



Ein einfaches Modell zur Klassifizierung der Tageslichtversorgung von Innenräumen mit vertikalen Fassaden

Dipl.-Ing. Jan de Boer,
Dipl.-Ing. Hans Erhorn

Fraunhofer-Institut für Bauphysik
(Institutsleitung: Prof. Dr. Gerd Hauser, Prof. Dr. Klaus Sedlbauer)
Nobelstraße 12
D-70569 Stuttgart

Inhalt

1. Einleitung	2
2. Grundlagen	3
3. Teilmodelle	10
3.1. Unverbauter Raum	10
3.2. Verbauter Raum	16
4. Gesamtmodell	29
5. Ausblick	31
6. Literatur	36

1. Einleitung

In der effizienten Nutzung des Tageslichtes in Funktionsgebäuden liegt ein großes energetisches Einsparpotential. Die von der EU-Kommission erlassene Richtlinie zur Gesamtenergieeffizienz von Gebäuden [7], die kurzfristig bis Anfang 2006 in allen Mitgliedsländern umgesetzt werden muss, soll dieses Potential freisetzen. Die Bewertungsmethode der Energieeinsparverordnung soll hierzu erweitert werden, um die Energieaufwendungen für Gebäudeklimatisierung und Beleuchtung primärenergetisch denen der Beheizung gegenüber zu stellen. Hierbei spielen neben effizienten künstlichen Beleuchtungssystemen Techniken der Tageslichtnutzung eine herausragende Rolle, da sie helfen sowohl die Beleuchtungsenergie als auch gleichzeitig den Kühlenergiebedarf zu reduzieren.

In den Normungsgremien zur Umsetzung der Richtlinie auf nationaler wie auf europäischer Ebene wird ein zweistufiges Verfahren zum Nachweis des Beleuchtungsenergiebedarfs diskutiert. In einer ersten Stufe soll die Tageslichtversorgung von Innenräumen klima- und lageunabhängig klassifiziert werden. In einer zweiten Stufe schließt sich dann die Korrelation der so klassifizierten Tageslichtversorgung mit monatlichen bzw. jährlichen klima-, lage- und nutzungsabhängigen Energiebedarfswerten für Beleuchtungszwecke an. In diesem Beitrag wird ein einfaches Modell zur Klassifizierung der Tageslichtversorgung vorgeschlagen. Ein in Frankreich [9] bereits genutztes generelles Konzept wird aufgegriffen, welches in Abhängigkeit einfacher bereits in der frühen Entwurfphase vorliegender, geometrischer Parameter die Einstufung ermöglicht. Dieses Konzept wird zu einem umfangreicheren Modell erweitert. Darüber hinaus wird kurz dargestellt, wie von der Klassifikation der Tageslichtversorgung über entsprechende Korrelationsansätze auf das tageslichtabhängige Beleuchtungsenergieeinsparpotential geschlossen werden kann.

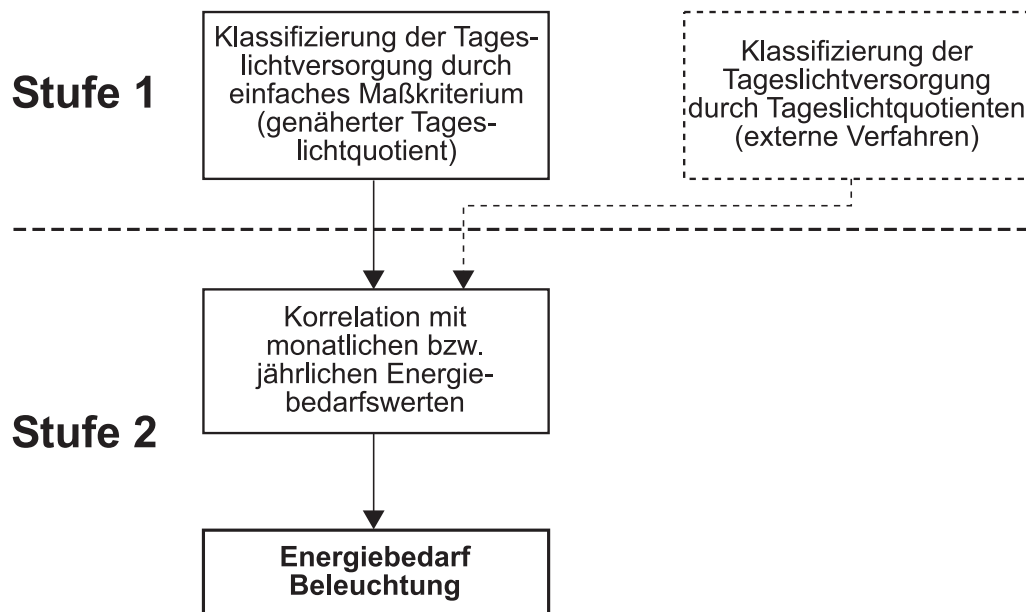


Bild 1: Zweistufiger Verfahrensansatz zur Ermittlung des Energiebedarfs für Beleuchtungszwecke in Innenräumen.

2. Grundlagen

Der diskutierte zweistufige Ansatz ist in Bild 1 dargestellt.

1. In der ersten Stufe wird die Tageslichtversorgung rein auf Grundlage geometrischer Parameter unabhängig von Klima und Lage der zu betrachteten Gebäudezone klassifiziert. Eine einfache Öffnung des Verfahrens ist angestrebt, so dass neben dem im folgenden abgeleiteten einfachen Model, auch detaillierte Berechnungsergebnisse (beispielsweise für komplexe Raumgeometrien) als Bewertungsgrundlage einfließen können.
2. In einer zweiten Stufe wird die gemäß Stufe 1 ermittelte Tageslichtversorgung mit monatlichen bzw. jährlichen Energiebedarfswerten für Beleuchtungszwecke korreliert. An dieser Stelle fließen weitere Verfahrensparameter wie Klima, Lage und das künstliche Beleuchtungssystem mit ein. Das generelle Vorgehen wird kurz in Ziffer 5 skizziert.

Im folgenden werden die an ein Klassifikationsverfahren zu stellenden Anforderungen formuliert. Bestehende Ansätze und der hieraus abgeleitete Bedarf an Verfahrenserweiterungen werden dargestellt. Des weiteren werden die an-

gesetzten allgemeinen Randbedingungen und der Aufbau einer zur Modellbildung genutzten Parametervariation vorgestellt.

Anforderungen

An die Klassifizierung der Tageslichtversorgung für ein einfaches Nachweisverfahren sind folgende Anforderungen zu stellen:

- *Berücksichtigung vorhandener Datenbasis:* Das Nachweisverfahren wird im frühen Planungsstadium zum Einsatz kommen. Im allgemeinen sind die relevanten Einflussgrößen für die Raumbeleuchtungsverhältnisse zu diesem Zeitpunkt erst teilweise bekannt. Die Informationen zur Geometrie des Gebäudekörpers und der Außenverhältnisse (Verbauungen), die maßgeblich die Tageslichtversorgung bestimmen, liegen vor. Dagegen werden beispielsweise die durch Innenausstattung (Reflektionsgrade der Raumumschließungsflächen) zu treffenden Vorgaben im allgemeinen erst zu späteren Zeitpunkten festgelegt. Hierfür sind plausible an der gängigen Planungspraxis orientierte Annahmen zu treffen. Sind vom im folgenden Modell abweichende Randbedingungen bereits in der frühen Planungsphase bekannt und sollen sie zur Erschließung weiterer Energieeinsparpotentiale angerechnet werden, ist auf andere detailliertere Bewertungsverfahren (siehe unten) auszuweichen.
- *Einfachheit:* Die Verfahrensnutzung sollte bei ausreichender Genauigkeit auf Grundlage der verfügbaren Information einfach möglich sein. Detaillierte lichttechnische Kenntnisse sollen nicht erforderlich sein.
- *Abstimmung mit Gesamtnachweisverfahren:* Das Modell sollte nach Möglichkeit in Übereinstimmung mit der Modellbildung des diskutierten Gesamtnachweisverfahrens stehen. So sollten beispielsweise Verbauungen und Auskragungen analog der üblichen Bewertung der solaren Wärmegewinne (vgl. Teilbestrahlungsfaktoren in [1]) berücksichtigt werden.
- *Wahl des Maßkriteriums:* Als Maßkriterium wird der Tageslichtquotient herangezogen. Der Tageslichtquotient beschreibt das Verhältnis der Innenbeleuchtungsstärke am Nachweisort zur Außenbeleuchtungsstärke,

ermittelt für den unverbauten bedeckten Himmel und stellt somit eine lage- und klimaunabhängige Bewertungsgröße dar. In unseren Breiten erscheint er aufgrund der überwiegend bedeckten Himmelszustände (unter 40 % Sonnenscheinwahrscheinlichkeit im Jahresmittel) als eine geeignete Größe zur Klassifizierung der Tageslichtversorgung von Innenräumen. Ergänzend sei angemerkt, dass bereits zahlreiche Korrelationsverfahren des Tageslichtquotienten mit Jahresbeleuchtungsenergiebedarfswerten – sowohl für vertikale als auch horizontale Fassadenöffnungen – existieren, so dass die generelle Vorgehensweise eingeführt ist.

Bestehende Ansätze

Es existieren zahlreiche analytische, grafische und rechnergestützte Verfahren zur Ermittlung der Tageslichtverhältnisse (speziell des Tageslichtquotienten) und damit einer möglichen Klassifizierung der Tageslichtversorgung in Innenräumen [1]. Detaillierte Berechnungsverfahren ermöglichen dies für nahezu beliebige Geometrien und Materialoberflächen, erfordern jedoch eine größere Anzahl Eingabeparameter und teilweise detaillierte licht- und simulationstechnische Kenntnisse. Sie sind daher für ein einfaches Nachweisverfahren ungeeignet. Näherungslösungen unterschiedlicher Randbedingungen und Genauigkeit [5], [10] können genutzt werden, jedoch erscheint auch hier der Aufwand oft noch zu hoch. Oben formulierte Anforderungen wie die Berücksichtigung von Verbauungen und Auskragungen zwecks Abstimmung mit dem Gesamtnachweisverfahren werden bei Näherungslösungen bis dato unzureichend erfüllt.

In [9] wird ein bereits in der französischen Normung genutztes einfaches Klassifikationsverfahren beschrieben. Ausgehend von der Beschreibung des potentiell in den Raum eindringenden Lichts durch einen *Transparenzindex* I_{Tr} und einen *Raumtiefenindex* I_{Rt} erfolgt gemäß Tabelle 1 eine Klassifizierung der Tageslichtversorgung. Hierbei wird zwischen einem „globalen“ und einem „detaillierten“ Ansatz unterschieden. Die „globale“ Methode verzichtet auf eine „detaillierte“ Zonierung des Gebäudes in Einzelräume oder Gruppen von Räumen mit gleichen Eigenschaften, wogegen der „detaillierte“ Ansatz dies gestattet. Der Transparenzindex ist wie folgt definiert

$$I_{Tr} = 100 \cdot \frac{A_V \cdot \tau}{A_{TL}} \quad [\%] \quad (1)$$

A_V verglaste Fensterfläche [m²]

τ Lichttransmission [-]. Ergibt sich aus Lichttransmission bei senkrechtem Lichteinfall τ_{D65} multipliziert mit einem Abminderungsfaktor von 0,9 für nicht senkrechten Lichteinfall. In [9] angegeben: Empfehlungswert für Wärmeschutzverglasung: 0,65.

A_{TL} Zonenfläche, die von Tageslicht profitiert [m²]

A_V stellt bei beiden Ansätzen die Summe der Glasflächen dar. Diese kann aus der Fläche der Rohbauöffnung A_R über $A_V = A_R \cdot k_1$ ermittelt werden, wobei k_1 den Versprossungsfaktor darstellt. Wird des weiteren noch die Verschmutzung der Verglasung betrachtet ist mit einem Verschmutzungsfaktor k_2 zu multiplizieren.

Der Raumtiefenindex des „detaillierten“ Ansatzes ergibt sich nach Bild 2 zu

$$I_{Rt} = \frac{W_R}{H_{Sturz} - H_{Nutzebene}} \quad [-] \quad (2)$$

W_R Tiefe der betrachteten Zone, bzw. des Raumes [m]

H_{Sturz} Höhe des Fenstersturzes [m]

$H_{Nutzebene}$ Höhe der Nutzebene (bei sitzender Tätigkeit in Büros: 0,8m) [m]

Der Raumtiefenindex ist für unterschiedliche Parameterkombinationen in Bild 3 dargestellt. Für die „globale“ Methode wird vereinfachend

$$I_{Rt} = \frac{A_{TL}}{1.3 \cdot L_F} \quad [-] \quad (3)$$

L_F Länge der nach Außen grenzenden Fassade der tageslichtversorgten Zone [m]

angesetzt, was bei einem einseitig natürlich belichteten rechteckigen Raum

$$I_{Rt} = \frac{W_R}{1.3} \quad [-]$$

entspricht. Mit einer Sturzhöhe $H_{\text{Sturz}} = 2,1 \text{ m}$ und einer Höhe der Nutzebene von $H_{\text{Nutzebene}} = 0,8 \text{ m}$ ergibt sich der Wert des Nenners gemäß Gleichung (2) zu 1,3.

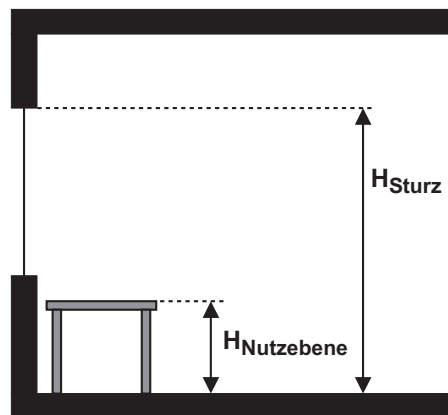


Bild 2: Zur Bestimmung des Raumtiefenindex I_{Rt} .

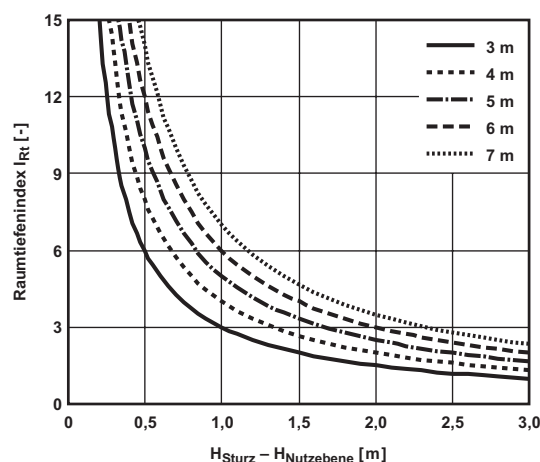


Bild 3: Zum Raumtiefenindex I_{Rt} : Variation des Raumtiefenindex mit $W_R = 3 \text{ m}$; 4 m ; 5 m ; 6 m ; 7 m in Abhängigkeit der anrechenbaren Höhendifferenz $H_{\text{Sturz}} - H_{\text{Nutzebene}}$.

Das aus den Indizes gebildete Maßkriterium wird dabei gemäß Tabelle 1 in drei Schritten als *schwach*, *mittel* oder *gut* eingestuft. Die Klassifikation der Tageslichtversorgung ist somit ohne detaillierte lichttechnische Kenntnisse direkt aus geometrischen Größen und einem Materialparameter (Transmissionsgrad der Verglasung) durchzuführen und wird konzeptionell als Grundlage des erweiterten Modells genutzt.

Maßkriterium	Klassifizierungsstufe der Tageslichtversorgung
$I_{Tr} - 5 I_{Rt} \geq 0$	Gut
$0 \geq I_{Tr} - 5 I_{Rt} > -5$	Mittel
$-5 \geq I_{Tr} - 5 I_{Rt}$	Schwach

Tabelle 1: Klassifizierungsstufen der Tageslichtversorgung nach [9].

Erweiterungen

Der Ansatz ist hinsichtlich einer Berücksichtigung von Verbauungen sowie des physikalischen Bezugs des Klassifizierungskriteriums zu erweitern und zu überarbeiten. Bis dato werden sämtliche Verbauungen im Außenraum vernachlässigt. Diese können jedoch durch Eigenverschattungen des Gebäudes (Auskragungen, Glasdoppelfassaden, Innenhöfe, Atrien) und Fremdverschattungen - wie in eng bebauten städtebaulichen Umfeldern - signifikante Abminderung der Tageslichtversorgung verursachen. Somit kann es momentan bei der Verfahrensanwendung zu einer erheblichen Unterschätzung des Energiebedarfs für Beleuchtungszwecke kommen. Des weiteren erfolgt die Klassifizierung durch eine Abbildung auf einen physikalisch bezuglosen Wertebereich. Würde dieser Wertebereich dagegen den Tageslichtquotienten approximieren, kann, wie bereits in Bild 1 dargestellt, innerhalb des Verfahrens eine Schnittstelle geschaffen werden, die - in Sonderfällen - den Einsatz externer Verfahren erlaubt.

Allgemeine Randbedingungen

Sowohl bei Innenräumen als auch bei Verbauungen werden die Reflexionsgrade gemäß Tabelle 2 fixiert. Für Innenräume wird hierbei von den Mindestanforderungen gemäß DIN 5034 [3] ausgegangen. Reflexionsgrade im Außenfeld werden pauschal auf einen Wert von 0,2 gesetzt. Dieser Wert entspricht der Annahme des mittleren äußeren Reflektionsgrades nach [4]. Ggf. bessere Beleuchtungsverhältnisse bei höheren Reflektionsgraden, können wie dargelegt, separat nachgewiesen werden.

Parameter		Wert
Lichtreflexionsgrad	Raumboden	0,2
	Raumwände	0,5
	Raumdecke	0,7
	Außenraum (Boden, Verbauungen, mittlere Reflektionsgrad Atrienwände, horizontale und vertikale Überhänge)	0,2

Tabelle 2: Zugrunde gelegte Lichtreflexionsgrade.

Bei den hier betrachteten vertikalen Fassaden kann nur ein gewisser Raumbereich in Fassadennähe mit Tageslicht versorgt werden. Analog [8] wird im wesentlichen - bis auf Sonderfälle sehr hoher Räume mit entsprechend hoch verglasten Fassaden - ein 5 m tiefer Zonenbereich als natürlich belichtet betrachtet; raumtiefere Bereiche werden als nicht tageslichtversorgt angesetzt und gehen damit nicht in die Bewertung ein. Diese Regelung ermöglicht eine recht einfache beleuchtungstechnische Zonierung eines Gebäudes.

Bei tageslichtabhängig kontrollierten Beleuchtungssystemen ist des weiteren der Nachweisort zur Bestimmung der Beleuchtungsverhältnisse festzusetzen. Dieser wird in halber Tiefe des tageslichtversorgten Bereichs angesetzt. Bei Räumen mit Raumtiefen größer oder gleich 5 m ergibt sich somit eine Nachweisachse bei 2,5 m. Bei geringeren Raumtiefen, wandert der Nachweisort entsprechend näher an die Fassade. Die Beleuchtungsverhältnisse werden über die Achse parallel zur Fassade gemittelt. Variierende Sensorposition und horizontal verschobene Fensterpositionen, die in der folgenden Parametervariation nicht variiert werden, finden hiermit im Mittel näherungsweise Berücksichtigung.

Fassadenparameter werden in der eigentlichen Klassifizierung der Tageslichtversorgung zunächst nicht berücksichtigt. Zunächst erfolgt eine reine Betrachtung der Rohbauöffnung. Sodann kann das erhaltene Maßkriterium, wie unter Ziffer 5 dargestellt, mit den Transmissionseigenschaften der Verglasung analog DIN 5034 [5] gewichtet werden bzw. kann in einer fassadensystemabhängigen Korrelation mit zeitlich integralen Einsparkennwerten Berücksichtigung finden.

Da verglaste Brüstungsbereiche nur einen geringen Beitrag zur Beleuchtung normaler Nutzbereiche beisteuern, werden Fensterhöhen erst ab einer Höhe der Fensterunterkante von 0,8 m anrechenbar. Bis auf den Boden verglaste Fassaden tragen somit gegenüber derselben Fassade mit einer opaken Brüstung von 0,8 Höhe zu keiner Verbesserung der Beleuchtungsverhältnisse bei.

Parametervariation

Das Modell wird durch Regression der ermittelten Tageslichtquotienten gegen geometrische Maße gewonnen. Die Tageslichtquotienten werden in einer Parametervariation mittels des Lichtberechnungsprogramms RADIANCE [6] ermittelt. Als Grunddatensatz dienen 30 Variationen der Geometrie eines unverbauten Raumes. Für jeden dieser 30 Fälle werden wiederum die äußere Verbauung, horizontale und vertikale Auskragungen, Innenhöfe und Atrien variiert. Bei Innenhöfen und Atrien fließen jeweils pro Geschossebene ein mittig gelegener Raum und ein Eckraum ein. Das Modell basiert somit auf über 800 betrachteten Varianten.

3. Teilmodelle

3.1. Unverbauter Raum

Variiert werden die Raumtiefe [3,6 m; 4,8 m; 7,2 m], die Raumbreite [3,6 m; 4,8 m; 7,2 m], die Raumhöhe [2,7 m; 3 m; 3,3 m], der wirksame Fensterflächenanteil [25 %; 40 %; 60 %; 73 %] und mit der Brüstungshöhe die vertikale Fensterposition [0,0 m; 1 m]. Teilweise werden Kreuzvariationen durchgeführt. Der Fensterflächenanteil von 73 % entspricht real dem Fall 100 % Flächenanteil, da Brüstungsbereiche bis 0,8 m nicht berücksichtigt werden. Sämtliche betrachteten Fälle sind in Tabelle 3 zusammengestellt. Bild 4 zeigt das geometrische Raummodell für ausgewählte Fälle.

Auf Grundlage von Tabelle 4 wird aus den errechneten Tageslichtquotienten durch Regression das Maßkriterium

$$I'_R = (4,13 + 20,0 * I_{Tr} - 1,36 * I_{Rt}) [\%] \quad (4)$$

des unverbauten Raumes mit Rohbauöffnung ermittelt. Ungleich dem Ansatz nach [9], wie unter Ziffer 2 (vgl. Gleichungen (1)) dargestellt, wird der Transparenzindex nicht in Prozent angegeben. Er bezieht sich gemäß

$$I_{Tr} = \frac{A_R}{A_{TL}} \quad [-] \quad (5)$$

A_R Fläche der Rohbauöffnung [m²]

auf die Rohbauöffnung, d.h. ohne Berücksichtigung der Transmissionseigenschaften der Verglasung. Die Berücksichtigung der Transmissionseigenschaften wird unter Ziffer 4 dargelegt. Für den Raumtiefenindex wird auf die Definition des „detaillierten“ Verfahrens [9] gemäß Gleichung (2) zurückgegriffen.

Die durch Gleichung (4) aufgespannte Ebene ist mit denen der Regression zugrunde liegenden Tageslichtquotienten in Bild 5 dargestellt. Bild 6 (links) zeigt die Korrelation der Tageslichtquotienten mit der Maßzahl $I_{Tr} - 5 I_{Rt}$ nach [9] für den „globalen“ und den „detaillierten“ Ansatz; Bild 6 (rechts) die Korrelation nach Gleichung (4). Es stellen sich näherungsweise lineare Abhängigkeiten ein. Der Vergleich des „globalen“ und des „detaillierten“ Ansatzes nach [9] zeigt, dass im „detaillierten“ Fall die Tageslichtversorgung als besser eingestuft wird. Die schlechtere Klassifikation der Tageslichtversorgung bei dem „globalen“ Ansatz ist auf die pauschal angenommene geringe Sturzhöhe von 2,1 m (vgl. Ziffer 2) zurückzuführen. Das überarbeitete Maßkriterium I'_R nach Gleichung (4) entspricht einer Ursprungsgerade mit Steigung 1 und stellt somit eine Näherung des Tageslichtquotienten dar.

Wie Gleichung (4) und Bild 5 zu entnehmen ist, ist der Transparenzindex der maßgebliche Verfahrensparameter. Der Raumtiefenindex ist deutlich weniger signifikant. Bei jeweils ansonsten unveränderten Parametern wird das Maßkriterium I'_R mit wachsender Rohbauöffnung und wachsender Differenz $H_{Sturz} - H_{Nutzebene}$ größer, verringert sich dagegen mit größerer vom Tageslicht profitierender Fläche und größerer Raumtiefe. Somit erscheint der gewählte Ansatz generell als plausibel.

Bild 7 ist der direkte Vergleich der errechneten Tageslichtquotienten mit denen nach Gleichung (4) genäherten Maßkriterien I'_R für alle 30 Variationen zu entnehmen.

Fall		Raumparameter				Fassadenparameter, transparenter Teil**						
		Breite	Tiefe	Höhe	Fläche die vom Tageslicht profitiert*	Breite	Höhe	Brüstungshöhe	Sturz	Fensterflächenanteil	ansetzbarer Fensterflächenanteil***	ansetzbare transparente Fläche
		[m]	[m]	[m]	A_{TL} [m²]	[m]	[m]	[m]	[m]	[%]	[%]	A_r [m²]
Nr	Haupt-variation											
1	Raumtiefe	3,6	3,6	3,0	12,96	2,15	2,0	0,85	0,15	40%	40%	4,3
2		3,6	4,8	3,0	17,28	2,15	2,0	0,85	0,15	40%	40%	4,3
3		3,6	7,2	3,0	18,0	2,15	2,0	0,85	0,15	40%	40%	4,3
4	Raumbreite	4,8	3,6	3,0	17,28	2,85	2,0	0,85	0,15	40%	40%	5,7
5		4,8	4,8	3,0	23,04	2,85	2,0	0,85	0,15	40%	40%	5,7
6		7,2	3,6	3,0	25,92	4,3	2,0	0,85	0,15	40%	40%	8,6
7		7,2	4,8	3,0	34,56	4,3	2,0	0,85	0,15	40%	40%	8,6
8	Raumhöhe	7,2	7,2	3,0	36,0	4,3	2,0	0,85	0,15	40%	40%	8,6
9		3,6	3,6	2,7	12,96	2,3	1,7	0,85	0,15	40%	40%	3,9
10		3,6	4,8	2,7	17,28	2,3	1,7	0,85	0,15	40%	40%	3,9
11		3,6	7,2	2,7	18,0	2,3	1,7	0,85	0,15	40%	40%	3,9
12		7,2	7,2	2,7	36	4,6	1,7	0,85	0,15	40%	40%	7,8
13		3,6	3,6	3,3	12,96	2,25	2,1	0,85	0,35	40%	40%	4,73
14		3,6	4,8	3,3	17,28	2,25	2,1	0,85	0,35	40%	40%	4,73
15		3,6	7,2	3,3	18,0	2,25	2,1	0,85	0,35	40%	40%	4,73
16	Fensterflächenanteil	7,2	7,2	3,3	36,0	4,5	2,1	0,85	0,35	40%	40%	9,45
17		3,6	3,6	3,0	12,96	1,5	1,8	1,0	0,2	25%	25%	2,7
18		3,6	4,8	3,0	17,28	1,5	1,8	1,0	0,2	25%	25%	2,7
19		3,6	7,2	3,0	18,0	1,5	1,8	1,0	0,2	25%	25%	2,7
20		7,2	7,2	3,0	36,0	3	1,8	1,0	0,2	25%	25%	5,4
21		3,6	3,6	3,0	12,96	3,25	2,0	0,85	0,15	60%	60%	6,5
22		3,6	4,8	3,0	17,28	3,25	2,0	0,85	0,15	60%	60%	6,5
23		3,6	7,2	3,0	18,0	3,25	2,0	0,85	0,15	60%	60%	6,5
24		7,2	7,2	3,0	36,0	6,5	2,0	0,85	0,15	60%	60%	13
25		3,6	3,6	3,0	12,96	3,6	3,0	0,0	0,0	100%	73%	7,92
26		3,6	4,8	3,0	17,28	3,6	3,0	0,0	0,0	100%	73%	7,92
27		3,6	7,2	3,0	18,0	3,6	3,0	0,0	0,0	100%	73%	7,92
28	Fensterposition	7,2	7,2	3,0	36,0	7,2	3,0	0,0	0,0	100%	73%	15,84
29		3,6	4,8	3,0	17,28	2,15	2,0	0,0	1,0	40%	24%	2,58
30		3,6	4,8	3,0	17,28	2,15	2,0	1,0	0,0	40%	40%	4,3

* Raumtiefen bis maximal 5 m werden angesetzt,

** horizontal jeweils mittig zentriert

*** Fensterflächen werden erst ab einer Brüstungshöhe von 0,8 m angesetzt

Tabelle 3: Betrachtete Varianten des unverbauten Raumes.

Fall	Klassifikation nach [9]					Errechneter Tageslichtquotient für Rohbauöffnung***	Überarbeitete und erweiterte Klassifikation		
	Transparenzindex I_{Tr}^*	Raumtiefenindex I_{Rt}^{**}		Maßkriterium ($I_{Tr} - 5 \cdot I_{Rt}$)			Transparenzindex I_{Tr}	Raumtiefenindex I_{Rt}	Maßkriterium I'_R
		Global	Detailliert	Global	Detailliert				
1	17,58	2,77	1,76	3,74	8,80	8,41	0,332	1,76	8,37
2	13,19	3,69	2,34	-5,27	1,48	5,35	0,249	2,34	5,92
3	12,66	3,85	2,44	-6,57	0,47	4,89	0,239	2,44	5,59
4	17,48	2,77	1,76	3,64	8,70	8,97	0,33	1,76	8,34
5	13,11	3,69	2,34	-5,35	1,40	5,97	0,247	2,34	5,89
6	17,58	2,77	1,76	3,74	8,80	9,96	0,332	1,76	8,37
7	13,19	3,69	2,34	-5,27	1,48	6,63	0,249	2,34	5,92
8	12,66	3,85	2,44	-6,57	0,47	5,94	0,239	2,44	5,59
9	15,99	2,77	2,06	2,14	5,70	7,19	0,302	2,06	7,36
10	11,99	3,69	2,74	-6,47	-1,72	4,54	0,226	2,74	4,92
11	11,51	3,85	2,86	-7,72	-2,77	4,15	0,217	2,86	4,59
12	11,51	3,85	2,86	-7,72	-2,77	5,12	0,217	2,86	4,59
13	19,32	2,77	1,67	5,48	10,95	9,17	0,365	1,67	9,14
14	14,49	3,69	2,23	-3,97	3,33	5,98	0,273	2,23	6,56
15	13,91	3,85	2,33	-5,32	2,28	5,37	0,263	2,33	6,21
16	13,91	3,85	2,33	-5,32	2,28	6,61	0,263	2,33	6,21
17	11,04	2,77	1,80	-2,80	2,04	5,71	0,208	1,80	5,85
18	8,28	3,69	2,40	-10,18	-3,72	3,69	0,156	2,40	3,99
19	7,95	3,85	2,50	-11,28	-4,55	3,30	0,15	2,50	3,73
20	7,95	3,85	2,50	-11,28	-4,55	4,10	0,15	2,50	3,73
21	26,58	2,77	1,76	12,74	17,80	11,98	0,502	1,76	11,77
22	19,94	3,69	2,34	1,47	8,23	7,64	0,376	2,34	8,46
23	19,14	3,85	2,44	-0,09	6,94	6,95	0,361	2,44	8,03
24	19,14	3,85	2,44	-0,09	6,94	8,64	0,361	2,44	8,03
25	32,39	2,77	1,64	18,54	24,21	14,54	0,611	1,64	14,12
26	24,29	3,69	2,18	5,83	13,38	9,62	0,458	2,18	10,32
27	23,32	3,85	2,27	4,09	11,96	8,69	0,44	2,27	9,83
28	23,32	3,85	2,27	4,09	11,96	10,85	0,44	2,27	9,83
29	7,91	3,69	4,00	-10,55	-12,09	2,64	0,149	4,00	1,67
30	13,19	3,69	2,18	-5,27	2,28	5,86	0,249	2,18	6,14

* unter der Annahme, dass sich die verglaste Fläche gemäß $A_v = A_R \cdot k_1$, mit Versprossungsfaktor $k_1 = 0,9$, aus der Rohbauöffnung A_R ergibt und der Transmissionsgrad einen Verschmutzungsfaktor $k_2=0,9$ beinhaltet: $\tau = 0,65 \cdot 0,9 \cdot 0,9 = 0,53$.

** bezieht sich auf Fläche die vom Tageslicht profitiert

*** in halber Raumtiefe der tageslichtversorgten Fläche

Tabelle 4: Errechnete Tageslichtquotienten und Klassifikation der Tageslichtversorgung nach dem ursprünglichen und überarbeiteten Ansatz für die betrachteten Varianten des unverbauten Raumes.

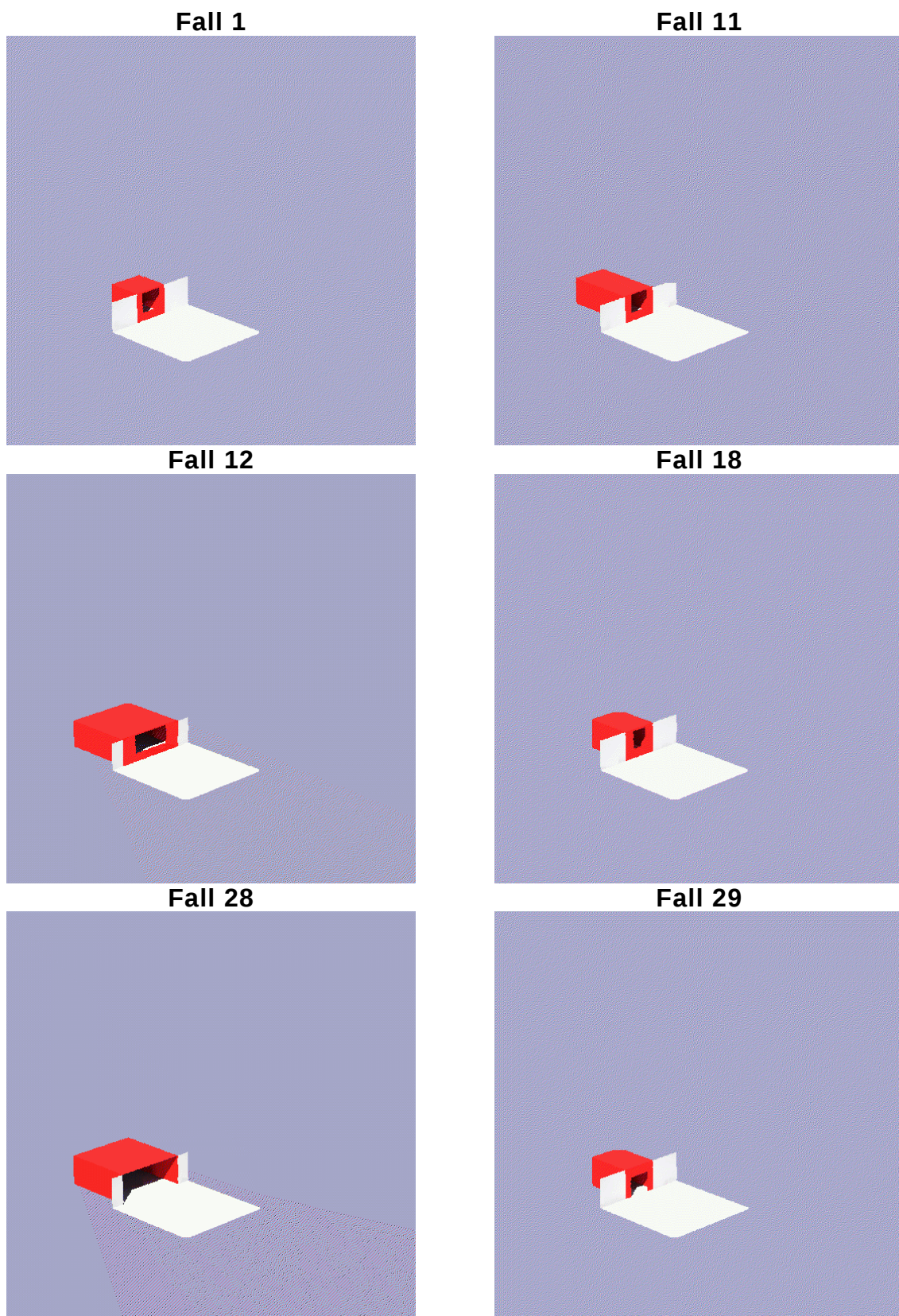


Bild 4: Exemplarische Visualisierung des Modells für unverbaute Büros für die Fälle 1, 11, 12, 18, 28 und 29. Raum aus Illustrationszwecken rot gefärbt.

Tageslichtquotienten Regressionsmodell

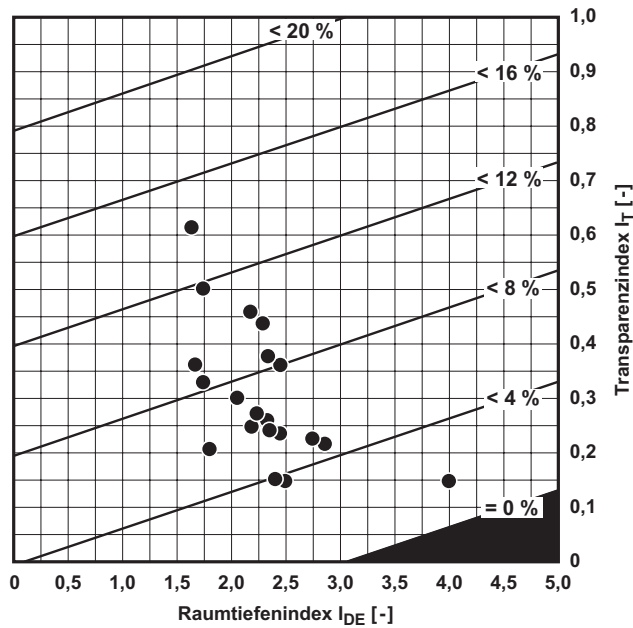


Bild 5: Errechnetes Maßkriterium I'_R aufgetragen über der mit I_{Tr} und I_{Rt} parametrisierten Regressionsebene. Die Indexpaare (I_{Tr}, I_{Rt}) der betrachteten 30 Fälle des unverbauten Raumes sind eingetragen. Datenpunkte können einander verdecken.

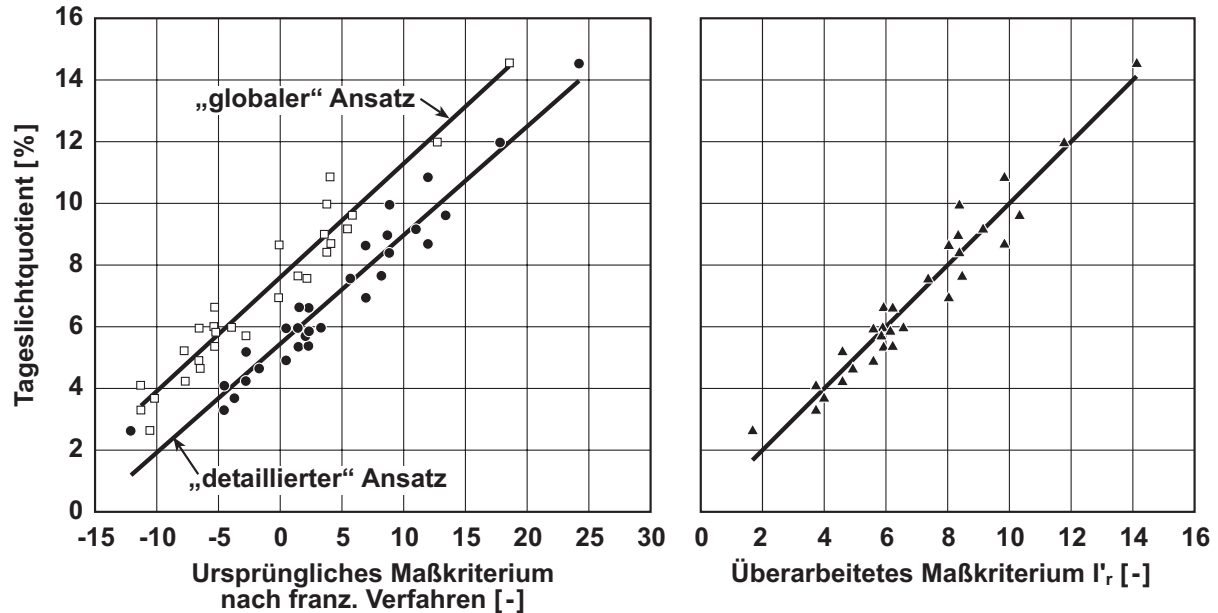


Bild 6: Errechneter Tageslichtquotient aufgetragen über dem als Funktion von I_{Tr} und I_{Rt} ermittelten Maßkriterium des „globalen“ und des „detaillierten“ Ansatzes nach [9] (links). Errechneter Tageslichtquotient aufgetragen über dem als Funktion von I_{Tr} und I_{Rt} ermittelten überarbeiteten Maßkriterium I'_R (rechts).

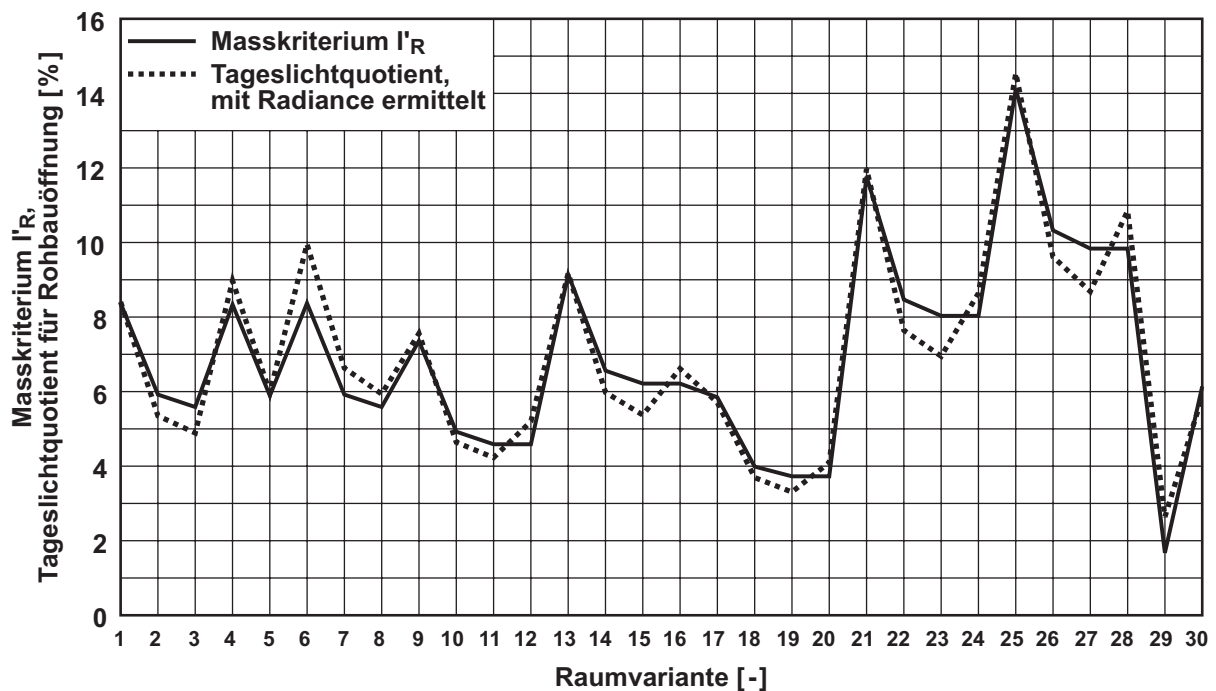


Bild 7: Vergleich des errechneten Tageslichtquotienten mit dem als Funktion von I_{Tr} und I_{Rt} bestimmten Maßkriteriums I'_R für die 30 untersuchten Fälle. Des weiteren ist die Einstufung der Tageslichtversorgung nach [9] angegeben.

3.2. Verbauter Raum

Für jeweils jede der 30 betrachteten Varianten des unverbauten Raumes werden die äußere Verbauung [2, 3, 4, 5 Geschosse, was bei dem zugrunde liegenden Abstand Verbauungswinkeln von 31° , 42° , 50° und 56° entspricht], horizontale Auskragungen [15° , 30° , 45° , 60°], vertikale Auskragungen [15° , 30° , 45° , 60°], Innenhöfe [1, 3, 7 Geschosse] und Atrien [1, 2, 3, 5, 7 Geschosse] variiert. Bei Innenhöfen und Atrien werden jeweils pro Geschossebene ein mittig gelegener Raum und ein Eckraum betrachtet. Darüber hinaus wird eine Möglichkeit der Berücksichtigung von Glasdoppelfassaden angegeben. Die Verbauungsgeometrien sind Bild 8 zu entnehmen. Sie wurden für lineare Verbauung, horizontale und vertikale Auskragungen analog der Ermittlung der Teilbestrahlungsfaktoren in [2] definiert. Bild 9 und Bild 10 zeigen exemplarisch die Visualisierung ausgewählter Verbauungssituationen. Tabelle 5 sind sämtliche errechnete Tageslichtquotienten zu entnehmen. In Bild 11 sind Regressionsgeraden dargestellt, die sich in Abhängigkeit des jeweils variierten Parameters ergeben. Die Regression wird derart durchgeführt, dass Ursprungsgeraden entstehen. Andere Regressionsgeraden können geringfügig-

gig bessere Anpassungen bringen, werden aufgrund der Modellkonsistenz jedoch nicht genutzt. Die sich ergebenden Anpassungsfunktionen sind jeweils in Bild_12 dargestellt. Die Einflüsse der unterschiedlichen Verbauungstypen können wie folgt im einzelnen beschrieben werden.

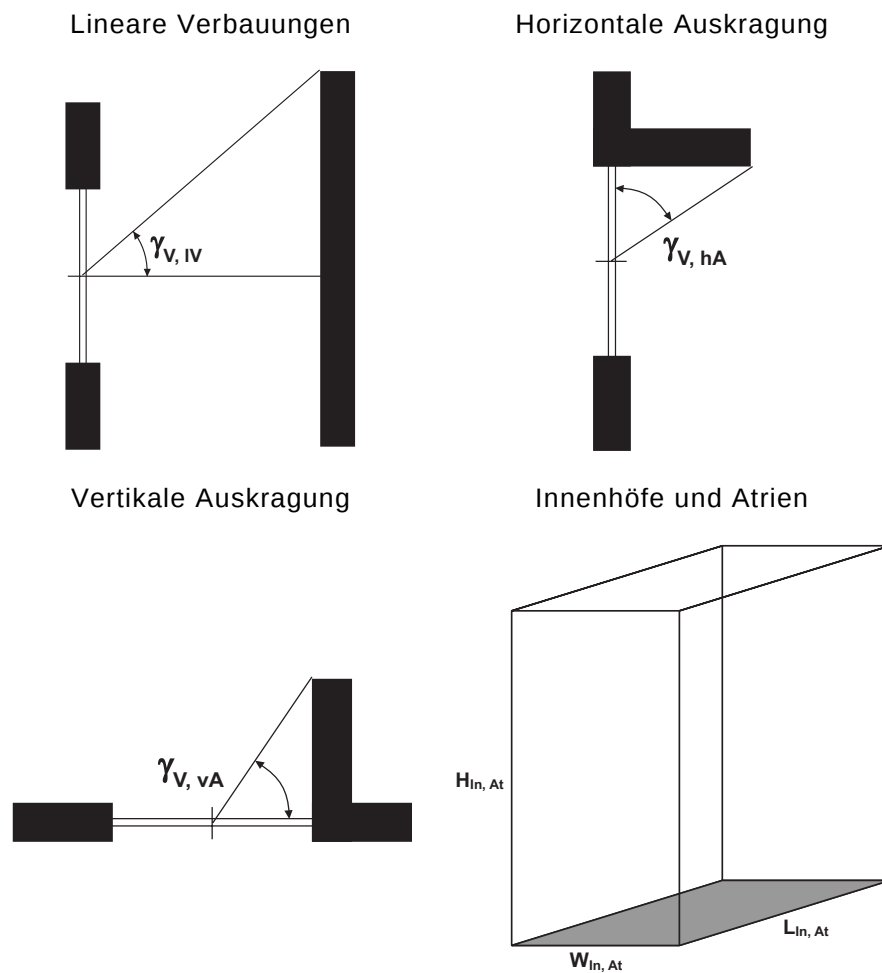


Bild 8: Zur Bestimmung der Verbauungsgeometrien.

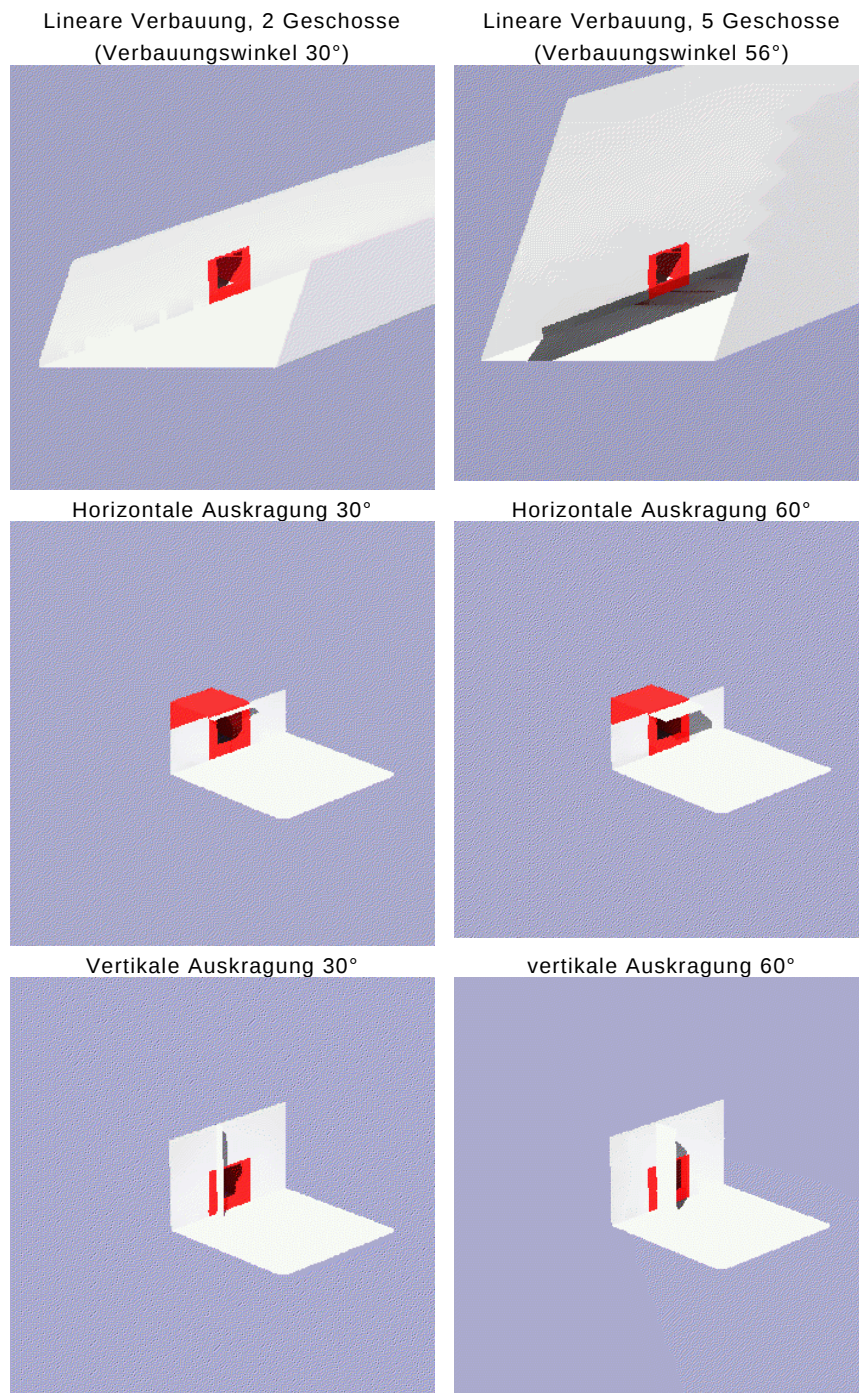
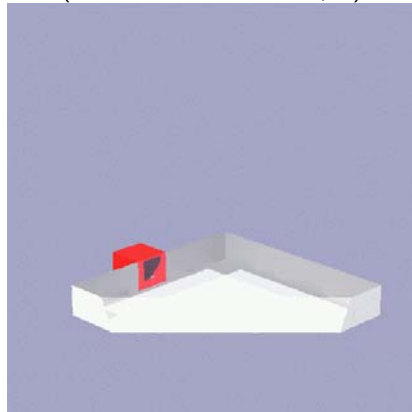
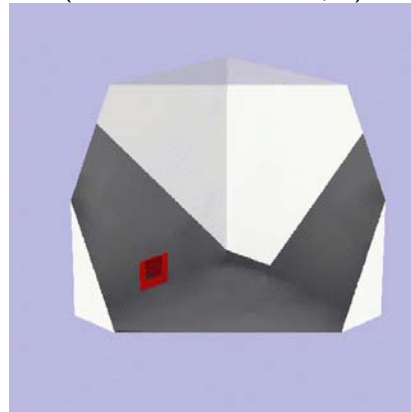


Bild 9: Exemplarische Visualisierungen des verbauten Raums. Raum aus Illustrationszwecken gefärbt und Modell teilweise aufgeschnitten.

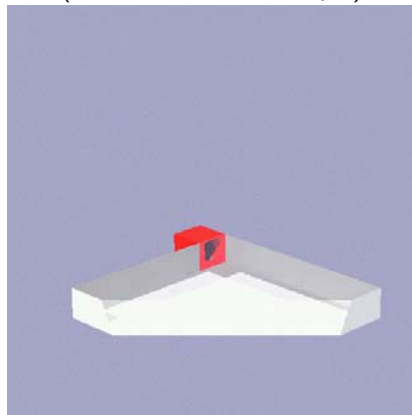
Atrium, Raum mittig, 1 Geschoss
(Lichtschachtindex $w_i=0,15$)



Atrium, Raum mittig, 7 Geschosse
(Lichtschachtindex $w_i=1,05$)



Atrium, Raum seitlich, 1 Geschoss
(Lichtschachtindex $w_i=0,15$)



Atrium, Raum seitlich, 7 Geschosse
(Lichtschachtindex $w_i=1,05$)

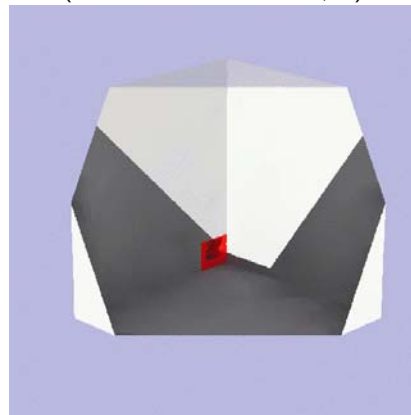
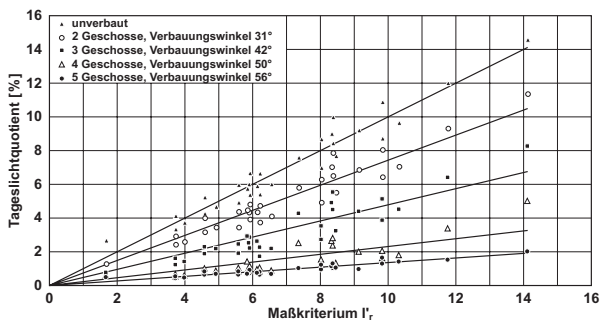


Bild 10: Exemplarische Visualisierungen des an Atrien grenzenden Modells. Raum aus Illustrationszwecken rot gefärbt und Modell aufgeschnitten. Die Modelle der Innenhöfe sind bis auf die Atriumsverglasungsebene gleich ausgebildet.

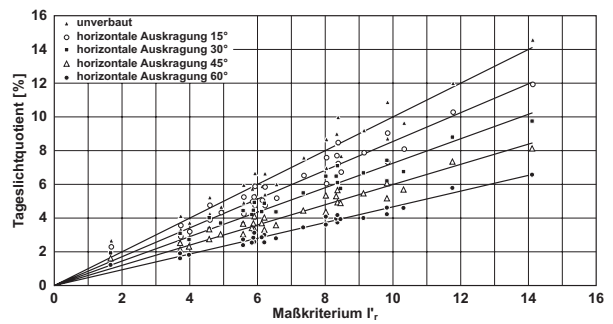
Varianten Nr.	Tageslichtquotient [%]																			
	Lineare Verbauung				Horizontale Auskragung				Vertikale Auskragung				Innenhof			Atrium				
	Anzahl Geschosse (Verbau- ungswinkel)				Auskragungswinkel				Auskragungswinkel				Anzahl Geschosse			Anzahl Geschosse				
	2 (31°)	3 (42°)	4 (50°)	5 (56°)	15°	30°	45°	60°	15°	30°	45°	60°	1	3	7	1	2	3	5	7
1	6,46	4,51	2,37	1,05	7,20	6,12	4,94	3,75	7,97	7,57	7,16	6,70	7,74	5,08	1,47	4,91	4,05	3,45	2,21	1,05
2	3,88	2,23	0,92	0,74	4,71	4,02	3,35	2,60	5,12	4,86	4,64	4,34	4,98	3,14	0,49	3,05	2,46	2,01	1,11	0,35
3	3,40	1,93	0,84	0,66	4,21	3,69	3,05	2,40	4,55	4,33	4,23	3,87	4,47	2,78	0,45	2,72	2,18	1,82	0,94	0,32
4	6,98	4,92	2,65	1,15	7,67	6,49	5,30	3,98	8,60	8,08	7,76	7,10	8,42	5,44	1,58	5,36	4,37	3,64	2,30	1,13
5	4,29	2,54	1,04	0,83	5,21	4,47	3,69	2,84	5,62	5,42	5,12	4,79	5,48	3,42	0,56	3,37	2,75	2,26	1,20	0,40
6	7,82	5,55	2,82	1,32	8,44	7,11	5,66	4,19	9,43	9,00	8,45	7,71	9,29	6,00	1,68	5,88	4,90	4,06	2,46	1,20
7	4,77	2,87	1,17	0,93	5,84	4,94	4,11	3,14	6,27	6,04	5,74	5,21	6,17	3,85	0,64	3,82	3,11	2,49	1,31	0,46
8	4,33	2,47	1,05	0,85	5,21	4,45	3,67	2,74	5,68	5,44	5,16	4,67	5,58	3,46	0,59	3,43	2,81	2,27	1,13	0,41
9	5,76	4,29	2,52	1,04	6,49	5,50	4,45	3,46	6,85	6,51	6,06	5,74	6,64	4,59	1,56	4,25	3,52	3,01	2,02	1,08
10	3,40	2,20	0,88	0,70	4,29	3,72	3,04	2,37	4,33	4,22	3,98	3,69	4,24	2,74	0,50	2,58	2,12	1,78	1,05	0,35
11	3,12	1,90	0,80	0,65	3,85	3,37	2,75	2,16	3,88	3,77	3,61	3,33	3,82	2,49	0,46	2,31	1,87	1,60	0,91	0,32
12	3,96	2,31	1,02	0,84	4,72	4,03	3,34	2,50	4,86	4,63	4,42	4,04	4,80	3,10	0,59	2,93	2,44	1,99	1,10	0,42
13	6,82	4,41	2,01	0,98	7,84	6,69	5,47	4,01	8,71	8,33	7,84	7,25	8,28	5,34	1,25	5,38	4,35	3,65	2,17	0,89
14	4,06	2,21	0,89	0,70	5,14	4,37	3,58	2,81	5,58	5,34	5,14	4,80	5,36	3,21	0,46	3,37	2,66	2,11	1,06	0,32
15	3,70	1,74	0,82	0,65	4,70	3,97	3,31	2,57	5,11	4,83	4,66	4,27	4,78	2,92	0,41	3,05	2,40	1,94	0,89	0,29
16	4,69	2,28	1,07	0,83	5,81	4,89	4,04	3,01	6,31	5,97	5,74	5,31	6,14	3,56	0,55	3,85	3,12	2,40	1,13	0,38
17	4,43	2,94	1,43	0,70	4,93	4,22	3,41	2,55	5,33	5,11	4,90	4,53	5,30	3,44	0,90	3,35	2,76	2,27	1,46	0,67
18	2,55	1,43	0,60	0,48	3,16	2,73	2,31	1,83	3,44	3,35	3,16	2,86	3,34	2,03	0,32	2,08	1,64	1,35	0,69	0,23
19	2,38	1,24	0,53	0,44	2,86	2,48	2,14	1,63	3,17	3,00	2,87	2,66	3,02	1,86	0,30	1,91	1,50	1,22	0,62	0,21
20	2,88	1,62	0,68	0,55	3,53	3,11	2,53	1,92	3,85	3,66	3,43	3,18	3,82	2,25	0,39	2,30	1,88	1,48	0,72	0,28
21	9,27	6,42	3,39	1,54	10,24	8,81	7,35	5,80	11,22	10,77	10,21	9,29	10,84	7,22	2,12	6,93	5,75	4,83	3,05	1,50
22	5,47	3,25	1,34	1,07	6,69	5,76	4,89	3,95	7,21	6,92	6,55	6,01	6,80	4,31	0,70	4,23	3,42	2,87	1,55	0,50
23	4,88	2,74	1,24	0,96	6,00	5,27	4,37	3,62	6,54	6,23	5,87	5,44	6,17	3,91	0,64	3,83	3,07	2,56	1,34	0,46
24	6,24	3,54	1,54	1,24	7,55	6,50	5,34	4,09	8,13	7,71	7,30	6,82	7,95	4,92	0,83	4,90	3,95	3,18	1,64	0,59
25	11,32	8,28	5,02	2,03	11,89	9,76	8,13	6,58	13,65	12,85	12,16	11,25	13,03	8,76	2,92	8,44	7,01	5,95	3,86	2,08
26	7,01	4,53	1,81	1,43	8,05	6,76	5,69	4,61	8,99	8,55	8,15	7,43	8,52	5,55	0,96	5,38	4,33	3,65	2,12	0,68
27	6,39	3,88	1,63	1,31	7,27	6,21	5,18	4,24	8,13	7,75	7,33	6,76	7,74	4,99	0,85	4,84	3,91	3,27	1,84	0,61
28	8,00	5,14	2,06	1,66	9,00	7,44	6,07	4,63	10,20	9,66	9,04	8,57	9,92	6,19	1,10	6,18	5,00	4,08	2,24	0,77
29	1,24	0,79	0,61	0,50	2,26	1,95	1,62	1,23	2,47	2,34	2,25	2,07	2,23	1,10	0,32	1,31	1,00	0,71	0,35	0,24
30	4,30	2,64	0,96	0,76	5,01	4,39	3,70	2,87	5,56	5,26	5,11	4,76	5,54	3,49	0,54	3,43	2,76	2,28	1,33	0,38

Tabelle 5: Errechnete Tageslichtquotienten für die unterschiedlich Verbauungssituationen.

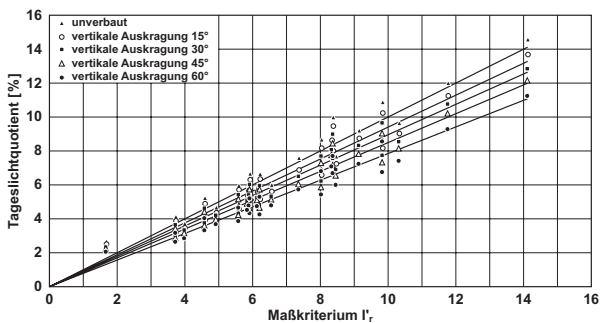
Regression für Anpassungsfaktor
Lineare Verbauung $I_{V,IV}$



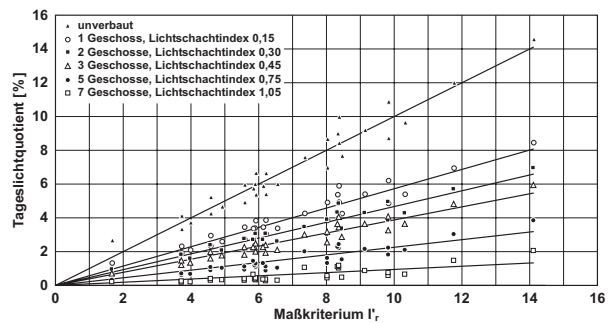
Regression für Anpassungsfaktor
Horizontale Auskragung $I_{V,hA}$



Regression für Anpassungsfaktor
Vertikale Auskragung $I_{V,VA}$



Regression für Anpassungsfaktor
Innenhöfe $I_{V,In,At}$



Regression für Anpassungsfaktor
Atrien $I_{V,In,At}$

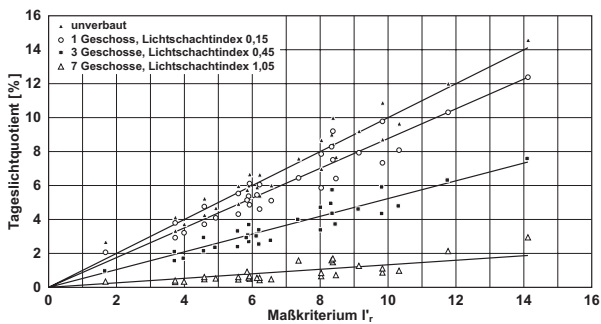


Bild 11: Errechnete Tageslichtquotienten für jeweils unterschiedliche Verbauungssituationen. Die jeweils 30 Varianten sind über dem Maßkriterium I'_R aufgetragen. Die Regressionsgeraden sind für die jeweilig variierten Geometriemaße angegeben.

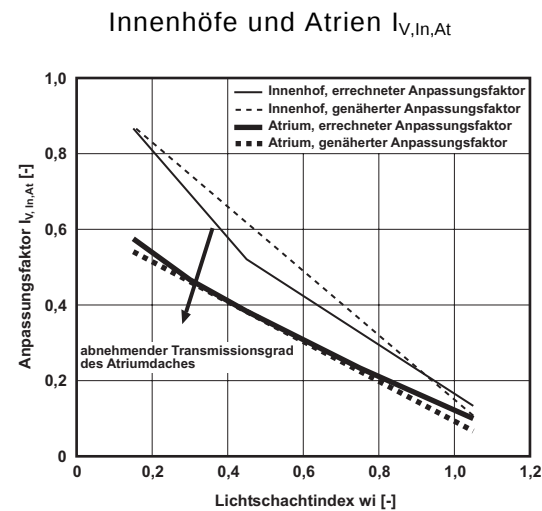
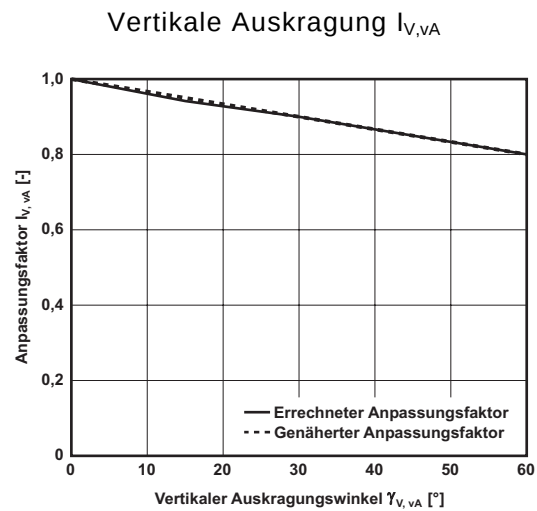
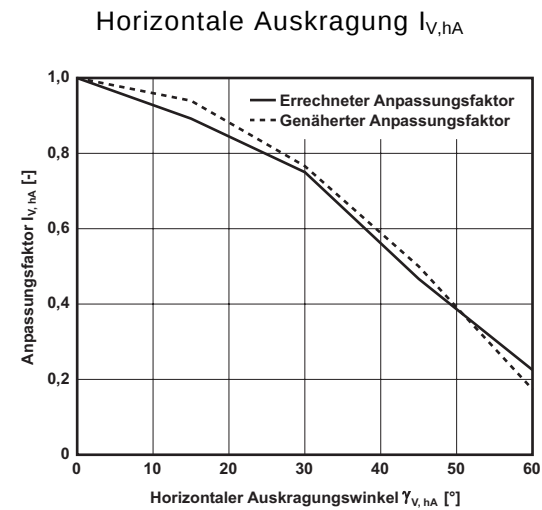
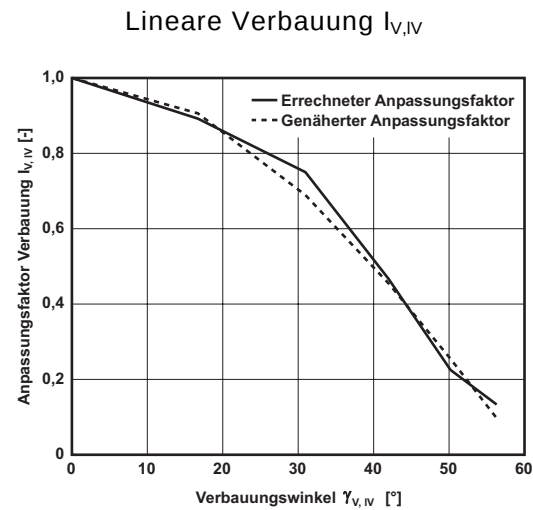


Bild 12: Errechnete und genäherte Anpassungsfaktoren für die unterschiedlichen Verbauungssituationen in Abhängigkeit der jeweiligen Geometriemaßzahl.

Lineare Verbauung

Für lineare Verbauungen gemäß Bild 8 lässt sich der Anpassungsfaktor Verbauung $I_{V,IV}$ ableiten

$$\begin{aligned} I_{V,IV} &= \cos(1,5 * \gamma_{V,IV}) & [-] & \quad \text{für } \gamma_{V,IV} < 60^\circ \\ I_{V,IV} &= 0 & & \quad \text{ansonsten} \end{aligned} \quad (6)$$

mit

$\gamma_{V,IV}$ Verbauungshöhenwinkel [°].

Tabelle 6 stellt die aus den Regressionsgeraden in Bild 11 ermittelten Anpassungsfaktoren $I_{V,IV}$ den mittels Gleichung (6) genäherten Werten gegenüber.

Anzahl Geschosse	Verbauungs- winkel	Faktor $I_{V,IV}$ aus Regression	Genäherter Faktor $I_{V,IV}$ (Gleichung (6))
[-]	[°]	[-]	[-]
0	0	1,00	1,00
2	31	0,75	0,69
3	42	0,47	0,45
4	50	0,23	0,25
5	56	0,13	0,10

Tabelle 6: Errechnete und genäherte Anpassungsfaktoren für lineare Verbauung $I_{V,IV}$.

Auskragung, horizontal

Horizontale Auskragungen werden gemäß Bild 8 und Bild 9 über die gesamte Raumbreite modelliert. Es lässt sich der Anpassungsfaktor $I_{V,hA}$ ableiten

$$\begin{aligned} I_{V,hA} &= \cos(1,33 * \gamma_{V,hA}) & [-] & \quad \text{für } \gamma_{V,hA} < 67,5^\circ \\ I_{V,hA} &= 0 & & \quad \text{ansonsten} \end{aligned} \quad (7)$$

mit

$\gamma_{V,hA}$ Winkel der horizontalen Auskragung [°].

Tabelle 7 stellt die aus den Regressionsgeraden in Bild 11 ermittelten Anpassungsfaktoren $I_{V,hA}$ den mittels Gleichung (7) genäherten Werten gegenüber.

Winkel	Errechneter Faktor	Genäherter Faktor $I_{V,hA}$ (Gleichung (7))
[°]	[-]	[-]
0	1,00	1,00
15	0,89	0,94
30	0,75	0,77
45	0,47	0,50
60	0,23	0,17

Tabelle 7: Errechnete und genäherte Anpassungsfaktoren horizontale Überhänge $I_{V,hA}$.

Auskragung, vertikal

Bei der Modellierung vertikaler Auskragungen gemäß Bild 8 und Bild 9 wird davon ausgegangen, dass auch der Raum, der sich über dem betrachteten, gegebenenfalls eingebauten Raum befindet, eine vertikale Auskragung hat. Es lässt sich der Anpassungsfaktor $I_{V,vA}$ ableiten:

$$I_{V,vA} = 1 - \gamma_{V,vA}/300^\circ \quad [-] \quad (8)$$

mit

$\gamma_{V,vA}$ Winkel der vertikalen Auskragung [°].

Tabelle 8 stellt die aus den Regressionsgeraden in Bild 11 ermittelten Anpassungsfaktoren $I_{V,vA}$ den mittels Gleichung (8) genäherten Werten gegenüber.

Winkel	Errechneter Faktor	Genäherter Faktor $I_{V,vA}$ (Gleichung (8))
[°]	[-]	[-]
0	1,00	1,00
15	0,94	0,95
30	0,90	0,90
45	0,85	0,85
60	0,80	0,80

Tabelle 8: Errechnete und genäherte Anpassungsfaktoren für vertikale Auskragungen $I_{V,vA}$.

Falls der betrachtete Raum beidseitig von Auskragungen eingefasst ist, sollte der Anpassungsfaktor je Seite separat ermittelt werden. Der Gesamtanpassungsfaktor für seitliche Blenden ergibt sich dann durch Multiplikation. Es ist erwartungsgemäß festzustellen, daß die vertikale Auskragungen einen deutlich geringeren Einfluss als horizontale Auskragungen haben.

Innenhöfe und Atrien

Atrien unterscheiden sich von Innenhöfen durch die zusätzliche Verglasungsebene, die den Lichteinfall in den Hofbereich und damit auch in angrenzenden Räumen weiter reduziert. Sowohl Innenhöfe als auch Atrien kommen in einer Vielzahl von Varianten vor. Es wird jeweils ein 4-seitig umbauter Innenhof (Atrium) angesetzt, wodurch von einer konservativen Abschätzung ausgegangen wird. Bei 3-seitig oder 2-seitig (linearen) umbauten Innenhöfen (Atrien), ist durchaus mit erhöhter Tageslichtversorgung zu rechnen. Dies kann separat mit detaillierten Berechnungsverfahren ermittelt und - falls erforderlich - nachgewiesen werden.

In der Parametervariation wird angenommen, dass die an den Innenhof (Atrien) grenzenden Raumzonen jeweils in der untersten Geschosebene liegen. Hierdurch werden auch Geschosebenen, die in unterschiedlichen Höhen an einen speziellen Innenhof (ein spezielles Atrium) grenzen angenähert. Dies erscheint gerechtfertigt, da aufgrund der angesetzten gleichen Reflektionsgrade der Umschließungsflächen der Innenhöfe (Atrien) aus dem unteren Viertelraum näherungsweise der gleiche Lichtstrom in die angrenzenden Raumzonen eingestrahlt wird.

Die Korrelation erfolgt über das geometrische Maßkriterium des Lichtschachtindex w_i (engl. „well-index“) der wie folgt definiert ist:

$$w_i = H_{In,At} \frac{(L_{In,At} + W_{In,At})}{(2 \cdot L_{In,At} \cdot W_{In,At})} \quad (9)$$

wobei

$H_{In,At}$ Höhe des Innenhofs (Atriums) [m]
 $L_{In,At}$ Breite des Innenhofs (Atriums) [m]
 $W_{In,At}$ Tiefe des Innenhofs (Atriums) [m]

Bild 13 und Bild 14 illustrieren die durch den Lichtschachtindex w_i beschriebenen, geometrischen Relationen zwischen Hoftiefe, -länge und -breite.

Es lässt sich der Anpassungsfaktor $I_{V,In,At}$ für an Innenhöfe und Atrien grenzende Räume ableiten

$$I_{V,In,At} = 1 - 0,85 w_i \quad \text{bei Innenhöfen} \quad (10)$$

$$I_{V,In,At} = \tau_{V,In,At,D65} * k_{V,In,At,1} * k_{V,In,At,2} * k_{V,In,At,3} * (1 - 0,85 w_i) \quad \text{bei Atrien}$$

$$I_{V,In,At} = 0 \quad \text{für } w_i > 1,18$$

mit

$\tau_{V,In,At,D65}$ Transmissionsgrad der Atriumsverglasung [-]

$k_{V,In,At,1}$ Versprossungsfaktor [-]

$k_{V,In,At,2}$ Verschmutzungsfaktor [-]

$k_{V,In,At,3}$ Abminderungsfaktor für nicht senkrechten Lichteinfall auf die Atriumsverglasung (0,85 i.A. ausreichend) [-]

Tabelle 9 stellt die aus den Regressionsgeraden in Bild 11 ermittelten Anpassungsfaktoren $I_{V,In,At}$ den mittels Gleichung (10) genäherten Werten gegenüber. Die Atriumsverglasung wurde in den Berechnungen der Parametervariation exemplarisch mit den Kennwerten $\tau_{V,In,At,D65} = 0,9$; $k_{V,In,At,1} = 0,9$; $k_{V,In,At,2} = 0,9$; $k_{V,In,At,3} = 0,85$ berücksichtigt.

Anzahl Geschosse	well-index	Innenhof		Atrium	
		Gerechnet	Genähert	Gerechnet	Genähert
[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]
1	0,15	0,87	0,87	0,58	0,54
2	0,3	-	-	0,47	0,46
3	0,45	0,52	0,62	0,38	0,38
5	0,75	-	-	0,23	0,22
7	1,05	0,13	0,11	0,10	0,07

Tabelle 9: Errechnete und genäherte Anpassungsfaktoren $I_{V,In,At}$ für Zonen

die an Innenhöfe und Atrien grenzen.

Der in der Parametervariation abgedeckte Lichtschachtindex w_i liegt zwischen 0,15 und 1,05. Aus der Extrapolation gemäß Gleichung (10) ergibt sich, dass bei Werten größer 1,18 der Tageslichtanteil in an Innenhöfe (Atrien) grenzenden Räumen Null wird.

Glasdoppelfassade

In Anlehnung an die Berücksichtigung von Verglasungsebenen nach DIN 5034 [5] ergibt sich der Anpassungsfaktor $I_{V,GDF}$ für Glasdoppelfassaden vor dem Raum direkt aus den Verglasungseigenschaften:

$$I_{V,GDF} = \tau_{V,GDF,D65} * k_{V,GDF,1} * k_{V,GDF,2} * k_{V,GDF,3} \quad (11)$$

mit

$\tau_{V,GDF,D65}$	Transmissionsgrad der Verglasung der Glasdoppelfassade [-]
$k_{V,GDF,1}$	Versprossungsfaktor Glasdoppelfassade [-]
$k_{V,GDF,2}$	Verschmutzungsfaktor Glasdoppelfassade [-]
$k_{V,GDF,3}$	Abminderungsfaktor für nicht senkrechten Lichteinfall (0,85 i.A. ausreichend) [-].

Vertikale und horizontale Schotten im Zwischenraum der Glasdoppelfassade können näherungsweise als vertikale und horizontale Auskragungen mittels $I_{V,VA}$ und $I_{V,hA}$ berücksichtigt werden.

Gesamtverbauung

Der Verbauungsindex I_V zur Berücksichtigung der Gesamtverbauung aus linearer Verbauung, horizontalen und vertikalen Auskragungen, Glasdoppelfassaden, Innenhöfen und Atrien kann durch Multiplikation der Einzeleffekte aus

$$I_V = I_{V,IV} * I_{V,hA} * I_{V,VA} * I_{V,In,At} * I_{V,GDF} \quad (12)$$

ermittelt werden. Lineare Verbauung und Innenhöfe (Atrien) schließen sich aus.

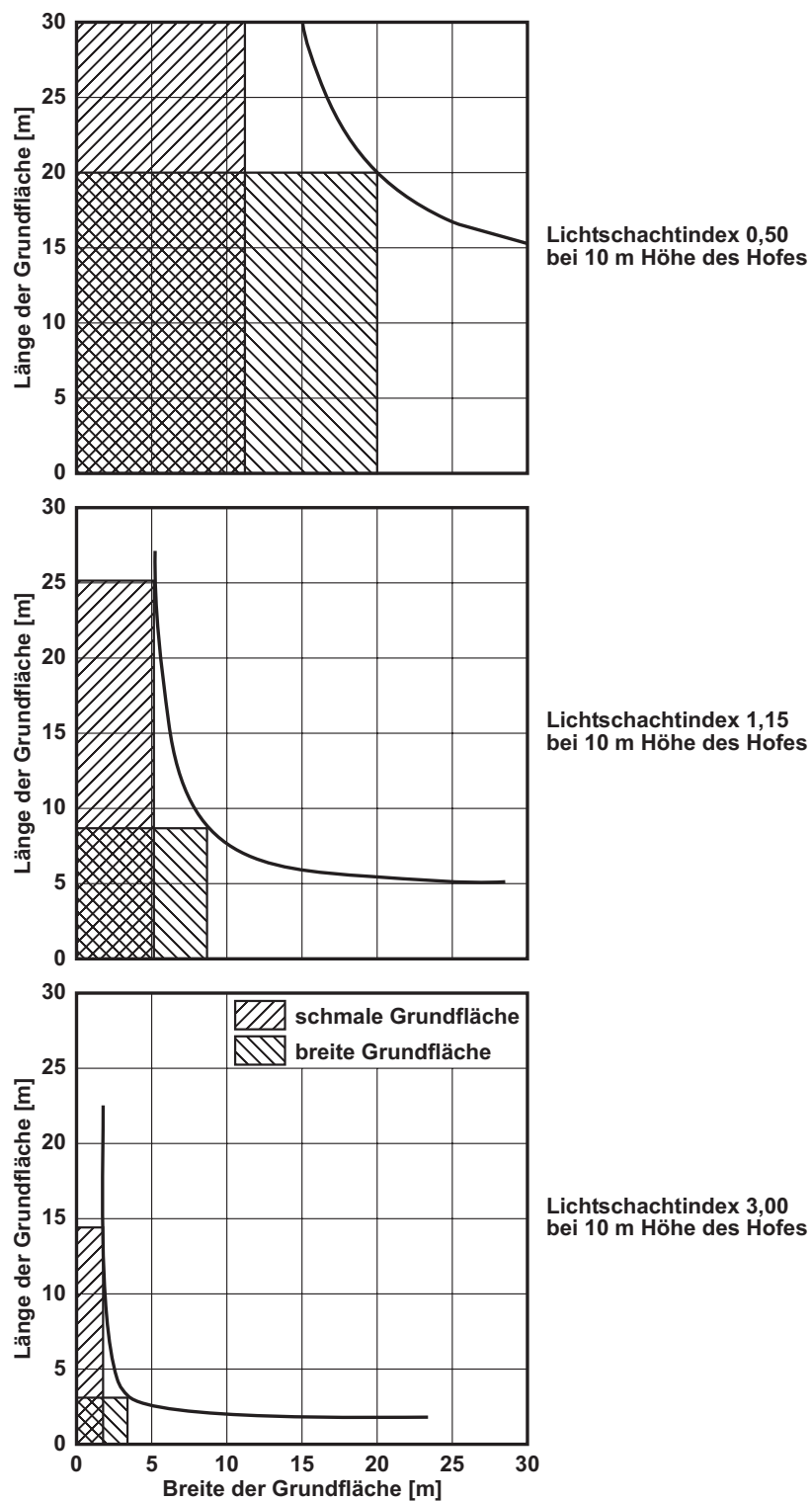


Bild 13: Zum Lichtschachtindex w_i („well-index“): Variation des Lichtschachtindex mit 0,5; 1,15 und 3 bei Höhe des Schachtes von 10 m. Dargestellt ist jeweils die Abhängigkeit der Länge von der Breite der Grundfläche. Die Rechtecke stellen jeweils die genähert „schmalste“ und die „breiteste“ Grundfläche dar.

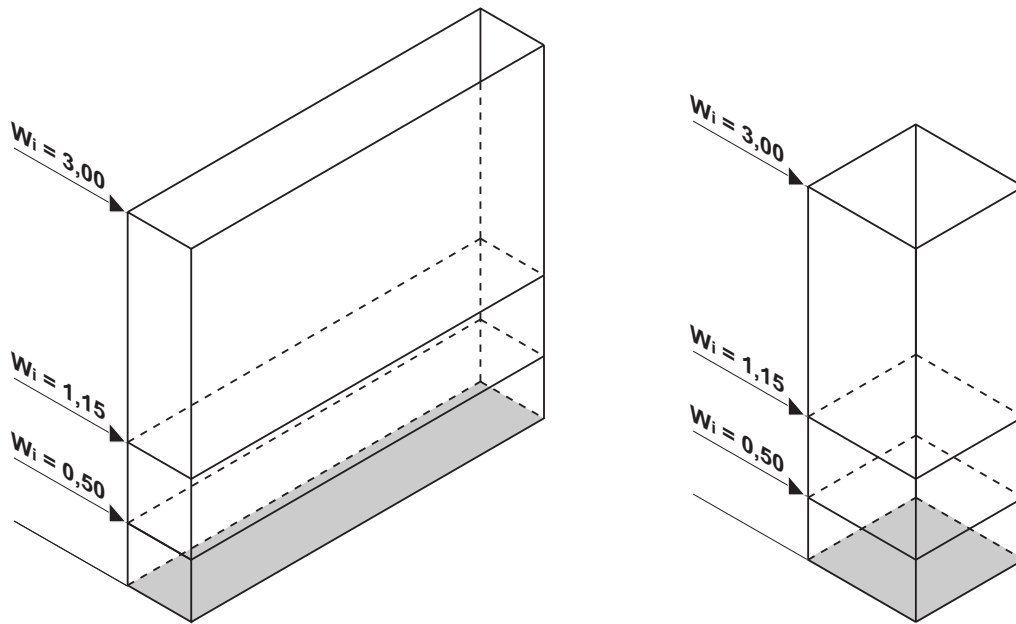


Bild 14: Zum Lichtschachtindex: Isometrien zur Darstellung der Variation des Schachtindex mit 0,5; 1,15 und 3. Die Grundfläche ist jeweils konstant gehalten, die Höhe wird variiert. Die linken Abbildungen stellt ein schmales Atrium, die rechten Abbildung das jeweils „breiteste“ mögliche Atrium (d.h. mit quadratischer Grundfläche) dar.

4. Gesamtmodell

Somit ergibt sich das indexbasierte Maßkriterium I_R zur Bewertung der Tageslichtverhältnisse bei Rohbauöffnungen aus Gleichungen (4) und (12) zu

$$I_R = I'_R * I_V \quad (13)$$

bzw.

$$I_R = (4,13 + 20,0 * I_{Tr} - 1,36 * I_{Rt}) I_{V,IV} * I_{V,hA} * I_{V,vA} * I_{V,ln,At} * I_{V,GDF} [\%]. \quad (14)$$

Sind die Verglasungseigenschaften des Raumes bekannt, kann dies analog DIN 5034 [5] in dem Maßkriterium I Berücksichtigung finden

$$I = I_R * \tau * k_1 * k_2 * k_3 \quad [\%] \quad (15)$$

mit

τ_{D65}	Transmissionsgrad der Verglasung [-]
k_1	Versprossungsfaktor [-]
k_2	Verschmutzungsfaktor [-]
k_3	Abminderungsfaktor für nicht senkrechten Lichteinfall (0,85 i.A. ausreichend) [-].

Wie dargelegt, können I_R und I näherungsweise dem Tageslichtquotienten gleichgesetzt werden:

$$D_R = I_R \quad (16)$$

und

$$D = I. \quad (17)$$

D_R Tageslichtquotient für die Rohbauöffnung [%]

D Tageslichtquotient mit Verglasung [%].

Mittels Gleichungen (14) und (15) lassen sich kontinuierliche Bewertungen der Tageslichtversorgung erzielen. Im Rahmen eines einfachen Nachweises bietet sich für tabellarische Verfahren analog [9] eine stufenweise Klassifikation der Tageslichtversorgung an. In Ergänzung zu [9] wird vorgeschlagen, die Klassifizierung um eine Stufe zu erweitern. Da oftmals zwar der Eindruck besteht eine Zone sei tageslichtversorgt (wie z.B. an tiefe Atrien angrenzende Zonen), die natürliche Beleuchtung aber kaum zu Beleuchtungsenergieeinsparungen beiträgt, wird die weitere Klassifikationsstufe „keine Tageslichtversorgung“ eingeführt.

Klassifizierung bei Maßkriterium I_r	Klassifizierung bei Maßkriterium I	Einstufung der Tageslichtversorgung
$I_R > 6 \%$	$I > 3 \%$	Gut
$6 \% \geq I_R > 4 \%$	$3 \% \geq I > 2 \%$	Mittel
$4 \% \geq I_R > 2 \%$	$2 \% \geq I > 1 \%$	Schwach
$2 \% \geq I_R$	$1 \% \geq I$	Keine

Tabelle 10: Klassifizierung der Tageslichtversorgung als Funktion der Maß-

kriterien I und I_R.

Der Übergang vom Maßkriterium I_R (für Rohbauöffnung) zum Maßkriterium I (mit Verglasung) ergibt sich auf Grundlage DIN 5034 [5]. Wird gemäß Gleichung (15) mit den Verglasungskennwerten gewichtet, ergibt sich bei $\tau = 0,74$ (herkömmliche Wärmeschutzverglasung), $k_1 = 0,9$ (Versprossung), $k_2 = 0,9$ (Verschmutzung) und $k_3 = 0,85$ (Abminderung für nicht senkrechten Lichteinfall) ein zusätzlicher Multiplikator von 0,51 womit sich die angegebenen Werte für I näherungsweise, wie in Tabelle 10 dargestellt, halbieren. Die Einstufung der Tageslichtversorgung nach dem Maßkriterium wird somit auf eine Wärmeschutzverglasung bezogen. Die Festlegung der Klassifizierungsstufen erfolgt empirisch. Unter 1% des Maßkriteriums I (Tageslichtquotient) wird von keiner - energetisch anrechenbaren - Tageslichtversorgung ausgegangen. Der Wert von 1 % deckt sich in etwa mit der Mindestanforderung nach DIN 5034 [3] eines Tageslichtquotienten von 0,9 %.

5. Ausblick

Die dargestellte Klassifizierung der Tageslichtversorgung kann in einem Nachweisverfahren des Beleuchtungsenergiebedarfs in Gebäuden genutzt werden, um monatliche oder jährliche Energiebedarfswerte für Beleuchtungszwecke zu ermitteln. Hierzu ist die Herstellung eines Zusammenhanges mit der Größe der relativen Nutzbelichtung erforderlich, die den Anteil des Tageslichts an der in einem Bezugszeitraum erforderlichen Belichtung am Nachweisort beschreibt. Die relative Nutzbelichtung

$$H_{\text{Nutz,rel}} = \frac{H_{\text{Nutz}}}{E_{\text{W}} \cdot t_{\text{A}}} \cdot 100 \text{ [\%]} \quad (18)$$

E_{W} Wartungswert der Beleuchtungsstärke [lx]

t_{A} Betriebszeit im betrachteten Zeitraum (im allgemeinen, jährlich oder monatlich) [h]

kann als Maßzahl für das mögliche Einsparpotential genutzt werden. Hierbei ist die Nutzbelichtung H_{Nutz} nach

$$H_{\text{Nutz}} = \int_{t=0}^{t=t_A} E_{\text{TL}} \cdot dt \text{ [lxh]} \quad \text{wobei} \quad E_{\text{TL}} = \begin{cases} E_{\text{TL}} & \text{für } E_{\text{TL}} < E_{\text{W}} \\ E_{\text{W}} & \text{sonst} \end{cases} \quad (19)$$

E_{TL} Beleuchtungsstärke durch Tageslicht [lx]

in einem gegebenen Punkt durch Integration der Beleuchtungsstärke E_{TL} aufgrund Tageslicht über den Betrachtungszeitraum t_A zu ermitteln. Die Nutzbelichtung gibt somit den Belichtungsanteil an, der von einem gedimmten künstlichen Beleuchtungssystem zum Erreichen der für die Erfüllung der Sehaufgabe erforderlichen Belichtung, der Nennbelichtung, nicht beigesteuert werden muss. Die Nutzbelichtung ist abhängig vom Wartungswert der Beleuchtungsstärke. Sie ist ein Maß für das im Idealfall zu erreichende Einsparpotential elektrischer Beleuchtungsenergie aufgrund Tageslichtnutzung. Bei Ein/Aus geregelten Beleuchtungsanlagen ist statt der relativen Nutzbelichtung mit der Größe der relativen Nutzungszeit [5] zu arbeiten. Das im folgenden beschriebene Vorgehen kann entsprechend übertragen werden.

Es sei an dieser Stelle angemerkt, dass die relative Nutzbelichtung einen zentralen Unterschied zwischen der gesamtverfahrenstechnischen Berücksichtigung der durch die Fassade eindringenden Solarstrahlung und des eindringenden Tageslichts charakterisiert. Der Tageslichteintrag kann nicht wie die solaren Wärmeeinträge näherungsweise direkt proportional im Raum verrechnet werden. Thermisch wird die in den Raum eindringende Solarstrahlung vollständig bilanziert. Lichttechnisch wird aufgrund der Nichtspeicherbarkeit des Lichts jeweils nur der Anteil des Tageslichts bis zum Erreichen der erforderlichen, nutzungsabhängigen Beleuchtungsstärke am Nachweisort (z.B. Arbeitsplatz) angesetzt. Hierdurch kommt es zu Sättigungseffekten. Ein Mehr an eindringenden Tageslicht sorgt nicht unmittelbar für höhere Einspareffekte für Beleuchtungszwecke, führt unter Umständen jedoch mit der zusätzlich eindringenden Solarstrahlung zur Überwärmung der Räume.

Bei Kenntnis der Betriebszeit, der spezifischen installierten Leistung und des Regelverhaltens des tageslichtabhängigen Kontrollsystems der Beleuchtungsanlage kann über

$$Q = p \cdot t_A \cdot (1 - H_{\text{Nutz,rel}} \cdot C_{\text{kontr.}}) \quad (20)$$

Q	spezifischer Energiebedarf für Beleuchtung für den betrachteten Zeitraum, jährlich: [kWh/m ² a], monatlich: [kWh/m ² moth]
p	spezifisch installierte Leistung des Beleuchtungssystems [W/m ²]
C _{kontr.}	Effizienz des Beleuchtungskontrollsystems [-]

der Energiebedarf für Beleuchtung ermittelt werden. Die Ermittlung der relativen Nutzbelichtung in Abhängigkeit der Tageslichtversorgung stellt somit den zentralen Punkt der 2. Verfahrensstufe gemäß Bild 1 dar. Dies kann

- a) mittels einfacher Korrelationsmodelle, welche die Abhängigkeit der Nutzbelichtung vom Tageslichtquotienten und des Wartungswertes der Beleuchtungsstärke beschreiben, oder
- b) über komplexere Modelle, die darüber hinaus Zusammenhänge zu detaillierten Fassadenparametern herstellen,

erfolgen.

Im folgenden sei das generelle Vorgehen anhand eines einfachen Korrelationsverfahrens kurz erläutert. Dieser einfache Ansatz wird als „Defaultverfahren“ auf CEN Ebene diskutiert. Für den nationalen Modellansatz, der auch das Verhalten von Fassadensystemen mitberücksichtigt und damit im Detaillierungsgrad über das CEN Verfahren hinausgehen soll, werden zur Zeit noch Kennwerte ermittelt.

Bild 15 stellt einen einfachen Zusammenhang für den Standort Frankfurt bereit. In Abhängigkeit des Tageslichtquotienten wurde aufgrund stündlicher Außenbeleuchtungsstärken, die mittels eines dynamischen Himmelsmodells [5], [8] aus Wetterdaten des Standortes Frankfurt bestimmt wurden, die relativen, jährlichen Nutzbelichtungen nach Gleichung (18) an den definierten Nachweisorten der Beleuchtungsstärke (vgl. Ziffer 2) ermittelt. Die relativen, jährlichen Nutzbelichtungen wurden unter vereinfachten Annahmen bestimmt. So wurde ein möglicher Sonnen- und Blendschutz dadurch berücksichtigt, dass in die Betrachtung ausschließlich Diffuslicht einfließt. Hiermit wird in gewissem Sinne ein idealer Sonnenschutz postuliert, der Diffus-, jedoch kein

Direktlicht in den Raum eindringen lässt. Die natürlichen Beleuchtungsverhältnisse werden mit diesem Modell im allgemeinen als zu gut bewertet, da ein Großteil realer Sonnenschutzsysteme mit der Direktstrahlung auch immer einen Anteil des Diffuslichts zurückhält. Des weiteren wird die in Gleichung (19) angesetzte Innenbeleuchtungsstärke, direkt über den Tageslichtquotienten aus der horizontalen, diffusen Außenbeleuchtungsstärke bestimmt. Der variierenden Leuchtdichteverteilung unterschiedlicher Himmelszustände wird somit ebenfalls nicht Rechnung getragen. Die angegebenen Zusammenhänge gelten für eine Arbeitszeit von 8⁰⁰ Uhr bis 17⁰⁰ Uhr.

Bei bekannten Maßkriterium I oder einem extern ermittelten Tageslichtquotienten (vgl. Bild 1) können nun aus Bild 15 die relativen Nutzbelichtungen für unterschiedliche Wartungswerte der Beleuchtungsstärke ermittelt und über Gleichung (20) Beleuchtungsenergiebedarfswerte bestimmt werden. Für ein einfaches Tabellenverfahren können aus Bild 15 - beispielsweise auf Basis der Klassifikationsstufen der Tageslichtversorgung nach Tabelle 10 - zudem diskrete relative Nutzbelichtungen vorgegeben werden. Diese in Tabelle 11 exemplarisch zusammengestellten Werte sind für die Einstufungen *schwach* und *mittel* für den Mittelwert der Klassifizierungsstufen angegeben, d.h. 1,5 % (schwach); 2,5 % (mittel). Für *starke* Tageslichtversorgung wurde die relative Nutzbelichtung für einen Tageslichtquotienten von 4 % bestimmt.

Das in diesem Beitrag entwickelte Modell stellt ein Näherungsverfahren für Räume mit vertikalen Fassaden dar. Eine Erweiterung für Räume mit horizontalen Fassaden (Oberlichtern) ist erforderlich und wird zur Zeit erarbeitet.

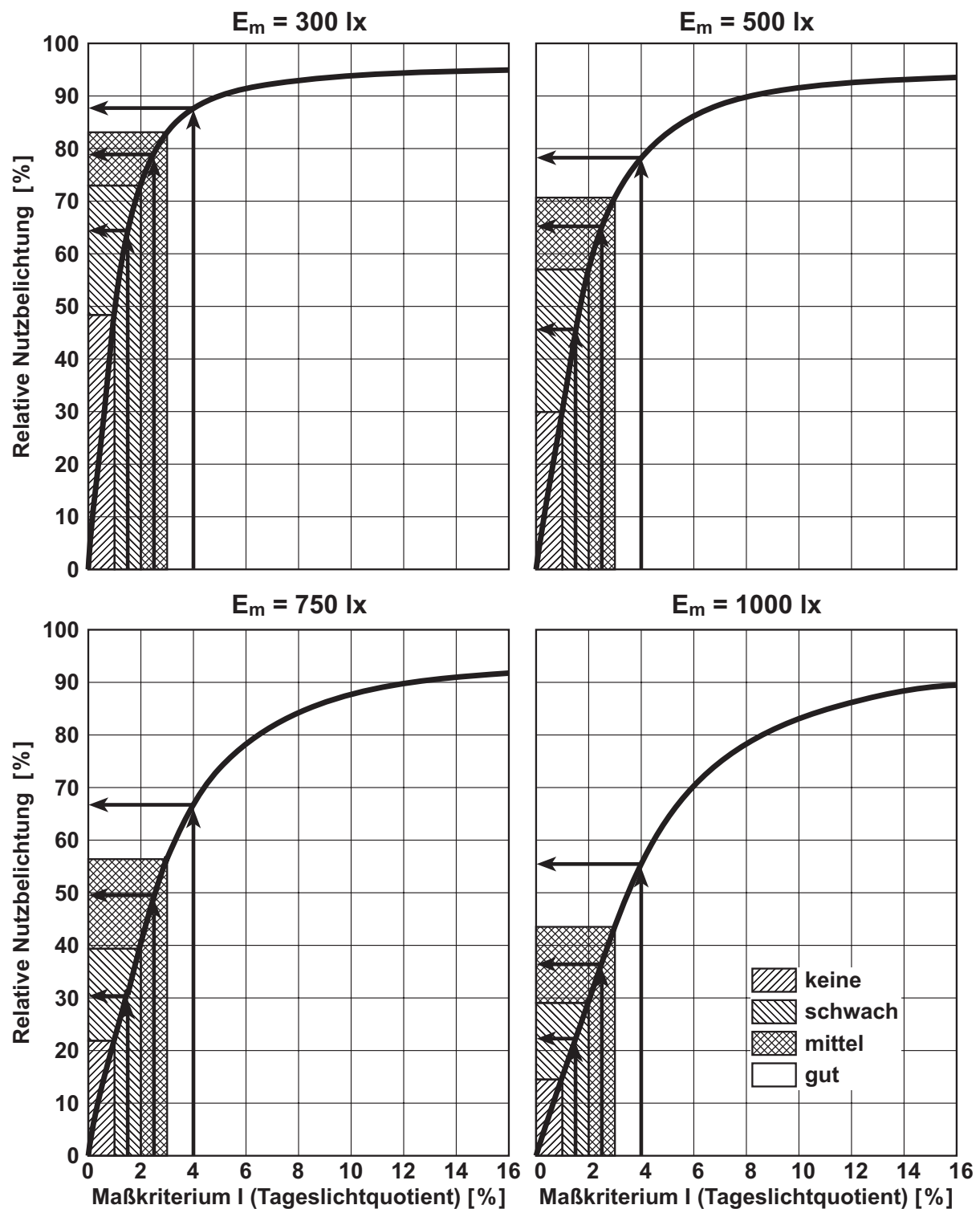


Bild 15: Relative, jährliche Nutzbelichtung $H_{\text{Nutz,rel}}$ als Funktion des Maßkriteriums I (Tageslichtquotient) und des Wartungswertes der Beleuchtungsstärke.

Wartungswert der Beleuchtungsstärke, E_m [lx]	Klassifizierung der Tageslichtversorgung [-]		
	schwach	mittel	stark
300	0,64	0,79	0,88
500	0,44	0,64	0,78
750	0,29	0,48	0,67
1000	0,22	0,37	0,56

Tabelle 11: Beispielhafte Zusammenstellung der relativen Nutzbelichtung $H_{\text{Nutz,rel}}$ in Abhängigkeit der Tageslichtversorgung und des Wartungswertes der Beleuchtungsstärke E_m .

6. Literatur

- [1] de Boer, J.; Erhorn, H.: Praxisgerechte Tageslichtplanung mittels Berechnungsprogrammen. Bauphysik-Kalender 2003, Hrsg. Erich Czielski, Ernst & Sohn, Berlin (2003), S. 345-376.
- [2] DIN 4108, Teil 6: Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden, Berechnung des Jahresheizwärme- und des Jahresheizenergiebedarfs. Beuth Verlag GmbH, Berlin (2000).
- [3] DIN 5034, Teil 1: Tageslicht in Innenräumen, Allgemeine Anforderungen. Beuth Verlag, Berlin (1999).
- [4] DIN 5034, Teil 2: Tageslicht in Innenräumen, Grundlagen, Berlin (1985).
- [5] DIN 5034, Teil 3: Tageslicht in Innenräumen, Berechnung. Beuth Verlag, Berlin (1994).
- [6] Dirksmöller, M.; Erhorn, H.: Adeline 3.0 – Dokumentation. Fraunhofer-Institut für Bauphysik, Stuttgart (1999).
- [7] EU-Richtlinie, Energy Performance of Buildings. Richtlinie 2002/91/EG, Amtsblatt der EU (2002).
- [8] Heibel, B.: Verfahren zur Bestimmung von Kunstlichteinschaltzeiten. Dissertation, Universität Gesamthochschule Kassel (1998).
- [9] Reglementation Thermique 2000, Annexe N° 1 A L'Arrêté Portant Approbation Des Methodes de Calcul Th-C et Th-E, Methode de Calcul Th-C. CSTB, Paris, Internetseite unter www.rt2000.net (2004).
- [10] Sick, F.: Einfluss elementarer architektonischer Maßnahmen auf die Tageslichtqualität in Innenräumen. Dissertation, Universität Karlsruhe, Fraunhofer IRB Verlag, Stuttgart (2002).

