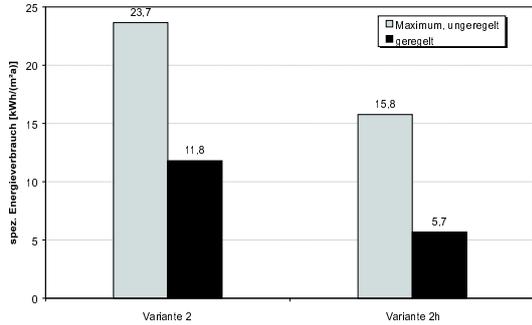
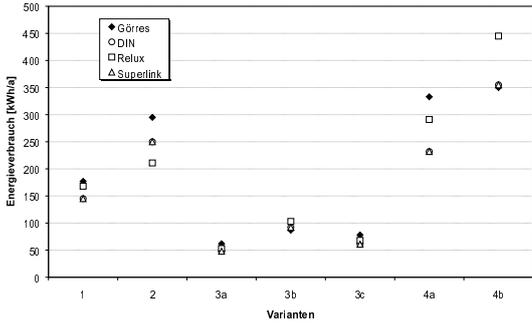
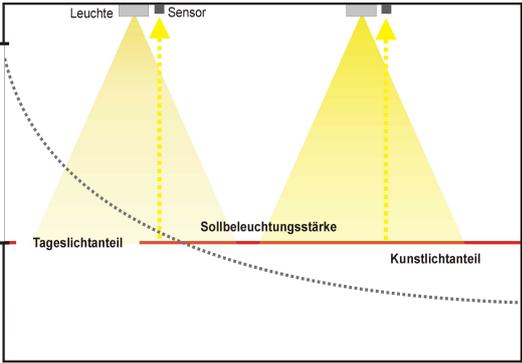


Entwicklung eines Berechnungsverfahrens zur Optimierung des Energieverbrauchs künstlicher Beleuchtung



Markus Görres, Dortmund, 2001

Entwicklung eines Berechnungsverfahrens zur Optimierung des Energieverbrauchs künstlicher Beleuchtung

Zur Erlangung des akademischen Grades eines Doktors der Ingenieurwissenschaften von der Fakultät Bauwesen der Universität Dortmund genehmigte Dissertation

von

Dipl.-Ing. Markus Görres

Dortmund, 2001

Tag der mündlichen Prüfung: 16.01.2001

- 1. Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Ernst-Rudolf Schramek**
- 2. Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Helmut F. O. Müller**

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Forschungstätigkeiten als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl Technische Gebäudeausrüstung der Universität Dortmund.

Mein Dank gilt dem Lehrstuhlinhaber, Prof. Dr.-Ing. Ernst-Rudolf Schramek, für die Förderung der Arbeit und die konstruktive Kritik. Ferner danke ich Herrn Prof. Dr.-Ing. Helmut F. O. Müller für die Übernahme des Korreferats und die hilfreichen Anregungen sowie Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. Achim Hettler als Vorsitzenden der Prüfungskommission.

Insbesondere danke ich Prof. Dr.-Ing. Christoph Nolte und Dr.-Ing. Sirri Aydinli für die fruchtbaren thematischen Diskussionen.

Darüber hinaus danke ich allen Mitarbeitern des Lehrstuhls für die stete Hilfsbereitschaft und das gute Arbeitsklima. Insbesondere möchte ich mich bei den studentischen Hilfskräften bedanken, die mir geduldig zugearbeitet haben und mich bei der Durchführung der Forschungsprojekte tatkräftig unterstützt haben.

Dortmund, Januar 2001

Markus Görres

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Grundlagen	3
2.1	Physikalische Grundlagen	3
2.1.1	Lichttechnische Grundgrößen	3
2.2	Kunstlicht	4
2.2.1	Lampen	5
2.2.2	Leuchten	5
2.2.3	Vorschaltgeräte	5
2.3	Tageslicht	6
2.3.1	Himmelszustände	6
2.3.2	Tageslichtquotient	7
2.4	Steuerung und Regelung der Beleuchtung	7
2.4.1	Unterscheidung Regelung – Steuerung	7
2.4.2	Beleuchtungskontrolle	8
2.4.3	Gebäudeleittechnik	10
2.4.4	Tageslichtabhängige Beleuchtungsregelung	10
2.5	Raumeigenschaften	12
2.5.1	Abmessungen	13
2.5.2	Sichtverbindung	14
2.5.3	Verbauung	14
2.5.4	Reflexionsgrad der Umschließungsflächen	14
2.6	Beleuchtungsqualität	14
2.6.1	Visuelle Behaglichkeit	15
2.6.2	Versorgung mit Tageslicht	15
2.6.3	Akzeptanz der Beleuchtung	15
2.6.4	Produktivität	16
2.6.5	Biologische Auswirkungen	16
3	Kunst- und Tageslichtberechnung	17
3.1	Wirkungsgradverfahren	17
3.1.1	Planungsfaktor	18
3.2	Tageslichtquotient und jährliche Nutzungszeit nach DIN 5034	19
3.2.1	Tageslichtquotient	19

3.2.2	Nutzungszeit	20
3.2.3	Himmelslichtdiagramm	21
3.3	Lichteinschaltzeit nach Szerman	22
3.4	Kunstlicht-Einschaltzeiten	24
3.5	Nutzbelichtung nach Aydinli	25
3.6	Raumpotenzial und Systempotenzial	27
3.7	Einschaltwahrscheinlichkeit nach Hunt	28
3.8	Energieverbrauch	30
3.8.1	Vergleichbarkeit des Energieverbrauchs	31
3.8.2	Energieeinsparung durch Beleuchtungskontrolle	31
3.8.3	Abweichungen zwischen Theorie und Praxis	32
3.9	Simulationsprogramme	33
3.9.1	Lesodial	34
3.9.2	Relux	34
3.9.3	Radiance und Adeline	34
3.10	Mängel bisheriger Berechnungen und resultierende Anforderungen	36
3.10.1	Mängel bisheriger Berechnungen	36
3.10.2	Anforderungen an ein Berechnungsverfahren	36
4	Entwicklung eines Berechnungsverfahrens	39
4.1	Ausgangsbasis und Randbedingungen der Berechnung	39
4.1.1	Tageslichteinfluss	41
4.2	Analyse und Ermittlung der Eingangsparameter	42
4.2.1	Raum- und Fensterabmessungen	42
4.2.2	Orientierung	44
4.2.3	Verbauung	45
4.2.4	Arbeitszeit pro Tag	46
4.2.5	Reflexionsgrade	47
4.2.6	Standort	48
4.2.7	Nennbeleuchtungsstärke	48
4.3	Aufstellung einer mehrdimensionalen Funktion	48
4.3.1	Abweichungen zur Berechnung nach DIN 5034	50
4.4	Berechnung des jährlichen Energieverbrauchs	50
4.5	Vergleich mit anderen Berechnungen und Simulationsrechnungen	53
4.5.1	Untersuchte Varianten	54
4.5.2	Ergebnisse	55
5	Computergestützte Berechnung	61
5.1	Programmbasis	61
5.2	Eingaben	61
5.2.1	Raumeigenschaften	63
5.2.2	Verbauung	63

5.2.3	Orientierung	63
5.2.4	Anwendung	63
5.2.5	Leuchte	63
5.3	Ergebnisse	64
5.3.1	Beleuchtung	64
5.3.2	Tageslicht	66
5.3.3	Künstliche Beleuchtung	66
5.4	Optimierung des Energieverbrauchs	66
5.4.1	Beispielrechnung	67
5.5	WWW-Schnittstelle	70
6	Grafisches Planungswerkzeug	73
6.1	Nomografie	73
6.1.1	Doppelleiter	73
6.1.2	Netztafeln	73
6.1.3	Leitertafeln	75
6.1.4	Zusammengesetzte Nomogramme	76
6.2	Entwicklung eines Nomogrammes	76
6.2.1	Vereinfachungen und Auswahl der Veränderlichen	77
6.2.2	Konstruktion der Nomogramme für das entwickelte Berechnungsverfahren	77
6.3	Anwendung der konstruierten Nomogramme	83
7	Zusammenfassung	87
	Literaturverzeichnis	89
	Abbildungsverzeichnis	101
	Tabellenverzeichnis	105
	Stichwortverzeichnis	107

Nomenklatur

Die Formelzeichen und Indizes wurden soweit möglich in Anlehnung an [DIN1304] gewählt, so dass Doppelnennungen weitgehend vermieden werden. Verwechslungen sind selbst bei einer mehrfachen Verwendung eines Formelzeichens ausgeschlossen, da sich die Bedeutung der Symbole aus dem jeweiligen Zusammenhang ergibt. Die Formelzeichen sind nach [DIN1338] kursiv dargestellt.

griechische Formelzeichen

α	Orientierung	[°]
β	Winkel	[°]
χ	Tageslichtanteil	[-]
η	Lichtausbeute	[lm/W]
η	Wirkungsgrad	[-]
γ	Höhenwinkel	[°]
λ	Wellenlänge	[nm]
λ	geografische Länge	[°]
ϕ	Lichtstrom	[lm]
τ	Transmissionsgrad	[-]
ε	Energievergleichskennwert	[W/(m ² lx)]
ε	Höhenwinkel	[°]
φ	Lichtstromanteil	[-]
φ	geografische Breite	[°]
ρ	Reflexionsgrad	[-]
ϑ	Temperatur	[°C]

lateinische Formelzeichen

<i>A</i>	Amplitude	$[(klx\ h)/a]$
<i>A</i>	Fläche	$[m^2]$
<i>a</i>	Koeffizient	$[-]$
<i>b</i>	Breite	$[m]$
<i>c</i>	Teilstrichlänge	$[mm]$
<i>D</i>	Tageslichtquotient	$[\%]$
<i>E</i>	Beleuchtungsstärke	$[lx]$
<i>e</i>	spezifischer Energieverbrauch	$[kWh/(m^2\ a)]$
<i>F</i>	Faktor	$[-]$
<i>f</i>	Koeffizient	$[-]$
<i>f</i>	Orientierungsfaktor	$[-]$
<i>H</i>	Belichtung	$[klx\ h]$
<i>H</i>	Höhe des Ortes	$[m]$
<i>h</i>	Höhe	$[m]$
<i>I</i>	Bestrahlungsstärke	$[W/m^2]$
<i>I</i>	Lichtstärke	$[cd]$
<i>K</i>	photometrisches Strahlungsäquivalent	$[lm/W]$
<i>k</i>	Raumindex	$[-]$
<i>k</i>	Verminderungsfaktor	$[-]$
<i>k</i>	dimensionslose Kennzahl	$[-]$
<i>L</i>	Leuchtdichte	$[cd/m^2]$
<i>l</i>	Länge	$[mm]$
<i>m</i>	Maßstab	$[mm/m]$
<i>N</i>	Tage	$[d]$

n	Leuchtenanzahl	[-]
P	Leistung	[W]
p	Planungsfaktor	[-]
p	spezifische Leistung	[W/m ²]
RP	Raumpotenzial	[%]
R	Korrekturfaktor	[-]
SP	Systempotenzial	[%]
SSW	Sonnenscheinwahrscheinlichkeit	[-]
T	Trübungsfaktor	[-]
T	Zeit	[h]
t	Tiefe	[m]
t	Zeit	[h]
v	Verminderungsfaktor	[-]
w	Einschaltwahrscheinlichkeit	[-]
X	KenngroÙe	[-]
z	Anzahl Lampen pro Leuchte	[-]

Indizes

γ	Höhenwinkel
ϱ	Reflexion
0	Anfangswert
A	Anfang
a	außen
a	jährlich
bH	bedeckter Himmel

<i>B</i>	Beleuchtung
<i>D65</i>	Normlichtart D 65
<i>D</i>	Decke
<i>d</i>	taglich
<i>el</i>	elektrisch
<i>erf</i>	erforderlich
<i>E</i>	Ende
<i>F</i>	Fenster
<i>G</i>	Glas
<i>G</i>	Global
<i>Hr</i>	Himmelslichtanteil, Rohbaumae
<i>II</i>	Grenzwert II, bedeckter Himmel
<i>I</i>	Grenzwert I, klarer Himmel
<i>i</i>	Index
<i>kH</i>	klarer Himmel
<i>k</i>	kunstliche Beleuchtung
<i>La</i>	Lampe
<i>LB</i>	Leuchte bei Betrieb
<i>L</i>	Leuchte
<i>L</i>	nach Linke
<i>max</i>	maximal
<i>M</i>	Messung
<i>m</i>	mittlere
<i>Nord</i>	Nordorientierung
<i>Nutz</i>	Nutzung

<i>N</i>	Nenn-
<i>N</i>	Nutzebene
<i>P</i>	Pendel
<i>P</i>	Punkt
<i>rel</i>	relativ
<i>Rr</i>	Reflexionsanteil, Rohbaumaße
<i>R</i>	Raum
<i>R</i>	Regelstrategie
<i>Süd</i>	Südorientierung
<i>su</i>	Standard, unten
<i>Sys</i>	System
<i>S</i>	Sonne
<i>T</i>	Tageslicht
<i>t</i>	Arbeitszeit
<i>u</i>	unten
<i>Verl</i>	Verlust
<i>Vr</i>	Außenreflexionsanteil, Rohbaumaße
<i>V</i>	Verbauung
<i>W</i>	Wände
<i>z</i>	Zenit
<i>l</i>	links
<i>r</i>	rechts

1 Einleitung

Künstliche Beleuchtung hatte 1998 mit 10,3% des Stromverbrauchs [HEA1999] und 1,9% des Endenergieverbrauchs [AGEB1999] nur einen geringen Anteil am gesamten Energieverbrauch in Deutschland. Energieeinsparpotenziale bleiben deshalb häufig bei der Planung unberücksichtigt, obwohl die Beleuchtung in Verwaltungsgebäuden bis zu 40% der gesamten Stromkosten verursachen kann [ZIES1996].

Optimierte geregelte Beleuchtungsanlagen führen jedoch sowohl zu einer Reduzierung des Stromverbrauchs als auch zu einer Minimierung des gesamten Energieverbrauchs bedingt durch verminderte Kühllasten.

Darüber hinaus gewinnt in zunehmendem Maße die Beleuchtungsqualität an Bedeutung. Eine optimierte Beleuchtung hat einerseits einen geringeren Energiebedarf und erfüllt andererseits die Anforderungen an die visuelle Behaglichkeit. Anzustreben ist ein möglichst optimaler Kompromiss aus Tageslicht und künstlicher Beleuchtung. Zufriedene Nutzer und eine höhere Produktivität sind die positiven Folgeerscheinungen.

Minimierung des Energieverbrauchs und optimale Tageslichtnutzung ist durch eine getrennte Betrachtung nicht zu erzielen. Eine gesamtheitliche Betrachtung ist deshalb ebenfalls das Ziel der im Jahre 2001 erscheinenden VDI-Richtlinie 6011 „Optimierung von Tageslichtnutzung und künstlicher Beleuchtung“.

Um diese Ziele zu erreichen, ist bereits in der frühen Planungsphase der Einsatz eines Berechnungsverfahrens erforderlich. Es existieren zwar zahlreiche Rechenmethoden für Kunst- und Tageslicht (Kapitel 3), aber diese Verfahren stellen aufgrund komplexer Berechnungen, aufwendiger Einarbeitung und prinzipieller Ungenauigkeiten keine praxisgerechten Planungsmittel dar.

Es werden Anforderungen an ein Berechnungsverfahren und Praxisaufwendungen aufgestellt.

Im Kapitel 4 wird deshalb ein Berechnungsverfahren entwickelt, welches die vorher genannten Anforderungen erfüllt. Dieses Verfahren wird mit anderen Rechnungen und Simulationen validiert und verglichen.

Berechnungsverfahren sind nur dann hilfreich und in der Praxis einsatzfähig, wenn deren Anwendung dem Planer keine Schwierigkeiten bereitet. Deshalb wird dem Anwender sowohl eine computergestützte Berechnung (Kapitel 5) als auch ein grafisches Planungswerkzeug (Kapitel 6) auf der Grundlage des entwickelnden Berechnungsverfahrens zur Verfügung gestellt, die eine einfache Handhabung und schnelle Ergebnisse erlauben.

2 Grundlagen

2.1 Physikalische Grundlagen

Der Spektralbereich des sichtbaren Lichtes ist der Teil der elektromagnetischen Strahlung, den das menschliche Auge wahrnehmen kann. Licht reicht vom violetten Spektralbereich mit einer Wellenlänge λ von 400 nm bis zum roten Licht mit einer Wellenlänge λ von 700 nm. Hier schließt sich die langwellige Wärmestrahlung an. Im kurzwelligen Bereich grenzt die energiereiche UV-Strahlung an den sichtbaren Bereich. Das menschliche Auge ist sensitiv für Wellenlängen zwischen 380 und 780 nm [LANG1998].

2.1.1 Lichttechnische Grundgrößen

Es werden nur die wichtigsten Zusammenhänge an dieser Stelle dargestellt. Für eine detailliertere Beschreibung wird auf die einschlägige Literatur verwiesen [LANG1998] und [HENT1994].

Als lichttechnische Grundgrößen bezeichnet man den Lichtstrom, die Lichtstärke, die Beleuchtungsstärke und die Leuchtdichte [DIN5031.3].

Lichtstrom

Der Lichtstrom ϕ ist die von einer Lichtquelle in alle Richtungen abgestrahlte Lichtleistung.

Lichtstärke

Die Lichtstärke I stellt die Intensität des Lichtstroms in einer bestimmten Richtung dar.

Beleuchtungsstärke

Die Beleuchtungsstärke E kennzeichnet den Lichtstrom pro beleuchteter Fläche und ist die Bewertungsgröße für das Beleuchtungsniveau eines Raumes.

Die mittlere Beleuchtungsstärke E_m ist der arithmetische Mittelwert der Beleuchtungsstärken in einem Raum oder in der einer bestimmten Tätigkeit dienenden Raumzone. Unter Raumzone wird derjenige Bereich eines Raumes verstanden, in dem eine gleichartige Tätigkeit an mehreren Arbeitsplätzen ausgeübt bzw. der gleichartig genutzt wird [DIN5035.1].

Die Nennbeleuchtungsstärke E_N ist für Arbeitsstätten in Innenräumen der Nennwert der mittleren Beleuchtungsstärke im Raum oder in der einer bestimmten Tätigkeit dienenden Raumzone, für den die Beleuchtungsanlage auszulegen ist.

Leuchtdichte

Die Leuchtdichte L kennzeichnet die Lichtstärke pro beleuchteter Fläche und gibt den Helligkeitseindruck wieder, den das Auge wahrnehmen kann.

Lichtausbeute

Die Lichtausbeute η bezeichnet das Verhältnis aus abgestrahltem Lichtstrom ϕ und der aufgenommenen Leistung P [DIN5031.4]:

$$\eta = \frac{\phi}{P} \quad (2.1)$$

Beleuchtungswirkungsgrad

Der Beleuchtungswirkungsgrad η_{LB} ist das Verhältnis des Lichtstroms, der aus einer Leuchte austritt ϕ_L , zur Summe der Lichtströme der eingesetzten Lampen $\sum \phi_{La}$ bei einer festgelegten Betriebstemperatur ϑ_L [DIN5031.4]:

$$\eta_{LB} = \frac{\phi_L(\vartheta_L)}{\sum \phi_{La}} \quad (2.2)$$

2.2 Kunstlicht

Künstliches Licht bietet die Möglichkeit, unabhängig vom Sonnenstand Sehaufgaben durchzuführen. In der Lichttechnik wird definitionsgemäß unterschieden zwischen Lampen und Leuchten.

2.2.1 Lampen

Lampen sind künstliche Lichtquellen nach [DIN5039]. Sie werden eindeutig durch ein internationales Lampenbezeichnungssystem (LBS) charakterisiert [ZVEI1998].

Es wird unterschieden zwischen Temperaturstrahlern, die Licht durch Erhitzung einer Glühwendel mittels elektrischem Strom erzeugen, und Entladungslampen, die aufgrund von angeregten Elektronen ein Gas zum Leuchten anregen.

Temperaturstrahler sind uneingeschränkt dimmbar, während Entladungslampen für den Dimmvorgang ein dimmfähiges Vorschaltgerät benötigen.

2.2.2 Leuchten

Leuchten dienen nach [DIN5039] zur Verteilung, Filterung oder Umformung des Lichtes von Lampen, einschließlich der zur Befestigung, zum Schutz oder zum Betrieb notwendigen Bestandteile.

2.2.3 Vorschaltgeräte

Vorschaltgeräte erzeugen die notwendige Spannungsspitze zum Zünden von Entladungslampen und begrenzen den Lampenstrom. Induktive Vorschaltgeräte unterteilen sich in konventionelle Vorschaltgeräte (KVG) und verlustarme Vorschaltgeräte (VVG). Bei den verlustarmen Vorschaltgeräten führen hochwertigere Kernmaterialien und dickere Leitungsquerschnitte zu geringeren Verlustleistungen [FGL1996]. Die Lampen- und Systemleistung für eine Leuchtstofflampe mit 36 W bzw. 58 W bei verschiedenen Vorschaltgeräten sind in Tabelle 2.1 dargestellt. Elektronische Vorschaltgeräte (EVG) erzielen durch eine Betriebsfrequenz von mehr als 25 kHz eine höhere Lichtausbeute der Lampe bei verminderten Verlustleistungen. Die physikalische Ursache besteht darin, dass bei höherer Frequenz der Ionisierungszustand der Entladungsstrecke nicht wie bei induktiven Vorschaltgeräten neu aufgebaut werden muss. Die eingesparte Ionisierungsarbeit führt somit zur Erhöhung der Lichtausbeute [TRIL1997]. Weitere Vorteile elektronischer Vorschaltgeräte wie höhere Nutzbrenndauer, höhere Schaltfestigkeit usw. sind in [FGL1996] und [TRIL1997] dargestellt.

Erst der Einsatz von dimmbaren elektronischen Vorschaltgeräten, die über eine 2polige Steuerschnittstelle für eine Gleichspannung im Bereich 1 – 10 V verfügen, ermöglicht die Kombination mit Beleuchtungsregelungen.

Der neue digitale Schnittstellenstandard für EVGs, DALI (digital addressable lighting interface), bietet neben der Steuerung auch Gruppen- und Szenenschaltungen des Vorschaltgerätes sowie Rückmeldungen durch das Vorschaltgerät [DIAN2000].

P_{La} [W]	KVG			VVG			EVG		
	P_{Sys} [W]	ϕ_{La} [lm]	η_{Sys} [-]	P_{Sys} [W]	ϕ_{La} [lm]	η_{Sys} [-]	P_{Sys} [W]	ϕ_{La} [lm]	η_{Sys} [-]
36	46	3.350	73	42	3.350	80	36	3.200	89
58	71	5.200	73	66	5.200	79	55	5.000	91

Tabelle 2.1: Systemleistung, Lichtstrom und Systemlichtausbeute in Abhängigkeit der Lampenleistung und der Vorschaltgeräte [TRIL1997]

2.3 Tageslicht

Tageslicht ist der sichtbare Teil der Sonnenstrahlung. Das Tageslichtangebot hängt von astronomischen, physikalischen, geografischen und geometrischen Einflussgrößen ab. Eine weitere Charakteristik ist ferner eine hohe Wechselhaftigkeit bzw. Veränderlichkeit des Himmelszustands, die durch stündliche Mittelwerte nur sehr unzureichend wiedergegeben werden kann [HEUS1991], [GOLL2000].

2.3.1 Himmelszustände

Zur Berechnung von Beleuchtungsstärken im Freien und im Innenraum ist eine Definition der möglichen Himmelszustände erforderlich. Die Leuchtdichteverteilungen verschiedener Himmelszustände, klarer Himmel, vollständig bedeckter Himmel sowie mittlerer Himmel, sind in [CIE1994] standardisiert.

Klarer Himmel

Unter klarem Himmel wird ein wolkenloser Himmel verstanden, dessen Leuchtdichteverteilung in [CIE1973] festgelegt ist.

Bedeckter Himmel

Für den vollständig bedeckten Himmel ist das Verhältnis der Leuchtdichte bei einem Höhenwinkel γ über dem Horizont zur Leuchtdichte im Zenit L_z definiert zu [DIN5034.2]:

$$L_\gamma = \frac{L_z (1 + 2 \sin \gamma)}{3} \quad (2.3)$$

Mittlerer Himmel

Da der klare und bedeckte Himmel in der Praxis nur selten auftreten, wurde von Aydınli der mittlere Himmel definiert, der mit Hilfe der örtlichen Sonnenscheinwahrscheinlichkeiten (SSW) eine Berechnung der Mittelwerte über eine mehrjährige Zeitspanne ermöglicht [AYDI1981].

Dieser statistische Himmelszustand ermöglicht Aussagen über den jährlichen Energieverbrauch und die Wirtschaftlichkeit der Tageslichtnutzung [DIN5034.2].

2.3.2 Tageslichtquotient

Der Tageslichtquotient D bezeichnet das Verhältnis der Beleuchtungsstärke E_P in einem Punkt einer Ebene zur Horizontalbeleuchtungsstärke E_a im Freien bei unverbaute Hemisphäre [DIN5034.1]:

$$D = \frac{E_P}{E_a} \cdot 100\% \quad (2.4)$$

Der Tageslichtquotient dient jedoch nach [DIN5034.1] lediglich zur Beurteilung einer ausreichenden Helligkeit im Innenraum bei bedecktem Himmel.

Eine Beurteilung der qualitativen Tageslichtbeleuchtung ist damit jedoch nicht möglich, da der Tageslichtquotient eine unterschiedliche Orientierung (Norden oder Süden) nicht berücksichtigt. Ein Vergleich zweier Räume oder zweier Tageslichtsysteme anhand des Tageslichtquotienten bei bedecktem Himmel kann bei anderen Himmelszuständen vollkommen unterschiedlich ausfallen [TREG1980].

2.4 Steuerung und Regelung der Beleuchtung

Nach einer Definition der Begriffe Steuerung und Regelung werden die verschiedenen Möglichkeiten der Steuerung und Regelung von Beleuchtungsanlagen dargestellt.

2.4.1 Unterscheidung Regelung – Steuerung

In der Regelungstechnik unterscheidet man zwischen Regelung und Steuerung. Die Steuerung ist eine offene Wirkungskette, d. h. es erfolgt keine Rückkopplung der Ausgangsgröße zur Steuereinrichtung (siehe Abbildung 2.1). Störgrößen werden hierbei ignoriert [FÖLL1994].

Bei der Regelung spricht man hingegen von einem Wirkungskreislauf, bzw. Regelkreis. Hier wird eine gemessene Größe mit einem Sollwert verglichen. Bei einer Abweichung des Messwertes vom Sollwert bewirkt die Regelung eine Änderung der Strecke (siehe Abbildung 2.2). Die Regelung ist somit in der Lage auf äußere Störgrößen zu reagieren [FÖLL1994].

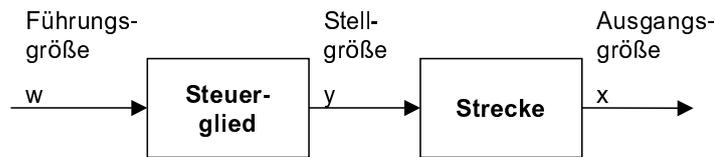


Abbildung 2.1: Prinzip einer Steuerung

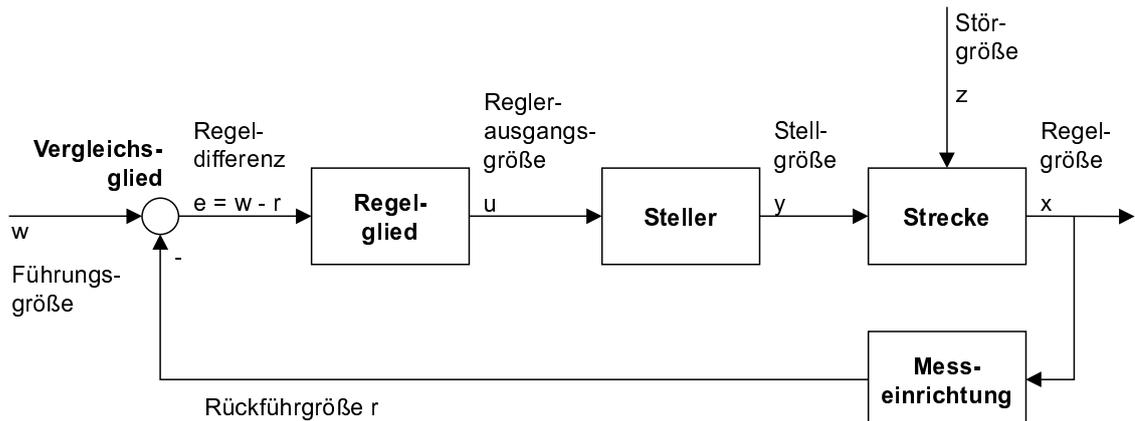


Abbildung 2.2: Prinzip einer Regelung

2.4.2 Beleuchtungskontrolle

Systeme zur Beeinflussung der Beleuchtung werden in Anlehnung an den englischen Sprachgebrauch im Folgenden Beleuchtungskontrollsysteme (lighting control systems), unter die sowohl Steuerungen als auch Regelungen fallen, genannt [EMBR1996].

Die Möglichkeiten der Beleuchtungskontrolle werden unterschieden in Kontrollstrategien, -techniken und -einrichtungen (siehe Tabelle 2.2) [VERD1984].

Die verbreitetsten Arten der Beleuchtungskontrolle werden im Folgenden dargestellt.

Manuelle Steuerung (Kontrolltechnik)

Eine manuelle Steuerung fällt ebenfalls unter die Beleuchtungskontrolle. Das Stellglied ist hier der Nutzer. Unter manuelle Steuerung fallen Ein- und Aus-Schalter sowie Dimmer, die seitens der Nutzer bedient werden [BECK1989]. Große Distanzen zwischen Arbeitsplatz und Schalter verhindern allerdings häufige Schaltfrequenzen.

Kontrollstrategie	Zeitsteuerung, Sollwertanpassung, Tageslichtergänzung, Kompensation des Lichtstromrückgangs
Kontrolltechnik	Beleuchtungsniveau (an–aus, Stufen, kontinuierlich) Anpassung (manuell, automatisch) Sensor (Licht, Anwesenheit) Plazierung (zentral, dezentral)
Kontrolleinrichtungen	Relais, Spannungssteuerung, Infrarot, Ultraschall, Mikroprozessoren, Vorschaltgeräte, Uhren

Tabelle 2.2: Kontrollstrategien, -techniken und -einrichtungen für Beleuchtung

Zeitsteuerungen (Kontrollstrategie)

Zweck einer zeitlich gesteuerten Beleuchtung ist die automatische Abschaltung der Beleuchtung, wenn diese nicht genutzt wird. Darunter fallen Zeitschaltuhren, die die Beleuchtung zu definierten Uhrzeiten ein- und ausschalten sowie computergestützte Systeme, die nach vorher programmierten Zeiten schalten [RUB11984b]. Anwesenheitssensoren mit verzögerter Ausschaltung werden im Folgenden dargestellt.

Präsenzmelder (Kontrolleinrichtungen)

Präsenzmelder, dazu zählen Anwesenheitssensoren und Bewegungsmelder, sind Passiv-Infrarot-Geräte. Diese Sensoren reagieren nicht auf absolute Wärmestrahlung sondern auf Änderungen der Wärmestrahlung in ihrem Erfassungsbereich [LECH1996]. Präsenzmelder sind häufig mit Lichtsensoren kombiniert und können an eine Gebäudeleittechnik angeschlossen werden. Die Qualität der Präsenzmelder hängt unmittelbar von der eingesetzten Linse ab [FREI1992].

Präsenzmelder werden unterschieden nach der verwendeten Kontrollstrategie. Automatische Ein- und Ausschaltung bewirkt eine sofortige Änderung, wenn eine Bewegung detektiert wird. Die am häufigsten anzutreffende Kontrollstrategie ist die automatische Einschaltung bei erfasster Bewegung zusammen mit einer verzögerten Ausschaltung, die unnötig hohe Schaltfrequenzen vermeidet [MANI1996].

Lichtsensoren (Kontrolleinrichtungen)

Ein Lichtsensor besteht aus einer Silizium-Photodiode, die zur Anpassung an das Spektrum des gemessenen Lichtes eine Farbkorrekturfilterung erfordert [RUB11984a]. Der Einfluss der Sensorik auf die Genauigkeit der Steuerung oder Regelung ist in [BELE2000] beschrieben. Ein Sensor kann mit und ohne Tubus oder mit einer einseitigen Blende ausgestattet sein, um richtungsselektiv zu messen (siehe auch Abbildung 2.3).

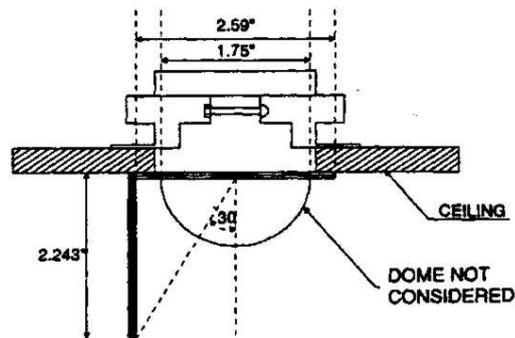


Abbildung 2.3: Lichtsensor mit einseitiger Blende (Maße in Zoll) [MIST1997]

2.4.3 Gebäudeleittechnik

Die Gebäudeleittechnik dient der übergeordneten Steuerung sämtlicher oder einzelner technischer Funktionen eines Gebäudes. Die Beleuchtung stellt ebenso wie Heizung, Lüftung und Klimatisierung eine Teilmenge dieser Funktionen dar. Im Idealfall arbeitet die Gebäudeleittechnik gewerkeübergreifend und versucht eine Optimierung der Gesamtenergiebilanz zu erzielen [SAND2000b]. Der vielfach benutzte Begriff Lichtmanagement in diesem Zusammenhang ist irreführend, da dabei nicht klar definiert ist, ob das Ziel Energieeinsparung, Speicherung unterschiedlicher Lichtszenarien o. ä. ist [GREU1995].

Die Gebäudeleittechnik bedient sich zur Übertragung der Daten verschiedener Bussysteme. Eine detaillierte Übersicht findet sich in [KNOO1998].

2.4.4 Tageslichtabhängige Beleuchtungsregelung

Eine tageslichtabhängige Beleuchtungsregelung (siehe Abbildung 2.4) kann zentral über eine Gebäudeleittechnik, raumweise über ein Bussystem oder separat für jede Leuchte erfolgen.

Letztere Systeme unterscheiden sich in Systeme ohne Abschaltung und Systeme mit Abschaltung (siehe Abbildung 2.5).

Bei Systemen mit Abschaltung wird der Lichtsensor an einen Regler angeschlossen, der wiederum die Steuerspannung für das elektronische Vorschaltgerät liefert. Diese Systeme können je nach Modell die Leistung von 1 bis 100% stufenlos dimmen.

Systeme ohne Abschaltung sind einfache Sensoren, die direkt an das Vorschaltgerät angeschlossen werden. Diese Sensoren sind insbesondere nachträglich einfach zu montieren, weisen aber den Nachteil auf, dass die Leuchten nie abgeschaltet werden können. Auf die Vor- und Nachteile dieser beiden Systeme wird in [GÖRR2000] näher eingegangen.

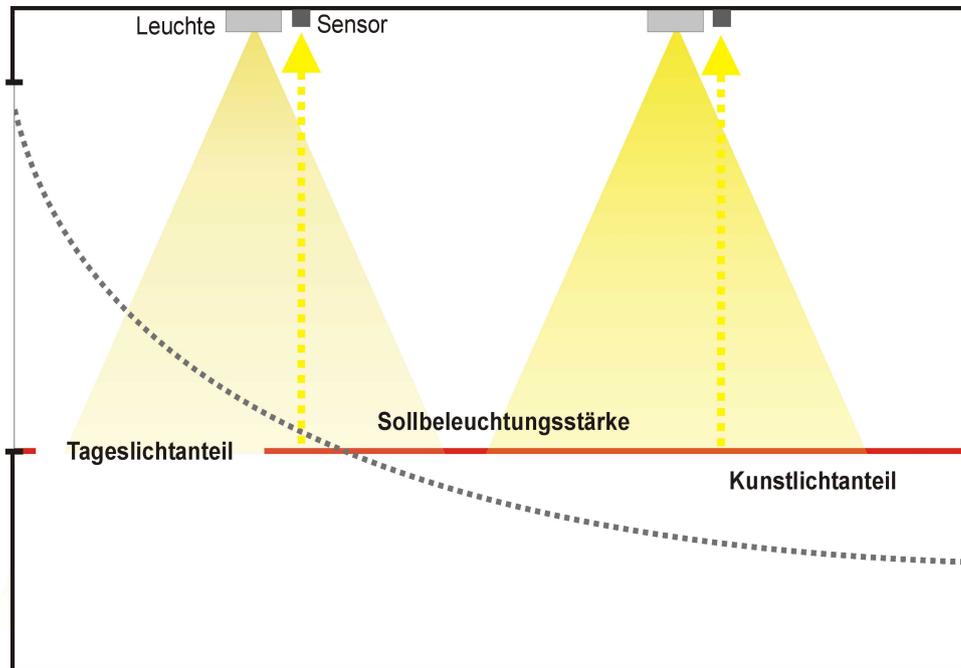


Abbildung 2.4: tageslichtabhängige Beleuchtungsregelung, separat für jedes Lichtband; abnehmender Tageslichtanteil mit zunehmendem Abstand zum Fenster

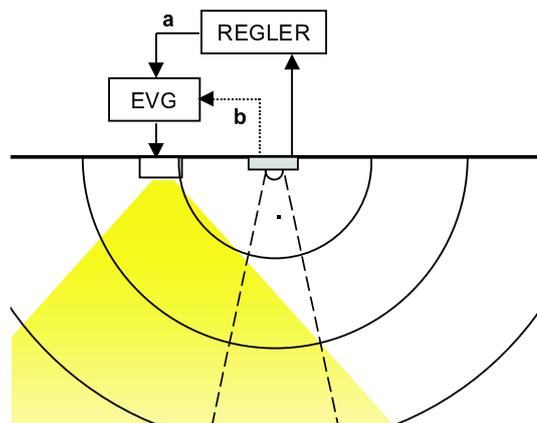


Abbildung 2.5: Prinzip der Beleuchtungsregelung mit Lichtsensor und Präsenzmelder, mit Abschaltung (a), ohne Abschaltung (b)

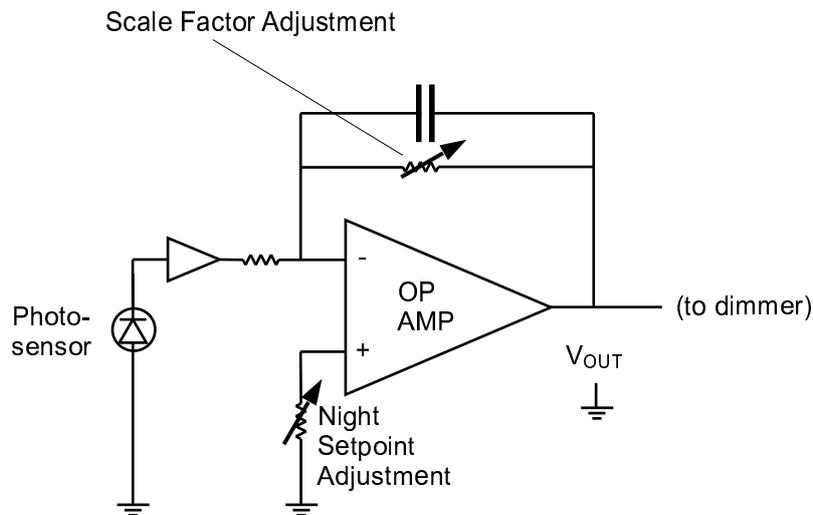


Abbildung 2.6: Schaltbild einer proportionalen Regelung [RUBI1989]

Die übliche Regelstrategie bei Einsatz von Sensoren, die auf die Arbeitsfläche schauen, ist eine proportionale Regelung. Das Dimmniveau ist eine lineare Funktion der Differenz zwischen dem Sensorwert und dem Referenzwert der Kalibrierung. Ausgang ist die Steuerspannung des EVGs (siehe Abbildung 2.6).

Die marktgängigen Beleuchtungskontrollsysteme schalten die Beleuchtung häufig erst aus, wenn die Beleuchtungsstärke im Raum einen über der Nennbeleuchtungsstärke liegenden Schwellwert für ein bestimmtes Zeitintervall überschreitet [LITT1998]. Dieser Schwellwert liegt bei einigen Systemen bei dem 1,5fachen der Nennbeleuchtungsstärke (siehe Abbildung 2.7).

Optimal ist eine kombinierte Regelung der Beleuchtung und des Sonnenschutzes, damit zum einen zu hohe Kühllasten im Raum vermieden werden und zum anderen der Sonnenschutz den Anteil der künstlichen Beleuchtung nicht unnötig erhöht [NEEM1998].

2.5 Raumeigenschaften

Ein Raum wird charakterisiert durch seine Abmessungen, die Sichtverbindungen nach außen, evtl. vorhandene Verbauung sowie die Reflexionsgrade der Umschließungsflächen des Raumes.

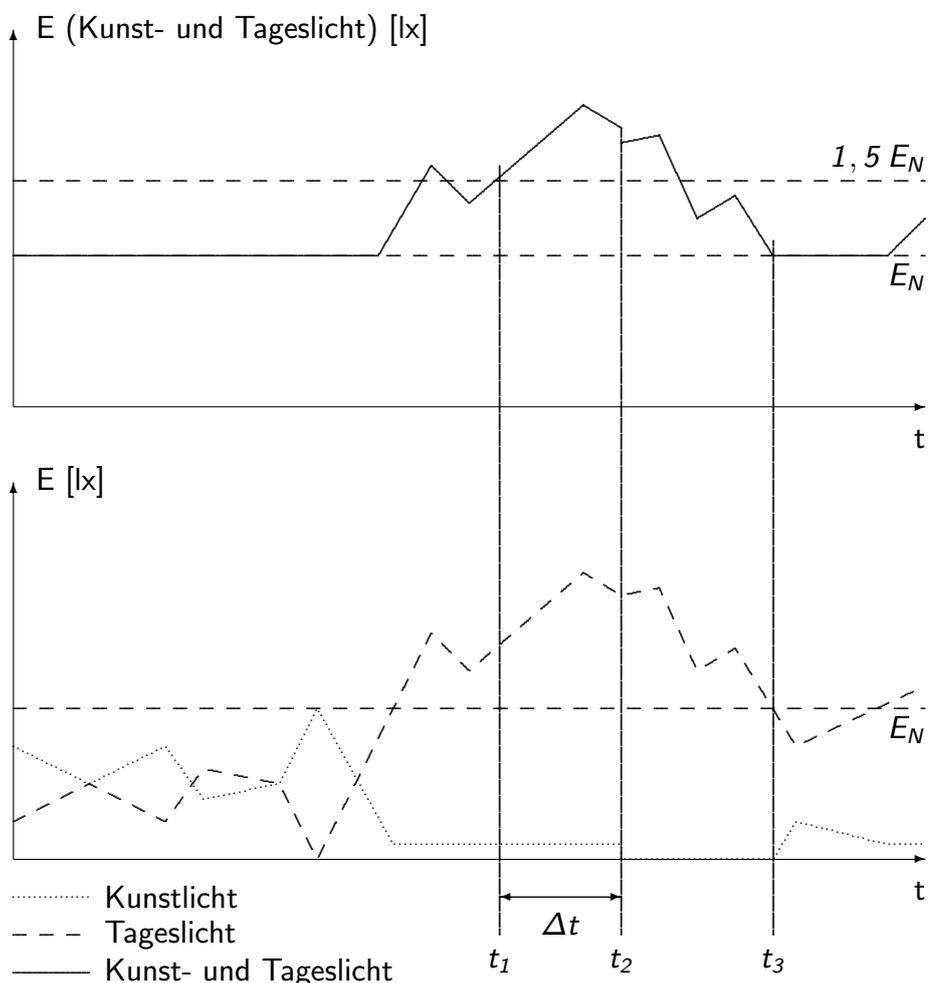


Abbildung 2.7: zeitliches Schaltverhalten einer tageslichtabhängigen Beleuchtungskontrolle in Abhängigkeit der Beleuchtungsstärke [TRIL1998]

t_1 : Beleuchtungsstärke erreicht 150% der Nennbeleuchtungsstärke

t_2 : Ausschaltzeitpunkt nach 15 min über dem Schwellwert

t_3 : Einschaltzeitpunkt bei Unterschreiten der Nennbeleuchtungsstärke

2.5.1 Abmessungen

Nach [ASV23] müssen Arbeitsräume eine Grundfläche von mindestens $8,00 \text{ m}^2$ haben. Die lichte Höhe muss bei einer Grundfläche bis zu 50 m^2 mindestens $2,50 \text{ m}$ und bei einer Grundfläche bis zu 100 m^2 mindestens $2,75 \text{ m}$ betragen.

2.5.2 Sichtverbindung

In [ASV7] ist vorgeschrieben, dass Arbeitsräume eine Sichtverbindung nach außen haben müssen, wenn nicht betriebstechnische Gründe dies verbieten.

Die erforderlichen Mindestanforderungen werden in [ASR7/1] präzisiert. Die durchsichtigen Fensterflächen eines Arbeitsraumes sollen bis zu einer Tiefe von 5 m mindestens $1,25 \text{ m}^2$ und über einer Tiefe von 5 m mindestens $1,5 \text{ m}^2$ betragen. Als Sichtverbindung vorgesehene Fenster sollen mindestens eine Höhe von 1,25 m und eine Breite von 1 m haben.

Wenn das Bauordnungsrecht des jeweiligen Bundeslandes größere Fensterflächen als die Arbeitsstättenrichtlinie vorschreibt, geht das Bauordnungsrecht vor.

2.5.3 Verbauung

Der Abstand eines Gebäudes zu einer Verbauung wird in den Landesbauordnungen geregelt. Nach [BAUO1995] muss der Abstand zur Nachbarbebauung mindestens das 0,8fache der Höhe betragen. In Kerngebieten, Gewerbegebieten und Industriegebieten beträgt der Mindestabstand das 0,5fache der Höhe und in Gewerbe- und Industriegebieten vor Gebäuden, die überwiegend der Produktion oder Lagerung dienen, das 0,25fache der Höhe.

2.5.4 Reflexionsgrad der Umschließungsflächen

Der Reflexionsgrad ϱ ist das Verhältnis des reflektierten Lichtstroms zum einfallenden Lichtstrom und wird jeweils getrennt für die Decke, die Wände und den Boden bzw. die Nutzebene angegeben. Wenn keine genauen Angaben über die Reflexionsgrade vorhanden sind, hat es sich bewährt, folgende Werte anzunehmen:

Decke	ϱ_D	=	0,7
Wände	ϱ_W	=	0,5
Nutzebene	ϱ_N	=	0,2

Eine genaue Berechnung der Reflexionsgrade ist in [LITG1988] angeführt.

2.6 Beleuchtungsqualität

In [DIN5034.1] wird eine angemessene Sichtverbindung nach außen gefordert und in [DIN5035.2] sind die erforderlichen Nennbeleuchtungsstärken geregelt. Der Begriff der Beleuchtungsqualität geht deutlich über die Anforderungen dieser Normen hinaus und ist

nicht eindeutig normativ geregelt. Insbesondere bei der Bildschirmarbeit ist die Gefahr einer Blendung zu vermeiden [BILD1996]. Zu beachten sind darüber hinaus Auswirkungen auf das Wohlbefinden der Nutzer, die sogenannte visuelle Behaglichkeit, Akzeptanz der Beleuchtung, sowie eine ausreichende Versorgung mit Tageslicht. Einige dieser Aspekte werden im Folgenden näher erläutert.

2.6.1 Visuelle Behaglichkeit

Die [VDI6011] gibt für die Beleuchtungsqualität eine Definition der visuellen Behaglichkeit analog zur thermischen Behaglichkeit an.

„Visuelle Behaglichkeit ist gegeben, wenn die Person bei Erledigung einer Sehaufgabe mit der Lichtsituation zufrieden ist. Mangelnde visuelle Behaglichkeit kann zu Fehlleistungen und Ermüdungserscheinungen führen, hohe visuelle Behaglichkeit hingegen kann die Produktivität fördern und die Leistungsfähigkeit steigern“ [VDI6011].

2.6.2 Versorgung mit Tageslicht

Eine Sichtverbindung nach aussen alleine reicht nicht aus. Zu wenig Tageslicht wird von den Nutzern als Beeinträchtigung bei der Büroarbeit empfunden, die auch zu gesundheitlichen Beschwerden führen kann [CAKI1999]. Der Mensch will darüber hinaus ebenfalls die Dynamik des Tageslichtes, d. h. die tageszeitlichen und jahreszeitlichen Schwankungen, miterleben können [SAND2000a]. Einige Leuchtenhersteller haben dies als Forschungsthema erkannt und bieten deshalb bereits Leuchten an, die den Tageslichtverlauf nachvollziehen [IGUZ1998].

2.6.3 Akzeptanz der Beleuchtung

Eine Beleuchtung, sowohl mit Tageslicht als auch mit künstlicher Beleuchtung und evtl. vorhandener Regeleinrichtungen, muss derart gestaltet sein, dass der Nutzer sie akzeptiert. Im anderen Fall führt es zu Gegenmassnahmen, wie z. B. Abdeckung der Lichtsensoren [BECK1989], die das angestrebte Ziel einer Energieeinsparung konterkarieren. Deshalb muss der Nutzer über derartige Massnahmen im Vorfeld informiert werden und die Möglichkeit haben, die Beleuchtung individuell zu beeinflussen [VINE1998], [SLAT1996].

Unzufriedenheit mit den klimatischen Raumbedingungen sowie unterschiedliches Alter und Einkommen können ebenfalls die Akzeptanz einer geregelten Beleuchtungsanlage negativ beeinflussen, ohne direkt mit der Beleuchtung im Zusammenhang zu stehen [NEEM1984b].

2.6.4 Produktivität

Es gibt zahlreiche Untersuchungen, die belegen, dass ein zu geringes Beleuchtungsniveau die Produktivität negativ beeinflusst und die Fehlerrate erhöht [LEVY1980], [MUCK1961] und [FLEI2000]. Quantitative Aussagen sind jedoch kaum vorhanden und nur unzureichend auf andere Fälle zu übertragen [VÖLK1998].

2.6.5 Biologische Auswirkungen

Licht hat auch eine biologische Wirkung auf den Menschen. Menschen, die an der sogenannten „Saisonal Abhängigen Depression“ (SAD), auch Winterdepression genannt, leiden, werden mit einer Lichttherapie, d. h. Bestrahlung von ca. 2 Stunden mit 2500 lx, behandelt. Die Erfolgsquote liegt hier bei 80% [SAUE1999].

Insbesondere bei Schicht- und Nachtarbeitern wird durch eine entsprechende Beleuchtung der Tag-Nacht-Rhythmus verschoben. Die Fehlerhäufigkeit während der Nachtarbeit und die Schlafstörungen der Arbeiter werden aufgrund eines derartigen circadianen Lichtsystems deutlich reduziert [SAUE2000].

3 Kunst- und Tageslichtberechnung

Es existieren verschiedene Berechnungsvorschriften im Kunst- und Tageslichtbereich. Sie dienen zur Auslegung der künstlichen Beleuchtung (siehe Abschnitt 3.1) oder zur Bestimmung des Tageslichtquotienten und der jährlichen Nutzungszeit des Tageslichts (siehe Abschnitt 3.2). Darüber hinaus wurden in verschiedenen Arbeiten Hilfsgrößen eingeführt, die nach weiteren Rechenschritten eine Berechnung des Energieverbrauchs ermöglichen, jedoch keine allgemeingültige Vorhersage des Energieverbrauchs erlauben. Die als Basis für weitere Berechnungen dienenden Gleichungen und Rechenverfahren werden in diesem Kapitel kurz vorgestellt, ebenso bereits durchgeführte Untersuchungen, um daraus die Forderungen an ein neues Berechnungsverfahren abzuleiten.

3.1 Wirkungsgradverfahren

Das Wirkungsgradverfahren dient zur Dimensionierung der künstlichen Beleuchtung. Basierend auf einer vorgegebenen Nennbeleuchtungsstärke lassen sich die Anzahl der erforderlichen Lampen und Leuchten ermitteln. Grenzen der Anwendung und die erforderlichen Voraussetzungen finden sich in [LITG1988]. An dieser Stelle wird lediglich die vereinfachte Berechnung der mittleren Beleuchtungsstärke bzw. der Anzahl der erforderlichen Leuchten vorgestellt. Unter Zuhilfenahme der Wirkungsgradtabellen aus [LITG1988] lässt sich die Beleuchtungsstärke berechnen. Der Begriff Wirkungsgrad ist dabei physikalisch nicht korrekt, da auch Werte größer 1 vorkommen können. Die Tabellen für die unterschiedlichen Leuchtentypen unterscheiden sich nach dem Anteil des Leuchtenlichtstroms in den unteren Halbraum φ_u und dem Standard-Direkt-Nutzlichtstromanteil φ_{su} . Ein Beispiel zeigt Tabelle 3.1.

Zur Verwendung der Tabellen sind die Reflexionsgrade der Umschließungsflächen (ϱ_D , ϱ_W und ϱ_N) sowie der Raumindex erforderlich. Der Raumindex k berechnet sich zu:

$$k = \frac{t \cdot b}{h(t + b)} \quad (3.1)$$

Nach evtl. erforderlicher Interpolation des Raumwirkungsgrades η_R kann die mittlere Beleuchtungsstärke E_m berechnet werden:

$$E_m = \frac{v \cdot \eta_R \cdot \eta_{LB} \cdot n \cdot z \cdot \phi_{La}}{A_R} \quad (3.2)$$

ϱ_D	0,8	0,8	0,8	0,5	0,5	0,7	0,7	0,7	0,8	0,8	0,8	0,5	0,5	0,3	0
ϱ_W	0,8	0,5	0,3	0,5	0,3	0,7	0,5	0,3	0,8	0,5	0,3	0,5	0,3	0,3	0
ϱ_N	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,2	0,2	0,2	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0
k	η_R														
0,6	93	74	68	72	67	80	72	66	83	70	66	69	65	65	61
0,8	101	82	76	80	74	87	79	74	89	77	73	76	72	71	67
1	106	90	83	86	81	93	85	80	93	83	79	81	78	77	73
1,25	112	98	92	93	88	98	92	88	98	90	86	88	85	84	80
1,5	115	102	96	97	92	101	96	92	100	93	89	91	88	87	83
2	119	108	103	101	98	105	101	97	102	97	94	94	92	91	88
2,5	122	112	108	105	101	107	104	101	104	99	97	97	95	94	90
3	124	116	112	107	104	109	106	104	105	101	99	99	97	96	93
4	125	119	115	109	107	111	108	106	106	103	101	100	99	97	94
5	127	121	118	111	109	112	110	108	106	104	103	101	100	98	95

Tabelle 3.1: Raumwirkungsgrade η_R des Leuchtentyps A 60.1 an der Decke in Abhängigkeit der Reflexionsgrade der Umschließungsflächen und des Raumindex k [LITG1988]

Eine Umformung der Gleichung 3.2 ergibt die erforderliche Leuchtenanzahl n :

$$n = \frac{E_N \cdot A_R}{v \cdot \eta_R \cdot \eta_{LB} \cdot z \cdot \phi_{La}} \quad (3.3)$$

Praktisch kann n nur ganze Zahlen annehmen, so dass n stets aufgerundet wird. Ebenfalls muss dabei berücksichtigt werden, dass eine sinnvolle Leuchtenanordnung gewährleistet ist, indem bei mehreren Lichtbändern jedes Lichtband immer die gleiche Leuchtenanzahl aufweist. Die mit dem Wirkungsgradverfahren berechnete erforderliche Leuchtenzahl n sowie die Systemleistung der Leuchte $P_{S,ys}$ sind notwendig, um den jährlichen Energieverbrauch der künstlichen Beleuchtung zu berechnen.

3.1.1 Planungsfaktor

Der Verminderungsfaktor v bzw. der Kehrwert, der Planungsfaktor p , berücksichtigt die Alterung der Lampen, d. h. den Lichtstromrückgang über die Nutzbrenndauer (siehe auch Abbildung 3.1). Der Planungsfaktor bewirkt durch eine definierte Überdimensionierung eine Verlängerung der Wartungsintervalle. In der Regel hat der Planungsfaktor p den Wert 1,25. Eine Regelung der Beleuchtungsstärke kann den Lichtstromrückgang über die Nutzbrenndauer durch eine höhere Leistungsaufnahme nach folgender Gleichung kompensieren [GÖRR2000]:

$$P_{erf} = \frac{\phi_{erf} \cdot P_{La,max}}{\phi_0 \left(1 - \frac{0,2}{t_{Ende}} t\right)} + P_{Verl} \quad (3.4)$$

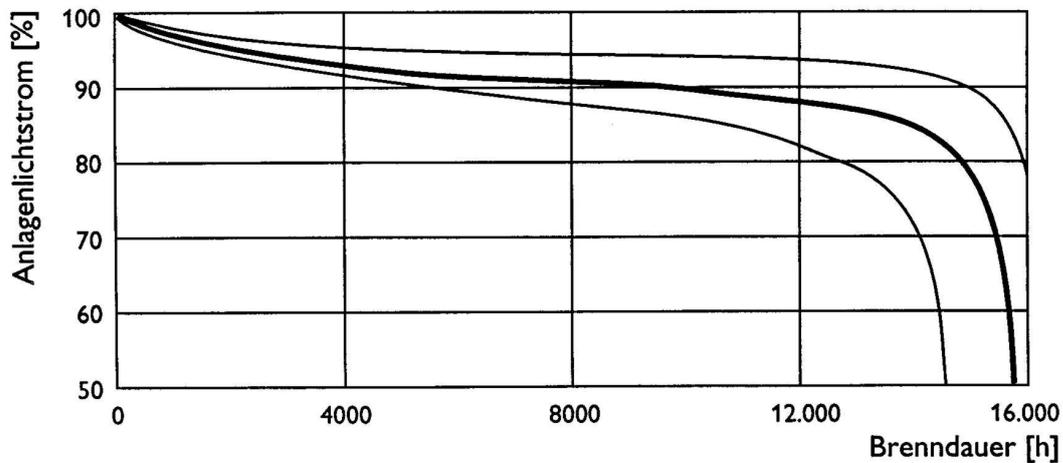


Abbildung 3.1: Lichtstromrückgang über die Nutzbrenndauer (Mittelwert der Messung und Streuung) [ZVEI1997]

3.2 Tageslichtquotient und jährliche Nutzungszeit nach DIN 5034

3.2.1 Tageslichtquotient

Die Berechnung des Tageslichtquotienten D ist ausführlich in [DIN5034.3] beschrieben und wird deshalb an dieser Stelle nur kurz angesprochen. Bei einer Berechnung des Tageslichtquotienten wird dieser zusammengesetzt aus einem Himmelslichtanteil D_{Hr} , einem Außenreflexionsanteil D_{Vr} und einem Innenreflexionsanteil D_{Rr} unter Berücksichtigung folgender Minderungsfaktoren (siehe Gleichung 3.5):

τ_{D65} Transmissionsgrad des Verglasungsmaterials für quasiparallelen, senkrechten Lichteinfall (Berechnung nach [DINEN410])

k_1 Verminderungsfaktor für Rahmen und Sprossenwerk

k_2 Verminderungsfaktor für Verschmutzung

k_3 Korrekturfaktor für nicht senkrechten Lichteinfall

Die Herleitungen der Verminderungsfaktoren und der einzelnen Anteile des Tageslichtquotienten finden sich in [KROC1964] und [KROC1965]. Die Lösung der Gleichung 3.5

ist manuell nicht mehr möglich und erfordert aufwendige numerische Integrationen.

$$D = \tau_{D65} \cdot k_1 \cdot k_2 \cdot k_3 \cdot (D_{Hr} + D_{Vr} + D_{Rr}) \quad (3.5)$$

Da der Tageslichtquotient unterschiedliche Orientierungen nicht berücksichtigt, ist eine qualitative Beurteilung der Tageslichtnutzung nicht möglich. Ebenso erlaubt der Tageslichtquotient keine Rückschlüsse auf den Energieverbrauch der Beleuchtung. Trotz aller Einschränkungen hinsichtlich seiner Anwendbarkeit stellt der Tageslichtquotient eine weit verbreitete Größe dar, die ebenfalls in anderen Arbeiten Verwendung findet und vielfach, fälschlicherweise, als quantitatives Beurteilungskriterium eingesetzt wird.

3.2.2 Nutzungszeit

Die jährliche Nutzungszeit $t_{Nutz,a}$ bezeichnet das Zeitintervall, während dessen die erforderliche Beleuchtungsstärke im Innenraum durch das vorhandene Tageslichtangebot, bestimmt an einem charakteristischen Bezugspunkt, erreicht oder überschritten wird [LANG1998]. In dieser Zeit kann die künstliche Beleuchtung ausgeschaltet werden. Die jährliche Nutzungszeit $t_{Nutz,a}$ kann aus den Beleuchtungsstärken an einem Punkt bei mittlerem Himmel $E_{P,m}$, unterschieden in Zeitintervallen mit direkter Besonnung ($\Delta T \cdot SSW$) und Zeitintervallen ohne Besonnung ($\Delta T \cdot (1 - SSW)$), ermittelt werden. Falls die Beleuchtungsstärke in einem Punkt 80% der Nennbeleuchtungsstärke erreicht:

$$E_{P,m} \geq 0,8 \cdot E_N \quad (3.6)$$

gilt:

$$t = \Delta T \cdot SSW \quad (3.7)$$

Analoges gilt für den Zeitraum ohne Besonnung ($\Delta T \cdot (1 - SSW)$). Die jährliche Nutzungszeit wird dann aus den Zeitintervallen bei Besonnung t und ohne Besonnung t^* über die Arbeitstage aller Monate N_i vom Zeitpunkt des Arbeitsbeginns T_A bis zum Zeitpunkt des Arbeitsendes T_E summiert:

$$t_{Nutz,a} = \sum_{i=1}^{12} \left[N_i \cdot \sum_{t=T_A}^{T_E} (t + t^*) \right] \quad (3.8)$$

Im Verhältnis zu den jährlichen Arbeitstagen N_a multipliziert mit der täglichen Arbeitszeit t_d ergibt sich somit die relative jährliche Nutzungszeit $t_{Nutz,a,rel}$ zu:

$$t_{Nutz,a,rel} = \frac{t_{Nutz,a}}{N_a \cdot t_d} \cdot 100\% \quad (3.9)$$

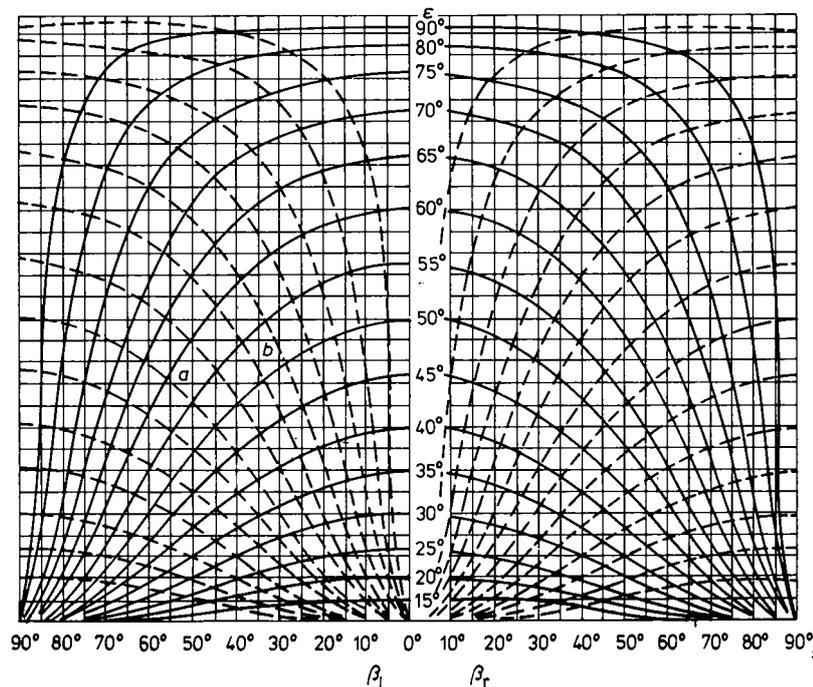


Abbildung 3.2: Himmelslichtdiagramm [FISC1982]

Mit Hilfe der relativen jährlichen Nutzungszeit kann der Anteil der Tageslichtnutzung an der Gesamtbeleuchtung, in der die künstliche Beleuchtung ausgeschaltet werden kann, quantifiziert werden. Eine Ein-Aus-Schaltung ist jedoch nicht mehr Stand der Technik. Die Nutzungszeit erlaubt hingegen keine Aussagen über den Zeitraum, in dem die künstliche Beleuchtung gedimmt werden kann. Ebenfalls können keine Rückschlüsse auf den Energieverbrauch impliziert werden. Ein weiterer Nachteil ist die aufwendige Berechnung nach [DIN5034.2] und [DIN5034.3], die zu langen Bearbeitungszeiten führt und keine schnelle Planungshilfe in der Praxis darstellt.

3.2.3 Himmelslichtdiagramm

Ein grafisches Verfahren zur einfachen Ermittlung des Tageslichtquotienten mit Hilfe des Himmelslichtdiagramms (siehe Abbildung 3.2) findet sich in [FISC1982]. Hier wird die sichtbare Himmelshalbkugel in Flächen unterteilt und im Himmelslichtdiagramm dargestellt. Nach Auftragen der Fensterhöhen- und -breitenwinkel sowie der Verbauungswinkel kann der sichtbare Anteil der Himmelshalbkugel aus dem Diagramm abgelesen und daraus der Tageslichtquotient abgeschätzt werden [FISC1982]. Dies Verfahren unterliegt einigen Ungenauigkeiten und denselben Einschränkungen hinsichtlich der Anwendbarkeit des

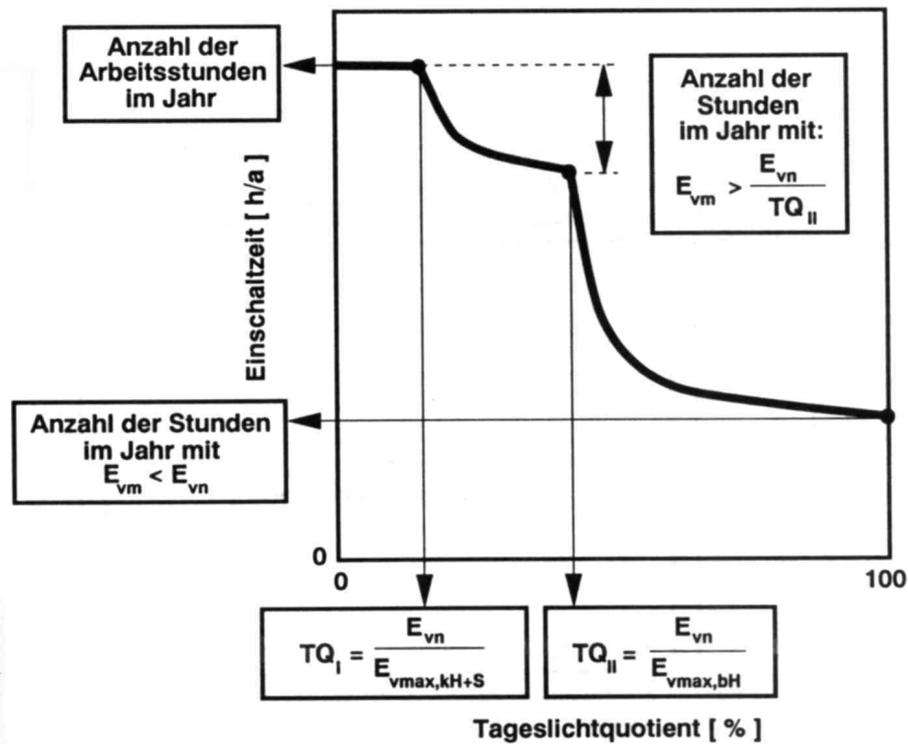


Abbildung 3.3: Einschaltzeit zwischen den Tageslichtquotientengrenzwerten [SZER1994a]

Tageslichtquotienten. Ein weitere grafische Bestimmung des Tageslichtquotienten ist in [LAHM1999] dargestellt. Hier wird allerdings nicht der Anteil aufgrund der Verbauung berücksichtigt.

3.3 Lichteinschaltzeit nach Szerman

Szerman hat in [SZER1994a] ein Verfahren entwickelt, dass die Berechnung des Energiebedarfs künstlicher Beleuchtung in Stundenintervallen ermöglicht und Aussagen über die Gesamtenergiebilanz eines Gebäudes einschließlich des Energiebedarfs für Kühlung und Heizung erlaubt [SZER1996a]. Die diesem Verfahren zugrunde liegenden Algorithmen wurden in ein Simulationsprogramm implementiert [SZER1996c]. Da dieses Verfahren jedoch in der Praxis zu zeit- und rechenaufwendig ist, hat Szerman ein vereinfachtes Verfahren zur Bestimmung der Einschaltzeit der künstlichen Beleuchtung in Abhängigkeit des Tageslichtquotienten entwickelt, obwohl er einschränkend feststellt, dass der Tageslichtquotient bei unterschiedlichen Himmelszuständen nicht aussagekräftig ist [SZER1996b].

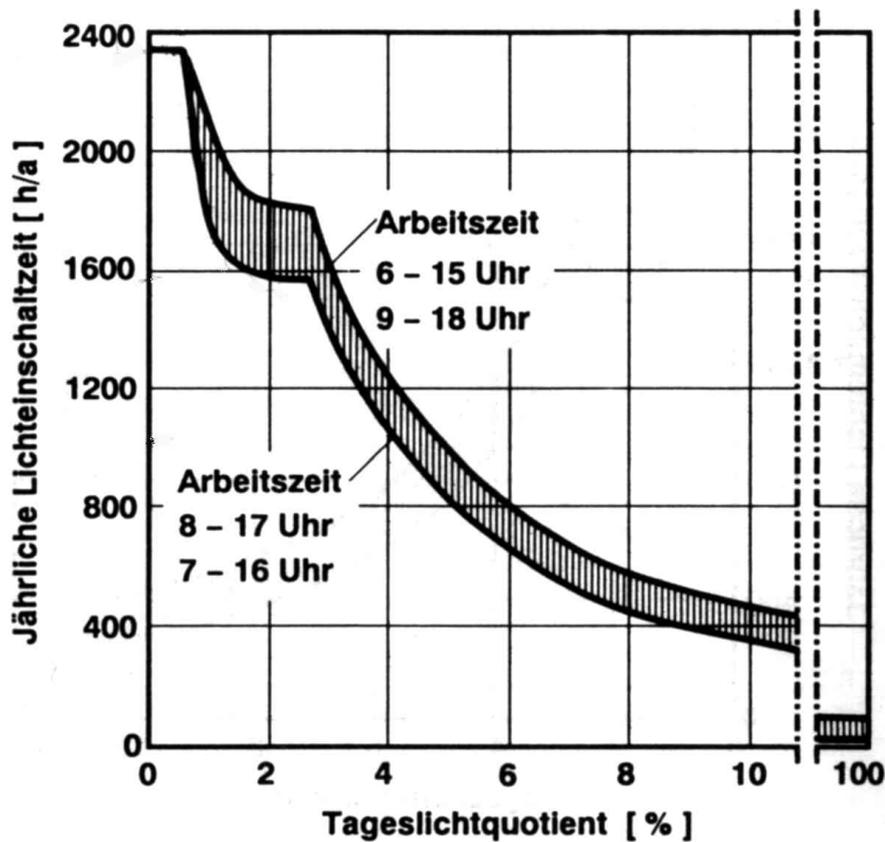


Abbildung 3.4: Einschaltzeit in Abhängigkeit des Tageslichtquotienten und der täglichen Arbeitszeit nach Szerman [SZER1996b]

Statt der jährlichen Nutzungszeit nach DIN 5034 wird von Szerman die jährliche Einschaltzeit künstlicher Beleuchtung eingeführt. Unterschieden wird zwischen dem Tageslichtquotientengrenzwert für klaren D_I und bedeckten Himmel D_{II} (siehe Abbildung 3.3).

$$D_I \approx \frac{E_N}{E_{max,kH}} \quad (3.10)$$

$$D_{II} = \frac{E_N}{E_{max,bH}} \quad (3.11)$$

Wenn diese Tageslichtquotientengrenzwerte überschritten werden, ermittelt sich daraus die Einschaltzeit der künstlichen Beleuchtung. Die Zeiten, in denen die künstliche Beleuchtung aufgrund der Tageslichtnutzung gedimmt werden kann, können mit dem vereinfachten Verfahren nicht berechnet werden. Hierzu ist das aufwendigere Verfahren zu

verwenden [SZER1994a]. Mit dem vereinfachten Verfahren zur Ermittlung der jährlichen Lichteinschaltzeit, stellt Szerman in [SZER1996b] ein Instrument zur Verfügung, das anhand von Diagrammen für unterschiedliche Nennbeleuchtungsstärken, Klimazonen oder unterschiedliche Arbeitszeiten (siehe Abbildung 3.4) die Ermittlung der Lichteinschaltzeiten in Abhängigkeit des Tageslichtquotienten ermöglicht. Eine Kombination der unterschiedlichen Parameter (Klimazone, Beleuchtungsstärke und Arbeitszeit) ist jedoch nicht möglich. Die Unzulänglichkeiten des Tageslichtquotienten werden bei diesem Verfahren bewusst in Kauf genommen. Darüber hinaus ist auch mit diesem Verfahren keine direkte Aussage über den Energieverbrauch möglich. Dazu sind weitere Berechnungen seitens des Anwenders durchzuführen.

3.4 Kunstlicht-Einschaltzeiten

In [HEIB1998] werden verschiedene Rechenverfahren zur Abschätzung der Einschaltzeit künstlicher Beleuchtung verglichen. Verglichen werden hierbei die jährliche Nutzungszeit nach DIN 5034 [DIN5034.3], das Verfahren zur Bestimmung der Einschaltzeit nach Szerman [SZER1994a] sowie das alte und neue Verfahren nach Hauser [HAUS1983] und [HAUS1998]. Aufgrund unterschiedlicher Ansätze zur Berechnung der zugrunde liegenden Beleuchtungsstärken, der Trübungsfaktoren und Tageslichtquotienten variieren die Einschaltzeiten der künstlichen Beleuchtung in Abhängigkeit des Fensterflächenanteils teilweise deutlich (siehe Abbildung 3.5). Der qualitative Verlauf ist jedoch bei allen Rechnungen ähnlich. Eine anschließende Parameterstudie untersucht den Einfluss verschiedener Größen auf die Einschaltzeit. Die Einschaltzeit auf der Ordinate wird stets als Funktion des Fensterflächenanteils, dargestellt auf der Abszisse, und eines dritten Parameters angegeben. Der Fensterflächenanteil wird jedoch nie die dort angegebenen Extrema annehmen, da nach [DIN5034.1] die durchsichtigen Flächen der Fenster mindestens 30% des Produktes aus Raumbreite und Raumhöhe betragen müssen und aus baulichen Gründen der Fensteranteil nur selten den Wert 100% annehmen wird.

Zur Berücksichtigung aller gleichzeitig auftretenden Parameter werden in [HAUS1998] Polynome aufgestellt, die die einzelnen Parameter durch unterschiedliche Exponenten berücksichtigen. Die Polynome sind allerdings nicht allgemeingültig und variieren je nach Regelstrategie (Index R) und Fensterhöhe (Index F). Beispielhaft ist ein Polynom mit der Kenngröße $X_{R,F}$ für eine ideale Regelung und Fenster ab Brüstung angegeben:

$$X_{R,F} = k_1 \cdot k_2 \cdot \tau_{D65}^{2,2} \cdot f_F^{1,2} \cdot h_R^{1,8} \cdot t_R^{-2,7} \cdot b_R^{0,39} \cdot E_N^{-1,44} \cdot \varrho_W^{0,42} \quad (3.12)$$

Diese Polynome können allerdings ebenfalls nicht manuell berechnet werden und sind durch die zahlreichen Exponenten in der Praxis relativ fehleranfällig. Anhand dieser Polynome und je nach Regelstrategie unterschiedlicher Koeffizienten kann die Einschaltzeit

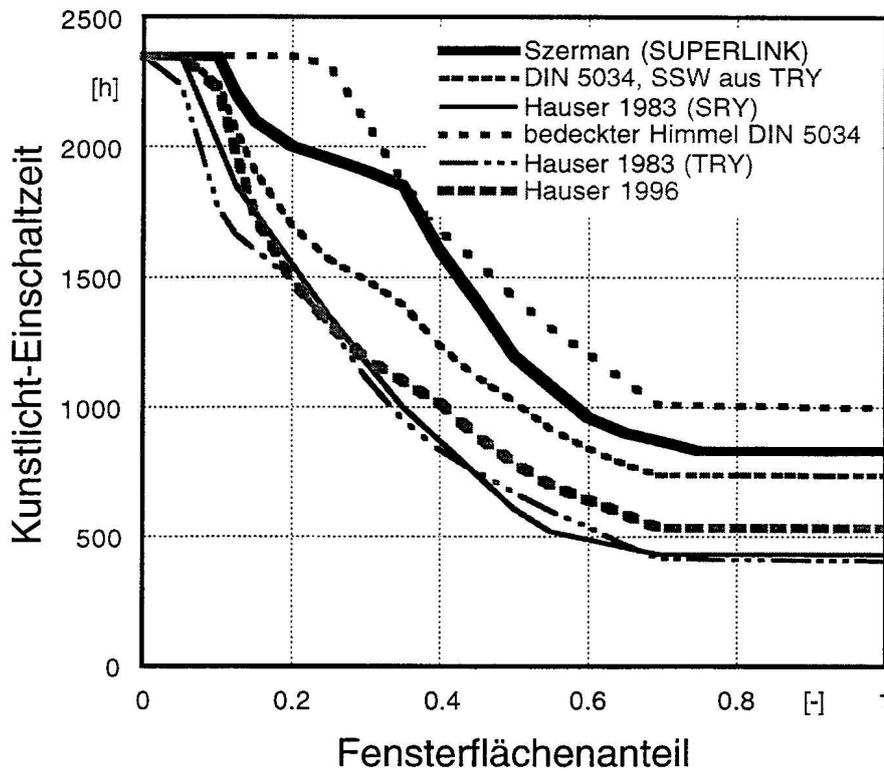


Abbildung 3.5: Vergleich der Einschaltzeiten verschiedener Verfahren in [HEIB1998]

der künstlichen Beleuchtung t_k berechnet werden (siehe auch Abbildung 3.6):

$$t_k = \frac{1}{a_1 X_{R,F} + a_2} + a_3 \quad (3.13)$$

Zur Berücksichtigung der Verbauung und der Orientierung sind darüber hinaus noch zusätzliche Korrekturfaktoren notwendig. Anhand der Gleichungen 3.12 und 3.13 wird deutlich, dass mit diesem vereinfachten Berechnungsverfahren weder eine allgemeingültige Berechnung zur Verfügung steht, noch ein einfaches Planungshilfsmittel, das in der Praxis Verwendung finden kann. Darüber hinaus sind zur Ermittlung des Energieverbrauchs ebenfalls weitere Berechnungen seitens des Anwenders erforderlich.

3.5 Nutzbelichtung nach Aydinli

Sämtliche bislang vorgestellten Berechnungsverfahren ermöglichen lediglich die Ermittlung einer Nutzungs- bzw. Einschaltzeit, die nur für eine tageslichtabhängige Ein- und

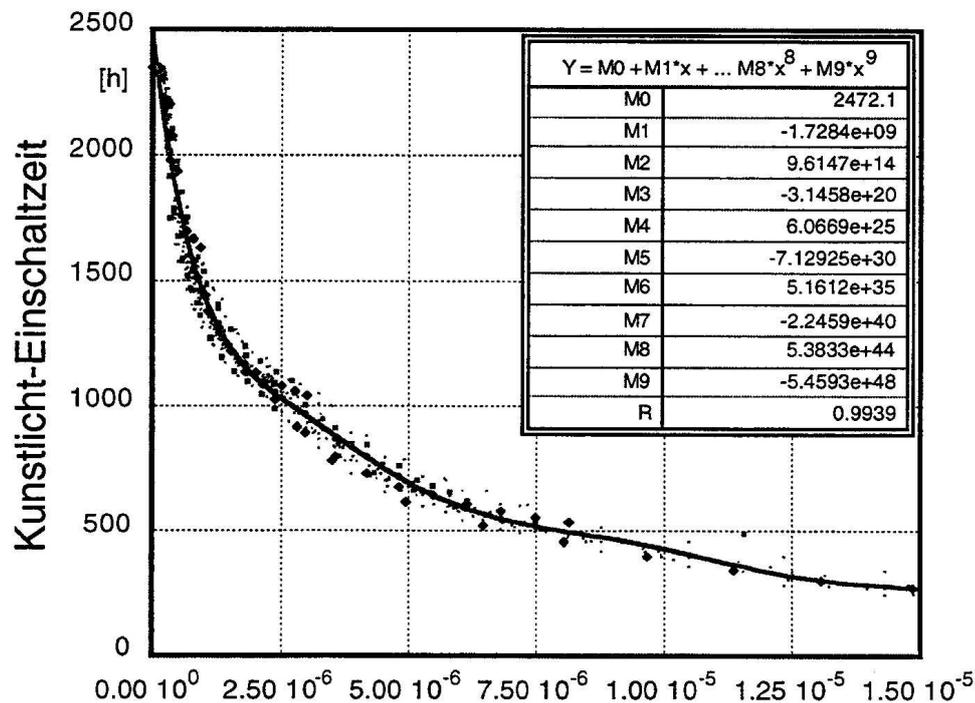


Abbildung 3.6: Einschaltzeit in Abhängigkeit von der Kenngröße $X_{R,F}$ für ideale Regelung und Fensteranordnung ab Brüstung [HAUS1998]

Ausschaltung der künstlichen Beleuchtung sinnvoll ist. Dies ist allerdings längst nicht mehr Stand der Technik. Bereits in [AYDI1984a] wurde von Aydinli aus diesem Grund der Begriff der Belichtung eingeführt, der eine Quantifizierung der Tageslichtnutzung auch bei einer gedimmten Beleuchtung ermöglicht. In [AYDI1984b] wurde dann der Begriff der Nutzbelichtung präzisiert. Die jährliche Nutzbelichtung $H_{Nutz,a}$ bezeichnet den durch Tageslicht bereitgestellten Anteil der jährlichen Belichtung $H_{erf,a}$, die für eine definierte Tätigkeit erforderlich ist. In [LANG1998] finden sich die Gleichungen zur Berechnung der Nutzbelichtung aus den Beleuchtungsstärken an einem Punkt bei mittlerem Himmel, basierend auf der Rechnung nach [DIN5034.3]. Analog zur Berechnung der jährlichen Nutzungszeit wird nach Zeitintervallen mit Besonnung ($\Delta T \cdot SSW$) und ohne Besonnung ($\Delta T \cdot (1 - SSW)$) unterschieden. Da Tageslicht nicht gespeichert werden kann, kann die Beleuchtungsstärke im Raum, erzeugt durch Tageslicht nicht durch Kunstlicht, in einem definierten Zeitintervall E_T maximal die Nennbeleuchtungsstärke E_N annehmen, andernfalls die Beleuchtungsstärke an einem Punkt bei mittlerem Himmel $E_{P,m}$, d. h.:

$$E_T = \begin{cases} E_N & : E_{P,m} \geq E_N \\ E_{P,m} & : E_{P,m} < E_N \end{cases} \quad (3.14)$$

Die Nutzbelichtung H_{Nutz} ist dann das Produkt aus der Beleuchtungsstärke in einem

Zeitintervall E_T und dem Zeitintervall, unterschieden nach Zeitintervallen mit Besonnung (H_{Nutz}) und ohne Besonnung (H_{Nutz}^*):

$$H_{Nutz} = E_T \cdot \Delta T \cdot SSW \quad (3.15)$$

Die jährliche Nutzbelichtung $H_{Nutz,a}$ wird dann analog zur jährlichen Nutzungszeit über die Arbeitstage aller Monate N_i vom Zeitpunkt des Arbeitsbeginn T_A bis zum Zeitpunkt des Arbeitsendes T_E summiert:

$$H_{Nutz,a} = \sum_{i=1}^{12} \left[N_i \cdot \sum_{t=T_A}^{T_E} (H_{Nutz} + H_{Nutz}^*) \right] \quad (3.16)$$

Die erforderliche jährliche Belichtung für eine bestimmte Tätigkeit, durch künstliche Beleuchtung und/oder Tageslicht, $H_{erf,a}$ ist das Produkt der Nennbeleuchtungsstärke und der jährlichen Arbeitszeit, analog zur Definition nach [DIN5031.3]:

$$H_{erf,a} = E_N \cdot N_a \cdot t_d \quad (3.17)$$

Das Verhältnis jährliche Nutzbelichtung zu erforderlicher jährlicher Belichtung ist dann die relative jährliche Nutzbelichtung $H_{Nutz,a,rel}$:

$$H_{Nutz,a,rel} = \frac{H_{Nutz,a}}{H_{erf,a}} \cdot 100\% \quad (3.18)$$

Die Nutzbelichtung eignet sich im Gegensatz zu den anderen Verfahren auch für gedimmte Beleuchtungsanlagen, basiert jedoch in der dargestellten Form auf dem Berechnungsverfahren der DIN 5034 mit den Einschränkungen, die bereits in Abschnitt 3.2 ausführlich dargestellt wurden. Die resultierende Energieeinsparung berechnet sich nach [KROC1989] zu:

$$\Delta E = P_{max} \cdot t_a \frac{H_{Nutz,a}}{H_{erf,a}} \quad (3.19)$$

In Gleichung 3.19 wird allerdings nicht berücksichtigt, dass im gedimmten Zustand der Anteil der Verlustleistung an der gesamten Systemleistung zunimmt.

3.6 Raumpotenzial und Systempotenzial

In [EHLI1996] wird die potenzielle Energieeinsparung als Produkt aus Raum- und Systempotenzial definiert. Die einzelnen Faktoren sind in Tabelle 3.2 aufgelistet.

Raumpotenzial	Systempotenzial
geographische Position	tageslichtabhängige Tageslichtkontrolle
meteorologische Daten	tageslichtabhängiges Schalten
Orientierung der Räume	tageslichtabhängiges Dimmen
Reflexionseigenschaften	raumtiefenabhängiges Dimmen
Raumgeometrie	Beleuchtungsanlage
Fenstergröße	
Verbauung	
Nutzer	
Beleuchtungsniveau	
Eigenschaften des Tageslichtsystems	

Tabelle 3.2: Einflussfaktoren des Raum- und Systempotenzials [EHLI1997]

Das Raumpotenzial RP entspricht der relativen jährlichen Nutzbelichtung (siehe auch Abschnitt 3.5). Das Systempotenzial SP ist die Summe des Tageslichtanteils der Beleuchtungsstärke χ über alle Sensoren (siehe Gleichung 3.21) [KNOO1997].

$$\chi(t) = \begin{cases} \frac{E_N - E_T}{E_k} & : E_T < E_N \quad \text{und} \quad (E_N - E_T) < E_k \\ \frac{E_N - E_k}{E_N} & : E_T \geq E_N \end{cases} \quad (3.20)$$

$$SP = \frac{100\%}{n_{Sensor}} \sum_{n_{Sensor}} \frac{1}{t_M} \int_{t_M} \chi(t) dt \quad (3.21)$$

Berücksichtigt wird jedoch nicht die abnehmende Lichtausbeute mit abnehmender Leistungsaufnahme. Das Systempotenzial stellt deshalb in erster Linie ein qualitatives Bewertungsinstrument für unterschiedliche Beleuchtungskontrollsysteme dar.

3.7 Einschaltwahrscheinlichkeit nach Hunt

Hunt hat in umfangreichen Studien mittels Zeitrafferaufnahmen das Einschaltverhalten künstlicher Beleuchtung in Schulräumen und Großraumbüros untersucht [HUNT1979b]. Ergebnis dieser Studien sind Korrelationen zwischen der Einschaltwahrscheinlichkeit und der Beleuchtungsstärke für unterschiedliche Raumtypen (siehe Abbildung 3.7). Hunt hat festgestellt, dass die Beleuchtung eingeschaltet wird, wenn am Arbeitsplatz ein bestimmter Minimalwert der Beleuchtungsstärke unterschritten wird. Für Großraumbüros ist die minimale Beleuchtungsstärke 50–60 lx, bei der 50 % der Nutzer die Beleuchtung einschalten. Dies entspricht einer mittleren Beleuchtungsstärke von 150–190 lx [HUNT1979b]. Basierend auf diesen Untersuchungen hat Hunt eine Funktion der Einschaltwahrscheinlich-

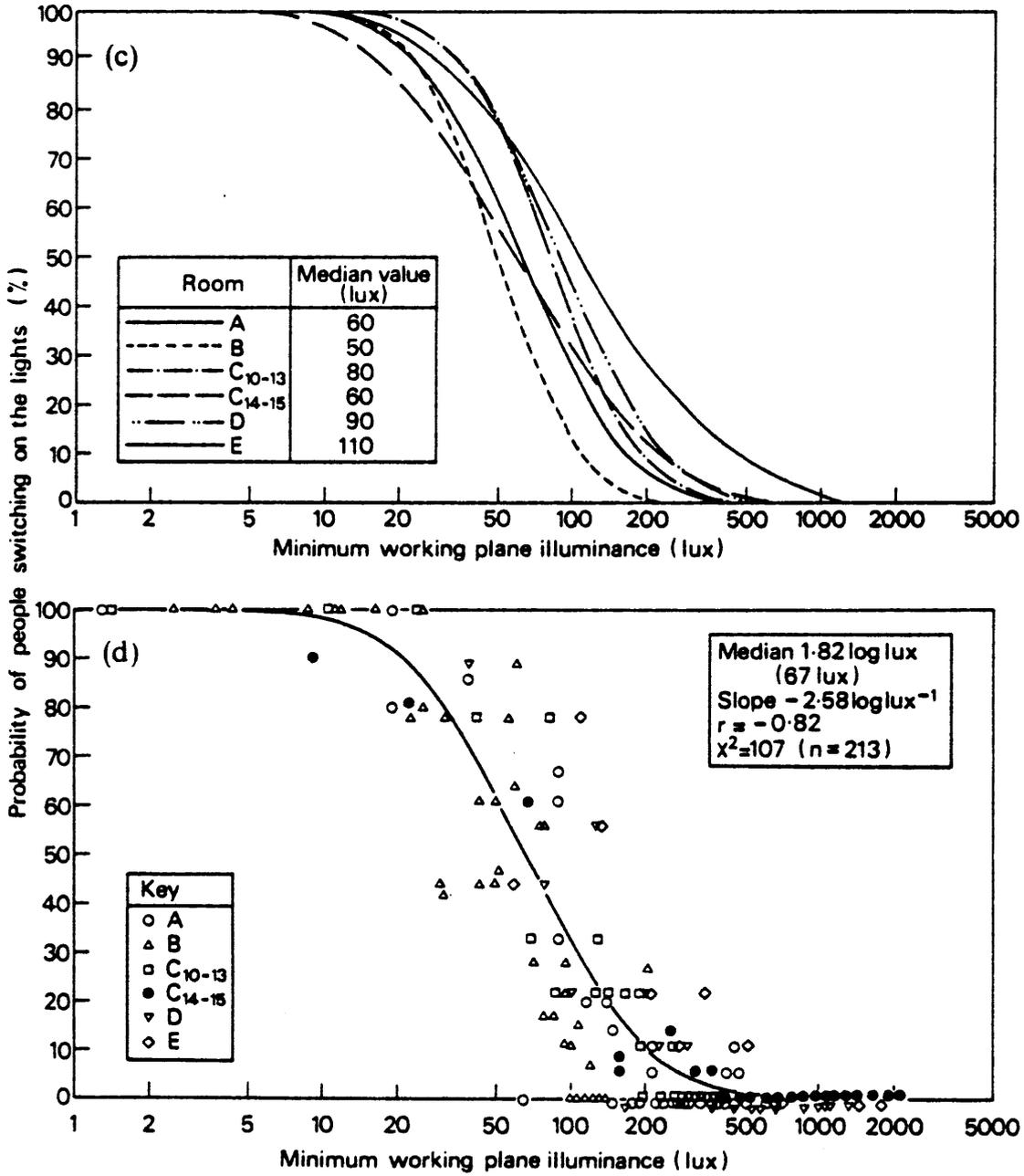


Abbildung 3.7: Einschaltwahrscheinlichkeit in Abhängigkeit der minimalen Beleuchtungsstärke am Arbeitsplatz, Messungen (c) und interpolierte Funktion (d) [HUNT1979b]

Orientierung	Faktor
Nord	0,77
Ost	1,04
Süd	1,20
West	1,00

Tabelle 3.3: Orientierungsfaktoren [HUNT1980]

keit w in Abhängigkeit der minimalen Beleuchtungsstärke formuliert [HUNT1980]:

$$w = -0,0175 + \frac{1,0361}{(1 + e^{(4,0835(\log E_{min} - 1,8223))})} \quad (3.22)$$

Die minimale Beleuchtungsstärke ist das Produkt aus der horizontalen Globalstrahlung I_G , dem photometrischen Strahlungsäquivalent für die Himmelsstrahlung k (125,4 lm/W [DIN5034.2]), dem minimalen Tageslichtquotienten D und einem Orientierungsfaktor f [HUNT1980]:

$$E_{min} = 0,6 I_G K D f \quad (3.23)$$

Die Orientierungsfaktoren sind in Tabelle 3.3 dargestellt.

Die Einschaltwahrscheinlichkeit nach Hunt benötigt wie die Berechnungen in den Abschnitten 3.3, 3.5 und 3.2.2 den Tageslichtquotienten. Direkte Aussagen über den Energieverbrauch ohne weitere Bilanzberechnungen sind mit der Einschaltwahrscheinlichkeit nicht möglich.

3.8 Energieverbrauch

Der Energieverbrauch für künstliche Beleuchtung ist das Produkt aus der Systemleistung P_{Sys} (Summe aus Verlustleistung P_{Verl} und Lampenleistung P_{La}) und der Zeit t :

$$E_k = (P_{La} + P_{Verl}) \cdot t \quad (3.24)$$

Eine Minimierung des Energieverbrauchs kann durch eine Minimierung eines Faktors erfolgen, wobei die Verlustleistung in der Regel konstant ist und die Lampenleistung durch die Steuerung beeinflusst wird. In [HUNT1977] sind einfache Gleichungen zur Abschätzung des Energieverbrauchs unter Berücksichtigung verschiedener Kontrollstrategien angeführt. Diese Gleichungen berücksichtigen allerdings nicht den Lichtstromrückgang aufgrund der Lampenalterung und werden deshalb nicht näher betrachtet.

3.8.1 Vergleichbarkeit des Energieverbrauchs

Problematisch bei Betrachtung von Angaben zu Energieverbräuchen oder Energieeinsparungen sind die häufig unterschiedlichen Randbedingungen. Bereits bei fehlender Angabe der zugrunde gelegten Bezugsfläche können deutliche Unterschiede auftreten [SIEB1997]. Um eine Vergleichbarkeit des Energieverbrauchs zu gewährleisten, müssen folgende Angaben vorliegen und Berücksichtigung finden:

- Fläche,
- Tätigkeit (Nennbeleuchtungsstärke),
- Arbeitszeit,
- Nutzerverhalten,
- Standort,
- Raumtyp (Großraumbüro, Kleinbüro, Halle, Flur, usw.),
- Art der Beleuchtungskontrolle,
- installierte Beleuchtungsanlage und
- Ausgangssituation (Referenz).

Theoretische Berechnungen bzw. Simulationsrechnungen bieten häufig eine bessere Vergleichbarkeit, da hier das Nutzerverhalten ausgeklammert werden kann und einige Parameter konstant bleiben. Dies erklärt allerdings ebenfalls mögliche Differenzen zu gemessenen Ergebnissen.

3.8.2 Energieeinsparung durch Beleuchtungskontrolle

In der Literatur finden sich unterschiedliche Angaben zur Energieeinsparung durch Beleuchtungskontrolle, die aufgrund nicht angegebener Randbedingungen bzw. unterschiedlicher Ausgangssituation nur einen eingeschränkten Vergleich erlauben. Einen Überblick über gemessene Einsparungen mit den jeweiligen Randbedingungen gibt Tabelle 3.4 wieder. Bei einer Kombination unterschiedlicher Optimierungsmaßnahmen bzw. Kontrollstrategien ist die gesamte Energieeinsparung höher als die der Einzelmaßnahmen jedoch prinzipiell nie identisch der Summe der Einzelmaßnahmen. Die potenzielle Energieeinsparung durch Tageslichtergänzung ist ebenfalls abhängig vom einfallenden Tageslichtes bedingt durch Lage und Verbauung [VERD1984].

Beleuchtungskontrolle bzw. Optimierungsmaßnahme	Raumtyp	E_N [lx]	Arbeitszeit	ΔE [%]	Quelle
zentrale Ausschaltung bei Pausen und Arbeitsende	Kleinbüro	-	-	20	[ZONN1996]
Sollwertanpassung	Großraumbüro	-	12 h/d	38–44	[RUBI1993]
Sollwertanpassung + Tageslichtergänzung	"	-	"	39–47	"
Tageslichtergänzung	Büro + Nebenflächen	450	-	25–50	[KLIN1994]
Präsenzmelder	Zeichensaal	-	-	22	[GUJE1996]
Präsenzmelder + Abschaltung bei Tageslicht	"	-	-	42	"
Zeitsteuerung	Großraumbüro + Nebenflächen	750	3.500 h/a	26	[VERD1984]
Kompensation des Lichtstromrückgangs	"	"	"	14	"
Sollwertanpassung	"	"	"	12	"
Tageslichtergänzung	"	"	"	50	"
Tageslichtergänzung + Kompensation	"	"	"	55	"
Tageslichtergänzung + Komp. + Sollwertanp.	"	"	"	72	"
Tageslichterg. + Komp. + Sollwertanp. + Zeitst.	"	"	"	60–72	"
Präsenzmelder	Großraumbüro + Nebenflächen	-	-	36	[JORD1992]
Erhöhung des Reflexionsgrads (dunkle in weiße Wände)	-	-	-	50	[SCHÄ1998]
Verringerung der Leuchtenhöhe	-	-	-	20	"

Tabelle 3.4: Energieeinsparung in Abhängigkeit unterschiedlicher Beleuchtungskontrollen bzw. Optimierungsmaßnahmen

3.8.3 Abweichungen zwischen Theorie und Praxis

Zwischen theoretisch berechneten Werten und praktisch gemessenen Energieverbräuchen bestehen häufig deutliche Unterschiede. Entscheidend sind dabei folgende Aspekte:

- Aufgrund der zeitlichen Varianz des verfügbaren Tageslichts und der vorhandenen Wolken geben die in theoretischen Berechnungen zugrunde gelegten meteorologischen Daten die Wirklichkeit oftmals nur unzureichend wieder.
- Die Beleuchtungskontrollsysteme schalten häufig erst bei höheren Schwellwerten als die Nennbeleuchtungsstärke, um störende häufige Schaltfrequenzen zu vermeiden (siehe auch Abbildung 2.7).
- Das Nutzerverhalten kann sowohl zu höheren als zu niedrigeren Verbräuchen führen.

Wie in Abschnitt 3.7 gezeigt, schalten Nutzer in Großraumbüros erst bei Unterschreiten einer mittleren Beleuchtungsstärke von 150–190 lx die künstliche Beleuchtung wieder ein und können somit den Energieverbrauch deutlich reduzieren. Untersuchungen zeigen jedoch auch, dass gerade bei einer Belegung von mehr als einer Person pro Büro die Beleuchtung nicht mehr ausgeschaltet wird, da sich keiner verantwortlich fühlt bzw. keiner den anderen Personen die Beleuchtungssituation verschlechtern möchte [HUNT1979b]. Häufig wird die Beleuchtung unmittelbar zu Arbeitsbeginn eingeschaltet und dann erst wieder zur Mittagspause oder bei Beendigung der Arbeit ausgeschaltet.

3.9 Simulationsprogramme

Computergestützte Berechnungs- und Simulationsprogramme ermöglichen einfache Auslegungen bis hin zu photorealistischen Visualisierungen der Beleuchtung. Darunter befinden sich firmenspezifische Auslegungsprogramme, die häufig nur die eigenen Produkte beinhalten und dessen Algorithmen seitens des Anwenders nicht verifiziert werden können. Andererseits existieren aufwendigere Simulationsprogramme, die neben der Berechnung lichttechnischer Daten darüber hinaus eine photorealistische Darstellung der Beleuchtungssituation bieten, die dem Planer als frühzeitige Entscheidungshilfe in der Entwurfsphase dient [REIN1999]. Die meisten Simulationsprogramme verwenden entweder die Himmelsmodelle der CIE oder das Modell von Perez, welches anhand stündlicher Daten der Direkt- und Globalstrahlung sowie der Taupunkttemperatur die direkten und diffusen Beleuchtungsstärken berechnet [PERE1990]. Hinsichtlich der Bewertung der Genauigkeit von Computerprogrammen existieren bis heute keine Kriterien. Selbst bei einfachen Problemstellungen (kubusförmiger Raum mit einer homogenen Lichtquelle) können bereits deutliche Abweichungen bis zu 12% auftreten. Entscheidend ist hier jedoch nicht alleine das eingesetzte Programm, sondern die Sorgfalt und Erfahrungen des Anwenders. Vielfach sind die Eingangsparameter nur ungenügend exakt definiert oder gänzlich unbekannt [KOKO2000]. An dieser Stelle kann und soll kein kompletter Überblick über sämtliche Computerprogramme gegeben werden. Es werden nur exemplarisch Programme aufgeführt, die zur Validierung eigener Berechnungen verwendet werden, sowie Verweise zu weiteren Quellen. Dargestellt werden nur Programme, die den Einfluss des Tageslichts auf die Innenraumbeleuchtung berücksichtigen. Im Rahmen des internationalen Forschungsprogramms IEA Task 21 „Daylight in Buildings“ wurden das Simulationsprogramm Adeline 3 weiterentwickelt sowie verschiedene Werkzeuge zur Auslegung von Gebäuden mit Tageslichtnutzung untersucht [BOER1998]. Darunter finden sich Normen, Tabellen, Diagramme, Nomogramme und einfache Computerprogramme, die hauptsächlich nur Überschlagswerte oder Lösungen für Teilprobleme bereitstellen. Hier sind auch Berechnungstabellen der DIN 5034 sowie das in Abschnitt 3.2.3 beschriebene vereinfachte Verfahren zur Ermittlung des Tageslichtquotienten mit Hilfe des Himmelslichtdiagramms aufgeführt. Diese gut strukturierte Übersicht hilft bei der Suche nach

Planungswerkzeugen für spezielle Probleme, nicht jedoch für allgemeingültige Lösungen. Einige der Computerprogramme werden im Folgenden näher erläutert.

3.9.1 Lesodial

Lesodial ist ein aus der Schweiz stammendes Programm, welches ohne besondere Vorkenntnisse eingesetzt werden kann. Entwickelt als Lehrwerkzeug für Studierende der Architektur liefert es qualitative und quantitative Aussagen beim Entwurf von Räumen mit Tageslichtnutzung [PAUL1995]. Vorteile sind die kurze Einarbeitungszeit, die schnellen Ergebnisse und gewichtete Hinweise zur Verbesserung des Entwurfs. Allerdings eignet sich das Programm aufgrund beschränkter Eingabemöglichkeiten und weniger Grundrissformen sowie fehlender Eingriffsmöglichkeiten nicht für alle Aufgabenstellungen. Für den Einsatz in der Lehre ist es jedoch gut geeignet.

3.9.2 Relux

Das Programm Relux erlaubt die Berechnung von künstlicher Beleuchtung sowie Tageslichtbeleuchtung in Innenräumen. Es bedient sich dabei des Radiosity-Verfahrens [CARR1999]. Die Tageslichtbeleuchtung ist auf den diffusen Himmel beschränkt. Berechnung mit direkter Sonneneinstrahlung sind laut Aussagen der Entwickler fehlerhaft [DEBA1998]. Darüber hinaus bietet das Programm die Kopplung künstlicher Beleuchtung mit Tageslichtnutzung und daraus folgernd Aussagen bzgl. des Energieeinsparpotenzials. Hier stehen grafische und tabellarische Ergebnisse zur Verfügung, die die prozentuale Einsparung des Energieverbrauchs künstlicher Beleuchtung durch Tageslichtnutzung angeben. Je nach Projekt und gewünschter Genauigkeit steigt die Rechenzeit. Fehlerhafte Eingaben können somit zeit- und rechenaufwendige Verzögerungen der Berechnungsergebnisse bewirken. Aufgrund der zahlreichen Einstellungs- und Variationsmöglichkeiten ist eine Einarbeitungszeit und ein erfahrener Anwender erforderlich, um richtige und genaue Ergebnisse zu erhalten.

3.9.3 Radiance und Adeline

Radiance ist ein kostenlose Software, bestehend aus diversen Programmen zur Berechnung der Leuchtdichten, Bestrahlungsstärken, Beleuchtungsstärken sowie zur photorealistischen Visualisierung der Beleuchtungssituation [LBNL1998]. Radiance verwendet das sogenannte „backward raytracing“, welches ausgehend vom Blickwinkel und Betrachterstandpunkt rekursiv die auftreffende Strahldichte berechnet. Damit übertrifft Radiance die Fähigkeiten anderer Programme, die eine diffuse Streucharakteristik zugrunde legen [ALTM2000]. Die Ergebnisse der Berechnungen mit Radiance wurden in verschiedenen

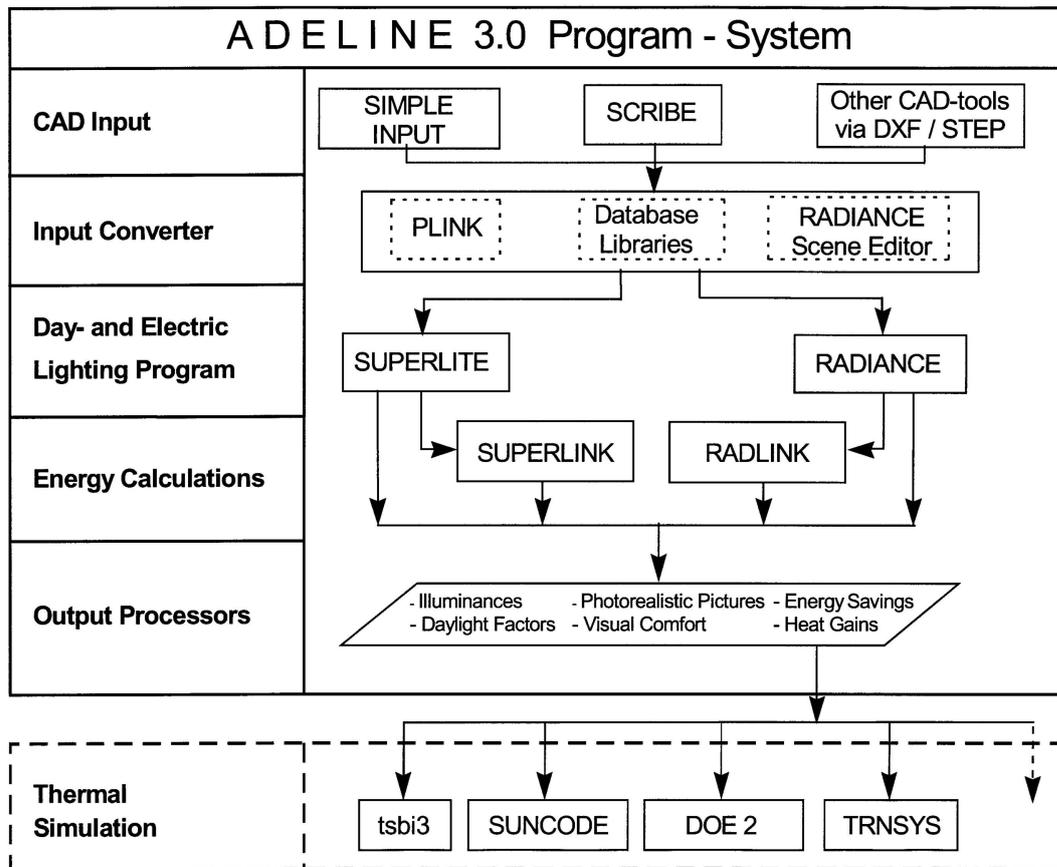


Abbildung 3.8: Programmmodule von Adeline 3 [ERHO1999]

Arbeiten validiert [FONT1999], [AIZL1997]. Einzelheiten zum Leistungsumfang, weiteren Möglichkeiten und Optionen von Radiance sind in [WARD1999], [ALTM2000] und [WARD1998] dargestellt. Radiance wird über Kommandozeilen bedient und ist daher insbesondere für Einsteiger schwierig zu bedienen und bedingt eine längere Einarbeitungszeit als Programme mit grafischen Oberflächen. Für Radiance gibt es ebenfalls einige grafische Oberflächen (Adeline, Rayfront, Siview, Desktop Radiance und rshow). Um alle Fähigkeiten von Radiance auszuschöpfen, muss der Anwender sich dennoch intensiver mit dem Programm und dessen Optionen beschäftigen. Adeline 3.0 (Advanced Daylighting and Electric Lighting Integrated New Environment) stellt ein Paket verschiedener Computerprogramme unter einer einheitlichen Oberfläche dar (siehe Abbildung 3.8).

Adeline bietet ebenfalls Schnittstellen zu den Programmen Superlink und Radlink zur Berechnung des Energieverbrauchs und thermischer Lasten künstlicher Beleuchtung. Die berechneten thermischen Lasten können dann in thermische Gebäudesimulationsprogramme übernommen werden (siehe Abbildung 3.8).

3.10 Mängel bisheriger Berechnungen und resultierende Anforderungen an ein alternatives Berechnungsverfahren

3.10.1 Mängel bisheriger Berechnungen

Die vorgestellten Berechnungsverfahren zeigen, dass zwar bereits zahlreiche Verfahren existieren, diese allerdings entweder keine allgemeingültigen Aussagen ermöglichen oder in der Praxis zu rechenaufwendig sind. Ebenso sind bei den meisten Verfahren noch weitere Berechnungen seitens des Anwenders erforderlich, die aus den berechneten Größen (Nutzungszeit, Einschaltzeit, Nutzbelichtung, Einschaltwahrscheinlichkeit) den Energieverbrauch der künstlichen Beleuchtung bei Tageslichtnutzung ermitteln. Computerprogramme haben alle den Nachteil, dass sie bei der Handhabung und der Eingabe zeitaufwendig sind und deshalb in der frühen Entwurfsphase nur selten eingesetzt werden. Zusammenfassend lassen sich folgende Mängel und Nachteile der vorgestellten Verfahren feststellen:

- Berechnungen nur für Ein-Aus-Schaltungen, nicht jedoch für gedimmte Beleuchtungsanlagen gültig (Abschnitte 3.2.2 und 3.3)
- zeit- bzw. rechenaufwendige Berechnungen notwendig (Abschnitte 3.2, 3.4, 3.9.2 und 3.9.3)
- Ermittlung des Energieverbrauchs erfordert weitere Berechnungen seitens des Anwenders (Abschnitte 3.2, 3.3, 3.4, 3.5 und 3.7)
- Einarbeitungszeit erforderlich (Abschnitt 3.9)
- Erfahrungen und detaillierte Kenntnisse seitens des Anwenders erforderlich, ansonsten besteht die Gefahr fehlerhafter Berechnungen (Abschnitt 3.9.3)
- keine allgemeingültigen Lösungen (Abschnitt 3.9)
- ungenaue Ergebnisse (Abschnitt 3.2.3)

3.10.2 Anforderungen an ein Berechnungsverfahren

Notwendig ist folglich ein Berechnungsverfahren zur Optimierung des Energieverbrauchs künstlicher Beleuchtung, das die relevanten Eingangsparameter berücksichtigt, keine zeitaufwendigen Berechnungen erfordert und einfach zu handhaben ist. Damit dieses Berechnungsverfahren ohne lange Einarbeitungszeiten, spezielle Hardware-Anforderungen und

weitere Hilfsmittel Verwendung findet, muss es anwendergerecht aufbereitet und dargeboten werden. Neben einfachen Berechnungsformeln oder Computerprogrammen, die auf Standardsoftware aufbauen, können ebenfalls grafische Werkzeuge diesen Zweck erfüllen. Basierend auf diesen Anforderungen und der zuvor konstatierten Mängel wird im folgenden Kapitel ein alternatives Berechnungsverfahren entwickelt.

4 Entwicklung eines Berechnungsverfahrens

Anhand der Ausführungen des vorangegangenen Kapitels wird deutlich, dass die existierenden Rechenvorschriften entweder nicht mehr zeitgemäße Ein-Aus-Schaltungen unterstützen, zu aufwendig sind oder nicht die mehrdimensionalen Problematik aufgrund der zahlreichen Einflussparameter berücksichtigen.

In diesem Kapitel wird deshalb nach einer Analyse und der Ermittlung geeigneter Eingangsparameter eine Lösung des mehrdimensionalen Problems formuliert und den existierenden Verfahren gegenübergestellt.

4.1 Ausgangsbasis und Randbedingungen der Berechnung

Als Grundlage zur Analyse potenzieller Einflussgrößen dient die Berechnung der Beleuchtungsstärke an einem Punkt bei mittlerem Himmel nach DIN 5034 (siehe auch Abschnitt 3.2) sowie die Berechnung der jährlichen Nutzbelichtung (siehe Abschnitt 3.5).

Die Berechnung wird beschränkt auf einen seitlich mit Tageslicht belichteten Büroraum mit Fenstern an einer Seite. Der Raum ist, ausgestattet mit zwei symmetrisch angeordneten Lichtbändern, in zwei Zonen unterteilt, an denen jeweils die Beleuchtungsstärke an einem Punkt berechnet wird, d. h. der Abstand des ersten Lichtbandes und Berechnungspunktes zum Fenster beträgt $1/4$ und der Abstand des zweiten Lichtbandes und Berechnungspunktes zum Fenster $3/4$ der Raumtiefe t (siehe Abbildung 4.1).

Zugrundegelegt wird ferner eine ideale proportionale Regelung, in der jedes Lichtband parallel zum Fenster separat geregelt wird. Diese in der Praxis nicht immer anzutreffende Situation wird bewusst als Idealzustand gewählt, um Energieeinsparpotenziale unter optimalen Bedingungen aufzeigen zu können.

Zur Ermittlung des Bedeckungsgrades werden die Wetterdaten des Testreferenzjahres des Standorts Essen verwendet. Da sich die in [DIN5034.2] tabellarisch aufgeführten Werte der Trübungsfaktoren T_L nach Linke [BAUE1959] für eine algorithmische Berechnung nicht eignen, werden die Trübungsfaktoren durch eine Sinusfunktion über das Jahr beschrieben, die eine gute Übereinstimmung mit den tabellarischen Werten zeigen (siehe Abbildung 4.2). Die Integrale zur Berechnung der Anteile des Tageslichtquotienten werden numerisch nach der Sehnen-Trapez-Regel mit 50 Stützstellen berechnet [FELD1989].

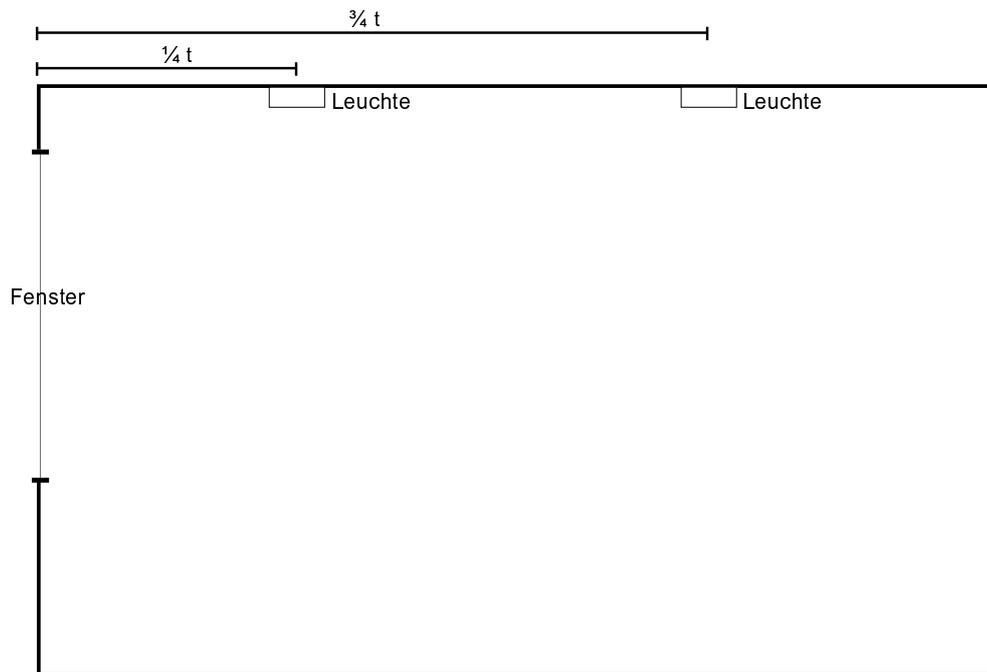


Abbildung 4.1: Querschnitt eines Raums mit zwei symmetrisch angeordneten Lichtbändern [LYNE1990]

Die von Aydinli in [AYDI1981] entwickelten Korrekturfaktoren R werden linear interpoliert.

Um eine Vergleichbarkeit der Berechnungen zu gewährleisten, wird angenommen, dass die Beleuchtung zu Arbeitsbeginn eingeschaltet und zum Ende der Arbeit wieder ausgeschaltet wird. In der Zeit der Mittagspause (1 Stunde) wird die Beleuchtung ebenfalls ausgeschaltet. Mit dieser fiktiven Bedienung wird der nicht kalkulierbare Faktor und die Fehlerquelle Mensch ausgeblendet, um die Ergebnisse objektiv analysieren zu können.

Dies ist erforderlich, da das Nutzerverhalten sowohl zu höheren als auch zu niedrigeren Energieverbräuchen führen kann (siehe Abschnitt 3.8.3).

Aus diesem Grunde wird auch keine Verschattungseinrichtung berücksichtigt, da die Vielzahl der Systeme, unterschiedliche Steuerungen und manuelle Eingriffe deutliche Unterschiede in den Energieverbräuchen bewirken [LEE1998] und objektive Vergleichsuntersuchungen nicht zulassen [SCHR1996]. Hier besteht noch erheblicher Forschungsbedarf.

Die Gleichungen zur Berechnung der erforderlichen jährlichen Belichtung $H_{erf,a}$ (3.17) und der jährlichen Nutzbelichtung $H_{Nutz,a}$ (3.16) wurden bereits im Abschnitt 3.5 hergeleitet. Dieser Berechnungsalgorithmus wird im Folgenden zur Analyse der Einflussgrößen benutzt.

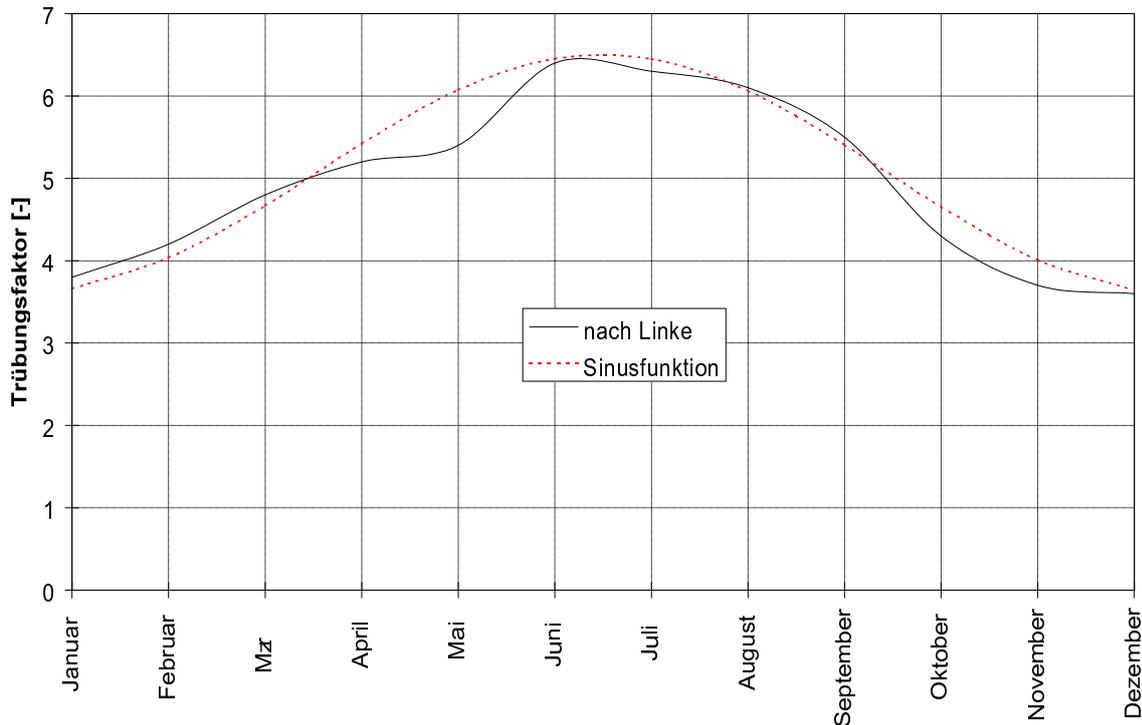


Abbildung 4.2: Trübungs faktoren aus [DIN5034.2] und Berechnung mit einer Sinusfunktion

4.1.1 Tageslichteinfluss

Zur Berücksichtigung der verschiedenen in [CIE1994] definierten Himmelszustände bei Berechnungen der Nutzbelichtung und des Energieverbrauchs wurde der mittlere Himmel eingeführt, der mit Hilfe örtlicher Sonnenscheinwahrscheinlichkeiten (SSW) den klaren und bedeckten Himmel statistisch abdeckt [AYDI1981] (siehe auch Abschnitt 2.3.1). Da der mittlere Himmel als Berechnungsgrundlage sowohl in der Berechnung nach [DIN5034.3] als auch in den Simulationsprogrammen Relux [RELU1999] und Superlink [HOPK2000] Verwendung findet, wird er ebenfalls bei der Analyse der Eingangsparameter für das entwickelte Berechnungsverfahren verwendet. Es wird in drei Fälle unterschieden [DIN5034.3]:

Fall A: für den Zeitraum $\Delta T \cdot SSW$, sofern die Fensterwand direkt besonnt werden kann, wird eine Sonnenschutz einrichtung benutzt, die einen konstanten Lichttransmissionsgrad im Bereich von 0,1 - 0,5 aufweist.

Fall B: für den Zeitraum $\Delta T \cdot SSW$, sofern die Fensterwand nicht direkt besonnt werden kann, wird keine Sonnenschutz einrichtung benutzt.

Fall C: für den Zeitraum $\Delta T \cdot (1 - SSW)$ wird keine Sonnenschutz einrichtung benutzt.

Durch die Annahme eines konstanten Transmissionsgrades der Sonnenschutzeinrichtung wird der Tageslichtanteil der Beleuchtungsstärke im Raum reduziert, so dass im ungünstigen Fall die künstliche Beleuchtung eingeschaltet werden muss, um die geforderte Nennbeleuchtungsstärke zu erzielen. Mit geeigneten Sonnen- und Blendschutzeinrichtungen [VDI6011] ist es möglich, im unteren Fensterbereich einen Blendschutz zu erzielen und im oberen Bereich direktes oder diffuses Tageslicht in die Raumtiefe zu lenken [LITT1990], [MÜLL1992], [KÖST2000]. Messungen haben gezeigt, dass dadurch die Beleuchtungsstärke im fensternahen Bereich reduziert und in der Raumtiefe erhöht wird [GUTJ1995]. Die Tageslichtlenkung wird in den meisten Rechenmethoden zur Ermittlung des Energieverbrauchs noch nicht berücksichtigt. Aufgrund des noch erheblichen Forschungsbedarfs wird es auch in dieser Arbeit nicht näher betrachtet.

Nach [DIN4710] beträgt die mittlere Sonnenscheinwahrscheinlichkeit in Deutschland 35%. Da selten alle Fassaden direkt nach Süden ausgerichtet sind bzw. evtl. vorhandene Verbauung ebenfalls eine direkte Besonnung der Fenster verhindert, reduziert sich die Wahrscheinlichkeit des Falles A weiter, so dass der Berechnungsfehler bei Annahme eines konstanten Lichttransmissionsgrades der Sonnenschutzeinrichtung gering ist.

Der Fehler wird allerdings größer, wenn der Sonnen- oder Blendschutz bei abnehmender Außenbeleuchtungsstärke nicht wieder entfernt wird [SKEL1999]. Um dies zu vermeiden, sollte die Regelung des Sonnenschutzes gewerkeübergreifend mit der Beleuchtungsregelung kombiniert werden. Dazu sind jedoch in der Regel Bussysteme oder der Einsatz einer Gebäudeleittechnik erforderlich. Die Optimierung dieser gewerkeübergreifenden Regelung erfordert ebenfalls noch erheblichen Forschungsbedarf.

4.2 Analyse und Ermittlung der Eingangsparameter

Durch Variation einzelner Parameter werden deren qualitative und quantitative Auswirkungen auf die Nutzbelichtung untersucht. Die Größen, die die Nutzbelichtung lediglich marginal beeinflussen, werden danach nicht näher betrachtet. Die Variablen, die hingegen deutlich die Werte der Nutzbelichtung verändern, werden ebenfalls auf eine gegenseitige Beeinflussung analysiert. Ziel ist die Aufstellung einer mehrdimensionalen Funktion zur vereinfachten Berechnung bei größtmöglicher Genauigkeit der Ergebnisse.

4.2.1 Raum- und Fensterabmessungen

Die zu untersuchenden Größen der Raum- und Fensterabmessungen sind die Raumbreite b , die Raumtiefe t , die Höhe h , die Fensterbreite b_F und die Fensterhöhe h_F .

Die Raumhöhe h_R hat nur geringe Auswirkungen auf die Nutzbelichtung, eine Änderung der Höhe um einen Meter bewirkt eine Änderung der Nutzbelichtung von ca. 1%.

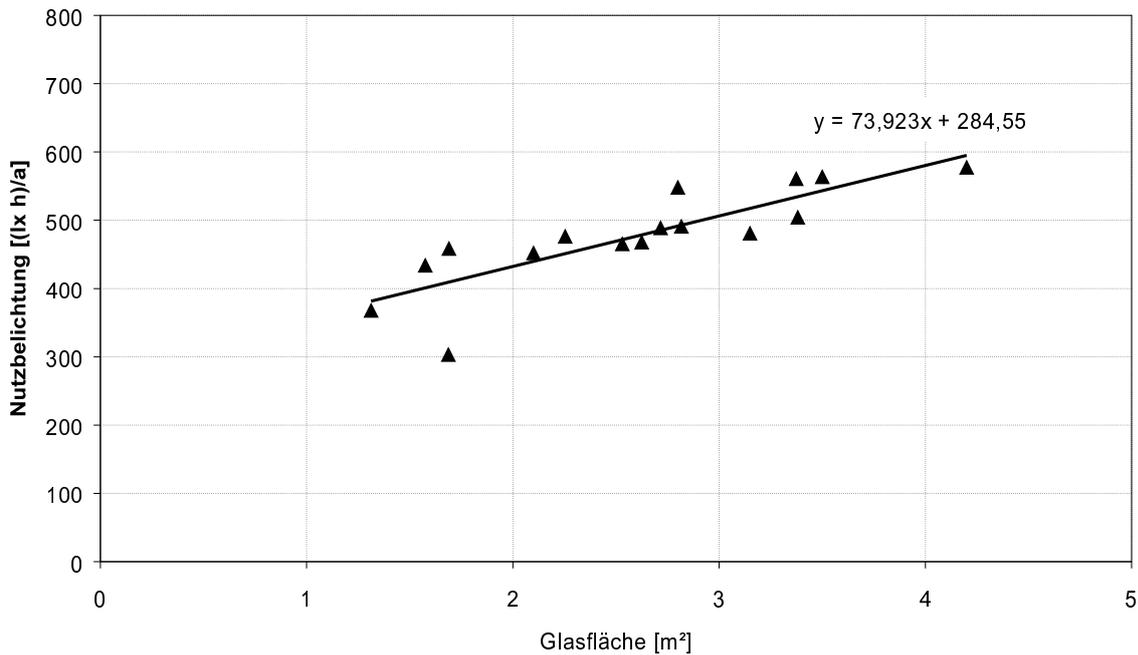


Abbildung 4.3: Nutzbelichtung in Abhängigkeit der Glasfläche

Eine Änderung der Fensterhöhe hingegen hat über die damit verbundene Änderung der Glasfläche A_G einen deutlichen Einfluss auf die Nutzbelichtung (siehe Abbildung 4.3). Bei gleichzeitiger Variation der Raumabmessungen wird jedoch ersichtlich, dass eine lineare bzw. polynomische Abhängigkeit der Nutzbelichtung von der Glasfläche oder dem Glasflächenanteil, wie sie beispielsweise in [HAUS1998] zu finden ist, nicht gegeben ist. Die Glasfläche A_G ist kleiner als die Rohbaumaße der Fensterfläche aufgrund der zu berücksichtigenden Versprossung (siehe auch Gleichung 4.1).

$$A_G = k_I \cdot A_F \quad (4.1)$$

Zu der Glasfläche muss deshalb ebenfalls die Raumfläche sowie das Verhältnis Raumtiefe zu Raumbreite in Verbindung gebracht werden. Idealerweise werden diese Größen so kombiniert, dass eine dimensionslose Kennzahl entsteht, die somit ebenfalls dimensionslose Koeffizienten erlaubt. Der dimensionslose Raumindex k , der im Wirkungsgradverfahren Anwendung findet, hat sich für die Nutzbelichtung als ungeeignet erwiesen, da in dieser Kennzahl keine Fensterabmessungen vorkommen. Nach verschiedenen Versuchen hat sich die im Folgenden dargestellte dimensionslose Kennzahl aus der Raumfläche A_R , der Glasfläche A_G sowie dem Verhältnis aus Raumtiefe und Raumbreite als geeignet erwiesen:

$$k_R = \frac{A_G}{A_R \cdot t/b} \quad (4.2)$$

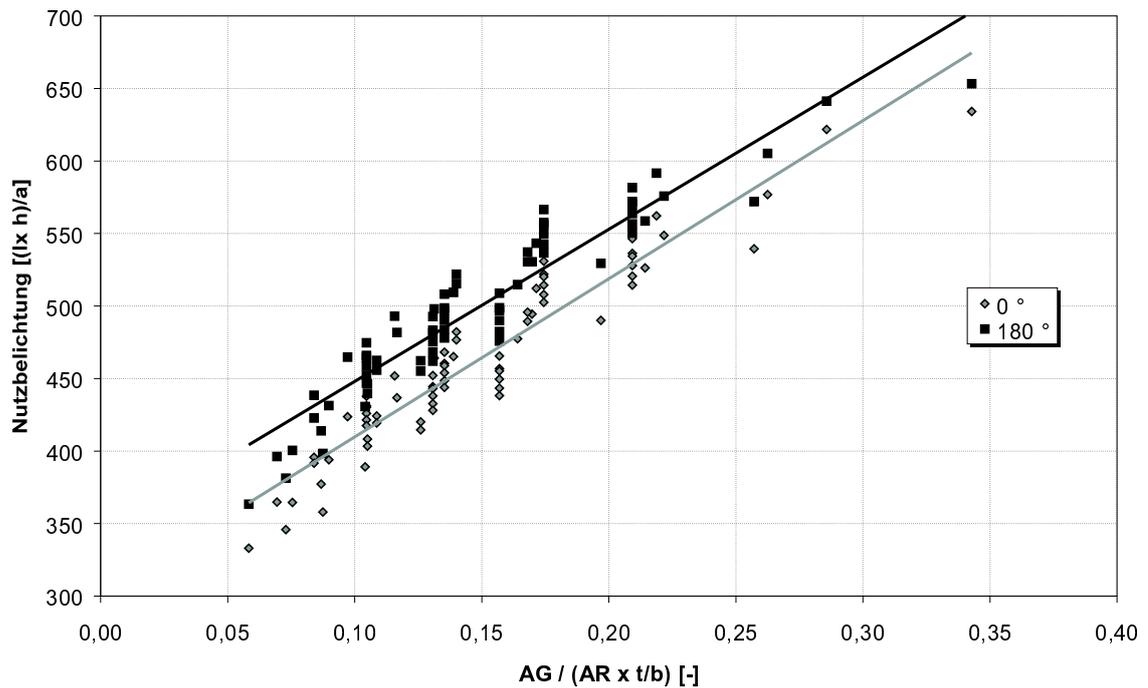


Abbildung 4.4: Nutzbelichtung in Abhängigkeit der dimensionslosen Raumgeometrie für Nord- und Südorientierung

Wie aus der Abbildung 4.4 deutlich wird, lässt sich ein linearer Zusammenhang aus der dimensionslosen Kennzahl der Raumgeometrie k_R nach Gleichung 4.2 und der Nutzbelichtung $H_{Nutz,a}$ herstellen.

Aus der Abbildung 4.4 wird allerdings ebenso ersichtlich, dass der lineare Zusammenhang von der Orientierung abhängig ist.

4.2.2 Orientierung

Wie bereits in Abbildung 4.4 deutlich wurde, hängt die Nutzbelichtung von der Orientierung ab. Bei alleiniger Betrachtung der Orientierung zeigt sich, dass die Nutzbelichtung sinusförmig mit der Orientierung variiert (siehe Abbildung 4.5). Die maximale Nutzbelichtung wird bei reiner Südorientierung $\alpha_F = 180^\circ$ erzielt. In Abbildung 4.5 wird ebenfalls offensichtlich, dass der Tageslichtquotient die Orientierung nicht berücksichtigt, was bereits in verschiedenen Arbeiten bemängelt wurde [VDI6011], [TREG1980], [LYNE1990].

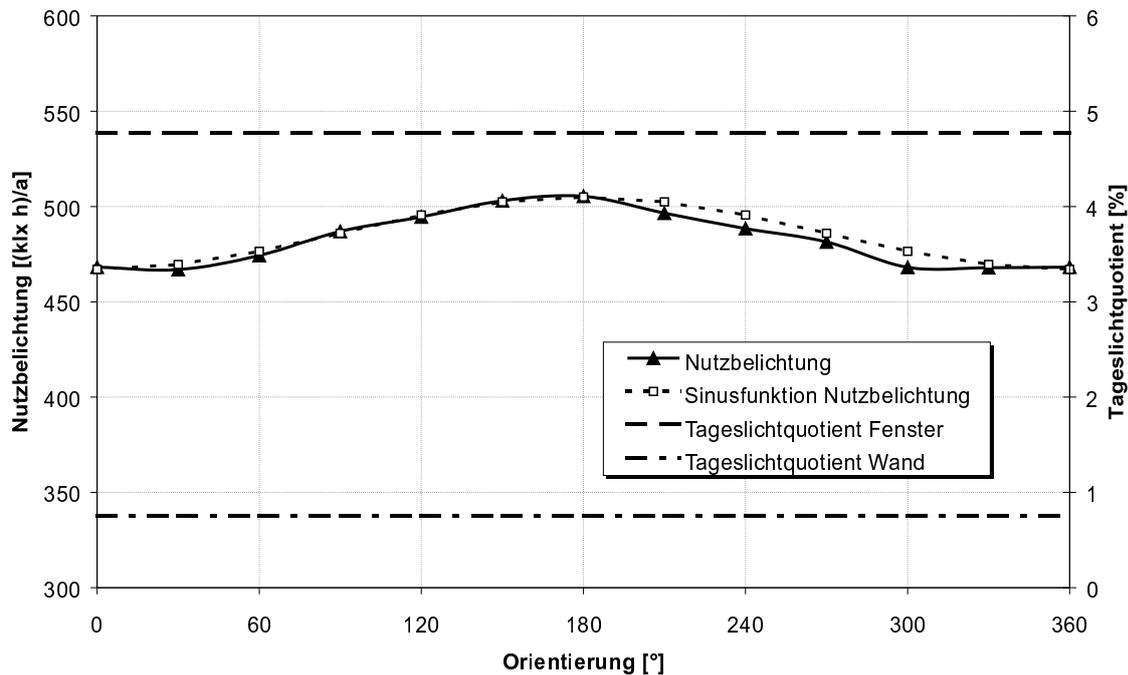


Abbildung 4.5: Nutzbelichtung und Tageslichtquotient in Abhängigkeit der Orientierung

4.2.3 Verbauung

Der Einfluss der Verbauung wird bestimmt durch die Höhe der Verbauung h_V , den Abstand zwischen Fenster und Verbauung t_V und den Reflexionsgrad der Verbauung ρ_V , der nach [DIN5034.1] zu 0,2 angenommen wird, wenn keine genauen Angaben vorliegen. Da der konkrete Reflexionsgrad häufig nur geschätzt werden kann bzw. im frühen Planungsstadium noch nicht bekannt ist, wird er nicht für Vergleiche herangezogen.

Der Einfluss der Verbauungsbreite kann vernachlässigt werden, da die Verbauungswinkel β_{Vl} und β_{Vr} nur im Außenreflexionsanteil des Tageslichtquotienten D_V Berücksichtigung finden ($D_{V,max} = 0,22$) und nur einen marginalen Einfluss auf die Nutzbelichtung haben. In der Berechnung wird ein Verbauungswinkel zu Grunde gelegt, der der Hälfte der Fensterbreite entspricht.

Aus der Höhe und dem Abstand berechnet sich der Verbauungshöhenwinkel ε_V zu:

$$\varepsilon_V = \arctan\left(\frac{h_V}{t_V}\right) \quad (4.3)$$

Ein Verbauungshöhenwinkel von $\varepsilon_V = 0$ bzw. eine Verbauungshöhe $h_V = 0$ ist gleichzusetzen mit einer nicht vorhandenen Verbauung. Die jährliche Nutzbelichtung nimmt quadratisch mit dem Verbauungswinkel ab (siehe Abbildung 4.6).

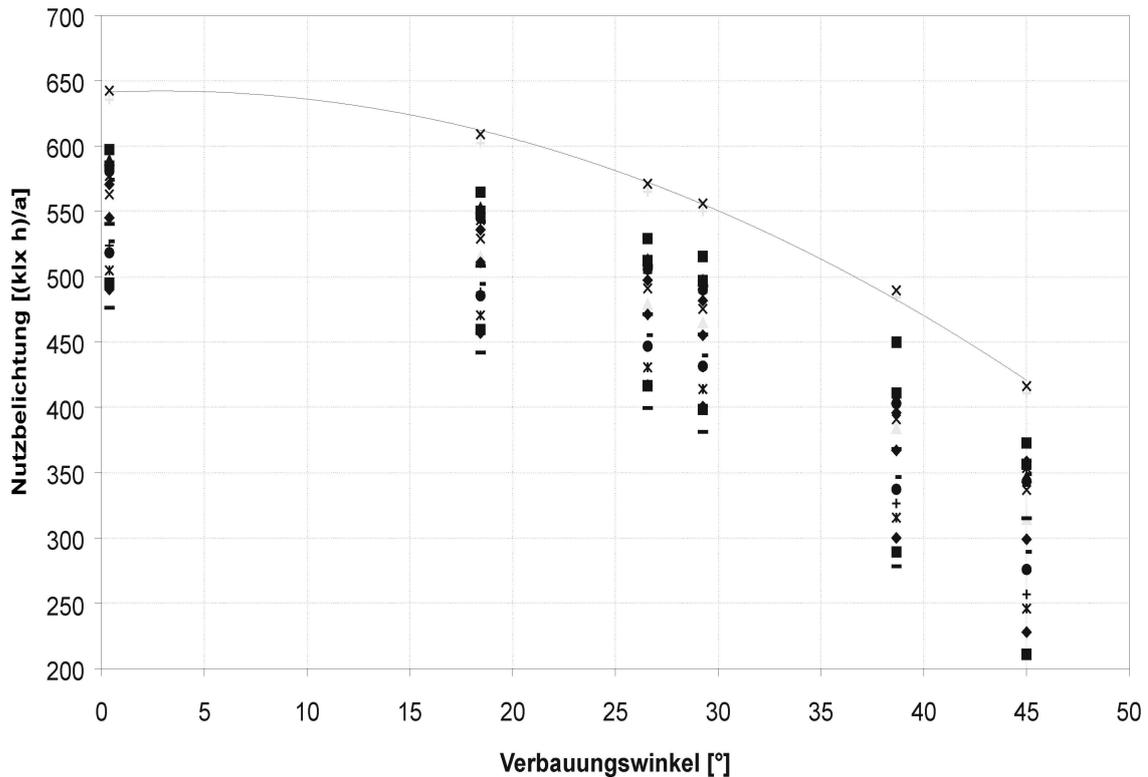


Abbildung 4.6: Nutzbelichtung in Abhängigkeit der Verbauungshöhenwinkel ε_V

4.2.4 Arbeitszeit pro Tag

In Deutschland beträgt die durchschnittliche tägliche Arbeitszeit t_d in einem Büro 8 Stunden, von 8 bis 17 Uhr, unterbrochen durch eine Mittagspause von 12 bis 13 Uhr. Eine Verlängerung der täglichen Arbeitszeit auf 9 bzw. 10 Stunden wird durch einen Arbeitsbeginn um 7 Uhr und/oder ein Arbeitsende um 18 Uhr erreicht. Geringfügige Fehler durch eine Verschiebung in die Morgen- oder Abendstunden werden hierbei vernachlässigt.

Die durchschnittlichen Arbeitstage pro Jahr abzüglich Urlaub und Feiertage betragen 220 Tage. Dieser Wert kann sich zwar je nach Personenbelegung oder Tätigkeit ändern, wird aber hier wegen der besseren Vergleichbarkeit nicht verändert.

Die Nutzbelichtung steigt linear mit der Arbeitszeit (siehe Abbildung 4.7).

Eine wechselseitige Abhängigkeit der Parameter Arbeitszeit und Orientierung ist nicht gegeben, da eine Verlängerung der Arbeitszeit nur in den Morgenstunden bzw. Abendstunden zu längerer Belichtung führt. Diese längere Belichtung ist bestimmt durch den Tagesgang der Sonne und nicht durch die Orientierung des Fensters. Ein nach Westen orientierter Raum wird bei einer längeren Arbeitszeit in den Abendstunden mehr Tageslicht erhalten und ein nach Osten orientierter Raum in den Morgenstunden. Bei Orientierung

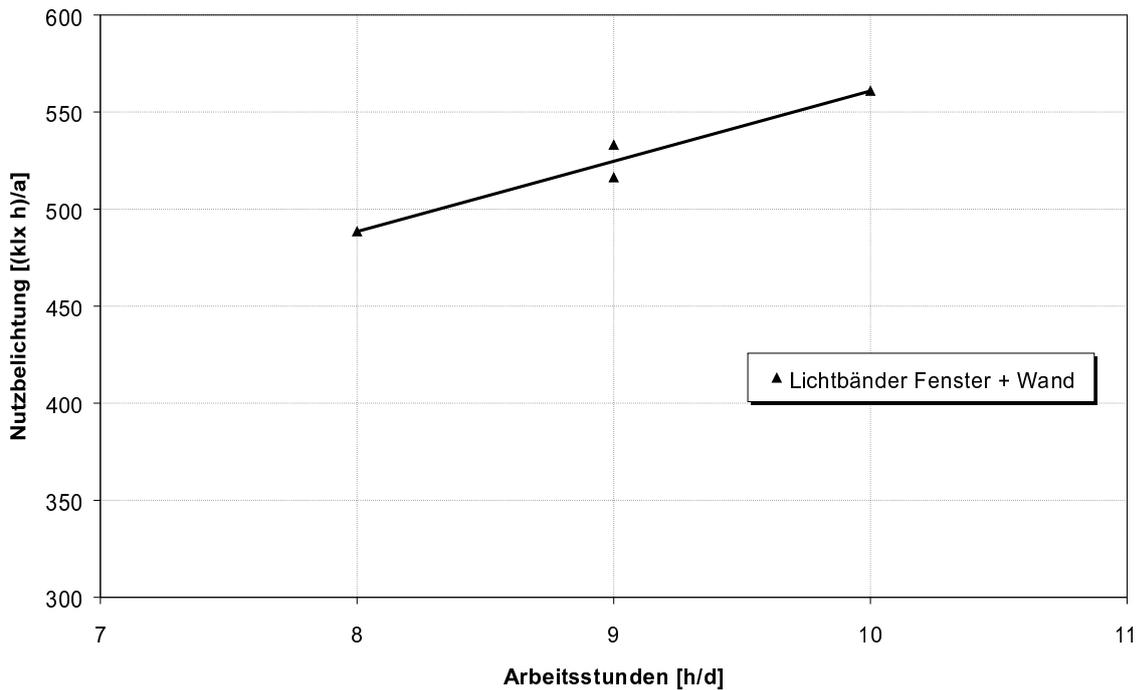


Abbildung 4.7: Nutzbelichtung in Abhängigkeit der täglichen Arbeitszeit; Unterschiede bei 9 h/d resultieren aus unterschiedlichem Arbeitsbeginn

nach Norden und Süden werden sich Änderungen in der Nutzbelichtung auf den Abend und den Morgen ungefähr gleichmäßig verteilen.

4.2.5 Reflexionsgrade

Die Variation der Reflexionsgrade der Umschließungsflächen ϱ_D , ϱ_W und ϱ_N beeinflusst alle auf die Nutzbelichtung einwirkenden Parameter. Deshalb wird ein Faktor gebildet, der die Auswirkung der Reflexionsgrade wiedergibt. Dazu wird ein mittlerer Reflexionsgrad ϱ_m gebildet, der die Anzahl nicht jedoch die Flächen der Umschließungsflächen berücksichtigt, da dadurch eine bessere Übereinstimmung festgestellt wurde:

$$\varrho_m = \frac{3\varrho_W + \varrho_D + \varrho_N}{5} \quad (4.4)$$

Der maximale mittlere Reflexionsgrad beträgt entsprechend der Raumwirkungsgradtabellen $\varrho_{m,max} = 0,7$. Das Verhältnis des berechneten mittleren Reflexionsgrades zum maximalen, mittleren Reflexionsgrad wird mit einem empirischen Faktor potenziert und bildet so den Faktor für die Nutzbelichtung F_ϱ :

$$F_{\varrho} = \left(\frac{\varrho_m}{\varrho_{m,max}} \right)^{f_{\varrho}} \quad (4.5)$$

4.2.6 Standort

Potenzielle Einflussgrößen bei unterschiedlichen Standorten sind vielfältig, z. B. die jährliche Sonnenscheindauer $t_{S,a}$, die geografische Breite φ , die geografische Länge λ und die Höhe des Ortes H sowie der Bedeckungsgrad nach [DIN4710] bzw. aus den Testreferenzjahren.

Die mittleren jährlichen Bedeckungsgrade verschiedener in [DIN4710] angegebenen Städte schwanken geringfügig zwischen 67 und 73%.

Bei den durchgeführten Analysen sind keine Tendenzen festgestellt worden, die sich eindeutig auf bestimmte Parameter zurückführen ließen. Deshalb wird in dieser Arbeit die Frage des Standorts nicht weiter betrachtet. Weitere Arbeiten müssen zu einem späteren Zeitpunkt die Einflüsse des Standorts untersuchen.

4.2.7 Nennbeleuchtungsstärke

Die Nennbeleuchtungsstärke E_N beeinflusst die erreichbare jährliche Nutzbelichtung, da per Definition die zur Berechnung der Nutzbelichtung verwendete Beleuchtungsstärke durch Tageslicht im Raum maximal die Nennbeleuchtungsstärke annehmen kann (siehe auch Gleichung 3.14).

Da die Nennbeleuchtungsstärke alle Parameter beeinflusst, wird ein Multiplikationsfaktor F_N gebildet, der sich wie folgt definiert:

$$F_N = \begin{cases} 0,72 & : E_N = 300 \text{ lx} \\ 1,00 & : E_N = 500 \text{ lx} \\ 1,25 & : E_N = 750 \text{ lx} \end{cases} \quad (4.6)$$

4.3 Aufstellung einer mehrdimensionalen Funktion

Anhand der Analyse der potenziellen Parameter und der entwickelten dimensionslosen Kennzahlen sowie aufgestellter Faktoren wird eine allgemeingültige, mehrdimensionale Funktion zur Berechnung der Nutzbelichtung aufgestellt [BRON1989]:

$$y = f(x_0, x_1, \dots, x_n) \quad (4.7)$$

Wie in Abschnitt 4.2.1 und 4.2.3 gezeigt, sind die Kennzahl der dimensionslosen Raumgeometrie k_R und der Verbauungshöhenwinkel ε_V von der Orientierung abhängig. Der Anteil der Nutzbelichtung, der von der Arbeitszeit beeinflusst wird, ist jedoch unabhängig von der Orientierung. Deshalb wird zunächst die Abhängigkeit der Orientierung formuliert:

$$H_{\text{Nutz},a,\text{Nord}} = f_{1,\text{Nord}} \cdot k_R + f_{2,\text{Nord}} + f_{3,\text{Nord}} \cdot \varepsilon_V^2 \quad (4.8)$$

$$H_{\text{Nutz},a,\text{Süd}} = f_{1,\text{Süd}} \cdot k_R + f_{2,\text{Süd}} + f_{3,\text{Süd}} \cdot \varepsilon_V^2 \quad (4.9)$$

Der Einfluss der Orientierung wird durch eine Cosinusfunktion beschrieben. Zur Bildung dieser speziellen aus der allgemeinen Cosinusgleichung 4.10 werden zunächst die Amplitude $A_{\text{Nord},\text{Süd}}$ der Cosinusfunktion und der Anfangswert H_0 aus den Formeln 4.8 und 4.9 berechnet.

$$y = A \cos(\omega \cdot \alpha) + y_0 \quad (4.10)$$

$$A_{\text{Nord},\text{Süd}} = \frac{f_{1,\text{Nord}} - f_{1,\text{Süd}}}{2} k_R + \frac{f_{2,\text{Nord}} - f_{2,\text{Süd}}}{2} + \frac{f_{3,\text{Nord}} - f_{3,\text{Süd}}}{2} \varepsilon_V^2 \quad (4.11)$$

$$\begin{aligned} H_{\text{Nutz},a,0} &= H_{\text{Nutz},a,\text{Süd}} + A_{\text{Nord},\text{Süd}} \\ &= \frac{f_{1,\text{Nord}} + f_{1,\text{Süd}}}{2} k_R + \frac{f_{2,\text{Nord}} + f_{2,\text{Süd}}}{2} + \frac{f_{3,\text{Nord}} + f_{3,\text{Süd}}}{2} \varepsilon_V^2 \end{aligned} \quad (4.12)$$

Die lineare Verschiebung der jährlichen Nutzbelichtung durch eine Verlängerung der Arbeitszeit $H_{\text{Nutz},a,t}$ wird durch folgende Gleichung ausgedrückt:

$$H_{\text{Nutz},a,t} = (t_d - 8) \cdot (f_4 \cdot k_R + f_5) \quad (4.13)$$

Die modifizierte Cosinusgleichung mit dem linearen Korrekturterm 4.13 und den Faktoren zur Berücksichtigung der Reflexionsgrade und der Nennbeleuchtungsstärken (4.5 und 4.6) lautet dann:

$$H_{\text{Nutz},a} = F_N \cdot F_\varrho \cdot \left[A_{\text{Nord},\text{Süd}} \cos\left(\frac{2\pi}{360^\circ} \alpha_F\right) + H_{\text{Nutz},a,0} + H_{\text{Nutz},a,t} \right] \quad (4.14)$$

Die Formel 4.14 ist die gesuchte Funktion mehrerer Variablen 4.7, die eine Berechnung der jährlichen Nutzbelichtung in Abhängigkeit mehrerer Veränderlicher erlaubt. Die empirisch ermittelten Koeffizienten sind in der Tabelle 4.1 dargestellt. Die relative jährliche Nutzbelichtung berechnet sich, wie bereits in Abschnitt 3.5 dargestellt, nach Formel 3.18.

Koeffizient	Wert
$f_{1,Nord}$	1,519
$f_{1,Süd}$	1,543
$f_{2,Nord}$	343
$f_{2,Süd}$	374
$f_{3,Nord}$	-0,111
$f_{3,Süd}$	-0,102
f_4	150
f_5	11
f_0	0,35

Tabelle 4.1: Koeffizienten der Gleichung 4.14

4.3.1 Abweichungen zur Berechnung nach DIN 5034

Mittels einer Parametervariation der Raum- und Fensterabmessungen (h_R , b_R , t_R , b_F und h_F), der Orientierung α_F , der Reflexionsgrade der Umschliessungsflächen (ϱ_D , ϱ_W und ϱ_N) und der Nennbeleuchtungsstärke E_N wird die Genauigkeit des Berechnungsverfahrens untersucht. Die Abweichungen der Berechnungsergebnisse des vorgestellten Verfahrens zu den Berechnung nach dem Verfahren der DIN 5034, erweitert um die Berechnung der Nutzbelichtung, beträgt maximal 8% und im Mittel 2,8% (siehe auch Abbildung 4.8). Eine höhere Genauigkeit lässt sich evtl. durch weitere Parameterstudien und Veränderung der empirischen Koeffizienten erzielen.

An dieser Stelle wird jedoch von einer Präzisierung der Koeffizienten abgesehen, da in der Berechnung der DIN 5034 bereits zahlreiche Ungenauigkeiten enthalten sind. Zu nennen sind hier Annahmen bzgl. der Reflexionsgrade der Verbauung und des Untergrunds sowie Verwendung tabellierter Werte für den Transmissionsgrad der Verglasung und für die Verminderungsfaktoren.

In Abschnitt 4.5 wird noch näher auf einen Vergleich verschiedener Berechnungen eingegangen.

4.4 Berechnung des jährlichen Energieverbrauchs

Ein entscheidender Mangel existierender Verfahren ist die fehlende Abhängigkeit der berechneten Zwischengrößen (Nutzungszeit, Einschaltzeit, Nutzbelichtung) zum Energieverbrauch. Deshalb wird an dieser Stelle aus der mehrdimensionalen Funktion der Nutzbelichtung 4.14 der Energieverbrauch der künstlichen Beleuchtung abgeleitet.

Die Belichtung, die nicht durch das Tageslicht, sondern durch künstliche Beleuchtung abgedeckt werden muss, $H_{k,a}$, ist die Differenz aus der erforderlichen Belichtung $H_{erf,a}$ und der jährlichen Nutzbelichtung $H_{Nutz,a}$:

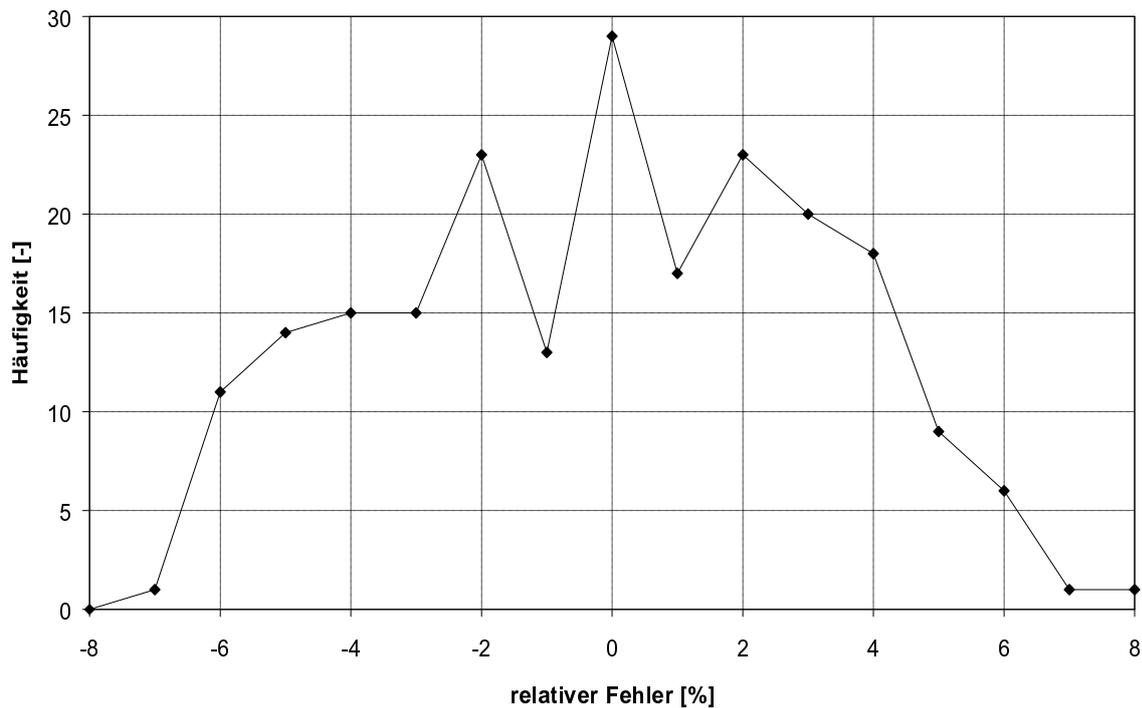


Abbildung 4.8: Häufigkeitsverteilung des relativen Fehlers zwischen der entwickelten Berechnung und der Berechnung nach DIN

$$H_{k,a} = H_{erf,a} - H_{Nutz,a} \quad (4.15)$$

Aus der jährlichen künstlichen Belichtung $H_{k,a}$, der erforderlichen Leuchtenzahl n und der Arbeitszeit t ermittelt sich der mittlere Lampenlichtstrom $\phi_{La,m}$, der notwendig ist, um die Nennbeleuchtungsstärke E_N zu gewährleisten. Dieser mittlere Lampenlichtstrom kann deutlich unterhalb des Maximalwertes ϕ_{La} liegen, da es sich hier um den Mittelwert über das gesamte Jahr handelt und sowohl Perioden mit maximaler Lichtstromabgabe als auch Perioden mit gedimmter Lichtstromabgabe vorkommen.

$$\phi_{La,m} = \frac{1.000 H_{k,a} \cdot A_R}{n \cdot z \cdot t \cdot \eta_{LB} \cdot \eta_R} \quad (4.16)$$

Mit Hilfe des mittleren Lampenlichtstroms $\phi_{La,m}$ und der System- und Verlustleistung (P_{Sys} und P_{Verl}) der Leuchte kann die mittlere Systemleistung $P_{Sys,m}$ nach Gleichung 4.18 berechnet werden. Hierbei wird der mittlere Leuchtenlichtstrom über die Lebensdauer der Lampe verwendet (siehe Formel 4.17), um den Lichtstromrückgang aufgrund

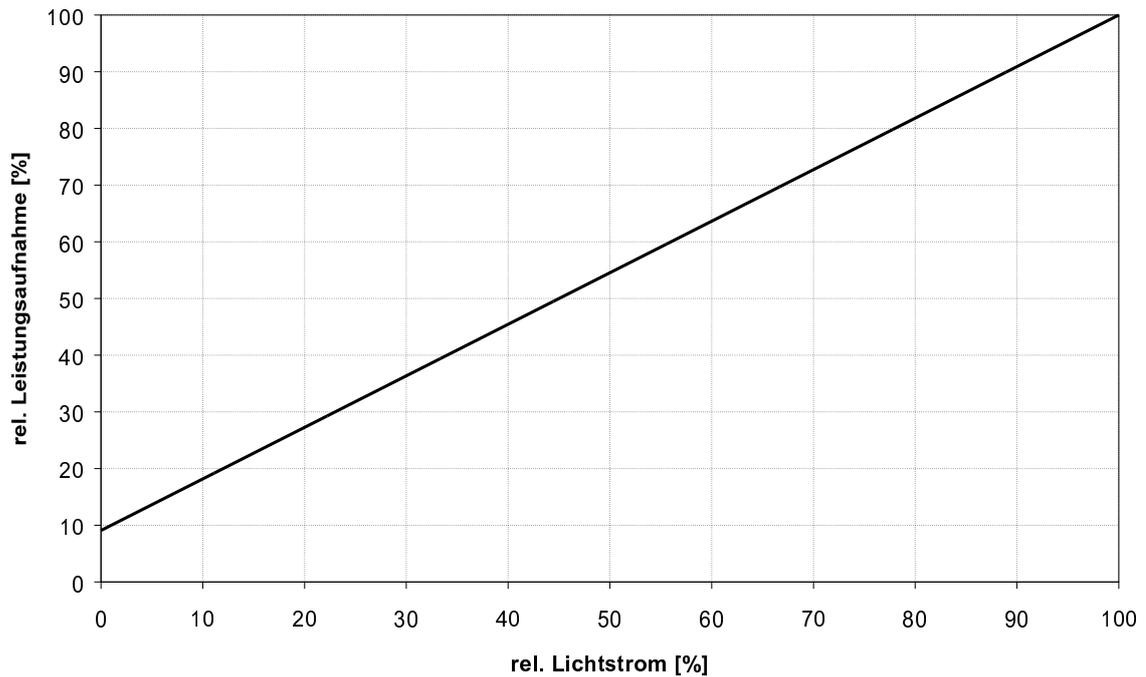


Abbildung 4.9: relative Leistungsaufnahme in Abhängigkeit des relativen Lichtstroms bei einer Leuchte mit $P_{Sys} = 55 \text{ W}$ und $\phi_L = 5.000 \text{ lm}$

der Alterung zu berücksichtigen (siehe auch Abschnitt 3.1.1). Eine Vernachlässigung der Lichtstromabnahme an dieser Stelle würde fälschlicherweise geringere mittlere Systemleistungen und somit ebenfalls geringere Energieverbräuche ergeben.

$$\phi_{L,m} = 0,9 \phi_L \quad (4.17)$$

$$P_{Sys,m} = \frac{\phi_{La,m} \cdot Z}{\phi_{L,m}} (P_{Sys} - P_{Verl}) + P_{Verl} \quad (4.18)$$

Aus Gleichung 4.18 wird deutlich, dass die mittlere Systemleistung $P_{Sys,m}$ linear mit dem erforderlichen mittleren Lampenlichtstrom $\phi_{La,m}$ ansteigt (siehe auch Abbildung 4.9). Darüber hinaus wird aus Abbildung 4.9 ersichtlich, dass bei eingeschaltetem Vorschaltgerät die Verlustleistung P_{Verl} auch bei fast ausgeschalteter Lampe ca. 9% der gesamten Systemleistung P_{Sys} ausmacht.

Die mittlere Lichtausbeute η_m liegt somit ebenso unter der maximalen Lichtausbeute η und ermittelt sich nach folgender Gleichung:

$$\eta_m = \frac{\phi_{La,m} \cdot Z}{P_{Sys,m}} \quad (4.19)$$

Der jährliche Energieverbrauch der künstlichen Beleuchtung $E_{k,a}$ ist folglich das Produkt aus der mittleren Systemleistung $P_{Sys,m}$, der Leuchtenanzahl n und der jährlichen Arbeitszeit t_a :

$$E_{k,a} = \frac{P_{Sys,m} \cdot n \cdot t_a}{1.000} \quad (4.20)$$

Zur objektiveren Vergleichbarkeit verschiedener Räume ist der flächenspezifische jährliche Energieverbrauch $e_{k,a}$ besser geeignet:

$$e_{k,a} = \frac{E_{k,a}}{A_R} \quad (4.21)$$

Der maximale Energieverbrauch $E_{k,a,max}$ unter den in Abschnitt 4.2 dargestellten Annahmen beträgt dann:

$$E_{k,a,max} = \frac{P_{Sys} \cdot n \cdot t_a}{1.000} \quad (4.22)$$

Die erzielte Energieeinsparung ΔE_k durch die Tageslichtnutzung kann somit nach folgender Gleichung quantifiziert werden:

$$\Delta E_k = \frac{E_{k,a,max} - E_{k,a}}{E_{k,a,max}} \cdot 100\% \quad (4.23)$$

Aufgrund der Verlustleistung durch die elektronischen Vorschaltgeräte und die mit abnehmendem Dimmlevel abnehmende Lichtausbeute [NAGE1995] ist die Energieeinsparung ΔE_k stets niedriger als die relative jährliche Nutzbelichtung $H_{Nutz,a,rel}$.

4.5 Vergleich mit anderen Berechnungen und Simulationsrechnungen

Um die Genauigkeit und Praxistauglichkeit aber auch die Einsatzgrenzen des vorgestellten Berechnungsverfahrens zu bewerten, ist ein Vergleich mit existierenden Berechnungen und Simulationen erforderlich.

Zum Vergleich wird die Berechnung nach DIN, erweitert um Bilanzen zur Berechnung des Energieverbrauchs, sowie die Simulation mit den Programmen Relux und Superlink (aus dem Programmpaket Adeline) herangezogen.

Bisher durchgeführte Vergleiche von Berechnungsprogrammen bezogen sich lediglich auf die berechnete Beleuchtungsstärke [HEES1996], [KOKO2000] bzw. die fotorealistische Visualisierung [ALTM2000]. Für den Planer ist jedoch ebenfalls der Energieverbrauch der künstlichen Beleuchtung von entscheidender Bedeutung. Deshalb werden hier auch ausschließlich Berechnungen, die den Energieverbrauch ermitteln, untersucht.

4.5.1 Untersuchte Varianten

Verglichen werden folgende Varianten, die sich durch unterschiedliche geometrische Abmessungen, Reflexionsgrade, Orientierungen usw. unterscheiden. Die Varianten 3 und 4 sind darüber hinaus mit verschiedenen Leuchtentypen verglichen worden:

- Variante 1 Raumbreite 3,6 m, Tiefe 4,48 m, Höhe 2,82 m, Höhe der Nutzebene 0,75 m, Fensterbreite 2,41 m, -höhe 1,61 m, k_1 0,7, Reflexionsgrade 0,7 0,7 0,2, Verbauungsabstand 25 m, -höhe 14 m, Orientierung 240° , Nennbeleuchtungsstärke 500 lx, Arbeitszeit 8 h/d, Leuchtentyp TCS 314/158 D6 (Anbauleuchte, Abstrahlungscharakteristik direkt, Hersteller Philips, $P_{Sys} = 55$ W, $\eta_{LB} = 0,68$)
- Variante 2 Raumbreite 5 m, Tiefe 5 m, Höhe 3 m, Höhe der Nutzebene 0,85 m, Pendellänge 0,5 m, Fensterbreite 3 m, -höhe 1,8 m, k_1 0,75, Reflexionsgrade 0,7 0,5 0,2, Verbauungsabstand 25 m, -höhe 0 m, Orientierung 0° , Nennbeleuchtungsstärke 500 lx, Arbeitszeit 8 h/d, Leuchtentyp TCS 314/158 D6-60 HFR (Pendelleuchte, Abstrahlungscharakteristik direkt/indirekt, Hersteller Philips, $P_{Sys} = 56$ W, $\eta_{LB} = 0,78$)
- Variante 3a Raumbreite 4 m, Tiefe 5 m, Höhe 3 m, Höhe der Nutzebene 0,85 m, Pendellänge 1 m, Fensterbreite 3 m, -höhe 2 m, k_1 0,75, Reflexionsgrade 0,8 0,8 0,3, Verbauungsabstand 25 m, -höhe 10 m, Orientierung 180° , Nennbeleuchtungsstärke 300 lx, Arbeitszeit 9 h/d, Leuchtentyp TCS 314/158 D6-60 HFR (Pendelleuchte, Abstrahlungscharakteristik direkt/indirekt, Hersteller Philips, $P_{Sys} = 56$ W, $\eta_{LB} = 0,78$)
- Variante 3b wie 3a nur Leuchtentyp Divisio/49 (Pendelleuchte, direkt/indirekt, Hersteller Trilux, $P_{Sys} = 108$ W, $\eta_{LB} = 0,79$)
- Variante 3c wie 3a nur Leuchtentyp TCS 314/236 D6-60 HFR (Pendelleuchte, Abstrahlungscharakteristik direkt/indirekt, Hersteller Philips, $P_{Sys} = 72$ W, $\eta_{LB} = 0,78$)

- Variante 4a Raumbreite 4 m, Tiefe 4,5 m, Höhe 3 m, Höhe der Nutzebene 0,75 m, Pendellänge 1 m, Fensterbreite 3 m, -höhe 1,8 m, k_l 0,7, Reflexionsgrade 0,7 0,7 0,2, Verbauungsabstand 25 m, -höhe 0 m, Orientierung 270° , Nennbeleuchtungsstärke 750 lx, Arbeitszeit 9 h/d, Leuchtentyp TCS 662/236 (Pendelleuchte, Abstrahlungscharakteristik direkt/indirekt, Hersteller Philips, $P_{Sys} = 72$ W, $\eta_{LB} = 0,75$)
- Variante 4b wie 4a nur Leuchtentyp TCS 662/258 (Pendelleuchte, Abstrahlungscharakteristik direkt/indirekt, Hersteller Philips, $P_{Sys} = 110$ W, $\eta_{LB} = 0,73$)

4.5.2 Ergebnisse

Die Ergebnisse der Vergleichsberechnungen sind in Tabelle 4.2 dargestellt und werden im Folgenden kommentiert und bewertet.

Eine alleinige Betrachtung der Abweichung der verschiedenen Berechnungen genügt an dieser Stelle nicht. Es ist zwingend erforderlich, die Berechnungsergebnisse und die zugrunde liegenden Algorithmen kritisch zu hinterfragen.

Ergebnisse nach DIN 5034

Wie bereits in Abschnitt 4.3.1 gezeigt, liegt die maximale Abweichung der Nutzbelichtung des eigenen Berechnungsverfahrens gegenüber der Berechnung nach DIN bei maximal 8%.

Beim Vergleich des Energieverbrauches (siehe Tabelle 4.2) wird deutlich, dass trotz identischer Nutzbelichtung bei der Variante 3b der Energieverbrauch nach DIN deutlicher abweicht als nach der eigenen Berechnung. Die Varianten 3a–c unterscheiden sich nur im Leuchtentyp und somit in der installierten Systemleistung. Da in der Berechnung des Energieverbrauches nach DIN die gesamte Systemleistung eingeht, führt dies zu zu hohen Energieverbräuchen bei der Variante 3b. Der Einfluss der Regelung, die eine Variation der Systemleistung je nach Tageslichtangebot bewirkt, wird hier nicht berücksichtigt und führt deshalb zu fehlerhaften Ergebnissen. Bei den Varianten 4a und 4b ist dies ebenfalls zu beobachten (siehe auch Abbildung 4.10).

Der Energieverbrauch kann bei alleiniger Variation der Leuchtentypen trotz identischer Verlustleistung nie gleich sein, da aufgrund unterschiedlicher Betriebswirkungsgrade der Leuchten und unterschiedlicher Raumwirkungsgrade ebenfalls der mittlere Lampenlichtstrom $\phi_{La,m}$ (siehe Gleichung 4.16) und damit die mittlere Systemleistung $P_{Sys,m}$ (siehe Gleichung 4.18) variiert (siehe auch Abschnitt 4.4).

Variante	Wert	Einheit	DIN	eigene Berechnung	Relux	Superlink
1	$H_{Nutz,a}$	[(klx h)/a]	455	460	-	-
	$H_{Nutz,a,rel}$	[%]	52	52	57	-
	$E_{k,a}$	[kWh/a]	194	177	168	145
	ΔE	[%]	50	54	57	63
2	$H_{Nutz,a}$	[(klx h)/a]	477	516	-	-
	$H_{Nutz,a,rel}$	[%]	54	59	64	-
	$E_{k,a}$	[kWh/a]	281	295	211	250
	ΔE	[%]	52	50	64	58
3a	$H_{Nutz,a}$	[(klx h)/a]	442	462	-	-
	$H_{Nutz,a,rel}$	[%]	74	78	76	-
	$E_{k,a}$	[kWh/a]	62	62	53	48
	ΔE	[%]	72	72	76	79
3b	$H_{Nutz,a}$	[(klx h)/a]	442	462	-	-
	$H_{Nutz,a,rel}$	[%]	74	78	76	-
	$E_{k,a}$	[kWh/a]	114	87	103	92
	ΔE	[%]	73	80	76	79
3c	$H_{Nutz,a}$	[(klx h)/a]	442	462	-	-
	$H_{Nutz,a,rel}$	[%]	74	78	76	-
	$E_{k,a}$	[kWh/a]	78	78	103	61
	ΔE	[%]	73	73	76	79
4a	$H_{Nutz,a}$	[(klx h)/a]	777	777	-	-
	$H_{Nutz,a,rel}$	[%]	52	52	49	-
	$E_{k,a}$	[kWh/a]	282	333	291	232
	ΔE	[%]	51	42	49	59
4b	$H_{Nutz,a}$	[(klx h)/a]	777	777	-	-
	$H_{Nutz,a,rel}$	[%]	52	52	49	-
	$E_{k,a}$	[kWh/a]	444	350	445	355
	ΔE	[%]	49	60	49	59

Tabelle 4.2: Übersicht der Ergebnisse der Vergleichsrechnungen

Ergebnisse mit Relux

Relux berechnet keine Nutzbelichtung sondern lediglich eine prozentuale Tageslichtnutzung, bei der das Tageslicht zur Beleuchtung ausreicht. Deshalb kann Relux nicht zu einem Vergleich der Nutzbelichtung herangezogen werden.

Die prozentuale Tageslichtnutzung ist bei Relux mit der prozentualen Energieeinsparung identisch. Eine Reduzierung der mittleren Systemleistung aufgrund der Regelung bleibt wie bei der Berechnung nach DIN unberücksichtigt. Dies wird ebenfalls bei den Varianten 3a–c ersichtlich, wo Relux im Gegensatz zu den Berechnungen nach DIN und der eigenen

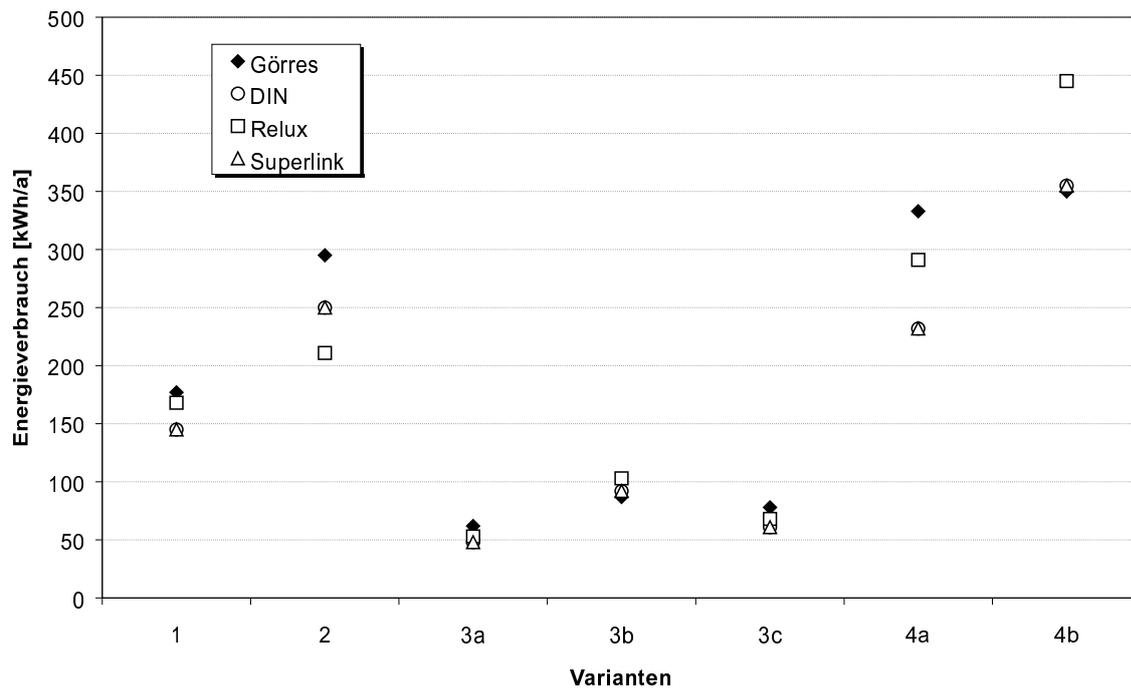


Abbildung 4.10: Vergleich der Berechnungsergebnisse des Energieverbrauchs der unterschiedlichen Varianten

Berechnung des Energieverbrauchs lediglich aus dem Produkt aus prozentualen Tageslichteinsatz, Arbeitsstunden und Anschlussleistung bestimmt. Die Eingabe unterscheidet hier auch nicht die Systemleistung in Lampen- und Verlustleistung.

Eine korrekte Berechnung des Energieverbrauchs ist somit mit Relux nicht möglich.

Ergebnisse mit Superlink

Superlink dient ebenso wie Radlink aus dem Programmpaket Adeline zur Berechnung der Energieverbräuche künstlicher Beleuchtung. Der Berechnung des Energieverbrauchs geht notwendigerweise eine Berechnung der Lichtverteilung im Raum mit Superlite bzw. Radiance voraus. Mit Radiance kann ebenfalls eine fotorealistische Visualisierung der Beleuchtungssituation berechnet werden (siehe auch Abbildung 4.11).

Superlink berechnet mit Hilfe der Sonnenscheinwahrscheinlichkeit und einer vereinfachten Lichtausbeute (siehe Formel 4.24) den Energieverbrauch und die Energieeinsparung über den vorgegebenen Zeitraum. Als Regelstrategie wurde eine ideale Regelung zugrunde gelegt.

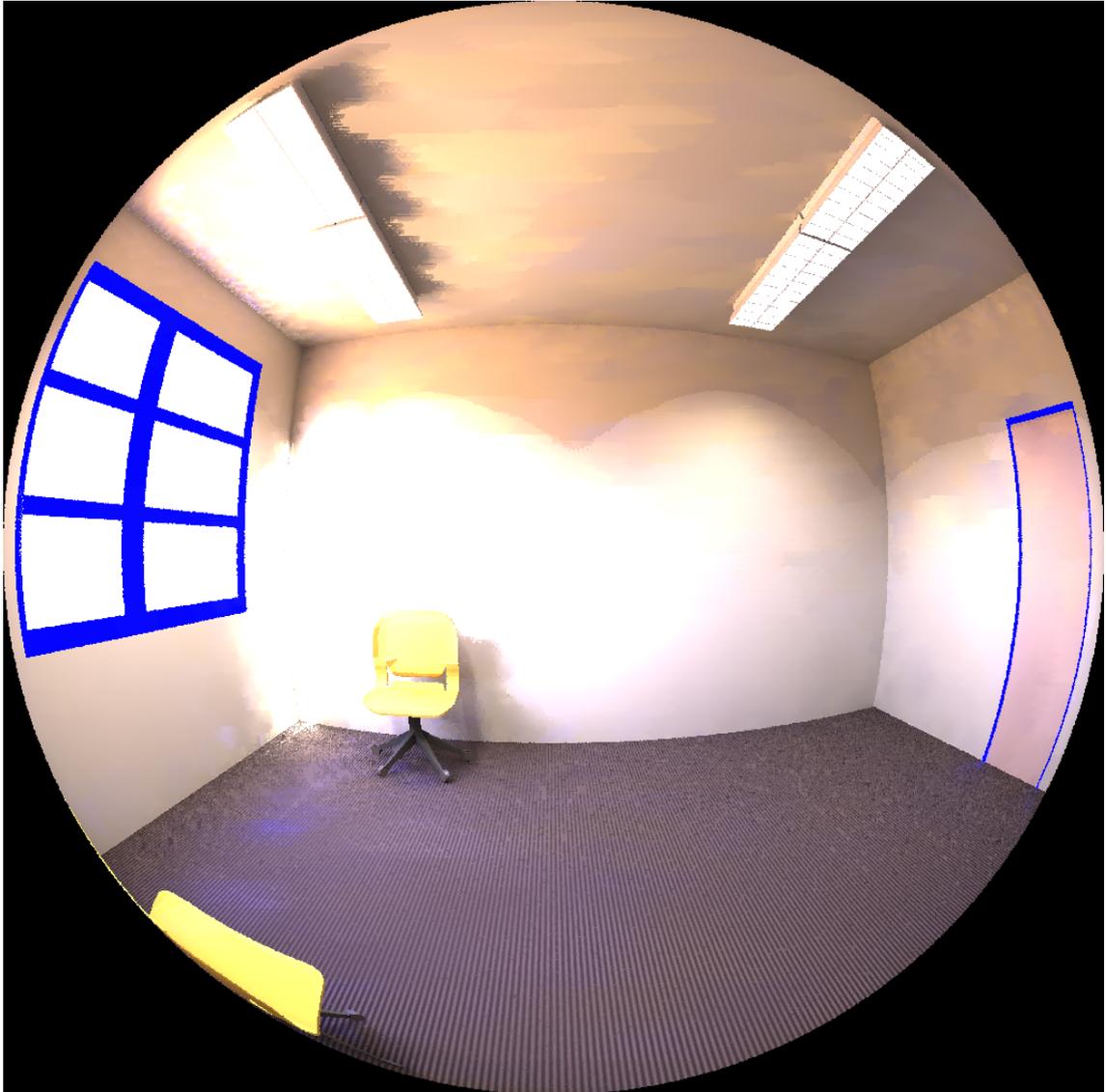


Abbildung 4.11: Visualisierung mit Radiance (hemisphärische Fischaugenperspektive)

$$\eta = \frac{E_N \cdot A_R}{P} \quad (4.24)$$

Anhand der Gleichung 4.24 wird deutlich, dass unterschiedliche Systemleistungen verschiedener Leuchtentypen berücksichtigt werden. Der Energieverbrauch ergibt sich aus dem Produkt des erforderlichen Lichtstroms der künstlichen Beleuchtung, der Zeit und der Lichtausbeute. Eine Differenzierung der aufgenommenen Leistung aufgrund der tageslichtabhängigen Regelung wird jedoch auch bei Superlink nicht vorgenommen. Ebenso wird nicht die Abstrahlungscharakteristik und die Pendellänge der Leuchten berücksichtigt.

Aufgrund der verwendeten Berechnungsmodelle in Superlink ist eine korrekte Aussage über den Energieverbrauch nur bedingt möglich, auch wenn in einigen Varianten (3b und 4b) eine sehr gute Übereinstimmung mit der eigenen Berechnung erzielt wurde (siehe auch Abbildung 4.10).

Ergebnisse des entwickelten Berechnungsverfahrens

Das entwickelte Berechnungsverfahren verwendet zur Berechnung des Energieverbrauchs die mittlere Systemleistung, die aus dem mittleren Lampenlichtstrom resultiert, der für die künstliche Belichtung erforderlich ist (siehe Abschnitt 4.4). Damit entspricht die Berechnung der Arbeitsweise einer tageslichtabhängigen Beleuchtungsregelung, die die Leistungsaufnahme der Leuchten je nach durch den Sensor erfassten Lichtstrom regelt.

Die Berechnungen nach DIN bzw. mit den Simulationsprogrammen Relux und Superlink sind nicht in der Lage, die Systemleistung zu differenzieren und führen somit zu teilweise deutlich abweichenden Werten.

Ebenfalls berücksichtigt das entwickelte Berechnungsverfahren Unterschiede in den Betriebswirkungsgraden der Leuchten und den Raumwirkungsgraden aufgrund verschiedener Pendellängen und Abstrahlcharakteristika.

Die Vorteile des hier vorgestellten Verfahrens liegen ebenfalls in einer einfachen Handhabung, da komplexe Berechnungen und aufwendige Simulationsprogramme durch mangelnde Sorgfalt bei der Benutzung zu großen Abweichungen führen können [KOKO2000].

Einsatzgrenzen

Wie bereits in Abschnitt 4.1 dargestellt, wird die Berechnung auf Büroräume mit 2 Zonen und 2 Lichtbändern beschränkt, um die prinzipielle Funktion dieses Berechnungsverfahrens zu demonstrieren. Aufgabe weiterer Untersuchung ist die Erweiterung auf andere Raumtypen.

5 Computergestützte Berechnung

Das in Kapitel 4 entwickelte Berechnungsverfahren ist trotz der Reduzierung auf eine Funktion mit mehreren Veränderlichen aufgrund der empirischen Koeffizienten und der komplexen Gleichung noch aufwendig zu berechnen. In diesem Kapitel wird deshalb eine computergestützte Berechnung vorgestellt, die die Berechnung der jährlichen Nutzbelichtung und des jährlichen spezifischen Energieverbrauchs für den Nutzer vereinfacht.

Es ist nicht beabsichtigt, den bereits zahlreichen Lichtberechnungsprogrammen ein weiteres Programm hinzuzufügen, sondern lediglich ein Werkzeug bereitzustellen, das das vorgestellte Berechnungsverfahren in einem Algorithmus implementiert und dem Anwender die Berechnung erleichtert.

5.1 Programmbasis

Um den Programmieraufwand zu begrenzen und dem Anwender eine einfache, grafische Benutzeroberfläche zu bieten, wird auf eine kommerzielle Tabellenkalkulation (Microsoft Excel) zurückgegriffen. Prinzipiell ist ebenfalls eine Übertragung auf andere Tabellenkalkulation möglich. Damit besteht auch keine Beschränkung auf bestimmte Nutzerkreise.

Die Programmierung der erforderlichen Routinen erfolgt in Visual Basic for Applications, einer Interpretersprache, die in der Tabellenkalkulation integriert ist [KOF1997].

5.2 Eingaben

Die Eingangsparameter, die nach der Analyse aus Abschnitt 4.2 die Nutzbelichtung entscheidend beeinflussen, stellen ebenfalls bei der computergestützten Berechnung die Eingangsgrößen dar. Unterteilt werden die Parameter hierbei in die Bereiche Raumeigenschaften, Verbauung, Orientierung, Anwendung und Leuchte. Insgesamt handelt es sich um 15 Veränderliche.

Soweit möglich sind bestimmte Werte über vordefinierte Listen auswählbar, so dass dem Nutzer ein Nachschlagen notwendiger Werte (wie Reflexionsgrade, Nennbeleuchtungsstärken usw.) abgenommen wird (siehe Bildschirmdarstellung, Abbildung 5.1). Damit

verbundene Einschränkungen in der Flexibilität werden in Kauf genommen, um die Bedienung einfach zu gestalten. Ein Heranziehen von weiteren Hilfsmitteln, wie Tabellenwerke, Diagramme oder Hilfsliteratur, wird dadurch vermieden.

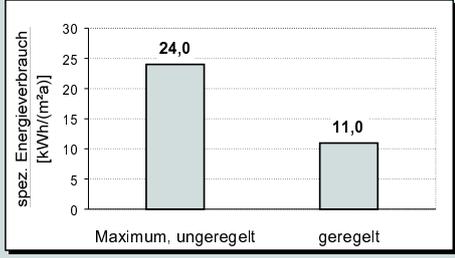
Eingaben		Ergebnisse	
Raumeigenschaften:		Beleuchtung:	
Raubbreite b [m]	3,6	erforderlicher Lichtstrom Φ_{erf} [lm]	15.178
Raumtiefe t [m]	4,48	Raumindex k [-]	1,00
Raumhöhe H [m]	2,82	Raumwirkungsgrad ρ_R [-]	0,78
Raumfläche A_R [m ²]	16,13	erforderliche Leuchtenanzahl n [-]	4
Reflexionsgrade (ρ_D, ρ_W, ρ_N)	hoch (0,7 0,7 0,2)	Lampenlichtstrom Φ_{La} [lm]	3.795
Fensterbreite b_F [m]	2,41	sensorische Beleuchtungsstärke E_S [lx]	892
Fensterhöhe h_F [m]	1,61	erforderliche jährliche Belichtung $H_{\text{erf,a}}$ [(klx h)/a]	880
Fensterfläche A_F [m ²]	3,88		
Verminderungsfaktor Rahmen k_1 [-]	zwei- und mehrflügelige Fenster	Tageslicht:	
Glasfläche A_G [m ²]	2,72	jährliche Nutzbelichtung $H_{\text{Nutz,a}}$ [(klx h)/a]	460
Geometrieverhältnis $A_G/(A_R \times t/b)$ [-]	0,135	relative jährliche Nutzbelichtung $H_{\text{Nutz,a,rel}}$ [%]	52
Nutzebene h_N [m]	0,75		
Verbauung:		künstliche Beleuchtung:	
Abstand t_V [m]	25	jährliche künstliche Belichtung $H_{\text{k,a}}$ [(klx h)/a]	420
Höhe h_V [m]	14	max. Energieverbrauch E_{max} [kWh/a]	387
Verbauungshöhenwinkel ν [°]	29,25	max. spez. Energieverbrauch e_{max} [kWh/(m ² a)]	24,0
Orientierung:		mittlerer Lampenlichtstrom $\Phi_{\text{La,m}}$ [lm]	1.813
<input type="radio"/> Nord 0°	<input type="radio"/> West 270°	mittlere Systemleistung $P_{\text{Sys,m}}$ [W]	25,1
<input type="radio"/> Süd 180°	<input type="radio"/> Ost 90°	mittlere Lichtausbeute η_m [lm/W]	72
<input checked="" type="radio"/> andere:	240	Energieverbrauch E [kWh/a]	177
Anwendung:		spez. Energieverbrauch e [kWh/(m ² a)]	11,0
Nennbeleuchtungsstärke E_N [lx]	BAP	Energieeinsparung E [%]	54
Arbeitszeit t [h/d]	8		
Leuchte:			
Modell	TCS 314/158 D6	UniDO, LS TGA, Markus Görres, 2000	
Abstrahlcharakteristik	direkt	1.8.2000	
Montageart	Anbau		
Pendellänge p [m]			
Lichtstrom der Leuchte Φ_L [lm]	5.000		
Anzahl der Lampen pro Leuchte z [-]	1		
Betriebswirkungsgrad ρ_{LB} [-]	0,68		
Systemleistung P_{Sys} [W]	55		

Abbildung 5.1: Bildschirmaufnahme der computergestützten Berechnung mit den verschiedenen Eingabe- und Ergebnisblöcken und dem Balkendiagramm des spezifischen jährlichen Energieverbrauchs

Dem Anwender bleibt dabei die Reihenfolge der Dateneingabe oder -variation freigestellt. Dies erleichtert eine nachträgliche Optimierung trotz projektspezifisch invarianter Größen. Entsprechende ProgrammROUTINEN sorgen für eine automatische Neuberechnung der Ergebnisse.

Eingaben werden auf Plausibilität überprüft. Bei Inplausibilitäten wird der Anwender zu Korrekturen aufgefordert.

Um plausible Ergebnisse zu erhalten, ist jedoch eine Kontrolle der Eingaben sowie Beurteilung der Berechnungsergebnisse seitens des Anwenders notwendig. Die Richtigkeit hängt wie bei allen anderen computergestützten Berechnungen von der Sorgfalt des Anwenders ab (siehe auch [KOKO2000]). Eine Gewährleistung für korrekte Berechnungen kann folglich nicht übernommen werden.

5.2.1 Raumeigenschaften

Zu den Raumeigenschaften zählen hierbei die Abmessungen des Raumes, der Fenster, die Höhe der Nutzebene sowie die Reflexionsgrade der Umschließungsflächen und die Art der Fensterrahmen und -sprossen.

Die dimensionslose Kennzahl der Raumgeometrie k_R , die zur Berechnung der jährlichen Nutzbelichtung benötigt wird, wird aus diesen Werten ermittelt.

5.2.2 Verbauung

Aus der Höhe und dem Abstand der Verbauung berechnet sich der Verbauungshöhenwinkel ε_V , der in die weitere Berechnung einfließt. Eine Variation der Breite der Verbauung wird nicht berücksichtigt (siehe ebenfalls Abschnitt 4.2.3).

5.2.3 Orientierung

Zur Eingabe der Orientierung der Fensterfassade kann der Nutzer eine der vier Himmelsrichtungen wählen oder einen beliebigen Wert zwischen 0 und 360° eingeben.

5.2.4 Anwendung

Die Anwendung bzw. Tätigkeit ist entscheidend für die erforderliche Nennbeleuchtungsstärke nach [DIN5035.2]. Entweder wird eine Anwendung aus einer Liste gewählt oder eine beliebige Beleuchtungsstärke manuell eingegeben.

An dieser Stelle wird auch die tägliche Arbeitszeit definiert.

5.2.5 Leuchte

Im Eingabebereich der Leuchte kann anhand einer Liste eine Leuchte ausgewählt werden, deren Charakteristika dann aus den Leuchtendaten dieser Leuchte mittels einer für diesen Zweck implementierten Datenimportroutine eingelesen werden.

Im Eulumdat-Datenformat sind die Abmessungen der Leuchte, die lichttechnischen Kenngrößen, die Leistungsaufnahme sowie die Lichtverteilungskurve enthalten [STOC1990]. Im erweiterten Datenformat Eulumdat/2 sind noch zusätzliche Daten enthalten, die jedoch in diesem Algorithmus und in anderen Berechnungsprogrammen noch keine Anwendung finden [STOC1996]. Das im amerikanischen Raum verbreitete Leuchtenformat IES wird aufgrund geringer Verbreitung in Deutschland nicht berücksichtigt [IES1995].

Für die computergestützte Berechnung sind die Leuchtenhöhe h_L , die Anzahl der Lampen pro Leuchte z , die Systemleistung P_{Sys} , der Lichtstrom ϕ , der Anteil des Lichtstroms im unteren Halbraum ϕ_u , der Standard-Direkt-Nutzlichtstromanteil ϕ_{su} und der Betriebswirkungsgrad der Leuchte η_{LB} aus dem Eulumformat einzulesen. Die Abstrahlcharakteristik (direkt, direkt/indirekt, indirekt), die Montageart (Anbau, Pendel) sowie die Leuchtenhöhe über der Nutzebene h unter Berücksichtigung einer evtl. Abpendelung lassen sich daraus bestimmen.

Aufgrund der Verwendung des standardisierten Eulum-Datenformats ist keine Beschränkung auf Leuchten bestimmter Hersteller vorgesehen. Die zugrunde liegende Berechnung basiert auf der Verwendung von Lichtbändern, so dass lediglich eine Einschränkung auf diese Leuchtentypen besteht.

5.3 Ergebnisse

Die Ergebnisse werden unterteilt in Beleuchtung allgemein, Tageslicht sowie künstliche Beleuchtung. Die Vorteile und Ziele dieser computergestützten Berechnung sind:

- schnelle und einfache Berechnung,
- einfache Optimierung des Energieverbrauchs,
- direkter Vergleich verschiedener Veränderlicher sowie
- unmittelbare Darstellung der Auswirkungen von Parameteränderungen auf den Energieverbrauch.

Aussagen zur Genauigkeit der Berechnung und Vergleiche zu anderen Berechnungsverfahren wurden bereits in Abschnitt 4.3.1 und 4.5 aufgeführt und werden an dieser Stelle nicht wiederholt, da die zugrunde liegenden Berechnungsformeln identisch sind.

5.3.1 Beleuchtung

Durch lineare Interpolation wird aus den Wirkungsgradtabellen der Raumwirkungsgrad η_R berechnet. Voraussetzung sind die Berechnung des Raumindex k und die Ermittlung des

Leuchtentyps aus dem Anteil des Lichtstroms im unteren Halbraum und dem Standard-Direkt-Nutzlichtstromanteil.

Der Raumwirkungsgrad ist erforderlich, um nach folgender Gleichung den erforderlichen Lichtstrom ϕ_{erf} zu berechnen, der die Nennbeleuchtungsstärke E_N im Raum gewährleistet:

$$\phi_{\text{erf}} = \frac{E_N \cdot A_R}{\eta_R \cdot \eta_{LB}} \quad (5.1)$$

Mit Hilfe des Lichtstroms der ausgewählten Leuchte kann dann die Anzahl der Leuchten n ermittelt werden, wobei n stets auf ein Vielfaches von 2 aufgerundet werden muss, da aufgrund der Definitionen aus Abschnitt 4.1 nur Büroräume mit 2 Lichtbändern betrachtet werden. Die Leuchtenanzahl ist zur Berechnung des Energieverbrauchs der künstlichen Beleuchtung notwendig.

$$n = \frac{\phi_{\text{erf}}}{\phi_L} \quad (5.2)$$

Die erforderliche jährliche Belichtung der gesamten Beleuchtung $H_{\text{erf},a}$ berechnet sich nach Gleichung 3.17.

Kalibrierung der Beleuchtung

Ein Nebenprodukt der computergestützten Berechnung ist die gleichzeitige Verwendung einiger Zwischenergebnisse zur Bestimmung der Kalibrierwerte einer tageslichtabhängig geregelten Beleuchtungsanlage.

Zu Grunde gelegt wird das in [GÖRR1999] beschriebene Verfahren, welches die sensorische Beleuchtungsstärke lichtbandweise ermittelt, basierend auf der Berechnung der Punktbeleuchtungsstärke einer direkten Lichtquelle nach [IES1968]. Deshalb kann der Kalibrierwert nur für direkt abstrahlende und nicht für indirekt sowie direkt/indirekt abstrahlende Leuchten ermittelt werden.

Hierzu wird aus der in Gleichung 5.2 bestimmten notwendigen Leuchtenzahl und des in Gleichung 5.1 berechneten erforderlichen Lichtstroms der erforderliche Lampenlichtstrom $\phi_{La,\text{erf}}$ ermittelt, der wiederum als Grundlage zur Berechnung der sensorischen Beleuchtungsstärke dient. Der komplette Berechnungsgang findet sich in [GÖRR1999].

$$\phi_{La,\text{erf}} = \frac{\phi_{\text{erf}}}{n z} \quad (5.3)$$

5.3.2 Tageslicht

Analog zur in Abschnitt 4 vorgestellten Berechnung werden aus den Eingabedaten die jährliche Nutzbelichtung $H_{Nutz,a}$ und die relative jährliche Nutzbelichtung $H_{Nutz,a,rel}$ nach Gleichung 4.14 und 3.18 berechnet.

Im Gegensatz zu den meisten Berechnungsverfahren endet die Berechnung nicht an dieser Stelle. Die nötigen Berechnungsschritte zur Ermittlung des Energieverbrauchs ausgehend von der Nutzbelichtung sind ebenfalls in dieser computergestützten Berechnung integriert.

5.3.3 Künstliche Beleuchtung

Die in Abschnitt 4.4 aufgestellten Gleichungen zur Berechnung der künstlichen Belichtung (4.15), der mittleren Systemleistung (4.18) und des jährlichen Energieverbrauchs (4.20) werden implementiert und in diesem Ergebnisblock dargestellt.

Der ermittelte jährliche spezifische Energieverbrauch wird zur besseren Anschaulichkeit darüber hinaus in Form eines Balkendiagramms dem maximalen Energieverbrauch gegenübergestellt (siehe ebenfalls Abbildung 5.1).

5.4 Optimierung des Energieverbrauchs

Durch Variation der verschiedenen Eingangsparameter kann mit Hilfe dieser computergestützten Berechnung ein Optimum für den jährlichen Energieverbrauch der künstlichen Beleuchtung gefunden werden.

Da bestimmte Variablen projektbezogen invariant sind, kann kein Optimierungsalgorithmus zur Minimierung des Energieverbrauchs verwendet werden. Der Nutzer kann jedoch mit diesem Berechnungswerkzeug den optimalen Kompromiss unter Beachtung der 15 unterschiedlichen Variablen erzielen. Im folgenden Abschnitt wird anhand eines Beispielbüros eine potenzielle Optimierung, bzw. eine Minimierung des Energieverbrauchs demonstriert.

Die Optima der visuellen Behaglichkeit, des Energieverbrauchs sowie der Gesamtkosten sind nicht gleichzeitig zu erzielen [NEEM1984a].

Hierbei ist zu beachten, dass eine Minimierung des Energieverbrauchs der künstlichen Beleuchtung unter gewissen Umständen eine Erhöhung der Gesamtenergiebilanz bewirken kann. Beispielsweise kann eine Vergrößerung der Fensterfläche zu einer stärkeren Überhitzung des Raumes führen und somit mehr Energie zur Kälteerzeugung erfordern als bei der Beleuchtung eingespart wird [RUND1991], [KROC1977].

Variante	Leuchte	n	p_{el} [W/m ²]	e_{max} [kWh/(m ² a)]	Reflexionsgrade	h_P [m]	e [kWh/(m ² a)]
2	Typ 1	6	13,4	23,7	Standard (0,7 0,5 0,2)	0,5	11,8
2a	Typ 1	6	13,4	23,7	Standard (0,7 0,5 0,2)	1,0	10,2
2b	Typ 1	6	13,4	23,7	Standard (0,7 0,5 0,2)	1,2	9,6
2c	Typ 1	6	13,4	23,7	hoch (0,7 0,7 0,2)	0,5	9,1
2d	Typ 1	6	13,4	23,7	hoch (0,7 0,7 0,2)	1,0	8,2
2e	Typ 1	4	9,0	15,8	hoch (0,7 0,7 0,2)	1,2	7,2
2f	Typ 1	4	9,0	15,5	sehr hoch (0,8 0,8 0,3)	0,5	6,4
2g	Typ 1	4	9,0	15,5	sehr hoch (0,8 0,8 0,3)	1,0	5,9
2h	Typ 1	4	9,0	15,5	sehr hoch (0,8 0,8 0,3)	1,2	5,7
2i	Typ 2	4	8,8	15,5	sehr hoch (0,8 0,8 0,3)	0	6,1
2j	Typ 3	4	8,8	15,5	sehr hoch (0,8 0,8 0,3)	1,2	5,6
2k	Typ 4	4	8,8	15,5	sehr hoch (0,8 0,8 0,3)	1,2	5,5

Tabelle 5.1: Ergebnisse der Optimierung des Beispielbüros

5.4.1 Beispielrechnung

Anhand eines Beispielbüros wird eine Optimierung dargestellt. Ziel ist die Minimierung des Energieverbrauchs. Die verschiedenen Varianten werden untersucht und quantitativ bewertet.

Grundlage ist die bereits in Abschnitt 4.5 berechnete Variante 2, ein Raum mit einer Grundfläche von 25 m² und Nordorientierung. Die tägliche Arbeitszeit beträgt 8 h/d und die erforderliche Nennbeleuchtungsstärke beträgt 500 lx.

Unter der Annahme, dass es sich um ein bestehendes Gebäude handelt, werden die Maße der Fenster und des Raumes sowie Orientierung und Verbauung nicht variiert.

Die Variationsmöglichkeiten umfassen Änderungen der Reflexionsgrade, die auch in bestehenden Räumen durchgeführt werden können, Veränderungen der Pendellänge der Leuchte sowie verschiedene Leuchtypen.

In Abbildung 5.2 wird deutlich, dass eine Minimierung des spezifischen Energieverbrauchs e sowohl durch eine Erhöhung der Reflexionsgrade der Umschließungsflächen als auch durch eine Erhöhung der Pendellänge zu erzielen ist. Bei Letzterem ist natürlich ein entsprechender Abstand zur Arbeitsfläche zu beachten. Es wird ebenfalls ersichtlich, dass ein anderer Leuchtyp nur marginal den spez. Energieverbrauch beeinflusst, hocheffiziente Leuchten immer vorausgesetzt.

Um die einzelnen Einflussfaktoren zu bewerten, ist eine differenzierte Betrachtung der Ergebnisse sinnvoll. In Tabelle 5.1 sind deshalb neben dem spezifischen Energieverbrauch e auch der maximale spezifische Energieverbrauch e_{max} , die Leuchtenanzahl n , die spezifische elektrische Anschlussleistung p_{el} und die Pendellänge h_P aufgeführt.

Die spezifischen Größen eignen sich besser zum Vergleich von Räumen unterschiedlicher Fläche. Falls ebenfalls unterschiedliche Nennbeleuchtungsstärken verglichen werden

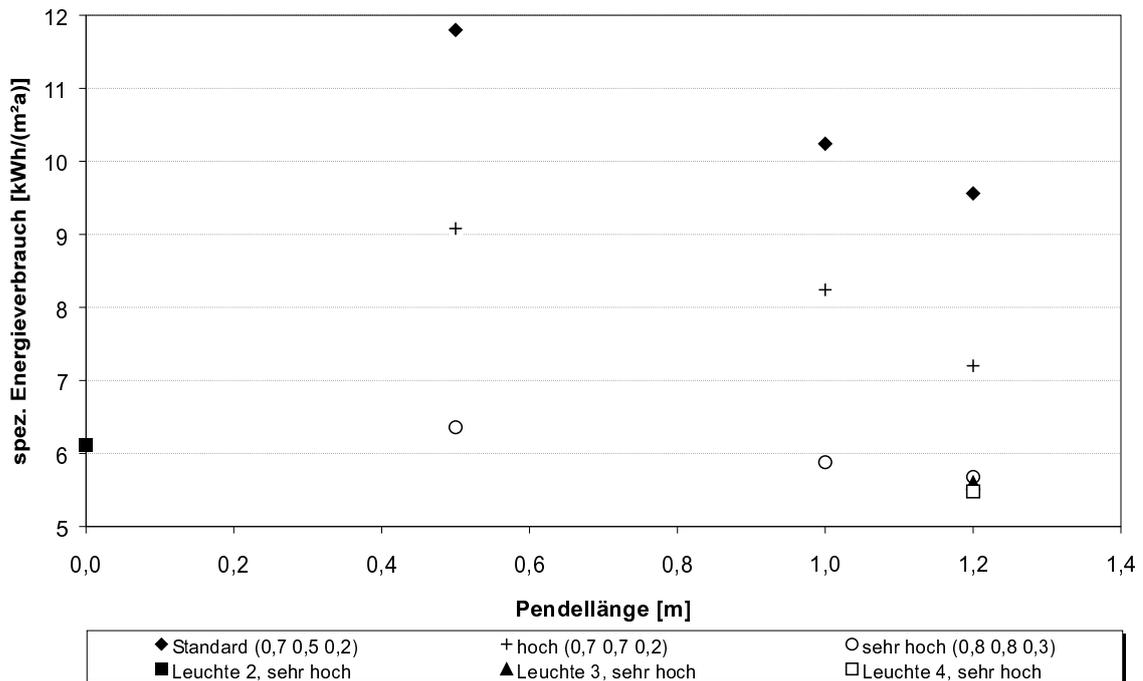


Abbildung 5.2: Minimierung des spez. Energieverbrauchs in Abhängigkeit der Pendellänge, der Reflexionsgrade und des Leuchtentyps

sollen, ist der Energievergleichskennwert Beleuchtung ε_B zu verwenden, der die spezifische Anschlussleistung bezogen auf die geforderte Nennbeleuchtungsstärke wiedergibt [HESS1996]:

$$\varepsilon_B = \frac{p_{\text{Sys}}}{A_R E_N} \quad (5.4)$$

Wie zu erwarten war, sinkt der spezifische Energieverbrauch mit steigenden Reflexionsgraden der Umschließungsflächen. Der abnehmende Energieverbrauch mit größerer Pendellänge begründet sich durch den höheren Raumwirkungsgrad.

Die Unterschiede im spezifischen Energieverbrauch bei unterschiedlichen Leuchtentypen resultieren aus geringfügig höheren Werten im Betriebswirkungsgrad der Leuchten und im Raumwirkungsgrad.

Der Raumwirkungsgrad ist auch die entscheidende Größe für die notwendige Leuchtenanzahl n , um die geforderte Nennbeleuchtungsstärke zu erzielen. Wie aus der Tabelle 5.1 zu entnehmen ist, genügen ab der Variante 2e 4 anstatt 6 Leuchten, wie bei den Varianten 2 bis 2d. Damit verbunden ist eine Reduzierung der spezifischen elektrischen Anschlussleistung p_{el} .

	p_{el} [W/m ²]	e [kWh/(m ² a)]
Grenzwert	15	21,0
Zielwert	11	15,4

Tabelle 5.2: Grenz- und Zielwerte für spezifische elektrische Anschlussleistung p_{el} und spezifischen Energieverbrauch e [VOLZ1999b]

Sowohl die spezifische elektrische Anschlussleistung als auch der spezifische Energieverbrauch werden zukünftig als Richtwerte zur Planung herangezogen. Unterschieden werden hier Grenzwerte als Standard und Zielwerte als Optima. Vorgeschlagene Werte bei einer Nennbeleuchtungsstärke von 500 lx sind in Tabelle 5.2 dargestellt.

Aus den Ergebnissen der Optimierung wird deutlich, dass der maximale spezifische Energieverbrauch bei 6 Leuchten überschritten wird (siehe Tabelle 5.1). Mit einigen Verbesserungsmaßnahmen (Varianten 2e bis 2k) wird der Grenzwert deutlich unterschritten und der Zielwert nur knapp überschritten. Der spezifische Energieverbrauch wird mit Beleuchtungskontrolle und Tageslichtnutzung bei allen Varianten unterschritten. Eine Beleuchtungskontrolle sollte deshalb immer installiert werden.

Sobald obige Ziel- und Grenzwerte verbindlich in Richtlinien vorgeschrieben sind, können entsprechende Abfragen im Berechnungsprogramm eingefügt werden.

Besonders deutlich werden die Energieeinsparpotenziale durch eine Optimierung bei Betrachtung der Variante 2 und der Variante 2h (siehe Abbildung 5.3).

Zwischen dem maximalen spezifischen Energieverbrauch (ungeregelt) der Variante 2 und dem minimalen spezifischen Energieverbrauch (geregelt) der Variante 2h befindet sich ein Faktor 4,2 bzw. eine Energieeinsparung von 76%, obwohl in beiden Varianten dieselbe effiziente Rasterleuchte mit einem Betriebswirkungsgrad von 0,78 eingesetzt wird.

Aus diesem Beispiel wird deutlich, dass eine Optimierung der Beleuchtung zur Minimierung des Energieverbrauchs sinnvoll ist und mit Hilfe des vorgestellten computergestützten Berechnungsprogramms einfach durchzuführen ist.

Diese Einsparungen werden erzielt durch eine Kombination folgender Maßnahmen:

- Reduzierung der Leuchtenanzahl durch erhöhten Raumwirkungsgrad (verbesserte Reflexionsgrade und Erhöhung der Pendellänge) und
- Beleuchtungskontrolle (Tageslichtergänzung, Sollwertanpassung und Kompensation des Lichtstromrückgangs).

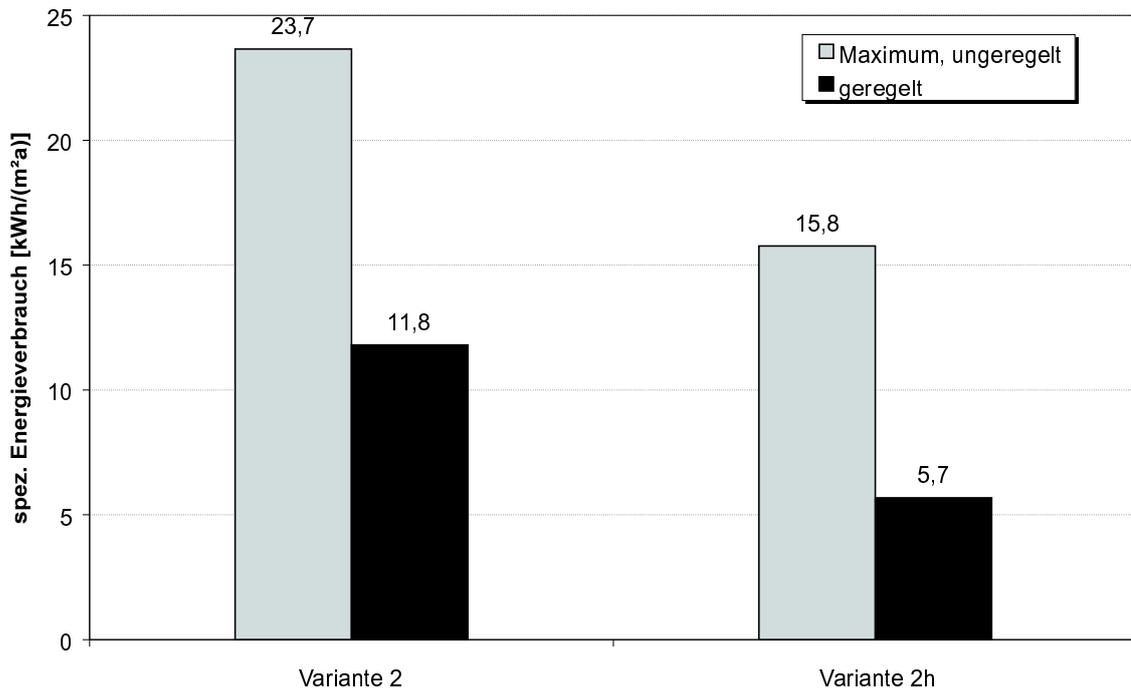


Abbildung 5.3: minimaler und maximaler spezifischer Energieverbrauch vor und nach der Optimierung

5.5 WWW-Schnittstelle

Um der zunehmenden Verbreitung des World-Wide-Web Rechnung zu tragen, wird zusätzlich zur computergestützten Berechnung in einer Tabellenkalkulation (siehe Abschnitt 5.1) eine webbasierte Schnittstelle zur interaktiven Berechnung des Energieverbrauchs künstlicher Beleuchtung erstellt.

Unter einer weltweit erreichbaren Internetadresse¹ befindet sich eine betriebssystemunabhängige, webbasierte Eingabemaske mit den in Abschnitt 5.2 aufgeführten Eingabedaten (siehe Abbildung 5.4).

Diese WWW-Schnittstelle zum entwickelten Berechnungsverfahren ermöglicht es, mit jedem Betriebssystem ohne definierte Anforderungen an Hard- und Software die Berechnung auf dem WWW-Server des Lehrstuhls Technische Gebäudeausrüstung der Universität Dortmund durchzuführen.

Eine Überprüfung auf plausible Eingaben erfolgt mit Hilfe von JavaScript [MÜNZ1999]. Die eigentliche Berechnung läuft serverseitig über ein Programm, welches mit der Programmiersprache Perl erstellt wurde [HAJJ2000]. Die zugrunde liegenden Algorithmen

¹<http://www.tga.bauwesen.uni-dortmund.de/goerres/beleuchtung/>

Uni-Dortmund · Fakultät Bauwesen · Fachgebiete/Fächer B1 · TGA · Mitarbeiter · Görres · Beleuchtungsoptimierung

Veranstaltungen
[Vorlesungen](#)
[Wahlpflichtveranst.](#)
[Veröffentlichungen](#)

Forschung
[Forschungsprojekte](#)

Einrichtungen
[Skripten](#)
[Mailinglisten](#)

Aktuell
[Noten](#)
[Abzuholende Arbeiten](#)
[Aushänge](#)

Mitarbeiter
[Anfahrt](#)

Beleuchtungsoptimierung - Schritt 2: Eingaben
 © Markus Görres, 2000

Raumeigenschaften:

Raumbreite [m]

Raumtiefe [m]

Raumhöhe [m]

Reflexionsgrade [-]

Fensterbreite [m]

Fensterhöhe [m]

Verminderungsfaktor Rahmen [-]

Nutzebene [m]

Verbauung:

Abstand [m]

Höhe [m]

Orientierung:

Nord 0° Ost 90° Süd 180° West 270°

Anwendung:

Nennbeleuchtungsstärke [lx]

Arbeitszeit [h/d]

Leuchte:

Modell

Pendellänge [m]

Document: Done

Abbildung 5.4: webbasierte Eingabemaske (Ausschnitt) als Schnittstelle zum Berechnungsverfahren

sind identisch mit den Algorithmen, die in der Tabellenkalkulation Anwendung finden.

Die Kontrolle der Eingabeparameter sowie der Berechnungsergebnisse obliegt dem Anwender. Analog zur Berechnung mit Hilfe der Tabellenkalkulation kann ebenfalls keine Gewährleistung übernommen werden.

Die Ergebnisse der Berechnung werden ebenso wie bei der computergestützten Berechnung (siehe auch Abschnitt 5.3) tabellarisch ausgegeben. Zusätzlich erfolgt eine grafische Ausgabe des spezifischen Energieverbrauchs der unregulierten und regulierten Beleuchtungsanlage (siehe Abbildung 5.5), die dem Anwender einen sofortigen Eindruck der Energieeinsparung vermitteln und eine Optimierung erleichtern.

Uni-Dortmund · Fakultät Bauwesen · Fachgebiete/Fächer: B1 : TGA · Mitarbeiter: Görres · Beleuchtungsoptimierung

Technische Gebäudeausrüstung suche

Veranstaltungen
[Vorlesungen](#)
[Wahlpflichtveranst.](#)
[Veröffentlichungen](#)

Forschung
[Forschungsprojekte](#)

Einrichtungen
[Skripten](#)
[Mailinglisten](#)

Aktuell
[Noten](#)
[Abzuholende Arbeiten](#)
[Aushänge](#)

Mitarbeiter
[Anfahrt](#)

Beleuchtungsoptimierung - Schritt 3: Ergebnisse
 © Markus Görres, 2000

Beleuchtung:

erforderliche jährliche Belichtung $H_{\text{erf,a}}$ [(klx h)/a]	880
erforderliche Leuchtenanzahl n [-]	4
Betriebswirkungsgrad der Leuchte η_{LB} [-]	0.78
Raumwirkungsgrad η_{R} [-]	0.76

Tageslicht:

jährliche Nutzbelichtung $H_{\text{Nutz,a}}$ [(klx h)/a]	513
relative jährliche Nutzbelichtung $H_{\text{Nutz,a,rel}}$ [%]	58

künstliche Beleuchtung:

jährliche künstliche Belichtung $H_{\text{k,a}}$ [(klx h)/a]	367
max. Energieverbrauch, ungeregelt E_{max} [kWh/a]	394
max. spez. Energieverbrauch, ungeregelt e_{max} [kWh/(m ² a)]	24.3
mittlere Systemleistung $P_{\text{Sys,m}}$ [W]	21.1
Energieverbrauch, geregelt $E_{\text{k,a}}$ [kWh/a]	14.9
spez. Energieverbrauch, geregelt $e_{\text{k,a}}$ [kWh/(m ² a)]	9.2
Energieeinsparung [%]	62

spez. Energieverbrauch [kWh/(m²a)]

Maximum, ungeregelt	24.3
geregelt	9.2

© Markus Görres, Mon Oct 9 16:54:32 2000, www.tga.bauwesen.uni-dortmund.de

Abbildung 5.5: Ausgabe der Berechnungsergebnisse in Form einer HTML-Seite (Ausschnitt)

6 Grafisches Planungswerkzeug

In diesem Kapitel wird ein grafisches Planungswerkzeug konstruiert, welches dem Anwender ermöglicht, mit dem in Kapitel 4 vorgestellten Verfahren ohne aufwendige Rechnungen schnelle Ergebnisse zu erzielen.

6.1 Nomografie

Unter Nomografie wird die bildliche Darstellung gesetzmäßiger Zusammenhänge zwischen veränderlichen Größen verstanden, mit dem Ziel, Ergebnisse komplexer Berechnungen einfach und ohne weitere Hilfsmittel abzulesen [MEYE1953]. Vorteil bei der Anwendung von Nomogrammen ist die vereinfachte Lösung wiederkehrender Aufgaben ohne aufwendige Rechenarbeit [WERT1964].

Die Nomografie stellt neben üblichen kartesischen Koordinatensystemen Funktions- und Doppelleitern bereit. Für mehrere Veränderliche existieren Netz- und Fluchtlinientafeln. Die Nomogrammtypen, die zur Entwicklung des grafischen Planungswerkzeugs erforderlich sind, werden im Folgenden kurz dargestellt.

6.1.1 Doppelleiter

Eine Doppelleiter, auch Funktionsleiter genannt, ermöglicht die Darstellung einer Funktion $y = f(x)$ mit zwei Veränderlichen auf einer Zahlengeraden durch Projektion eines rechtwinkligen Koordinatensystems auf eine Achse [BAY1963]. Praktische Anwendung findet die Doppelleiter z. B. bei der Umrechnung von PS in kW und von der metrischen Einheit cm in die angelsächsische Einheit in (siehe Abbildung 6.1).

6.1.2 Netztafeln

Eine Funktion mit drei Variablen stellt ein dreidimensionales Problem dar (siehe Gleichung 6.1). Netztafeln ermöglichen die Projektion dieser dreidimensionalen Funktion in die Ebene (siehe Abbildung 6.2) [BLIE1977].

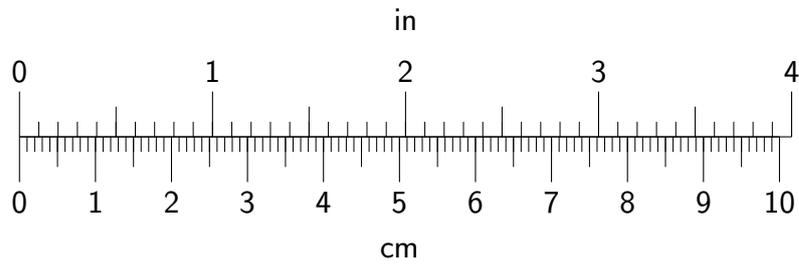


Abbildung 6.1: Doppelleiter zur Umrechnung von Zentimeter in Zoll

$$F(x, y, z) = 0 \quad (6.1)$$

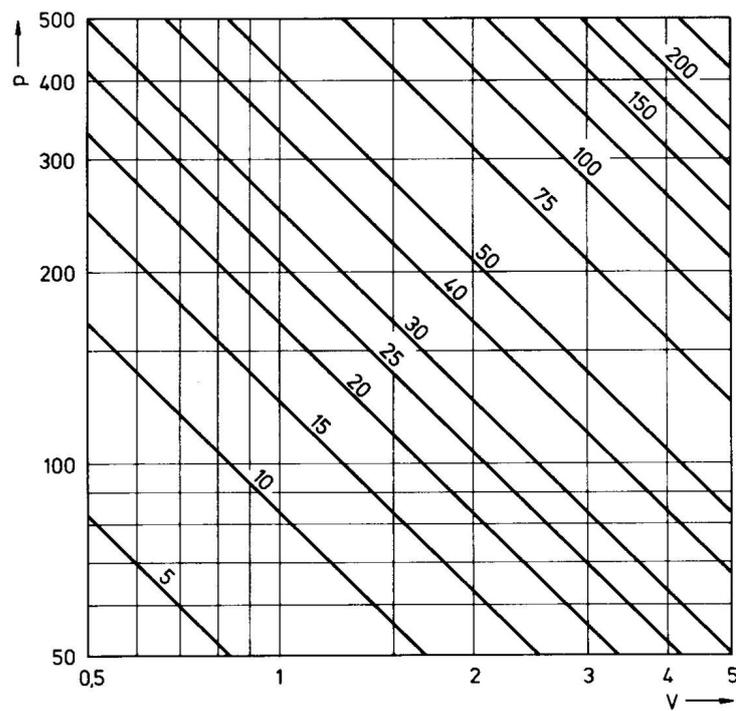


Abbildung 6.2: Netztafel zur Darstellung des allgemeinen Gasgesetz $pV = RT$ als Funktion dreier Veränderlicher [BLIE1977]

In Netztafeln werden zwei Veränderliche an den Achsen, Ordinate und Abszisse, dargestellt. Die dritte Variable wird durch Kurvenscharen, Parallelen oder Strahlen abgebildet.

6.1.3 Leitertafeln

Mit Hilfe von Leitertafeln lassen sich ebenfalls Gleichungen mit drei Veränderlichen (6.1) darstellen. Hier geht allerdings die anschauliche Darstellung eines kartesischen Koordinatensystems verloren.

Die allgemeine Formel für ein Nomogramm mit drei parallelen Leitern lautet:

$$c = a + b \quad (6.2)$$

Durch Logarithmieren lassen sich ebenfalls Produkte und Divisionen auf die Form der Gleichung 6.2 reduzieren (siehe auch Abbildung 6.3).

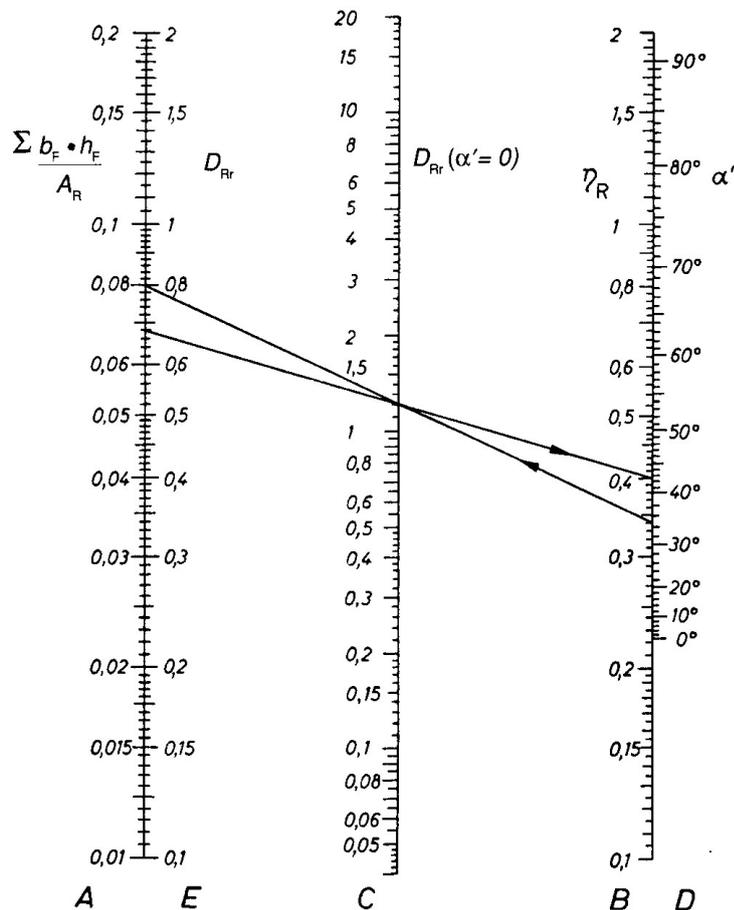


Abbildung 6.3: Nomogramm zur Bestimmung des Innen-Reflexionsanteils D_{Rr} von einseitig befensterten Räumen [LANG1998]

Verschiedene Maßstäbe der Leiter sowie unterschiedliche Teilungen erlauben einen Einsatz für fast alle Anwendungszwecke [WERT1964].

6.1.4 Zusammengesetzte Nomogramme

Funktionen mit mehr als drei Veränderlichen können sowohl mit zusammengesetzten Netztafeln als auch mit Kombinationen von Leitertafeln dargestellt werden. Hierzu wird die Zielfunktion mit der Einführung geeigneter Hilfsvariablen in mehrere Funktionen mit drei Variablen (siehe Gleichung 6.1) umgeformt. Ein verbreitete Lösung eines Systems mit fünf Veränderlichen ist in Abbildung 6.4 dargestellt.

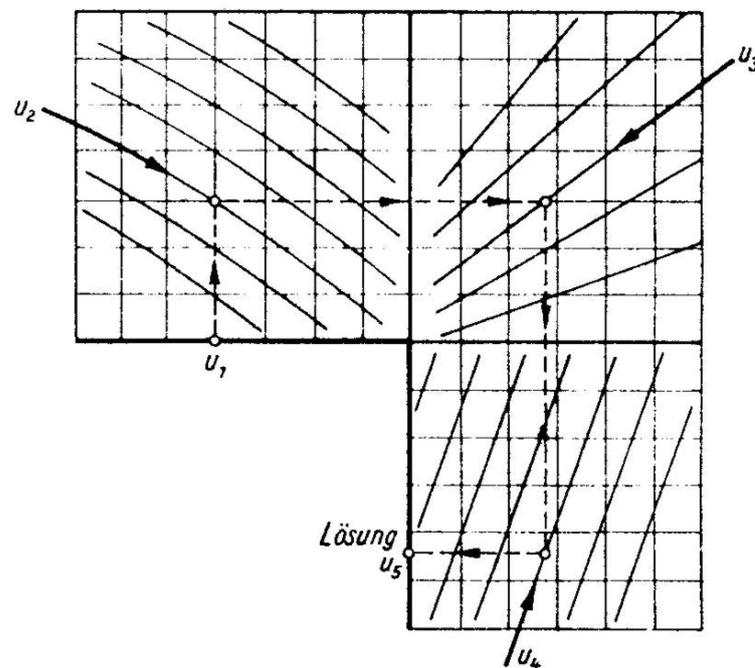


Abbildung 6.4: Zusammengesetztes Nomogramm zur Darstellung einer Funktion mit fünf Veränderlichen [NEWS1955]

6.2 Entwicklung eines Nomogrammes

Zur Darstellung eines funktionalen Zusammenhangs können prinzipiell verschiedene Nomogramme verwendet werden. Bei der Auswahl ist sowohl auf eine ausreichende Übersichtlichkeit als auch eine hinreichende Genauigkeit zu beachten. Da Netztafeln häufig

anschaulicher sind als Leitertafeln in logarithmischer Teilung, werden diese bevorzugt verwendet.

Eine Schwierigkeit bei der Konstruktion zusammengesetzter Netztafeln ist die richtige Auswahl geeigneter Hilfsgrößen und die Umformung der entsprechenden Gleichungen. Hier gilt das Prinzip, alle notwendigen Variablen darzustellen und überflüssige wegzulassen [NEWS1955].

Ein Ablesebeispiel sowie die Darstellung der der Berechnung zugrundeliegenden Formeln erleichtern die Benutzung eines Nomogramms deutlich.

6.2.1 Vereinfachungen und Auswahl der Veränderlichen

Es werden einige Vereinfachungen getroffen, die für die meisten Anwendungsfälle keine Einschränkungen bedeuten, jedoch die Berechnung der gesuchten Größen deutlich vereinfachen und beschleunigen. Eine Berücksichtigung aller 15 Veränderlichen würde einer einfachen und schnellen Berechnung mit einem grafischen Planungswerkzeug entgegenstehen.

Zur Vereinfachung wird im Folgenden nur eine tägliche Arbeitszeit von 8 h/d betrachtet. Für Aussagen zur jährlichen Nutzbelichtung und potenziellen Energieeinsparung ist eine invariante Arbeitszeit vollkommen ausreichend. Ebenfalls lassen die Auswirkungen anderer Parameter besser Rückschlüsse auf Optimierungsmöglichkeiten zu als die tägliche Arbeitszeit.

Ansonsten gelten bei dem grafischen Planungswerkzeug dieselben Einschränkungen wie bereits in Abschnitt 4.1 aufgeführt.

6.2.2 Konstruktion der Nomogramme für das entwickelte Berechnungsverfahren

Aufgrund der zahlreichen Eingangsparameter sind mehrere Nomogramme erforderlich, um das in Kapitel 4 entwickelte Berechnungsverfahren abzubilden. Diese Nomogramme bauen aufeinander auf, können jedoch unabhängig voneinander benutzt werden.

Für die Ermittlung der dimensionslosen Kennzahl der Raumgeometrie k_R wird ein Nomogramm aus zusammengesetzten Netztafeln konstruiert (siehe Abbildung 6.5). Die Hilfsgrößen werden hierbei wegen des einfacheren Verständnisses mit angegeben. Der Nenner der Gleichung 4.2 wird deutlich vereinfacht und auf das Quadrat der Raumtiefe reduziert, ohne damit auf die Genauigkeit Einfluss zu nehmen.

Zur Berechnung des Verbauungshöhenwinkels ε_V wird eine sogenannte Z-Tafel oder N-Nomogramm verwendet (siehe Abbildung 6.6), da die Funktionsgleichung der Z-Tafel (6.3) mit der Formel des Höhenwinkels (siehe Gleichung 4.3) übereinstimmt.

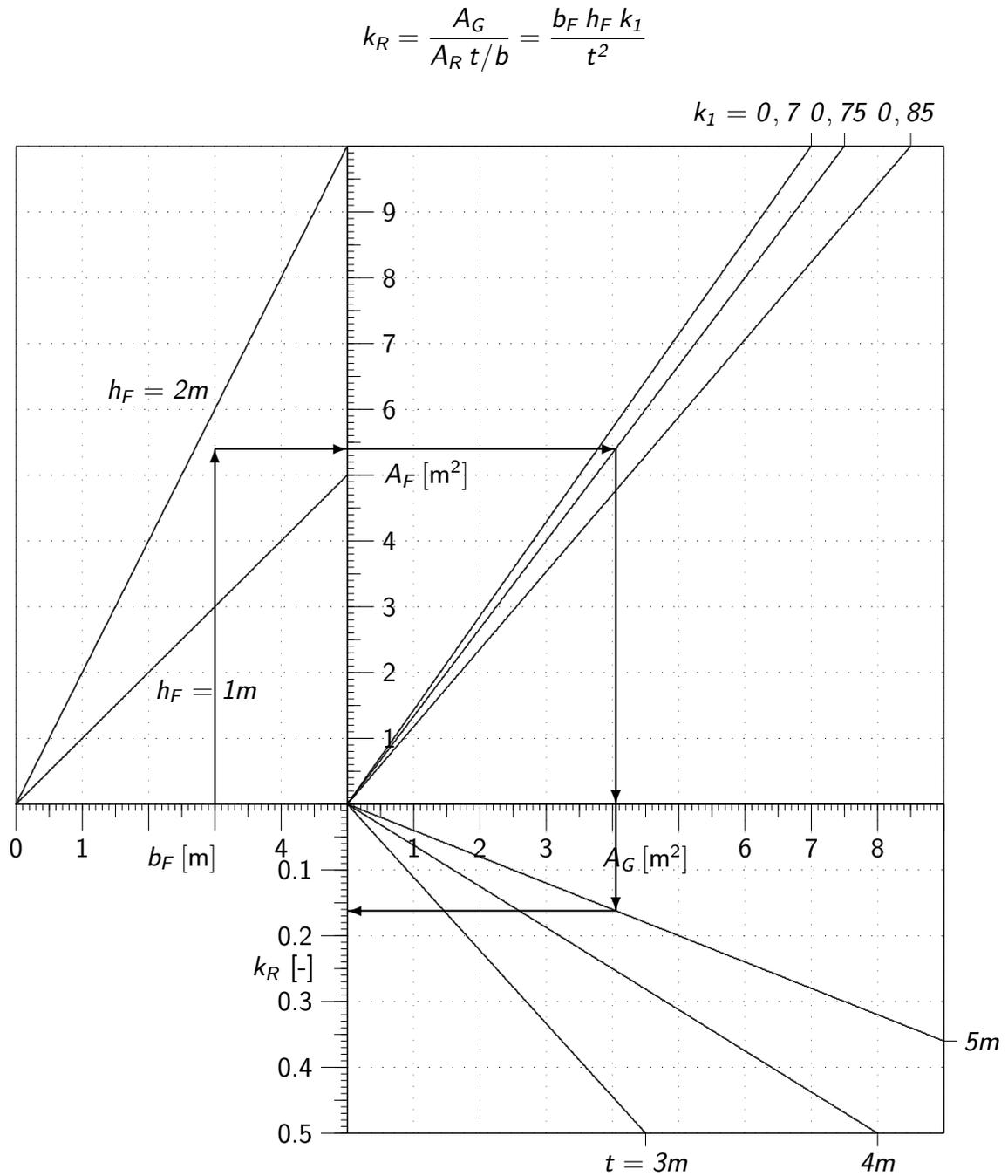


Abbildung 6.5: Nomogramm zur Ermittlung der dimensionslosen Kennzahl k_R

$$f(z) = \frac{f(x)}{f(y)} \quad (6.3)$$

Zur Bestimmung der Teilstrichlängen c der Diagonalleiter mit der Länge l dient folgende Gleichung, wobei die Maßstäbe der parallelen Leitern m_x und m_y in diesem Fall identisch sind:

$$c = \frac{l f(z)}{\frac{m_y}{m_x} + f(z)} \quad (6.4)$$

Bei größeren Abständen oder Höhen der Verbauung als in der Z-Tafel dargestellt, müssen beide Werte durch einen identischen Wert dividiert werden.

$$\varepsilon_V = \arctan\left(\frac{h_V}{t_V}\right)$$

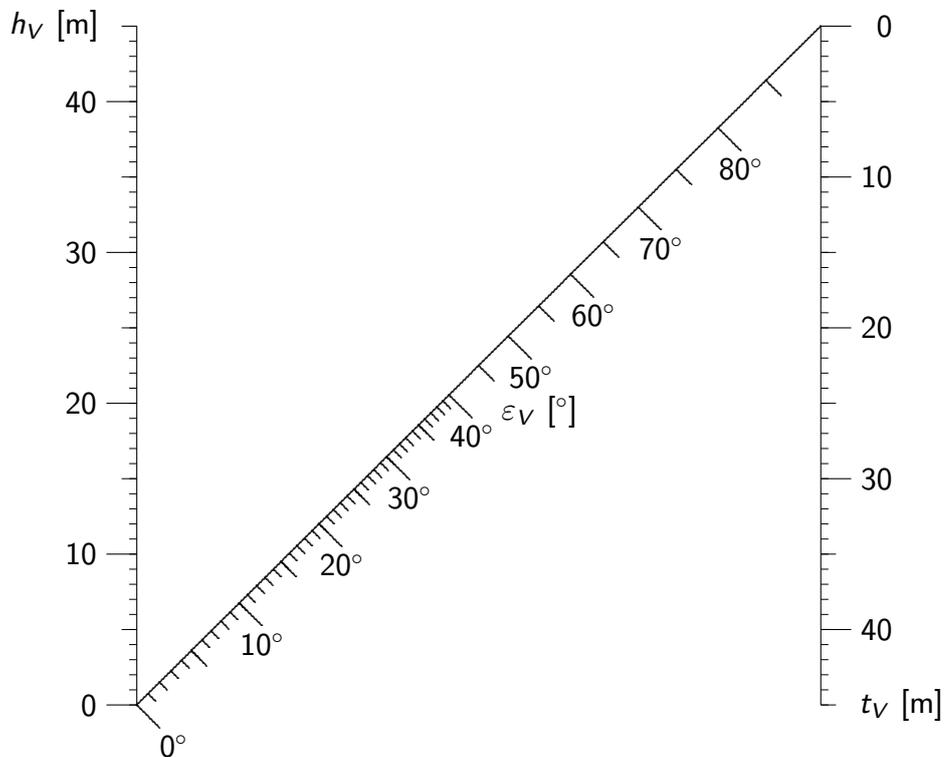


Abbildung 6.6: Z-Tafel zur Ermittlung des Verbauungshöhenwinkels ε_V in Abhängigkeit der Höhe und des Abstands der Verbauung

Das Nomogramm zur Ermittlung der jährlichen Nutzbelichtung $H_{Nutz,a}$ setzt sich ebenfalls aus 3 kombinierten Netztafeln zusammen. Die Hilfsgrößen und Zwischenergebnisse liefern hier jedoch keine weiteren Informationen und werden deshalb nicht angegeben (siehe Abbildung 6.7).

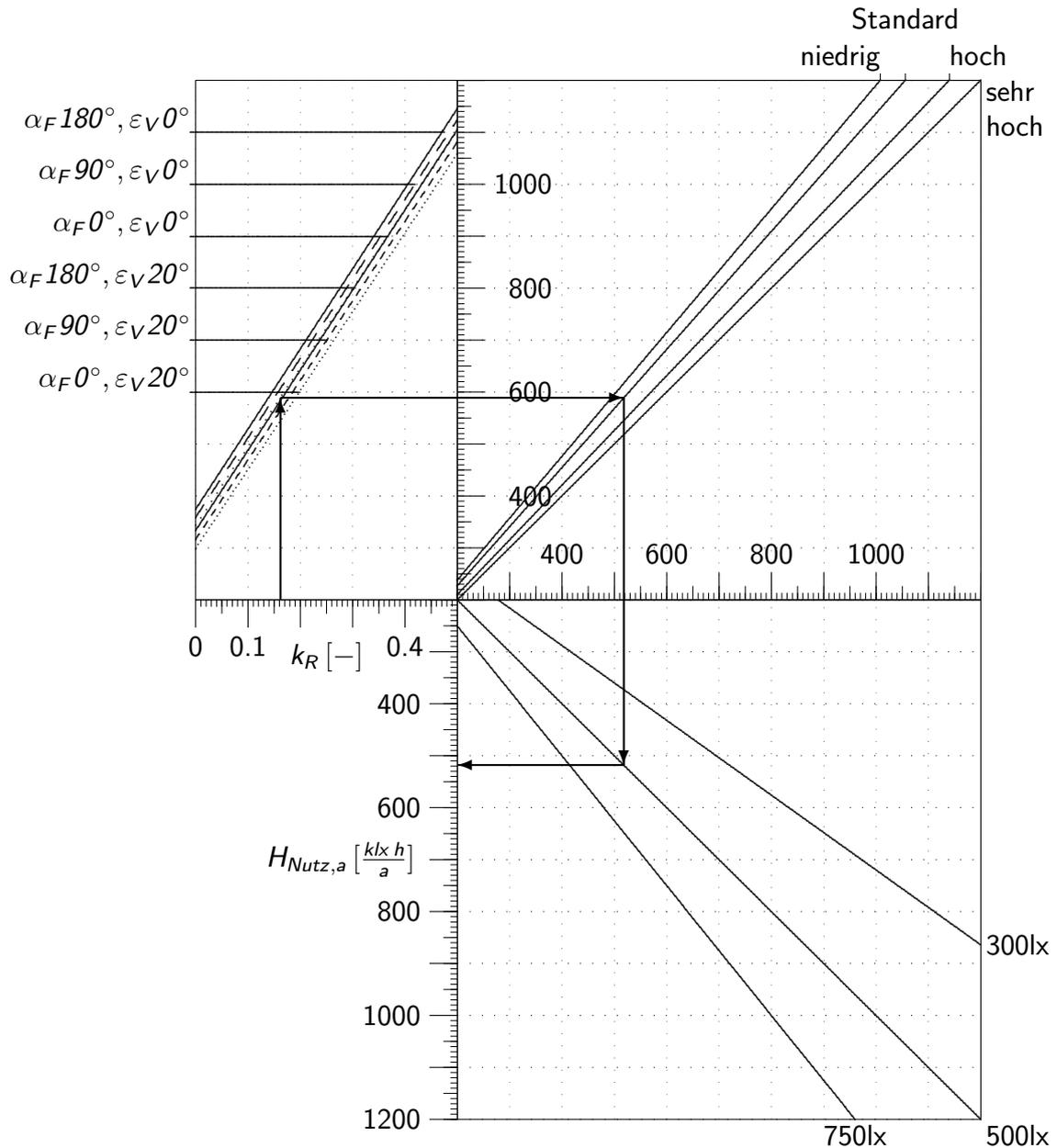


Abbildung 6.7: Nomogramm zur Ermittlung der jährlichen Nutzbelichtung $H_{Nutz,a}$ in Abhängigkeit der Orientierung α_F , des Verbauungswinkels ε_V , der Reflexionsgrade und der Nennbeleuchtungsstärke E_N

Zur Berechnung der jährlichen künstlichen Belichtung $H_{k,a}$ wird eine Kombination aus Leitertafel und Doppelleiter eingesetzt (siehe Abbildung 6.8). Die erforderliche jährliche Belichtung $H_{erf,a}$ ist für die eigentliche Berechnung nicht erforderlich, wird jedoch der

Vollständigkeit halber ebenfalls angegeben.

$$H_{k,a} = H_{\text{erf},a} - H_{\text{Nutz},a} = E_N t_a - H_{\text{Nutz},a}$$

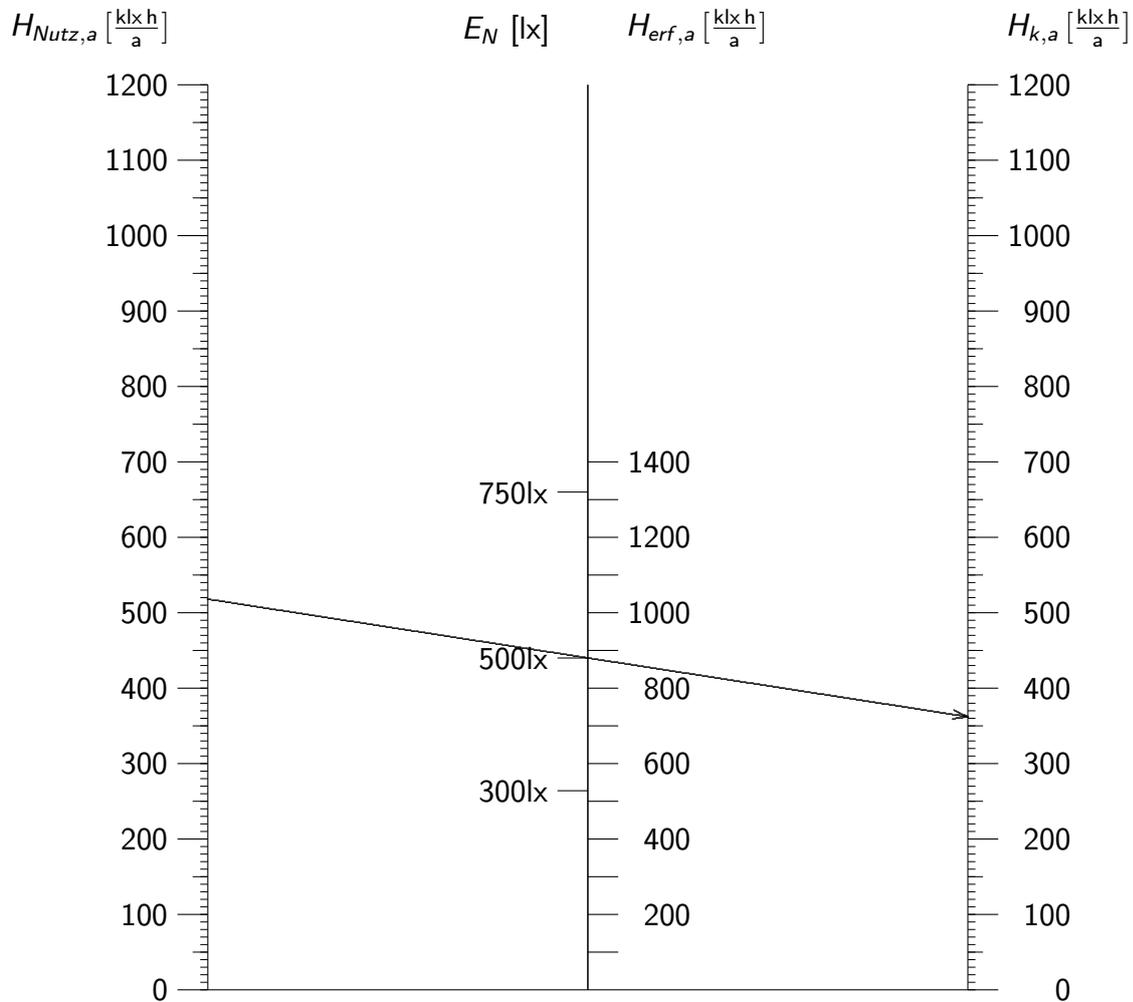


Abbildung 6.8: Leitertafeln zur Ermittlung der jährlichen künstlichen Belichtung $H_{k,a}$ in Abhängigkeit der jährlichen Nutzbelichtung $H_{\text{Nutz},a}$ und der Nennbeleuchtungsstärke E_N

Die Berechnung der Leuchtenanzahl n sowie der mittleren Systemleistung $P_{\text{Sys},m}$ erfordert teilweise ähnliche Rechenoperationen, so dass diese in einem Nomogramm kombiniert werden. Zunächst erfolgt die Ermittlung der erforderlichen Leuchtenzahl anhand der Nennbeleuchtungsstärke E_N mit Hilfe zweier gekoppelter zweifacher quadratischer N-Nomogramme (siehe Abbildung 6.9, Quadranten I und II).

Die allgemeine Schlüsselgleichung zweier rechtwinkliger N-Nomogramme lautet:

$$f_1(x_1) \cdot f_2(x_2) = f_3(x_3) \cdot f_4(x_4) \quad (6.5)$$

$$n = \frac{E_N A_R}{\phi_L \eta_{LB} \eta_R} \quad \text{und} \quad P_{Sys,m} = \frac{1000 H_{k,a} A_R}{1.760 n \eta_{LB} \eta_R 0,9 \phi_L} (P_{Sys} - P_{Verl}) + P_{Verl}$$

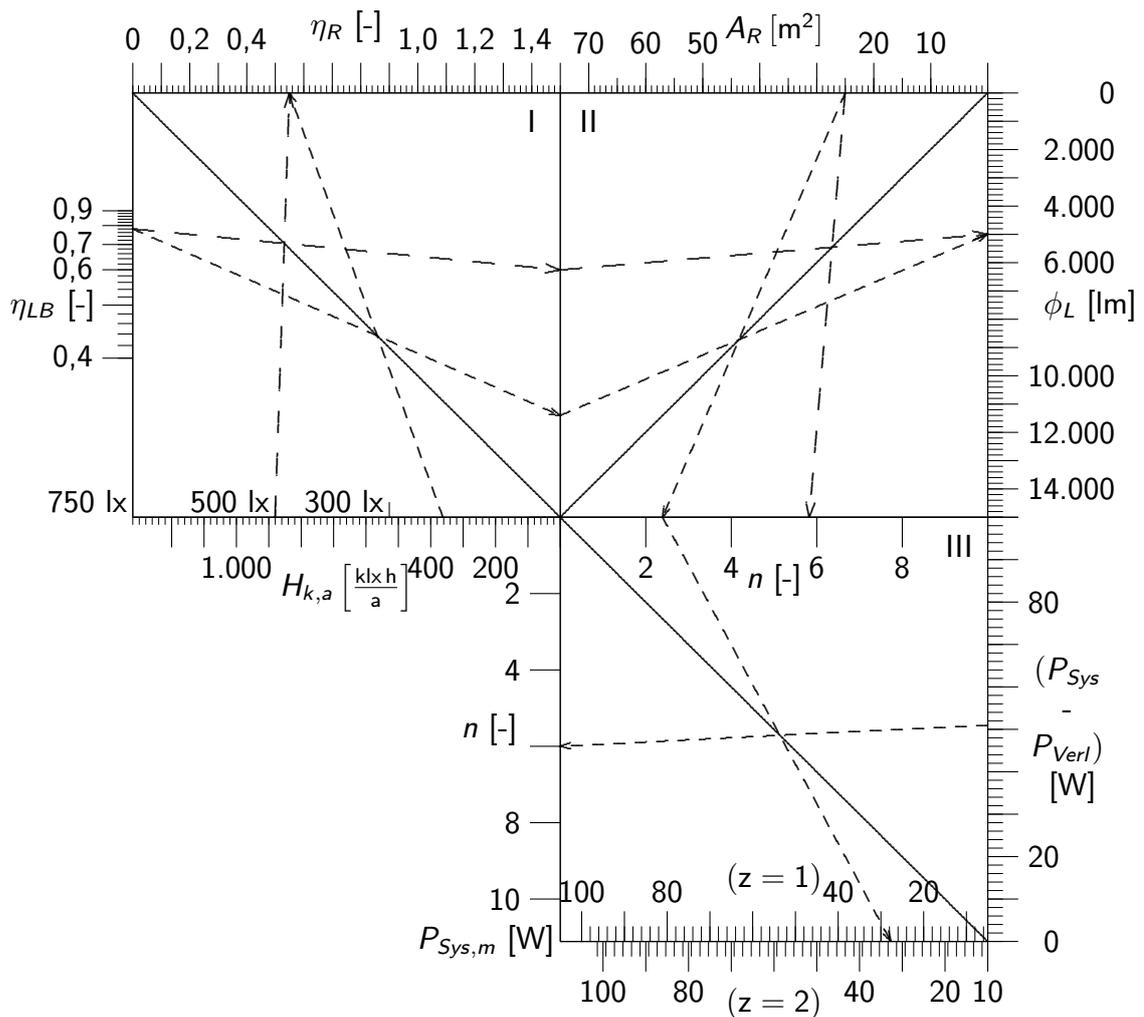


Abbildung 6.9: Nomogramm zur Ermittlung der Leuchtenanzahl n (--- →)
 Nomogramm zur Ermittlung der mittleren Systemleistung $P_{Sys,m}$ (- · - · - →)

Bei den rechtwinkligen N-Nomogrammen wird ausgenutzt, dass der Quotient der Teilgleichungen (siehe Gleichung 6.6) identisch ist und somit ebenfalls die Hilfsdiagonale.

$$f_h = \frac{f_1}{f_3} = \frac{f_4}{f_2} \quad (6.6)$$

Die Vorgehensweise zur Benutzung dieses Nomogrammes wird im Folgenden erläutert. Es werden jeweils die gegenüberliegenden Werte zweier quadratischer N-Nomogramme verbunden (siehe Abbildung 6.9, Quadrant I). Die gesuchte vierte Größe ergibt sich durch Konstruktion einer Linie durch den Schnittpunkt aus der Hilfsdiagonalen und der ersten Linie sowie dem dritten Wert. Die somit ermittelte vierte Größe stellt zugleich den Eingangswert für die zwei quadratischen N-Nomogramme im zweiten Quadranten dar.

Durch doppelte Belegung der Achsen der Nomogramme werden dieselben ebenfalls zur Bestimmung der mittleren Systemleistung verwandt. Die zuvor berechnete Leuchtenanzahl n dient hier ebenfalls als Eingangsparameter. Hierzu sind noch zwei weitere quadratische N-Nomogramme an die bestehenden angekoppelt (siehe Abbildung 6.9, Quadrant III).

Die mittlere Systemleistung wird an der Abszisse der quadratischen N-Nomogramme im 3. Quadranten abgelesen. Je nach Anzahl der Lampen pro Leuchte z , d. h. unterschiedlicher Verlustleistung, wird der Wert auf der oberen oder unteren Skala abgelesen.

Die Ermittlung des jährlichen Energieverbrauchs der künstlichen Beleuchtung $E_{k,a}$ erfolgt durch eine selbsterklärende Netztafel (siehe Abbildung 6.10).

6.3 Anwendung der konstruierten Nomogramme

Mit Hilfe der konstruierten Nomogramme können im wesentlichen drei Anwendungen abgedeckt werden:

- schnelle Berechnung der Nutzbelichtung und des Energieverbrauchs
- anschauliche Auswirkung einzelner Parameter auf die Ergebnisse sowie
- einfache Optimierung der Tageslichtnutzung bzw. Minimierung des Energieverbrauchs.

Die konstruierten Nomogramme erlauben sowohl qualitative als auch quantitative Aussagen.

Eine Beispielrechnung ist bereits zur besseren Anschaulichkeit in den Nomogrammen eingezeichnet. Die Berechnung der Ergebnisse und Zwischenwerte verläuft entlang der in die Nomogramme eingezeichneten Pfeillinien. Die Zwischenergebnisse dienen als Eingangsparameter in den folgenden Nomogrammen.

Es handelt sich hierbei um die bereits in Abschnitt 4.5 berechnete Variante 2. Geringfügige Abweichungen des jährlichen Energieverbrauchs der künstlichen Beleuchtung mit der

computergestützten Berechnung (292 statt 295 $\frac{\text{kWh}}{\text{a}}$) nach Kapitel 5 sind auf Rundungsungenauigkeiten zurückzuführen.

Fehlerquellen und Ungenauigkeiten bei der Benutzung von Nomogrammen resultieren aus Zeichen- und Ablesefehlern. Dies kann entweder zu einer Fehlerfortpflanzung oder zu einer gegenseitigen Kompensation der Fehler führen.

Verglichen mit Abweichungen zwischen theoretischen und praktischen Werten des Energieverbrauchs aufgrund des Nutzerverhaltens sind Ablesefehler bei der Berechnung mittels Nomogrammen minimal. Diese Ungenauigkeiten sind insbesondere deshalb zu vernachlässigen, weil der Schwerpunkt dieses grafischen Planungswerkzeugs darin liegt, in der frühen Planungsphase schnell Ergebnisse zu liefern.

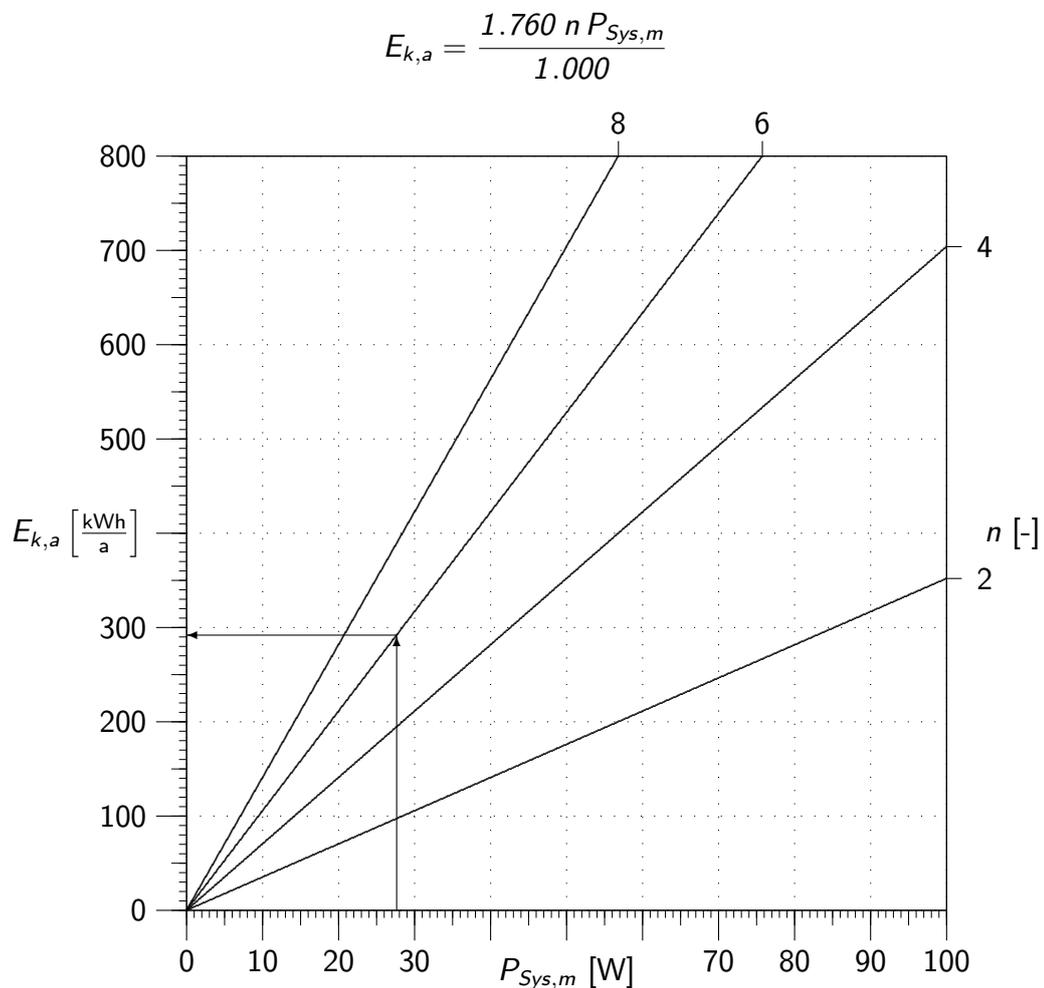


Abbildung 6.10: Nomogramm zur Ermittlung des jährlichen Energieverbrauchs der künstlichen Beleuchtung $E_{k,a}$

Der Vergleich der Berechnungsergebnisse der unterschiedlichen Simulationsprogramme und Rechenverfahren in Abschnitt 4.5 hat ebenfalls gezeigt, dass deutliche Abweichungen auftreten können und somit Ungenauigkeiten bei Nomogrammen durch Zeichen- und Ablesefehler eine untergeordnete Rolle spielen.

Im Gegensatz zu den grafischen Planungshilfsmitteln, die in Abschnitt 3.2.3 vorgestellt wurden, handelt es sich bei diesen konstruierten Nomogrammen um ein umfassenderes Planungswerkzeug, das keine weiteren Rechnungen und Hilfsmittel erfordert.

Aufgrund der einfachen Ermittlung der Berechnungsergebnisse mit Hilfe von Lineal und Bleistift, wird dem Planer aufgezeigt, welche Änderungen einzelner Parameter direkte Auswirkungen auf das Ergebnis haben. Eine Optimierung der Tageslichtnutzung bzw. eine Minimierung des Energieverbrauchs künstlicher Beleuchtung kann somit anschaulich und einfach durchgeführt werden.

7 Zusammenfassung

Optimierte geregelte Beleuchtungsanlagen reduzieren den Energieverbrauch und erfüllen die Anforderungen der Nutzer an eine hohe Qualität der Beleuchtung.

Zur Erzielung eines optimalen Kompromisses ist bereits im frühen Planungsstadium ein entsprechendes Berechnungsverfahren erforderlich. Die meisten existierenden Rechenverfahren sind entweder nur für nicht mehr dem Stand der Technik entsprechende Ein-Aus-Schaltungen gültig oder erfordern weitere Berechnungen zur Ermittlung des Energieverbrauchs seitens des Anwenders. Einige Rechenmethoden weisen prinzipielle Ungenauigkeiten auf und wiederum andere können aufgrund komplexer Berechnungen bzw. mangelnder Einarbeitung/Sachkenntnis zu fehlerhaften Ergebnissen führen.

Das entwickelte Berechnungsverfahren zur Ermittlung des Energieverbrauchs künstlicher Beleuchtung vermeidet die Mängel vorhandener Methoden und erfüllt die Anforderungen an eine einfache und schnelle Berechnung. Im Gegensatz zu vorhandenen Rechenverfahren und Simulationsprogrammen, die nicht in der Lage sind, die Arbeitsweise einer tageslichtabhängigen Beleuchtungsregelung bei der Berechnung des Energieverbrauchs zu berücksichtigen, tragen die Algorithmen des entwickelten Berechnungsverfahrens diesem Verhalten Rechnung. Während andere Rechenverfahren lediglich die gesamte Systemleistung der Leuchten bzw. maximale Wirkungsgrade zur Berechnung des Energieverbrauchs verwenden und damit fehlerhafte Ergebnisse liefern, basiert die Berechnung des Energieverbrauchs mit dem entwickelten Berechnungsverfahren auf einer mittleren Systemleistung. Dadurch werden sowohl die Nutzbelichtung als auch die Charakteristika der eingesetzten Leuchten (Beleuchtungswirkungsgrad, Abstrahlcharakteristik, Pendellänge) berücksichtigt.

Damit das entwickelte Berechnungsverfahren in der Praxis einfach und schnell zu verwenden ist, wird dem Anwender sowohl eine computergestützte Berechnung über eine grafische Benutzeroberfläche als auch ein grafisches Planungswerkzeug zur Verfügung gestellt.

Die computergestützte Berechnung erlaubt eine schnelle und einfache Berechnung ohne Zuhilfenahme weiterer Hilfsmittel und ermöglicht neben einer unmittelbaren Darstellung der Auswirkung einzelner Parameter auf den Energieverbrauch ebenfalls eine Optimierung unter Beibehaltung geforderter Randbedingungen.

Anhand einer Beispielrechnung wird gezeigt, dass durch einige Optimierungsmaßnahmen eine Reduzierung des Energieverbrauchs um 76% von einer unregulierten Beleuchtung zu

einer geregelten und optimierten Beleuchtung erzielt werden kann.

Die konstruierten Nomogramme stellen ein umfassendes grafisches Planungswerkzeug dar, welches nicht nur Zwischenergebnisse liefert, sondern ausgehend von den entscheidenden Eingangsparametern die Berechnung sowohl der Nutzbelichtung als auch des Energieverbrauchs erlaubt.

Die Nomogramme wurden so entwickelt, dass keine weiteren Hilfsmittel oder Rechenwerkzeuge erforderlich sind und eine schnelle Berechnung bereits im frühen Planungsstadium möglich ist.

Mit Hilfe der Nomogramme können sowohl qualitative als auch quantitative Aussagen getroffen werden. Der Anwender kann sowohl anschaulich die Auswirkungen einzelner Parameter auf die Ergebnisse nachvollziehen als auch einfach eine Optimierung der Tageslichtnutzung bzw. Minimierung des Energieverbrauchs erzielen.

Das entwickelte Berechnungsverfahren und dessen Anwendung in einer computergestützten Berechnung und einem grafischen Planungswerkzeug schließt eine Lücke im Bereich der Kunst- und Tageslichtberechnung und dient Planern als schnelles und einfach anzuwendendes Hilfsmittel zur Optimierung der Tageslichtnutzung und Minimierung des Energieverbrauchs.

Literaturverzeichnis

Die Literaturstellen sind entsprechend der Regeln der [DIN1505.2] angegeben, die zur eindeutigen Identifizierungen von Dokumenten hinreichend sind.

- [AGEB1999] Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen: Endenergieverbrauch nach Energieträgern in Deutschland, Frankfurt a. M., 1999.
- [AIZL1997] AIZLEWOOD, M. et. al.: Data sets for the validation of daylighting computer programs, Building Research Establishment, Watford, 1997.
- [ALTM2000] ALTMANN, K., APIAN-BENNEWITZ, P.: Studie zur Anwendung und Grenzen derzeitiger Programmtypen zur photo-realistischen Darstellung von Licht und Beleuchtung in der Architektur, http://www.pab-opto.de/render_vergleich/report1.pdf, 2000.
- [ASR7/1] ASR (idFv. April 1976) 7/1 Sichtverbindung nach außen
- [ASV7] ArbStättV (idFv. 4.12.1996) §7 Beleuchtung
- [ASV23] ArbStättV (idFv. 4.12.1996) §23 Abstandflächen
- [AYDI1981] AYDINLI, S.: Über die Berechnung der zur Verfügung stehenden Solarenergie und des Tageslichtes, VDI-Verlag, Fortschrittsberichte, Nr. 79, 1981.
- [AYDI1984a] AYDINLI, S., KROCHMANN, J.: Solarstrahlung — Wärmegewinn und Kühlleistung, Technik am Bau, Heft 8, S. 563 - 567, 1984.
- [AYDI1984b] AYDINLI, S.: Die relative Nutzungszeit und relative Nutzbelichtung bei Tageslicht im Arbeitsraum. In: Lichttechnische Gesellschaften Deutschlands, der Niederlande, Österreichs und der Schweiz (Veranst.): Licht 84, Gemeinschaftstagung der Lichttechnischen Gesellschaften Deutschlands, der Niederlande, Österreichs und der Schweiz (Mannheim 1984). – Tagungsberichte
- [BAUE1959] BAUER, F. (Hrsg.): Linkes Meteorologisches Taschenbuch, Akademische Verlagsgesellschaft, Leipzig, 1959.

- [BAUO1995] BauO NW (idFv. 7.3.1995) §6 Abstandflächen
- [BAY1963] BAY, A.: Einführung in die Nomographie, Vieweg Verlag, 1963.
- [BECK1989] BECK, P.: Lighting controls offer a wide range of options, Consulting/specifying engineer, Band 6, Heft August, S. 90 – 93, 1989.
- [BELE2000] BELENDORF, H.: Der Einfluß der Sensorik auf die tageslichtabhängige Kunstlichtbeleuchtung. In: Ostbayerisches Technologie-Transfer-Institut e.V. (OTTI) Regensburg (Veranst.): Sechstes Symposium Innovative Lichttechnik in Gebäuden (Staffelstein 2000). – Tagungsberichte
- [BILD1996] BildschArbV (in Kraft getr. am 21.8.1996)
- [BLIE1977] BLIEFERT, C., DEHMS, G., MORAWIETZ, G.: Praktische Nomographie: Die graphische Darstellung von funktionalen Zusammenhängen und das zeichnerische Lösen von Gleichungen mit Beispielen aus dem Bereich der Naturwissenschaften und dem Ingenieurwesen, Verlag Chemie, 1977.
- [BOER1998] DE BOER, J., ERHORN, H.: Survey simple design tools, IEA Task 21 Daylight in Buildings, Subtask C4: Simple design tools, Fraunhofer Institut für Bauphysik, Stuttgart, 1998.
- [BRON1989] BRONSTEIN, I. N., SEMENDJAJEW, K. A.: Taschenbuch der Mathematik, 24. Auflage, Verlag Harri Deutsch, 1989.
- [CAKI1999] ÇAKIR, A. E., ÇAKIR, G.: Licht und Gesundheit: Gesundheits- und Befindlichkeitsstörungen bei der Büro- und Bildschirmarbeit, ERGONOMIC Institut für Arbeits- und Sozialforschung Forschungsgesellschaft mbH, Berlin, 1999.
- [CARR1999] CARROLL, W. L.: Daylighting Simulation: Methods, Algorithms and Resources, DRAFT Working Document, IEA Task 21 - Daylight in Buildings, Subtask C2 - Daylighting Algorithms, 1999.
- [CIE1973] CIE COMMISSION INTERNATIONALE DE L'ECLAIRAGE: Standardisierung der Leuchtdichtevertelung bei klarem Himmel, CIE-Publikation 22, 1973.
- [CIE1994] CIE COMMISSION INTERNATIONALE DE L'ECLAIRAGE: Spatial distribution of daylight — luminance distributions of various reference skies, CIE-Publikation 110, 1994.
- [DEBA1998] DEBATIN, S.: Probleme bei der Tageslichtnutzung mit Relux, mündliche Aussage, 18.9.1998.

- [DIAN2000] DIANO, J.: DALI, digital addressable lighting interface, Dossier Lightech, Heft 5, S. 28 – 32, 2000.
- [DIN1304] Norm DIN 1034 Teil 1 März 1994. Formelzeichen; Allgemeine Formelzeichen
- [DIN1338] Norm DIN 1338 August 1996. Formelschreibweise und Formelsatz
- [DIN1505.2] Norm DIN 1505 Teil 2 Januar 1984. Titelangaben von Dokumenten; Zitierregeln
- [DIN4710] Norm DIN 4710 November 1982. Meteorologische Daten zur Berechnung des Energieverbrauches von heiz- und raumluftechnischen Anlagen
- [DIN5031.3] Norm DIN 5031 Teil 3 März 1982. Strahlungsphysik im optischen Bereich und Lichttechnik; Größen, Formelzeichen und Einheiten der Lichttechnik.
- [DIN5031.4] Norm DIN 5031 Teil 4 März 1982. Strahlungsphysik im optischen Bereich und Lichttechnik; Wirkungsgrade.
- [DIN5034.1] Norm DIN 5034 Teil 1 Oktober 1999. Tageslicht in Innenräumen; Allgemeine Anforderungen
- [DIN5034.2] Norm DIN 5034 Teil 2 Februar 1985. Tageslicht in Innenräumen; Grundlagen
- [DIN5034.3] Norm DIN 5034 Teil 3 September 1994. Tageslicht in Innenräumen; Berechnung
- [DIN5035.1] Norm DIN 5035 Teil 1 Juni 1990. Beleuchtung mit künstlichem Licht; Begriffe und allgemeine Anforderungen.
- [DIN5035.2] Norm DIN 5035 Teil 2 September 1990. Beleuchtung mit künstlichem Licht; Richtwerte für Arbeitsstätten in Innenräumen und im Freien
- [DIN5039] Norm DIN 5039 September 1995. Licht, Lampen, Leuchten; Begriffe, Einteilung.
- [DINEN410] Norm DIN EN 410 Dezember 1998. Glas im Bauwesen - Bestimmung der lichttechnischen und strahlungsphysikalischen Kenngrößen von Verglasungen
- [EHLI1996] EHLING, K., KNOOP, T., AYDINLI, S., KAASE, H.: Integration of daylight, artificial light and electronic controls into office buildings. In: Deutsche Gesellschaft für Sonnenenergie e.V. (Veranst.): EuroSun'96, 10. Internationales Sonnenforum (Freiburg 1996). – Tagungsberichte

- [EHLI1997] EHLING, K., KNOOP, T.: Energetisch und ergonomisch optimierte Beleuchtung durch innovative Tageslicht- und Installationsbussysteme. In: Lux Europa 1997, The 8th European Lighting Conference (Amsterdam 1997). – Tagungsberichte
- [EMBR1996] EMBRECHTS, R.: Energieeinsparung und Beleuchtung: macht Platz für Individualität! In: Lichttechnische Gesellschaften Deutschlands, der Niederlande, Österreichs und der Schweiz (Veranst.): Licht 96, 12. Gemeinschaftstagung der Lichttechnischen Gesellschaften Deutschlands, der Niederlande, Österreichs und der Schweiz (Leipzig 1996). – Tagungsberichte
- [ERHO1999] ERHORN, H., DIRKSMÖLLER, M.: Adeline 3.0 Advanced Daylighting and Electric Lighting Integrated New Environment : Documentation of the Software Package ADELIN, Version 3, IEA Task 21 Daylight in Buildings, Subtask C5: Adeline 3.0, Fraunhofer Institut für Bauphysik, Stuttgart, 1999.
- [FELD1989] FELDMANN, D.: Repetitorium der Ingenieur-Mathematik, Teil 2, Verlag C. Feldmann, 1989.
- [FGL1996] FGL FÖRDERGEMEINSCHAFT GUTES LICHT: Wirtschaftlicher Lichtkomfort mit Beleuchtungselektronik, Informationen zur Lichtanwendung, Heft 12, Frankfurt a. M., 1996.
- [FISC1982] FISCHER, U.: Tageslichttechnik, Verlag R. Müller, 1982.
- [FLEI2000] FLEISCHER, S., KRUEGER, H., SCHIERZ, C.: Einfluss von Helligkeitsverteilungen und Lichtfarben auf den Menschen im Büro. In: Ostbayerisches Technologie-Transfer-Institut e.V. (OTTI) Regensburg (Veranst.): Sechstes Symposium Innovative Lichttechnik in Gebäuden (Staffelstein 2000). – Tagungsberichte
- [FÖLL1994] FÖLLINGER, O.: Regelungstechnik, Hüthig Verlag, 4. Auflage, 1994.
- [FONT1999] FONT, M. et. al.: Validation of daylighting simulation programs, IEA Task 21 Daylight in Buildings, Subtask C1: Validation of daylighting simulation programs, Ecole Nationale des Travaux Publics de l'Etat, Vaulx-en-Velin Cedex, 1999.
- [FREI1992] FREIDEMANN, J., WEIGAND, D. E.: Lighting Controls for Managing Energy, Lighting Design + Application, Band 22, Heft 2, S. 32 – 36, 1992.

- [GÖRR1999] GÖRRES, M.: Einregulierung tageslichtabhängiger Beleuchtungsanlagen, Licht, Heft 11/12, S. 1076 – 1080, 1999.
- [GÖRR2000] GÖRRES, M., SCHUBERT, G.: Energiekosteneinsparung und Komfortsteigerung, DBZ, Sonderheft Büro+Architektur, S. 84 – 89, 2000.
- [GOLL2000] GOLLER, M., REISE, C.: Über die Veränderlichkeit des Tageslichtes. In: Ostbayerisches Technologie-Transfer-Institut e.V. (OTTI) Regensburg (Veranst.): Sechstes Symposium Innovative Lichttechnik in Gebäuden (Staffelstein 2000). – Tagungsberichte
- [GREU1995] GREULE, R.: Wirtschaftliches Lichtmanagement im Büro, Licht & Architektur, Heft 9, S. 74 – 80, 1995.
- [GUTJ1995] GUTJAHR, J., MÜLLER, H. F. O., BURG, M.: Lichtlenkung: Natürliche Beleuchtung von Gebäuden mit Lichtlenkgläsern, Intelligente Architektur, Heft 3, S. 76 – 79, 1995.
- [GUJE1996] GUJER, H. U.: Sparpotential „Automatischer Lichtschalter“ – Studie einer Beleuchtungssanierung an der Eidg. Techn. Hochschule in Zürich. In: Lichttechnische Gesellschaften Deutschlands, der Niederlande, Österreichs und der Schweiz (Veranst.): Licht 96, 12. Gemeinschaftstagung der Lichttechnischen Gesellschaften Deutschlands, der Niederlande, Österreichs und der Schweiz (Leipzig 1996). – Tagungsberichte
- [HAJJ2000] HAJJI, F.: Perl: Einführung, Anwendungen, Referenz, Verlag Addison-Wesley-Longmann, 2000.
- [HAUS1983] HAUSER, G.: Passive Sonnenenergienutzung durch Fenster, Außenwände und temporäre Wärmeschutzmaßnahmen – Eine einfache Methode zur Quantifizierung durch k_{eq} -Werte, HLH, Band 34, Heft 4, S. 144 – 153, Heft 5, S. 200 – 204, und Heft 6, S. 259 – 265, 1983.
- [HAUS1998] HAUSER, G.: Planungsinstrument für die Ermittlung des Jahres-Strombedarf für Kunstlicht: Fraunhofer IRB Verlag, 1998 (Bauforschungsberichte F 2340/2).
- [HEA1999] HEA Hauptberatungsstelle für Energieanwendung e.V.: Struktur des Stromverbrauchs 1998, Frankfurt a. M., 1999.
- [HEIB1998] HEIBEL, B.: Verfahren zur Bestimmung von Kunstlicht-Einschaltzeiten, Dissertation, Universität Kassel, 1998.
- [HEES1996] HEESE, J., MÜLLER, T., NEYEN, A., STOLZENBERG, K.: Beleuchtungsplanungsprogramme -Ein Vergleich der Berechnungsergebnisse mit

- den in Versuchsräumen gemessenen Werten. In: Lichttechnische Gesellschaften Deutschlands, der Niederlande, Österreichs und der Schweiz (Veranst.): Licht 96, 12. Gemeinschaftstagung der Lichttechnischen Gesellschaften Deutschlands, der Niederlande, Österreichs und der Schweiz (Leipzig 1996). - Tagungsberichte
- [HENT1994] HENTSCHEL, H.-J.: Licht und Beleuchtung: Theorie und Praxis der Lichttechnik, Hüthig-Verlag, 1994.
- [HESS1996] HESSISCHES MINISTERIUM FÜR UMWELT, ENERGIE, JUGEND, FAMILIE UND GESUNDHEIT (Hrsg.): Elektrische Energie im Hochbau : Leitfaden Elektrische Energie, Wiesbaden, 1996.
- [HEUS1991] HEUSLER, W.: Experimentelle Untersuchung des Tageslichtangebotes und dessen Auswirkungen auf die Innenraumbeleuchtung, Dissertation, Universität Berlin, 1991.
- [HOPK2000] HOPKIRK, N., STOFFEL, J., DIRKSMÖLLER, M.: Adeline 3 User's Manual, 2000.
- [HUNT1977] HUNT, D. R. G.: Simple expressions for predicting energy savings from photo-electric control of lighting, Lighting Research and Technology, Band 9, Heft 2, S. 93 – 102, 1977.
- [HUNT1979b] HUNT, D. R. G.: The use of artificial lighting in relation to daylight levels and occupancy, Building and Environment, Vol. 14, S. 21 – 33, 1979.
- [HUNT1980] HUNT, D. R. G.: Predicting artificial lighting use - a method based upon observed patterns of behaviour, Lighting Research and Technology, Band 12, Heft 1, S. 7 – 14, 1980.
- [IES1968] IES ILLUMINATING ENGINEERING SOCIETY: The calculation of direct illumination from linear sources, Technical Report No. 11, 1968.
- [IES1995] IES ILLUMINATING ENGINEERING SOCIETY: Standard file format for electronic transfer of photometric data, Publikation IESNA LM-63-1995, 1995.
- [IGUZ1998] IGUZZINI: Sistema di illuminazione Variabile a Regolazione Automatica (SIVRA) per Ambienti Privi di Finestre, 1998.
- [JORD1992] JORDAN, B., SZENTAL, P.: Lighting controls: reaping the benefit, Australian, Asian & Pacific electrical world, Heft 7, S. 20 – 24, 1992.

- [KLIN1994] KLINKER, W.: Energieoptimierung durch Lichtmanagement: Zweidraht-Bussystem automatisiert die Beleuchtung komplexer Gebäude, Gebäude-technik, Heft 1, S. 10 – 14, 1994.
- [KNOO1997] KNOOP, T., EHLING, K., AYDINLI, S., KAASE, H.: Investigation of daylight redirecting systems and daylight responsive lighting control systems. In: Right Light 4, 4th European Conference on energy-efficient lighting (Kopenhagen 1997). – Tagungsberichte, Band 2
- [KNOO1998] KNOOP, P. T.: Tageslichtabhängige Beleuchtungssysteme auf der Basis von Installationsbussen, VDI Verlag, 1998.
- [KOF1997] KOFER, M.: VBA-Programmierung mit Excel 97, Verlag Addison-Wesley, 1997.
- [KOKO2000] KOKOSCHKA, S.: Zuverlässigkeit lichttechnischer Planungsprogramme, Licht + Architektur, Heft 1, S. 62 – 65, 2000.
- [KÖST2000] KÖSTER, H.: Patente der Tageslichtlenkung und Raumtiefenausleuchtung — ein Beitrag zur passiven Solararchitektur, das bauzentrum, Heft 4, S. 76 – 79, 2000.
- [KROC1964] KROCHMANN, J.: Neueres vom Tageslicht in Innenräumen, Lichttechnik, Heft 12, S. 585 – 590, 1964.
- [KROC1965] KROCHMANN, J.: Über die Berechnung des Tageslichtquotienten bei klarem Himmel, Lichttechnik, Heft 8, S. 91A – 94A, 1965.
- [KROC1977] KROCHMANN, J.: Beleuchtung, Wärmeeinstrahlung und direkte Besonnung durch Seitenfenster in Innenräumen, Technik am Bau, Heft 4, S. 405 – 408, 1977.
- [KROC1989] KROCHMANN, J.: Künstliche Beleuchtung und Tageslicht, Technik am Bau, Heft 5, S. 427 – 434, 1989.
- [LAHM1999] LAHME, A.: Grafische Bestimmung von Tageslichtquotienten in Räumen. In: Ostbayerisches Technologie-Transfer-Institut e.V. (OTTI) Regensburg (Veranst.): Fünftes Symposium Innovative Lichttechnik in Gebäuden (Staffelstein 1999). – Tagungsberichte
- [LANG1998] LANGE, H.: Handbuch für Beleuchtung, 5. Auflage, ecomed Verlag, 1992, 1. Ergänzungslieferung, 1998.
- [LBNL1998] LAWRENCE BERKELEY NATIONAL LABORATORY: Radiance, <http://radsite.lbl.gov/radiance/>, 1998.

- [LECH1996] LECHER, T.: Sparpotential „Automatischer Lichtschalter“ – Präsenzmelder schalten Energie bedarfsabhängig. In: Lichttechnische Gesellschaften Deutschlands, der Niederlande, Österreichs und der Schweiz (Veranst.): Licht 96, 12. Gemeinschaftstagung der Lichttechnischen Gesellschaften Deutschlands, der Niederlande, Österreichs und der Schweiz (Leipzig 1996). – Tagungsberichte
- [LEE1998] LEE, E. S., DI BARTOLOMEO, D. L., SELKOWITZ, S. E.: Thermal and daylighting performance of an automated venetian blind and lighting system in a full-scale private office, *Energy and Buildings*, Band 29, S. 47 – 63, 1998.
- [LEVY1980] LEVY, A. W.: Lighting Controls, Patterns of Lighting Consumption, and Energy Conservation, *IEEE Transactions on Industry Applications*, Heft 3, S. 419 – 427, 1980.
- [LITG1988] LITG DEUTSCHE LICHTTECHNISCHE GESELLSCHAFT E.V.: Projektierung von Beleuchtungsanlagen nach dem Wirkungsgradverfahren / STOLZENBERG, K. (Bearb.), Publikation Nr. 3.5, 5. Auflage, Berlin, 1988.
- [LITT1990] LITTLEFAIR, P. J.: Innovative daylighting: review of systems and evaluation methods, *Lighting Research and Technology*, Band 22, Heft 1, S. 1 – 17, 1990.
- [LITT1998] LITTLEFAIR, P. J.: Predicting lighting energy use under daylight linked lighting controls, *Building research & information*, Heft 4, S. 208 – 222, 1998.
- [LYNE1990] LYNES, J. A., LITTLEFAIR, P. J.: Lighting energy savings from daylight: Estimation at the sketch design stage, *Lighting Research and Technology* 22(3), S. 129 – 137, 1990.
- [MANI1996] MANICCIA, D.: They turn off the lights, *IAEEL newsletter*, S. 9 – 12, 1996.
- [MEYE1953] MEYER ZUR CAPELLEN, W.: Leitfaden der Nomographie, Springer Verlag, 1953.
- [MIST1997] MISTRICK, R. G., THONGTIPAYA, J.: Analysis of daylight photocell placement and view in a small office, *Journal of the Illuminating Engineering Society*, Band 26, Heft 2, S. 150 – 158, 1997.
- [MUCK1961] MUCK, E., BODMANN, H.-W.: Die Bedeutung des Beleuchtungsniveaus bei praktischer Sehtätigkeit, *Lichttechnik*, Band 13, Heft 10, S. 502 – 507, 1961.

- [MÜLL1992] MÜLLER, H.: Solartechnik für den klimagerechten Bürobau, Deutsche Bauzeitschrift, Heft 4, S. 553 – 558, 1992.
- [MÜNZ1999] MÜNZ, S., NEFZGER, W.: HTML-4.0-Handbuch : HTML 4.0 – JavaScript – DHTML – Perl, Franzis Verlag, 1999.
- [NAGE1995] NAGEL, T., SERICK, F., KAASE, H.: Farbtemperaturänderungen von Leuchtstofflampen bei Variation der Eingangsleistung, Licht, Heft 7/8, S. 654 – 657, 1995.
- [NEEM1984a] NE'EMAN, E.: A comprehensive approach to the integration of daylight and electric light in buildings, Energy and Buildings, Heft 6, S. 97 – 108, 1984.
- [NEEM1984b] NE'EMAN, E., SWEITZER, G., VINE, E.: Office worker response to lighting and daylighting issues in workspace environments: a pilot survey, Energy and Buildings, Heft 6, S. 159 – 171, 1984.
- [NEEM1998] NE'EMAN, E.: Daylight availability database for energy efficient integration with electric light, Journal of the illuminating engineering society, Band 27, Heft 2, S. 59 – 66, 1998.
- [NEWS1955] NEWSKI, B. A.: Praktikum der Nomogramm-Konstruktionen, Akademie Verlag, 1955.
- [PAUL1995] PAULE, B., COMPAGNON, R., SCARTEZZINI, J.-L.: Towards a new daylighting design computer-tool. In: Right-Light Three conference (Newcastle upon Tyne, England, 1995). – Proceedings
- [PERE1990] PEREZ, R., INEICHEN, P., SEALS, R., MICHALSKY, J., STEWART, R.: Modeling daylight availability and irradiance components from direct and global irradiance, Solar Energy, Band 44, Heft 5, S. 271 – 289, 1990.
- [REIN1999] REINHART, C. F. et. al.: Planung eines Büroneubaus - Tageslichtsimulation als Entscheidungshilfe in der Entwurfsphase. In: Ostbayerisches Technologie-Transfer-Institut e.V. (OTTI) Regensburg (Veranst.): Fünftes Symposium Innovative Lichttechnik in Gebäuden (Staffelstein 1999). – Tagungsberichte
- [RELU1999] RELUX INFORMATIK AG: Relux Version 2.3 Handbuch, Basel, 1999.
- [RUBI1984a] RUBINSTEIN, F.: Photoelectric control of equi-illumination lighting systems, Energy and Buildings, Heft 6, S. 141 – 150, 1984.

- [RUBI1984b] RUBINSTEIN, F. M., KARAYEL, M.: The measured energy savings from two lighting control strategies, IEEE Transactions of industry applications, Band 20, Heft 5, S. 1189 – 1197, 1984.
- [RUBI1989] RUBINSTEIN, F., WARD, G., VERDERBER, R.: Improving the performance of photo-electrically controlled lighting systems, Journal of the Illuminating Engineering Society, Band 18, S. 70 – 94, 1989.
- [RUBI1993] RUBINSTEIN, F., SIMINOVITCH, M., VERDERBER, R.: Fifty percent energy savings with automatic lighting controls, IEEE Transactions on industry applications, Band 29, Heft 4, S. 768 – 773, 1993.
- [RUND1991] RUNDQUIST, R. A.: Daylighting controls: orphan of HVAC design, ASHRAE Journal, Heft 11, S. 30 – 34, 1991.
- [SAND2000a] SANDNER, U.: Der Mensch im (Licht-)Fokus, Licht + Architektur, Heft 1, S. 72 – 75, 2000.
- [SAND2000b] SANDNER, U.: Lichtmanagement intelligent gelöst, elektroborse, Heft 3, S. 54 – 61, 2000.
- [SAUE1999] SAUER, M., SCHMIDT, M.: Photobiologische Lichtplanung, Professional Lighting Design, Heft 6, S. 32 – 35, 1999.
- [SAUE2000] SAUER, M.: Photobiologische Lichtplanung - Von der Lichttherapie zur Lichthygiene. In: Ostbayerisches Technologie-Transfer-Institut e.V. (OTTI) Regensburg (Veranst.): Sechstes Symposium Innovative Lichttechnik in Gebäuden (Staffelstein 2000). – Tagungsberichte
- [SCHÄ1998] SCHÄFER, R.: Strom sparen: Neue Beleuchtungsanlagen für Bürobauten senken Energieverbrauch deutlich, Maschinenmarkt, Heft 16, S. 26 – 28, 1998.
- [SCHR1996] SCHRUMM, L., PARKER, D. S.: Daylighting dimming and energy savings: the effects of window orientation and blinds, ASME International Solar Energy Conference, S. 507 – 516, San Antonio, 1996.
- [SIEB1997] SIEBERT, L.: Virtualität und Realität von Energiekennzahlen, HLH, Band 48, Heft 8, S. 20 – 23, 1997.
- [SKEL1999] SKELLY, M., WILKINSON, M.: Blinded by the light?, Building Services Journal, Heft 12, S. 33 – 34, 1999.
- [SLAT1996] SLATER, A., BORDASS, B., HEASMAN, T.: Give people control of lighting controls, IAEEEL newsletter, Heft 3, S. 7 – 8, 1996.

- [STOC1990] STOCKMAR, A., EULUMDAT — ein Leuchten-Datenformat für den europäischen Beleuchtungsplaner. In: Lichttechnische Gesellschaften Deutschlands, der Niederlande, Österreichs und der Schweiz (Veranst.): Licht 90, Gemeinschaftstagung der Lichttechnischen Gesellschaften Deutschlands, der Niederlande, Österreichs und der Schweiz (Rotterdam 1990). – Tagungsberichte
- [STOC1996] STOCKMAR, A., EULUMDAT/2, ein bewährtes Leuchten-Datenformat in erweiterter Form. In: Lichttechnische Gesellschaften Deutschlands, der Niederlande, Österreichs und der Schweiz (Veranst.): Licht 96, 12. Gemeinschaftstagung der Lichttechnischen Gesellschaften Deutschlands, der Niederlande, Österreichs und der Schweiz (Leipzig 1996). – Tagungsberichte
- [SZER1994a] SZERMAN, M.: Auswirkung der Tageslichtnutzung auf das energetische Verhalten von Bürogebäuden, Dissertation, Universität Stuttgart, 1994.
- [SZER1996a] SZERMAN, M.: Auswirkungen der Tageslichtnutzung auf das energetische Verhalten von Bürogebäuden, Bauphysik, Band 18, Heft 5 und 5, S. 97 - 109 und S. 149 – 156, 1996.
- [SZER1996b] SZERMAN, M.: Planungsgrundlagen Licht: Zum Umgang mit dem Tageslichtquotienten, AIT, Heft 9, S. 78 – 82, 1996.
- [SZER1996c] SZERMAN, M.: SUPERLINK - Ein dynamisches Rechenverfahren zur Bestimmung der Lichteinschaltzeiten tageslichtabhängig geregelter Beleuchtung, Gesundheits-Ingenieur, Band 117, Heft 1, S. 29 – 34, 1996.
- [TREG1980] TREGENZA, P. R.: The daylight factor and actual illuminance ratios, Lighting Research and Technology, Vol. 12, No. 2, S. 64 – 68, 1980.
- [TRIL1997] TRILUX-LENZE GmbH: Beleuchtungsplanung : Lichttechnik – Elektrotechnik, Arnsberg, 1997.
- [TRIL1998] TRILUX-LENZE GmbH: Lichtmanagementsystem LC 200, Produktbeschreibung, Arnsberg, 1998.
- [VDI6011] Norm VDI 6011 Teil 1 Manuskript Stand Juni 2000. Optimierung von Tageslichtnutzung und künstlicher Beleuchtung; Allgemeines
- [VERD1984] VERDERBER, R. R., RUBINSTEIN, F. M.: Mutual impacts of lighting controls and daylighting applications, Energy and Buildings, Heft 6, S. 133 – 140, 1984.

- [VINE1998] VINE, E. LEE, E., CLEAR, R., DI BARTOLOMEO, D., SELKOWITZ, S.: Office worker response to an automated venetian blind and electric lighting system: a pilot study, *Energy and Buildings*, Band 28, S. 205 – 218, 1998.
- [VÖLK1998] VÖLKER, S. et. al.: Ein neues Bewertungsverfahren der Wirtschaftlichkeit von Beleuchtungsanlagen. In *Lichttechnische Gesellschaften Deutschlands, der Niederlande, Österreichs und der Schweiz (Veranst.): Licht 98, 13. Gemeinschaftstagung der Lichttechnischen Gesellschaften Deutschlands der Niederlande, Österreichs und der Schweiz (Bregenz 1998)*. – Tagungsberichte
- [VOLZ1999b] VOLZ, G.: Einfall für zwei: Tageslicht und Kunstlicht, *Bundesbaublatt*, Heft 3, S. 58 – 62, 1999.
- [WARD1998] WARD LARSON, G., SHAKESPEARE, R.: *Rendering with Radiance : The Art and Science of Lighting Visualization*, Morgan Kauffmann Publishers, 1998.
- [WARD1999] WARD LARSON, G.: *RADIANCE Reference Manual*, Lawrence Berkeley National Laboratory, 1999.
- [WERT1964] WERTH, E.: *Nomographie : Wegweiser zur vereinfachten Ausführung von Berechnungen*, Teubner Verlag, 1964.
- [ZIES1996] ZIESENISS, C.-H.: *Beleuchtungstechnik für den Elektrofachmann : Lampen, Leuchten und ihre Anwendung*, Hüthig Verlag, 1996.
- [ZONN1996] ZONNEVELDT, L., PERNOT, C.E.E.: Energy savings by optimal use of daylight. In: *European Directory of Sustainable and Energy Efficient Building*, S. 72 – 75, 1996.
- [ZVEI1997] ZVEI Zentralverband Elektrotechnik- und Elektroindustrie e.V.: *Lebensdauerverhalten von Entladungslampen für Beleuchtung*, Frankfurt, 1997.
- [ZVEI1998] ZVEI Zentralverband Elektrotechnik- und Elektroindustrie e.V.: *Lampenbezeichnungssystem (LBS) – Einheitliches System zur Bezeichnung elektrischer Lampen für die Allgemeinbeleuchtung*, Frankfurt, 1998.

Abbildungsverzeichnis

2.1	Prinzip einer Steuerung	8
2.2	Prinzip einer Regelung	8
2.3	Lichtsensormit einseitiger Blende (Maße in Zoll) [MIST1997]	10
2.4	tageslichtabhängige Beleuchtungsregelung, separat für jedes Lichtband; abnehmender Tageslichtanteil mit zunehmendem Abstand zum Fenster .	11
2.5	Prinzip der Beleuchtungsregelung mit Lichtsensor und Präsenzmelder, mit Abschaltung (a), ohne Abschaltung (b)	11
2.6	Schaltbild einer proportionalen Regelung [RUBI1989]	12
2.7	zeitliches Schaltverhalten einer tageslichtabhängigen Beleuchtungskontrolle in Abhängigkeit der Beleuchtungsstärke [TRIL1998] t ₁ : Beleuchtungsstärke erreicht 150% der Nennbeleuchtungsstärke t ₂ : Ausschaltzeitpunkt nach 15 min über dem Schwellwert t ₃ : Einschaltzeitpunkt bei Unterschreiten der Nennbeleuchtungsstärke . .	13
3.1	Lichtstromrückgang über die Nutzbrenndauer (Mittelwert der Messung und Streuung) [ZVEI1997]	19
3.2	Himmelslichtdiagramm [FISC1982]	21
3.3	Einschaltzeit zwischen den Tageslichtquotientengrenzwerten [SZER1994a] .	22
3.4	Einschaltzeit in Abhängigkeit des Tageslichtquotienten und der täglichen Arbeitszeit nach Szerman [SZER1996b]	23
3.5	Vergleich der Einschaltzeiten verschiedener Verfahren in [HEIB1998] . . .	25
3.6	Einschaltzeit in Abhängigkeit von der Kenngröße $X_{R,F}$ für ideale Regelung und Fensteranordnung ab Brüstung [HAUS1998]	26
3.7	Einschaltwahrscheinlichkeit in Abhängigkeit der minimalen Beleuchtungs- stärke am Arbeitsplatz, Messungen (c) und interpolierte Funktion (d) [HUNT1979b]	29
3.8	Programmmodule von Adeline 3 [ERHO1999]	35

4.1	Querschnitt eines Raums mit zwei symmetrisch angeordneten Lichtbändern [LYNE1990]	40
4.2	Trübungsfaktoren aus [DIN5034.2] und Berechnung mit einer Sinusfunktion	41
4.3	Nutzbelichtung in Abhängigkeit der Glasfläche	43
4.4	Nutzbelichtung in Abhängigkeit der dimensionslosen Raumgeometrie für Nord- und Südorientierung	44
4.5	Nutzbelichtung und Tageslichtquotient in Abhängigkeit der Orientierung .	45
4.6	Nutzbelichtung in Abhängigkeit der Verbauungshöhenwinkel ε_V	46
4.7	Nutzbelichtung in Abhängigkeit der täglichen Arbeitszeit; Unterschiede bei 9 h/d resultieren aus unterschiedlichem Arbeitsbeginn	47
4.8	Häufigkeitsverteilung des relativen Fehlers zwischen der entwickelten Berechnung und der Berechnung nach DIN	51
4.9	relative Leistungsaufnahme in Abhängigkeit des relativen Lichtstroms bei einer Leuchte mit $P_{Sys} = 55 \text{ W}$ und $\phi_L = 5.000 \text{ lm}$	52
4.10	Vergleich der Berechnungsergebnisse des Energieverbrauchs der unterschiedlichen Varianten	57
4.11	Visualisierung mit Radiance (hemisphärische Fischaugenperspektive) . . .	58
5.1	Bildschirmaufnahme der computergestützten Berechnung mit den verschiedenen Eingabe- und Ergebnisblöcken und dem Balkendiagramm des spezifischen jährlichen Energieverbrauchs	62
5.2	Minimierung des spez. Energieverbrauchs in Abhängigkeit der Pendellänge, der Reflexionsgrade und des Leuchtentyps	68
5.3	minimaler und maximaler spezifischer Energieverbrauch vor und nach der Optimierung	70
5.4	webbasierte Eingabemaske (Ausschnitt) als Schnittstelle zum Berechnungsverfahren	71
5.5	Ausgabe der Berechnungsergebnisse in Form einer HTML-Seite (Ausschnitt)	72
6.1	Doppelleiter zur Umrechnung von Zentimeter in Zoll	74
6.2	Netztafel zur Darstellung des allgemeinen Gasgesetz $pV = RT$ als Funktion dreier Veränderlicher [BLIE1977]	74
6.3	Nomogramm zur Bestimmung des Innen-Reflexionsanteils D_{Rr} von einseitig befensterten Räumen [LANG1998]	75
6.4	Zusammengesetztes Nomogramm zur Darstellung einer Funktion mit fünf Veränderlichen [NEWS1955]	76

6.5	Nomogramm zur Ermittlung der dimensionslosen Kennzahl k_R	78
6.6	Z-Tafel zur Ermittlung des Verbauungshöhenwinkels ε_V in Abhängigkeit der Höhe und des Abstands der Verbauung	79
6.7	Nomogramm zur Ermittlung der jährlichen Nutzbelichtung $H_{Nutz,a}$ in Abhängigkeit der Orientierung α_F , des Verbauungswinkels ε_V , der Reflexionsgrade und der Nennbeleuchtungsstärke E_N	80
6.8	Leitertafeln zur Ermittlung der jährlichen künstlichen Belichtung $H_{k,a}$ in Abhängigkeit der jährlichen Nutzbelichtung $H_{Nutz,a}$ und der Nennbeleuchtungsstärke E_N	81
6.9	Nomogramm zur Ermittlung der Leuchtenanzahl n (--- →) Nomogramm zur Ermittlung der mittleren Systemleistung $P_{Sys,m}$ (- - - - →)	82
6.10	Nomogramm zur Ermittlung des jährlichen Energieverbrauchs der künstlichen Beleuchtung $E_{k,a}$	84

Tabellenverzeichnis

2.1	Systemleistung, Lichtstrom und Systemlichtausbeute in Abhängigkeit der Lampenleistung und der Vorschaltgeräte [TRIL1997]	6
2.2	Kontrollstrategien, -techniken und -einrichtungen für Beleuchtung	9
3.1	Raumwirkungsgrade η_R des Leuchtentyps A 60.1 an der Decke in Abhängigkeit der Reflexionsgrade der Umschließungsflächen und des Raumindex k [LITG1988]	18
3.2	Einflussfaktoren des Raum- und Systempotenzials [EHLI1997]	28
3.3	Orientierungsfaktoren [HUNT1980]	30
3.4	Energieeinsparung in Abhängigkeit unterschiedlicher Beleuchtungskontrollen bzw. Optimierungsmaßnahmen	32
4.1	Koeffizienten der Gleichung 4.14	50
4.2	Übersicht der Ergebnisse der Vergleichsrechnungen	56
5.1	Ergebnisse der Optimierung des Beispielbüros	67
5.2	Grenz- und Zielwerte für spezifische elektrische Anschlussleistung p_{el} und spezifischen Energieverbrauch e [VOLZ1999b]	69

Stichwortverzeichnis

- Abweichungen 32, 50
 Adeline 34
 Akzeptanz 15
 Anschlussleistung
 – spezifische elektrische 67
 Anwesenheitssensoren 9
 Arbeitszeit 46
-
- bedeckter Himmel 6
 Beispielrechnung 67
 Beleuchtung
 – künstliche 4
 Beleuchtungskontrolle 8
 Beleuchtungsqualität 14
 Beleuchtungsregelung
 – Kennlinie 52
 – tageslichtabhängige 10
 Beleuchtungsstärke 3
 – mittlere 4, 17
 Beleuchtungswirkungsgrad 4
 Belichtung
 – erforderliche jährliche 27
 – jährliche Nutz- 27
 – künstliche 51, 81
 Bestrahlungsstärke 30
 Betriebswirkungsgrad der Leuchte 68
 Bewegungsmelder 9
 Bildschirmeingabe und -ausgabe 62
 biologische Auswirkungen 16
 Blendschutz 42
 Bussysteme 10
-
- CIE 6
 circadianes Lichtsystem 16
- computergestützte Berechnung 61
-
- DALI 5
 DIN 5034 19, 55
 Doppelleiter 73
 Dynamik des Tageslichts 15
-
- Eingangsparameter 42, 61
 Einregulierung 65
 Einsatzgrenzen 59
 Einschaltchwelle 28
 Einschaltwahrscheinlichkeit 28
 Einschaltzeit 24
 Energieeinsparung 31, 69
 Energieverbrauch 30
 – jährlicher 53, 83
 – spezifischer 67
 Energievergleichskennwert 68
 Ergebnisse 55
 Eulumdat 64
-
- Fensterabmessungen 42
 Fensterfläche 43
 Funktion
 – mehrdimensionale 48, 49
 Funktionsleiter 73
-
- Gebäudeleittechnik 10
 Genauigkeit 50
 Glasfläche 43
 Globalstrahlung 30
 Grenzwert 69
 Grundlagen 3

<hr/>	
Himmelslichtdiagramm	21
Himmelszustände	6
Hunt	28
<hr/>	
IES-Format	64
Internet	70
<hr/>	
Java-Script	71
<hr/>	
Kalibrierung	65
Kennlinie Beleuchtungsregelung	52
Kennzahl	
– dimensionslose	44, 77
klarer Himmel	6
Koeffizienten	
– empirische	49
Kontrolleinrichtung	8
Kontrollstrategie	8
Kontrolltechnik	8
Kunstlicht	4
Kunstlicht-Einschaltzeit	24
<hr/>	
Lampen	5
Leistungsaufnahme	52
Leitertafeln	75
Lesodial	34
Leuchtdichte	4
Leuchten	5, 63
Leuchtendaten	64
Leuchtenzahl	82
Lichtausbeute	4
Lichteinschaltzeit	22
Lichtmanagement	10
Lichtsensor	9
Lichtstärke	3
Lichtstrom	3
– mittlerer Lampen-	51
– mittlerer Leuchten-	52
Lichtstromrückgang	18
Lichttherapie	16
<hr/>	
Maßnahmen	69
mittlerer Himmel	6, 41
<hr/>	
N-Nomogramm	77, 82
Nennbeleuchtungsstärke	4, 48
Netztafeln	73
Nomografie	73
Nomogramm	73
– Konstruktion eines	77
– zusammengesetztes	76
Nutzbelichtung	25, 49, 79
Nutzerakzeptanz	15
Nutzungszeit	
– jährliche	20
– relative jährliche	20
<hr/>	
Optimierung	66
Orientierung	44
<hr/>	
Perez-Modell	33
Perl	71
Planungsfaktor	18
Planungswerkzeug	
– grafisches	73
Präsenzmelder	9
Produktivität	16
<hr/>	
Radiance	34, 57
Raumabmessungen	42
Raumgeometrie	44
Raumindex	17
Raumpotenzial	27
Raumwirkungsgrad	17, 68

Reflexionsgrad	14, 47	Verminderungsfaktoren	19
– mittlerer	47	Visualisierung	57
– Verbauung	45	visuelle Behaglichkeit	15
Regelung	7	Vorschaltgeräte	5
Relux	34, 56		
<hr/>			
SAD	16	Wellenlängen	3
Sichtverbindung	14	Winterdepression	16
Sichtverbindung nach außen	15	Wirkungsgradtabelle	17
Simulation	53	Wirkungsgradverfahren	17
Simulationsprogramme	33	WWW-Schnittstelle	70
– Lesodial	34		
– Radiance	34	Z-Tafel	77
– Relux	34	Zeitsteuerung	9
Sonnenscheinwahrscheinlichkeit ...	6, 41	Zielwert	69
Sonnenschutz	42		
Steuerung	7		
– manuelle	8		
Superlink	57		
Systemleistung			
– mittlere	52, 82		
Systempotenzial	27		
Szerman	22		
<hr/>			
Tabellenkalkulation	61		
Tageslicht	6		
Tageslichteinfluss	41		
Tageslichtlenkung	42		
Tageslichtquotient	7, 19, 44		
Trübungsfaktoren	40		
<hr/>			
Varianten	54		
Verbauung	14, 45		
Verbauungshöhenwinkel	45, 79		
Verbauungswinkel	45		
Verbesserungen	69		
Vergleich	53		
Verlustleistung	52		
Verminderungsfaktor	18		

Lebenslauf

Persönliche Daten

Name: Markus Görres
Geburtstag und -ort: 10.10.1968 in Bottrop-Kirchhellen
Familienstand: verheiratet, 1 Kind

Schulbildung

1975 – 1979: Grundschule in Bottrop-Kirchhellen
1979 – 1988: Ratsgymnasium in Gladbeck

Wehrdienst

1988 – 1989: Grundwehrdienst in Münster

Studium

10/1989 – 07/1996: Studium der Chemietechnik an der Universität Dortmund,
Abschluss Diplom-Ingenieur
10/1992 – 09/1993: Gasthörer an der Universität Pisa, Fachbereich Chemiein-
genieurwesen

Berufliche Tätigkeit

09/1996 – 11/2000: wiss. Mitarbeiter am Lehrstuhl Technische Gebäude-
ausrüstung, Fakultät Bauwesen, Universität Dortmund
seit 12/2000: Produktmanager E Control bei der WILA Leuchten GmbH,
Iserlohn

Dortmund, Januar 2001

