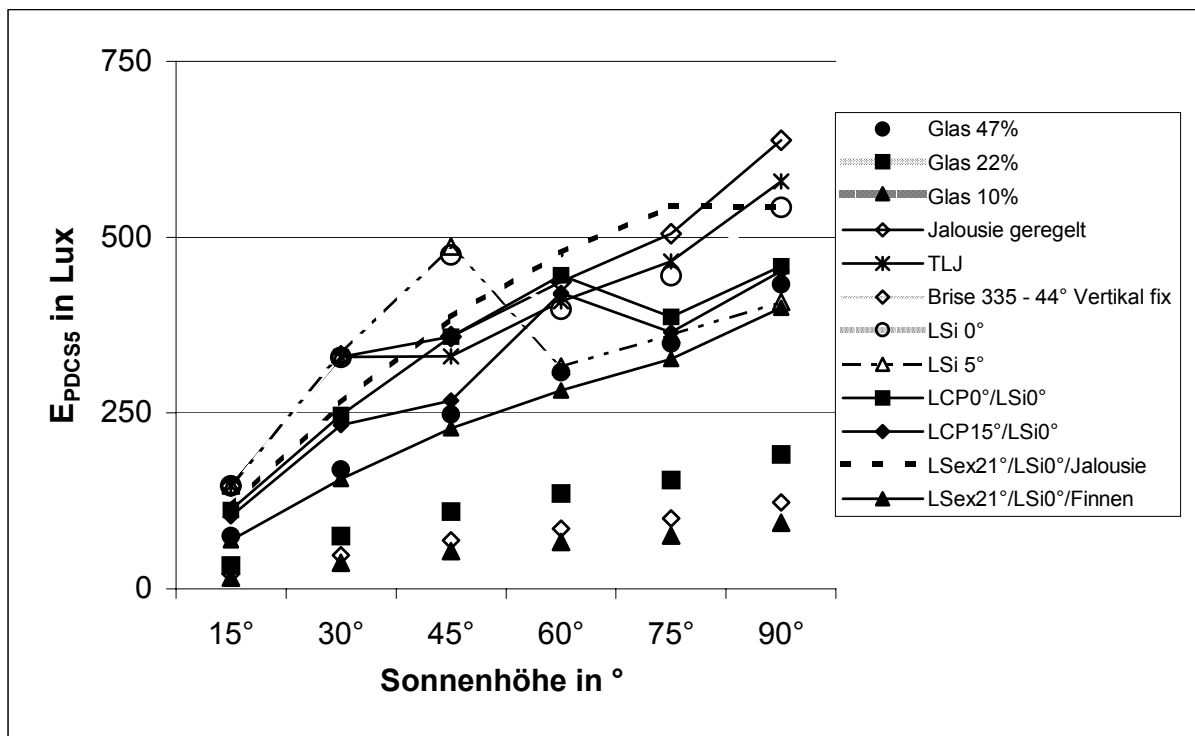
Grafik 5.62. Systemvergleich für Sonnenhöhe 90° / E_{PDCS10}

5.3.4.3. Beleuchtungsstärke E_{PDTOSx} bei bedecktem Himmel in den Tropen ($TOS_{(RIO)}$)

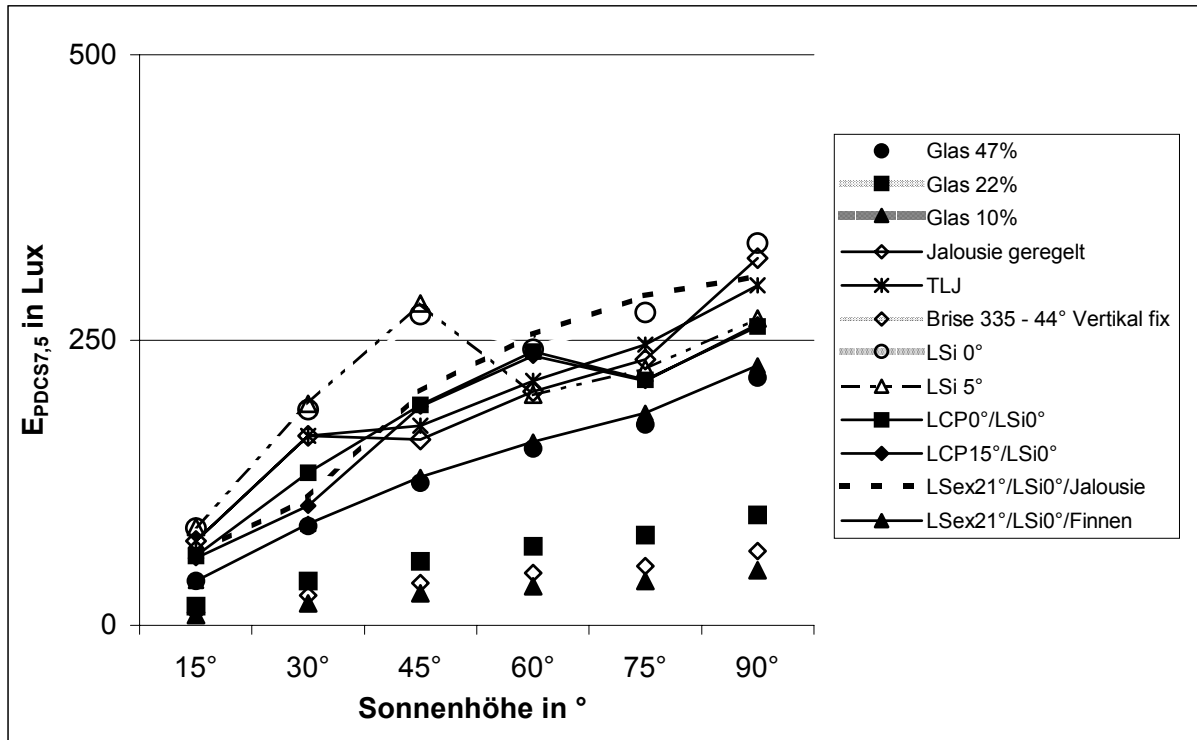
Durch das rotationssymmetrische Modell von CIE Overcast Sky, auf dem TOS beruht, werden die Beleuchtungsstärkewerte E_{PDTOSx} ohne Berücksichtigung der Azimutdifferenz zwischen Fassade und Sonne dargestellt.



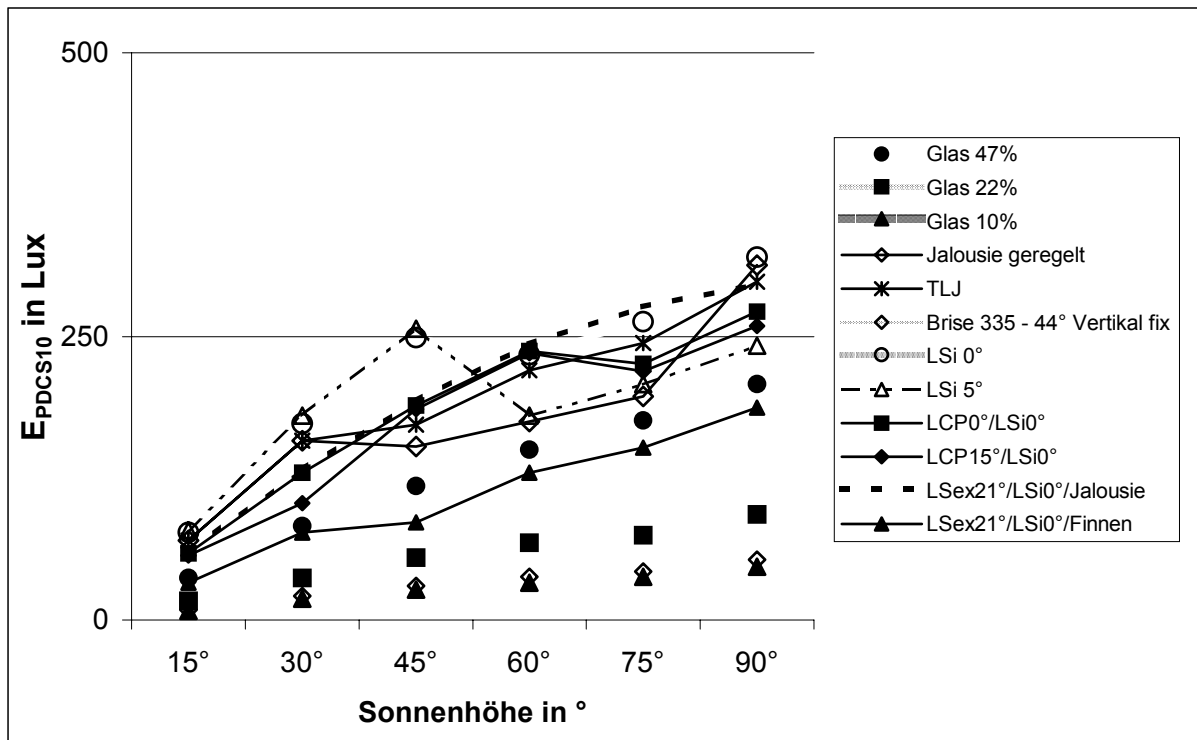
Grafik 5.63. Systemvergleich für alle Sonnenhöhen / $E_{PDTOS2,5}$



Grafik 5.64. Systemvergleich für alle Sonnenhöhen / E_{PDTOS5}



Grafik 5.65. Systemvergleich für alle Sonnenhöhen / $E_{PDTOS7,5}$



Grafik 5.66. Systemvergleich für alle Sonnenhöhen / $E_{PDTOS10}$

5.4. Tageslichtautonomie TA_x

Das wichtigste Ziel für den Einsatz von Tageslichtkontrollsystemen ist eine möglichst weitgehende Tageslichtautonomie.

Für die Tageslichtautonomie TA_x in sind im wesentlichen 3 Faktoren ausschlaggebend (Ceteris paribus, d.h. für die getroffenen Annahmen des Modellraums):

- a) Die Häufigkeit $H_{\gamma(\alpha)}$ der jeweiligen Sonnenstände hinsichtlich der spezifischen geografischen Lage des Gebäudes und der Orientierung der Fassade
- b) Das Potential $E_{PDCS(\gamma;\Delta)}$ und $E_{PDTOS(\gamma;\Delta)}$ des jeweiligen Tageslichtkontrollsystems in Abhängigkeit der Sonnenhöhe γ_S und der Azimutdifferenz ΔAz zwischen Fassade und Sonne
- c) das an dem betrachteten Ort vorhandene Tageslichtangebot

Ferner ist die Art der Möblierung und die simulationsbedingten Abweichungen zu berücksichtigen.

Die Ermittlung der Tageslichtautonomie war bisher aufgrund der Komplexität der Berechnung von Tageslichtkontrollsystemen nicht möglich. Durch die Zusammenführung der Methodik zur Ermittlung der Sonnenhöhenhäufigkeit (siehe Kapitel 5.4.3.) und dem ermittelten Potential $E_{PDCS(\Delta;\gamma)}$ für die jeweiligen Himmelszustände lässt sich dieses nun auf der Basis von Stundenwerten realisieren:

Es gilt:

$$TA_x = I_{NCS} * TA_{XCS} + I_{NTOS} * TA_{XTOS}$$

Dabei gilt:

$$I_{NCS} + I_{NTOS} = 1$$

Dabei ist:

TA_x die Tageslichtautonomie in x Meter von der Fassade während der Bürozeit von 8 - 18 Uhr, in [%]

TA_{XCS} die Tageslichtautonomie in x Meter von der Fassade bei klarem Himmel und Sonne während der Bürozeit von 8 - 18 Uhr, in [%]

TA_{XTOS}	die Tageslichtautonomie in x Meter von der Fassade während der Bürozeit von 8 - 18 Uhr in bei bedecktem Himmel in den Tropen, in [%]
I_{NCS}	der Anteil an klarem Himmel im Jahresverlauf
I_{NTOS}	der Anteil an bewölkttem Himmel im Jahresverlauf

Die Werte für I_{NCS} und I_{NTOS} sind nach den Angaben in Kapitel 3) „Tageslicht in den Tropen“ zu gewinnen.

5.4.1. Tageslichtautonomie bei klarem Himmel und Sonne

$$TA_{XCS} = \sum_{n=0}^7 (TA_{X(\alpha F + 45^\circ * n)})$$

Dabei gilt:

$$TA_{X(\alpha F)} = \sum_{i=1}^6 E_{PDCSx(0^\circ; 15^\circ * i)} / E_N * a_{G(0^\circ; 15^\circ * i)}$$

$$TA_{X(\alpha F + 45^\circ)} = \sum_{i=1}^6 E_{PDCSx(45^\circ; 15^\circ * i)} / E_N * a_{G(45^\circ; 15^\circ * i)}$$

$$TA_{X(\alpha F + 90^\circ)} = \sum_{i=1}^6 E_{PDCSx(90^\circ; 15^\circ * i)} / E_N * a_{G(90^\circ; 15^\circ * i)}$$

$$TA_{X(\alpha F + 135^\circ)} = \sum_{i=1}^6 E_{PDCSx(135^\circ; 15^\circ * i)} / E_N * a_{G(135^\circ; 15^\circ * i)}$$

$$TA_{X(\alpha F + 180^\circ)} = \sum_{i=1}^6 E_{PDCSx(180^\circ; 15^\circ * i)} / E_N * a_{G(180^\circ; 15^\circ * i)}$$

$$TA_{X(\alpha F + 225^\circ)} = \sum_{i=1}^6 E_{PDCSx(135^\circ; 15^\circ * i)} / E_N * a_{G(225^\circ; 15^\circ * i)}$$

$$TA_{X(\alpha F + 270^\circ)} = \sum_{i=1}^6 E_{PDCSx(90^\circ; 15^\circ * i)} / E_N * a_{G(270^\circ; 15^\circ * i)}$$

$$TA_{X(\alpha F + 315^\circ)} = \sum_{i=1}^6 E_{PDCSx(45^\circ; 15^\circ * i)} / E_N * a_{G(315^\circ; 15^\circ * i)}$$

dabei gilt:

$$0 \leq ((E_{\text{PDCSx}(\alpha_F+45^\circ \cdot n/15^\circ \cdot i)} / E_N) \leq 1;$$

falls $((E_{\text{PDCSx}(\alpha_F+45^\circ \cdot n/15^\circ \cdot i)} > 1$, dann wird der Wert auf 1 gesetzt

Grund: die Tageslichtautonomie kann in jeder Situation max. 100% betragen – ein „Ausgleich“, wie er bei Nichtberücksichtigung dieser Bedingung durch die Addition der Ergebnisse verschiedener Situationen entstehen könnte, würde zu einem falschen Ergebnis führen.

$$a_{G(\Delta;\gamma_S)} = 100/h_B * \Sigma H_{\gamma(\alpha)}$$

dabei ist:

TA_{XCS}	die Tageslichtautonomie in x m von der Fassade bei klarem Himmel (CS = Clear Sky); in [%]
α_F	die Fassadenorientierung (es wird die jeweils nächstliegende Orientierung einer 45°-Teilung des Polarkoordinatensystems verwendet, da nur für diese Himmelsrichtungen die $E_{\text{PDCSx}(\Delta;\gamma)}$ – Werte vorliegen), in [°]
$TA_{\text{x}(\alpha_F+\beta)}$	die Tageslichtautonomie in x m von der Fassade, bezogen auf die Fassadenorientierung , in [%]
$H_{\gamma(\alpha)}$	Sonnenhöhenhäufigkeit H_{γ} in einem definierten Himmelsgewölbeausschnitt im Jahresverlauf.; der berücksichtigte Zeitraum entspricht der Bürozeit 8 ⁰⁰ – 18 ⁰⁰ ; in [h]
$E_{\text{PDCSx}(\Delta;\gamma)}$	das Beleuchtungsstärkepotential eines Tageslichtkontrollsystems in x m von der Fassade, gültig für eine Sonnenhöhe von γ und eine Azimutdifferenz Δ zwischen Fassade und Sonne und CIE Clear Sky & Sun. Die Werte $E_{\text{PDCSx}(0^\circ/\gamma)}$ sind standortunabhängig; in [lx]
E_N	die mindestens zu erreichende horizontale Beleuchtungsstärke (im allgemeinen 500 lx), in [lx]
$a_{G(\Delta;\gamma_S)}$	Anteil der Sonnenhöhenhäufigkeiten im definierten Himmelsgewölbeausschnitt $(\Delta;\gamma_S)$ für die jeweils berechnete Formel an der Summe der Jahresbüroarbeitszeiten (ohne Subtraktion des Wochenendes); in [h]
h_B	ist die Jahressumme aller Stunden in der betrachteten Bürozeit (Wochenenden werden mitgezählt!), in [h]

5.4.2. Tageslichtautonomie bei bedecktem Himmel

TA_{XTOS} : Für bedeckten Himmel in den Tropen (Tropical Overcast Sky = CIE Overcast Sky * $F_{TOS(\gamma)}$) gilt:

$$TA_{XTOS} = \sum_{n=0}^7 (TA_{X(\alpha F + 45^\circ * n)})$$

Dabei gilt:

$$TA_{X(\alpha F)} = \sum_{i=1}^6 E_{PDTOSx(0^\circ; 15^\circ * i)} / E_N * a_{G(0^\circ; 15^\circ * i)}$$

$$TA_{X(\alpha F + 45^\circ)} = \sum_{i=1}^6 E_{PDTOSx(45^\circ; 15^\circ * i)} / E_N * a_{G(45^\circ; 15^\circ * i)}$$

$$TA_{X(\alpha F + 90^\circ)} = \sum_{i=1}^6 (E_{PDTOSx(90^\circ; 15^\circ * i)} / E_N * a_{G(90^\circ; 15^\circ * i)})$$

$$TA_{X(\alpha F + 135^\circ)} = \sum_{i=1}^6 (E_{PDTOSx(135^\circ; 15^\circ * i)} / E_N * a_{G(135^\circ; 15^\circ * i)})$$

$$TA_{X(\alpha F + 180^\circ)} = \sum_{i=1}^6 E_{PDTOSx(180^\circ; 15^\circ * i)} / E_N * a_{G(180^\circ; 15^\circ * i)}$$

$$TA_{X(\alpha F + 225^\circ)} = \sum_{i=1}^6 E_{PDTOSx(135^\circ; 15^\circ * i)} / E_N * a_{G(225^\circ; 15^\circ * i)}$$

$$TA_{X(\alpha F + 270^\circ)} = \sum_{i=1}^6 E_{PDTOSx(90^\circ; 15^\circ * i)} / E_N * a_{G(270^\circ; 15^\circ * i)}$$

$$TA_{X(\alpha F + 315^\circ)} = \sum_{i=1}^6 E_{PDTOSx(45^\circ; 15^\circ * i)} / E_N * a_{G(315^\circ; 15^\circ * i)}$$

Dabei gilt:

$$0 \leq ((E_{PDTOSx(\alpha F + 45^\circ * n / 15^\circ * i)} / E_N) \leq 1;$$

falls $((E_{PDTOSx(\alpha F + 45^\circ * n / 15^\circ * i)} / E_N) > 1$, dann wird der Wert auf 1 gesetzt

Es ist:

TA_{XTOS} die Tageslichtautonomie in x m von der Fassade bei bedecktem Himmel in den Tropen (TOS = Tropical Overcast Sky)

$E_{\text{PDTOS}_x(\Delta;\gamma)}$ das Beleuchtungsstärkepotential eines Tageslichtkontrollsystems in x m von der Fassade, gültig für eine Sonnenhöhe von γ und eine Azimutdifferenz Δ zwischen Fassade und Sonne und bedecktem Himmel in den Tropen (Tropical Overcast Sky). Dieser Wert ist standortabhängig. Über die in Kapitel 3 aufgestellte Formel wird der Faktor $F_{\text{TOS}(\gamma)}$ ermittelt, die mit diesem Faktor modifizierte Formel für CIE Overcast Sky bildet dann die Grundlage für eine ortsspezifische Simulation der Tageslichtkontrollsysteme bei bedecktem Himmel. Durch die Rotationssymmetrie dieses Himmelsmodells sind nur die entsprechenden Sonnenhöhen zu simulieren.

5.4.3. Häufigkeit der Sonnenhöhen $H_{\gamma(\alpha)}$ in Abhängigkeit der Himmelsrichtung

Als Basis für die Berechnung der Tageslichtautonomie TA_x wurden folgende Werte ermittelt:

γ_s	15°	30°	45°	60°	75°	90°
α_{S-B}	$7^\circ < \gamma_s \leq 22,5^\circ$	$22,5^\circ < \gamma_s \leq 37,5^\circ$	$37,5^\circ < \gamma_s \leq 52,5^\circ$	$52,5^\circ < \gamma_s \leq 67,5^\circ$	$67,5^\circ < \gamma_s \leq 82,5^\circ$	$82,5^\circ < \gamma_s \leq 90^\circ$
180°	0	0	227	150	62	7
225°	47	214	250	98	69	18
270°	0	71	180	144	92	39
315°	0	0	0	0	0	0
360°/0°	0	0	0	0	0	0
45°	0	0	0	0	0	0
90°	282	233	186	144	107	13
135°	175	196	238	105	72	8

Tabelle 5.27. Sonnenhöhenhäufigkeit H_γ in Abhängigkeit der Orientierung α für den Standort Rio de Janeiro; Nord = 180°, 8° - 18° (ohne Berücksichtigung der Sommerzeit)

Diese hier vorgestellte Methode der Ermittlung der Sonnenhöhenhäufigkeit in durch die Sonnenhöhenbereich γ_{S-B} und den Sonnenazimutbereich α_{S-B} definierten Himmelsauschnitten kann im eigens entwickelten Programm AZSO für unterschiedliche Standorte durchgeführt werden. Gültiger Azimutbereich jeweils $\alpha_{S-B} \pm 22,5^\circ$.

5.4.4. Auswertungsergebnisse

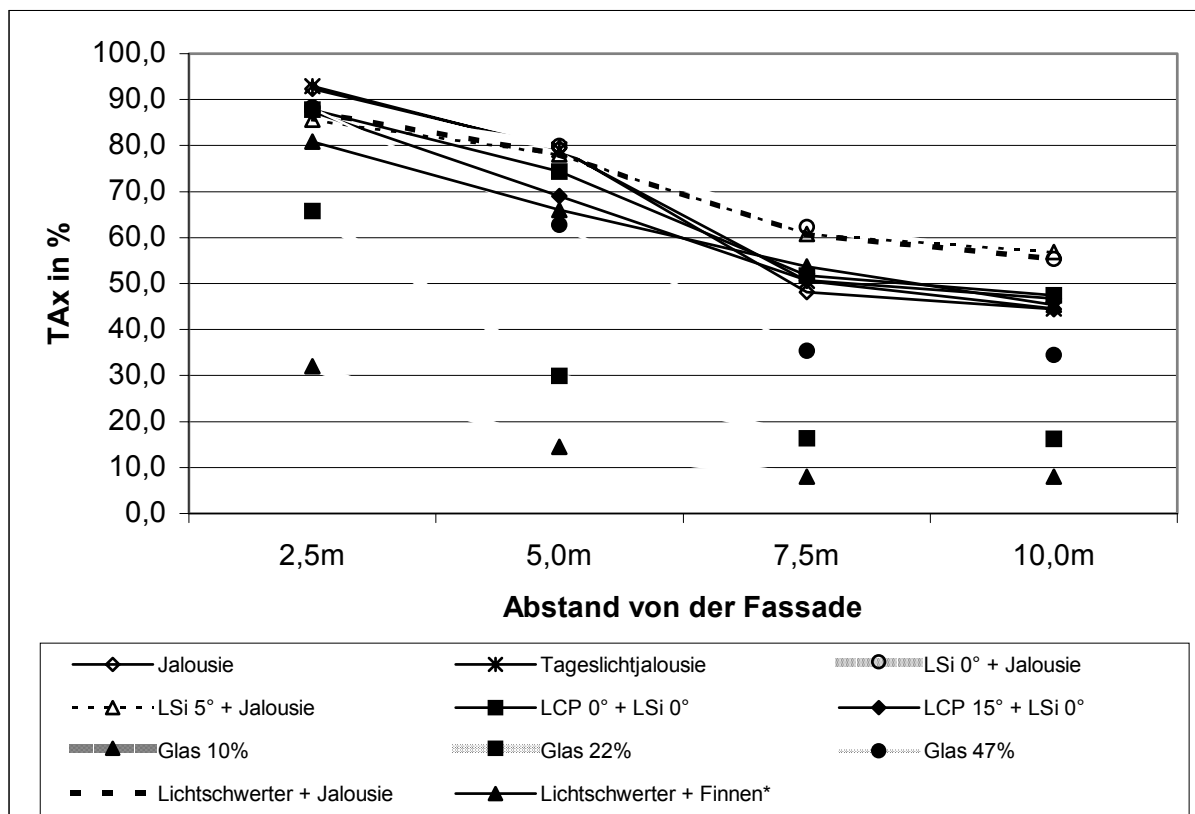
Die Ergebnisse beziehen sich auf die Tageslichtautonomie während der Bürozeiten von 8.00 Uhr bis 18.00 Uhr (10 h/d). Es werden jeweils nur die für die jeweilige Orientierung geeigneten Systeme berücksichtigt.

Nordfassade – Tageslichtautonomie in %

Für $E_N = 500 \text{ lx}$:

Systeme	2,5 m	5,0 m	7,5 m	10,0 m
Jalousie	92,4	79,5	48,1	44,4
Tageslichtjalousie	92,9	79,1	50,6	44,6
LSi 0° + Jalousie	88,2	79,9	62,3	55,4
LSi 5° + Jalousie	85,6	78,1	60,8	56,8
LCP 0° + LSi 0°	87,8	74,4	51,7	47,5
LCP 15° + LSi 0°	87,3	69,1	50,7	46,8
Glas 10% + Jalousie innen	32,0	14,5	8,0	8,1
Glas 22% + Jalousie innen	65,8	29,9	16,4	16,2
Glas 47% + Jalousie innen	88,3	62,8	35,4	34,5
Lichtschwerter + Jalousie	87,4	78,1	60,7	55,4
Lichtschwerter + Finnen	80,9	66,0	53,7	45,4

Tabelle 5.28. erzielte Tageslichtautonomie verschiedener Systeme in Abhängigkeit von der Raumtiefe



Grafik 5.67. Tageslichtautonomie der Nordfassade

5.4.5. Bewertung

Bei den untersuchten Tageslichtkontrollsystemen treten deutliche Unterschiede auf:

Die geringste Tageslichtautonomie wird bei den Sonnenschutzgläsern mit innenliegenden geregelten Jalousien erreicht.

Überraschend gut schneidet die geregelte außenliegende Jalousie ab: bis zu 5,0 m Entfernung von der Fassade liegt sie in der Spitzengruppe, bei 7,5 m und 10,0 m liegt sie etwa 20% unter den erreichten Spitzenwerten.

Die Tageslichtjalousie liegt nur im Bereich von 7,5 m um etwa 2,5% über dem entsprechenden Wert der geregelten Jalousie.

Bei den internen Lichtschwertern schneidet das um 5° geneigte nur bei 10,0 m unwesentlich besser ab: bei allen anderen Raumtiefen werden aufgrund der größeren Bautiefe etwas geringere Werte erreicht. Beide Systeme gehören bei den Raumtiefen von 5,0 m – 10,0 m in die Spitzengruppe. Lediglich in Fassadennähe verlieren sie gegenüber der Spitzengruppe aufgrund der Verschattung durch das Lichtschwert, das insbesondere bei bedecktem Himmel die Beleuchtung verringert.

Die Kombination aus externem, internem Lichtschwert und geregelter außenliegender Jalousie zählt zur Spitzengruppe. Allerdings ist keine Verbesserung durch das außenliegende Lichtschwert festzustellen, es werden insgesamt in den Bereichen von 2,5 m – 7,5 m etwas niedrige Werte erreicht als durch die Version mit innenliegendem Lichtschwert und geregelter Jalousie.

Sinnvoll erscheint dagegen der Einsatz eines außenliegenden Lichtschwertes bei dem feststehenden System mit externen Finnen: hier werden zwar in den Bereichen von 2,5 m – 7,5 m etwa 10% und bei 10,0 m Raumtiefe etwa 20% niedrigere Werte im Vergleich zur den Spitzenwerten erzielt, dafür ist es jedoch ein praktisch völlig wartungsfreies System.

Die Kombination mit den LCPs bringt wider Erwarten keine Verbesserung im Vergleich mit dem einfacheren System (internes Lichtschwert und geregelte Jalousie): die Werte liegen etwa 10 – 20% (abhängig von der Entfernung von der Fassade) niedriger. Grund dafür liegt vermutlich in der zusätzlichen Verschattung, die sich besonders bei nicht direkter Einstrahlung besonders bemerkbar macht.

Die Ergebnisse zeigen die Bedeutung einer Auswertung auf Stundenbasis: in der Regel werden TAGESLICHTSYSTEME auf ihre Leistungsfähigkeit bei Direktstrahlung untersucht und beschrieben. Dabei wird außer Acht gelassen, dass diese als Elemente in einem Tageslichtkontrollsystem bei Diffusstrahlung auch negative Auswirkungen wie eine unerwünschte Verringerung der Gesamttransmission des Systems zur Folge haben können.

5.4.6. Einfluss der gewählten Nennbeleuchtungsstärke E_N auf die Tageslichtautonomie TA_x

Im folgenden werden die Tageslichtautonomien bei Regelbeleuchtungsstärken von $E_N = 300$ lx und $E_N = 1000$ lx vorgestellt (Nordfassade).

TA_x für $E_N = 300$ lx:

	2,5 m	5,0 m	7,5 m	10,0 m
Jalousie	93,9	89,4	73,9	70,5
Tageslichtjalousie	93,9	90,5	74,9	71,6
LSi 0° + Jalousie	90,2	87,4	78,8	76,6
LSi 5° + Jalousie	90,2	87,4	77,9	75,2
LCP 0° + LSi 0°	89,8	85,4	72,0	71,2
LCP 15° + LSi 0°	89,6	82,0	67,8	66,4
Glas 10%	52,3	24,2	13,3	13,4
Glas 22%	83,8	48,5	27,3	27,0
Glas 47%	91,5	80,2	58,1	57,1
Lichtschwerter + Jalousie	89,2	85,9	74,5	74,1
Lichtschwerter + Finnen	87,1	77,8	64,7	60,0

Tabelle 5.29. erzielte Tageslichtautonomie verschiedener Systeme in Abhängigkeit von der Raumtiefe

TA_x für $E_N = 1000$ lx:

	2,5 m	5,0 m	7,5 m	10,0 m
Jalousie	87,2	45,3	24,1	22,2
Tageslichtjalousie	86,6	49,1	25,3	22,3
LSi 0° + Jalousie	81,4	53,7	32,4	27,7
LSi 5° + Jalousie	75,1	54,1	32,3	28,7
LCP 0° + LSi 0°	79,9	49,0	26,2	23,7
LCP 15° + LSi 0°	78,0	48,0	26,3	23,5
Glas 10%	16,0	7,3	4,0	4,0
Glas 22%	34,9	15,0	8,2	8,1
Glas 47%	72,6	32,4	17,7	17,3
Lichtschwerter + Jalousie	80,6	59,0	31,3	27,7
Lichtschwerter + Finnen	65,3	51,3	28,2	23,0

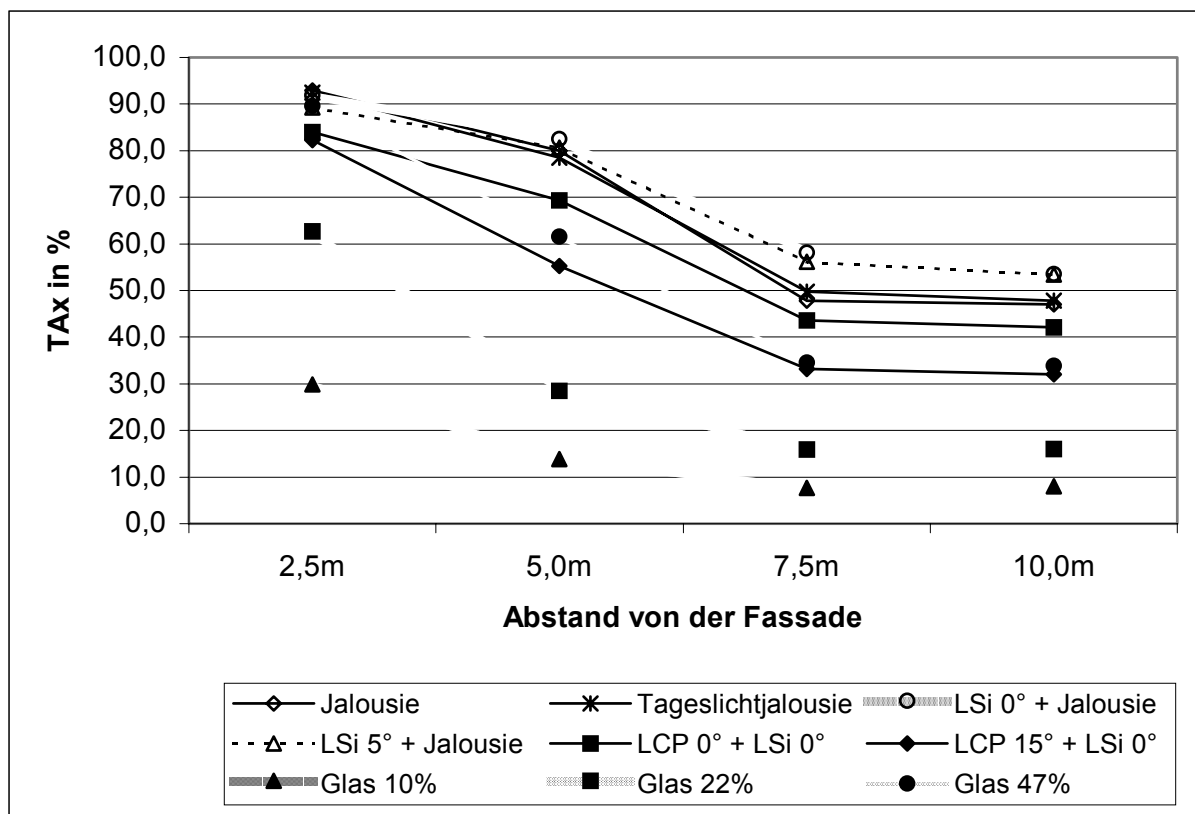
Tabelle 5.30. erzielte Tageslichtautonomie verschiedener Systeme in Abhängigkeit von der Raumtiefe

Südfassade – Tageslichtautonomie in %

TA_x für E_N = 500 lx:

	2,5 m	5,0 m	7,5 m	10,0 m
Jalousie	92,9	79,9	47,8	47,0
Tageslichtjalousie	92,4	78,5	49,7	47,8
LSi 0° + Jalousie	91,8	82,5	58,2	53,5
LSi 5° + Jalousie	89,2	80,6	56,2	53,4
LCP 0° + LSi 0°	84,0	69,3	43,6	42,1
LCP 15° + LSi 0°	82,2	55,3	33,1	32,0
Glas 10%	29,9	13,8	7,7	8,0
Glas 22%	62,7	28,5	15,9	16,0
Glas 47%	89,6	61,6	34,5	33,9

Tabelle 5.31. erzielte Tageslichtautonomie verschiedener Systeme in Abhängigkeit von der Raumtiefe



Grafik 5.68. Tageslichtautonomie der Südfassade

Bewertung

Beide Systeme mit externen Lichtschwertern werden bei dieser Betrachtung nicht berücksichtigt, da sie für die Nordfassade ausgelegt wurden.

Die Sonnenschutzgläser mit innenliegenden Jalousien weisen entsprechend ihrem Transmissionsgrad eine niedrige Tageslichtautonomie auf.

Die Tageslichtkontrollsysteme mit LCPs verlieren deutlich gegenüber ähnlichen Systemen ohne diese spezielle Komponente.

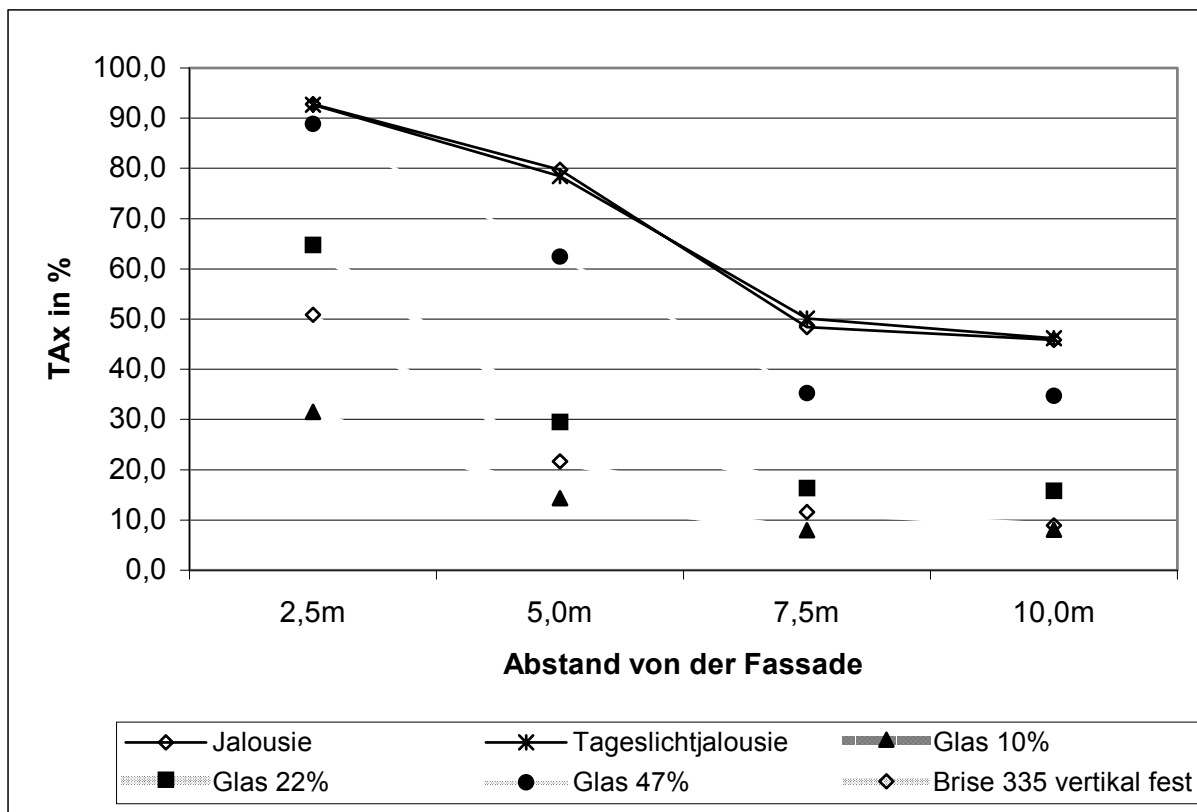
Die Tageslichtautonomie für Jalousien und Tageslichtjalousie bildet im vorderen Raumbereich die Spitze und verliert in der Tiefe des Raumes gegenüber den Systemen mit innenliegenden Lichtschwertern.

Ostfassade – Tageslichtautonomie in %

TA_x für E_N = 500 lx:

	2,5 m	5,0 m	7,5 m	10,0 m
Jalousie	92,8	79,7	48,4	45,9
Tageslichtjalousie	92,7	78,5	50,1	46,2
Brise 335 vertikal fest	50,8	21,7	11,6	9,0
Glas 10%	31,5	14,3	8,0	8,1
Glas 22%	64,8	29,6	16,4	15,8
Glas 47%	88,9	62,4	35,2	34,7

Tabelle 5.32. erzielte Tageslichtautonomie verschiedener Systeme in Abhängigkeit von der Raumtiefe



Grafik 5.69. Tageslichtautonomie Ostfassade

Bewertung

Die Auswahl der möglichen Systeme ist aufgrund der relativ häufig auftretenden niedrigen Sonnenstände bei dieser Fassadenorientierung deutlich eingeschränkt. So fallen alle Systeme weg, die mit ungeschützten Oberlichtern arbeiten.

Das speziell für diese Fassadenorientierung entworfene feststehende System vermeidet zwar die Blendung, verdunkelt den Raum aber in allen Raumtiefen sehr stark. Die Sonnenschutzgläser erreichen zwar eine bessere, aber keine zufriedenstellende Tageslichtautonomie.

Wie bereits bei der Nord- und Südfassade werden sowohl mit der geregelten Jalousie als auch mit der Tageslichtjalousie gute Ergebnisse erzielt.

5.4.7. Fazit

Die Unterschiede zwischen den untersuchten Tageslichtkontrollsystemen sind signifikant.

Wie zu erwarten schlossen die Sonnenschutzgläser in innenliegenden geregelten Jalousien am schlechtesten ab – je geringer der Transmissionsgrad, desto geringer die Tageslichtautonomie.

Die LCPs erbrachten selbst auf der Nordseite nicht die erwartete Verbesserung – sie sind sowohl auf der Nord-, besonders aber auf der Südfassade den Systemen mit nur internem Lichtschwert und geregelten Jalousien deutlich unterlegen.

Auffallend ist der relativ geringe Unterschied der Tageslichtautonomie in Abhängigkeit von der Fassadenorientierung: alle Systeme, die für verschiedene Fassadenorientierungen gleichermaßen geeignet sind, erzielen sehr ähnliche Ergebnisse. Das liegt zum einen an der rotationssymmetrischen Verteilung des Tageslichtes bei bewölktem Himmel. Dieser Himmelszustand tritt immerhin bei 40% der Gesamtzeit auf.

Zum anderen sind die Tageslichtlenkkomponenten in erster Linie dann wirksam, wenn $\Delta Az = 0^\circ$ ist. Dieser Zustand tritt im Tages- und Jahresverlauf jedoch zu einem relativ geringen Prozentsatz auf.

Zudem sind alle untersuchten Tageslichtlenkkomponenten feststehende Systeme, d.h. sie wurden zwar in ihrer Ausrichtung optimiert. Diese optimale Nutzung findet jedoch auch nur zu einem relativ geringen Prozentsatz statt. In der übrigen Zeit können diese Komponenten auch kontraproduktiv sein, da sie das Fenster zusätzlich verschatten.

Die oftmals überraschenden Ergebnisse bestätigen die anfangs geäußerte These, dass für eine realistische Evaluierung von Tageslichtkontrollsystemen das genaue Verhalten im Tages- und Jahresverlauf untersucht werden muss. Nur so lässt sich der tatsächliche Nutzen von Tageslichtsystemen bereits im Vorfeld abschätzen.

5.4.8. Einfluss der Möblierung auf die Tageslichtautonomie TA_x

Um eine Aussage hinsichtlich der Wirtschaftlichkeit von Tageslichtkontrollsystemen treffen zu können, ist eine möglichst realistische Aussage zur Tageslichtautonomie notwendig. Daher muss die Möblierung und die damit verbundene vermutliche Verminderung der Tageslichtautonomie berücksichtigt werden. Prinzipiell ließen sich die bisher durchgeführten Simulationen alle möbliert durchführen. Allerdings würde dieses einen 3 – 4 mal höheren Rechenaufwand erfordern. Es wurde daher aus dem bisher untersuchten Tageslichtkontrollsystemen das mit der im unmöblierten Zustand höchsten Tageslichtautonomie ausgewählt und exemplarisch für die Untersuchung des Einflusses der Möblierung auf die Tageslichtautonomie verwendet.

Simulationsergebnisse für ein horizontales Lichtschwert in einem möblierten Raum

Es werden die identischen Parameter verwendet wie für den unmöblierten Raum.

Die Oberflächen der Möblierung haben folgende Reflexionsgrade:



Bild 5.44. Reflexionsgrade der Oberflächen

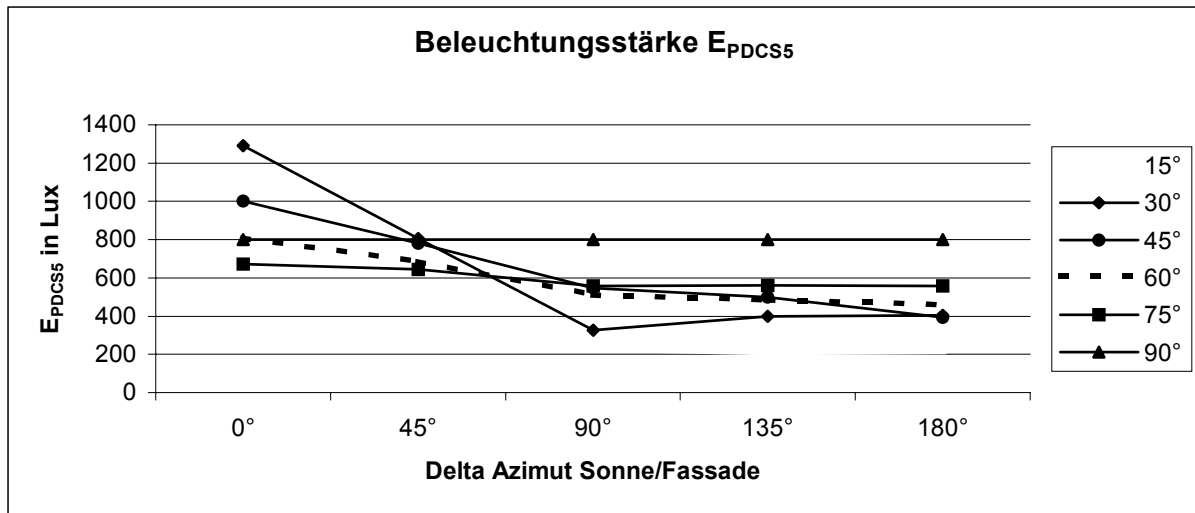
$$\alpha_{\text{Tisch}} = 0.4$$

$$\alpha_{\text{Stellwand}} = 0.8$$

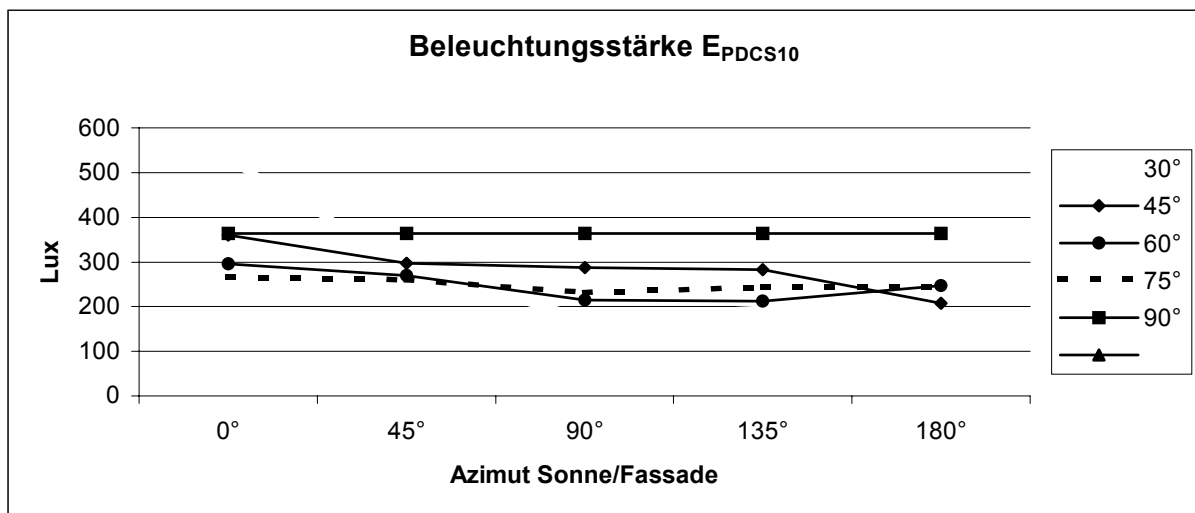
A) für klare Himmel mit Sonne (CIE Clear Sky & Sun)

Sonnenhöhe γ_s	Delta Azimut Fassade/Sonne				
	0°	45°	90°	135°	180°
15°	...	...	eingezogen	e.	e.
30°	55°	35°	0°	e.	e.
45°	40°	30°	10°	5°	0°
60°	40°	30°	20°	20°	0°
75°	30°	25°	25°	20°	20°
90°	40°				

Tabelle 5.33. Lamellenneigung der Jalousie in Abhängigkeit von γ_s und Azimutdifferenz ΔAz



Grafik 5.70. Beleuchtungsstärke E_{PDCS5}



Grafik 5.71. Vertikale Beleuchtungsstärke E_{PDCS10}

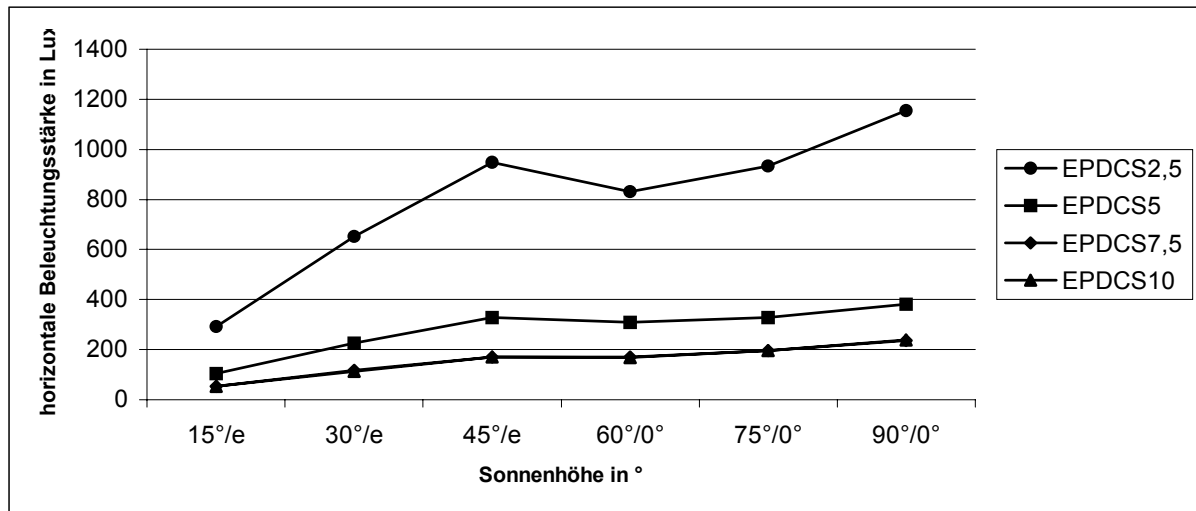
Anmerkung: Die Grafiken der Kontrollwerte E_{VIC1} und E_{VIC2} befinden sich in Anhang III.13.

B) für bewölkte Himmel in den Tropen ($TOS_{(RIO)}$)

aufgrund der Rotationssymmetrie der Leuchtdichteverteilung des bedeckten Himmels gelten die folgenden Werte für alle Orientierungen und alle $|\alpha_F - \alpha_S|$

γ_S/γ_J	15°/e.	30°/e.	45°/e.	60°/0°	75°/0°	90°/0°
$E_{PDCS2,5}$	291	653	948	832	934	1156
E_{PDCS5}	104	226	328	309	328	382
$E_{PDCS7,5}$	54	117	170	171	196	237
E_{PDCS10}	54	112	170	169	197	239
E_{VIC1}	558	1296	1829	1124	1273	1576
E_{VIC2}	261	581	815	738	817	1032

Tabelle 5.34. Tageslichtpotential und vertikale Beleuchtungsstärken bei bedecktem Himmel. Die Lammellenneigung γ_J wird in der Kopfzeile hinter der Sonnenhöhe γ_S angegeben (e=eingez.)



Grafik 5.72. horizontale Beleuchtungsstärke bei bedecktem Himmel in den Tropen in Abhängigkeit von der Sonnenhöhe

Nordfassade – Tageslichtautonomie in %: Vergleich möbliert / unmöbliert

TA_x für $E_N = 500$ lx:

	2,5 m	5,0 m	7,5 m	10,0 m
LSi 0° + Jalousie möbliert	87,9	68,9	46,1	38,1
LSi 0° + Jalousie	88,2	79,9	62,3	55,4
Unterschied unmöbliert / möbliert	0%	-14%	-33%	-31%

Tabelle 5.35. Verringerung der Tageslichtautonomie bei der möblierten im Vergleich zu der unmöblierten Variante in Abhängigkeit von der Raumtiefe

TA_x für E_N = 300 lx:

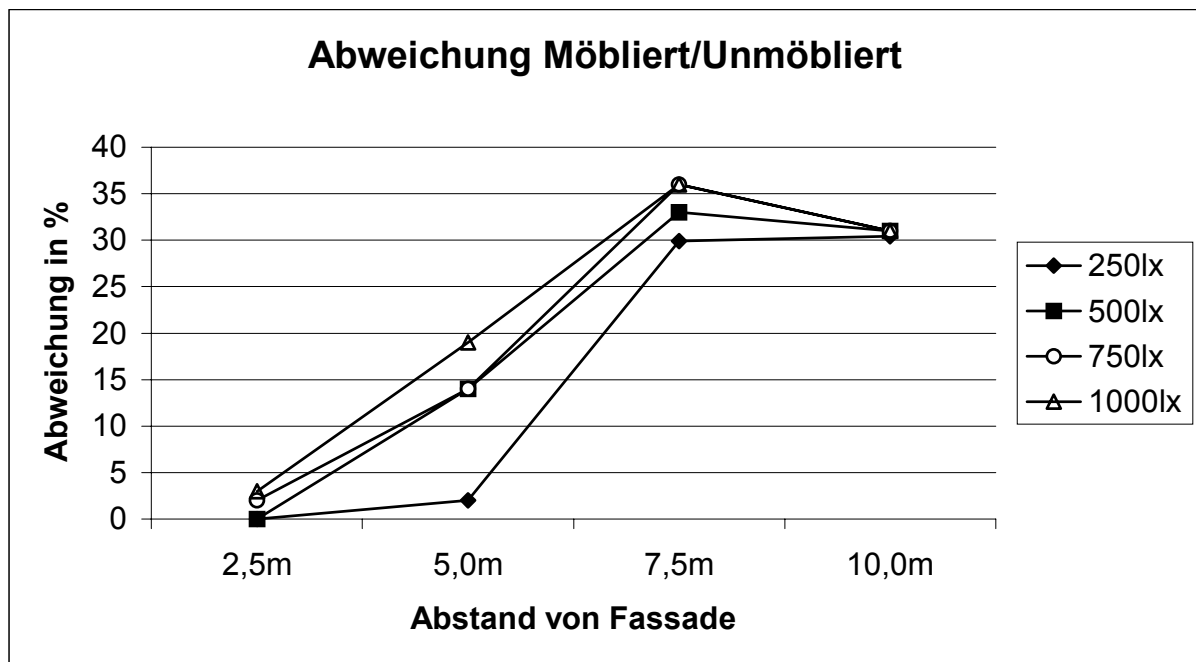
	2,5 m	5,0 m	7,5 m	10,0 m
LSi 0° + Jalousie möbliert	90,1	83,7	64,7	62,5
LSi 0° + Jalousie	90,2	87,4	78,8	76,6
Unterschied unmöbliert / möbliert	0%	-4%	-18%	-18%

Tabelle 5.36. Verringerung der Tageslichtautonomie bei der möblierten im Vergleich zu der unmöblierten Variante in Abhängigkeit von der Raumtiefe

TA_x für E_N = 1000 lx:

	2,5 m	5,0 m	7,5 m	10,0 m
LSi 0° + Jalousie möbliert	79,0	43,5	20,8	19,1
LSi 0° + Jalousie	81,4	53,7	32,4	27,7
Unterschied unmöbliert / möbliert	-3%	-19%	-36%	-31%

Tabelle 5.37. Verringerung der Tageslichtautonomie bei der möblierten im Vergleich zu der unmöblierten Variante in Abhängigkeit von der Raumtiefe



Grafik 5.73. Verringerung der Tageslichtautonomie bei der möblierten Variante im Vergleich zur unmöblierten Variante in Abhängigkeit von der Soll-Beleuchtungsstärke E_N

Um nun zu einer realistischen Beurteilung der Tageslichtautonomie der jeweiligen Tageslichtkontrollsysteme unter Nutzungsbedingungen zu kommen, ist es sinnvoll einen Möblierungsfaktor einzuführen:

Es gilt:

$$TA_{x(M)} = TA_x * F_{Mx}$$

Dabei ist:

F_{Mx} der Möblierungsfaktor in Abhängigkeit von der Raumtiefe; ist F_M nicht bekannt, so wird er auf 1 gesetzt

Damit lässt sich die sehr zeitaufwendige Simulation möblierter Räume vermeiden, da eine ähnliche Verminderung der Tageslichtautonomie durch vergleichbare Systeme zu erwarten ist.

Fazit

Während die Möblierung im vorderen Bereich relativ geringe Verluste in der Tageslichtautonomie verursachen, ist die Verringerung der Tageslichtautonomie in größerer Raumtiefe beträchtlich. Da die Verringerungen bei einer Sollbeleuchtungsstärke von 500 – 1000lx in einem relativ engen Band liegen, werden diese Werte als Möblierungsfaktor F_M in der Folge berücksichtigt.

Es ist zu erwarten, dass die Möblierung bei Systemen, die auf ganzer Fensterfläche eine gleichmäßige Leuchtdichte aufweisen (Beispiel geregelte Jalousien), auch im vorderen Bereich eine deutliche Verringerung der horizontalen Beleuchtungsstärke verursacht. Dieses gilt es in zukünftigen Arbeiten zu beleuchten.

5.4.9. Korrekturfaktor F_{SIMU}

Sind aus Validierungen software-spezifische Abweichungen in Abhängigkeit von der Raumtiefe bekannt (siehe auch 5.1.), so kann dieses mit dem Faktor F_{SIMUX} wie folgt korrigiert werden:

Beispiel:

$$TA_{x(\alpha F)} = \sum_{i=1}^6 (E_{PDCSx(0^\circ;15^\circ * i)} * F_{SIMUX} / E_N * a_{G(0^\circ;15^\circ * i)})$$

Dabei ist:

F_{SIMUX} der Korrekturfaktor F_{SIMU} korrigiert bei simulationsprogrammspezifischen Abweichungen die Tageslichtautonomie TA_x . In dem entwickelten Auswerteprogramm „Tako“ steuert F_{SIMU1} die Werte $E_{PDCS2,5}$ und E_{PDCS5} , während F_{SIMU2} die Werte für $E_{PDCS7,5}$ und E_{PDCS10} beeinflusst. Mit dieser Regelung kann auf Besonderheiten bei Simulationsprogrammen eingegangen werden. Ist F_{SIMUX} nicht bekannt (wie an dieser Stelle), so wird der Faktor auf 1 gesetzt.

6. Energetische Bewertung

Nach der Ermittlung der Tageslichtautonomie durch die verschiedenen Tageslichtkontrollsysteme ist es nun möglich, die Auswirkungen dieser Systeme auf den Gesamtenergieverbrauch des virtuellen Büroraumes zu untersuchen.

Zunächst wird in einem kurzen Überblick der Gesamtenergieverbrauch in Bürogebäuden an dem Standort Rio de Janeiro und der Aufteilung dieses auf die verschiedenen Verbrauchergruppen dargestellt.

Darauf folgend wird eine Energiebilanz für die Beleuchtung eines Bürogebäudes mit unverbautem Horizont erstellt. Es werden dabei folgende Energieverbräuche berücksichtigt:

- a) Kunstlichtverbrauch in Abhängigkeit von der Tageslichtautonomie TA der untersuchten Tageslichtkontrollsysteme (aus TAKO)
- b) Kunstlicht- und Tageslicht als interne Wärmelast (aus TAKO-Cool)

6.1. Überblick Gesamtenergieverbrauch eines Bürogebäudes

Der Gesamtenergieverbrauch in Bürogebäuden setzt sich in der Regel aus der Gebäudeklimatisierung (Heizung, Kühlung, Entfeuchtung, Auffeuchtung, Transportaufwand für das Kälte-/Wärmemedium), des Kunstlicheinsatzes und des Einsatzes von technischem Gerät (Computer, Lifte, etc.) zusammen. Aufgrund ihrer unterschiedlichen Konzeption kann der Energieverbrauch bei verschiedenen Gebäuden deutlich variieren: nach Levine et al [1] verbrauchen Bürogebäude in den ASEAN-Staaten zwischen etwa 40 und annähernd 900 kWh/m² a (Durchschnitt: 247 kWh/m² a), während die gleichen Autoren für klimatisierte Gebäude in den USA ein Verbrauch von 270 – 370 kWh/m² a angeben.

Die Vergleichbarkeit wird zusätzlich durch oftmals nicht klar definierte Bezugsgrößen erschwert: bezieht sich der Energieverbrauch auf m² - Nutzfläche, Hauptnutzfläche, Brutto- oder Nettogrundrissfläche? Aufgrund dieser etwas unübersichtlichen Situation wird daher im folgenden zwar die augenblickliche Situation in Rio de Janeiro dargestellt, anschließend aber ein eigenes Verbrauchsszenario für den Kunst- und Tageslichtbereich geschaffen, um so die Auswirkung der unterschiedlichen Parameter besser beurteilen zu können.

6.2. Augenblickliche Situation in Rio de Janeiro

Lomardo [3] untersuchte 4 für das Zentrum Rio de Janeiros typische Bürogebäude. Dabei kam sie zu folgenden Ergebnissen:

Gebäude	Klima kWh/m ² a	Licht kWh/m ² a	andere kWh/m ² a	Gesamt kWh/m ² a
A	154,8	138,0	24,0	316,8
B	73,2	145,2	80,4	298,8
C	130,8	142,8	145,2	418,8
D	146,4	74,4	100,8	322,1
Durchsch.	126,3	125,1	87,6	339,0

Tabelle 6.1. Energieverbrauch in Bürogebäuden in Rio de Janeiro nach einer Untersuchung von Lomardo (vom Autor überarbeitete Tabelle) [3]

Auffällig ist der sehr hohe Kunstlichtverbrauch: setzt man 52 Wochen á 5 Tage á 10 Stunden als Nutzungszeit an, so ergibt sich eine installierte Leistung von 48,1 W/m².

Tages- und Kunstlicht

Wie der Tabelle 6.1. zu entnehmen ist, hat in Rio de Janeiro das Kunstlicht einen direkten Anteil von ca. 37% am Gesamtverbrauch. Durch die Wärmeabgabe wirkt sich die künstliche Beleuchtung zudem auf die Kühllast aus. Nimmt man für die Umwandlung von Nutz- (Kühlung) in Endenergie (elektrischer Strom) einen Faktor von 0,4 an (siehe auch Abschnitt Nutz- und Endenergie), so ist das Kunstlicht mit durchschnittlich knapp 52% am Gesamtenergieverbrauch beteiligt.

Andererseits erhöht auch das Tageslicht die Kühllast. Um sowohl den direkten Stromverbrauch (Kunstlicht) als auch den indirekten Energieverbrauch (Erhöhung der Kühllast durch Kunst- und Tageslicht) zu ermitteln, wird auf Basis der in „TAKO“ errechneten Ergebnisse das Programm „TAKO-Cool“ eingesetzt. Die Struktur dieses Programms und die eingesetzten Algorithmen werden im folgenden erläutert und die Ergebnisse ausgewählter Beispiele für den Standort Rio de Janeiro vorgestellt.

Zunächst gilt es zu berechnen, wie groß die Kunstlichteinsparung durch die Nutzung von Tageslichtkontrollsystemen sein kann.

6.3. Kunstlichteinsparung

Für die im folgendem durchgeführte Berechnung wird von einer tageslichtabhängigen Kunstlichtregelung ausgegangen, d.h. es wird immer genau soviel Kunstlicht „zugeführt“ wie nötig ist, das vorhandene Tageslicht auf das gewünschte Beleuchtungsstärkesoll E_N zu ergänzen.

Es gilt für ausschließlich künstliche Beleuchtung:

$$B_{JB} = I_L * h_{B'} \quad [\text{Wh} / \text{m}^2 \text{ a}]$$

Es gilt für teilweise Kunstlichtnutzung:

$$B_{KL} = \sum_{i=1}^4 ((TA_{2,5*i} / 100) * F_{2,5*i} * I_L * h_{B'}) / \sum_{i=1}^4 F_{2,5*i} \quad [\text{Wh}/\text{m}^2 \text{ a}]$$

Dabei gilt:

$$h_{B'} = h_B - (52 \text{ w} * 2 \text{ d} * 10 \text{ h})$$

Dabei ist:

- B_{JB} Jahresbedarf an künstlicher Beleuchtung, wenn keine Tageslichtnutzung erfolgt, in $[\text{Wh}/\text{m}^2 \text{ a}]$
- I_L installierte Leistung in $[\text{W}/\text{m}^2]$
- B_{KL} Jahresbedarf an Kunstlicht nach Berücksichtigung der Tageslichtnutzung, in $[\text{Wh}/\text{m}^2]$
- h_B ist die Jahressumme aller Stunden in der betrachteten Bürozeit (mit Wochenenden!), in $[\text{h}/\text{a}]$
- $h_{B'}$ ist die Jahressumme aller Stunden in der betrachteten Bürozeit (ohne Wochenenden!), in $[\text{h}/\text{a}]$
- $F_{2,5*i}$ Fläche, für die die jeweilige Tageslichtautonomie gültig ist, in $[\text{m}^2]$

Die Bedeutung des Parameters Beleuchtungsstärkesoll E_N wurde bereits im Kapitel „Tageslichtautonomie“ angesprochen. Dieser Parameter wird bereits im Modul „TAKO“ eingestellt.

Im Modul „TAKO-Cool“ kommt der installierten Leistung I_L eine große Bedeutung zu. Je höher die installierte Leistung, desto höher die Einsparung durch die Tageslichtnutzung.

Die mögliche Bandbreite für I_L reicht von $50 \text{ W}/\text{m}^2$ für ältere Systeme oder/und hohe Beleuchtungsstärken [68], [3] bis zu $10 \text{ W}/\text{m}^2$ für moderne Systeme und niedrigeren Beleuchtungsstärken mit zusätzlicher individueller Arbeitsplatzbeleuchtung [68].

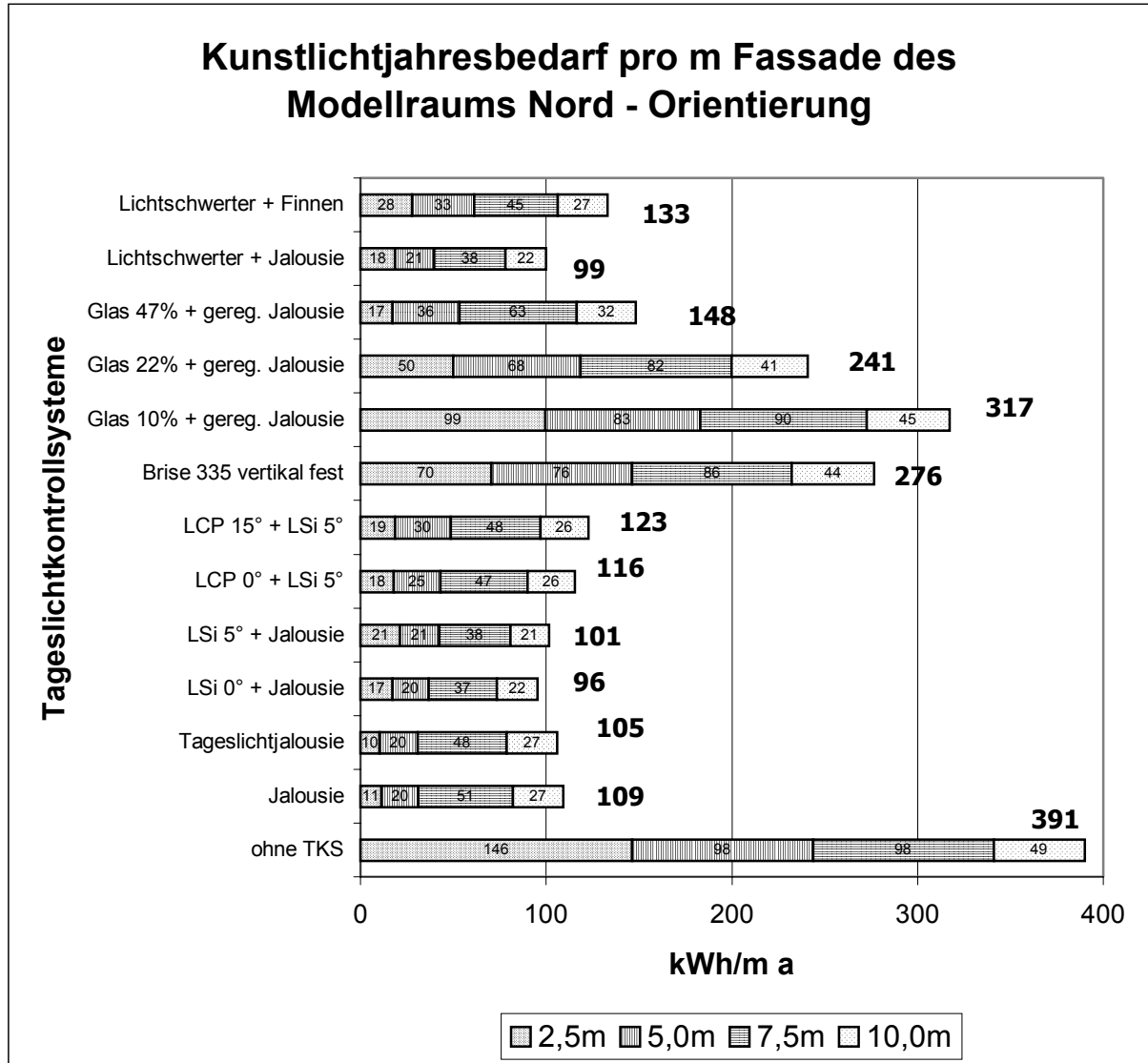
Es wird im folgenden eine installierte Leistung I_L von 15 W/m^2 angenommen, was ein modernes System mit einer Beleuchtungsstärke von 500 lx darstellt [69].

Im folgenden wird der Jahreskunstlichtbedarf in kWh pro laufenden Meter-Fassade dargestellt. Diese Auswertung wurde gewählt, um eine Basis für die Wirtschaftlichkeitsberechnungen der Tageslichtkontrollsysteme zu schaffen.

Dabei werden die einzelnen Raumabschnitte differenziert dargestellt: es wird der Bereich von der Fassade bis $3,75 \text{ m}$ Raumtiefe dargestellt ($TA_{2,5}$), der Bereich von $3,75 \text{ m}$ bis $6,25 \text{ m}$ (TA_5), der Bereich von $6,25 \text{ m}$ bis $8,75 \text{ m}$ ($TA_{7,5}$) und der Bereich von $8,75 \text{ m}$ bis $10,0 \text{ m}$ Raumtiefe (TA_{10}). Durch diese Darstellung lassen sich – wie bereits bei der Darstellung der Tageslichtautonomie TA_x - auch die Auswirkung der Raumtiefe auf den Energieverbrauch abgelesen werden. Dabei gilt es zu berücksichtigen, dass die Tageslichtkontrollsysteme auf eine möglichst tiefe Raumausleuchtung ausgelegt wurden.

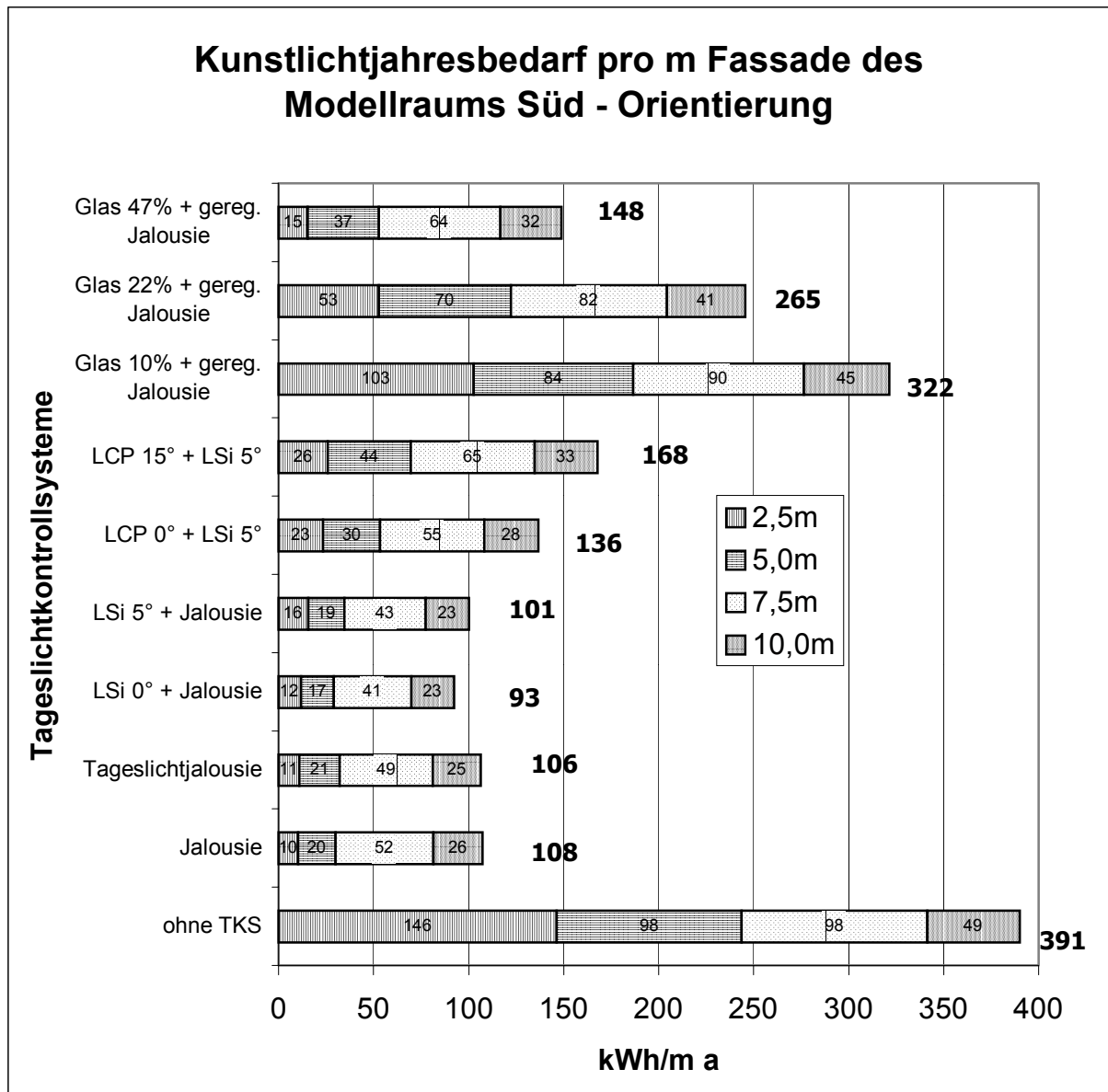
Für geringere Raumtiefen würde man die Geometrie der Tageslichtkontrollsysteme entsprechend verändern. Die in der Folge vorgestellten Ergebnisse können zwar Anhaltspunkte für geringere Raumtiefen liefern, sollten aber anhand der tatsächlichen Raumtiefe und der entsprechenden Geometrie der TKS überprüft werden.

Kunstlichtbedarf beim Einsatz der Tageslichtkontrollsysteme in der Nordfassade
für den Standort Rio de Janeiro ($I_L = 15 \text{ W/m}^2$). Bei dieser Darstellung wird der Kunstlichtjahresbedarf pro m Fassadenbreite gezeigt.



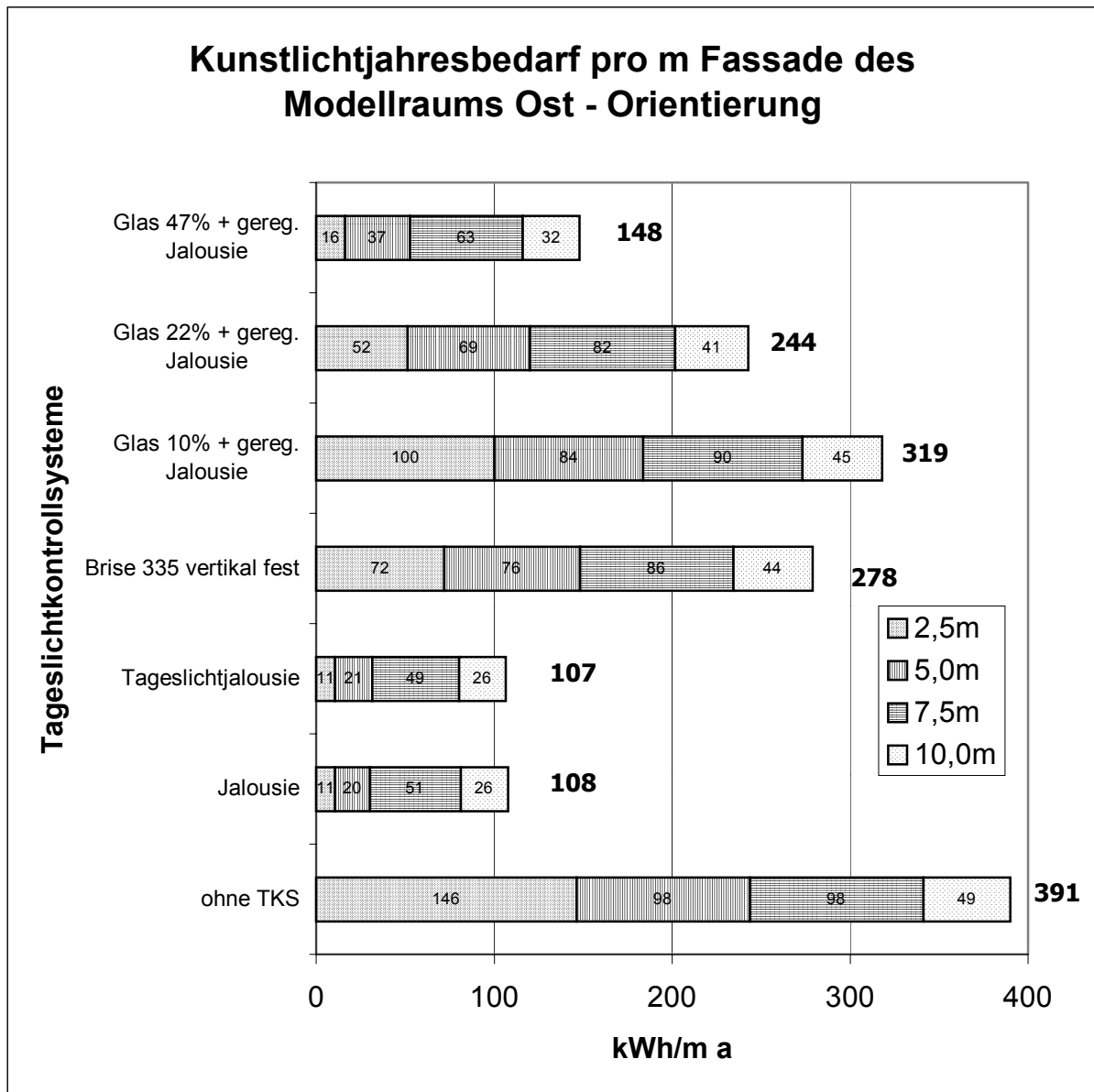
Grafik 6.1. Kunstlichtjahresbedarf pro m Fassade des Modellraums; Nord – Orientierung

Süd



Grafik 6.2. Kunstlichtjahresbedarf pro m Fassade des Modellraums; Süd – Orientierung

Ost

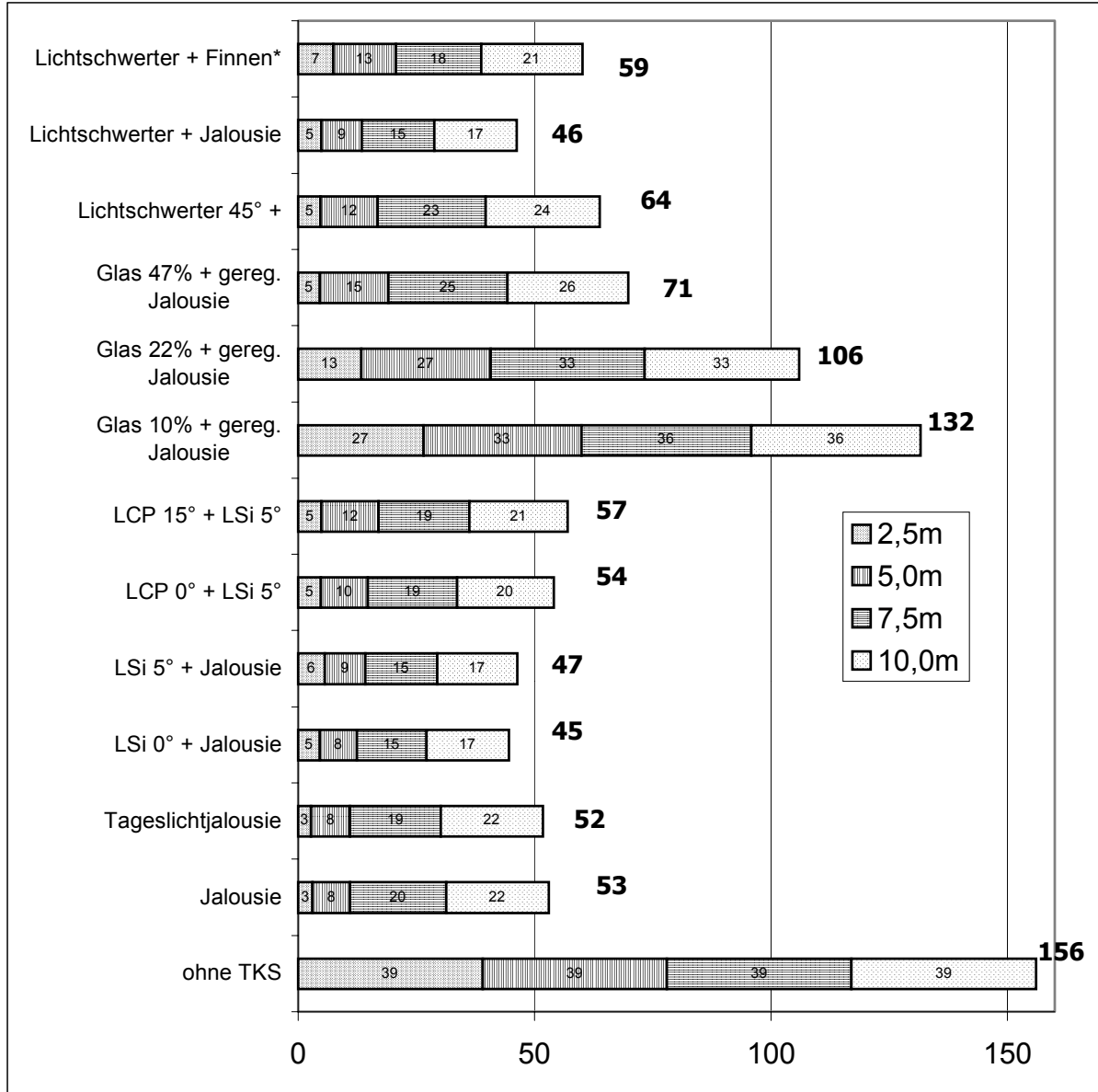


Grafik 6.3. Kunstlichtjahresbedarf pro **m Fassade** des Modellraums Ost – Orientierung

Kunstlichtbedarf pro m² der Tageslichtautonomiezonen

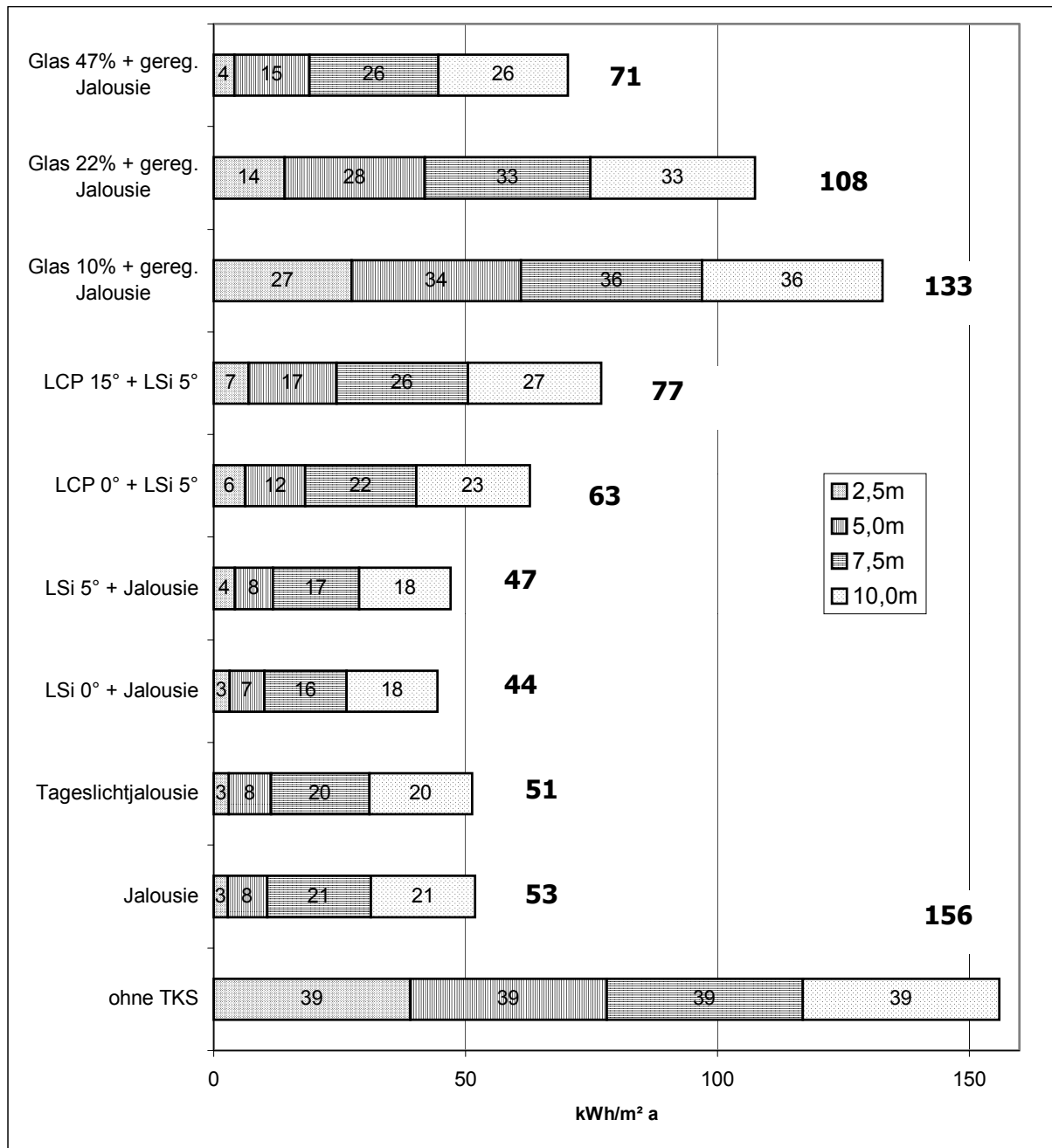
beim Einsatz der Tageslichtkontrollsysteme für den Standort Rio de Janeiro ($I_L = 15 \text{ W/m}^2$).

Nordfassade



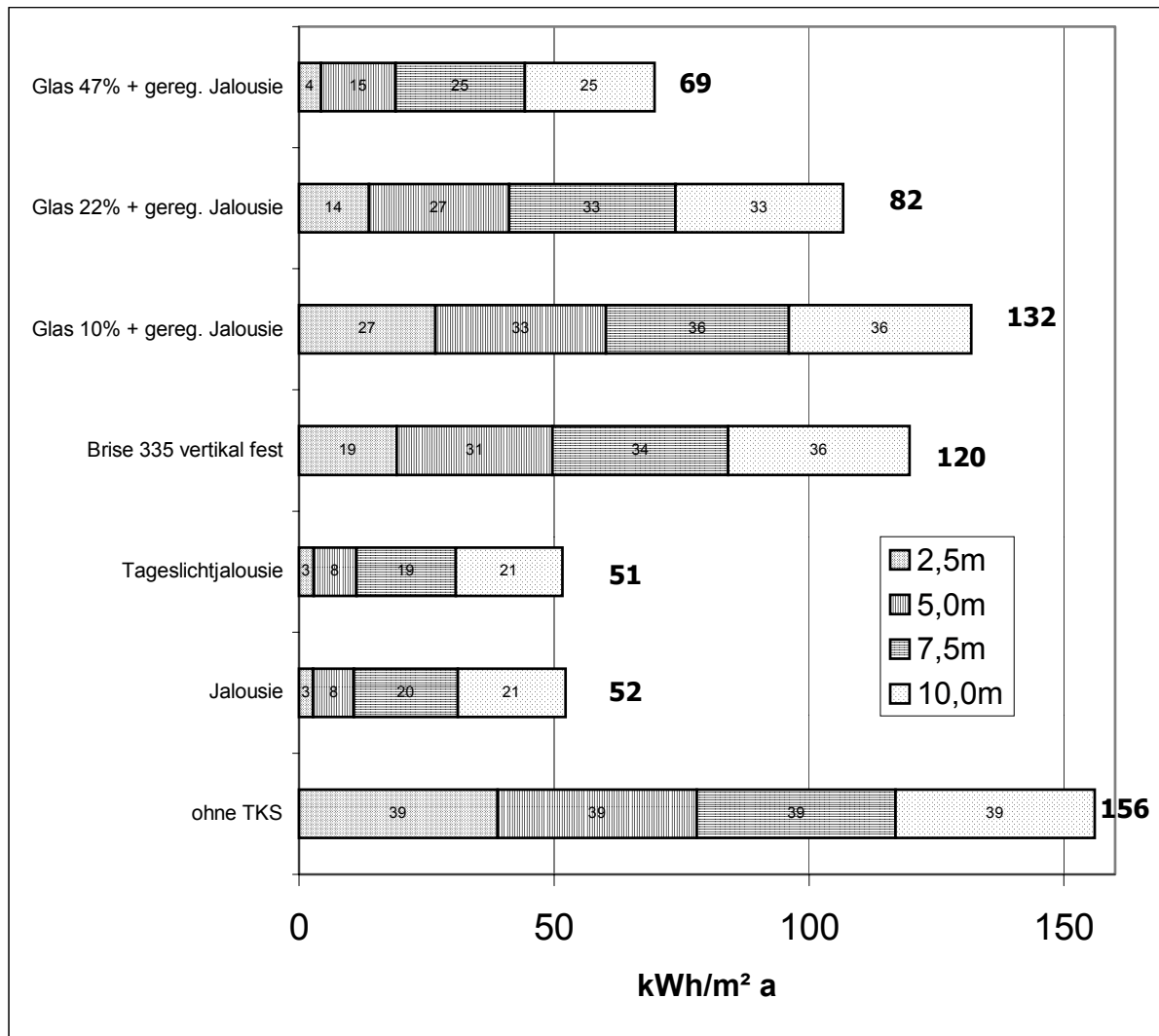
Grafik 6.4. Kunstlichtjahresbedarf pro m² nach Tageslichtautonomiezonen des Modellraums Nord – Orientierung

Südfassade



Grafik 6.5. Kunstlichtjahresbedarf pro m^2 nach Tageslichtautonomiezonen des Modellraums Süd – Orientierung

Ostfassade



Grafik 6.6. Kunstlichtjahresbedarf pro m^2 nach Tageslichtautonomie-zonen des Modellraums Ost – Orientierung

6.4. Beeinflussung der Kühllast

Eine große Bedeutung bei der Nutzung von Tageslicht in den Tropen (und nicht nur dort) kommt der thermischen Komponente zu. Neben dem Aspekt des thermischen Komforts durch die Lichtstrahlung, der bereits im Kapitel „visueller Komfort“ behandelt wurde und mit dem Grenzwert $E_{v11} = 5.000 \text{ lx}$ bereits Eingang in die Auslegung der Tageslichtkontrollsysteme gefunden hat, hat die thermische Komponente auch einen wesentlichen Einfluss auf die Kühllast.

Bei der Tageslichtnutzung stehen sich dabei zwei Aspekte gegenüber:

- 1) Tageslicht lässt sich nicht so gleichmäßig auf eine Beleuchtungsstärke regeln wie Kunstlicht, d.h. es können hier zeitweise höhere Beleuchtungsstärken als E_N auftreten.
- 2) Tageslicht hat eine höheres photometrisches Strahlungsäquivalent im Vergleich mit der Lichtausbeute η von Kunstlichtquellen. Das durchschnittliche photometrische Strahlungsäquivalent k_m liegt in Deutschland bei etwa 115 lm/W [26]. Die Lichtausbeute von Leuchtstofflampen liegt zwischen 55 und 90 lm/W [70]. Hentschel [36] gibt für verschiedene OSRAM-Modelle mit konventionellem Vorschaltgerät Lichtausbeuten $37 - 78 \text{ lm/W}$ an.

Anders als in anderen Klimazonen kommt im feucht-heißen Klima der thermischen Komponente zu keiner Zeit eine positive Wirkung in Form einer Verminderung der Heizlast zugute. Die gesamte thermische Komponente muss durch eine entsprechende Klimatisierung aus dem Gebäude entfernt werden.

6.4.1. Ermittlung der tageslichtbedingten Kühllast

Um die tageslichtbedingte Kühllast zu ermitteln, werden im virtuellen Raum „Sensoren“ direkt hinter der Scheibe (Abstand = 1 cm) angebracht. Damit lässt sich das gesamte einfallende Licht und über eine einfache Rechenoperation die damit verbundene Wärmestrahlung ermitteln.

Die Anordnung der Sensoren hängt von dem jeweiligen Tageslichtkontrollsystem ab: im Falle der geregelten Jalousie wurden die „Sensoren“ vertikal in Fassadenmitte in Abständen von 25 cm angebracht, beginnend bei einer Höhe von $1,00 \text{ m}$. Im Falle des internen horizontalen

Lichtschwertes in Verbindung mit einer geregelten Jalousie im Sichtfensterbereich wurde der Sichtfensterbereich identisch behandelt. Das unverschattete Oberlicht dagegen wurde mit Sensoren in einer Höhe von 2,5 m und 2,75 m, ebenfalls in Fassadenmitte, ausgestattet.

Die Summe der Werte der einzelnen Sensoren wird anschließend durch die Anzahl der Sensoren geteilt. Wie bereits bei der Ermittlung der Tageslichtautonomie werden für die verschiedenen Sonnenstände und Himmelszustände entsprechende RADIANCE-Simulationen durchgeführt, d.h. beide Aspekte können in einer Simulation behandelt werden. Die so ermittelten Werte, $Q'_{\text{SFCS/TOS}}$ für das Sichtfenster und $Q'_{\text{OLCS/TOS}}$ für das Oberlicht (falls vorhanden), zur Ermittlung der Wärmelast im Jahresverlauf genutzt, die in einer der Tageslichtautonomieermittlung ähnlichen Weise stattfindet. Durch die klare Unterteilung von Sichtfenster und Oberlicht lassen sich ausgezeichnet Analysen über den Einfluss der Öffnungsgrößen und –arten durchführen.

Bei komplizierteren Geometrien der Tageslichtkontrollsysteme, wie zum Beispiel bei außenliegenden Lichtschwertern und Finnen, ist eine größere Anzahl von Sensoren sinnvoll. Die genaue Anordnung und Anzahl hängt vom Einzelfall ab.

Es gilt:

$$Q_{\text{TL}} = I_{\text{NCS}} * Q_{\text{TLCS}} + I_{\text{NTOS}} * Q_{\text{TLTOS}}$$

Dabei gilt:

$$I_{\text{NCS}} + I_{\text{NTOS}} = 1$$

Dabei ist:

Q_{TL} die durch das Tageslicht verursachte Wärmelast im Jahresverlauf während der gewählten Bürozeit. hier: von 8 - 18 Uhr in [Wh/m² a]

Q_{TLCS} die durch das Tageslicht bei durchgehend klarem Himmel und Sonne theoretisch verursachte Wärmelast im Jahresverlauf während der gewählten Bürozeit. hier: von 8 - 18 Uhr in [Wh/m² a]

Q_{TLTOS} dito bei bedecktem Himmel in den Tropen in [Wh/m² a]

I_{NCS} der Anteil an klarem Himmel im Jahresverlauf

I_{NTOS} der Anteil an bewölktem Himmel

Bei klarem Himmel mit Sonne gilt:

$$Q_{\text{TLCS}} = \sum_{n=0}^7 Q_{\text{TLCS}(\alpha F + 45^\circ * n)}$$

dabei gilt:

$$Q_{\text{TLCS}(\alpha F)} = \sum_{i=1}^6 (Q'_{\text{SFCS}(0^\circ; 15^\circ * i)} * F_{\text{SF}} + Q'_{\text{OL}(0^\circ; 15^\circ * i)} * F_{\text{OL}}) * a_{G(\gamma; \alpha)} / K_{\text{H}, S(15^\circ * i)}$$

$$Q_{\text{TLCS}(\alpha F + 45^\circ)} = \sum_{i=1}^6 (Q'_{\text{SFCS}(45^\circ; 15^\circ * i)} * F_{\text{SF}} + Q'_{\text{OL}(45^\circ; 15^\circ * i)} * F_{\text{OL}}) * a_{G(\gamma; \alpha)} / K_{\text{H}, S(15^\circ * i)}$$

$$Q_{\text{TLCS}(\alpha F + 90^\circ)} = \sum_{i=1}^6 (Q'_{\text{SFCS}(90^\circ; 15^\circ * i)} * F_{\text{SF}} + Q'_{\text{OL}(90^\circ; 15^\circ * i)} * F_{\text{OL}}) * a_{G(\gamma; \alpha)} / K_{\text{H}}$$

$$Q_{\text{TLCS}(\alpha F + 135^\circ)} = \sum_{i=1}^6 (Q'_{\text{SFCS}(135^\circ; 15^\circ * i)} * F_{\text{SF}} + Q'_{\text{OL}(135^\circ; 15^\circ * i)} * F_{\text{OL}}) * a_{G(\gamma; \alpha)} / K_{\text{H}}$$

$$Q_{\text{TLCS}(\alpha F + 180^\circ)} = \sum_{i=1}^6 (Q'_{\text{SFCS}(180^\circ; 15^\circ * i)} * F_{\text{SF}} + Q'_{\text{OL}(180^\circ; 15^\circ * i)} * F_{\text{OL}}) * a_{G(\gamma; \alpha)} / K_{\text{H}}$$

$$Q_{\text{TLCS}(\alpha F + 225^\circ)} = \sum_{i=1}^6 (Q'_{\text{SFCS}(135^\circ; 15^\circ * i)} * F_{\text{SF}} + Q'_{\text{OL}(135^\circ; 15^\circ * i)} * F_{\text{OL}}) * a_{G(\gamma; \alpha)} / K_{\text{H}}$$

$$Q_{\text{TLCS}(\alpha F + 270^\circ)} = \sum_{i=1}^6 (Q'_{\text{SFCS}(90^\circ; 15^\circ * i)} * F_{\text{SF}} + Q'_{\text{OL}(90^\circ; 15^\circ * i)} * F_{\text{OL}}) * a_{G(\gamma; \alpha)} / K_{\text{H}}$$

$$Q_{\text{TLCS}(\alpha F + 315^\circ)} = \sum_{i=1}^6 (Q'_{\text{SFCS}(45^\circ; 15^\circ * i)} * F_{\text{SF}} + Q'_{\text{OL}(45^\circ; 15^\circ * i)} * F_{\text{OL}}) * a_{G(\gamma; \alpha)} / K_{\text{H}, S(15^\circ * i)}$$

dabei gilt:

$$a_{G(\gamma; \alpha)} = 100/h_{\text{B}'} * \Sigma H_{\gamma(\alpha)}$$

dabei ist:

K_{H} photometrisches Strahlungsäquivalent für klaren Himmel. Fungiert hier als Umwandlungsfaktor Beleuchtungsstärke [lx] in Strahlungsstärke [W/m²] 125 lux = 1 W/m² (DIN 5034) gerechnet

$K_{\text{H}, S(15^\circ * i)}$ photometrisches Strahlungsäquivalent für klaren Himmel mit Sonne. Fungiert hier als Umwandlungsfaktor Beleuchtungsstärke [lx] in Strah-

lungstärke $[W/m^2]$. Die Werte sind abhängig von der Sonnenhöhe (siehe unter „Photometrisches Strahlungsäquivalent“ im Kapitel „Tagelicht in den Tropen“)

$Q'_{SFCSCS(0^\circ;15^\circ * i)}$	die vertikale Beleuchtungsstärke im Sichtfensterbereich direkt hinter der Fassade bei klarem Himmel und Sonne bei einer durch die Sonnenhöhe und ΔAz definierten Situation, in $[lx]$
$Q'_{OLCS(0^\circ;15^\circ * i)}$	dito bei für das Oberlicht, in $[lx]$
F_{SF}	die Fläche des Sichtfensters, in $[m^2]$
F_{OL}	die Fläche des Oberlichts, in $[m^2]$
$H_{\gamma(\alpha)}$	Sonnenhöhenhäufigkeit H_γ in einem definierten Himmelsgewölbeausschnitt im Jahresverlauf; der berücksichtigte Zeitraum entspricht der Bürozeit $8^\circ - 18^\circ$, in $[h/a]$
$a_{G(\Delta;\gamma_S)}$	Anteil der Sonnenhöhenhäufigkeiten im definierten Himmelsgewölbeausschnitt ($\Delta;\gamma_S$) für die jeweils berechnete Formel an der Summe der Jahresbüroarbeitszeiten (ohne Subtraktion des Wochenendes), in $[h/a]$
h_B	ist die Jahressumme aller Stunden in der betrachteten Bürozeit (Wochenenden werden nicht mitgezählt!), in $[h/a]$

Für bedeckten Himmel gilt entsprechend:

$$Q_{TLTOS} = \sum_{n=0}^7 Q_{TLTOS(\alpha F + 45^\circ * n)}$$

dabei gilt:

$$Q_{TLTOS(\alpha F)} = \sum_{i=1}^6 (Q'_{SFTOS(0^\circ;15^\circ * i)} * F_{SF} + Q'_{OLTOS(0^\circ;15^\circ * i)} * F_{OL}) * a_{G(\gamma;\alpha)} / K_{Hbd}$$

$$Q_{TLTOS(\alpha F + 45^\circ)} = \sum_{i=1}^6 (Q'_{SFTOS(45^\circ;15^\circ * i)} * F_{SF} + Q'_{OLTOS(45^\circ;15^\circ * i)} * F_{OL}) * a_{G(\gamma;\alpha)} / K_{Hbd}$$

$$Q_{TLTOS(\alpha F + 90^\circ)} = \sum_{i=1}^6 (Q'_{SFTOS(90^\circ;15^\circ * i)} * F_{SF} + Q'_{OLTOS(90^\circ;15^\circ * i)} * F_{OL}) * a_{G(\gamma;\alpha)} / K_{Hbd}$$

$$Q_{TLTOS(\alpha F + 135^\circ)} = \sum_{i=1}^6 (Q'_{SFTOS(135^\circ;15^\circ * i)} * F_{SF} + Q'_{OLTOS(135^\circ;15^\circ * i)} * F_{OL}) * a_{G(\gamma;\alpha)} / K_{Hbd}$$

$$Q_{\text{TLTOS}(\alpha F+180^\circ)} = \sum_{i=1}^6 (Q'_{\text{SFTOS}(180^\circ;15^\circ * i)} * F_{\text{SF}} + Q'_{\text{OLTOS}(180^\circ;15^\circ * i)} * F_{\text{OL}}) * a_{G(\gamma;\alpha)} / K_{\text{Hbd}}$$

$$Q_{\text{TLTOS}(\alpha F+225^\circ)} = \sum_{i=1}^6 (Q'_{\text{SFTOS}(135^\circ;15^\circ * i)} * F_{\text{SF}} + Q'_{\text{OLTOS}(135^\circ;15^\circ * i)} * F_{\text{OL}}) * a_{G(\gamma;\alpha)} / K_{\text{Hbd}}$$

$$Q_{\text{TLTOS}(\alpha F+270^\circ)} = \sum_{i=1}^6 (Q'_{\text{SFTOS}(90^\circ;15^\circ * i)} * F_{\text{SF}} + Q'_{\text{OLTOS}(90^\circ;15^\circ * i)} * F_{\text{OL}}) * a_{G(\gamma;\alpha)} / K_{\text{Hbd}}$$

$$Q_{\text{TLTOS}(\alpha F+315^\circ)} = \sum_{i=1}^6 (Q'_{\text{SFTOS}(45^\circ;15^\circ * i)} * F_{\text{SF}} + Q'_{\text{OLTOS}(45^\circ;15^\circ * i)} * F_{\text{OL}}) * a_{G(\gamma;\alpha)} / K_{\text{Hbd}}$$

Es gilt:

$$a_{G(\gamma;\alpha)} = 100/h_{\text{B}'} * \Sigma H_{\gamma(\alpha)}$$

dabei ist:

Q_{TLTOS} die Kühllast im Jahresverlauf durch das Tageslicht bei bedecktem Himmel in den Tropen, in [Wh/m² a]

$Q'_{\text{SFTOS}(0^\circ;15^\circ * i)}$ die vertikale Beleuchtungsstärke im Sichtfensterbereich direkt hinter der Fassade bei bedecktem Himmel in den Tropen, in [lx]

$Q'_{\text{OLTOS}(0^\circ;15^\circ * i)}$ die vertikale Beleuchtungsstärke im Oberlichtbereich direkt hinter der Fassade bei bedecktem Himmel in den Tropen, in [lx]

K_{Hbd} photometrisches Strahlungsäquivalent für bedeckten Himmel. Fungiert hier als Umwandlungsfaktor Beleuchtungsstärke [lx] in Strahlungsstärke [W/m²]: 115 lux = 1 W/m² (DIN 5034)

Die Einführung dieser Methode wird durch die Notwendigkeit einer möglichst exakten Berechnung der in den Raum eindringenden Wärmestrahlung notwendig. HELIOS zum Beispiel sieht zwar eine Berechnungsmöglichkeit für einen automatischen Sonnenschutz vor: so kann die den Sonnenschutz aktivierende vertikale solare Strahlungsstärke definiert und der Transmissionsgrad des Sonnenschutzes angegeben werden. Es kann jedoch nicht – und das ist entscheidend – die Obergrenze der im inneren ankommende Strahlung (z.B. E_{V11}) festgelegt werden. Damit lassen sich geregelte Jalousien nicht entsprechend abbilden.

Diese Methode kann nicht ohne weiteres bei Gläsern mit unterschiedlichen Transmissionswerten für den sichtbaren Bereich und den thermisch relevanten Bereich der Strahlung angewendet werden. In diesem Fall sind Korrekturfaktoren notwendig.

Ebenfalls mit größerem Aufwand verbunden ist die Berechnung von TKS mit innenliegendem Sonnenschutz: eine Mess-/Simulationsanordnung, die Mehrfachreflexionen berücksichtigt, lässt aber auch für diese Situation gute Ergebnisse erwarten.

6.4.2. Ermittlung der kunstlichtbedingten Kühllast

Die kunstlichtbedingte Kühllast wird auf Grundlage der erzielten Tageslichtautonomie ermittelt, das heißt, es wird der Kunstlichtbedarf der jeweiligen Tageslichtkontrollsysteme ermittelt, der notwendig ist, um die vorgegebene Beleuchtungssollstärke zu sicherzustellen.

Es wird dabei davon ausgegangen, dass die gesamte installierte Leistung I_L während ihrer Nutzung, d.h. der Leistungsabgabe, letztendlich über Wärmeabstrahlung und Lichtabsorption in Wärme übergeführt wird.

Für die kunstlichtbedingte Kühllast KL_{kl} (Nutzenergie) gilt folgender Zusammenhang:

$$KL_{KL} = \left(\sum_{i=1}^4 (1 - (TA_{2,5*i} / 100) * F_{2,5*i} I_L * h_{B'}) \right) / \sum_{i=1}^4 F_{2,5*i} \quad [Wh/m^2a]$$

Dabei gilt für die auf die Bodenfläche bezogene Anschlussleistung I_L (Mittelwert) [69]:

$$I_L = 15 \text{ W/m}^2; \text{ Nennbeleuchtungsstärke } E_n = 500 \text{ lx}$$

Die Werte für I_L und E_n lassen sich in TAKO-Cool individuell einstellen.

Für eine Analyse der einzelnen Zonen gilt:

$$KL_{KL2,5*i} = (1 - (TA_{2,5*i} / 100) * F_{2,5*i} I_L * h_{B'}) / F_{2,5*i} \quad [Wh/m^2a]$$

6.5. Nutzenergie/Endenergie

Zunächst wird der Nutzenergiebedarf ermittelt. Hierbei wird nach den zwei zur Anwendung kommenden Energieformen unterschieden: Kälte E_K und Strom E_S .

Die Kälteenergie E_K wird für die Kühlung (und gegebenenfalls für die Entfeuchtung) benötigt. Setzt man die Nutzenergie für die Kälte E_K als 100%, so ergibt sich bei einer Leistungszahl der Kältemaschine von 3, einem Wirkungsgrad des Elektro-Motors von 0,90 und einem Wirkungsgrad der Kälte-Verteilung von 0,93 [69] folgende Gleichung:

$$100\% E_K (\text{Nutzenergie}) / (3,00 * 0,90 * 0,93) = 40\% E_S (\text{Endenergie})$$

An dieser Stelle gilt es festzuhalten, dass die angenommenen Werte für die Leistungszahl, den Wirkungsgrad des Elektromotors und den Wirkungsgrad der Kälteverteilung variieren können. Die Werte hängen unter anderem von der Qualität der Maschinen und ihres Betriebes im Bereich des Leistungseffizienzoptimums ab.

Die Nutzenergie E_B wird für die Arbeitsplatzbeleuchtung (und gegebenenfalls für den Betrieb der Bürogeräte und den Transportenergiebedarf der Lüftungsanlage) benötigt. Es gilt die Gleichung:

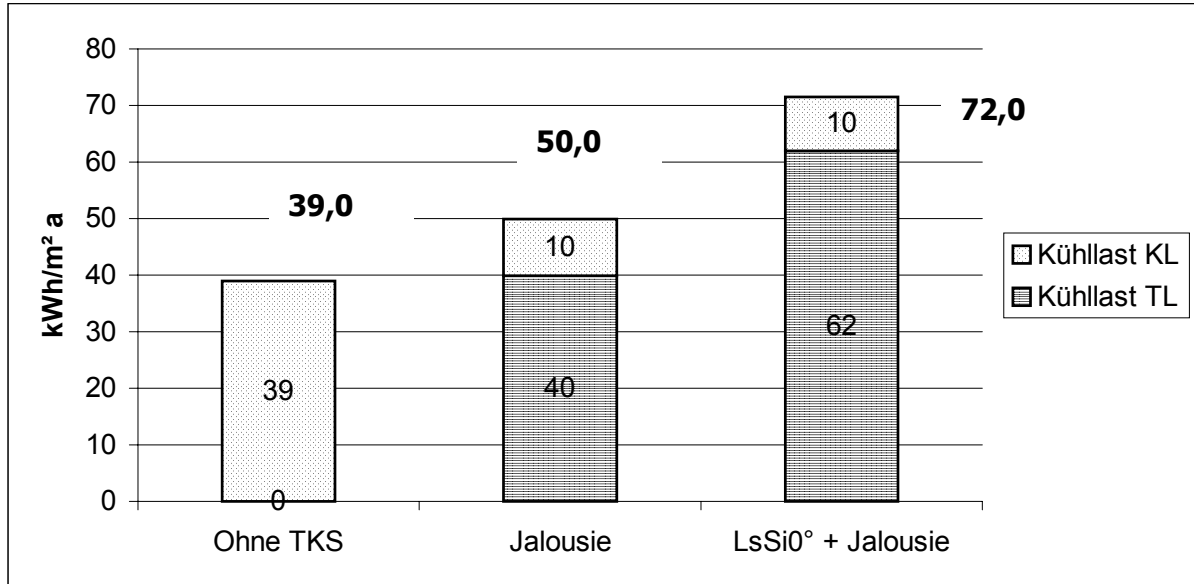
$$100\% E_B (\text{Nutzenergie}) = 100\% E_S (\text{Endenergie})$$

Bemerkung: Es gilt an dieser Stelle darauf hinzuweisen, dass in diesem Ansatz zum Gesamtenergieverbrauch ausschließlich die Hauptnutzfläche nach DIN 277 [71] berücksichtigt wird. Ein Vergleich mit bestehenden Gebäuden ist damit nicht direkt möglich. So machen diese nutzungs- und damit energieintensiven Flächen beispielsweise in einer Untersuchung von Voss et al [72] nur 57% der Bruttogrundrissfläche aus. Die in dieser Publikation festgestellte Schwierigkeit aufgrund unterschiedlicher Flächenbezüge kann aus eigener Erfahrung nur bestätigt werden.

6.5.1. Nutzenergieanalyse

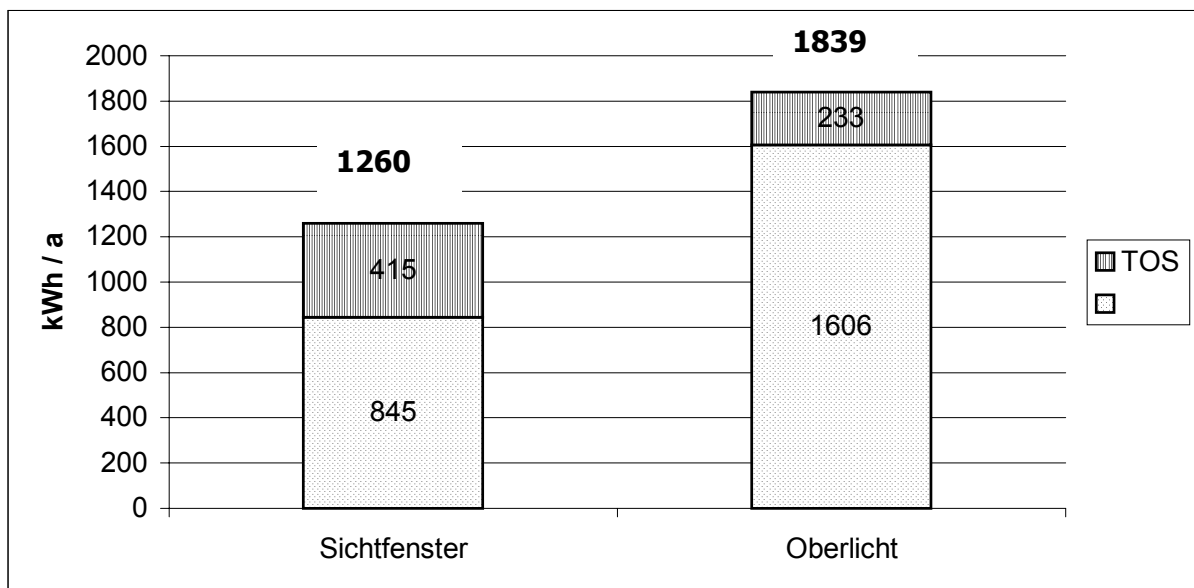
Mit Hilfe von „TAKO cool“ errechnete Kühllastzusammensetzung aus Tages- und Kunstlicht für 2 ausgewählte Systeme im Vergleich mit reiner Kunstlichtbeleuchtung:

Nordfassade des Standortes Rio de Janeiro ($I_L = 15 \text{ W/m}^2$)

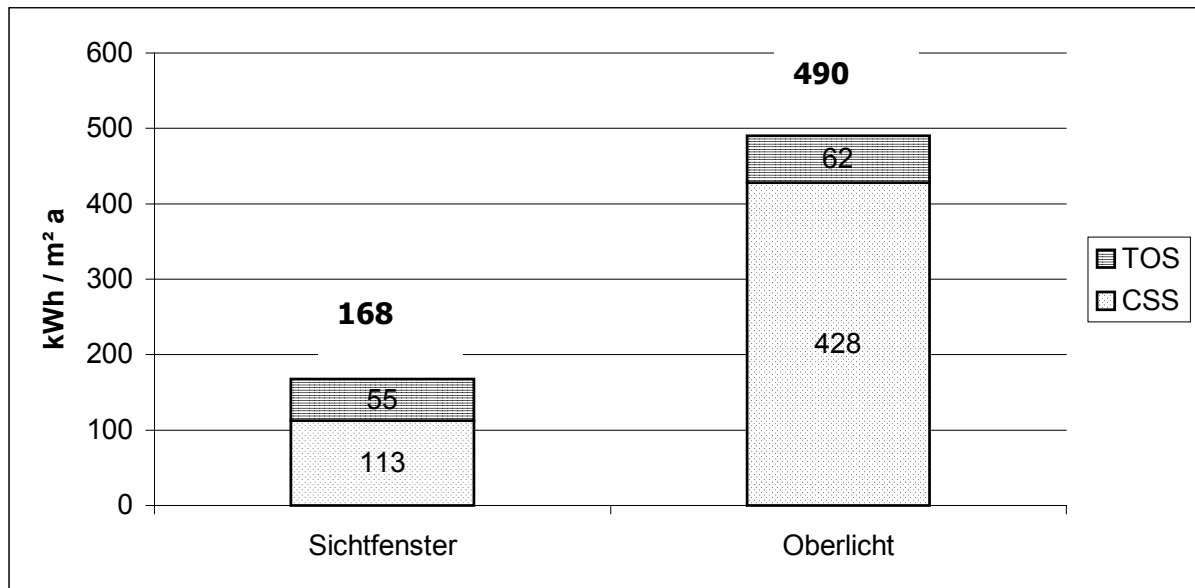


Grafik 6.7. Nutzenergieanalyse für drei Varianten

Die auffallend hohe Kühllast durch Tageslicht bei dem Tageslichtkontrollsystem mit horizontalem internen Lichtschwert (LsSi0° + Jalousie) und geregelter Jalousie lässt eine genauere Analyse der Verteilung der Kühllast zwischen Sichtfenster und Oberlicht als notwendig erscheinen:



Grafik 6.8. Energieeintrag im Sichtfenster- und im Oberlichtbereich im Jahresverlauf für eine unverbaute Nordfassade in Rio de Janeiro (TKS: internes horizontales Lichtschwert und außen liegende geregelte Jalousie)



Grafik 6.9. Energieeintrag pro m² im Sichtfenster- und im Oberlichtbereich im Jahresverlauf für eine unverbaute Nordfassade in Rio de Janeiro (TKS: internes horizontales Lichtschwert und außenliegende geregelte Jalousie)

Fazit

Grafik 6.8. zeigt den Gesamtwärmeeintrag im Jahresverlauf für den Sichtfenster- und den Oberlichtbereich, während Grafik 6.9. den Wärmeeintrag pro Flächeneinheit für beide Bereiche darstellt.

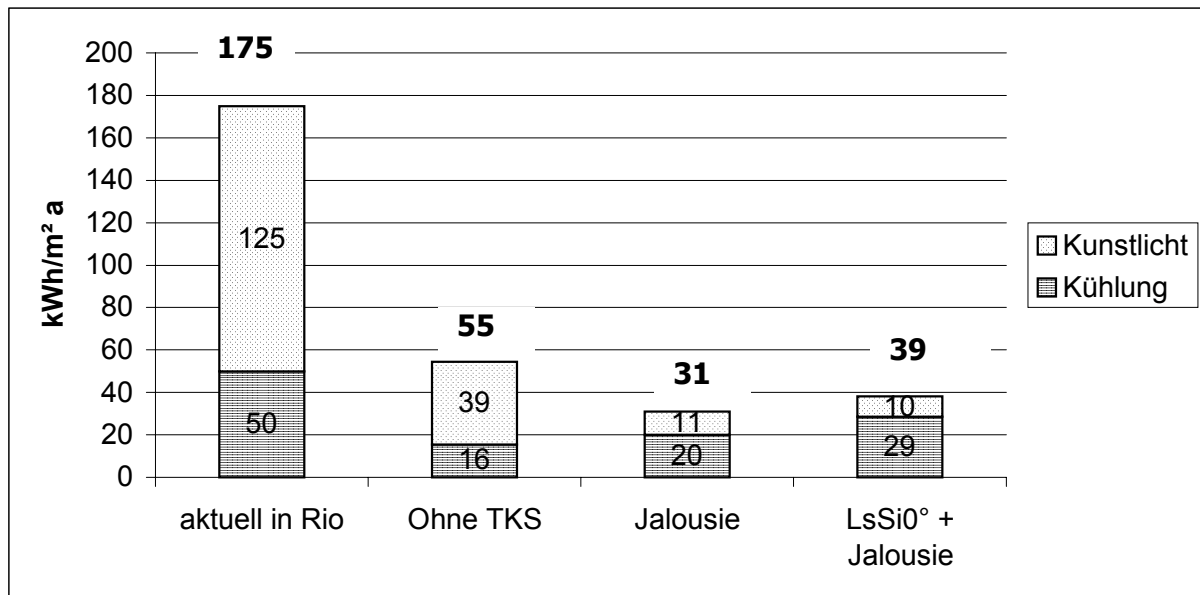
Es zeigt sich deutlich der große Einfluss des Oberlichtes auf die Kühllast im Jahresverlauf. Die relativ große unverschattete Öffnung für das Oberlicht, die zu einer möglichst tiefen Raumausleuchtung führen soll, verursacht eine hohe Kühllast. Durch die Berücksichtigung beider Aspekte, dem der Tageslichteinsparung und dem der verursachten Kühllast, durch die Programmmodule TAKO und TAKO-Cool ist durch virtuelle Versuchsreihen (= Simulationen) eine Optimierung der Fassadengeometrie möglich.

Es gilt an dieser Stelle darauf hinzuweisen, dass auch im Sichtfensterbereich aus Gründen der Raumtiefeausleuchtung und zur Vermeidung eines zu großen Kontrastes zwischen Sichtfenster und Oberlicht eine relativ große vertikale Beleuchtungsstärke zugelassen wird. Bei geringeren Raumtiefen und einer anderen Auslegung des Oberlichts ließe sich auch an dieser Stelle eine deutliche Reduzierung des Wärmeeintrages erreichen.

6.5.2. Endenergieanalyse für Kunstlicht und die durch Kunst- und Naturlicht notwendige Kühlung

Im folgenden wird für drei Fälle beispielhaft der Endenergieverbrauch in Form von elektrischem Strom dargestellt. Die Umwandlung von Nutz- in Endenergie wird für den Kühllastfall mit dem Faktor 0,4 angesetzt (siehe auch Abschnitt Nutz- und Endenergie).

Nordfassade des Standortes Rio de Janeiro ($I_L = 15 \text{ W/m}^2$)



Grafik 6.10. Endenergiebilanz

Fazit

Ein Teil der durch den Einsatz von Tageslichtkontrollsystemen erzielten Energieeinsparung durch eine massive Verringerung des Kunstlichteinsatzes wird durch die hohen durch diese Systeme induzierten Kühllasten wieder verloren. Erreicht man durch geregelte Jalousien eine Kunstlichteinsparung von 72%, so sinkt die Einsparung unter Berücksichtigung der Kühllasten auf 57%.

Bei der Variante mit Oberlicht und internem Lichtschwert ist eine Kunstlichteinsparung von 76% möglich, nach Berücksichtigung der induzierten Kühllast sinkt die Einsparung auf 29% ab. Würde man die Möblierung berücksichtigen, so würde die Einsparung etwas geringer ausfallen.

Es gilt jedoch an dieser Stelle darauf hinzuweisen, dass die Auslegung der Tageslichtkontrollsysteme eine möglichst hohe Tageslichtautonomie für große Raumtiefen zum Ziel hatte. Damit wurde neben dem Gedanken der Energieeffizienzsteigerung gleichwertig das Ziel einer Komfortverbesserung des Innenraumes durch einen möglichst hohen Tageslichtanteil an der Gesamtbeleuchtung Rechnung getragen. Bei einer Auslegung dieser Systeme mit dem ausschließlichen Ziel der Energieeffizienzoptimierung würde die verwendete Geometrie anders ausgelegt werden. Durch die Analysemöglichkeiten mit TAKO und TAKO-Cool steht einem damit auch für diese Zielsetzung ein wichtiges Werkzeug zur Verfügung.

7. Zusammenfassung und Ausblick

Die zu Beginn durchgeführte Untersuchung einiger wichtiger Parameter für die Tageslichtnutzung in den Tropen erbrachte eine Reihe interessanter Ergebnisse:

1) Messungen der horizontalen Beleuchtungsstärke bei klarem Himmel und Sonne erbrachten eine sehr gute Übereinstimmung mit den rechnerischen Werten nach CIE Clear Sky & Sun.

2) Große Abweichungen von den rechnerischen Werten nach CIE Overcasted Sky ergaben die Messungen der Leuchtdichte des Himmelsgewölbes. Hier lagen die Abweichungen im Durchschnitt bei durchschnittlich 124% über den nach CIE errechneten Werten. Weitere Messreihen, insbesondere der Leuchtdichte im Zenit, sollten zukünftig an möglichst vielen tropischen Standorten durchgeführt werden, um so die Erstellung einer speziellen Formel für die feucht-heißen Tropen zu ermöglichen.

3) Bei den Messreihen zur Überprüfung des visuellen Komforts wurde hinsichtlich der Absolutblendung eine signifikante tropenspezifische Abweichung festgestellt: eine offensichtlich tropenspezifische Adaptation der Augen an hohe Leuchtdichten wurde durch zahlreiche Messungen bestätigt. Auch hier sind weitere umfangreiche und interdisziplinäre Untersuchungen wünschenswert, um die bisherigen Ergebnisse auf ein breiteres Fundament zu stellen.

Im Rahmen der vorliegenden Untersuchung wurden zahlreiche neue Werkzeuge entwickelt, um einerseits Tageslichtkontrollsysteme auslegen zu können (SOHO, systemspezifische Auslegungskonzepte) und andererseits die entwickelten Systeme und Konfigurationen annähernd dynamisch auf Stundenwertbasis im Jahresverlauf evaluieren zu können (AZSO, TAKO und TAKO-Cool). Damit ist es erstmals möglich, komplexe Tageslichtkontrollsysteme auf ihre Effizienz im Jahresverlauf hin zu testen. Die dafür entwickelte Methodik und die einzelnen Werkzeuge sind prinzipiell weltweit für jeden Standort einsetzbar.

Der konkrete Einsatz dieser Werkzeuge für den Standort Rio de Janeiro ergaben ein interessantes Einsparpotential durch Tageslichtnutzung. Es wurde aber auch klar, dass die erreichte große Einsparung an Kunstlicht oftmals mit einer deutlichen Erhöhung der Kühllast durch den

tageslichtbedingten Wärmeeintrag verbunden ist. Durch TAKO und TAKO-Cool stehen jedoch geeignete Werkzeuge zur Verfügung, um die Problematik zu analysieren und eine Optimierung der Systeme durchzuführen.

Ein Ausbau der Module TAKO und TAKO-Cool erscheint wünschenswert. Insbesondere eine Untersuchung des thermischen Verhalten von Absorptions- und Reflexionsgläsern mit innenliegendem Sonnenschutz, heute in vielen tropischen Ländern eine Standardlösung, sollte in einem nächsten Schritt erfolgen. Auch eine Analyse des thermischen Verhaltens feststehender Systeme wie die Kombination von Lichtschwertern und außenliegenden Finnen, die eine gute Tageslichtautonomie erreicht, lässt interessante Ergebnisse erwarten.

Eine Kosten-Nutzen-Analyse sollte in einem nächsten Schritt mit den erarbeiteten Ergebnissen verknüpft werden, um so die Wirtschaftlichkeit von Tageslichtkontrollsystemen in den Tropen (und anderswo) zu untersuchen. Dieses wird auf Grund der annähernd dynamischen Simulation erstmals möglich.

Eine mindestens einjährige Messreihe in einem oder mehreren realen Büroräumen zur Evaluierung der entwickelten Methoden ist erstrebenswert.

Bibliographie

- [1] Levine, M.D., Busch, J.F., Deringer, J.J. (1992), *Overview of Building Energy Conservation Activities in ASEAN*, Vol. II: Technology. In: ASEAN-USAID Buildings Energy Conservation Project Final Report, M.D. Levine and J.F. Busch, Eds. Berkeley, CA, Lawrence Berkeley Laboratory, Kalifornien
- [2] Lamberts, R., Dutra, L., Pereira, F. (1997), *Eficiência Energética na Arquitetura*, PW Editores, São Paulo
- [3] Lomardo, Louise Land Bittencourt. (1988), *Consumo de Energia nos grandes Prédios Comerciais: Estudos de Caso*, Master Abschlussarbeit (unveröffentlicht), FAU-URFJ, Rio de Janeiro
- [4] Freire, J., Malheiros, M. (1997), *Aldeamentos Indígenas do Rio de Janeiro*. UERJ, Rio de Janeiro
- [5] Prefeitura de Rio de Janeiro (Hrsg.) (2000), *Guia da Arquitetura Colonial, Neoclássica e Romântica no Rio de Janeiro*, Editora Casa da Palavra, Rio de Janeiro
- [6] Alvim, Sandra. (1984), *Inventário Arquitetônico – arquitetura religiosa do século XVII – município do Rio de Janeiro*, 2. Ausgabe, Rio de Janeiro, Fakultät für Architektur und Städtebau, Federale Universität von Rio de Janeiro
- [7] Albernaz, Maria Paula & Lima, Cecília Modesto. (1999), *Dicionário ilustrado de arquitetura*. Band II., ProEditores São Paulo
- [8] Pinto, Estevão. (1981), *Muxarabis e balcões*, In: *Arquitetura Civil II*. Ministerio de Educação e Cultura/IPHAN/FAU-USP, São Paulo, S. 47 ff
- [9] Lima, Oliveira. (1908), *D. João VI no Brasil*, Editora, Rio de Janeiro
- [10] Hue, Jorge de Souza. (1999), *Uma visão da arquitetura colonial no Brasil*, Editora Agir, Rio de Janeiro
- [11] Costa, Lúcio. (1981), *Documentação Necessária*, in: *Arquitetura Civil II*. MEC/IPHAN/FAU-USP. São Paulo, S. 89 ff
- [12] Prefeitura de Rio de Janeiro (Hrsg.). (2000), *Guia da Arquitetura Eclética no Rio de Janeiro*, Editora Casa da Palavra, Rio de Janeiro
- [13] Prefeitura de Rio de Janeiro (Hrsg.). (1997), *Guia da Arquitetura Art Déco no Rio de Janeiro*, Editora Index, Rio de Janeiro
- [14] Prefeitura de Rio de Janeiro (Hrsg.), (2000), *Guia da Arquitetura Moderna no Rio de Janeiro*, Editora Casa da Palavra, Rio de Janeiro
- [15] Yeang, Ken. (1992), *The Architecture of Malaysia*, Verlag Pepin van Roojen, Amsterdam
- [16] Cavalcanti, Lauro. (2001), *Quando Brasil era Moderno – Guia de Arquitetura 1928 – 1960*, Aeroplano Editora, Rio de Janeiro
- [17] Niemeyer, Oscar. (2000), *Minha arquitetura*, Editora Revan, Rio de Janeiro

- [18] Laar, Michael. (2001), *Brise Soleil – classical elements of tropical modernism*, in: Lamberts et al. (Ed.) Kongressband 7th International Building Performance Simulation Association Conference. Rio de Janeiro, 13-15 August 2001, S. 1321-1328
- [19] Mindlin, Henrique. (1999), *Arquitetura moderna no Brasil*, Aeroplan Editora, Rio de Janeiro
- [20] Latorraca, G. (Ed.) (1999), *João Filgueiras Lima, Lelé*, Instituto Lina Bo e P.M. Bardi/São Paulo; Editorial Blau, Lissabon
- [21] Tzonis, Lefaivre & Stagno. (2001), *Tropical Architecture Critical Regionalism in the Age of Globalization*, Wiley-Academy, Großbritannien
- [22] Aynsley, R., Edmonds, I. (1997), *Daylighting in the Tropics*, in: Artikel vorgestellt an der Tagung IEA Task 21 - 5th Experts Meeting, 28. Oktober, QUT, Brisbane, 9 Seiten
- [23] Hopkinson, R.G., Petherbridge, P., Longmore, J. (1966), *Daylighting*, Verlag Heinemann, London
- [24] ASHRAE (1993), *Fundamentals Handbook* (SI)
- [25] Littlefair, P.J. (1985), *The luminous efficacy of daylight: A review*. *Lighting Research and Technology* 17.4, S. 162-182
- [26] DIN 5034 - *Tageslicht in Innenräumen*. Beuth Verlag. Berlin
- [27] Majoros, András (1998), *Daylighting*, PLEA Notes 4. Brisbane
- [28] Laar, M. *Daylighting in the Tropics– an Evaluation of Sky Luminance, Glare Perception and Veiling Reflections on VDTs in the Tropics*, in Pereira et al (Eds), *Proceedings of the 18th International Conference on passive and low energy architecture PLEA*, Florianopolis, November 7th to 9th, 2001, pp. 179 - 183
- [29] Baker, N., Fanchiotti, A., Steemers, K. (Ed.). (1993), *Daylighting in Architecture – A European Reference Book*, James & James (Science Publishers) Ltd, London
- [30] Roy, G., Ruck, N., Reid, G., Winkelmann, F., Julian, W. (1995), *The Development of Modelling Strategies for Whole Sky Spectrums under Real Conditions for International Use*, University of Sydney, Murdoch University/Australien
- [31] Corbella, Oscar. (1995), *Reconstrução e análise de dados de radiação solar e horas de brilho solar para a cidade de Rio de Janeiro*. *Anais do III Encontro Nacional/I Encontro Latino-Americano de Conforto no Ambiente Construído*. Gramado/Brasilien, S. 167 - 172f
- [32] Corbella, Oscar. (1997), *Sky luminosity categorization for Rio de Janeiro City, Brazil*, *International Journal of Lighting Research and Technology*, CIBSE Volume 29, Number 2, London, S. 69 - 79
- [33] Gonzalez, Eduardo; Hinz, Elke; De Oteiza, Pilar; Quiros, Carlos. (1986), *Proyecto, Clima y Arquitectura*, Band 2, Universidad de Zulia/Venezuela Ediciones G.Gili, S.A. De C.V., Ciudad de México
- [34] Mascaró, de, Lucía. R. (1983), *luz, clima e arquitetura*, Editora Nobel, São Paulo
- [35] Lam, William M. (1985), *Sunlighting as Formgiver for Architecture*, Van Nostrand Reinold Company, New York

- [36] Hentschel, H.-J. (1988), *Licht und Beleuchtung*, 3. Auflage, Hüthig-Verlag, Heidelberg
- [37] ABNT (Hrsg.) (1992). *NBR 5413 - Iluminância de interiors*
Associação de Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro
- [38] EN 12464 (Entwurf) (2000) – *Beleuchtung von Arbeitsstätten*
European Committee for Standardization. Brüssel
- [39] Baresch, C., Skiba, M. (o.A.) *Shell Solar Path*. Ruhr-Universität Bochum, Department for Nuclear and New Energy Systems (Software)
- [40] Siteco GmbH. *SiVIEW 5.7d(c)*. Licht-Simulationssoftware
- [41] Illuminating Engineering Society (Hrsg.) (1984). *IES lighting handbook, reference volume*. Illuminating Engineering Society of North America. New York
- [42] AS 1680.2.0 - Australian Standard. (1990), *Interior lighting Part 2.0: Recommendations for specific tasks and interiors*. Australien
- [43] Bartenbach, Christian, Witting, Walter. (1999), *Visuelle Belastung bei Bildschirmarbeit*, Bartenbach Lichtlabor GmbH. Aldrans/Innsbruck
- [44] DIN 33403 (1988), *Klima am Arbeitsplatz und in der Arbeitsumgebung*. Beuth-Verlag. Berlin
- [45] Kaase, H., Aydinli, S., Jakobiak, A. (2001), *Tageslichtnutzung in Gebäuden*, Bericht zum Forschungsprojekt. TU Berlin
- [46] Nazzal, A. Ali. (2001), *A new daylight glare evaluation method – Introduction of the monitoring protocol and calculation method*,
Energy and Buildings 33, S. 257 – 265
- [47] Hubbuch, Markus (1997), *Erkenntnisse aus dem DIANE-Projekt Tageslichtnutzung*, in: Forum Tageslichtnutzung in Gebäuden am 20. März 1997 – Dokumentation. Energieagentur NRW. Wuppertal
- [48] Ward, Gregory J. (1992), *Radiance Visual Comfort Calculation*
LESO-EPFL
<http://radsite.lbl.gov/radiance/refer/Notes/glare.html> (9.3.2002)
- [49] Guth, Sylvester (1963), *A Method for Evaluation of Discomfort Glare*, Journal of the Illuminating Engineering Society, Mai 1963, S. 351 – 364
- [50] Ward, Gregory. *Tools for Lighting Design and Analysis*.
Lawrence Berkeley National Laboratory, Berkeley, Kalifornien/USA
http://www.arch.vuw.ac.nz/papers/bbsc389/2001/pdf_files/the_radiance_lighting_simulation_and_rendering_system.zip (9.3.2002)
- [51] Hesse, J., Müller, T., Stolzenberg, K. (1999), *Blendungsbewertungsverfahren und UGR – System*, Schriftenreihe der Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin, Dortmund-Berlin
- [52] Loe, D.L., Mansfield, K.P. und Rowlands, E. (1994), *Appearance of lit environment and its relevance in lighting design: Experimental study*, Lighting Research and Technology 26(3): S. 119-133

- [53] EN 9241-6 (1998), *Ergonomische Anforderungen für Bürotätigkeiten mit Bildschirmgeräten. Teil 6: Leitsätze für die Arbeitsumgebung*, European Committee for Standardization, Brüssel
- [54] Schierz, Christoph, Sun, Yuan-Yuan, Krueger, Helmut (o.A.), *Komfortable, energie-günstige Beleuchtung mit dynamischem Licht*, Institut für Hygiene und Arbeitsphysiologie, ETH Zürich
- (55) Hertel, Dirk und Renner, Eberhard. (1994), *Eine Lichtquelle mit flexiblem Spektrum*, Vortrag auf dem 9. Bauklimatischen Symposium an der TU Dresden
- (56) NEFF. (1984), *Intensive Tageslichtnutzung in Hochbauten*. Hrsg.: Nationaler Energie-Forschungs-Fond, Zürich
- (57) Fontoyont, Marc. (1997), *Lighting Engineering*, in: Forum Tageslichtnutzung in Gebäuden am 20. März 1997 – Dokumentation. Energieagentur NRW. Wuppertal
- (58) Aizlewood, M.E. (1993), *Innovative daylighting systems: an experimental evaluation*, Lighting Research and Technology, Band 25 Nr.4, S.141-152
- [59] Ward, Gregory. (1994), *The Radiance 2.4 Synthetic Imaging System*, University of California, Berkeley
- [60] Sick, Friedrich (1997), *Tageslichtnutzung (Daylighting)*, in: Marko, Armin Und Braun, Peter (Hrsg.), *Thermische Solarenergienutzung an Gebäuden*, Springer-Verlag, Berlin-Heidelberg
- [61] Fraunhofer-Institut für Bauphysik (Hrsg.) (1999), *Ergebnisse der Software Validierung*, Adeline Newsletter Nr.8, 7. Jahrgang, Fraunhofer-Institut für Bauphysik, Stuttgart 10/1999, S.1f
- [62] Abromeit, A. (2000) *Roughness und Specularity bei "plastic" im sinnvollen Wertebereich*. Fachbereich Technischer Ausbau, Universität Karlsruhe
http://www.fbta.uni-karlsruhe.de/radiance/hilfe/mat+func/rough_spec/plastic_spec.html (9.3.2002)
- [63] Rubin, Mike (2001), *Window 4.1 Optical Data Library #11.2*, Windows and Daylighting Group, Lawrence Berkeley National Laboratory, Berkeley/Kalifornien
- [64] Abromeit, A. *Material „glass“*. (2000)
 Fachbereich Technischer Ausbau, Universität Karlsruhe
www.fbta.uni-karlsruhe.de/radiance/hilfe/mat+func/glass.html (9.3.2002)
- [65] Hopkinson, R.G. (1952), *Lighting: daylighting a hospital ward*. Architects Journal, Vol. 115, S. 2973 ff
- [66] Laar, Michael. (2001), *Daylighting systems for the tropics – the example of Laser Cut Panels (Australia) and Plexiglas Daylight (Germany)*. in: Lamberts et al. (Ed.) Kongressband 7th International Building Performance Simulation Association Conference. Rio de Janeiro, 13-15 August 2001, S. 1329-1333
- [67] Greenup, Edmonds, Compagnon. (2000), *RADIANCE algorithm to simulate laser cut panel redirecting elements*, Lighting Research and Technology, Vol. 32, Nr. 2, S. 49 – 54
- [68] Burton, Simon (Ed.). (2001), *Energy Efficient Office Refurbishment*, James & James Ltd., London

- [69] Recknagel, Sprenger, Schramek (2001), *Taschenbuch für Heizung + Klimatechnik*, 70. Auflage, Oldenbourg Industrieverlag, Oldenburg
- [70] Schierz, Ch. (1995), *Grundlagen der Photometrie*, Skript für das Nachdiplomstudium Arbeit und Gesundheit; Institut für Hygiene und Arbeitsphysiologie, ETH Zürich
- [71] DIN 277. (1987). *Grundflächen und Rauminhalte von Bauwerken im Hochbau*. Beuth Verlag. Berlin
- [72] Voss, K., Löhnert, G., Wagner, A. (2001), *Energieeffizienz und Solarenergienutzung im Nichtwohnungsbau – Konzepte und Bauten* Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE, Freiburg
- [73] Siteco (1997), *Siview 5.2 für AutoCAD 14*. Referenzhandbuch Siteco, Traunreut
- [74] Ward, G., Shakespeare, R. (1998), *Rendering with Radiance*. Morgan Kaufmann Publishers, Inc., San Francisco
- [75] Compagnon, R. (1997), *RADIANCE – a simulation tool for daylighting systems*, The Martin Centre for Architectural and Urban Studies, University of Cambridge – Department of Architecture, Cambridge
- [76] Pilkington (1997), *Glass*, Produktordner, Pilkington UK Ltd., England
- [77] Herzog, Thomas. (1992), *„Glaspalast“ mit neuartigem Paneel-System*, DBZ, München, S. 1303-1308

Anhang I

I.1. Weitere Grundeinstellungen im Programm Siview/RADIANCE

Über eine Reihe von Variablen kann die Genauigkeit der Simulationen eingestellt werden. Dabei gilt es, einen Kompromiss zwischen der notwendigen Genauigkeit und einer angemessenen Rechenzeit zu finden. Es werden für die Beleuchtungsstärkemessungen folgende Einstellungen verwendet:

-ps	4	-sj	1
-pt	0.1	-st	0.01
-pj	0.7	-ab	8
-dj	0.7	-aa	0.15
-ds	0.1	-ar	128
-dt	0.05	-ad	512
-dc	0.5	-as	256
-dr	4	-lr	12
-dp	1024	-lw	0.0005

Diese Werte garantieren eine sehr hohe Genauigkeit, die angesichts der Raumtiefe und der damit verbundenen Mehrfachreflexionen notwendig ist. Um diese Einstellungen in Siview zu ermöglichen, wurde nach Angaben des Autors eine spezielle Siview-Version von Siteco programmiert und zur Verfügung gestellt.

Für die Berechnung der Leuchtdichtebilder und der Bilder zur Visualisierung der Beleuchtungssituation wurden folgende Werte verwendet:

-ps	4	-sj	0.7
-pj	0.7	-ab	4/8
-dj	0.0	-aa	0.2
-ds	0.15	-ar	64
-dt	0.125	-ad	512
-dc	0.5	-as	128
-dr	1	-lr	4
-dp	512	-lw	0.1

Die gewählten Werte entsprechen der Siview–Original-Einstellung für beste Qualität.

Diese Werte generieren etwas weniger exakte Werte, was sich aber in erster Linie bei Mehrfachreflexionen und damit in der Raumtiefe bemerkbar macht. Da die Bilder jedoch die Situation an der Fassade darstellen und zudem die Rechenzeit damit massiv gesenkt werden kann, erscheint dieser Kompromiss akzeptabel. Die von Lawrence Berkeley National Laboratories (LBNL) vorgegebenen Werte für hohe Genauigkeit werden teilweise etwas unterschritten, teilweise werden höhere Werte verwendet. Die Firma Siteco, Hersteller von Siview, begründet dieses mit einer mit zahlreichen eigenen Versuchen durchgeführten Optimierung der Relation Genauigkeit/Zeit.

I.2. Optimierung der Wahl des Ambiance Value – eine kritische Betrachtung

Zur Einstellung des Wertes $-av$ (ambiance value) wurden eigene Tests in Zusammenarbeit mit Siteco durchgeführt. Dieses wurde notwendig, da in der einschlägigen Literatur eine weite Bandbreite von möglichen Werten angegeben wird: auf der Radiance-homepage wird mit dem Wert $-av = 0$, im Siview-Handbuch mit 0.1 [128] und bei Ward et al [129] mit Werten von 1 – 4 gearbeitet. Simulationsläufe mit dieser Bandbreite brachte zwar ähnliche Ergebnisse in Fassadennähe, in einer Raumtiefe von 10,0m gab es jedoch Unterschiede bis zum Faktor 5.

Es wurden im folgenden Versuche mit $-ab$ 8 und $-av$ 0 durchgeführt. Durch den sehr hohen Wert für $-ab$ waren hohe Genauigkeiten zu erwarten, auf Kosten längerer Rechenzeiten. Mit der von Campagnon [127] vorgeschlagenen Formel

$$E_{\text{amb}} = E_{\text{amb}} / 179 / \pi \quad (\text{I.1.}) \quad (\text{dabei entspricht } E_{\text{amb}} = -av; E_{\text{amb}} \text{ der Beleuchtungsstärke des Raumes)}$$

wurde nun jeweils für E_{amb} der niedrigste Beleuchtungsstärkewert eingesetzt. Der damit errechnete Wert für $-av$ wurde mit $-ab$ 4 zu Vergleichssimulationen verwendet: die Ergebnisse erzielten in allen Fällen eine sehr hohe Übereinstimmung, die maximale Abweichung betrug 7%, bei deutlich höherer Rechengeschwindigkeit im Vergleich zu $-ab$ 0 und $-av$ 0.

In den folgenden Simulationen wird daher mit einer ersten Simulation (-av 0.1; -ab 4) der niedrigste Beleuchtungsstärkewert abgeschätzt, -av mit der Formel (I.1.) berechnet und die Simulation nochmals mit -ab 4 durchgeführt.

Für die durchgeführten Simulationen wurden diese entwickelte Methodik nicht angewendet. Grund hierfür war das Bestreben, nicht nur eine sehr gute, sondern die bestmögliche Genauigkeit zu erreichen. Es wurden daher die anfangs beschriebenen Parameter verwendet und der damit verbundene größere Zeitaufwand in Kauf genommen.

I.3. Materialien

Wenn nicht anders angegeben, werden bei dem Radiance-Material „plastic“ die Parameter „specularity“ und „roughness“ auf 0.0 (matt, glatt) gesetzt.

I.4. Horizontalbeleuchtungsstärke E_H bei klarem Himmel und Sonne

Die Horizontalbeleuchtungsstärke durch die Sonne E_S , durch den Himmel E_H und durch Sonne und Himmel E_g hängen von der Sonnenhöhe γ_S ab [N2]:

$$E_S = K_S * E_{e0} * \exp(-T_L * \delta_R * m * p/p_0) * \sin \gamma_S * I_x \quad (1)$$

$$E_H = 0,5 * K_H * E_{e0} [\tau_{am} - \exp(-T_L * \delta_R * m * p/p_0)] * \sin \gamma_S * I_x \quad (2)$$

$$E_g = E_S + E_H \quad (3)$$

Hierin bedeuten:

K_S photometrisches Strahlungsäquivalent für die Sonnenstrahlung in Abhängigkeit von der Sonnenhöhe γ_S

$$= (17,72 + 4,4585 * \gamma_S - 8,7563 * 10^{-2} * \gamma_S^2 + 7,3948 * 10^{-4} * \gamma_S^3 - 2,167 * 10^{-6} * \gamma_S^4 - 8,4132 * 10^{-10} * \gamma_S^5) \text{ lm} * \text{W}^{-1}$$

K_H photometrisches Strahlungsäquivalent für die Himmelsstrahlung

$$= 125,4 \text{ lm} * \text{W}^{-1}$$

E_{e0} Bestrahlungsstärke der extraterrestrischen Sonnenstrahlung

$$= 1,37 \text{ kW/m}^2$$

$\delta_R * m$ Produkt aus der mittleren optischen Dicke der reinen, trockenen Rayleigh-Atmosphäre und der relativen optischen Luftmasse

$$= (0,9 + 9,4 * \sin\gamma_S)^{-1}$$

p/p_0 Luftdruckkorrektur von $\delta_R * m$

$$= \exp(-H/HR)$$

H Höhe des Ortes über Meeresniveau: für Rio de Janeiro 20 m (Stadtzentrum)

HR = 8.000 m

T_L Trübungsfaktor: für Rio de Janeiro nicht bekannt

τ_{am} Transmissionsgrad der Atmosphäre bezüglich Absorption

$$= (0,506 - 1,0788 * 10^{-2} * T_L) * (1,294 + 2,4417 * 10^{-2} * \gamma_S - 3,973 * 10^{-4} * \gamma_S^2 + 3,8034 * 10^{-6} * \gamma_S^3 - 2,2145 * 10^{-8} * \gamma_S^4 + 5,8332 * 10^{-11} * \gamma_S^5)$$

Anhang II - Auslegungen

Anhang II stellt die trigonometrischen Grundlagen für die Auslegung der einzelnen Tageslichtkontrollsysteme dar. Es wurde dabei Wert darauf gelegt, die Auslegungssystematik so zu gestalten, dass eine Anwendung dieser weltweit durchgeführt werden kann.

II.1. Auslegungskonzept für feststehende Thermobrise

Auslegung der feststehenden vertikalen Elemente

Um den direkten Sonneneinfall durch vertikale Elemente zu vermeiden, gelten für die Lamellenstellung folgende Zusammenhänge:

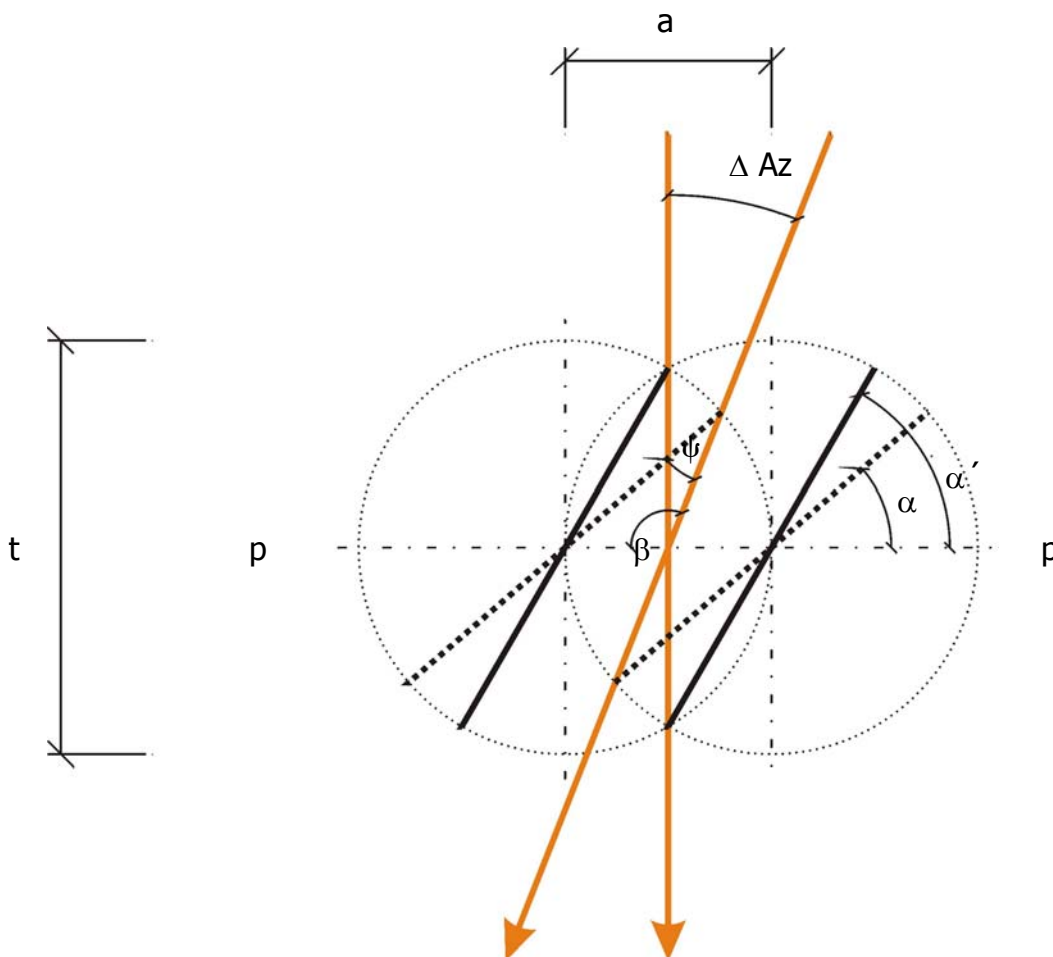


Abbildung II.1. Horizontalschnitt der vertikalen Verschattungselemente (schematisch)

$$\alpha' = \arctan a/t \quad (\text{bei lotrechtem Einfall})$$

und

$$\alpha = 180^\circ - \beta - \psi$$

dabei gilt:

$$\beta = 90^\circ + \Delta Az$$

$$\psi = \arcsin(\sin\beta * a / t)$$

Dabei ist:

- $p - p$ eine Achse parallel zur Fassade durch die „Drehpunkte“ der Verschattungselemente
- t die Tiefe der Verschattungselemente
- a der Abstand des „Drehpunkts“ der Elemente untereinander
- ΔAz die maximale Abweichung des Sonnenazimuts in dem betrachteten Zeitraum von dem senkrechten Lot auf die Fassade; die Zeichnung muss entsprechend der geographischen Lage und der Fassadenorientierung gedreht oder gespiegelt werden.
- α' gibt den Winkel zwischen Fassadenelement und der Parallelen zur Fassade an, der notwendig ist, um bei lotrechtem Sonneneinfall die Verschattung zu gewährleisten
- α gibt den Winkel zwischen Fassadenelement und der Parallelen zur Fassade an, der notwendig ist, um bei Sonneneinfall im Winkel ΔAz die Verschattung zu gewährleisten

II.1.1. Auslegung für eine Westfassade

an dem Standort Rio de Janeiro

$$\Delta Az = 18^\circ \text{ (21.12./18.00, Sommerzeit – kritischster Moment)}$$

$$\Rightarrow \beta = 108^\circ$$

$$\Rightarrow \psi = \arcsin(\sin\beta * \frac{1}{2}) = 28^\circ$$

für $a = \frac{1}{2} t$ (dieses Verhältnis kann max.

$$\Rightarrow \alpha = 44^\circ$$

$a = t$ betragen)

Anmerkung: für eine Ostfassade beträgt $\Delta Az = 16^\circ$ (21.12./8.00, Sommerzeit) betragen

II.2. Auslegungskonzepte für Lichtschwerter

II.2.1. Konzept für interne Lichtschwerter

Um einen direkten Sonneneinfall durch das Oberlicht auszuschließen gilt:
entweder:

$$\gamma_{LSv} < \gamma_S$$

vertikale Komponente (siehe Zeichnung II.2.)

oder

$$(\alpha_F + \alpha_{LSH}) < \alpha_{S(Ost)}$$

horizontale Komponente

$$\text{und } (\alpha_F - \alpha_{LSH}) < \alpha_{S(West)}$$

(unter Berücksichtigung der 360° - Projektion der Himmelsrichtungen, siehe auch Abbildung II.3. und Abbildung II.4.)

Dabei sind:

γ_{LSv} der Winkelbereich, in dem das Lichtschwert vertikal nicht zu einer völligen Ausblendung der Direktstrahlung führt

γ_S die Sonnenhöhe

α_F der Fassadenazimut

α_S der Sonnenazimut

α_{LSH} der Bereich, in dem das Lichtschwert horizontal nicht zu einer völligen Ausblendung der Direktstrahlung führt

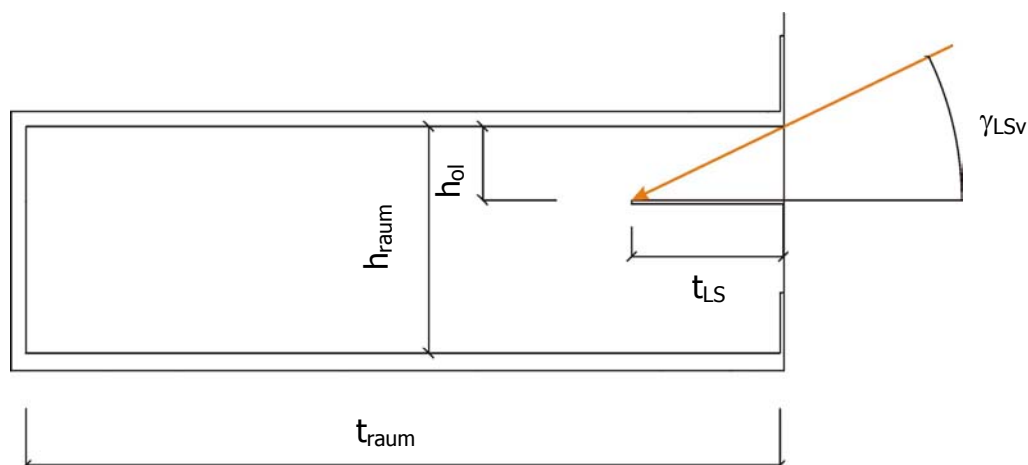


Abbildung II.2. Schnitt vertikal durch Raum mit internem Lichtschwert

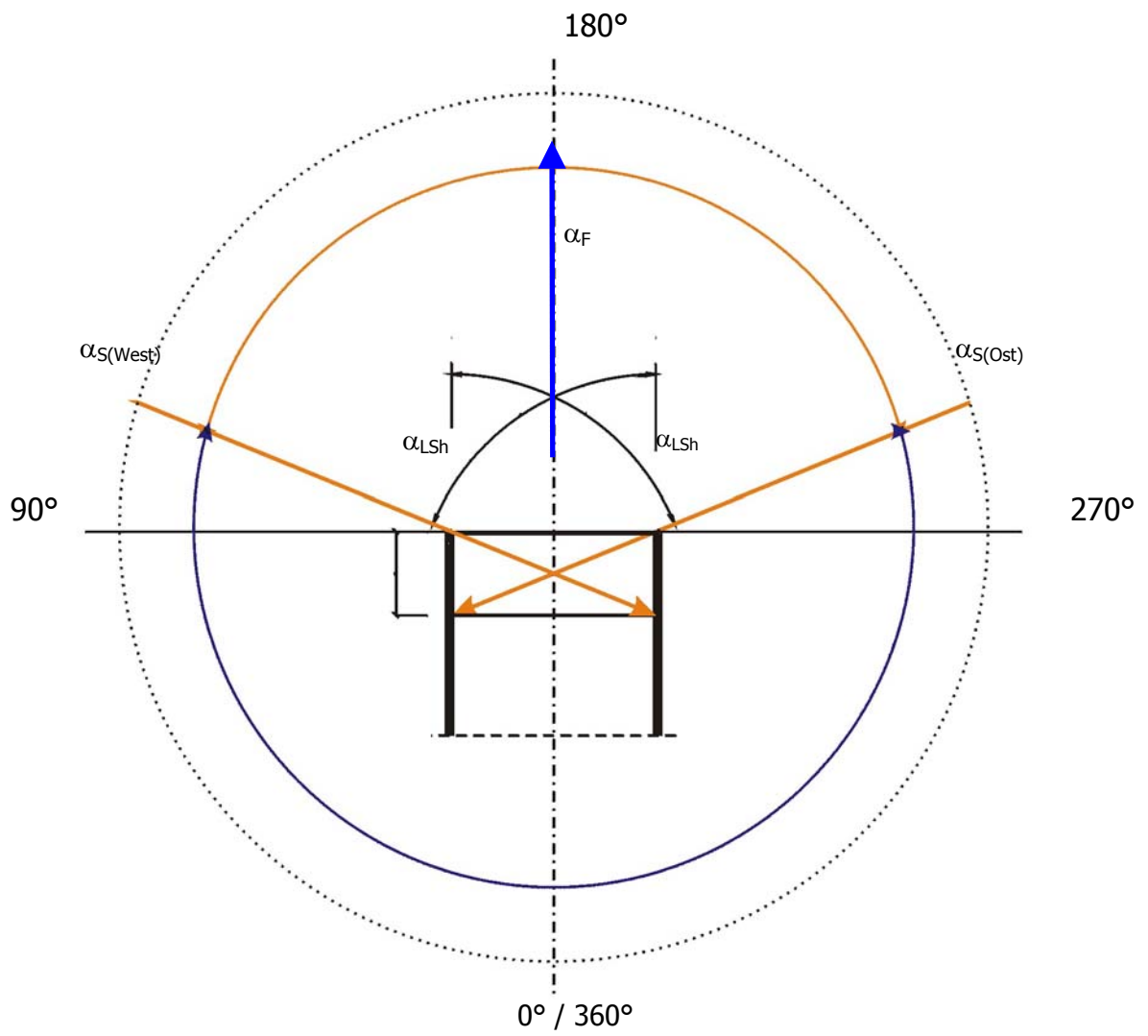


Abbildung II.3. Wirksamer horizontaler Sonnenschutzwinkel eines innenliegenden Lichtschwertes

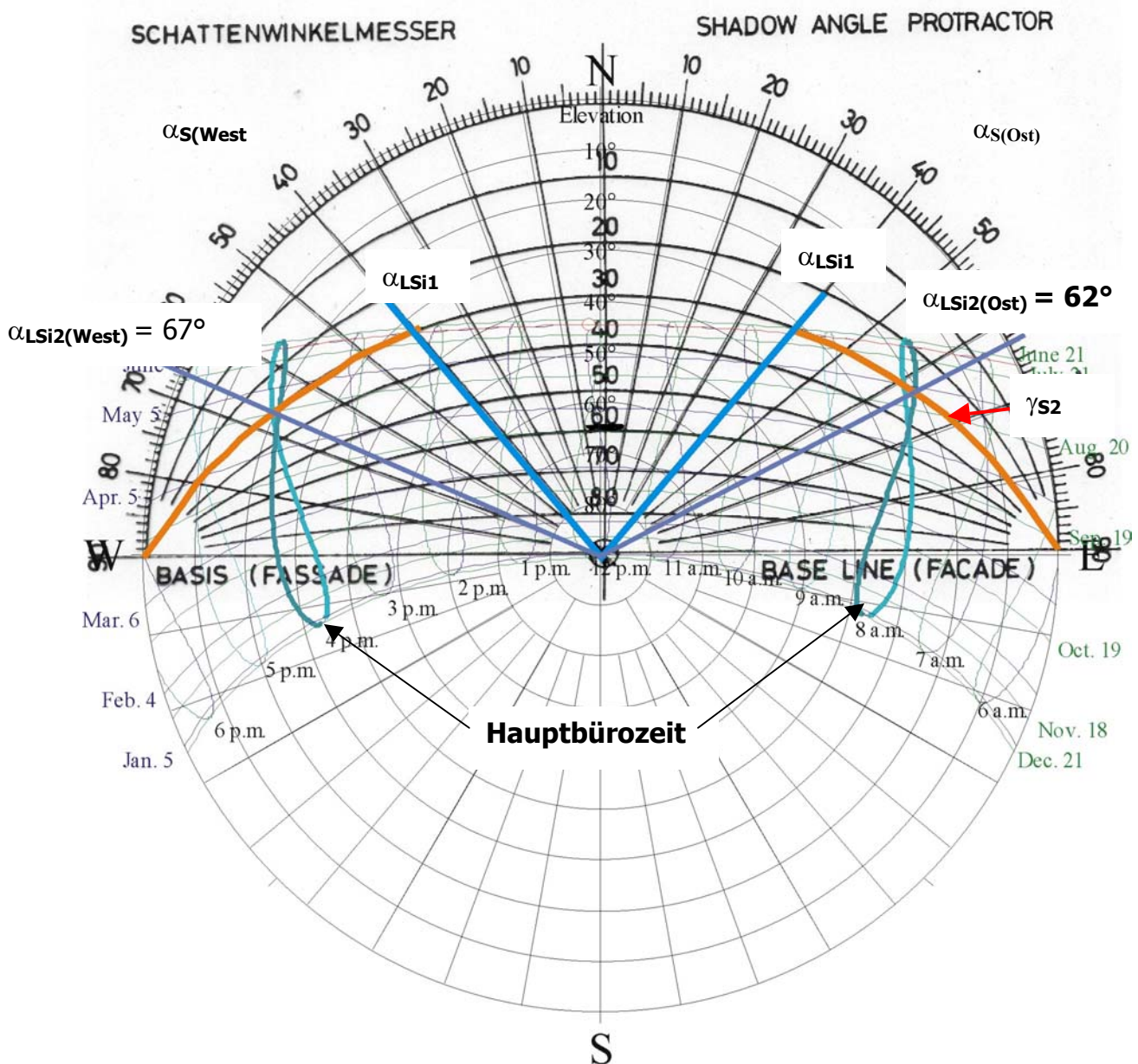


Abbildung II.4. Überlagerung Sonnenstandsdiagramm für Rio de Janeiro (GMT -3.0) und Schattenwinkelmessers für die Auslegung des inneren Lichtschwertes

Dabei ist:

- α_{LSi1} das Paar horizontaler Einfallswinkel, zwischen denen aufgrund des örtlichen Sonnenverlaufs in Verbindung mit der angenommenen horizontalen Verschattungskomponente keine direkte Strahlung in den Raum eindringen kann
- $\alpha_{LSi2}(\text{Ost}/\text{West})$ die horizontalen Einfallswinkel, ab denen aufgrund des örtlichen Sonnenverlaufs in der gewählten Hauptbürozeit und der Tiefe des Lichtschwertes keine direkte Strahlung in den Raum eindringen kann
- γ_{S2} die Sonnenhöhe, ab der die horizontale Verschattungskomponente wirksam wird

Auslegung nach Sonnenhöhe γ_S

Der Winkel γ_{LSv} gibt den Bereich der Sonnenhöhe an, für den das Lichtschwert für die Verschattung nicht effektiv ist. Dieser Winkel ist abhängig von der Höhe des Oberlichtes h_{ol} und von der Tiefe t_{LS} des Lichtschwertes.

$$\gamma_{LSv} = \arctan (h_{ol} / t_{LS})$$

Wird die Tiefe des internen Lichtschwertes nach der vertikalen Komponente der Direktstrahlung (0 Sonnenhöhe γ_S) ausgelegt, so gilt:

$$t_{LS} = h_{ol} / \tan \alpha_{LSv}$$

Auslegung nach Sonnenazimut

Der Winkel α_{LSH} gibt den Bereich des Sonnenazimuts an, für den das Lichtschwert für die Verschattung nicht effektiv ist. Dieser Winkel ist abhängig von der Breite des Raumes b_{raum} und von der Tiefe t_{LS} des Lichtschwertes.

$$\alpha_{LSH} = \arctan (b_{raum} / t_{LS})$$

Wird die Tiefe des internen Lichtschwertes nach der horizontalen Komponente der Direktstrahlung (Sonnen-Azimut) ausgelegt, so gilt:

$$t_{LS} = h_{ol} / \tan \alpha_{LSH}$$

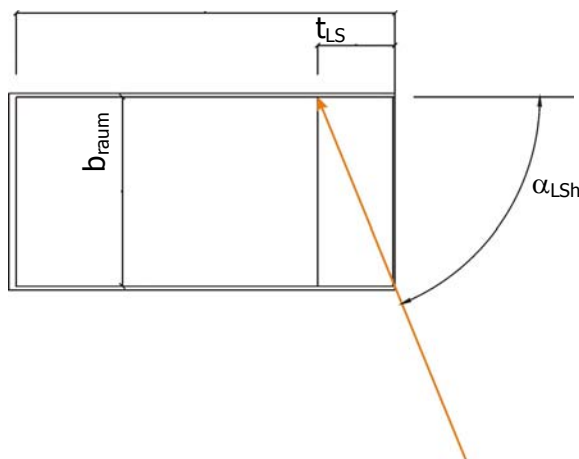


Abbildung II.5. Grundriss des Modellraums mit internem Lichtschwert

Nun würde eine völlige Vermeidung von Direktstrahlung oftmals zu sehr tiefen Lichtschwertern führen. Sinnvoll kann es an dieser Stelle sein, Direktstrahlung, die sich über der Augenhöhe von stehenden Personen (ca. 1,70 m) an der Wand abbildet zuzulassen, insbesondere dann, wenn sich dieser Zustand nur an wenigen Tagen im Jahr einstellt. Als gut handhabbare Methode hat sich eine Überprüfung des Direktlichteinfalls über *rpict* (Siview/Radiance) erwiesen.

II.2.2. Interne Finnen

Bei tiefen Sonnenständen und einer feststehenden Raumbreite würde auf Grund dieser Zusammenhänge ein sehr tiefes Lichtschwert notwendig werden, um direkten Sonneneinfall über einen längeren Zeitraum zu vermeiden.

Um eine zu große Tiefe des Lichtschwertes zu vermeiden, kann man daher interne LS-Finnen anbringen:

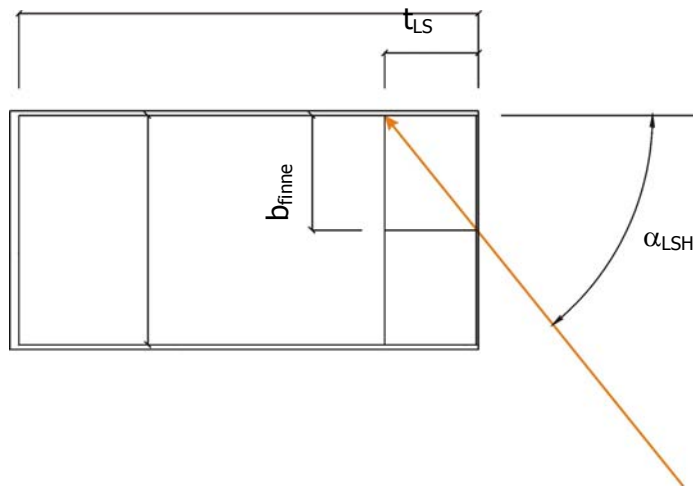


Abbildung II.6. Schnitt horizontal durch Raum mit internem Lichtschwert und einer internen Finne

Der Winkel α_{LSH} verringert sich entsprechend:

$$\alpha_{LSH} = \arctan (b_{finne} / t_{LS})$$

Damit kann auch der Bereich zwischen den Winkeln α_{LSi1} und α_{LSi2} (siehe Abbildung II.6.) gegen direkte Sonneneinstrahlung geschützt werden.

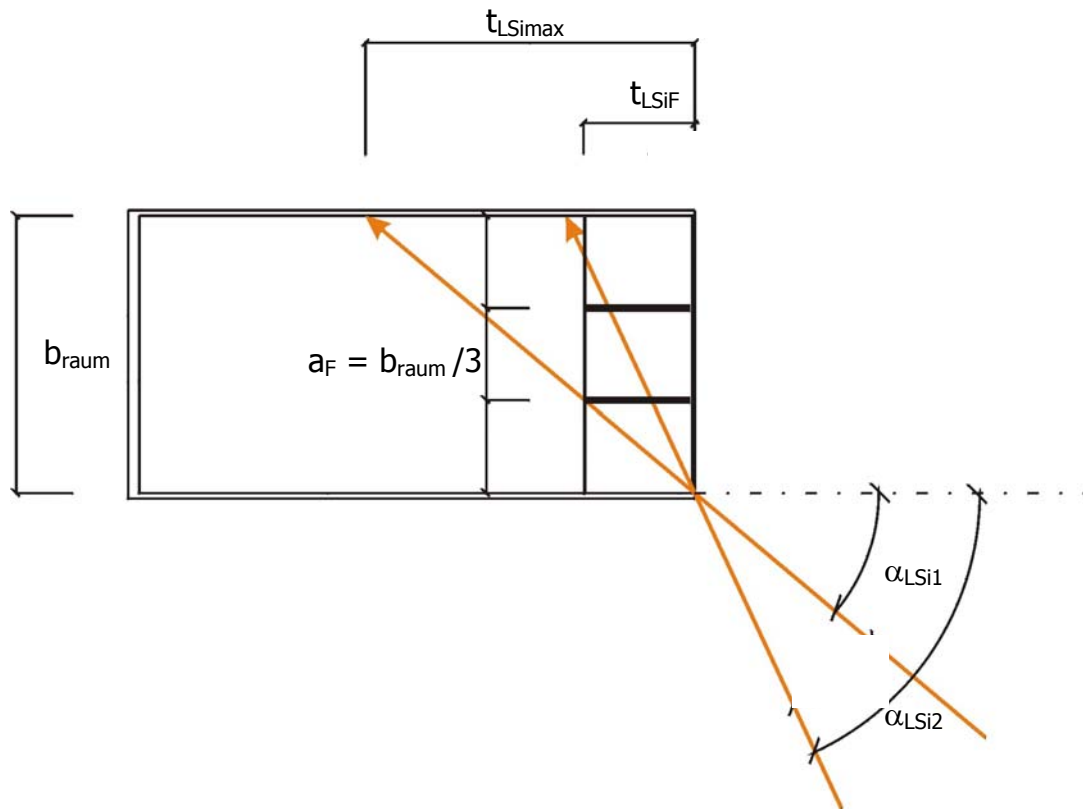


Abbildung II.7. Draufsicht des Modellraumes - Konstruktion der innenliegenden Finnen

Dabei ist:

- t_{LSiMax} die maximale Tiefe des internen Lichtschwertes für den Fall, dass keine Finnen eingesetzt werden
- t_{LSiF} Tiefe der Finnen
- a_F Abstand der Finnen von den Seitenwänden sowie untereinander

Dabei gilt:

$$t_{LSiF} = \tan(90^\circ - \alpha_{LSi1}) * a_F$$

II.2.3. Geneigtes internes Lichtschwert

Verbesserung der Lichtverteilung durch eine Neigung des internen Lichtschwertes:

Um die Raumtiefe besser auszuleuchten, kann es sinnvoll sein, das Lichtschwert leicht zu neigen. Dabei gilt es zu berücksichtigen, dass die lichte Höhe zwischen Fußboden und Unterkante Lichtschwert mindestens 2,0 m, besser 2,1 m beträgt. Durch die Neigung vergrößert sich auch der Winkel γ_{LSv} wie folgt:

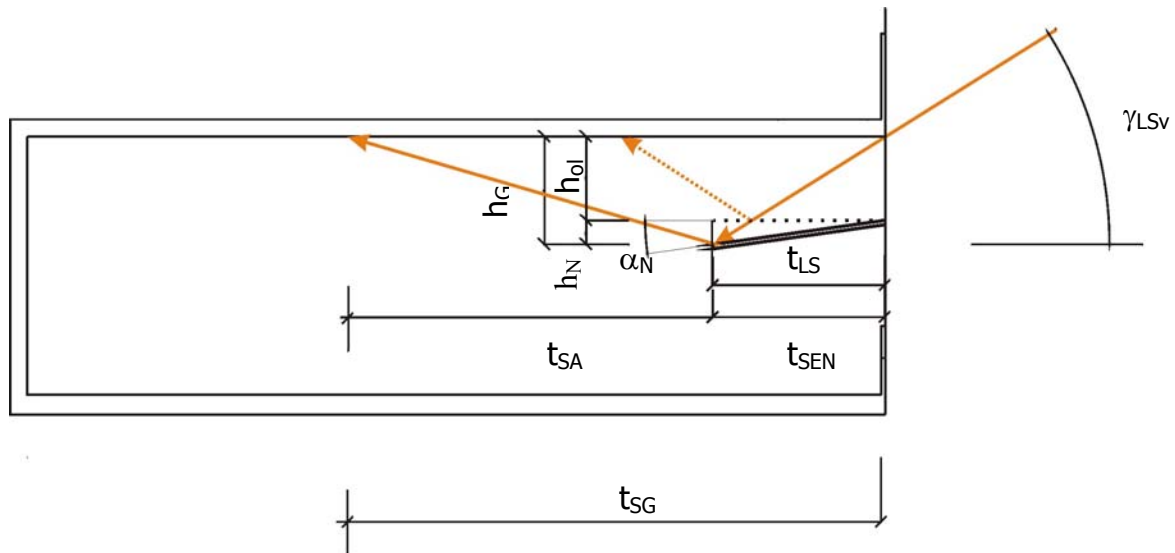


Abbildung II.8. Schnitt vertikal durch Raum mit geneigtem internen Lichtschwert

Es gilt:

$$\gamma_{LSv} = \arctan (h_G / t_{LS})$$

Dabei gilt:

$$h_G = h_N + h_{ol}$$

$$h_N = \tan \alpha_N * t_{LS}$$

Wird die Tiefe des internen Lichtschwertes nach der vertikalen Komponente der Direktstrahlung (= Sonnenhöhe γ_S) ausgelegt, so gilt:

$$t_{LS} = h_G / \tan (\gamma_{LSv} - \alpha_N)$$

Durch die Neigung des Lichtschwertes wird eine bessere Ausleuchtung der Raumtiefe erreicht. Das hat 2 Gründe:

- 1) die relative Größe des Oberlichtes nimmt um h_N zu und
- 2) der Winkel, mit dem der einfallende Strahl vom Lichtschwert reflektiert wird, verringert sich um α_N

Berechnung der Eindringtiefe T_{SG} der Tageslichtreflexion

Für horizontale Lichtschwerter gilt:

$$t_{SG} = t_{SE} + t_{SA} \text{ oder } t_{SG} = 2 * t_{SE}$$

Dabei gilt:

$$t_{SE} = \cot \gamma_S * h_{ol}$$

Dabei bedeuten:

- t_{SG} die maximale horizontale Strecke, die der Strahl von der Fassade über die Reflexion am Lichtschwert zur Decke zurücklegt
- t_{SE} der maximale horizontale Abstand zwischen Fassade und Auftreffpunkt des einfallenden Lichtstrahls auf dem Lichtschwert
- t_{SA} der horizontale Abstand zwischen dem Startpunkt des ausfallenden Lichtstrahls auf dem Lichtschwert und der Decke

Für geneigte Lichtschwerter gilt:

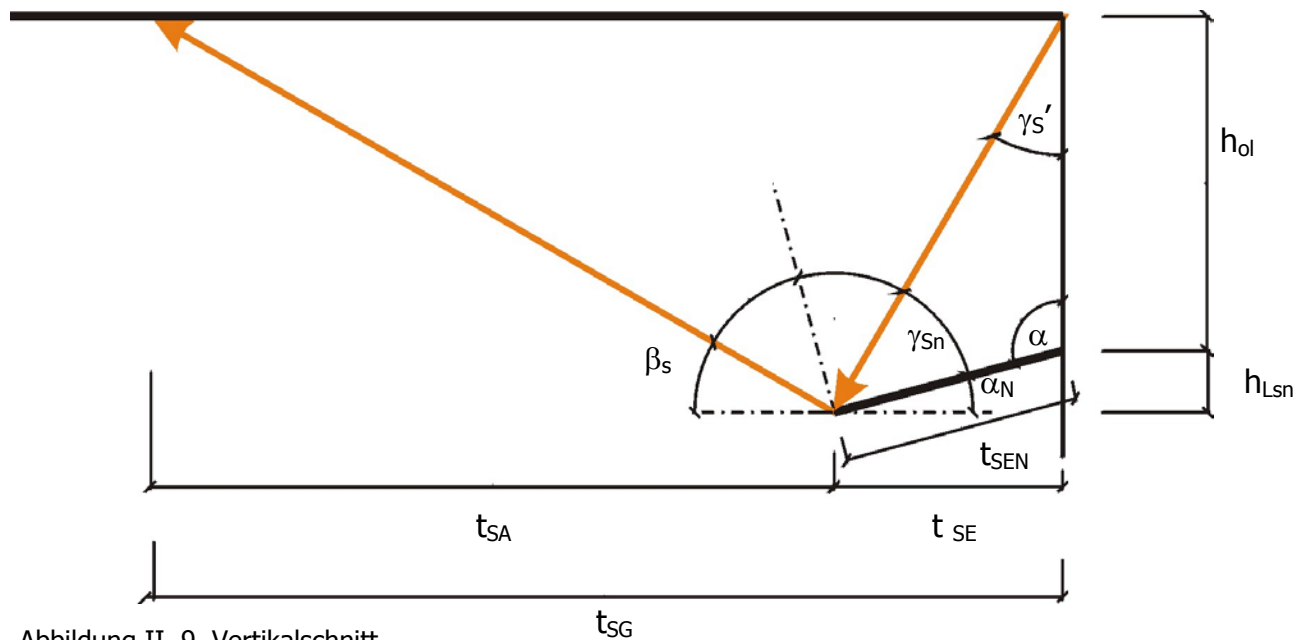


Abbildung II. 9. Vertikalschnitt

Es gilt:

$$h_{ol} / \sin \gamma_{Sn} = t_{SEN} / \sin \gamma_S' \Rightarrow t_{SEN} = h_{ol} / \sin \gamma_{Sn} * \sin \gamma_S'$$

$$t_{SE} = \cos \alpha_N * t_{SEN}$$

Dabei gilt:

$$\gamma_S' = 90^\circ - \gamma_S$$

$$\alpha = 90^\circ + \alpha_N$$

$$\gamma_{Sn} = \gamma_S - \alpha_N$$

$$\beta_s = \gamma_S - 2 * \alpha_N$$

$$h_{Lsn} = \sin \alpha_N * t_{SEN}$$

Für die Tiefe der Raumausleuchtung gilt dann:

$$t_{SG} = t_{SE} + t_{SA}$$

Dabei gilt:

$$t_{SA} = (h_{ol} + h_{Lsn}) / \tan \beta_s$$

II.2.3.1. Auslegung für eine Nordfassade in Rio de Janeiro

Das Lichtschwert wurde für Sonnenhöhen $\geq 30^\circ$ ausgelegt. Die Neigung α_N beträgt 5° . Das Oberlicht hat eine lichte Höhe 0.75 m.

$$t_{SEN} = h_{ol} / \sin \gamma_{sn} * \sin \gamma_{s'} = 0,75\text{m} / \sin 25^\circ * \sin 60^\circ = \underline{\underline{1,54 \text{ m}}}$$

II.2.4. Auslegungskonzept für ein internes und externes Lichtschwert & Jalousie

Schritt 1: Festlegung der Sonnenhöhe, nach der die Kombination ausgelegt werden soll
Dabei wird die im Kapitel „Tageslichtkontrollsysteme“, Abschnitt „Wichtung“ vorgestellte Systematik verwendet:

$$\begin{aligned} & 3 * W_{\gamma_{Sx} (60^\circ)} + 2 * W_{\gamma_{Sx} (120^\circ)} + 1 * W_{\gamma_{Sx} (180^\circ)} + \\ & 1,5 * W_{\gamma_{Sx-10^\circ} (60^\circ)} + 1 * W_{\gamma_{Sx-10^\circ} (120^\circ)} + 0,5 * W_{\gamma_{Sx-10^\circ} (180^\circ)} + \\ & 1,5 * W_{\gamma_{Sx+10^\circ} (60^\circ)} + 1 * W_{\gamma_{Sx+10^\circ} (120^\circ)} + 0,5 * W_{\gamma_{Sx+10^\circ} (180^\circ)} = W_{\gamma_{Sx} \text{ max}} \end{aligned}$$

Schritt 2: Ermittlung des optimalen Neigungswinkels für das äußere Lichtschwert und das innere Lichtschwert

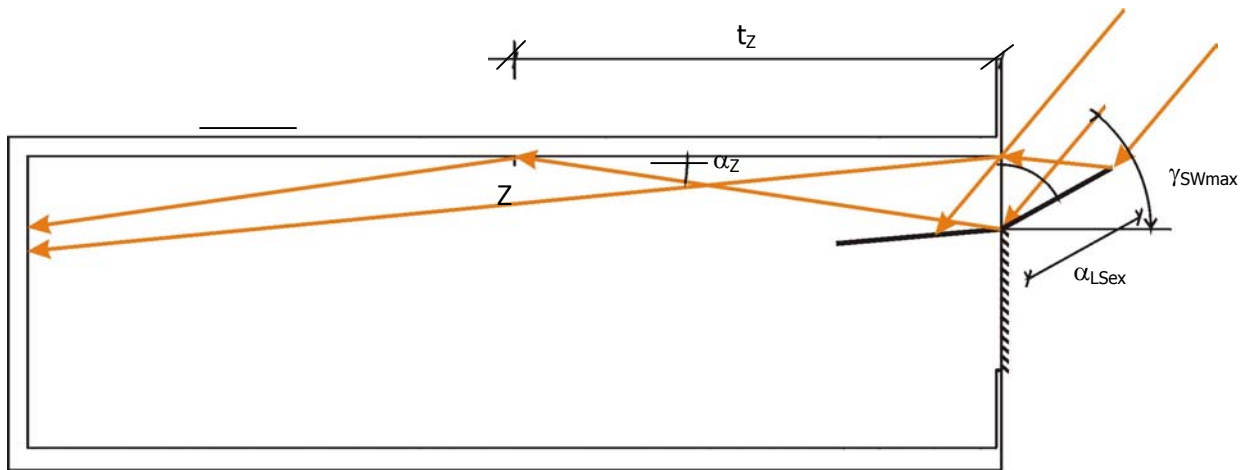


Abbildung II.10. Vertikaler Raumschnitt

Ermittlung des optimalen Neigungswinkels α_{LSex} für das äußere Lichtschwert:

A) Berechnung von Ausfallwinkel mit Bezugsebene Lichtschwert/ 0° :

$$\alpha_{E(LS)} = \alpha_{A(LS)} = \gamma_{SWmax} - \alpha_{LSex} \quad (1)$$

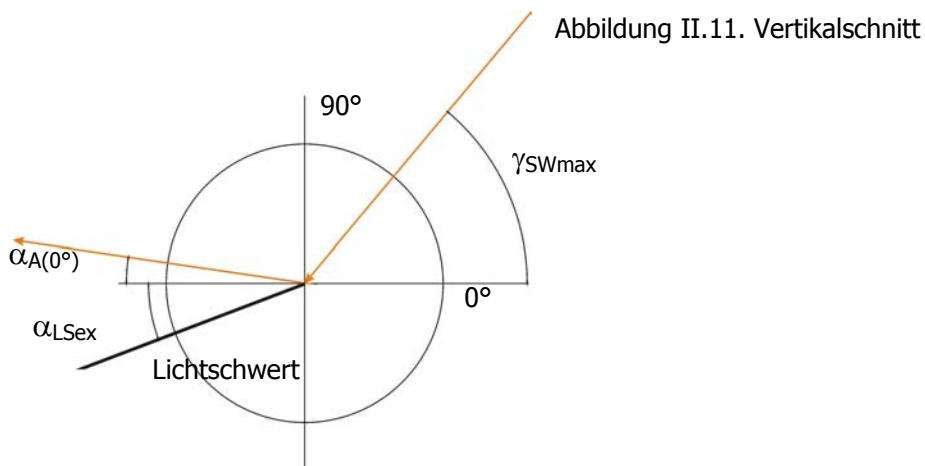
$$\alpha_{A(0^\circ)} = \alpha_{A(LS)} - \alpha_{LSex} \quad (2)$$

(1) in (2), nach α_{LSex} aufgelöst:

$$\alpha_{LSex} = (\gamma_{SWmax} - \alpha_{A(0^\circ)}) / 2 \quad (3)$$

Dabei sind:

- $\alpha_{LSex(0^\circ)}$ optimaler Neigungswinkel für das äußere Lichtschwert
- $\alpha_{E(LS)}$ Einfallswinkel in Relation zum Lichtschwert
- $\alpha_{A(LS)}$ Ausfallswinkel in Relation zum Lichtschwert
- $\alpha_{A(0^\circ)}$ Ausfallswinkel in Relation zur Nullebene



B) Festlegung des gewünschten Ausfallswinkels $\alpha_{A(0^\circ)}$:

Der Ausfallswinkel $\alpha_{A(0^\circ)}$ ist mit dem „Zielwinkel“ α_Z identisch.

Dabei gilt:

$$\alpha_Z = \arctan (h_{OL} / t_Z)$$

Dabei ist:

α_Z	Winkel zwischen dem Zielpunkt Z und der Unterkante des Oberlichtes
h_{OL}	Höhe des Oberlichtes
t_Z	Distanz zwischen dem Zielpunkt Z und dem Oberlicht

Der Zielpunkt Z wird in dieser Anwendung in der Raummitte angenommen, um so den rückwärtigen Raum für eine verbesserte Tageslichtsituation zu sorgen. Aufgrund des hohen Reflexionsgrades der rückwärtigen Wand ist eine gute diffuse Tageslichtverteilung zu erwarten. Der Zielpunkt Z könnte aber auch durch Deckenreflektoren definiert sein, die die Tageslichtsituation an bestimmten Arbeitsflächen verbessern. Diese Festlegung ist projektspezifisch.

Tiefe des Lichtschwertes t_{Lsex} :

Die Tiefe des äußeren Lichtschwertes t_{Lsex} beeinflusst die Menge des reflektierten Lichtes und verschattet das Oberlicht bei niedrigen Sonnenhöhen gegen Direktstrahlung sowie generell gegen einen Teil der indirekten Strahlung (Diffusstrahlung).

Die in der Abbildung II.12. angegebene Tiefe t_{Lsex} ergibt sich aus der maximalen Wirksamkeit der Lichtschwertes bei der Sonnenhöhe γ_{SWmax} , d.h. eine von der Oberkante des Oberlichtes in dem Winkel α_Z nach außen abfallende Linie begrenzt die Tiefe des Lichtschwertes. Mit dieser Festlegung wird erreicht, dass das Lichtschwert das im Winkel γ_{SWmax} einfallende Licht exakt in das Oberlicht reflektiert. Wäre das Lichtschwert tiefer, so würde eine Teil der Strahlung auf die Fassade reflektiert. Wäre das Lichtschwert weniger tief, so würde die Fläche des Oberlichtes nicht vollständig für die Tageslichtumlenkung genutzt.

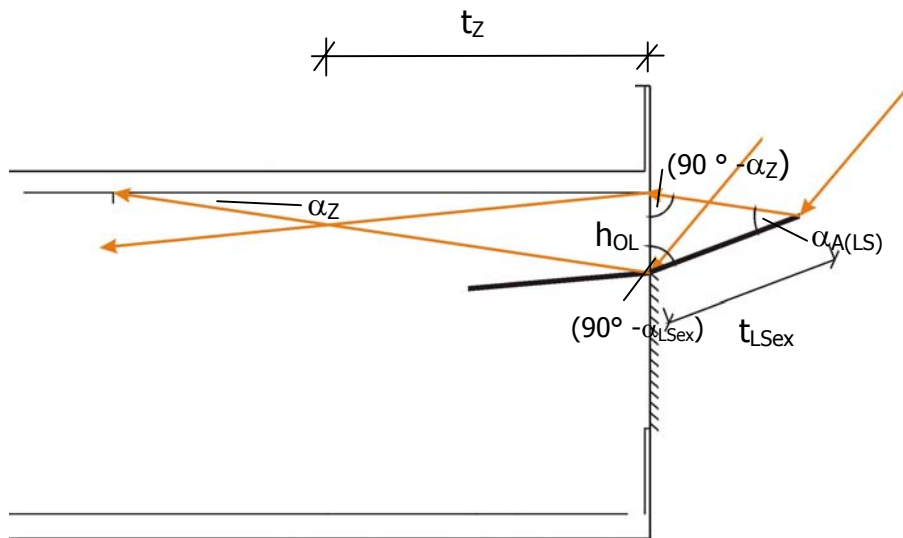


Abbildung II.12. Trigonometrische Festlegung der Tiefe des Lichtschwertes

Nach dem Sinussatz gilt:

$$t_{LSex} = h_{OL} / \sin \alpha_{A(LS)} * \sin (90^\circ - \alpha_Z)$$

II.2.5. Auslegungskonzept für das interne Lichtschwert in Verbindung mit einem externem Lichtschwert

Für die Auslegung des internen Lichtschwertes gilt es, einen Kompromiss zwischen maximal möglicher Neigung (tiefe Raumausleuchtung) und der Funktion des Blendschutzes zu finden. Es ist ferner eine Durchgangshöhe von ca. 2,10 m freizuhalten.

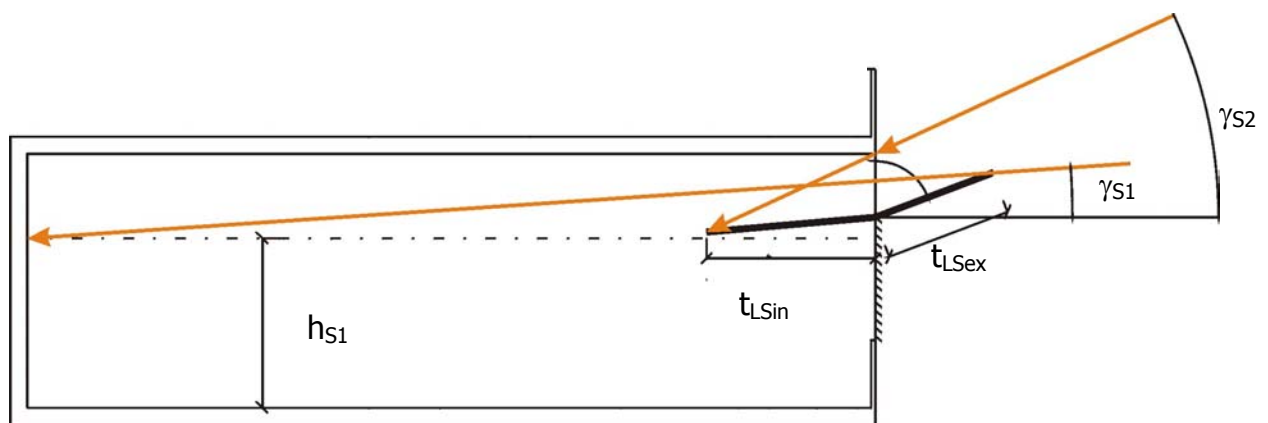


Abbildung II.13. Vertikalschnitt durch Modellraum

Dabei sind:

- γ_{S1} Sonnenhöhe, unter der keine direkte Strahlung in den Raum einfallen kann, die unter der Höhe h_{S1} auftreffen würde
- γ_{S2} Sonnenhöhe, über der keine direkte Strahlung in den Raum einfallen kann
- h_{S1} Höhe im Raum, die von direkter Strahlung freizuhalten ist; hierfür werden 2,00 m angenommen

II.2.6. Internes Lichtschwert mit integrierten Finnen

Will man nun den Bereich zwischen den Winkeln α_{LS1} und α_{LS2} gegen direkte Sonneneinstrahlung schützen, so wird der Einsatz von LS-Finnen notwendig.

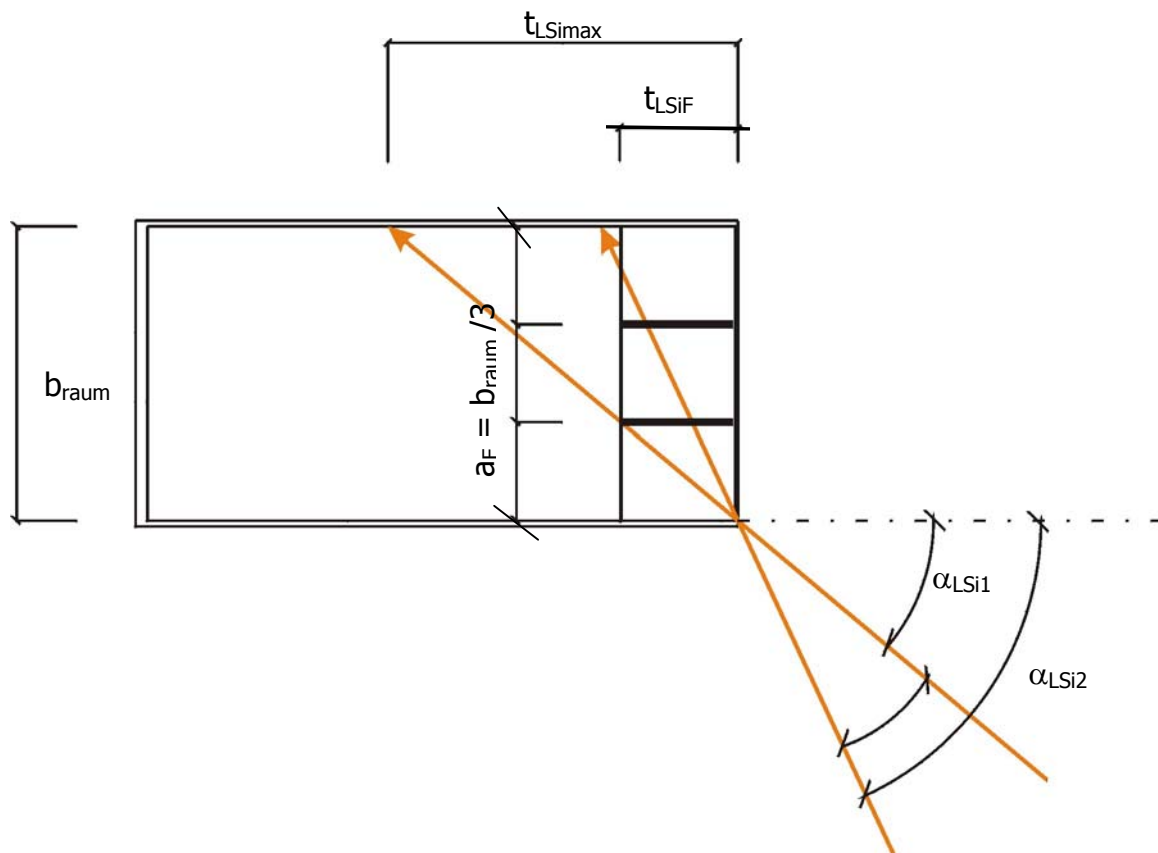


Abbildung II.14. Draufsicht des Modellraumes - Konstruktion der innenliegenden Finnen

Dabei ist:

- t_{LSimax} die maximale Tiefe des internen Lichtschwertes für den Fall, dass keine Finnen eingesetzt werden
- t_{LSiF} Tiefe der Finnen
- a_F Abstand der Finnen von den Seitenwänden sowie untereinander

Dabei gilt:

$$t_{LSiF} = \tan(90^\circ - \alpha_{LSi1}) * a_F$$

II.2.7. Auslegung für eine unverschattete Nordfassade in Rio de Janeiro: internes und externes Lichtschwert & Jalousien

Schritt 1: Festlegung der Sonnenhöhe, nach der die Kombination ausgelegt werden soll

Dabei wird die im Kapitel „Tageslichtkontrollsysteme“, Abschnitt „Wichtung“ vorgestellte Systematik verwendet:

$$3 * W_{\gamma_{Sx}(60^\circ)} + 2 * W_{\gamma_{Sx}(120^\circ)} + 1 * W_{\gamma_{Sx}(180^\circ)} +$$

$$1,5 * W_{\gamma_{Sx-10^\circ}(60^\circ)} + 1 * W_{\gamma_{Sx-10^\circ}(120^\circ)} + 0,5 * W_{\gamma_{Sx-10^\circ}(180^\circ)} +$$

$$1,5 * W_{\gamma_{Sx+10^\circ}(60^\circ)} + 1 * W_{\gamma_{Sx+10^\circ}(120^\circ)} + 0,5 * W_{\gamma_{Sx+10^\circ}(180^\circ)} = W_{\gamma_{Sx \max}}$$

Die Auswertung ergibt folgende Werte:

γ_{Sx}	90°	80°	70°	60°	50°	40°	30°	20°	10°
$W_{\gamma_{Sx}}$	567	1219	1888	2901	<u>3694</u>	3049	1777	993	525

Tabelle II.1. Ergebnisse der gewichteten Sonnenhöhenwahrscheinlichkeit $W_{\gamma_{Sx}}$ für eine unverschattete Nordfassade in Rio de Janeiro

Die Sonnenhöhe γ_{SWmax} , die im Jahresverlauf am häufigsten auftritt, ist $\gamma_{SWmax} = 50^\circ$.

Festlegungen für das Fallbeispiel:

- γ_{S2} 30°
- α_N 0°

b_{raum}	5,0 m
α_{LSi1}	40° (siehe Sonnenstandsdiagramm, Grafik II.4.)
α_{LSi2}	62° (siehe Sonnenstandsdiagramm, Grafik II.4.)
l_{LSi}	Länge des internen Lichtschwertes

Berechnung des Neigungswinkels des externen Lichtschwertes α_{Lsex} :

Es liegen folgende Parameter vor:

$$t_z = 5,00 \text{ m}; h_{\text{OL}} = 0,75 \text{ m}; \gamma_{\text{SWmax}} = 50^\circ$$

für α_{Lsex} ergibt sich daher ein Wert von 20,75°

Berechnung des Tiefe des externen Lichtschwertes t_{Lsex} :

Es gelten die gleichen Parameter:

für t_{Lsex} ergibt sich daher ein Wert von 1,52 m

Berechnung der Tiefe t_{LSi} des internen horizontalen Lichtschwertes:

$$0,75 \text{ m} / \tan 30^\circ = \underline{1,30 \text{ m}}$$

Berechnung der Tiefe der LS-Finnen:

$$t_{\text{LSiF}} = \tan(90^\circ - 40^\circ) * 5,0 \text{ m} / 3 = \underline{1,99 \text{ m}}$$

Die Tiefe der internen Finnen würde damit fast 2 m betragen.

II.2.8. Auslegungskonzept: Kombination internes und externes Lichtschwert, externe Finnen und eine Sonnenblende

Schritt 1: Verschattung durch das externe Lichtschwert

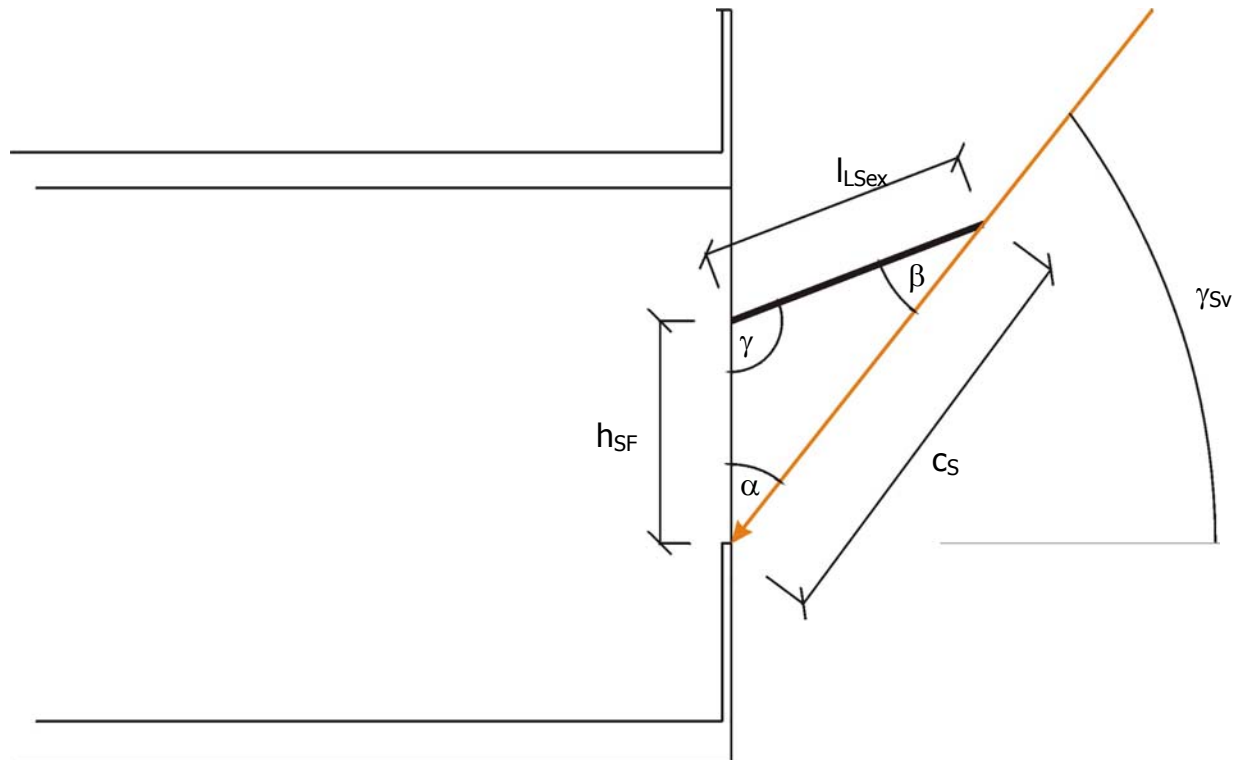


Abbildung II.15. Vertikalschnitt Fassade

Nach dem Cosinussatz gilt:

$$c_S^2 = l_{LSex}^2 + h_{SF}^2 - 2 l_{LSex} * h_{SF} * \cos \gamma$$

$$\cos \alpha = (h_{SF}^2 + c_S^2 - l_{LSex}^2) / (2 * h_{SF} * c_S)$$

$$\gamma_{Sv} = 90^\circ - \alpha$$

Dabei ist:

l_{LSex} die Länge des Lichtschwertes

h_{SF} die Höhe des Sichtfensters (Brüstung – Lichtschwert)

γ Neigungswinkel des Lichtschwertes + 90°

γ_{Sv} Sonnenhöhe, über der das Fensterfenster vollständig verschattet wird

Schritt 2: Berechnung der Sonnenblende

in vielen Fällen ist die Verschattung durch geneigte Lichtschwerter gering und es würde bei niedrigeren Sonnenhöhen entweder direkte Strahlung einfallen oder sehr enge Abstände zwischen den Finnen erzwingen. Daher ist man in vielen Fällen gezwungen, Sonnenblenden einzusetzen.

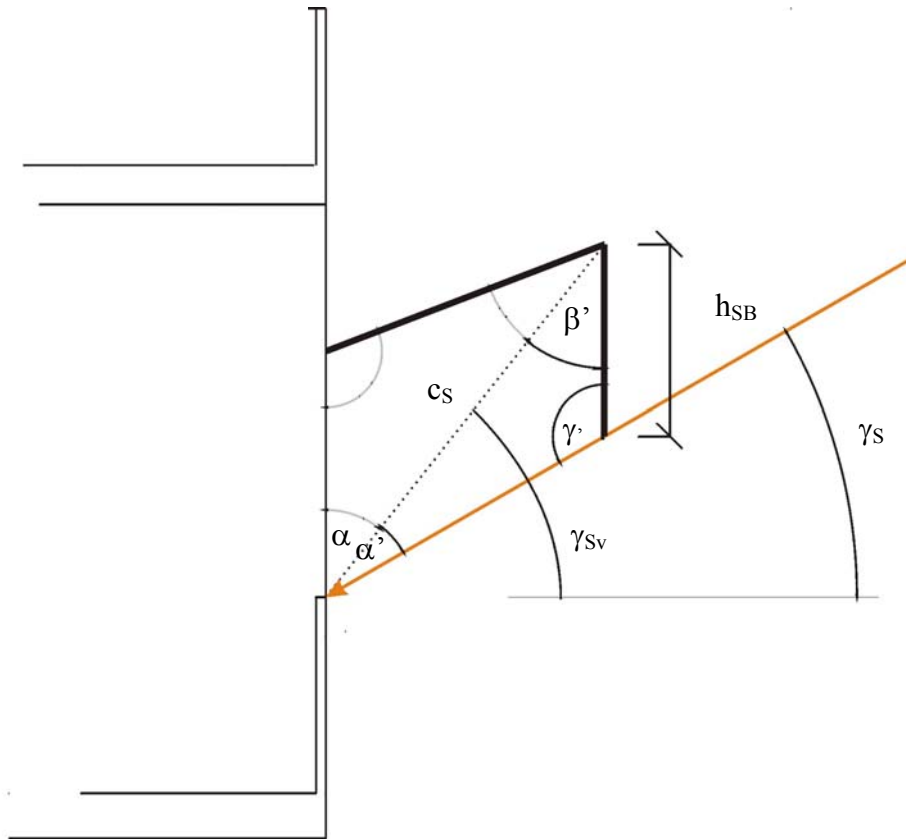


Abbildung II.16. Berechnung der Sonnenblende

Dabei ist:

h_{SB} die Höhe des Sonnenblende
 γ_{Smin} Sonnenhöhe, für die ausgelegt wird

Es gilt:

$$\alpha' = \gamma_{Sv} - \gamma_S$$

$$\beta' = \alpha \quad (\text{wenn Blende parallel zu Fassade!})$$

$$\gamma' = 180^\circ - \alpha' - \beta'$$

$$c_S / \sin \gamma' = 2r \quad (1)$$

$$h_{SB} / \sin \alpha' = 2r \quad (2)$$

(2) in (1), nach h_{SB} aufgelöst:

$$h_{SB} = c_S /' \sin \gamma' * \sin \alpha \quad (3)$$

Anmerkung: die Sonnenblenden sollten aus einem teiltransparenten Material angefertigt werden, das zwar direkte Sonnenstrahlung ausschließt, gleichzeitig aber Diffusstrahlung durchlässt und somit zu harte Schatten und Leuchtdichtekontraste vermeidet.

Schritt 3: Berechnung der Finnen

Aus der Überlagerung des Sonnenstandsdiagramms und dem Schattenwinkelmesser (Grafik II.4.) lässt sich über die bisher ermittelten Werte das Winkelpaar α_{LSi1} ablesen. Dieser Winkel bestimmt die Länge der Finnen in Abhängigkeit ihres Abstandes untereinander.

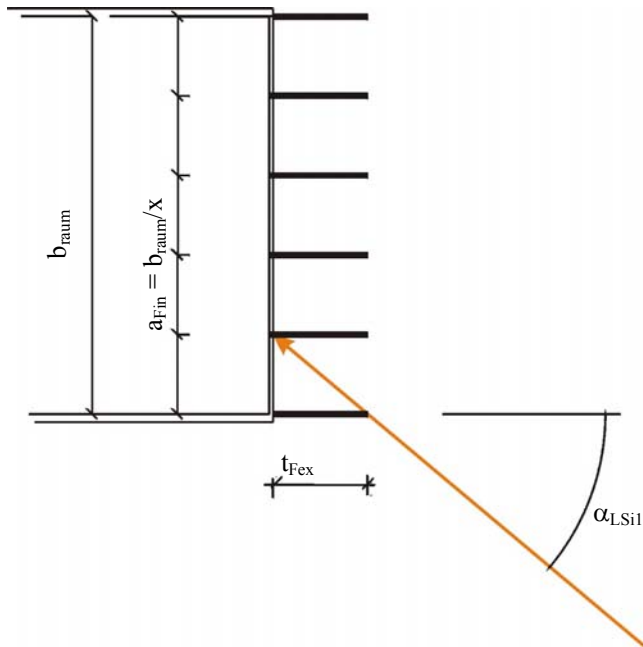


Abbildung II.17. Grundrissausschnitt des Modellraums

$$t_{\text{Fex}} = a_{\text{Fin}} / \tan \alpha_{\text{LSi1}}$$

$$a_{\text{Fin}} = b_{\text{raum}}/x$$

Dabei ist:

x Anzahl der Finnen (-1) pro Bezugsbreite

II.2.9. Auslegung für die Kombination internes und externes Lichtschwert, externen Finnen und Sonnenblende für eine Nordfassade

Schritt 1:

l_{Lsex}	1,52 m
h_{SF}	1,25 m (die Brüstungshöhe wurde für diese Anwendung von 0,8m auf 1,0m vergrößert, um die Höhe der notwendigen Sonnenblende zu begrenzen und somit einen freien Blick bis zu einer Höhe von 1,6m zuzulassen. Die Differenz in der Brüstungshöhe lässt keinen spürbaren Unterschied in der Tageslichtnutzung erwarten)
γ	111°

$$c_s^2 = 1,52^2 + 1,25^2 - 2 \cdot 1,52 \cdot 1,25 \cdot \cos 111^\circ = 5,24$$

$$\Rightarrow c_s = 5,23^{1/2} = \underline{2,29 \text{ m}}$$

$$\cos \alpha = (1,25^2 + 2,29^2 - 1,52^2) / 2 \cdot 1,25 \cdot 2,29 = 0,79$$

$$\gamma_{\text{Sv}} = 90^\circ - \arccos \alpha = \underline{51,8^\circ}$$

$$\alpha = 38,2^\circ$$

Schritt 2: Berechnung der Sonnenblende

Festlegung: $\gamma_{\text{Smin}} = 30^\circ$

$$\alpha' = 51,8^\circ - 30^\circ = 21,8^\circ$$

$$\beta' = \alpha = 38,2^\circ$$

$$\gamma' = 180^\circ - 21,8^\circ - 38,2^\circ = 120^\circ$$

nach (3):

$$h_{\text{SB}} = 2,29 \text{ m} / \sin 120^\circ \cdot \sin 21,8^\circ = \underline{0,98 \text{ m}}$$

Die Ausführung der Sonnenblende hängt von verschiedenen Faktoren wie zum Beispiel der Neigung und der Tiefe des äußeren Lichtschwertes ab. Die in Zeichnung II.18. zu sehende Ausbildung ist das Ergebnis mehrerer Simulationsläufe.

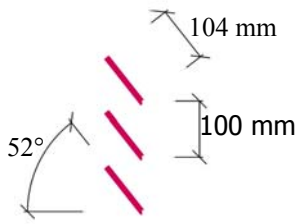


Abbildung 5.18. Detailausschnitt horizontale Sonnenblende

Schritt 3: Berechnung der Finnen

Vorgabe: $x = 5$; $\alpha_{LSi1} = 40^\circ$ (siehe Grafik II.4.)

$$t_{Fex} = 5,0\text{m} / 5 / \tan 40^\circ = \underline{1,19\text{ m}}$$

II.3. Auslegungskonzept geneigter LCPs in Verbindung mit internem Lichtschwert & Jalousien

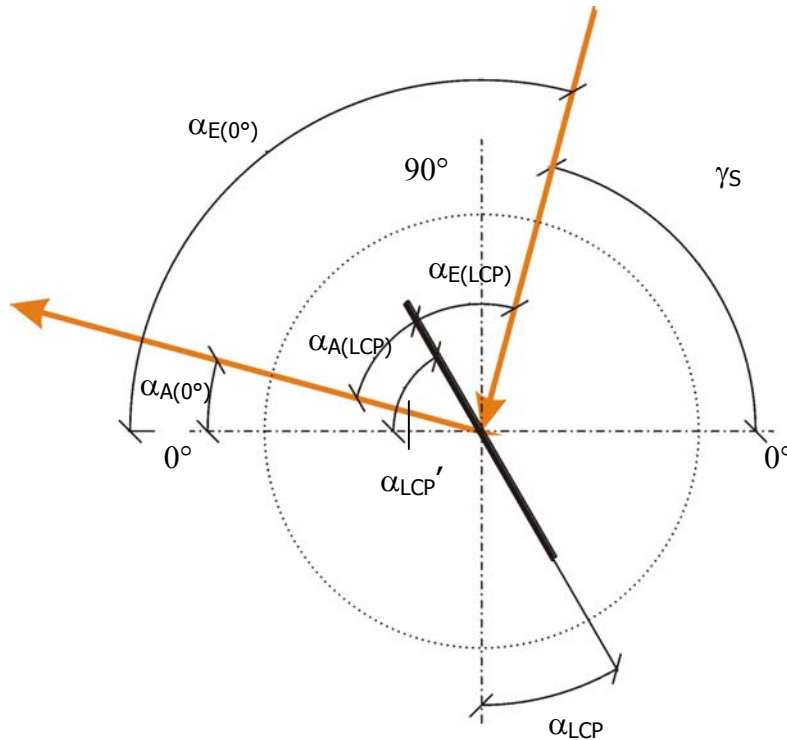


Abbildung II.19. Vertikalschnitt

Für den Ausfallwinkel $\alpha_{A(0^\circ)}$ gilt:

$$\alpha_{A(0^\circ)} = \alpha_{LCP'} - \alpha_{A(LCP)} \quad (1)$$

$$\alpha_{E(0^\circ)} = 180^\circ - \gamma_S \quad (2)$$

$$\alpha_{E(LCP)} = \alpha_{E(0^\circ)} - \alpha_{LCP'} \quad (3)$$

$$\alpha_{A(LCP)} = \alpha_{E(LCP)} \quad (4)$$

$$\alpha_{LCP} = 90^\circ - \alpha_{LCP'} \quad (5)$$

(2) und (3) in (1):

$$\alpha_{A(0^\circ)} = 2 * \alpha_{LCP'} + \gamma_S - 180^\circ$$

Optimierung der Neigung

Bei einer Neigung des Panels gilt es jedoch zu berücksichtigen, dass diese begrenzt werden muss, um Blenderscheinungen zu vermeiden.

Es gilt:

$$\alpha_{A(0^\circ)} \geq 0$$

Die Begrenzung des Ausstellwinkels wird durch den niedrigsten zu erwartenden Sonnenstand festgelegt.

Es gilt:

$$\alpha_{LCP}' \leq (180^\circ - \gamma_{Smin}) / 2$$

oder

$$\alpha_{LCP} \leq 90^\circ - ((180^\circ - \gamma_{Smin}) / 2)$$

Eine Möglichkeit die Neigung zu optimieren ist die Auslegung nach der Sonnenhöhenhäufigkeit γ_{SWmax} .

Auslegungsmethodik

Schritt 1: Festlegung der Sonnenhöhe, nach der die Kombination ausgelegt werden soll

Dabei wird die im Kapitel „Tageslichtkontrollsysteme“, Abschnitt „Wichtung“ vorgestellte Systematik verwendet:

$$\begin{aligned} & 3 * W_{\gamma_{Sx}(60^\circ)} + 2 * W_{\gamma_{Sx}(120^\circ)} + 1 * W_{\gamma_{Sx}(180^\circ)} + \\ & 1,5 * W_{\gamma_{Sx-10^\circ}(60^\circ)} + 1 * W_{\gamma_{Sx-10^\circ}(120^\circ)} + 0,5 * W_{\gamma_{Sx-10^\circ}(180^\circ)} + \\ & 1,5 * W_{\gamma_{Sx+10^\circ}(60^\circ)} + 1 * W_{\gamma_{Sx+10^\circ}(120^\circ)} + 0,5 * W_{\gamma_{Sx+10^\circ}(180^\circ)} = W_{\gamma_{Sx max}} \end{aligned}$$

Schritt 2: Ermittlung des optimalen Neigungswinkels für die Neigung des LCP

A) Festlegung des gewünschten Ausfallswinkels $\alpha_{A(0^\circ)}$:

Der Ausfallswinkel $\alpha_{A(0^\circ)}$ ist mit dem „Zielwinkel“ α_Z identisch.

Dabei gilt:

$$\alpha_Z = \arctan (h_{OL} / t_Z)$$

Dabei ist:

α_Z	Winkel zwischen dem Zielpunkt Z und der Unterkante des Oberlichtes
h_{OL}	Höhe des Oberlichtes

t_z

Distanz zwischen dem Zielpunkt Z und dem Oberlicht

Der Zielpunkt Z wird in dieser Anwendung in der Raummitte angenommen, um so im rückwärtigen Raum für eine verbesserte Tageslichtsituation zu sorgen. Aufgrund des hohen Reflexionsgrades der rückwärtigen Wand ist eine gute diffuse Tageslichtverteilung zu erwarten. Der Zielpunkt Z könnte aber auch durch Deckenreflektoren definiert sein, die die Tageslichtsituation an bestimmten Arbeitsflächen verbessern. Diese Festlegung ist projektspezifisch.

B) Berechnung der Neigung des LCP aus α_Z und γ_{Smin}

Es gilt:

$$\alpha_Z = \alpha_{A(0^\circ)} \quad \text{und} \quad \alpha_{E(0^\circ)} = \gamma_{SWmax}$$

$$\alpha_Z + \gamma_{SWmax} + \alpha_{E(LCP)} + \alpha_{A(LCP)} = 180^\circ$$

$$\alpha_{E(LCP)} = \alpha_{A(LCP)} = \frac{1}{2} * (180^\circ - \alpha_Z - \gamma_{SWmax})$$

$$\alpha_{LCP} = 90^\circ - (\alpha_Z + \alpha_{A(LCP)})$$

Schritt 3: Überprüfung des maximalen Neigungswinkels:

$$\alpha_{LCP} \leq 90^\circ - ((180^\circ - \gamma_{Smin}) / 2)$$

II.3.1. Auslegung für eine unverschattete Nordfassade in Rio de Janeiro: geneigtes LCP mit internem Lichtschwert & Jalousien

Schritt 1:

Die Auswertung ergibt folgende Werte:

γ_{Sx}	90°	80°	70°	60°	50°	40°	30°	20°	10°
$W_{\gamma_{Sx}}$	567	1219	1888	2901	<u>3694</u>	3049	1777	993	525

Tabelle II.2. Ergebnisse der nach der gewichteten Sonnenhöhenwahrscheinlichkeit für eine unverschattete Nordfassade in Rio de Janeiro

Die Sonnenhöhe γ_{SWmax} , die im Jahresverlauf am häufigsten auftritt, ist $\gamma_{SWmax} = 50^\circ$.

Schritt 2: Ermittlung des optimalen Neigungswinkels für die Neigung des LCP

A) Festlegung des gewünschten Ausfallswinkels $\alpha_{A(0^\circ)}$:

Es liegen folgende Parameter vor:

$$t_z = 5,00 \text{ m}; h_{OL} = 0,75 \text{ m}; \gamma_{SWmax} = 50^\circ$$

für α_z ergibt sich daher ein Wert von 8,5°

B) Berechnung der Neigung des LCP aus α_z und γ_{Smin}

$$\alpha_{LCP} = \underline{\underline{29,3^\circ}}$$

Schritt 3: Überprüfung des maximalen Neigungswinkels:

$$\alpha_{LCP} \leq 90^\circ - ((180^\circ - \gamma_{Smin}) / 2)$$

Die Auslegung des inneren Lichtschwertes wurde für einen tiefsten Sonnenstand $\gamma_{Smin} = 30^\circ$ vorgenommen.

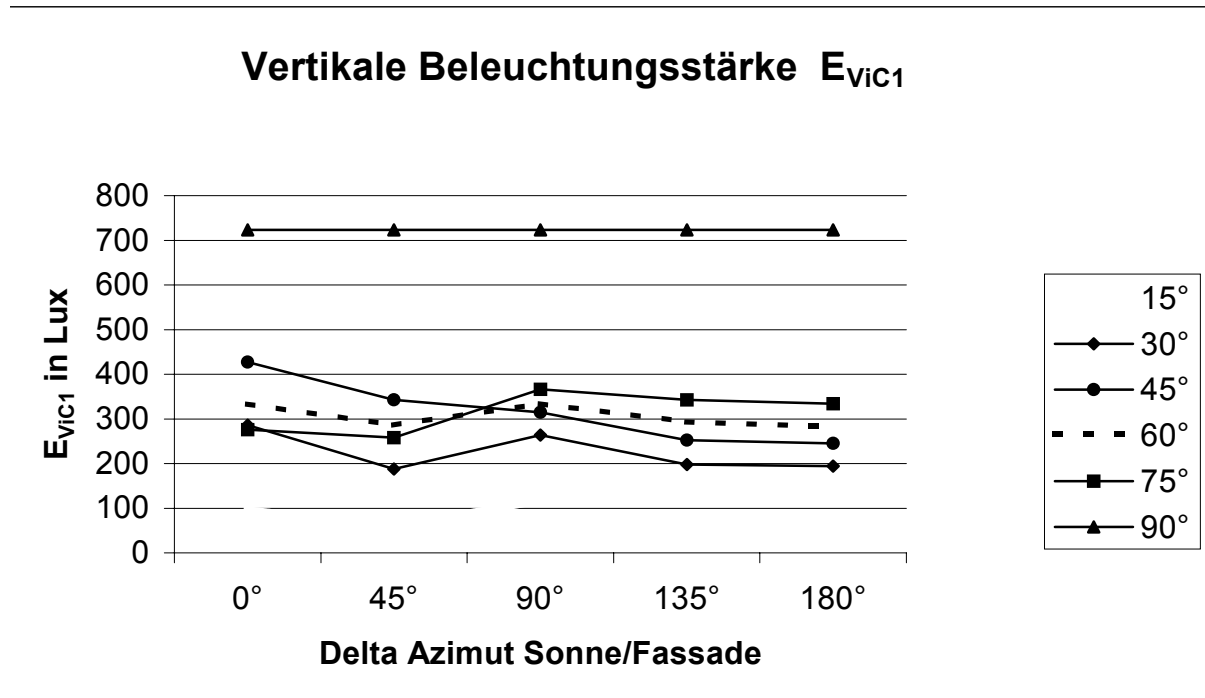
Damit ergibt sich für die maximal zulässige Neigung des LCPs:

$$\alpha_{LCP} \leq 15^\circ$$

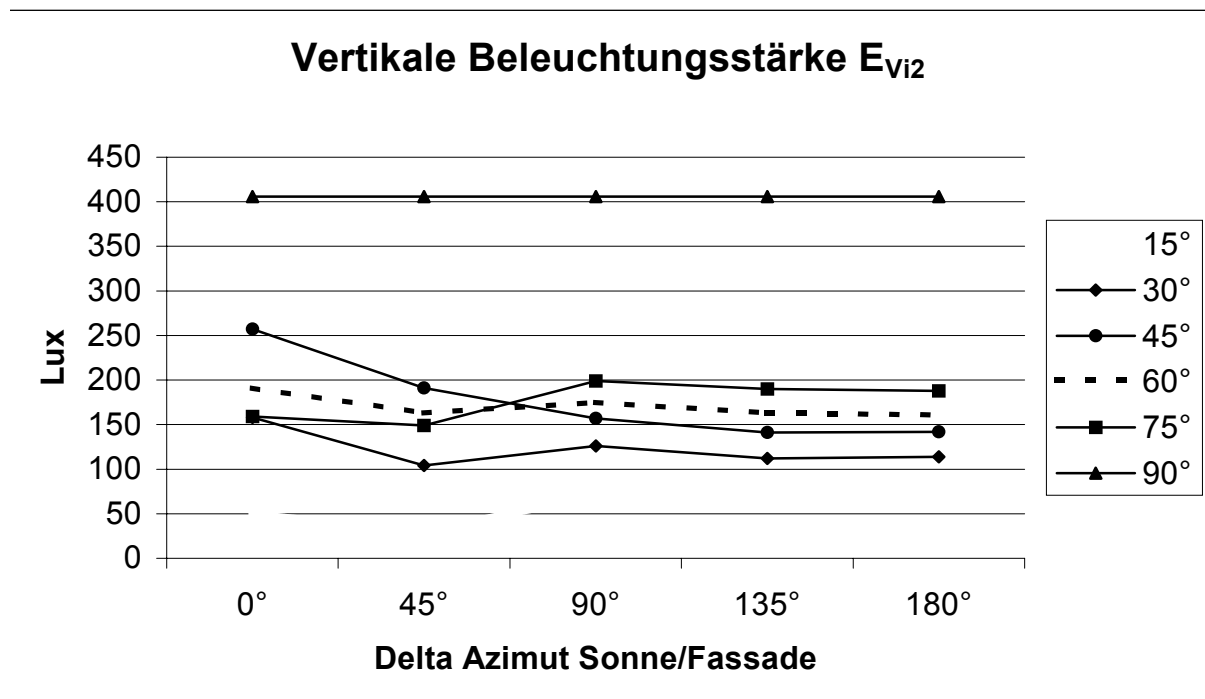
Für die folgenden Simulationen wird als Neigungswinkel dem entsprechend $\alpha_{LCP} = 15^\circ$ eingesetzt.

Anhang III – Vertikale Beleuchtungsstärke am Bildschirm

III.1. Sonnenschutzglas $\tau_{vis} = 10\%$ mit geregelter Jalousie

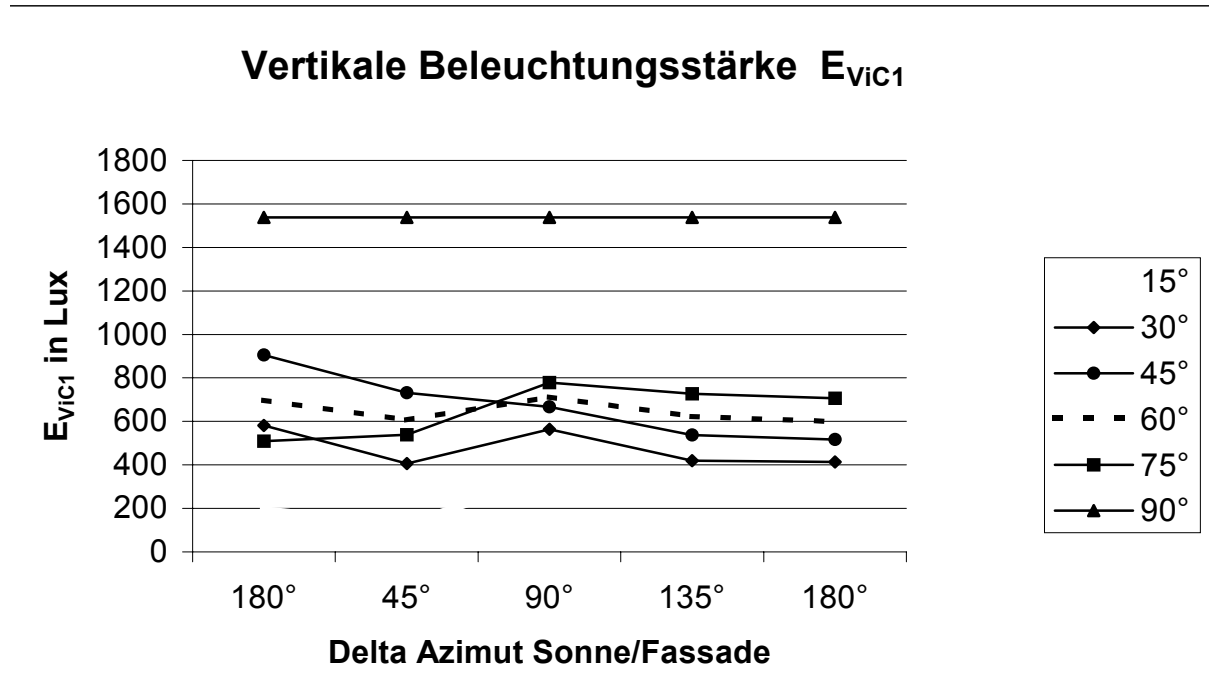


Grafik III.1. Sonnenschutzglas mit $\tau_{vis} = 10\%$ mit geregelten Jalousien, Beleuchtungsstärke E_{VIC1}

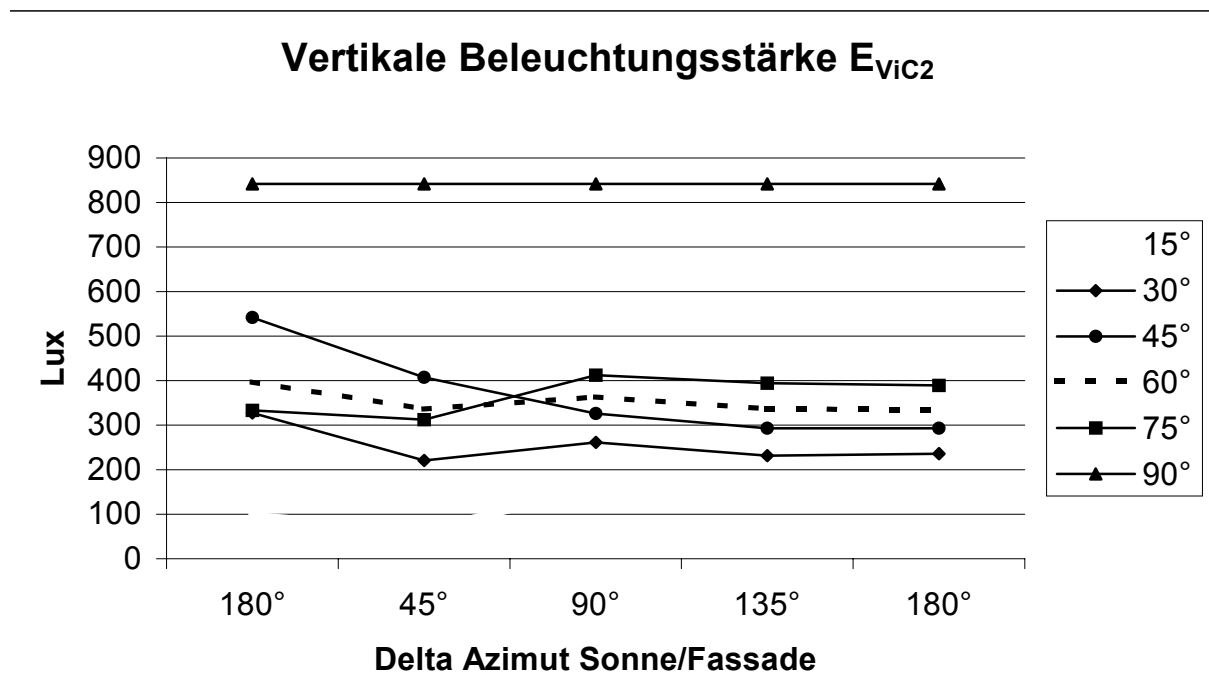


Grafik III.2. Sonnenschutzglas mit $\tau_{vis} = 10\%$ mit geregelten Jalousien, Vertikale Beleuchtungsstärke E_{Vi2}

III.2. Sonnenschutzglas $\tau_{vis} = 22\%$ mit geregelter Jalousie

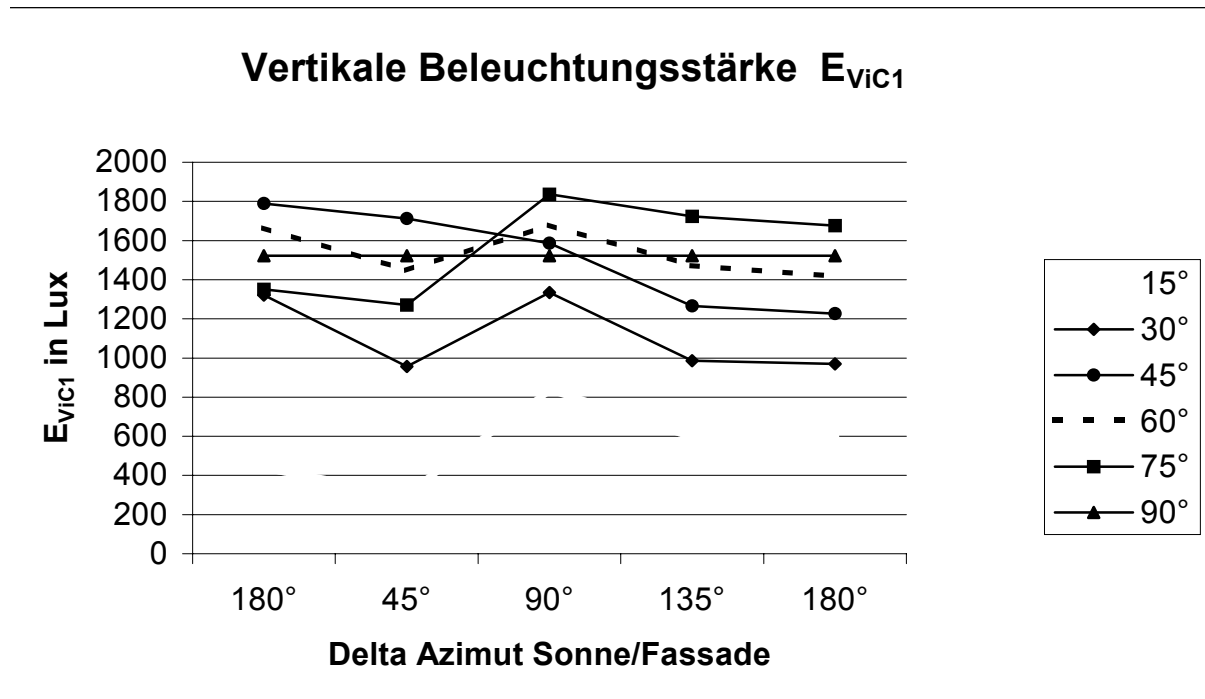


Grafik III.3. Sonnenschutzglas mit $\tau_{vis} = 22\%$ mit geregelten Jalousien, Beleuchtungsstärke E_{VIC1}

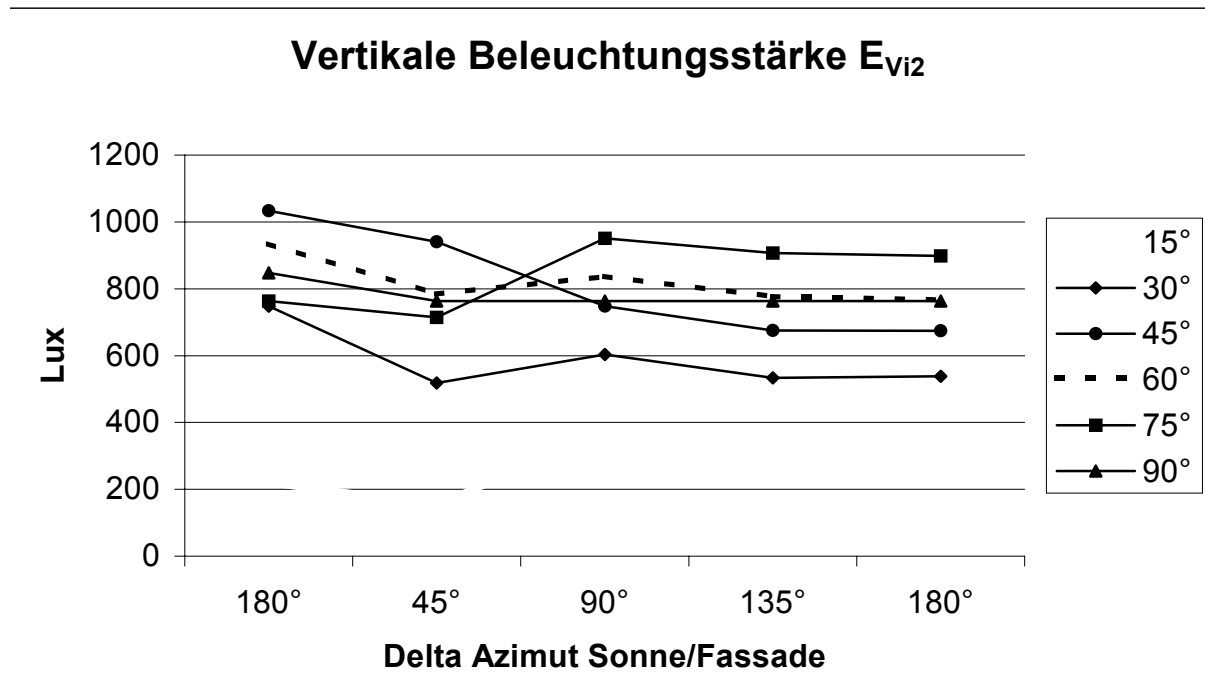


Grafik III.4. Sonnenschutzglas mit $\tau_{vis} = 22\%$ mit geregelten Jalousien, Beleuchtungsstärke E_{VIC2}

III.3. Sonnenschutzglas $\tau_{vis} = 47\%$ mit geregelter Jalousie

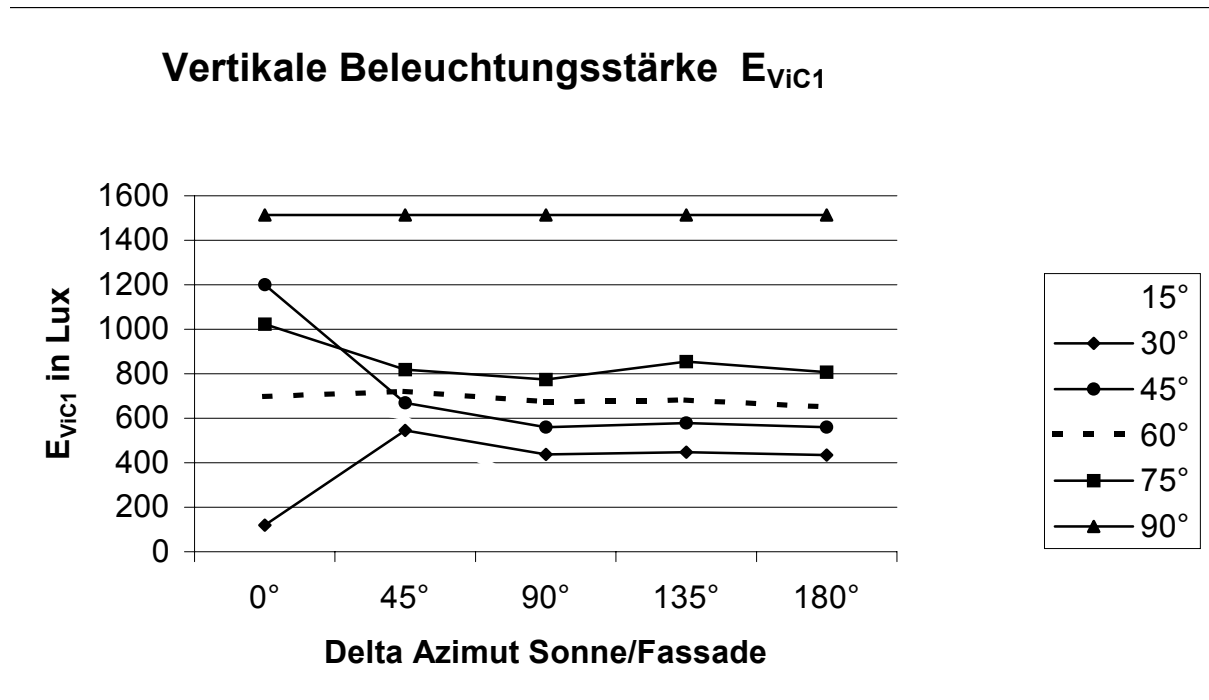


Grafik III.5. Sonnenschutzglas mit $\tau_{vis} = 47\%$ mit geregelten Jalousien, Beleuchtungsstärke E_{VIC1}

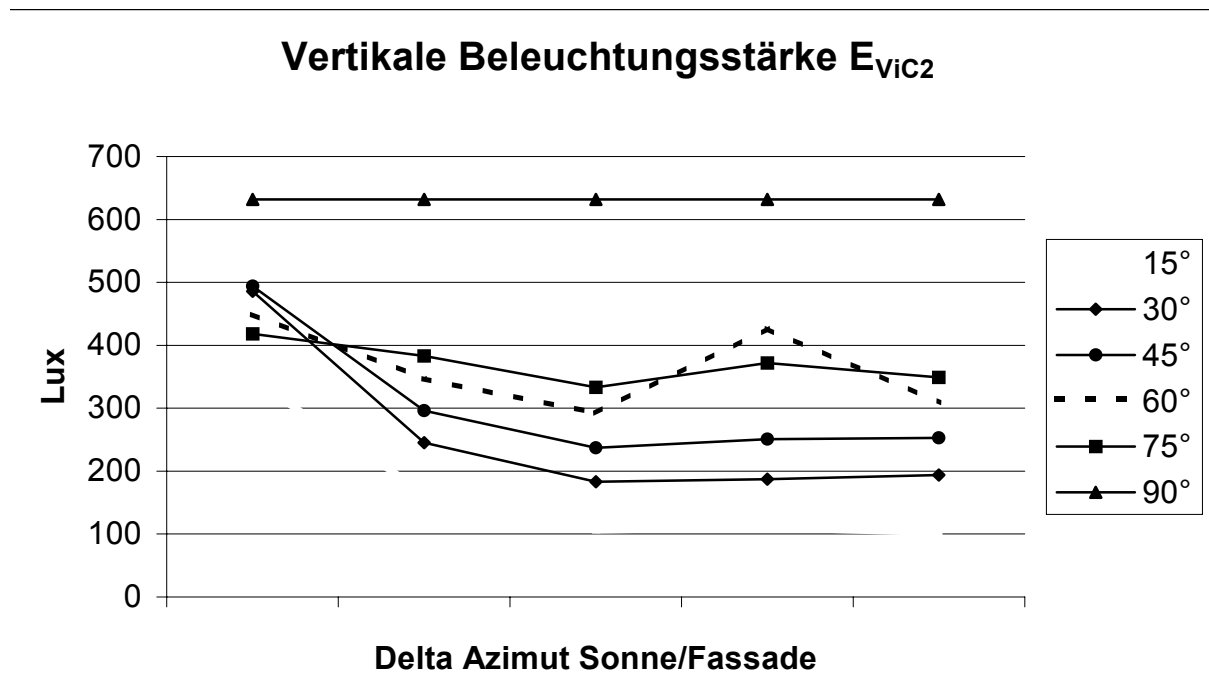


Grafik III.6.. Sonnenschutzglas mit $\tau_{vis} = 47\%$ mit geregelten Jalousien, Beleuchtungsstärke E_{VIC2}

III.4. Thermobrise feststehend

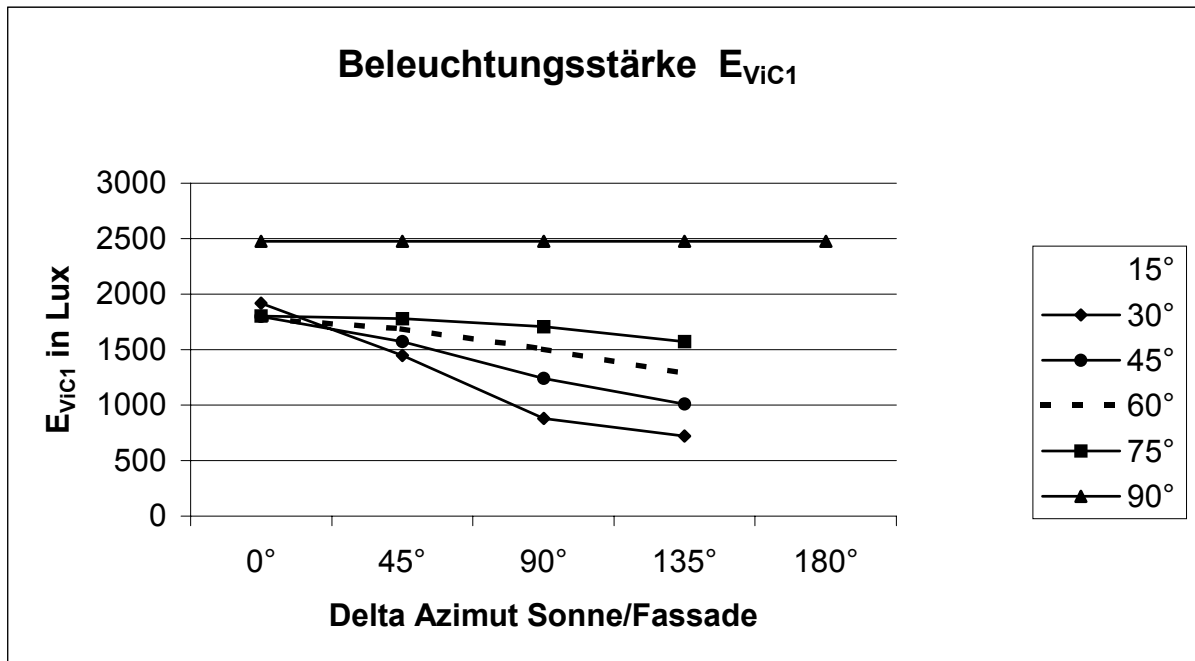


Grafik III.7. Feststehende vertikale Brise 335, Beleuchtungsstärke E_{VIC1}

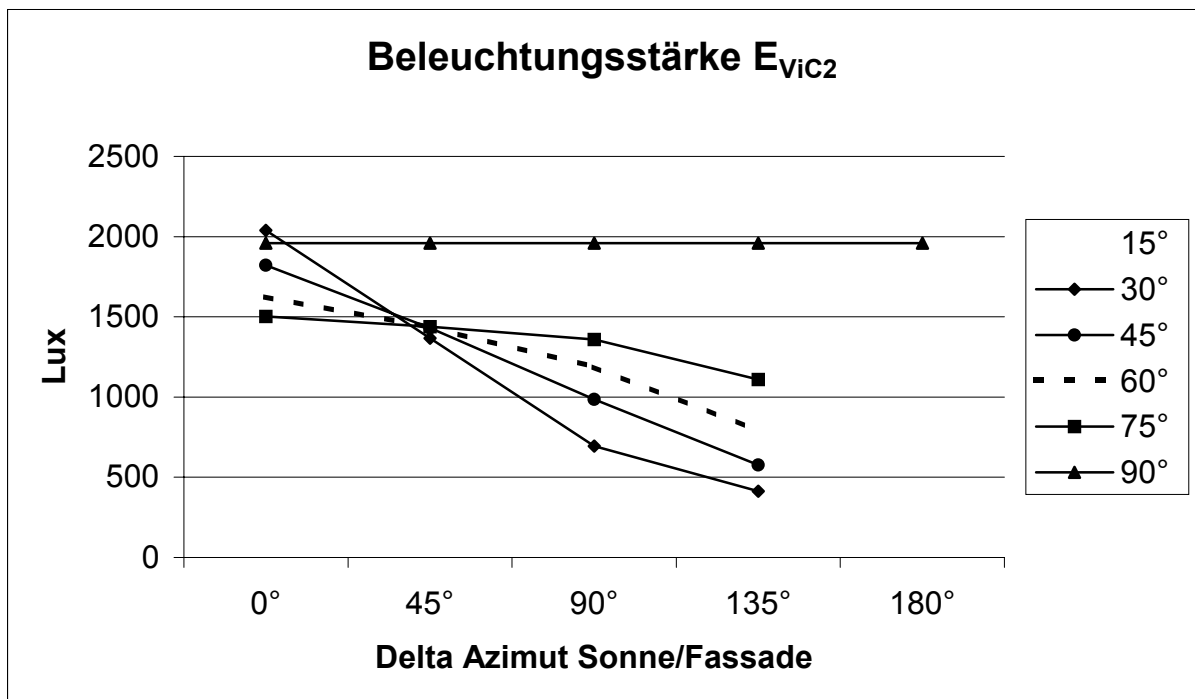


Grafik III.8. Feststehende vertikale Brise 335, Beleuchtungsstärke E_{VIC2}

III.5. Auslegung für eine unverschattete Nordfassade in Rio de Janeiro: internes und externes Lichtschwert & Finnen

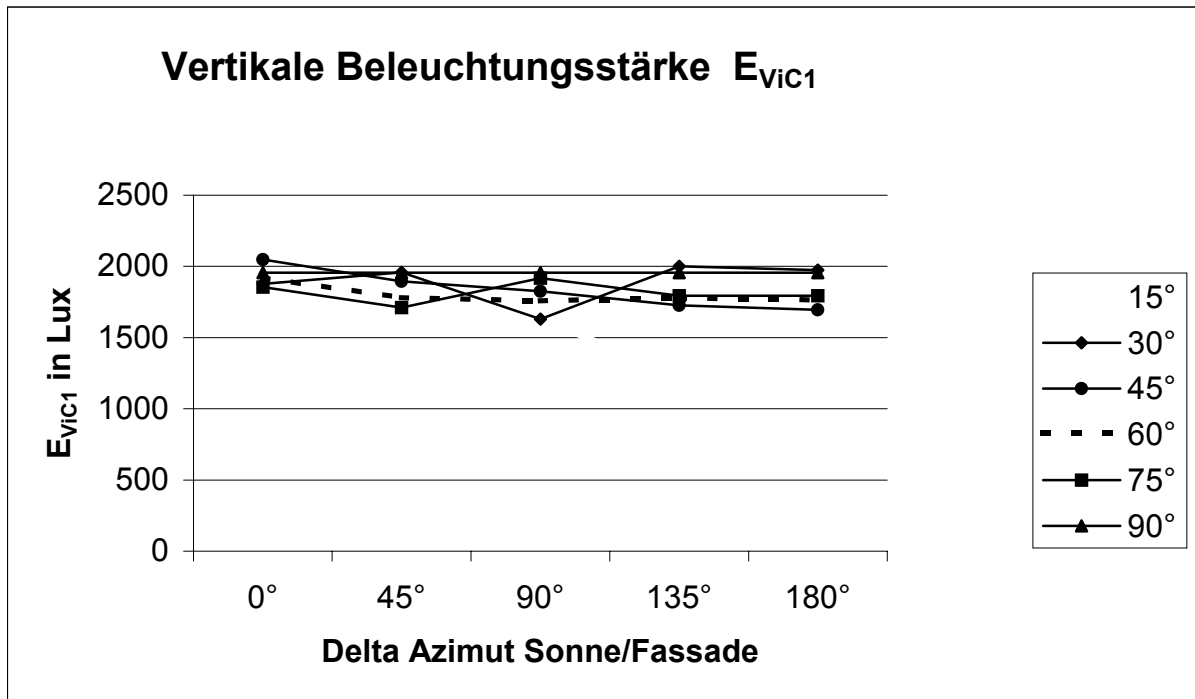


Grafik III.9. Innen- und außenliegendes Lichtschwert mit Finnen, Beleuchtungsstärke E_{VIC1}

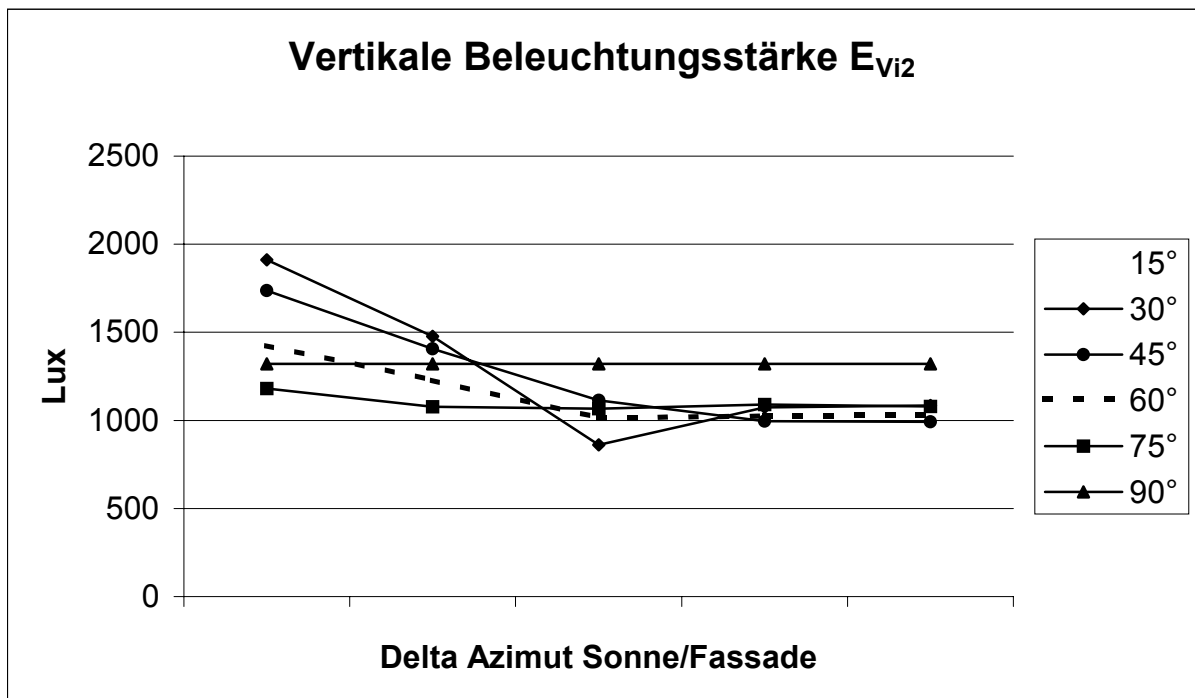


Grafik III.10. Innen- und außenliegendes Lichtschwert mit Finnen, Beleuchtungsstärke E_{VIC2}

III.6. Horizontales Lichtschwert

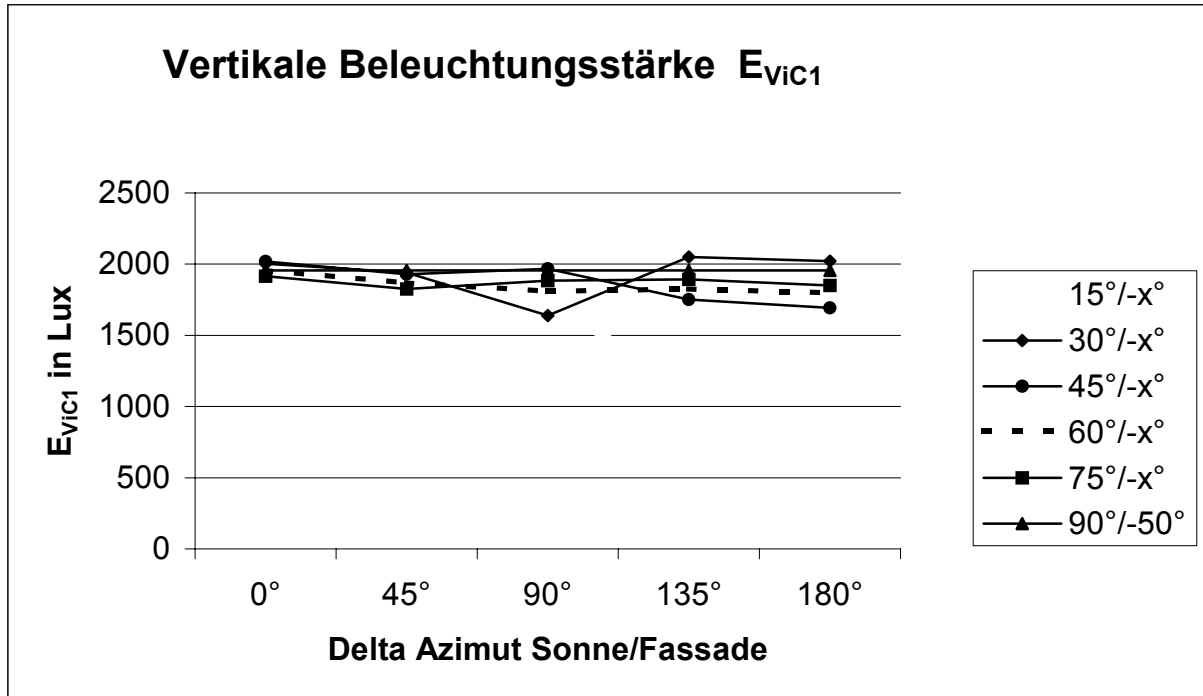


Grafik III.11. Innenliegendes Lichtschwert mit geregelter Jalousie, Beleuchtungsstärke E_{VIC1}

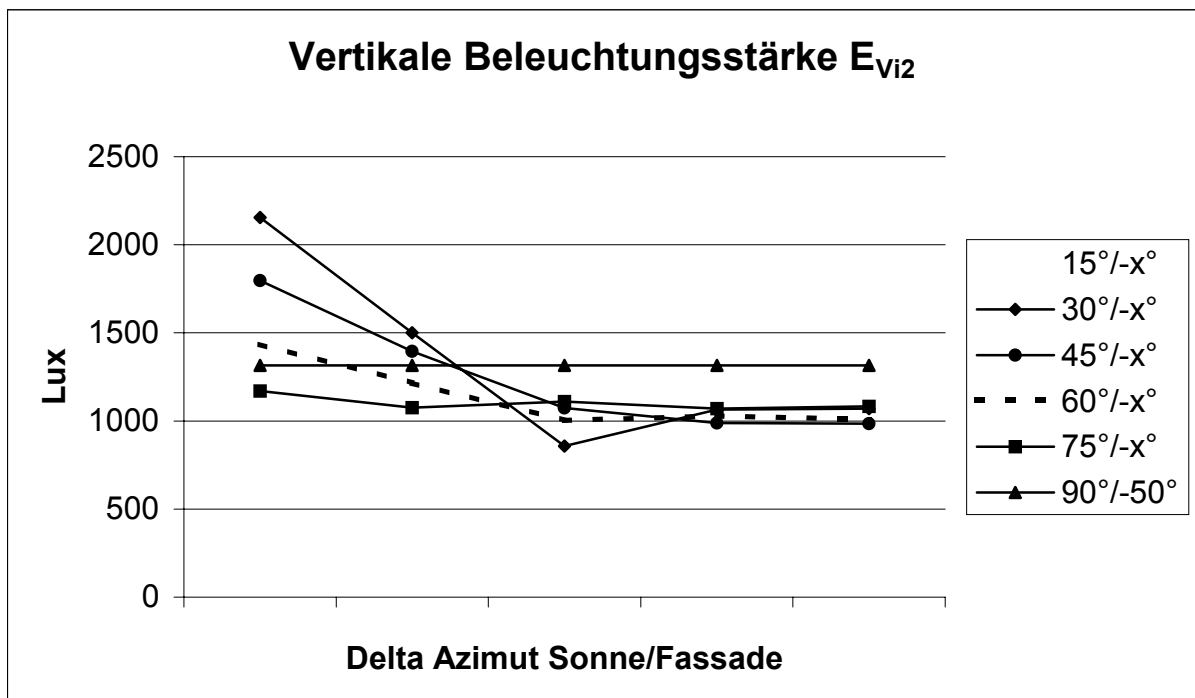


Grafik III.12. Innenliegendes Lichtschwert mit geregelter Jalousie, Beleuchtungsstärke E_{Vi2}

III.7. 5° geneigtes internes Lichtschwert

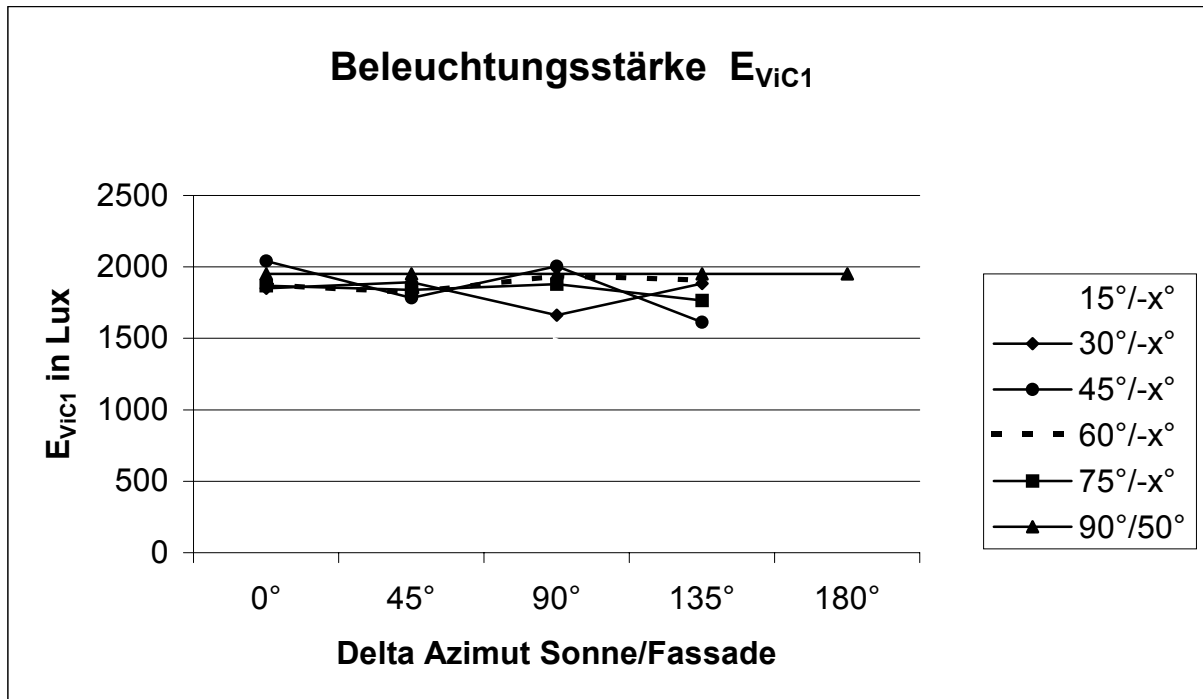


Grafik III.13. Innenliegendes Lichtschwert mit geregelter Jalousie, Beleuchtungsstärke E_{VIC1}

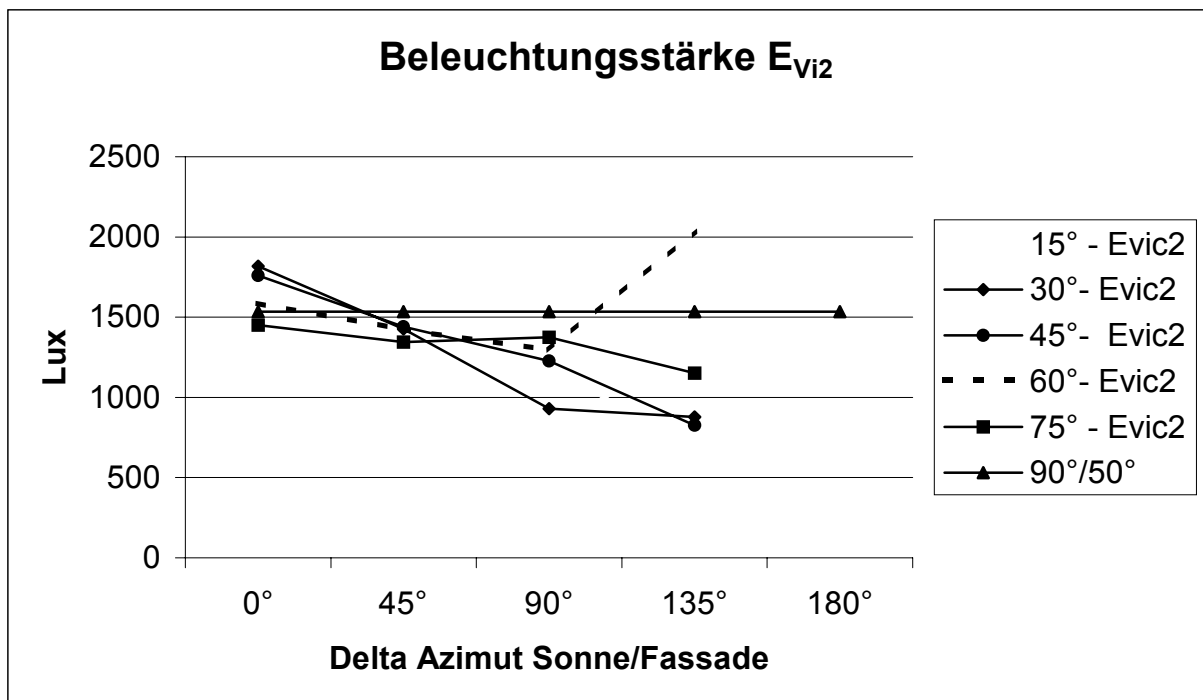


Grafik III.14. Innenliegendes Lichtschwert mit geregelter Jalousie, Beleuchtungsstärke E_{Vi2}

III.8. Internes und externes Lichtschwert mit Jalousie

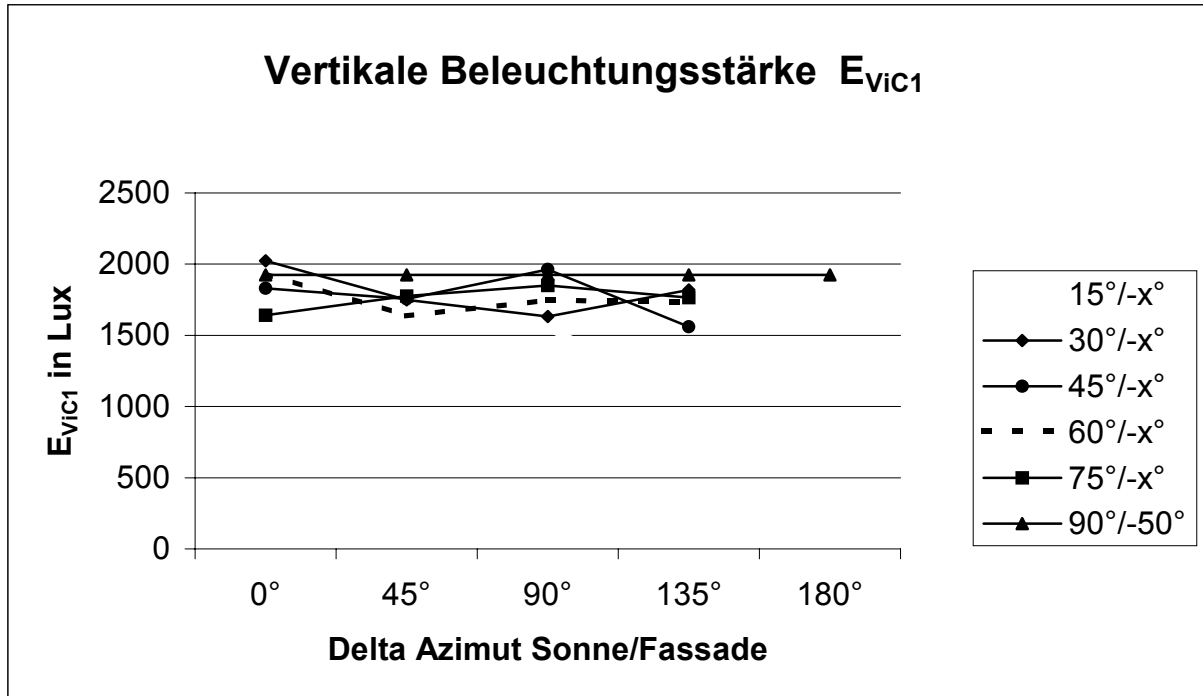


Grafik III.15. Innen- und außenliegendes Lichtschwert mit geregelter Jalousie, Beleuchtungsstärke E_{Vic1}

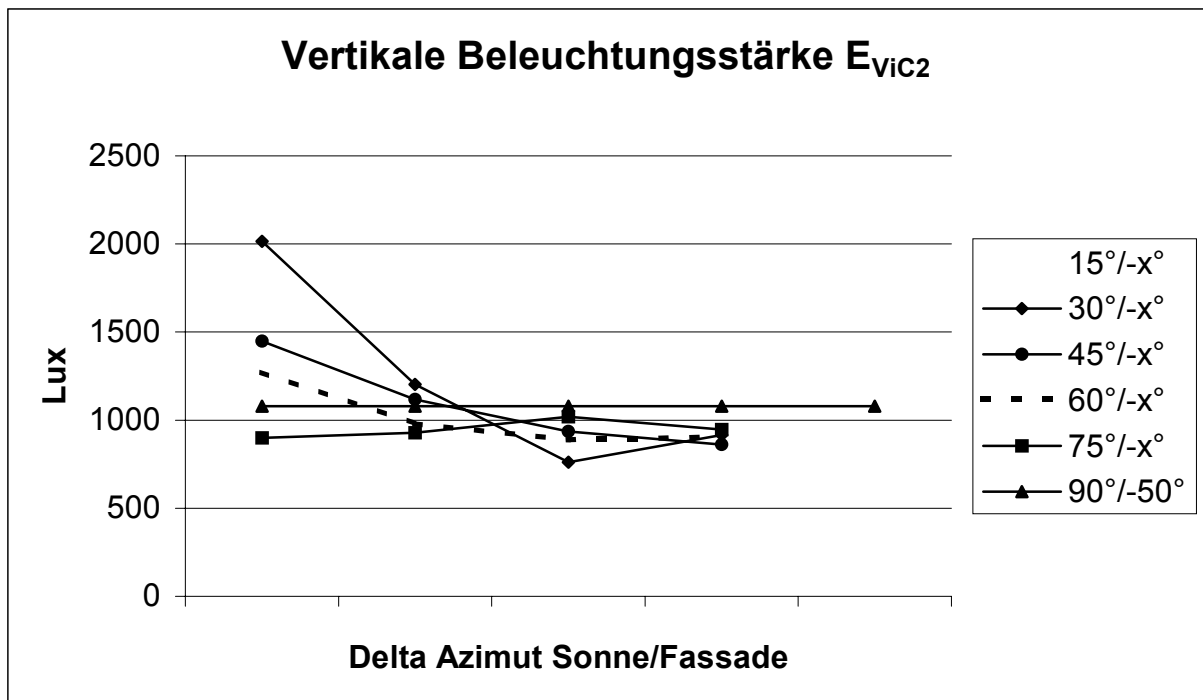


Grafik III.16. Innen- und außenliegendes Lichtschwert mit geregelter Jalousie, Beleuchtungsstärke E_{Vic2}

III.9. Vertikales LCP im Oberlicht mit innenliegendem Lichtschwert

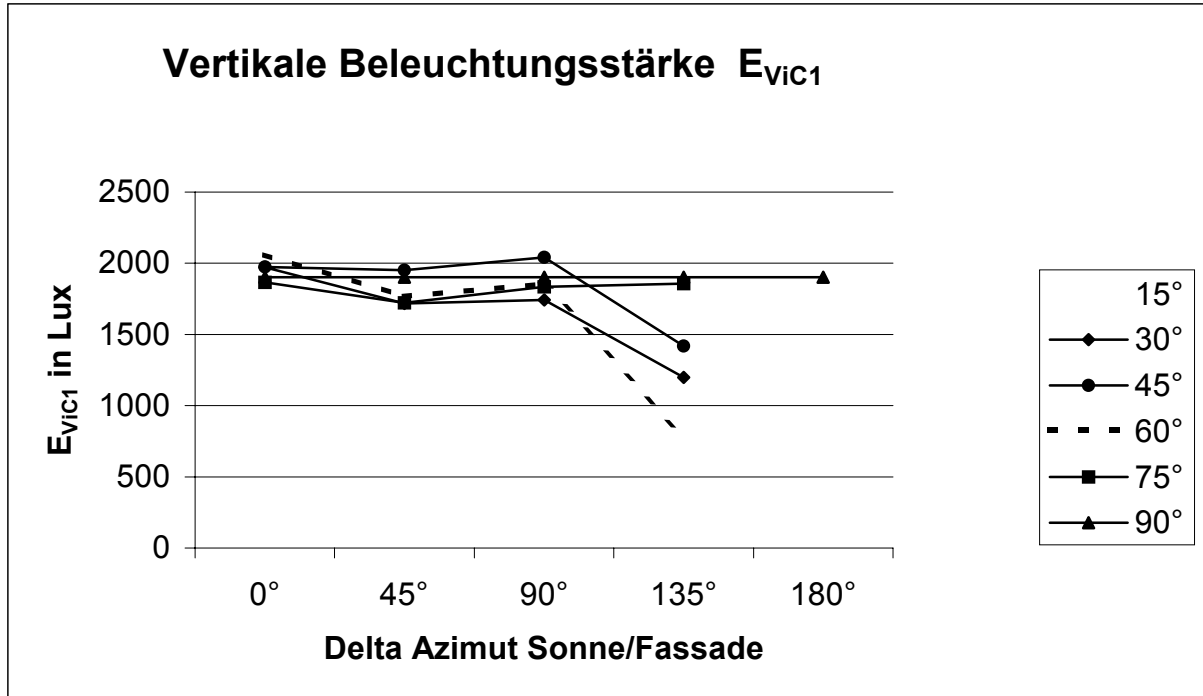


Grafik III.17. Innen- und außenliegendes Lichtschwert mit geregelter Jalousie, Beleuchtungsstärke E_{VIC1}

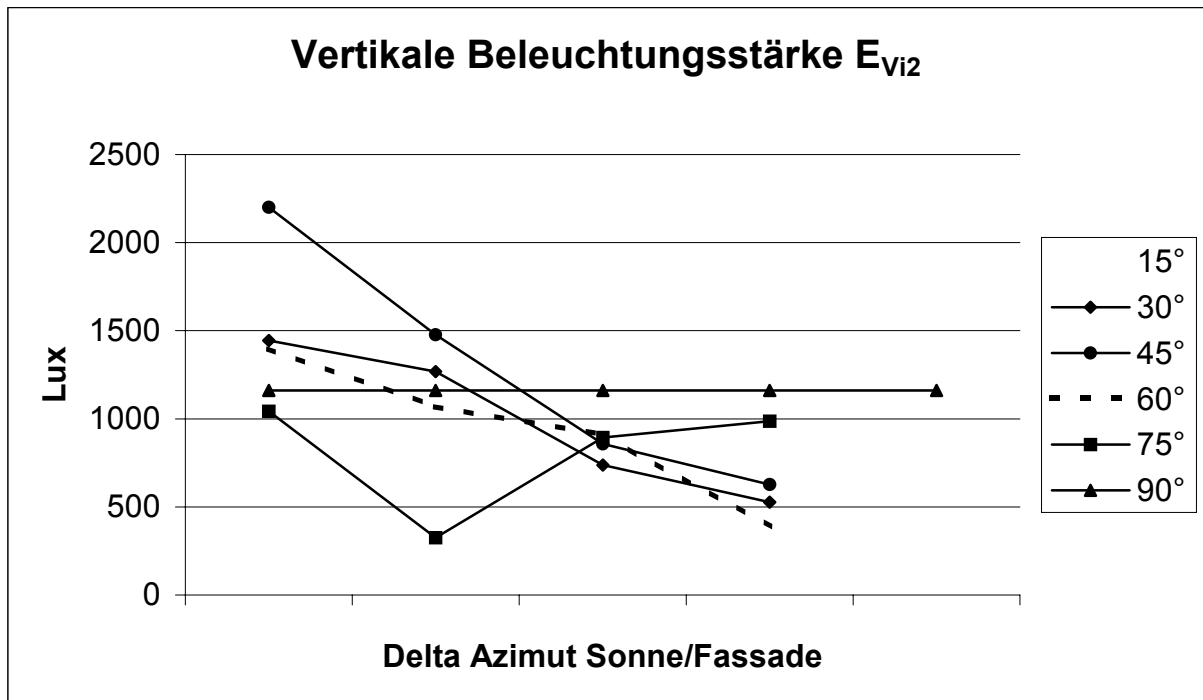


Grafik III.18. Innen- und außenliegendes Lichtschwert mit geregelter Jalousie, Beleuchtungsstärke E_{VIC2}

III.10. LCP mit $\alpha_{LCP} = 15^\circ$ und einem horizontalen internen Lichtschwert

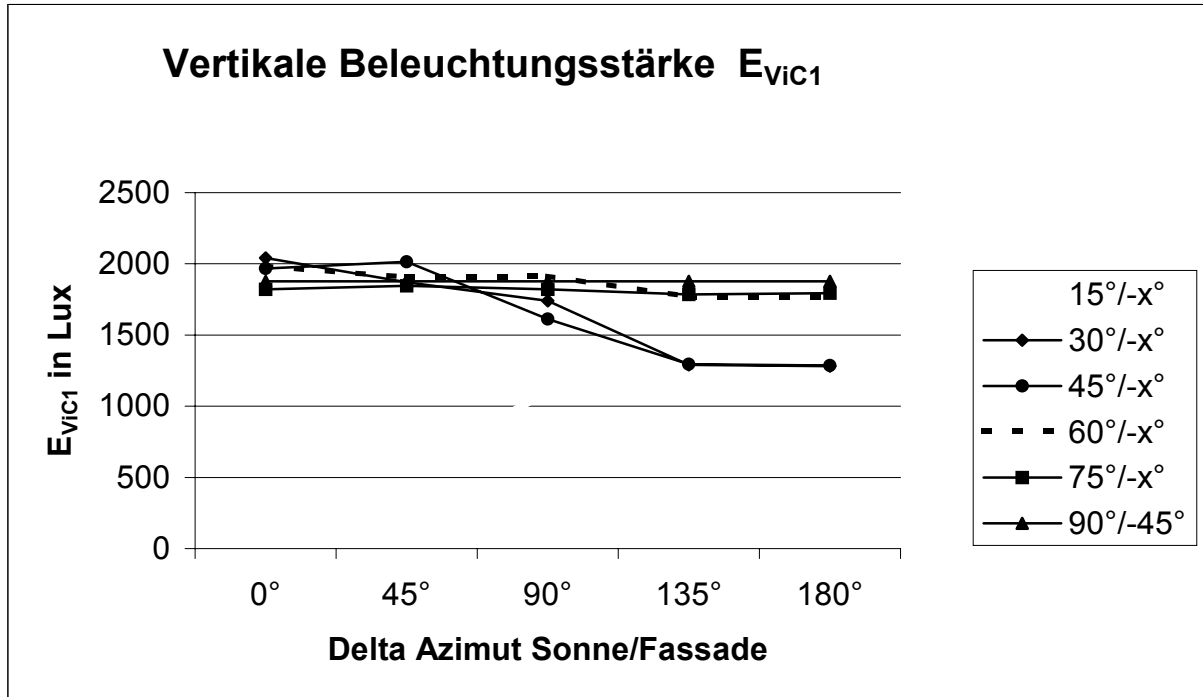


Grafik III.19. LCP 15° mit internem Lichtschwert und mit geregelter Jalousie, Beleuchtungsstärke E_{VIC1}

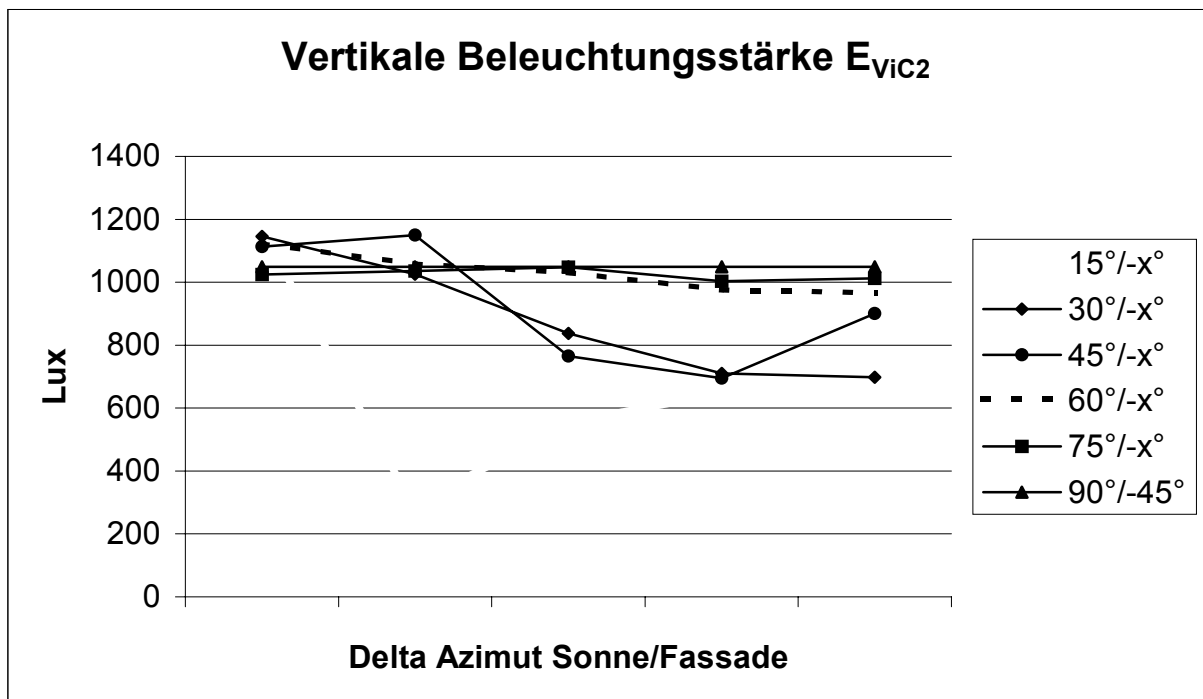


Grafik III.20. LCP 15° mit internem Lichtschwert und mit geregelter Jalousie, Beleuchtungsstärke E_{Vi2}

III.11. Standard-Jalousie – außenliegend und geregelt

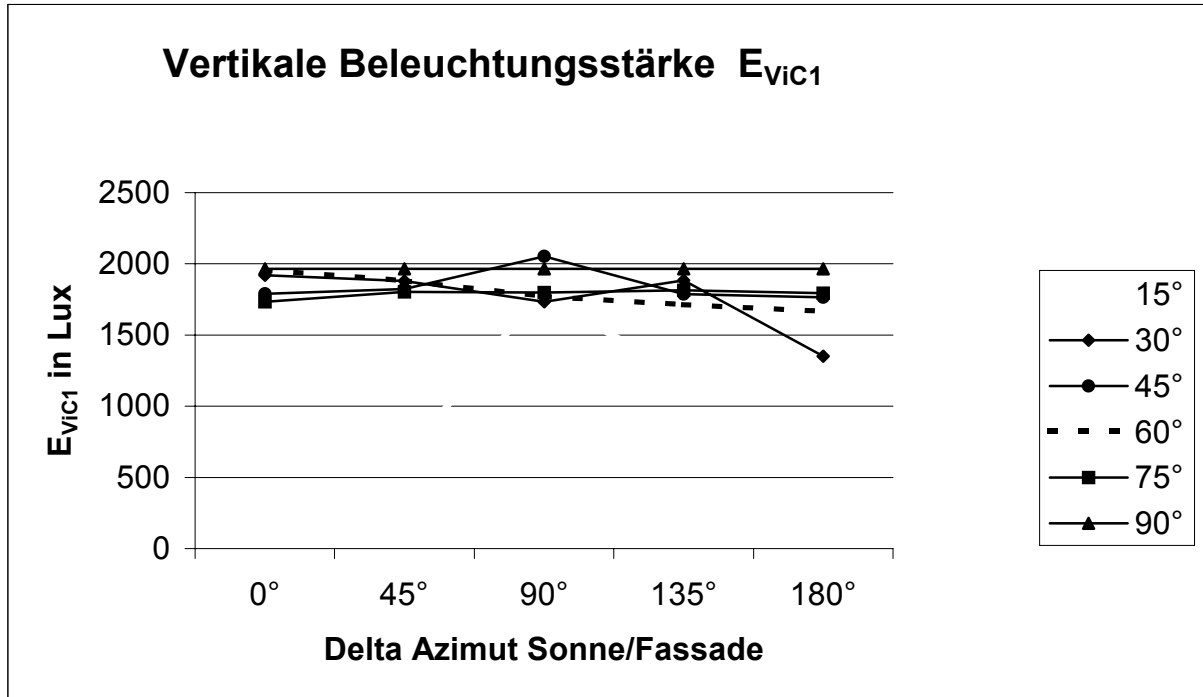


Grafik III.21. Vertikale Beleuchtungsstärke E_{VIC1}

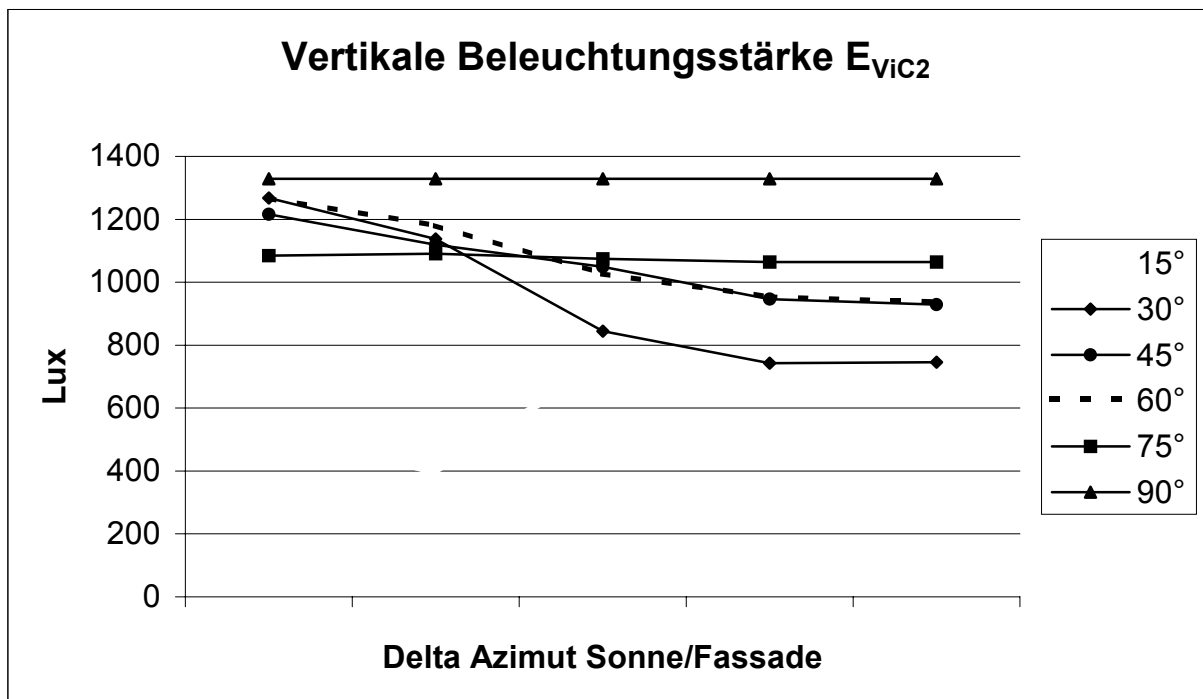


Grafik III.22. Vertikale Beleuchtungsstärke E_{VIC2}

III.12. Tageslichtjalousie

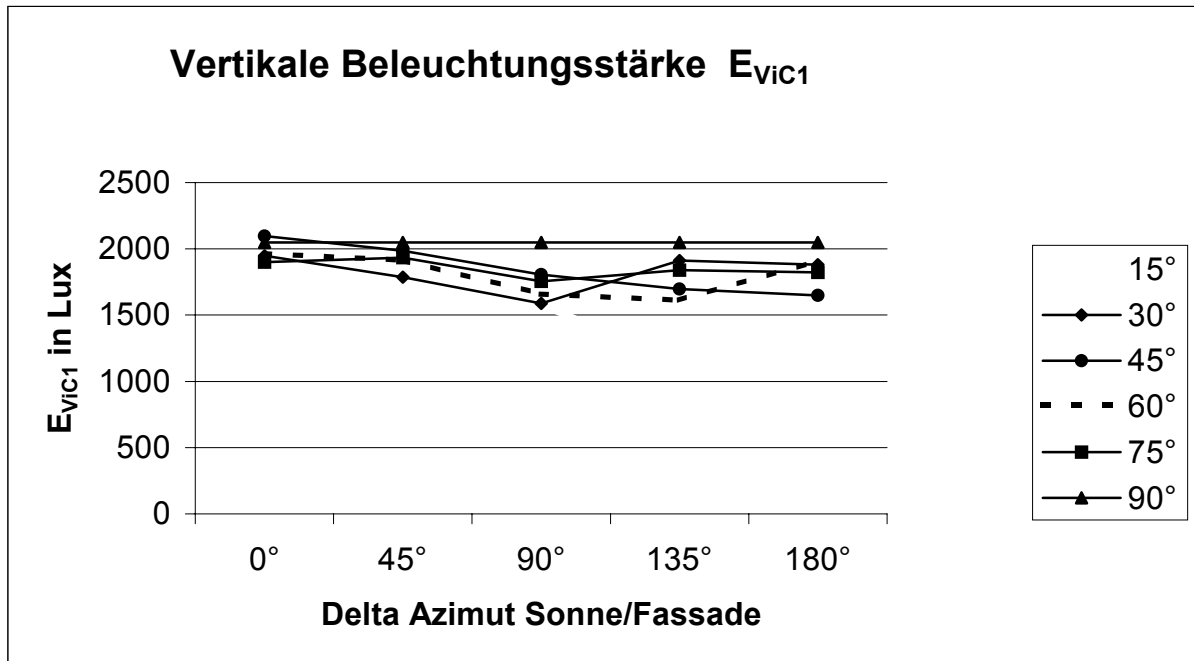


Grafik III.23. Beleuchtungsstärke E_{VIC1}

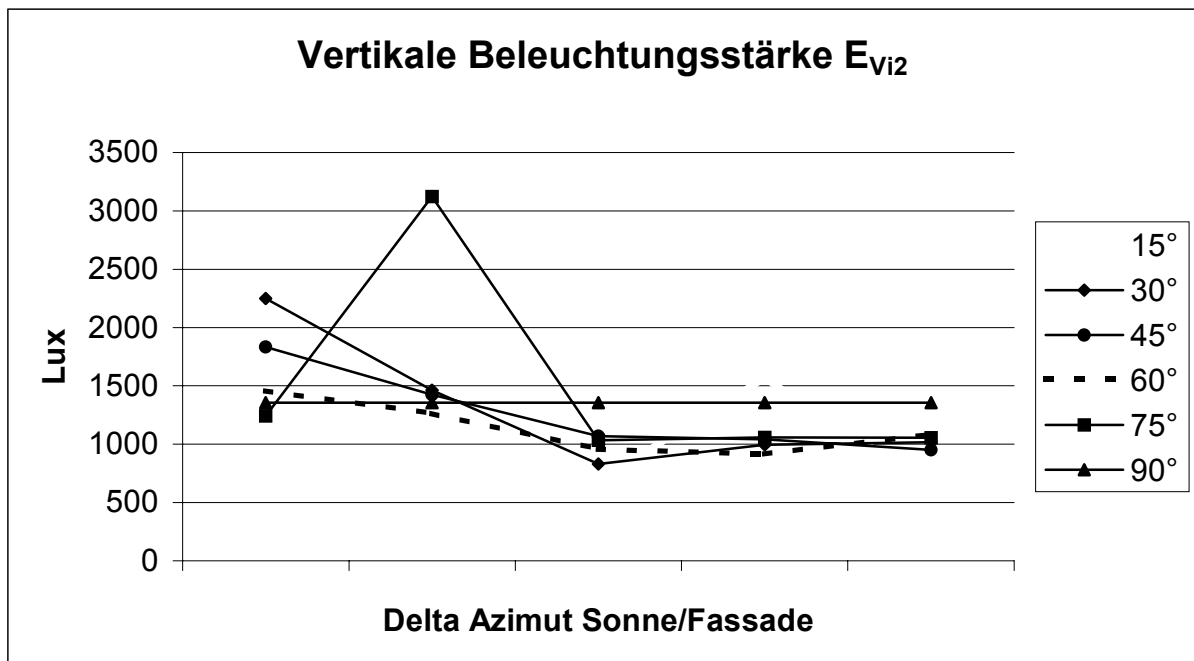


Grafik III.24. Beleuchtungsstärke E_{VIC2}

III.13. Horizontales Lichtschwert in einem möblierten Raum



Grafik III.25. Vertikale Beleuchtungsstärke E_{ViC1}

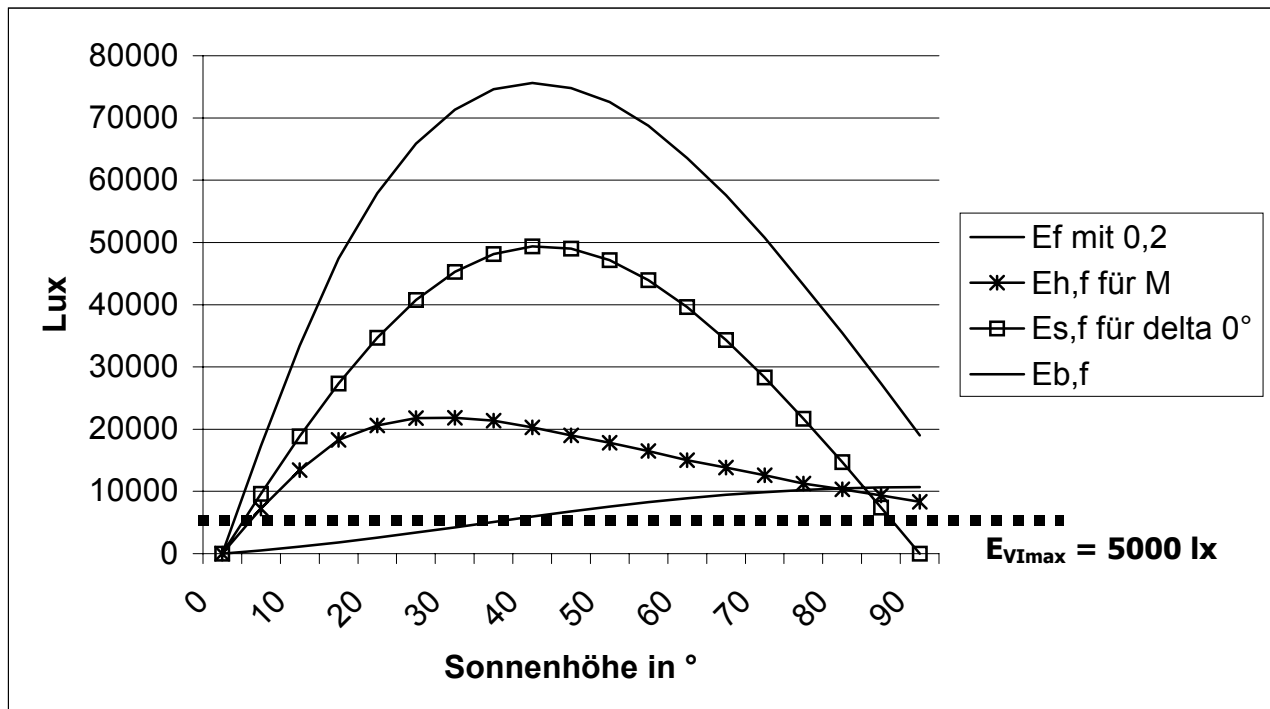


Grafik III.26. Vertikale Beleuchtungsstärke E_{Vi2}

Anhang IV - Jalousien

IV.1. Vertikale Beleuchtungsstärke nach DIN 5034

Dabei gilt es zunächst die Anforderungen an die vertikale Beleuchtungsstärke im Innenraum in Fassadennähe mit der vertikalen Beleuchtungsstärke an der Fassade in Abhängigkeit von der Sonnenhöhe γ_S zu überprüfen:



Grafik IV.1. Zusammensetzung der vertikalen Beleuchtungsstärke E_F nach DIN 5034 für $\Delta Az = 0^\circ$ und maximal zulässige vertikale Beleuchtungsstärke senkrecht zur Fassade am Arbeitsplatz E_{V1}

IV.2. Steuerung von Jalousien

Um das Eindringen von Direktstrahlung in den Raum zu verhindern, gilt folgendes:

Bei Sonnenhöhen unter 45° müssen die Lamellen der Jalousie geneigt werden, um den notwendigen Schutz vor direkter Sonneneinstrahlung sicherzustellen.

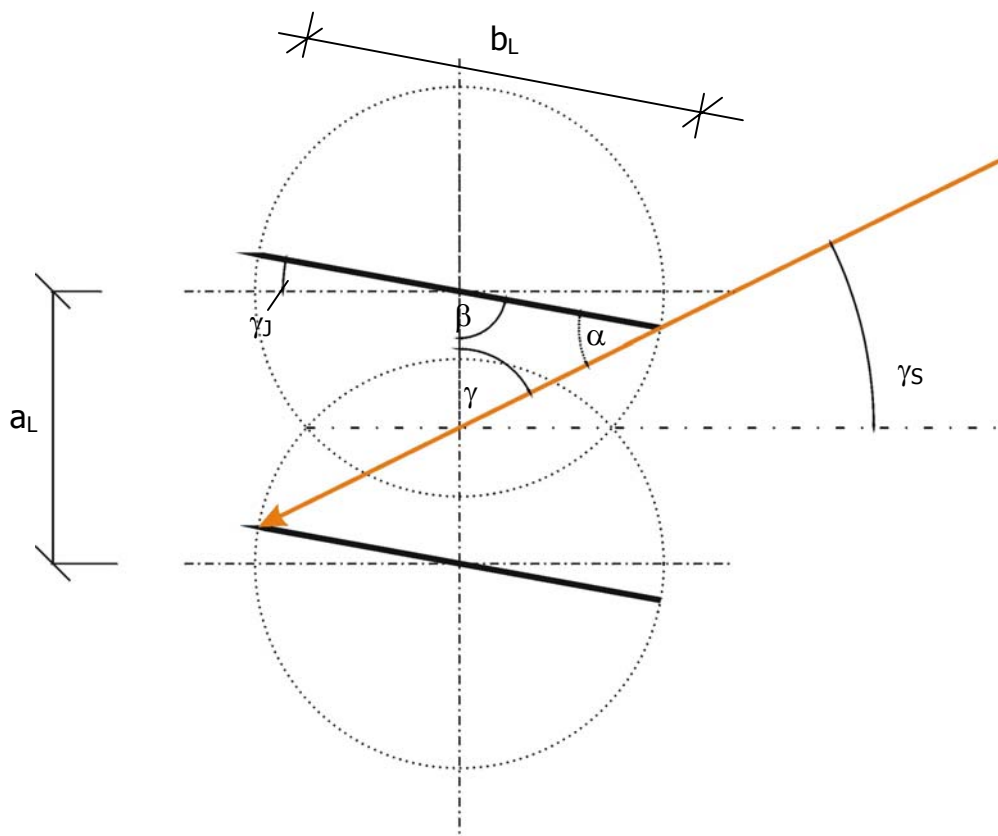
Bei Sonnenhöhen über 45° können die Lamellen in die horizontale Stellung gefahren werden und sind damit für die diffuse Strahlung offen.

Bei Sonnenhöhen $\gamma_S \geq 45^\circ$ stehen die Lamellen in horizontaler Stellung $\gamma_J = 0^\circ$.

(wenn $a_L \leq b_L$)

bei $\gamma_S = 45^\circ$ $\gamma_J = 0^\circ$ (1)

Für Sonnenhöhen $\gamma_S < 45^\circ$ gilt dann:



Grafik IV.1. Systemskizze Vertikalschnitt Jalousie

Es gilt:

$$\gamma = 90^\circ - \gamma_S$$

$$\beta = 90^\circ - \gamma_J$$

$$b_L / \sin \gamma = a_L / \sin \alpha$$

$$\Rightarrow \sin \alpha = a_L * \sin \gamma / b_L$$

$$\alpha = \arcsin (\sin(90^\circ - \gamma_S) * a_L / b_L) \quad (2)$$

$$\gamma_J = 90^\circ - (180^\circ - (90^\circ - \gamma_S) - (\arcsin (\sin((90^\circ - \gamma_S) * a_L / b_L))))$$

wenn $a_L = b_L$:

$$\gamma_J = 90^\circ - 2 * \gamma_S$$

dabei bedeuten:

γ_J Neigung der Lamellen zur Horizontalen

a_L der Abstand zwischen den Lamellen

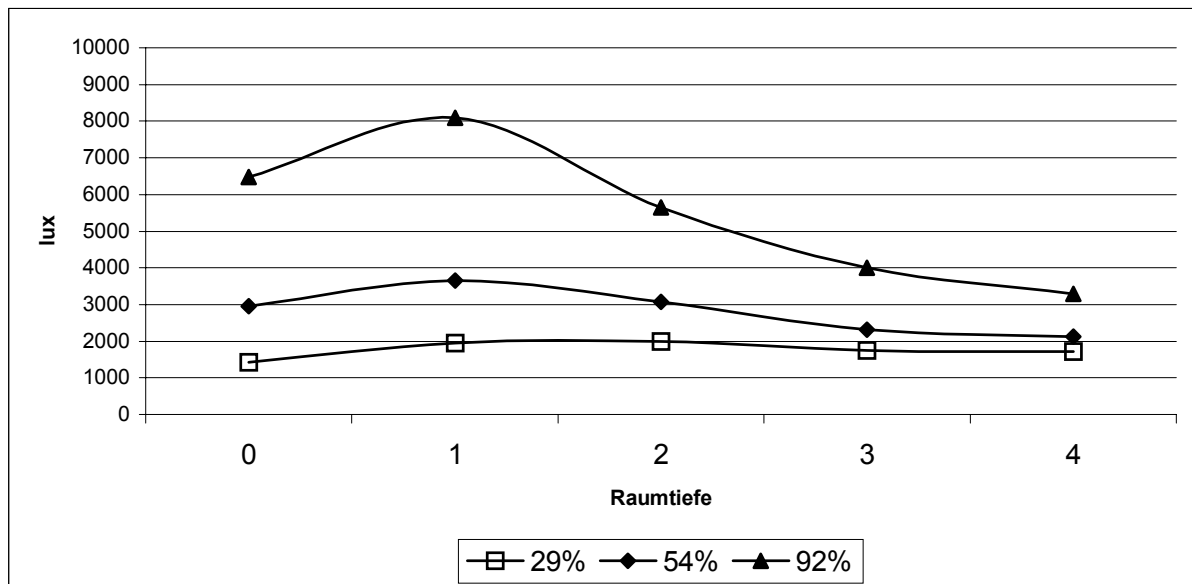
b_L Breite der Lamellen

IV.3. Transmission τ_J einer Jalousie

Zusammenhang zwischen Sonnenhöhe γ_S , Lamellenneigung γ_J und dem Reflexionsgrad α_J einer Jalousie

Das Verhältnis der vertikalen inneren Beleuchtungsstärke E_{vi} zur äußeren vertikalen Beleuchtungsstärke gibt den Gesamttransmissionsgrad τ_J einer Jalousie an. Es werden dabei auch die Reflexion der Sonnenstrahlen, die Reflexion des diffusen Himmelslichtes und die Reflexion der vom Boden reflektierten Strahlen auf den Lamellen berücksichtigt.

Diese Untersuchung wurde notwendig, da bei verschiedenen Simulationen wesentliche Unterschiede hinsichtlich der Raumausleuchtung aufgrund unterschiedlicher Reflexionsgrade festgestellt wurde (siehe Grafik IV.2.).



Grafik IV.2. Einfluss des Reflexionsgrades der Jalousie auf die Tageslichtverteilung, Beispiel 21.12., 16 Uhr, CIE Clear Sky & Sun

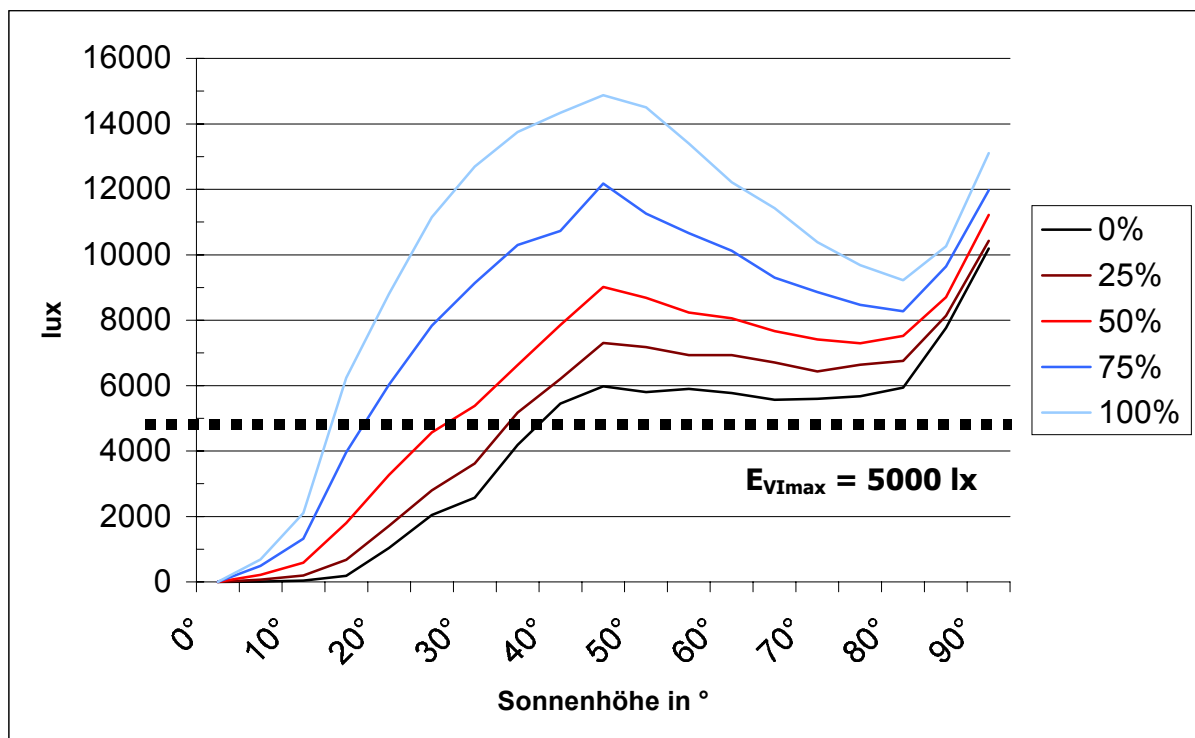
Die Simulationen werden in dem virtuellen Modellraum von 5 x 10 m durchgeführt. Um eine möglichst allgemeingültige Aussage treffen zu können, wurden folgende Parameter festgelegt:

- 1) Alle raumumschließenden Flächen mit Ausnahme der Fenster bekommen den Reflexionsgrad 0 zugewiesen.
- 2) das Fenster wird als ideal streuendes Glas mit 80% Transmission festgelegt. Die Einstellung unter FLOAT lautet daher: 0.8/0.8/0.8/0.0/0.0/1.0/0.0

Mit dieser Einstellung soll eine möglichst gleichmäßige Verteilung der Strahlen auf die Messpunkte erreicht werden – durch die zur Vereinfachung als flach definierten Lamellen und die fehlende Berücksichtigung der Beugung wäre eine gewisse Streifenwirkung bei der

Benutzung von Fensterglas zu erwarten. Probesimulationen hinsichtlich dieser Thematik bestätigten den Verdacht.

- 3) Die Messpunkte wurden in einem Abstand von 1,0 m von der Fassade in Raummitte (jeweils 2,50 m Abstand zu den Wänden) in einem Abstand vom Boden von 1,0 m, 1,25 m, 1,5 m, 1,75 m und 2,0 m „angebracht“. Die Messungen erfolgen vertikal in Richtung Fassade.
- 4) Es wurden Sonnenhöhen γ_S von 0° (horizontal) bis 90° (Zenith) in Schritten von 5° simuliert. Der Sonnenazimut α_S beträgt in allen Fällen 180° (Nord), die Fassadenorientierung α_F ist ebenfalls Nord, die Azimut-Differenz zwischen Sonne und Fassade $\Delta|\alpha_F - \alpha_S|$ ist somit 0° .
- 5) Die sonnenstandsabhängige Neigung der Lamellen γ_J wird nach der Formel (2) vorgenommen. Der Abstand der Lamellen untereinander a_L und die Breite der Lamellen b_L sind jeweils 10 cm. Damit wird der Einfall direkter Sonnenstrahlung ausgeschlossen.
- 6) Für die Lamellen werden 5 verschiedene Reflexionsgrade untersucht: 0.0, 0.25, 0.5, 0.75 und 1.0. Die Reflexionsgrade gelten für jeweils beide Seiten der Lamellen.
- 7) Die Bodenreflexion beträgt 20%.



Grafik IV.3. Durchschnittliche vertikale innere Beleuchtungsstärke E_{VI} in Abhängigkeit von Sonnenhöhe γ_S , Lamellenneigung γ_J und Lamellenreflexionsgrad α_J , mit Angabe der thermischen Komfortgrenze von 5.000 lx (ca. 46W/m²)

Diskussion der Grafik IV.3.: Die Kurvenverläufe bestätigen die Vermutung, dass sich sowohl die Sonnenhöhe γ_S und die im Bereich $0^\circ < \gamma_S < 45^\circ$ damit verbundene Lamellenstellung γ_J , als auch der Reflexionsgrad α_J sich deutlich auf die in den Innenraum gelangende vertikale Beleuchtungsstärke E_{VI} auswirkt. Dabei werden Beleuchtungsstärken erzielt, die bereits deutlich im kritischen Bereich von über 5.000 lx liegen. Eine Nachregulierung der Lamellenneigung γ_J ist erforderlich, was bedeutet, dass auch ein Teil der diffusen Strahlung abgeschirmt werden muss.

IV.4. Transmissionswert τ_J in Abhängigkeit der Sonnenhöhe γ_S und des Reflexionsgrades α_J :

$$E_{VI} = \sum_{i=1}^n E_{V_{II}} / n$$

dabei bedeutet:

n Anzahl der Messstellen (in diesem Fall 5)

$E_{V_{II}}$ Messergebnisse der einzelnen „Sensoren“

Die Rechenoperation $100\%/E_{V_a} * E_{VI}$ ergibt den durchschnittlichen Transmissionswert τ_J in Abhängigkeit der Sonnenhöhe γ_S :

$$\tau_{J(\gamma_S)} = 100\%/E_{V_a} * E_{VI}$$

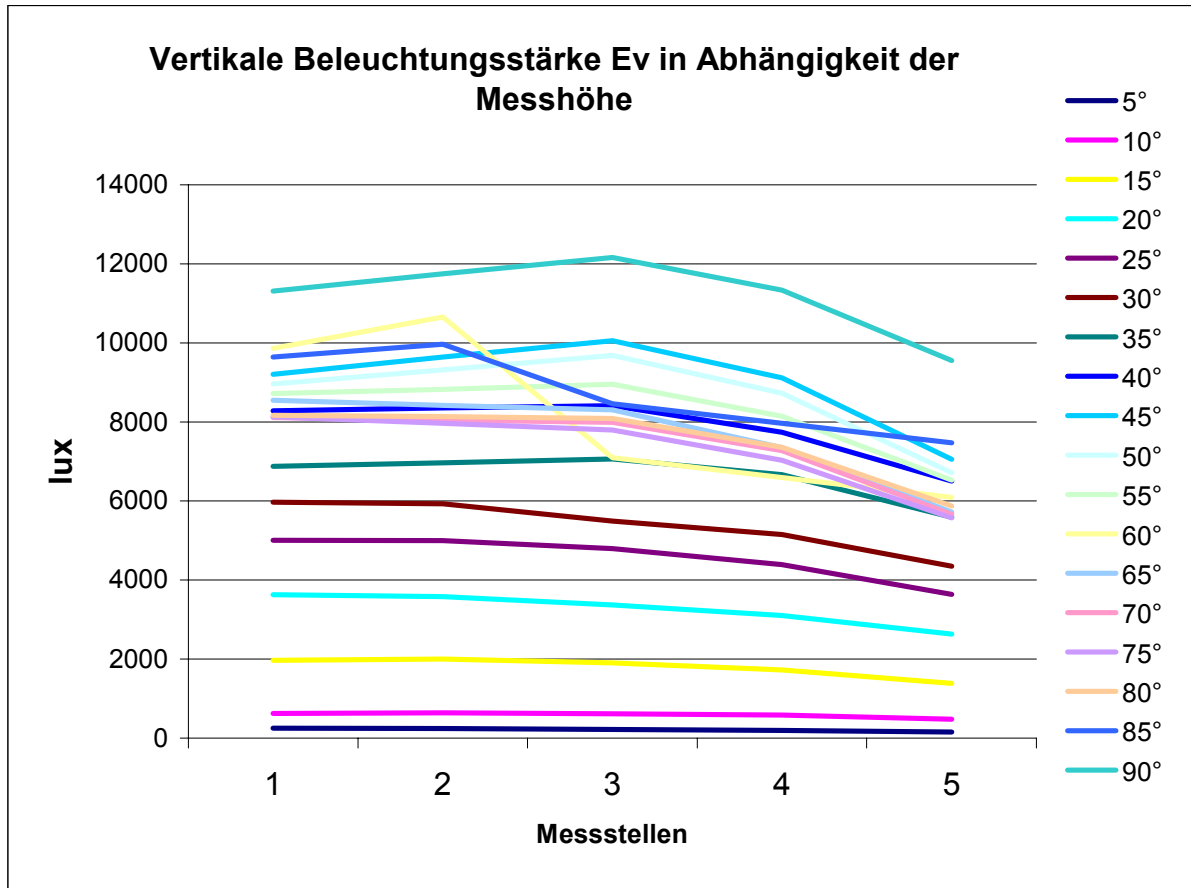
	5°	10°	15°	20°	25°	30°	35°	40°	45°
Ev	22899	30216	53018	63878	69407	71610	71621	70039	66554
theoretischer Transmissionsgrad τ_{Jt} für $E_{V_{I\max}}$									
5.000 lx	21,8	16,5	9,4	7,8	7,2	7,0	7,0	7,1	7,5
ermittelter Transmissionsgrad τ_J									
0%	0,04	0,14	0,34	1,6	2,9	3,6	5,9	7,8	9,0
25%	0,31	0,66	1,3	2,7	4,0	5,1	7,2	8,9	11,0
50%	0,92	2,0	3,4	5,1	6,6	7,5	9,3	11,2	13,6
75%	2,1	4,4	7,5	9,4	11,3	12,8	14,4	15,3	18,3
100%	3,0	7,0	11,8	13,8	16,1	17,7	19,2	20,5	22,4

Tabelle IV.1. Transmissionswert τ_J der Jalousie in Abhängigkeit der Sonnenhöhe γ_S und des Reflexionsgrades α_J

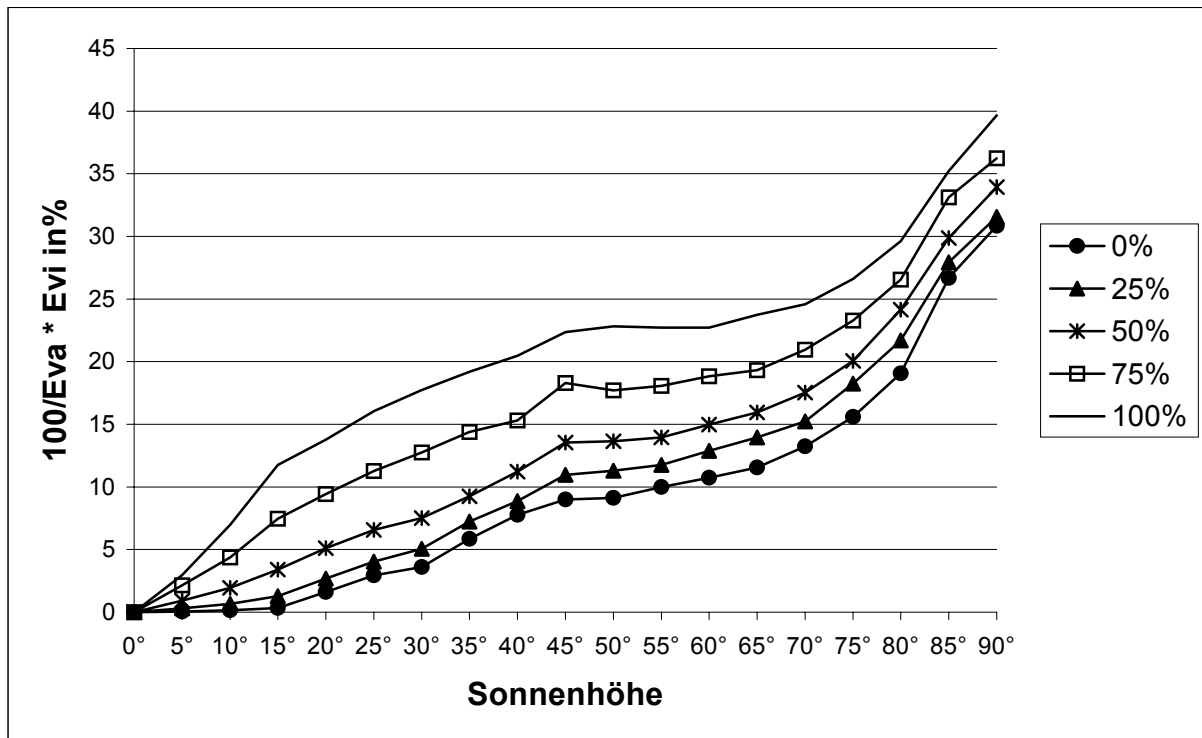
	45°	50°	55°	60°	65°	70°	75°	80°	85°	90°
Ev	66554	63556	59028	53807	48113	42282	36399	31147	29128	33051
theoretischer Transmissionsgrad τ_{Jt} für $E_{V_{I\max}}$										
5000 lx	7,5	8,0	8,5	9,25	10,5	11,8	13,8	16,0	17,3	15,3
ermittelter Transmissionsgrad τ_J										
0%	9,0	9,1	10,0	10,7	11,6	13,2	15,6	19,1	26,7	30,8
25%	11,0	11,3	11,8	12,9	14,0	15,2	18,2	21,7	27,9	31,6
50%	13,6	13,7	14,0	15,0	16,0	17,5	20,1	24,2	29,9	34,0
75%	18,3	17,7	18,1	18,8	19,3	21,0	23,3	26,6	33,1	36,2
100%	22,4	22,8	22,7	22,7	23,7	24,6	26,6	29,6	35,2	39,7

Tabelle IV.2. Transmissionswert τ_J der Jalousie in Abhängigkeit der Sonnenhöhe γ_S und des Reflexionsgrades α_J

Dabei gilt es zu berücksichtigen, dass sich die Werte der einzelnen Messstellen in Abhängigkeit von ihrer Messhöhe zum Teil deutlich unterscheiden:



Grafik IV.4. Abhängigkeit der vertikalen Beleuchtungsstärke E_v von der Messstellenhöhe bei einem Lamellenreflexionsgrad $\alpha_j = 50\%$



Grafik IV.5. Gesamttransmissionsgrad τ_j in Abhängigkeit von Sonnenhöhe γ_s , Lamellenneigung γ_j und Lamellenreflexionsgrad α_j

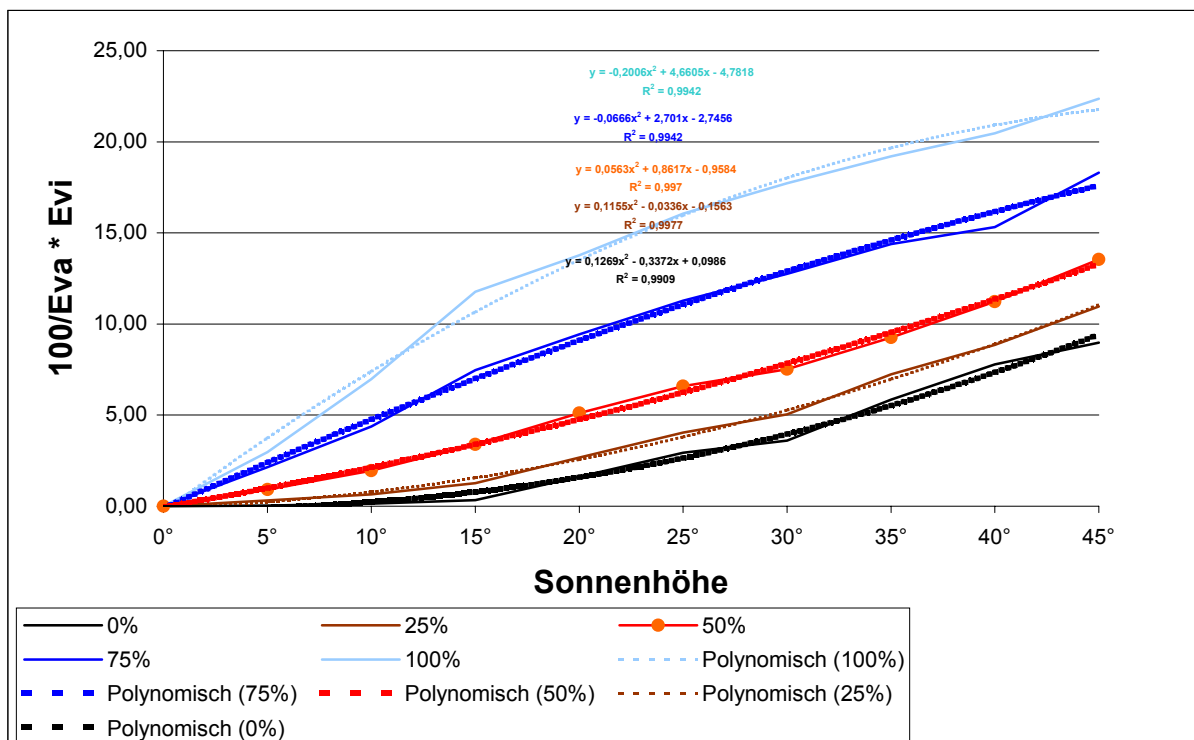
Diskussion der Grafik IV.5.: Es lassen die in der Grafik deutlich 2 Bereiche unterscheiden: während die jeweiligen Transmissionsgrade im Bereich von $0^\circ < \gamma_S \leq 45^\circ$ annähernd linear verlaufen, sind im Bereich $45^\circ < \gamma_S < 90^\circ$ polynomische Funktionen zu erwarten. Diese Unterschiede lassen sich durch die an die Sonnenhöhe gekoppelte Lamellenneigung im Bereich bis 45° erklären. Die Unterschiede des Transmissionsgrades τ_j sowohl hinsichtlich der Sonnenhöhe als auch hinsichtlich des Reflexionsgrades α_j sind beträchtlich:

der Transmissionsgrad für Lamellen mit $\alpha_j = 0\%$ reicht von 0% bis 31% . Für Lamellen mit $\alpha_j = 100\%$ werden Werte von 0% bis 40% erreicht.

Bei einer Sonnenhöhe γ_S von 45° , d.h. wenn die Lamellen auf ganzer Tiefe direkt von der Sonne bestrahlt werden, liegt der Transmissionsgrad für Lamellen mit $\alpha_j = 0\%$ bei 9% , bei Lamellen mit $\alpha_j = 100\%$ dagegen bei 22% .

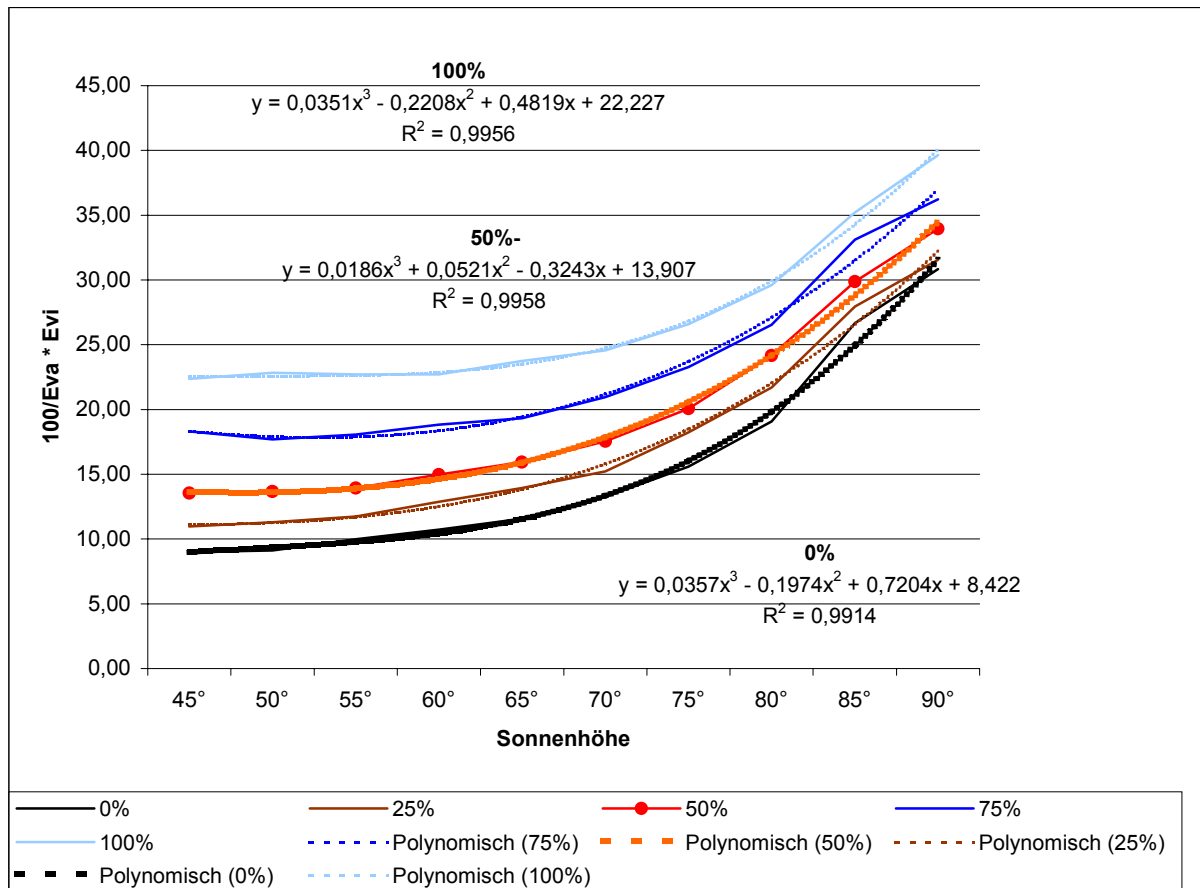
Als nächster Schritt werden die beiden Bereiche einzeln untersucht:

A) Gesamttransmissionsgrad τ_j in Abhängigkeit der Sonnenhöhe $0^\circ < \gamma_S \leq 45^\circ$ für verschiedene Reflexionsgrade der Lamellen (für $x = \gamma_S / 5^\circ$):



Grafik IV.6. Gesamttransmissionsgrad bei Sonnenhöhen bis 45°

B) Gesamttransmissionsgrad τ_j in Abhängigkeit der Sonnenhöhe $45^\circ \leq \gamma_S \leq 90^\circ$ für verschiedene Reflexionsgrade der Lamellen (für $x = \gamma_S / 5^\circ$):



Grafik IV.7. Gesamttransmissionsgrad bei Sonnenhöhen von 45° - 90°

Fazit: der Reflexionsgrad α_J sowie die Lamellenneigung γ_J in Abhängigkeit der Sonnenhöhe γ_S haben einen großen Einfluss auf die Gesamttransmission τ_J einer Jalousie.

Curriculum Vitae

Michael **Laar**

31.03.1965	geb. in München, als Sohn des Kaufmanns Rudolf Laar und seiner Ehefrau Jutta, geb. Lindenthal
1975 – 1981	Gymnasium Erding
1981 – 1982	Gymnasium Altötting
1982 – 1984	Fachoberschule Altötting
1984	Reifeprüfung
1984 – 1986	Wehrdienst bei der Luftwaffe
1986 – 1993	Studium der Architektur an der Fachhochschule München
März 1993	Diplom
1993 – 1995	Architekt im Institut für ökologische Architektur und Städtebau, Köln
1993 – 1996	Studium der Tropentechnologie am Institut für Tropentechnologie, FH Köln
1996	Diplom (Masteräquivalent)
1996 – 1997	Freier Mitarbeiter bei GPP, Bonn und im Architekturbüro Jankowski, Köln
seit 1997	Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Tropentechnologie, Köln
Oktober 2001	Verleihung des akademischen Grades „Master of Engineering“ durch die FH Köln

Rio de Janeiro, den 8.8.2002