

Institut für Entwerfen und Gestalten, Lehrstuhl für Raumkunst und Lichtgestaltung

Tageslichtoptimierung in Museen / Experimentelle Untersuchung des visuellen Museumsraumes unter Tageslicht aus der Sicht der ökologischen Optik

Dipl.-Ing.
Man Jin Choi

Vollständiger Abdruck der von der Fakultät für Architektur der Technischen Universität München zur Erlangung des akademischen Grades eines
Doktor - Ingenieurs
genehmigten Dissertation.

Vorsitzender: Univ.-Prof. Matthias Reichenbach-Klinke

Prüfer der Dissertation:

1. Univ.-Prof. Hannelore Deubzer
2. Hon.-Prof. Christian Bartenbach

Die Dissertation wurde am 12.02.2002 bei der Technischen Universität München eingereicht und durch die Fakultät für Architektur am 30.07.2002 angenommen.

Frau Univ. Professor Dip.-Ing. Hannelore Deubzer bin ich für die Betreuung und Unterstützung sowie für das Arrangement dieser Arbeit mit herzlichem Dank verbunden.

Herrn Hon. Professor Dipl.-Ing. Christian Bartenbach gilt mein besonderer Dank für die Betreuung, die Anregung und die Unterstützung dieser Arbeit. Er hat die Voraussetzung für die Durchführung der vorliegenden Arbeit geschaffen und erteilte mir die Erlaubnis den Kunsthimmel sowie die anderen Einrichtungen von seiner Firma Bartenbach LichtLabor GmbH zu benutzen.

In diesem Zusammenhang danke ich auch der Firma Bartenbach LichtLabor GmbH für die finanzielle Unterstützung der Durchführung der Experimente und deren Mitarbeitern für die Beihilfe.

Herrn Dr. Walter Witting von dieser Firma schulde ich großen Dank, da er ganze Zeit diese Arbeit mit dem wertvollen Rat und Kritik begleitete.

Weiterhin danke ich Herrn Univ. Professor Dipl.-Ing. Matthias Reichenbach-Klinke für den Vorsitz bei der mündlichen Prüfung.

Darüber hinaus sollen an dieser Stelle viele Korrekturhelfer der deutschen Grammatik dieser Arbeit nicht unerwähnt bleiben.

Ich möchte mich herzlich bei meiner lieben Mutter und bei meinen Schwiegereltern bedanken und widme meinem verstorbenen Vater diese Arbeit.

Nicht zuletzt danke ich meiner Ehefrau Young Shil, meiner Tochter Ji Hye und meinem Sohn Nack Hyun. Sie standen mir immer zur Seite trotz schwieriger Zeiten.

Zum Schluss danke ich meinem Heiland, Herrn Jesus Christus.

Kusterdingen, im Oktober 2002

Man Jin Choi

Inhaltsverzeichnis

	Seite
1. Einleitung	1
2. Grundlagen der visuellen Wahrnehmung	4
2.1 Einleitung	4
2.2 Umwelt	5
2.3 Physiologische Grundlagen des Gesichtssinnesorganes	5
2.3.1 Aufbau des menschlichen Auges	6
2.3.2 Abbildungsfehler im Auge	7
2.3.3 Akkommodation und Tiefenschärfe	7
2.3.4 Netzhaut (Retina)	8
2.3.5 Gesichtsfeld, Blickfeld und Sehfeld	8
2.3.6 Helligkeitsbereich und Adaptation	9
2.3.7 Hellempfindlichkeit	10
2.4 Sehen	11
2.4.1 Kontrasterscheinung und Nachbilder	11
2.4.2 Farbsehen	12
2.4.3 Objektwahrnehmung	14
2.4.4 Tiefenwahrnehmung	15
2.4.5 Konstanz	16
2.4.6 Täuschung	17
2.5 Kognition und psychologische- und soziologische Einflüsse	17
2.6 Beziehung zwischen Sehleistung und Beleuchtung	18

3.	Lichttechnische Grundlagen	20
3.1	Lichttechnische Größen und Einheiten	20
3.2	Physikalische Grundlagen	22
3.3	Tageslichttechnische Grundlagen	24
3.3.1	Astronomische Grundlagen	24
3.3.2	Meteorologische Grundlagen	25
3.3.3	Globalstrahlung	26
3.3.4	Solarstrahlungsangebot im Freien	27
3.3.5	Tageslichtangebot im Freien	28
3.3.6	Tageslicht im Innenraum	30
3.4	Tages- und Kunstlicht im Vergleich	31
4.	Tageslicht im Museum	33
4.1	Beleuchtungsniveau	34
4.2	Helligkeitsverteilung	35
4.3	Blendung	35
4.4	Blend- und Sonnenschutz	38
4.5	Lichtrichtung und Schattenwirkung	40
4.6	Farbwiedergabe	41
4.7	Lichtschutz der Exponate	41
4.8	Bezug nach außen	44
5	Typen der Tageslichtlösungen im Museum	45
5.1	Tagesbelichtung durch Oberlichtöffnungen	45
5.1.1	Tagesbelichtung durch Lichtkuppeln	47
5.1.2	Tagesbelichtung durch Lichtbänder mit Oberen Oberlichtanordnungen	52

5.1.3	Tagesbelichtung durch Oberlichtbänder mit Fensteranordnungen	58
5.1.3.1	Tagesbelichtung durch Laternenoberlichterbänder mit Fensteranordnungen	58
5.1.3.2	Tagesbelichtung durch Shedoberlichter mit Fensteranordnungen	59
5.2	Tagesbelichtung durch Seitliche Fensteranordnungen	64
5.2.1	Tagesbelichtung durch Seitliche Seitenfenster	64
5.2.2	Tagesbelichtung durch Hohe Seitenfenster	69
5.3	Tageslicht als Mittel der Ausformung des Raummilieus	72
6.	Ökologische Optik	75
6.1	Oberfläche und Entstehung der Struktur im Umgebungslicht	75
6.2	Visuelle Raumwahrnehmung in der ökologischen Optik	77
6.2.1	Raum	77
6.2.2	Visuelle Raumwahrnehmung aus der Sicht der ökologischen Optik	78
6.3	Erkundungsverhalten des Menschen im Umgebungsraum	79
6.4	Stabilität der Wahrnehmung	80
6.4.1	In- und Umfeld	80
6.4.2	Stabile Wahrnehmung	82
7.	Versuchsaufbau und Versuchsdurchführung	83
7.1	Daten des Kunstlicht-Himmels und erprobter Himmelszustand des Experiments	85
7.2	Versuchsraum und –modell	87

7.3	Beschreibung der variierenden Elemente und Ausstellungsobjekte	88
7.3.1	Erprobte Tageslichtkonzepte	88
7.3.2	Wandprobe	90
7.3.3	Bodenprobe	91
7.3.4	Ausstellungsobjekte	92
7.4	Fotoaufnahme	94
7.5	Messungen	95
7.5.1	Messung der Beleuchtungsstärke	95
7.5.2	Messung des Reflexionsgrades	97
7.5.3	Messung der Farbtemperatur	97
8.	Versuchsergebnisse	98
8.1	Charakterisierung des visuellen Raumes durch Tageslichtkonzept	99
8.1.1	Auswirkung des Lichtkonzeptes auf das Lichtverhältnis	99
8.1.1.1	Horizontale Beleuchtungsstärke	99
8.1.1.2	Vertikale Beleuchtungsstärke	100
8.1.2	Auswirkung des Tageslichtskonzeptes auf die Helligkeitskorrelation zwischen den Raumbegrenzungselementen	101
8.1.2.1	Helligkeitsdominanzbildung der Raumdecke	102
8.1.2.2	Helligkeitskorrelation zwischen dem Boden und den Wänden	104
8.1.3	Auswirkungen des Tageslichtkonzeptes auf den visuellen Raum	105
8.1.3.1	Visueller Wahrnehmungszustand und Raumcharakteristik beim Tageslichtkonzept 1	106
8.1.3.2	Visueller Wahrnehmungszustand und Raumcharakteristik beim Tageslichtkonzept 2	110
8.1.3.3	Visueller Wahrnehmungszustand und Raumcharakteristik beim Tageslichtkonzept 3	113
8.2	Charakterisierung des Umgebungsraummilieus durch Oberflächenbehandlung und Materialart der Wand	134
8.2.1	Auswirkungen des Wandreflexionsgrads auf den visuellen Raum	134

8.2.1.1	Auswirkungen des Wandreflexionsgrads auf den vertikalen Tageslichtquotienten	134
8.2.1.2	Auswirkungen des Wandreflexionsgrads auf den visuellen Wahrnehmungszustand und das Raumerscheinungsbild	135
8.2.1.3	Auswirkungen des Wandreflexionsgrades auf die Betrachtung der Skulpturen	140
8.2.2	Auswirkungen der Materialart und Oberflächenbehandlungen der Wand auf den visuellen Wahrnehmungszustand und das Raumerscheinungsbild	141
8.3	Charakterisierung des visuellen Raumes durch Oberflächenbehandlungen und Materialart des Bodens	164
8.3.1	Auswirkungen des Bodenreflexionsgrades auf das Lichtverhältnis	164
8.3.2	Auswirkungen des Bodenreflexionsgrades auf den visuellen Raum	165
8.3.3	Auswirkungen der Materialart und der Oberflächenbehandlungen des Bodens auf den visuellen Raum	167
8.3.3.1	Auswirkungen der Materialart und der Oberflächenbehandlung des Bodens auf seine Helligkeiterscheinung	167
8.3.3.2	Auswirkungen der Materialart und der Oberflächenbehandlung des Bodens auf das Raumerscheinungsbild	169
8.4	Charakterisierung des visuellen Raumes durch Bilderrahmen	181
9.	Zusammenfassung und Schlussfolgerungen	192
	Literaturverzeichnis	204

1. Einleitung

Vom Bau der ersten Museen bis nach dem Ende des Zweiten Weltkriegs war das Tageslicht mangels adäquater kunstlichttechnischer Lösungen die einzige Beleuchtungsmöglichkeit. Durch die direkte Sonneneinstrahlung wurden jedoch viele Kunstwerke schwer beschädigt, so dass man in den 60er Jahren zur Beleuchtung durch Kunstlicht übergang. Dank des lichttechnischen Fortschritts wird heutzutage wieder verstärkt mit Tageslicht gearbeitet, das sich inzwischen problemlos steuern und dosieren lässt. Die subjektive Wahrnehmung des Betrachters wird entscheidend von den Lichtverhältnissen im Raum beeinflusst. Dabei kommt das Tageslicht den menschlichen Sehgewohnheiten am nächsten und ermöglicht somit die Schaffung eines optimalen Raummilieus und einer unverfälschten Darstellung der Exponate. Dazu bietet uns das Tageslicht die vielfältigen Wahrnehmungsinformationen durch ständige Veränderungen in seiner Intensität, spektraler Zusammensetzung, Farbtemperatur und Lichtverteilung. Außerdem stellt das Tageslicht durch die Transparenz zwischen Innen- und Außenraum für den Museumsbesucher einen optimalen Sehkomfort her. Beleuchtung durch Kunstlicht wirkt dagegen meist gleichförmig und statisch. Die durch das Tageslicht möglicherweise entstehenden Nachteile müssen jedoch durch eine sorgfältige Planung ausgeschlossen werden.

Bei der Planung eines Museums sollte zunächst ein passendes Lichteinfallskonzept für Museumsgebäude entwickelt werden. Dabei kann im Allgemeinen zwischen Oberlicht und Seitenlicht unterschieden werden. Beide Lichter lassen sich wiederum in verschiedenen Formen und Anordnungen variieren. Anschließend sollte das ausgewählte Tageslicht mit Hilfe der Lichttechnik optimiert werden. Mit einer diesbezüglichen Planung kann ein sinnvoller Beitrag zur optimalen optischen Wahrnehmung und zur Bewahrung der Sammlungsgüter geleistet werden.

Ziel dieser Arbeit ist anhand von Untersuchungen eine Aussage zu treffen über die Optimierung der Tageslichtlösungen in Museen in Hinsicht auf die Raumästhetik und den Wahrnehmungszustand unter Einbeziehung der modernen Wahrnehmungstheorie und der Lichttechnik. Dabei ist das zentrale Thema das Raummilieu aus Sicht der ökologischen Optik. Nach der Wahrnehmungstheorie ist es

wünschenswert, dass das Leuchtdichteverhältnis im Raum, sogar zwischen dem Um- und Infeld, harmonisch ist.

Zur Durchführung dieses Forschungsprojekts sind folgende Arbeitsschritte notwendig:

1. Eine Literaturstudie über die Wahrnehmungstheorien und über den Stand der Forschung und Technik bezüglich der Beleuchtung durch Tageslicht.
2. Untersuchung der Tageslichtkonzepte in bekannten Museen.
3. Die so gewonnenen Erkenntnisse dienen der Entwicklung von Kriterien, mit Hilfe derer typische Probleme tageslichtbeleuchteter Museen gelöst und deren raumästhetische Wirkungen unter verschiedenen Konzepten bzw. Varianten beurteilt werden können.
4. Ziel des letzten Teils ist die experimentelle Verifizierung.

Die experimentellen Untersuchungen des letzten Teils sollen anhand von Modellen erfolgen, die nach den aus den vorigen Arbeitsschritten gewonnenen Erkenntnissen konstruiert und variiert werden. Diese Experimente werden mit physikalischen Methoden durchgeführt. Gleichzeitig muss aber die menschliche Wahrnehmung mitbeachtet werden, denn letztlich beinhaltet eine befriedigende Lösung der Lichtverhältnisse im Museum die Verbindung eines sinnvollen technischen Konzepts mit den subjektiven Eindrücken und Bedürfnissen des Betrachters. Aus diesen Gründen erfolgt das Fotografieren der Modellräume zur visuellen Bestätigung sowie Lichtmessungen zur physikalischen Bewertung. Während dieser experimentellen Untersuchungen werden

- Tageslichtkonzept und damit Lichteinfallswinkel bzw. -position
- Art und Oberflächeneigenschaft der Wände und des Bodens
- Bilderrahmen

variiert, da diese Kriterien ausschlaggebend für die visuellen Raummilieus in Museen sind. Zur Durchführung des Experiments steht ein Kunstlicht-Himmel zur Verfügung, mit dessen Hilfe alle möglichen Himmelszustände, Zeiten und Standorte simuliert werden können.

Aufbauend auf den gewonnenen Erkenntnissen werden Empfehlungen für die Ermittlung der optimalen Tageslichtlösung und die angemessenen raumästhetischen Gestaltungen der Museen ausgesprochen. Damit soll eine verbesserte Museumsplanung ermöglicht werden, in die nicht nur Bauphysik bzw. Lichttechnik, sondern auch die Physiologie bzw. die Psychologie des Museumsbesuchers miteinbezogen ist.

2. Grundlagen der visuellen Wahrnehmung

2.1 Einleitung

Unter visueller Wahrnehmung versteht man heutzutage die Aufnahme und die anschließende Verarbeitung der Informationen über die Umwelt durch die Sinnesorgane des Gesichts. /51,166/ Diese optische Prozesse lassen sich nach /166,162/ in folgende drei Stufen einteilen.

- **Sensorische Empfindung im Auge.** In dieser Stufe werden die aus der Umwelt im Auge gesammelten Lichtreize als ein umgekehrtes, seitenverkehrtes und verzerrtes Bild auf der Netzhaut des Auges abgebildet.
- **Neuronale Reizübermittlung.** Das Netzhautbild wird in der Netzhaut in elektrische Signale umgewandelt und über die Sehnerven an den visuellen Bereich des Gehirns weiter geleitet.
- **Klassifikation.** Im Gehirn werden die angekommenen sensorischen Informationen durch die inneren höheren Ordnungen, z. B. Erfahrung, Wissen, Einstellung, Erwartungen, Emotionszustand, klassifiziert.

In einer realen Situation eines Raumes senden die raumbegrenzenden Elemente und die Objekte als Reizquelle dem Betrachter die visuellen Reize mittels des Lichtes. Diese Reize beinhalten die optischen Informationen über Größe, Form, Farbe, Helligkeit, Abstand, Textur und Tiefe des Umgebungsraumes. /35/ Die gerade erklärten visuellen Reize werden vom menschlichen Sinnesorgan empfangen und anschließend im Gehirn unter psychologischen und soziologischen Einflüssen verarbeitet. Letztlich wird das Raum- oder Objekterlebnis als Gedächtnis gespeichert und beeinflusst die nächste Informationsverarbeitung. Aus den oben erklärten Gründen werden die folgenden drei wesentlichen Komponenten für die visuelle Wahrnehmung in den nächsten Abschnitten näher betrachtet werden:

- **Die Umwelt**
- **Das Organ des Gesichtssinnes**
- **Die Einflüsse der Kognition und der psychischen Verfassung des Individuums**

2.2 Umwelt

Die Umwelt, die wir wahrnehmen, ist die Quelle der Reize. Zur Entstehung der visuellen Wahrnehmung muss die Intensität dieser Reize die Mindestschwelle der Lichtempfindlichkeit des Auges übersteigen. Dieser Schwellenwert ändert sich durch die folgenden reizspezifischen Faktoren: /161/

- Wellenlänge
- Retinale Lokalisation
- Räumliche Ausdehnung (räumliche Summation von Reizenergie)
- Zeitdauer des Lichtreizes (zeitliche Summation von Reizenergie)

Die gesamte Wellenlänge der Sonnenstrahlung umfasst ein breites Band, vom Ultraviolett bis zum Infrarot. Ihre genaue Einteilung ist in DIN 5030 Teil 2 /37/ und in anderen zahlreichen physikalischen Lehrbücher /2,82,106,156/ angegeben. Von dieser gesamten Wellenlänge kann unser Auge nicht alle, sondern nur sichtbare Strahlung (Licht) im winzigen Bereich zwischen 380 nm ($1 \text{ nm} = 10^{-9} \text{ m}$) und 780 nm, d. h. zwischen dem Ultraviolett und dem Infrarot, wahrnehmen. Eine andere Angabe darüber, nämlich von 400 nm bis 700 nm, gibt Tipler. /156/ Dieses sichtbare weiße Licht kann man durch ein Prisma in ein Spektrum (Farbband) zerlegen. Dessen Farbreihe wird nach der oben zitierten Physikliteratur von den kürzeren Wellen ausgehend als Violett (390 nm-455 nm), Blau (455 nm-492 nm), Grün (492 nm-577 nm), Gelb (577 nm-597 nm), Orange (597 nm-622 nm) und Rot (622 nm-780 nm) bezeichnet.

2.3 Physiologische Grundlagen des Gesichtssinnesorganes

Die Physiologie des menschlichen Gesichtssinnesorganes wird in Werken der mehreren Fachliteratur /22,34,54,57,58,78,79,92,143,151/ umfänglich erörtert. DIN 5340 /51/ erklärt alle Begriffe der physiologischen Optik in einer Liste. Das visuelle System des Menschen lässt sich in Anlehnung an /76/ hinsichtlich des Wahrnehmungsprozesses in nachfolgende vier Einheiten einteilen:

- Eine Struktur, welche die visuellen Reize aus der Umwelt sammelt und modifiziert
- Lichtrezeptoren, die Reizinformationen in elektrische Signale umwandeln
- Eine Reihe von Neuronen, die Signale verarbeiten und an das Gehirn weiterleiten
- Zentrale Neuronen im Gehirn, die angekommene Signale weiterverarbeiten und sie schließlich in das visuelle Erleben umsetzen

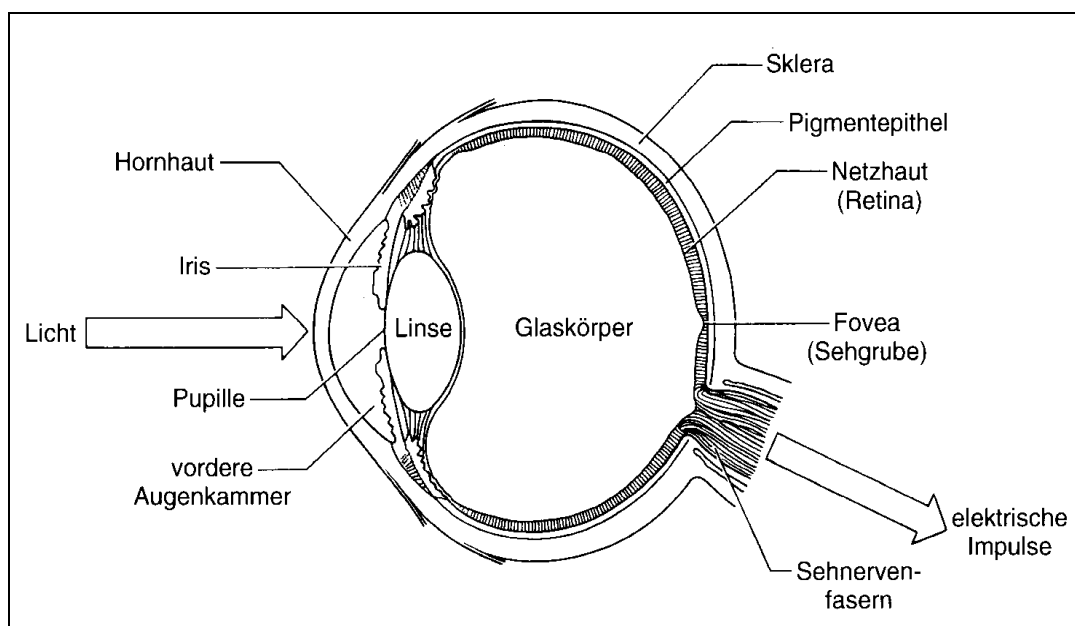


Abb. 1: Querschnitt durch das menschliche Auge /76/

2.3.1 Aufbau des menschlichen Auges

Abb. 1 ist eine schematische anatomische Schnittdarstellung des menschlichen Auges. Hornhaut (Korena), Kammerwasser und die Linse bilden zusammen mit dem Glaskörper einen dioptrischen Apparat. Dieses Sehsystem erzeugt wie Sammellinsen ein verkleinertes, auf dem Kopf stehendes, seitenverkehrtes und verzerrtes Bild eines Ausschnittes der Außenwelt auf der Netzhaut. Die Iris und Pupille, die vor der Augenlinse liegen, regulieren die Menge des ins Auge eindringenden Lichts automatisch. Die Fovea ist die Sehgrube der Netzhaut und sitzt genau auf der Sehachse. Der Blinde Fleck ist eine Stelle in der Netzhaut, wo der Sehnerv den Augapfel verlässt.

2.3.2 Abbildungsfehler im Auge

Die nachfolgenden optischen Fehler des Sehapparats des Auges verhindern eine scharfe Abbildung:

- **Sphärische Aberration;** Randstrahlen werden stärker gebrochen als Strahlen in der Nähe der optischen Achse.
- **Chromatische Aberration;** Kurzwelliges Licht wird stärker gebrochen als langwelliges Licht.
- **Myopie (Kurzsichtigkeit)**
- **Hypermetropie (Weitsichtigkeit)**
- **Astigmatismus.** Er beruht auf den unterschiedlichen Brechungsverhältnissen des oben erklärten dioptrischen Apparates in den verschiedenen Ebenen.

2.3.3 Akkommodation und Tiefenschärfe

Akkommodation ist die Scharfeinstellung des menschlichen Auges. Dabei muss die Größe des Auges und die Gesamtbrechkraft der obengenannten elastischen Augensammellinsen genau abgestimmt sein, um ins Auge eintretende Lichtstrahlen in die Sehgrube der Netzhaut fokussiert zusammenlaufen zu lassen. Bei der Naheinstellung wird der Brechwert der Augenlinse erhöht, bei der Ferneinstellung dagegen verringert. Beim Betrachten eines Gegenstandes aus einer Entfernung von mehr als sechs Metern wird die Augenlinse meist völlig gelockert. Mit zunehmendem Alter wird die Naheinstellungsfähigkeit des Menschen in der Regel immer geringer. /98/

Unter Tiefenschärfe versteht man den scharf gesehenen Bereich vor und hinter der eingestellten Entfernung im relativen Tiefensehen. Die Tiefenschärfe nimmt mit abnehmender Größe der Pupillenöffnung einigermaßen zu. Allerdings ist die Tiefenschärfe viel mehr abhängig von der Akkommodationsdistanz. Je größer die Akkommodationsentfernung wird, desto weiter wird die Tiefenschärfe. Sie beträgt bei einer Sehdistanz von ca. 2 Metern ungefähr 1,5 Metern, von 4 Metern 15 Metern und von ab ca. 5 Metern unbegrenzt. /162/

2.3.4 Netzhaut (Retina)

Die Netzhaut besteht aus den lichtempfindlichen Photorezeptoren, verschiedenen Arten von Nervenzellen und Nervenfasern. Die Photorezeptoren wandeln ein optisches Abbild der Außenwelt durch einen chemischen Transduktionsprozess in elektrische Signale um und schicken diese Signale über den Sehnerv zum Gehirn weiter. Dabei werden diese Signale durch übergeordnete Gehirnprozesse der anderen Gehirnbereiche bereits beeinflusst, organisiert und modifiziert. Aus diesem Grund kann die Netzhaut als ein vorgeschobener Teil des Gehirns verstanden werden. /92,117/

Die Photorezeptoren der Netzhaut besitzen ca. 6 Millionen Zapfen und 120 Millionen Stäbchen. Es gibt drei Sorten Zapfen, die jeweils auf die verschiedenen Wellenlängen des Lichtes reagieren. Deswegen können die Zapfen buntfarbig sehen. Sie werden außerdem im Vergleich zu den Stäbchen bei höherer Leuchtdichte eingeschaltet und ermöglichen das Sehen feiner Details eines Objektes. Die Zapfen sind in der Fovea am dichtesten verteilt. Daher ist die Sehschärfe dort am größten. Der Winkelbereich der Fovea ist auf ca. 1 Grad durch ihre winzige Größe, nämlich einen kleinen Durchmesser vom halben Millimeter, begrenzt. Die Fovea enthält keine Stäbchen und ist deswegen beim Schwarz-weiß Sehen blind. Die Zahl der Zapfen nimmt in der Peripherie der Netzhaut drastisch ab, wo sich Stäbchen dominierend befinden. Die Sehschärfe wird dementsprechend dorthin geringer, da Stäbchen mit einem einzigen Pigment für das unscharfe Schwarz-weiß Sehen bei schwachen Lichtverhältnissen zuständig ist. Die Reaktionsgeschwindigkeit der Zapfen ist ungefähr viermal schneller als die der Stäbchen. /144/ Deswegen sind Zapfen für die rasch wechselnde Gesichtssreizsituation besser geeignet. Am blinden Fleck ist kein Photorezeptor vorhanden und daher die Sehschärfe null. Die dort fehlende Information wird von der Gegenwirkung der beiden Augen und der Ergänzung und der Oberflächeninterpolation im Gehirn kompensiert. /134/

2.3.5 Gesichtsfeld, Blickfeld und Sehfeld

Unter dem Gesichtsfeld versteht man den Sehbereich bei unbewegtem Kopf und fixiertem Auge. Der horizontale Sehwinkel beträgt für das zweitäugige Gesichtsfeld

etwas mehr als 180 Grad und für das einäugige Gesichtsfeld ungefähr 150 Grad. Der Bereich, der von den beiden Augen doppelt gesehen wird, erreicht ca. 90 Grad. Das Gesichtsfeld ist in der vertikalen Richtung auf 150 Grad eingeschränkt. Die obengenannten Weiten der Sehbereiche verändern sich jedoch nach dem Leuchtdichteverhältnis, der Auffälligkeit der Reize und der spektralen Zusammensetzung des Lichtes. /119/ Das Gesichtsfeld für Farbreiz ist kleiner als für Hell-Dunkel-Reiz und vergrößert sich von Grün, über Rot bis Gelb und Blau. /119/

Das Blickfeld ist als der Sehbereich aus der Bewegung unseres Auges bei fixiertem Kopf definiert. Dieser Sehwinkelbereich beträgt maximal, gemessen von der Hauptblicklinie in alle Richtungen, ca. 20 Grad. /119/

Darüber hinaus versteht man unter dem Sehfeld den Sehbereich aus der Bewegung des Kopfes und unserer Augen.

2.3.6 Helligkeitsbereich und Adaptation

Folgende drei Helligkeitsbereiche werden nach DIN 5031 Teil 2 /39/ beim Sehen unterschieden:

- Tagesehen (photopisches Sehen); Für praktische Zwecke ist die Gesichtsfeldleuchtdichte größer als 10 cd/m^2 . Nur Zapfen reagieren. Das Auge ist helladaptiert. Das Farbsehen ist möglich.
- Dämmerungssehen (mesopisches Sehen); Die Gesichtsfeldleuchtdichte liegt zwischen $0,001$ und 10 cd/m^2 . Stäbchen und Zapfen reagieren gleichzeitig. Das Farbsehen ist eingeschränkt.
- Nachtsehen (skotopisches Sehen); Die Gesichtsfeldleuchtdichte ist kleiner als $0,001 \text{ cd/m}^2$. Nur Stäbchen reagieren. Das Auge ist dunkeladaptiert und nimmt nur Grautöne wahr.

Das menschliche Auge kann sich an einen Leuchtdichteunterschied von mehr als 1:100,000 anpassen. /119/ Der Anpassungsvorgang des menschlichen Auges an die jeweiligen Lichtverhältnisse wird als Adaptation bezeichnet. Ein essentielles Merkmal der Adaptation ist der zeitliche Verlauf. Dieser Vorgang ist durch den Un-

terschied zwischen Anfangs- und Endniveau der Leuchtdichte sowie durch die Richtung des Wechsels charakterisiert. Die Richtung findet bei der Dunkeladaptation vom helleren zum dunkleren Ort statt, bei der Helladaptation jedoch umgekehrt. Die vollständige Helladaptation, d.h. von vollkommener Dunkelheit zur normal hellen Beleuchtung, dauert maximal ca. 6 min. Dabei wird die Empfindlichkeit des Auges schon in 0,05 Sekunden auf etwa 20 Prozent herabgesetzt. /119/ Dagegen benötigt die Dunkeladaptation bis zu 30 Minuten und länger.

Die Adaptationen unseres Auges werden von Pupille, Zapfen und Stäbchen gesteuert. Diese Gesichtssinnesorgane besitzen jeweils andere Reaktionszeiten. Die Pupille reagiert innerhalb von 0,2-0,5 bis 1 Sekunde am schnellsten und spontansten auf einen plötzlichen Helligkeitswechsel und gewährleistet dadurch einen schnellen Schutz vor Blendung. /57/ Die Pupille kontrolliert durch ihre Größenänderung zwischen 2mm und 8mm einen Beleuchtungsunterschied von 1:16. /54/ Dagegen erfolgt die Zapfenadaptation zunächst innerhalb von Minuten. In dieser Phase ist die zusammenlaufende Stäbchenadaptation nicht bemerkbar. Nach dieser Zapfenadaptation beginnt die Stäbchenadaptation. Der Anfangspunkt dieser Stäbchenadaptation wird als der sogenannte Kohlrausch-Knick bezeichnet. /85/ Hier endet das Farbsehen und es beginnt die über 30 Minuten dauernde Stäbchenadaptation.

2.3.7 Hellempfindlichkeit

Die Strahlungsbewertung durch das menschliche Auge wird als spektraler Hellempfindlichkeitsgrad ($V(\lambda)$) bezeichnet. Unser Auge empfindet trotz gleicher Strahlungsintensität die Helligkeit nach den unterschiedlichen Wellenlängen nicht identisch. Nach DIN 5031 Teil 2 /41/ liegt die Größe der Hellempfindlichkeit maximal bei der Wellenlänge von 555 nm (die Farbe gelb-grün), fällt steil an beiden Rändern ab und erreicht den Nullwert bei 380nm (blau) und 780nm (rot). Nach oben zitierter /41/ verläuft die Größekurve der Hellempfindlichkeit außerdem nach dem Tages- ($V(\lambda)$) und Nachtsehen ($V'(\lambda)$) unterschiedlich. Das Maximum der Hellempfindlichkeit für Tagessehen ($V(\lambda)$) positioniert genau in der Mitte des sichtbaren spektralen Bereichs, ist für Nachtsehen jedoch etwas nach links zum kurzweligen Licht verschoben. /106/

2.4 Sehen

2.4.1 Kontrasterscheinung und Nachbilder

Der physiologische Kontrast ist definiert als die Vorgänge im Nervensystem unseres Sehorgans, die durch die vorhandenen Reizunterschiede verändert werden. /78,145/ Diese Kontrastempfindlichkeit betrachtet man als die wichtigste Funktion des Gesichtssinnes, da seine Fähigkeit wesentlich nach diesen Wahrnehmungsleistungen für die Einzelheiten der Gegenstände und der Szenen bemessen wird. /33/ Die Sehfähigkeit wird in der Regel durch die Steigerung des objektiv vorhandenen Kontrastes immer überzeugender. Die Kontrastempfindlichkeit kann aber unter Umständen visuelle Täuschungen, wie die Hermann'sche Kontrasttäuschung und der Mach'sche Randkontrast, verursachen. Die Absolutschwelle des Hell-Dunkel-Sehens liegt in einer Beleuchtungsstärke von 0,008 lx bei maximalem Helligkeitskontrast zwischen Sehobjekt und Umgebung.

Es wird bei der Kontrasterscheinung zwischen Simultan- und Sukzessivkontrast unterschieden. Befinden sich die Helligkeitsunterschiede gleichzeitig im Gesichtsfeld, besteht ein Simultankontrast. Der mindeste Unterschiedswert des Simultankontrastes für das helladaptierte Auge beträgt etwa 0,6 %. Das Aussehen eines Sehobjekts, das in Lichtverteilung und Farbton objektiv unverändert bleibt, wird beim Simultankontrast durch die umgebenden Felder beeinflusst. Nach /118/ ist der Simultaneffekt abhängig von Menge, Größe und Anordnung. Außerdem spielen bei allen Prozessen des Simultankontrastes die Fixationszeit, die Beweglichkeit der Augen und des Kopfes und die Vor- und Rückwärtsbewegungen des ganzen Körpers eine nicht zu unterschätzende Rolle. /118/ Man sieht aufgrund der Helligkeitskontrastphänomene ein Objekt mit einem helleren Hintergrund dunkler und auf einem dunkleren Hintergrund heller als seine objektive Helligkeit. Dazu verändern einfarbige Umfelder neben der Helligkeit auch den Farbton. Bei der Beobachtung des Randkontrastes werden helle bzw. dunkle schwache Streifen neben der Grenze von unterschiedlich hell gesehenen Flächen wahrgenommen. (Mach'sche Bänder) Der Farbkontrast beeinflusst die Buntart einer Farbe durch die farbtonverwandten Umgebungsfarben maximal. Daneben wird die Sättigung einer Farbe durch komplementäre Umgebungsfarben maximal intensiviert, ohne

den Farbton zu verändern. /118/ Die oben erklärte simultane Kontrastwirkung wird aufgehoben, wenn /118/

- sich das umgebende Feld nicht mehr gleichzeitig im Gesichtsfeld befindet
- man zwei komplementäre Farben mit einem neutralen grauen Hintergrund lange anstarrt (Farbintegration durch die totale Umstimmung)
- die zusammenwirkenden Felder sehr klein werden.

Der Sukzessivkontrast kommt zeitlich nachfolgend vor und beruht auf dem Nachbilderphänomen. Ein negatives Nachbild eines Gegenstandes kann man nach längerer Betrachtung (10 bis 30 Sekunden) auf nebenstehenden hellen oder dunklen Flächen wahrnehmen. Dieses Nachbilderphänomen ist vorhanden in einer Überschreitung der Zeitspanne der visuellen Empfindung gegenüber des physikalischen Reizes. Falls die Nachbilder in den komplementären Gegenfarben, z. B. Schwarz als Weiß, Gelb als Blau und Rot als Grün, erscheinen, spricht man von einem Sukzessivkontrast.

2.4.2 Farbsehen

Unter der Farbe versteht man nach /41,51/ diejenige Gesichtsempfindung, bei der zwei aneinandergrenzende, strukturlose Teile des Gesichtsfeldes bei einäugiger Beobachtung mit unbewegtem Auge allein unterschieden werden können. Abgesehen von den Farbvalenzen hängt die Farbempfindung von den nachfolgenden Sehbedingungen der Farbfläche ab: /41/

- Die Farbstimmung
- Die umgebenden Farbflächen
- Der von der Leuchtdichte und ihrer Verteilung bedingte Adaptationszustand des Auges.

Wie wir Farbe wahrnehmen, ist einerseits auf die physikalische spektrale Zusammensetzung und andererseits auf die biologischen Eigenschaften unseres Sehsystems zurückzuführen. Die Art der physikalischen Farbreize wird von den Absorptions- und Reflexionsanteilen der Wellenlängen (spektraler Remissionsgrad)

des auf ein Sehobjekt reflektierten Lichtes bestimmt. /112/ Die Zusammensetzung dieser reflektierenden Wellenlängen im sichtbaren Spektralbereich lässt sich in Kurven aufzeichnen und damit die Farbe definieren. Dabei ist der sogenannte Spektrale Strahldichtefaktor $\beta(\lambda)$ des achromatischen Materials ungefähr gleichmäßig über das gesamte Spektrum. Im Gegensatz dazu ragen beim chromatischen Sehen bestimmte Wellenlängen hervor.

Wie unser Sehorgan auf diese verschiedenen Wellenlängen reagiert und die Farbe wahrnimmt, wird von den zwei unterschiedlichen Theorien erklärt. Nach der Drei-Farben-Theorie von Thomas Young (1773-1829) empfinden drei verschiedene Zapfen der Netzhaut Farbreize jeweils für den kurz- (Blau-), mittel- (Grün-) und langwelligeren (Rot) Bereich des Spektrums. Die Absorptionsmaxima der drei Zapfen liegen jeweils ungefähr bei 430, 530 beziehungsweise 560 Nanometern im Wellenlängebereich des Lichtes. /91/ Je nach der spektralen Zusammensetzung reagiert einer, reagieren zwei oder alle drei Zapfentypen mehr oder weniger stark auf den Farbreiz. Im Gegensatz zu der Drei-Farben-Theorie von Thomas Young beruht unsere Farbwahrnehmung nach der Gegenfarbetheorie von Ewald Hering (1834-1918) auf vielen phänomenologischen Betrachtungen wie Farbsimultankontrast und Erscheinung der negativen Nachbilder. Dabei wurden drei Gegensatzpaare, die aus den Farben von Rot-Grün, Blau-Gelb und Schwarz-Weiß zusammengesetzt sind, herausgefunden. Diese Gegensatzpaare bewirken die antagonistischen Prozesse in unserem visuellen System.

Die oben diskutierten zwei Theorien des Farbsehens, die gegensätzlich erscheinen, wirken in der Tat gemeinsam, jedoch auf den unterschiedlichen Prozessebenen des Farbsehens. /76,92/ Die Lichtrezeptoren der Drei-Zapfen-Theorie sind zuständig für die Farbmischung durch der physiologischen Erregungen der Strahlungsenergie. Die Gegenfarbezellen ermöglichen dagegen die Wahrnehmung des Farbkontrastes auf der neurophysiologischen Prozessebene. Schließlich bringen die Lichtrezeptoren und die Gegenfarbezellen die gemeinsamen Elektrosignale zum Gehirn, wo die Farbe endlich interpretiert und wahrgenommen wird. /76/

2.4.3 Objektwahrnehmung

Bei der Objektwahrnehmung mischen die Vorgänge der Strukturierung, Differenzierung, Identifikation, Klassifikation und Skalierung im Großhirn außer der Vorbearbeitung der Information in der Netzhaut und der Sehbahn mit. Dabei spielen Aufmerksamkeit, Erfahrung und Vorwissen eine große Rolle. Aus oben genannten Gründen sind die Erklärungsansätze über die Objektwahrnehmung im Gegensatz zum Farbsehen nicht einfach. Die grundlegenden Theorien über die Objektwahrnehmung sind hauptsächlich mit der Gestaltpsychologie verknüpft. /76,138/ Die Gestalttheorie bezieht sich auf die Wahrnehmungsorganisation, unter der man die Gruppierung in der Wahrnehmung von Teilen zu größeren Einheiten versteht. Der fundamentale Aspekt dieses Organisationsprinzips wird als die Figur-Grund-Unterscheidung von dem dänischen Psychologen Edgar Rubin bezeichnet. Nach Rubin handelt es sich bei der Objektwahrnehmung um die Trennung der Figur von deren Hintergrund. Anhand seiner berühmten Kippfigur `Rubische Vase´ zeigt er, dass die Objektwahrnehmung je nach dem Bevorzugungsgewicht zwischen Figur und dem Hintergrund anders wird. /138/ Dieses Kippbild kann man entweder als Vase oder zwei Gesichter interpretieren. Eine andere Grundregel der Gruppierungsgestaltpsychologie besagt, dass das Ganze vielmehr als das Ergebnis einer einfachen Addition seiner Teile ist: /76,138/

- **Gute bzw. einfache Gestalt:** Jedes Reizmuster wird zugunsten der einfachsten Form strukturiert wahrgenommen.
- **Gestaltgerechte Linienfortsetzung:** Die Fortsetzung der Linien wird nach der einfachsten Wegfolge gesehen.
- **Nähe:** Die am dichtesten zusammenstehenden Objekte bilden eine einheitliche Erscheinung.
- **Gemeinsames Schicksal:** Gegenstände, die sich in die gleiche Richtung bewegen, vermitteln den Eindruck, zusammenzugehören.
- **Vertrautheit:** Durch die Erscheinung der Vertrautheit oder Bedeutung werden Objekte als geschlossene Gruppe erkannt.

2.4.4 Tiefenwahrnehmung

Tiefensehen wird unterschieden nach /51/ in

- **absolutes Tiefensehen: Wahrnehmung der Entfernung eines Objektpunktes vom Beobachter.**
- **relatives Tiefensehen: Wahrnehmung des Unterschiedes der Entfernungen zweier Objektpunkte vom Beobachter. (Tiefenunterscheidung)**

Die Kriterien zum Eintritt der obengenannten Tiefenwahrnehmungen sind Querdisparation (Disparität), Okulomotorische Faktoren, Bewegungsparallaxe und Abbildungsfaktoren. /76,79,138/ Die Disparität beruht auf dem binokularen (zweiäugigen) Sehen. Jeder gesehene Punkt wird auf sogenannten korrespondierenden Stellen der beiden Netzhäute abgebildet. Da jedes Auge Objekte aus einem andern Blickwinkel schaut, ergibt sich eine Ungleichheit bei den Netzhautbildern der beiden Augen. Dadurch wird der Abstand zwischen den beiden Objekten geschätzt. Andererseits werden Objekte, die auf dem gedachten sogenannten Horopterkreis liegen, als gleich entfernt vom Beobachter geschätzt. Befindet sich ein Gegenstand entweder innerhalb oder außerhalb des Horopterkreises, entstehen seine Doppelbilder auf dem gedachten Mittelaugen nicht korrespondierend. Unser Gehirn erkennt das und errechnet damit die Tiefe.

Als okulomotorische Faktoren werden Konvergenz und Akkommodation bezeichnet, denn beide kann man auf die Bewegung der Augenmuskulatur zurückführen. Der Konvergenzwinkel zwischen den Sehachsen beider Augen informiert das Gehirn über die Größe der Entfernung eines Objektes. Dabei wird sie immer kleiner mit dem zunehmenden Winkel. Das Gehirn erfährt auch die unterschiedlichen Entfernungen durch den Akkommodationszustand.

Durch die Abbildungsfaktoren kann man jedoch auch einäugig räumliche Tiefe erkennen. Derartige Tiefeninformationen basieren nicht auf den physiologischen Mechanismen, sondern auf der jeweiligen räumlichen Anordnung. Zu ihnen gehören Perspektive, Schatten, Verdeckung durch vorlagerte Objekte, relative Höhe bzw. Größe im Blickfeld.

Die Bewegung ist noch ein Faktor für das Sehen der dritten Dimension. Da sich durch sie der Beobachtungswinkel ändert, kann ein Betrachter die Tiefen und den Abstand aus den anderen Perspektiven vergleichen und damit eine bessere Information über das Tiefensehen gewinnen.

2.4.5 Konstanz

Konstanz ist als unsere Sehfähigkeit definiert, die Eigenschaften der Gegenstände trotz der Änderung des Netzhautbildes unverändert wahrzunehmen. Diese Konstanzleistung geschieht in Form, Größe, Farbe und Helligkeit.

Man spricht von Formkonstanz, wenn man die Form eines Gegenstandes trotz der verschiedenen Blickwinkel und der unterschiedlichen Entfernungen gleich bleibend erkennt.

Größenkonstanz bezieht sich auf die Tiefen- und Entfernungswahrnehmung. Beide Wahrnehmungen liefern unserem Gehirn die erweiterten Informationen, welche die Korrektur durch die Relation zwischen Größe und Entfernung hervorrufen. Unser Gehirn kann damit die wahre Größe eines Objektes errechnen, obwohl Sehwinkel und damit Größe des Netzhautbildes ständig anders werden.

Dank der Helligkeitskonstanz kann man die achromatischen Farben eines Gegenstandes ohne Rücksicht auf die schwankenden Beleuchtungsstärken meistens gleichbleibend wahrnehmen. Dieses Sehvermögen wird, wie Form- und Größenkonstanz, wiederum mit dem Verhältnisprinzip verständlich. Die Relation der reflektierten Lichtmengen zwischen den Oberflächen eines betrachteten Gegenstandes und den umgebenden Oberflächen bleibt trotz der geänderten Lichtintensität immer gleich. Das menschliche Gehirn kalkuliert diese Reflexionsrelation mit ein und identifiziert damit die monochromatische Farbe meist konstant trotz der Leuchtdichteschwankung.

Farbkonstanz ist definiert als die relativ gleiche Farbwahrnehmung bei wechselnder Stärke und Farbtemperatur der Beleuchtung. Aber Farbkonstanz ist beim

menschlichen Auge nicht vollständig, sondern nur annähernd. Farbkonstanz geschieht durch die folgenden Faktoren: /76/

- **Farbumstimmung:** Unter ihr versteht man den Übergang zu einer anderen Farbstimmung in der ganzen Netzhaut. Wirkt ein Farbreiz dabei lange auf einen begrenzten Bezirk der Netzhaut ein, so wird er gegenüber der übrigen Netzhaut umgestimmt. /41/
- **Umfeld:** Unser Auge rechnet durch die gleich bleibenden Verhältnisse der unterschiedlichen Lichtreflexionen zwischen dem Innenfeld und dem Umfeld komplex um und nimmt damit die Farbe konstant trotz der geänderten Sehbedingungen wahr.

2.4.6 Täuschung

Die optischen Täuschungen verhindern neben der Sehstörung die optimalen Wahrnehmungsprozesse, jedoch zeitigen sie mitunter eine positive Auswirkung, so z. B. die geometrisch-optische Täuschung. Diese Täuschungen passieren auch beim ganz normal sehenden Auge und bei der Betrachtung zwei- sowie dreidimensionaler Objekte. /145/ In der Regel hängen die Wahrnehmungstäuschungen von den folgenden drei Bedingungen ab: /80/

- **Widersprüchliche Reizinformation:** Sie sind meist auf die sogenannten geometrisch-optischen Täuschungen zurückzuführen.
- **Überlastung des visuellen Wahrnehmungssystems.**
- **Unterbelastung des visuellen Wahrnehmungssystems:** Dabei handelt es sich nicht um Schwäche in der Intensität, sondern um die Eintönigkeit in der Komplexität der Reize.

2.5 Kognition und psychologische und soziologische Einflüsse

Die Kognition und psychische Verfassung des Individuums können unterschiedliche Wirkungen auf die subjektiven Wahrnehmungen veranlassen. Diese Auswirkungen sind bedingt durch

- die momentane Situation
- die situationsübergreifenden Persönlichkeitseigenschaften, wie momentane Stimmungen, Emotion, Einstellung des Betrachters
- die überdauernden, relativ konstanten Persönlichkeitsmerkmale oder Erfahrungen und das Vorwissen.

Neisser /124/ bezeichnet die Kognition als 'Schemata', die durch vorher existierende Strukturen gebildet sind. Nach ihm hängt Sehen besonders insofern von Schemata ab, dass kein Wahrnehmen ohne dieses kognitive Gedächtnis zustande gebracht werden kann. In seinem Wahrnehmungszyklus von Objekt (verfügbare Information), Schemata und Erkundung /124/ werden die aktiven Erkundungen zunächst durch die antizipierenden Schemata geleitet. Durch das Ergebnis dieser Erkundungen verändern sich die vorhandenen Schemata. Die veränderten Schemata beeinflussen wiederum das nachfolgende Verhalten und stehen für weitere Information bereit. Da Gedächtnisschemata sich hauptsächlich durch Erfahrung entwickeln, wird man durch Wahrnehmungslernen immer fähiger. Dadurch kann man die Umgebung unter zunehmend feineren Aspekten wahrnehmen. /124/

2.6 Beziehung zwischen Sehleistung und Beleuchtung

Abb. 2 stellt eine Korrelation zwischen der Sehschärfe und der Leuchtdichte dar. Nach ihr wird die Unterschiedsempfindlichkeit und damit die Sehschärfe generell bis ca. 500 cd/m^2 mit zunehmender Leuchtdichte erhöht. Der Bereich der besten Sehschärfe liegt bei Leuchtdichten zwischen ca. 100 und ca. 1000 cd/m^2 . Bei sehr niedriger sowie höherer Leuchtdichte wird die Sehleistung schlechter. Bei extrem hohen Leuchtdichten wird das Sehen aufgrund der Direktblendung sehr stark beeinträchtigt.

Auch Hentschels Referat /86,87/ zeigt, dass Zusammenhänge zwischen Beleuchtungsstärke und der Sehleistung bestehen. Ihm zufolge können nicht nur die Sehleistung, sondern auch das Leistungsniveau der mit einer Sehleistung verknüpften praktischen Tätigkeit durch die Steigerung der Beleuchtungsstärke erhöht werden.

J. Krivohlavy und H. Khek wiesen nach, dass ein Informationsverlust in der Wahrnehmung durch die überforderte Verarbeitung des Gehirns entstehen kann. /35/ (Abb. 3) Gemäß ihrer Untersuchung kommen Informationsverluste dadurch zustande, dass freie Kapazitäten des Gehirns in einen Erschöpfungszustand geraten, wodurch die mentale Belastung steigt. Ursache hierfür ist abgesehen von den Problemen der wahrgenommenen Objekte und des Wahrnehmenden die schlechte Sehbedingung, z. B. schlechte Beleuchtung und Gewitter in der Natursituation. Oben genannte Sehbeeinträchtigung durch schlechte Beleuchtung ergibt sich, wenn zu schwach, diffus, ungleichmäßig und flimmernd beleuchtet wird oder sich im Gesichtsfeld

- direkte und indirekte Blendungen
- spiegelnder Glanz
- zu hohe Leuchtdichteunterschiede
- Zwielicht und unzweckmäßige Lichtfarbe

befinden. /96/ Die durch oben erwähnte Kriterien vorkommenden Beeinträchtigungen der Informationsverarbeitung unseres Gehirns können durch die Optimierung der Beleuchtungsstärke und des Leuchtdichteunterschiedes erleichtert bzw. verbessert werden. /35,86/

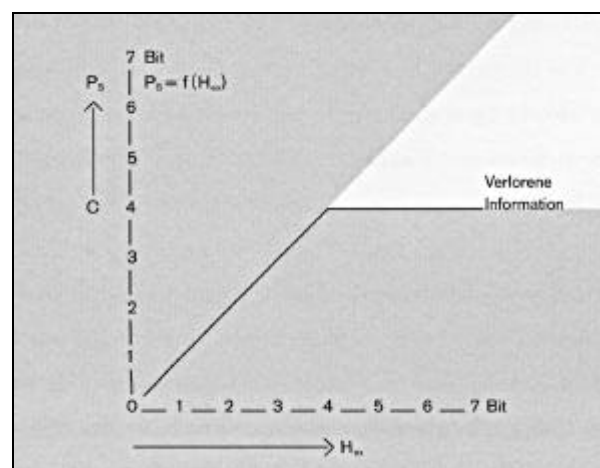
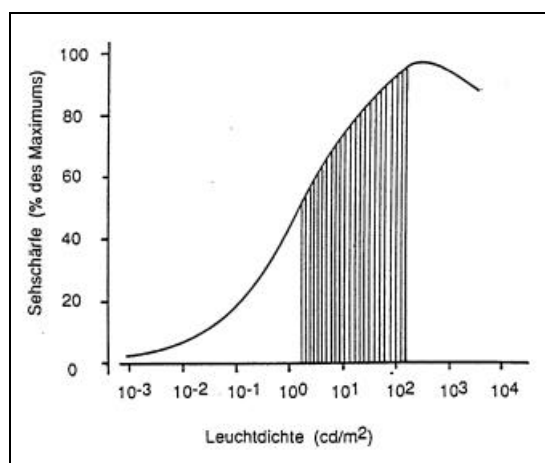


Abb. 2: links, Verhältnis zwischen Sehschärfe und Leuchtdichte /5/

Abb. 3: rechts, Korrelation zwischen Beleuchtung und Informationsverarbeitungsprozess im Gehirn /35/

3. Lichttechnische Grundlagen

3.1 Lichttechnische Größen und Einheiten

Die Definitionen von allen lichttechnischen Größen und Einheiten werden in DIN 5031 Teil 3 /39/ zusammengestellt. Eine lichttechnische Größe entspricht jeder strahlungsphysikalischen Größe, die in DIN 5031 Teil 1 /38/ definiert ist. Im folgenden werden vier Grundgrößen von ihnen erläutert.

Der Raumwinkel Ω wird nach DIN 5031 Teil 3 /39/ als der Quotient aus der Zentralprojektion des Gegenstandes auf eine um den Punkt gelegte Kugel und dem Quadrat des Kugelradius definiert. Für die Berechnung des Raumwinkels $d\Omega_2$, der durch ein von seinem Scheitelpunkt im Abstand r_1 befindliches Flächenelement dA_1 begrenzt ist, wird folgende Gleichung angegeben:

$$(Gl. 1) \quad d\Omega_2 = dA_1 \cdot \cos e_1 \cdot \Omega_0 / r_1^2$$

$$\Omega_0 = 1 \text{ sr}$$

e_1 = ebener Winkel zwischen der Flächennormalen von dA_1 und der Richtung des Scheitelpunkts p

Die Einheit des Raumwinkels wird als der Steradian (Kurzzeichen: sr) bezeichnet. Der Raumwinkel einer Vollkugel entspricht der Oberfläche des Einheitskegels ($r = 1$) und beträgt 4π sr, der einer Halbkugel ist 2π sr. Der Raumwinkel eines Strahlkegels mit Öffnungswinkel a lässt sich bei folgender vereinfachten Form leicht berechnen;

$$(Gl. 2) \quad \Omega = 4\pi \cdot \left(\cos \frac{a}{2}\right) \cdot \Omega_0$$

Der in Lumen gemessene Lichtstrom F (Einheit: Lumen, $lm = cd \cdot sr$) wird als der Quotient aus Lichtmenge Q (Einheit: Lumensekunde, Lumenstunden ; $lm \cdot s$, $lm \cdot h$) und Zeit t bezeichnet. Die Lichtmenge ist die getreu nach der internationalen Hellempfindlichkeitskurve innerhalb des sichtbaren Spektralbereiches bewert-

tete Strahlungsmenge (Einheit: $\text{W} \cdot \text{s}$) und bezieht sich dabei auf eine Lichtquelle, die nach allen Richtungen ausstrahlt.

$$(Gl. 3) \quad \Phi = Q/t$$

Die Einheit der Lichtstärke I wird als Candela (Kurzzeichen: cd) bezeichnet. Die Lichtstärke lässt sich mit dem Verhältnis des Lichtstromes, der von einer punktförmigen Lichtquelle in eine bestimmte Richtung ausgesandt wird, zum durchstrahlten Raumwinkel formulieren.

$$(Gl. 4) \quad I = \frac{\Phi}{\Omega_1}$$

Die Leuchtdichte ist die einzige photometrische Grundgröße, die vom menschlichen Auge unmittelbar wahrgenommen werden kann. Die Leuchtdichte ist für den Helligkeitseindruck einer Fläche maßgebend und wird in cd/m^2 angegeben. Die Leuchtdichte L wird nach DIN 5031 Teil 3 /39/ als der Quotient aus dem durch eine Fläche A Lichtstrom Φ , der in eine bestimmte Richtung e auftrifft, und dem Produkt aus dem durchstrahlten Raumwinkel Ω und der Projektion der Fläche $A \cdot \cos e$ auf eine Ebene senkrecht zur betrachteten Richtung definiert. (Gl.5)

$$(Gl. 5) \quad L = \frac{\Phi}{A \cdot \cos e \cdot \Omega} = \frac{I(e)}{A \cdot \cos e}$$

Die Beleuchtungsstärke E wird in Lux ($\text{lx} = \text{lm}/\text{m}^2$) angegeben. Sie wird mit dem Lichtstrom Φ , der auf eine Fläche auftrifft, pro eine beleuchtete Fläche A bestimmt.

$$(Gl. 6) \quad E = \frac{\Phi}{A}$$

Nach dem photometrischen Entfernungsgesetz wird die auf einem Flächenelement A auftretende Beleuchtungsstärke E aus der gleichen Lichtstärke I der

Lichtquelle, dem Abstand r zwischen der Lichtquelle und A und dem Lichteinfallswinkel e im betrachteten Raumwinkel näherungsweise wie folgt berechnet:

$$(Gl. 7) \quad E = \frac{I}{r^2} \cdot \cos e \cdot \Omega_0$$

Gl. 7 zeigt, dass sich die Beleuchtungsstärke in der Praxis durch die kleine Variation des Abstandes wesentlich ändern kann.

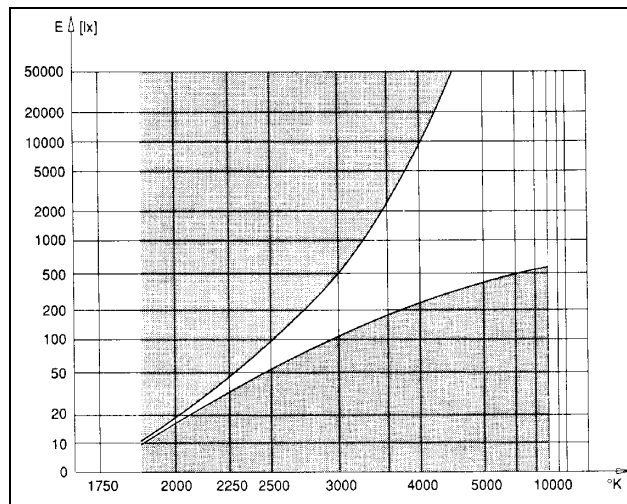


Abb. 4: Kruithhofersche Behaglichkeitskurve /8/

3.2 Physikalische Grundlagen

Die Farbtemperatur wird in der Lichttechnik zur Charakterisierung der Lichtfarbe einer Lichtquelle als Kelvin-Temperatur oder absolute Temperatur definiert. Die Emissionskurve vom Licht mit der Farbtemperatur 5000 Kelvin weist fast die gleiche Intensität in allen Wellenlängenbereichen auf. Mit sinkender Farbtemperatur im Bereich unterhalb 5000 Kelvin wird der Anteil der langwelligeren Strahlung immer dominanter. Dagegen wird der kurzwellige Strahlungsanteil mit ansteigender Farbtemperatur im Bereich oberhalb 5000 Kelvin immer größer. Die Veränderungen der Lichtfarbe mit steigender Farbtemperatur können 800 K = rot, 1000 K = orange, 2500 K = gelb-weiß, 6000 K = weiß, 10000 K = blau angesehen werden.

Aber die Menschen nehmen Licht mit niedriger Farbtemperatur psychologisch eher wärmer wahr. Der Grund dafür ist, dass sich unser visuelles System an die warme rötliche Lichtfarbe des ursprünglichen Kunstlichts in Form von Feuer gewöhnt. Die Behaglichkeit des Lichts stellt einen Zusammenhang zwischen Farbtemperatur und Beleuchtungsstärke her. Diese Beziehung ist in der sogenannten Kruithhoferschen Behaglichkeitskurve dargestellt. Aus Abb. 4 wird ersichtlich, dass eine Lichtquelle mit niedriger Farbtemperatur bei angemessenen Beleuchtungsstärken ebenfalls komfortabel empfunden werden.

Die nachfolgenden Wechselwirkungen zwischen Licht und Materie können beim Auftreffen eines Lichtstromes auf Materie vorkommen: /149/

- Änderung der Strahlrichtung; Sie geschieht beim Auftreffen durch Reflexion und beim Durchlassen durch Brechung und Beugung. Die Lichtverteilungen der Materie können gerichtet, gestreut, vollkommen gestreut oder gemischt sein.
- Schwächung der Intensität durch Absorption. Das aufgenommene Licht wird in Wärme umgewandelt.
- Lumineszierende Materialien durch Absorption von ultravioletter, sichtbarer oder infraroter Strahlung zeigen Photolumineszenz, bei der Strahlung bei größerer als der auffallenden Wellenlänge emittiert wird.

Diese drei Vorgänge können allein oder gemeinsam auftreten und hängen von der spektralen Zusammensetzung des Lichtes ab. Die Eigenschaften der Materialien können bei den oben genannten Prozessen mit Zuhilfenahme der lichttechnischen Kennzahlen dargestellt werden. Diese Stoffkennzahlen werden als der Reflexionsgrad r , der Absorptionsgrad a , der Transmissionsgrad t , die Brechzahl n und als die Streuungskennzahl Halbwertswinkel g für schwach streuende Stoffe und Streuvermögen s für stark streuende Stoffe bezeichnet. Die Stoffkennzahlen werden in DIN 5036 Teil 1 /49/ definiert. Der Zusammenhang zwischen ihnen kann nach dem Gesetz von der Erhaltung der Energie dargestellt werden als

$$(Gl. 8) \quad r + a + t = \frac{\Phi_r}{\Phi_o} + \frac{\Phi_a}{\Phi_o} + \frac{\Phi_d}{\Phi_o} = 1$$

Φ_r : reflektierter Lichtstrom

Φ_a : absorbierter Lichtstrom

Φ_d : durchgelassener Lichtstrom

Φ_o : auftreffender Lichtstrom.

Sind der Reflexionsgrad r und der Transmissionsgrad t einer Materie bekannt, kann die Leuchtdichte L bei bekannter Beleuchtungsstärke E mit den folgenden Formeln ermittelt werden für vollkommen gestreute Reflexion

$$(Gl. 9) \quad L = \frac{r}{p} \cdot E$$

und vollkommen gestreute Transmission

$$(Gl. 10) \quad L = \frac{t}{p} \cdot E.$$

3.3 Tageslichttechnische Grundlagen

3.3.1 Astronomische Grundlagen

Die Quelle des natürlichen Lichtes ist die Sonne. Ihr Durchmesser beträgt $1,392 \cdot 10^6$ km, die mittlere Entfernung zwischen der Erde und der Sonne $1,496 \cdot 10^8$ km. /140/ Die Sonne ist ein glühender Gasball und erzeugt Energie durch eine atomare Umwandlung in ihrem Inneren. Diese Energie wird von der Sonnenoberfläche in Form von Wärmestrahlung und elektromagnetischer Strahlung abgegeben. Das Spektrum dieser Strahlung erstreckt sich von der extrem kurzwelligen Gammastrahlung mit Wellenlängen von etwa 10^{-3} nm bis zur Radiowellenstrahlung mit Wellenlängen von über 0.8 m. Der Anteil der sichtbaren Strahlung beträgt etwa 48 %, der Ultraviolettstrahlung etwa 6 % und der Infrarotstrahlung 46 %. Die Lichtstärke der Sonne erreicht ca. $3 \cdot 10^{27}$ cd. Aufgrund der Neigung der Erdachse um 23,5 Grad gegenüber der Ekliptik ändern sich nicht nur die auf der Erde wahrge-

nommenen Tageslängen und Jahreszeiten, sondern die außerhalb der Atmosphäre auftreffenden Bestrahlungsstärke der extraterrestrischen Sonnenstrahlung. Unter der Solarkonstante E_0 versteht man die ganze Bestrahlungsstärke der extraterrestrischen Sonnenstrahlung auf einer zur Einfallrichtung senkrechten Ebene bei mittlerem Sonnenabstand. Für E_0 legt DIN 5034 Teil 2 /44/ $E_0 = 1,37 \text{ KW} / \text{m}^2$ fest und stellt deren Schwankung ($\pm 3 \%$) des Jahresgangs graphisch dar. Der Sonnenstand spielt eine wesentliche Rolle bei den Lichtverhältnissen eines Ortes der Erde zu einem beliebigen Zeitpunkt und wird gekennzeichnet durch den Sonnenhöhwinkel g_s und den Sonnenazimutwinkel a_s in Abhängigkeit von der Tages- und Jahreszeit. Das genaue Berechnungsverfahren des Sonnenstandes ist in DIN 5034 Teil 2 /44/ geschildert.

3.3.2 Meteorologische Grundlagen

Neben den astronomischen Größen üben die meteorologischen Parameter grundlegenden Einfluss auf das Strahlungs- und Tageslichtangebot im Freien an einem Ort aus. In zeitlicher Hinsicht können die Erscheinungen der Meteorologie nach Wetter, Witterung und Klima zusammengefasst werden. Darüber sind zahlreiche Veröffentlichungen /1,67,115,116,158/ erschienen.

Die Sonnenstrahlung verändert sich beim Durchdringen der Erdatmosphäre durch Absorption, Streuung und diffuse Reflexion. Die Atmosphäre, welche die Erde umgibt, setzt sich aus Luftmolekülen, Aerosolteilchen und ihrer Gasmischung zusammen, die man als Luft bezeichnet. Die Luft besteht aus Stickstoff (78 Vol.-%), Sauerstoff (21 Vol.-%) und Edelgasen. Der Aufbau der Luft wird aus der vertikalen Temperaturverteilung in die Troposphäre (0-11 km), Stratosphäre (11-50 km), Mesosphäre (50-80 km), Thermosphäre (80- 500 km) und Exosphäre (höher als 500 km) eingeteilt. /1/ Alle Wettervorgänge spielen sich vor allem in der Troposphäre ab. Die Troposphäre beinhaltet etwa drei Viertel der Gasmasse der Atmosphäre und beinahe den gesamten Wasserdampf. Dieser Wasserdampf wirkt bei Bildung von allen veränderlichen Wettererscheinungen wie Wolken und Niederschlag mit.

Schwächungen der Sonnenstrahlung treten jedenfalls beim Durchgang der wolkenlos angenommenen Atmosphäre ein. Sie werden nach /115/ einerseits durch

Streuung an den Luftmolekülen und Aerosolpartikeln verursacht. Andererseits wird die Sonnenstrahlung durch Absorption an Ozon, Wasserdampf und verschiedenen Gasen abgeschwächt. Dadurch ändern sich neben der Sonnenbestrahlungsstärke die spektrale Zusammensetzung der Sonnenbestrahlung. Diese Extinktion bezeichnet man als Trübung. Ihre Beeinflussung ist, abgesehen von der Zusammensetzung der Atmosphäre, durch den Sonnenhöhenwinkel und Luftdruck bedingt. Im Gegensatz zur Veränderung im Wellenlängenbereich von UV und Infrarot bleibt der Anteil des sichtbaren Wellenlängenbereiches in der Atmosphäre fast unverändert.

Darüber hinaus wird die einfallende Sonnenstrahlung ebenfalls durch die Reflexion an Wolken vermindert. Die reflektierte Sonnenstrahlung geht entweder in den Weltraum zurück oder nach mehrfachen Reflexionen zur Erdoberfläche. Dabei werden alle Wellenlängen gleich beeinflusst. Daher sieht der stark bewölkte Himmel weiß bis grau aus. Insbesondere die Art, die Höhe, die Dicke und räumliche Verteilung von Wolken beeinflussen das Tageslichtangebot, das an einem Ort, zu einem bestimmten Zeitpunkt ankommt, maßgeblich. Vor allem der teilweise bewölkte Himmel verursacht starke Schwankungen des Tageslichtangebotes durch die häufig wechselnden Sonnenerscheinungen. Die verschiedenartigen Wolken werden international nach Höhenlage in tiefe Wolken (0-2 km), mittelhohe Wolken (2-7 km), hohe Wolken (5-13 km) und Wolken mit großer vertikaler Erstreckung (0-13 km) klassifiziert. /1/

3.3.3 Globalstrahlung

Die Globalstrahlung E_{eg} (W/m^2) besteht aus der direkten Sonnenstrahlung E_{eS} und der gestreuten oder diffus reflektierten Himmelsstrahlung E_{eH} .

$$(Gl. 11) \quad E_{eg} = E_{eH} + E_{eS} \cdot \sin g_s$$

g_s : Sonnenhöhe

In DIN 5034 Teil 2 /44/ werden die Berechnungsverfahren der Bestrahlungsstärken für den klaren, vollständig bedeckten und mittleren Himmel auf horizontalen Flächen beschrieben. Der Anteil der direkten Sonnenstrahlung wird größer mit der zunehmenden Sonnenhöhe und abnehmender Trübung. Die Wolkenschicht lässt in der Regel nur ca. 20-25 % der einfallenden Sonnenstrahlung von Solarstrahlung durch. Daher sind die herrschenden Bewölkungsverhältnisse entscheidend für das Strahlungsklima eines bestimmten Ortes. Eine wiederholte Reflexion der Strahlung wird durch die Reflexion der Erdoberfläche hervorgerufen. Die Reflexionsgrade von verschiedenen Erdoberflächen (Albedo) sind sehr unterschiedlich. Die Albedo erreicht bei der Erde den durchschnittlichen Wert von etwa. 30 % und beträgt bei dem schneefreien Boden 5-20 %, dem reinen Schnee 80-90 %, dem schmelzenden Schnee 60-70 % und dem Meer 10 %. /115/

3.3.4 Solarstrahlungsangebot im Freien

Um die Größen der Himmelsleuchtdichte und der Beleuchtungsstärken im Freien festzulegen, werden die Himmelszustände nach dem Grad und der Verteilung der Bewölkung standardisiert. In DIN 5034 Teil 2 /44/ werden sie in zwei extreme Zustände klarer Himmel und bedeckter Himmel während der kurzen Zeiten und mittlerer Himmel als langjähriges Mittel aller Himmelszustände eingeteilt. Den bedeckten Himmel bezeichnet man als den vollständig bedeckten Himmel, dessen Zustand mit geschlossener, dichter Stratusbewölkung eine inhomogene Wolkenverteilung aufweist. Die Leuchtdichteverteilung des bedeckten Himmels ist rotations-symmetrisch. Seine Leuchtdichte nimmt vom Zenit zum Horizont ab und erreicht am Horizont ungefähr ein Drittel der Zenitleuchtdichte.

Der klare Himmel stellt einen wolkenfreien Himmelszustand dar. Dessen Leuchtdichteverteilung ist spiegelsymmetrisch zu einer gedachten Ebene, die durch den Standort, den Zenit und die Sonnenposition definiert wird. Der klare Himmel als Lichtquelle ist mit der Sonne gekoppelt. Deswegen sind die Himmelsleuchtdichten an erster Stelle abhängig von der Sonnenhöhe und zusätzlich von Trübung und der optischen Luftmasse. Die mittleren monatlichen Trübungsfaktoren in der Bundesrepublik Deutschland sind in DIN 5034 Teil 2 /44/ angegeben.

Der mittlere Himmel bezieht alle Himmelszustände ein, insbesondere den teilweise bedeckten Himmel in einem langfristigen Zeitabschnitt. Um den aus den langfristigen Betrachtungen resultierenden Mittelwert zu berücksichtigen, werden die lichttechnischen und strahlungsphysikalischen Daten vom mittleren Himmel mit Hilfe der örtlichen Sonnenscheinwahrscheinlichkeit festgestellt. Die Sonnenscheinwahrscheinlichkeit SSW ist das langfristige Mittel der Augenblickswerte der relativen Sonnenscheindauer. Dabei bezeichnet die relative SSD das Verhältnis der Sonnenscheindauer zur möglichen Sonnenscheindauer innerhalb der selben Zeitspanne. Die Sonnenscheindauer SSD ist nach DIN 5034 Teil 2 /44/ die Summe der Zeitintervalle innerhalb einer gegebenen Zeitspanne, während derer die Bestrahlungsstärke der direkten Sonnenstrahlung auf einer Ebene senkrecht zur Sonnenrichtung größer oder gleich 120 W/m^2 ist. Inzwischen wird die mögliche Sonnenscheindauer definiert als die Summe der Zeitintervalle innerhalb einer gegebenen Zeitspanne, während der die Sonne über dem wirklichen Horizont steht, der durch Berge, Gebäude, Bäume usw. eingengt sein kann.

3.3.5 Tageslichtangebot im Freien

Das Tageslichtangebot im Freien muss zuerst zur Kenntnis genommen werden, um die Beleuchtungsverhältnisse in durch Tageslicht beleuchteten Innenräumen zu ermitteln. Das auf der Erde ankommende Tageslicht wird aus der punktförmigen Sonne ausgestrahlt. Trotzdem kann es begründet durch den großen Abstand zwischen Sonne und Erde die parallele Strahlung angenommen werden. Im Gegensatz zum reflektierten, sekundären Licht kann das primäre Tageslicht von unserem Auge nicht direkt betrachtet werden. Aber das primäre Licht enthält ein umfangreiches Potential für die optische Wahrnehmung. Die Komponenten des Tageslichts, die für die optische Wahrnehmung wesentliche Rolle spielen, können nach /9/ wie folgt genannt werden:

- Intensität
- Intensitätsverteilung
- Lichtrichtung oder Strahlungscharakteristik
- Schattenbildung
- Spektrale Zusammensetzung

Die horizontale Beleuchtungsstärke, die auf der Erdoberfläche zur Verfügung steht, besteht aus der Beleuchtungsstärke durch die Sonne und aus der Beleuchtungsstärke durch den Himmel.

$$(Gl. 12) \quad E_g = E_H + E_S \cdot \sin g_s$$

E_g : Horizontalbeleuchtungsstärke (lx)

E_H : Beleuchtungsstärke durch den Himmel

g_s : Sonnenhöhe

$E_S \cdot \sin g_s$: Beleuchtungsstärke durch die direkte Sonne, bezogen auf die Sonneneinfallrichtung

Die Horizontalbeleuchtungsstärke der Sonnentage bei Sonnenschein erreicht 40000 bis 100000 lx. /9/ Die Horizontalbeleuchtungsstärke im Schattenbereich schwächt sich um 1/10 bis 1/20 der Intensität des Sonnenscheinbereichs ab. Beim bedeckten Himmel beträgt die Horizontalbeleuchtungsstärke ca. 1/10 der Horizontalbeleuchtungsstärke der sonnigen Tage. Die Beleuchtungsstärke auf geneigten Fläche E_F setzt sich zusammen aus Himmels- $E_{H,F}$, Sonnen- $E_{S,F}$ und Bodenreflexionsanteilen $E_{B,F}$. Die Reflexionsanteile bestehen in der Realität neben dem Boden aus Verbauung und Bäumen. Die Vertikalbeleuchtungsstärke erreicht abgesehen von den Lichtverhältnissen bei tief stehender Sonne, ca. 70 bis 80 % des Wertes der Horizontalbeleuchtungsstärke. Angenommen die Nutzungszeit von 7.00 Uhr bis 18.00 Uhr angesetzt, dann wird nach einfacher Rechnung ein Jahresmittel der Außenbeleuchtungsstärke von ca. 10000 lx angegeben. Für genauere Berechnungsverfahren der Beleuchtungsstärke wird auf die mehrfach erwähnte DIN 5034 Teil 2 /44/ verwiesen.

Die Verteilung der Helligkeit des Tageslichtes auf dem beleuchteten Teil der Erdoberfläche ist von Bewölkung, Schattenbildung durch die Sonne und der Trübung des Sonnenlichtes abhängig. Je bewölkter und trüber der Himmel wird, desto gleichmäßiger wird die Helligkeitsverteilung an einem beliebigen Ort auf der Erdoberfläche. Beim bewölkten Himmel kommen durch den teilweise durchbrechenden Sonnenschein zwischen den Wolken zonal starke Helligkeitsdifferenzen vor.

Die Farbtemperatur des Tageslichts ändert sich auch ständig durch Wetter, Himmelsrichtung, Tages- und Jahreszeiten. Sie erreicht ca. 4000 K bei Sonnenuntergang, für den klaren blauen Nordhimmel wird ein Maximalwert von ca. 10000 K bemessen. Beim bedeckten Himmel beträgt ihr Wert ca. 4000 K am Südhimmel und ca. 5500 K in Nordrichtung. Für die tageslichttechnische Bewertung definiert die CIE D_{65} als Tagesnormlichtart bei der Farbtemperatur von 6500 K. /149/

3.3.6 Tageslicht im Innenraum

Für die Berechnung der Beleuchtung in einem Innenraum, der durch Tageslicht beleuchtet wird, wird wegen seiner Einfachheit am häufigsten das Tageslichtquotientenverfahren angewendet. DIN 5034 Teil 1 /43/ definiert den Tageslichtquotienten D als das Verhältnis der Beleuchtungsstärke E_p in einem Punkt einer gegebenen Ebene im Innenraum zur gleichzeitig vorhandenen Horizontalbeleuchtungsstärke E_a im Freien bei unbebauter Himmelshalbkugel:

$$(Gl. 13) \quad D = \frac{E_p}{E_a} \cdot 100 \%$$

Der Tageslichtquotient gilt in der Regel für die Beleuchtung durch den bedeckten Himmel, weil sich wegen seiner typischen, rotationssymmetrischen und relativen Leuchtdichteverteilung nur für ihn reproduzierbare Beleuchtungsverhältnisse im Innenraum ergeben. Daher bleiben bei diesem Verfahren die durch direktes Sonnenlicht bewirkten Anteile beider Beleuchtungsstärken unberücksichtigt. Der Tageslichtquotient ist abhängig von /88,149/

- der durch die geographische Lage bedingten Außenbeleuchtungsstärke
- den Reflexionseigenschaften der Verbauung, Bäume und Gelände und deren Beschattungswirkung
- der Größe und Lage der Fenster und Oberlichter
- den lichttechnischen Eigenschaften der in der Fensteröffnung befindlichen Bauteile
- den Raumabmessungen (Proportionen)
- den Reflexionseigenschaften des Innenraumes
- der Lage des Punktes im Raum.

Das Berechnungsverfahren des für einen Punkt im Innenraum gültigen Tageslichtquotienten ist in DIN 5034 Teil1 und Teil 3 /43,44/ erklärt. Der Tageslichtquotient setzt sich aus dem direkten Himmelslichtanteil D_H , dem Reflexionsanteil D_V des Außenraumes und dem Reflexionsanteil D_R der Innenraumflächen zusammen. Nach der zugrunde liegenden Berechnung des Tageslichtquotienten für die Rohbauöffnung der Fenster werden zunächst die Verluste durch Verglasung, Konstruktionsteile und Verschmutzung berücksichtigt: /45/

$$(Gl. 14) \quad D = (D_{Hr} + D_{Vr} + D_{Rr}) \cdot t_{D65} \cdot k_1 \cdot k_2 \cdot k_3 \cdot k_e$$

t_{D65} : Transmissionsgrad des Verglasungsmaterials für parallel, senkrechten Lichteinfall bei Normlichtart D_{65}

k_1 : Verminderungsfaktor für Rahmen und Sprossenwerk

k_2 : Verminderungsfaktor für Verschmutzung

k_3 : Korrekturfaktoren für nicht senkrechten Lichteinfall

k_e : Verminderungsfaktor für Schachtwirkung, besonderes bei kleinflächigen Oberlichtern

3.4 Tages- und Kunstlicht im Vergleich

Die künstliche Beleuchtung kann aufgrund der technischen Unvollkommenheit mit dem Tageslicht in sämtlichen Wirkungen noch nicht verglichen werden. Außer der Wirtschaftlichkeit und Umweltfreundlichkeit können

- Qualität in sämtlichen Wirkungen
- Vielfältigkeit durch die permanenten Schwankungen
- Bezug nach Außen
- Biologische Anpassung des menschlichen Auges an das Reizangebot des Tageslichtes

als die Vorteile der Tageslichtsanwendung bezüglich der visuellen Wahrnehmung genannt werden. Die bemerkenswerteste Beschaffenheit des Tageslichtes von

den obengenannten Kriterien liegt an der spektralen Zusammensetzung. Die durch Wetter, Tages- und Jahreszeiten bedingten ständigen Veränderungen des Tageslichtes in seiner Intensität, spektralen Zusammensetzung, Farbtemperatur und Lichtverteilung lassen die vielfältigen Erscheinungsbilder im Raum entstehen. Dadurch gewinnen die Museumsexponate neben verschiedenen Eindrücken weitere neue Merkmale besonderes in ihrem optischen Bezug zum Raum. Dagegen hat das Kunstlicht nur eine statische Wirkung. Das kann man darauf zurückführen, dass das ausgestrahlte Kunstlicht durch die Art der Lampe geprägt und deshalb seine lichttechnischen Kriterien unveränderlich ist.

Darüber hinaus ist die Herstellung des visuellen Bezugs nach außen bzw. der Transparenz zwischen dem Innen- und Außenraum für die Tageslichtanwendung besonders spezifisch. Durch die Tageslichtöffnungen des Innenraumes werden nicht nur die direkte Sichtverbindung nach außen, sondern auch die indirekte Vermittlung des Wetters und der Tageszeit im sonst optisch abgeschlossenen Raum hergestellt. Das menschliche Auge ist physiologisch auf die sich ständig ändernden Komponenten des Tageslichtes eingestellt. Daher ist das menschliche Auge in der Lage, die bei den dynamisch schwankenden Tageslichtsituationen ausgestellten Objekte durch seine verschiedenen Mechanismen anpassend wahrzunehmen. Parallel dazu werden die Verarbeitungsvorgänge im Gehirn dazu führen, die durch das Tageslicht ins Auge eintretenden Informationen am günstigsten zu bewerten.

Die Schwierigkeit der Kontrolle des Tageslichtes kann durch die heutige Tageslichttechnik beseitigt werden. Die künstliche Beleuchtung kann am besten als die Ersatzbeleuchtung des Tageslichtes oder als Nachtlicht eingesetzt werden.

4. Tageslicht im Museum

Das Konzept der Tageslichtöffnung und des integrierten Lichtsystems bestimmt sich zunächst nach den Sammlungs- bzw. Ausstellungsarten der Museen. Diese Ausstellungsarten können unter die Kategorien von Kunst, Kulturgeschichte, Naturkunde, Technik und Wissenschaft und Politik und Geschichte grob eingeordnet werden. Nach /72,90,139/ werden von der Beleuchtungsplanung der Museen im Allgemeinen

- die bestmögliche Präsentation der Exponate
- den Lichtschutz der Exponate
- die Schaffung des Komforts für Besucher

und dazu besonderes in durch Tageslicht beleuchteten Museen

- Sonnen- und Blendschutz
- der Bezug zur Umwelt

gefordert. Nach DIN 5035 Teil 1 /47/ lassen sich die nachfolgenden Kriterien zur Erfüllung der oben genannten Sehaufgaben festlegen:

- Größe der auftretenden Leuchtdichte und Farbkontraste
- Größe der wesentlichen Strukturelemente (Details)
- Geschwindigkeit, mit der wahrgenommen werden muss
- gewünschte Sicherheit des Erkennens
- Dauer der Seharbeit

Aus den obengenannten Kriterien lassen sich aus gerade zitierter DIN 5035 Teil 1 /47/ folgende lichttechnischen Gütemerkmale vor allem für Kunstlicht folgern:

- Beleuchtungsniveau
- Helligkeitsverteilung
- Begrenzung der Blendung
- Lichtrichtung und Schattigkeit
- Farbwiedergabe

Diese Kriterien beeinflussen die Qualität der Beleuchtung im Innenraum und können auch für Tageslichtplanung in Museen gelten. Je schwieriger die Sehaufgaben werden, um so größer wird der Anspruch an die Gütemerkmale der Beleuchtung. Je nach Art und Schwierigkeit der Sehaufgabe bzw. nach Raumart kann festgestellt werden, welchen Kriterien Vorrang gegeben werden soll.

Eigenschaften des Exponats			Format		„groß“		„klein“	
			Darstellung, Aussehen		kontrastreich		kontrastarm	
Erscheinungsweise			dunkel	hell	dunkel	hell		
Leuchtdichte	L_o	cd/m ²	10		20			
Reflexionsgrad*	ρ	%	20	40	20	40		
Beleuchtungsstärke	E	lx	160	80	320	160		

* gültig für diffuse Reflexion beleuchteter Flächen

Abb. 5: Vorschlag der Mindest-Beleuchtungsstärken von Hilbert /91/

4.1 Beleuchtungsniveau

Bei der Festsetzung der Beleuchtungsstärke in Museum handelt es sich neben der optimalen Wahrnehmung um Lichtschutz der Kunstobjekte. Wie im Kapitel 2 erklärt wurde, bietet im allgemeinen eine höhere Leuchtdichte bis zur gewissen Grenze eine bessere Präsentationsmöglichkeit. Andererseits muss die Beleuchtungsstärke aufgrund des Exponatschutzes jedoch begrenzt werden. DIN 5035 Teil 2 /48/ gibt als die optimale Beleuchtungsstärke der lichtunempfindlichen Ausstellungsstücke 300 lx und empfiehlt, dass für lichtempfindliche Ausstellungsstücke dem Schutz gegen Strahlung die höchste Priorität zugebilligt werden soll. Der bisher allgemein gültige Begrenzungswert von 50 lx für die lichtempfindlichen Exponate beruht auf der Empfehlung von G. Thomson. Nach Hilbert /89/ basiere die oben genannten Schwellenwerte von Thomson nicht auf der wissenschaftlichen Ermittlung. Trotz des besseren Schutzeffektes durch eine niedrigere Beleuchtungsstärke ist eine Beleuchtungsstärke von 50 lx im Allgemeinen für eine

museale Präsentation zu schwach, denn die Gesichtsfeldleuchtdichte für die Farbwahrnehmung erfordert mindestens 10 cd/m^2 . (s. S.9) Nach Krochmann /104/ solle dafür die Beleuchtungsstärke immer 200 lx , wenigstens 100 lx betragen. Hilbert /90/ schlägt die Leuchtdichte von 10 bis 20 cd/m^2 sowohl zum Lichtschutz, als auch zur Gewährleistung der mühelosen Wahrnehmung für schwache Farbkontraste und kleinere Details vor. (Abb. 5) Vorausgesetzt, dass angemessene Schutzmaßnahmen für die lichtempfindlichen Exponate getroffen werden, könne nach Hilbert /90/ eine bevorzugte Beleuchtungsstärke für die Gemädegalerien unter Tageslicht von 300 bis 400 lx und unter Kunstlicht von etwa 150 bis 250 lx erlaubt werden.

4.2 Helligkeitsverteilung

Die Grundtypen der Helligkeitsverteilung unterscheiden sich nach dem Ziel und der Art der Ausstellung generell zwischen dem Galerietyp und dem Inszenierungstyp. /90/ Das erstgenannte Konzept weist die neutralen und gleichmäßigen Lichtverhältnisse wie üblich in der Bildergalerie auf. Aufgrund des gleichwertigen Beleuchtungsniveaus bei allen Objekten wird vom Besucher dort gefordert, eigenen Intellekt beim Betrachten, Vergleichen und Erkennen gewisser Inhalte anzuwenden. Dagegen hat das als zweites erwähnte Inszenierungskonzept auf einen Museumsbesucher eher eine gefühlsmäßige Wirkung. Dabei ist vor allem das sorgfältige Verhältnis zwischen Grund- und Akzentuierungsbeleuchtung ausschlaggebend. Das diesbezügliche Konzept kann den Beschauer durch die thematische Organisation einbeziehen, leiten und belehren. Daher ist es eher für die meisten Museen geeignet ausgenommen den Kunstgalerien.

4.3 Blendung

Nach DIN 5035 Teil 1 /47/ versteht man unter Blendung Störungen durch zu hohe Leuchtdichte und/oder zu große Leuchtdichteunterschiede im Gesichtsfeld. Sie beeinträchtigt die Betrachtung eines Objektes sowie den Sehkomfort in Ausstellungsräumen. Man unterscheidet /47/

- **physiologische Blendung, die zu einer Herabsetzung des Sehvermögens**
- **psychologische Blendung, die zu vorzeitiger Ermüdung und zur Herabsetzung von Leistung, Aktivierung und Wohlbefinden**

führt. Der Grund für die mentale Belastung durch die psychologische Blendung ist die Korrektur derartiger Störung unseres Gehirns und die dadurch entstehende Erschöpfung der freien Kapazität des Gehirns. Die psychologische Blendung ist stark abhängig von den Beobachtungssituationen und wird subjektiv bewertet. Bartenbach und Witting /18/ haben die visuelle bzw. psycho-physische Belastung auf dem Bildschirmarbeitsplatz bei den verschiedenen Lichtsystemen getestet. Dabei erzielte das Lichtumlenksystem dank der Zusammenwirkung von der Systemleuchtdichte und der ausgewogenen Lichtverteilung signifikant bessere Werte für die mentale Belastung. Der Ermüdungs- und Leistungsstörungsgrad ist deutlich höher bei der Blendsituation mit zu großen Leuchtunterschiede (beim klaren Fenster ohne System) oder bei der niedrigen Leuchtdichte (beim Blendschutz in Form eines relativ dichten Stoffrollos) als bei den Lichtumlenksystemen.

Die Ursache der physiologischen Blendung kann durch das Streulicht im menschlichen Auge erklärt werden. Dieses Streulicht wird von der sich im Gesichtsfeld befindenden unabgeschirmten Blendquelle erzeugt und liegt wie ein Schleier auf der Netzhaut. Diese zusätzliche Schleierleuchtdichte bewirkt beim Auge ein höheres Adaptionsniveau trotz der unveränderten mittleren Gesichtsfeld-Leuchtdichte. Damit steigt die minimale Stärke des Leuchtdichteunterschieds zur Erkennung einer Sehaufgabe und daraus erfolgt eine Herabsetzung der Sehleistung.

Die oben erklärten psychologischen und physiologischen Blendungen können getrennt oder gemeinsam in Form von Sukzessivblendung und Simultanblendung (Relativblendung) auftreten. /119/ Die Sukzessivblendung ist eine Folge des plötzlichen Wechsels von niedriger zu höherer Leuchtdichte im Gesichtsfeld oder umgekehrt. Dabei sind zwei Arten zu unterscheiden:

- **Adaptationsblendung, dessen Blendungseffekt bis zum Wiedererreichen des der neuen Situation entsprechenden Sehleistungsniveaus mehrere Sekunden oder Minuten, in Extremfällen mehr als 30 Minuten dauert.**

- **Absolutblendung, die durch die Leuchtdichte von mehr als 10000 cd/m² im Gesichtsfeld entsteht und das menschliche Auge nicht adaptieren lässt.**

Die Simultanblendung wird durch zu große Leuchtdichtekontraste im Gesichtsfeld hervorgerufen und je nach den Ursachen, wie folgt, eingeteilt: /86,119/

- **Infeldblendung durch das dichte Zusammenlegen der Blendquelle und dem wahrnehmenden Gegenstand**
- **Umfeldblendung durch die peripher liegende Blendquelle im Gesichtsfeld**
- **Direktblendung durch die direkte Lichtquelle**
- **Reflexblendung durch Spiegelung hoher Leuchtdichte auf glänzenden Oberflächen**

Das Ausmaß der Blendung ist abhängig für Direktblendung von /72/

- **der Leuchtdichte der Blendlichtquelle**
- **dem Blickwinkel des Beobachters zur Blendlichtquelle (Winkelbereich von flacher als 45° vor dem Betrachter)**
- **dem Leuchtdichtekontrast der Blendlichtquelle zur Sehaufgabe**
- **der Größe und Nähe der Blendlichtquelle zur Sehaufgabe**

und für Reflexblendung zusätzlich von

- **dem Glanzgrad der Oberfläche**
- **der Größe der Lichtbündel des gerichtet auftreffenden Lichts**
- **der Lage der reflektierenden Oberfläche.**

Gegen die Relativblendung, die Kontrastminderung, Fusions- und Akkommodations-schwierigkeit bewirkt, können die folgenden Gegenmaßnahmen getroffen werden: /47,154/

- **Festlegung einer geeigneten Lichteinfallrichtung**
- **Erhöhung der mittleren Leuchtdichte im Gesichtsfeld**
- **Gestaltung der matten oder entspiegelten Oberflächen**

- vergrößerte leuchtende Fläche der Lichtquelle

Bezüglich der Begrenzung der Reflexblendung fordert DIN 3035 Teil 1 /47/, dass die Leuchtdichteverhältnisse zwischen Arbeitsfeld (Infeld) und Umfeld über etwa 3:1 nicht hinausgehen dürfen und die Reflexionsgrade für Arbeitsflächen von 0.2 bis 0.5 betragen.

4.4 Blend- und Sonnenschutz

Die Blend- und Sonnenschutzsysteme gewährleisten die störungsfreie Wahrnehmung und den Exponatschutz vor der Sonneneinstrahlung in Tageslichtmuseen. Die Kriterien der Blend- und Sonnenschutzsysteme sind: /9,15/

- Erforderliche Leuchtdichtereduzierung
- Lichtdurchlässigkeit
- Sicht nach Außen
- Lichtverteilung
- Spektrale Durchlässigkeit
- g-Wert (ein auf die Strahlung bezogener Energiewert)
- gestalterische Ansprüche.

Die am häufigsten verwendeten Materialien für die Blend- und Sonnenschutzsysteme sind Metall, Kunststoff, Glas oder Textilien. Diese Einrichtungen können beweglich oder fest bzw. vor, zwischen oder hinter dem Fenster eingebaut werden. Dabei werden zwischen den folgenden Systemen unterschieden: /15, 9/

- Beschattung
- Reflexions- und Absorptionsgläser
- Metallische Folien und Filter
- Sonnen- und Lichtumlenkung

Die Beschattungssysteme sind die einfachsten und am meisten verwendeten Systeme. Bei ihnen handelt es sich um starr oder beweglich installierten Abdeckun-

gen, wie Vordach, Lamellen oder Textilabschatter, z. B. Markisen, Rollos, Jalousien, etc.. Aufgrund der ständigen Veränderung des Sonnen- und Himmelszustandes sind die beweglichen Beschattungssysteme effektiver als die starren Abdeckungen. Die Reflexions- und Absorptionsgläser haben die Beschaffenheit, die Sonnenstrahlung entweder zu reflektieren oder zu absorbieren. Die Arten derartiger Gläser sind durch Sonnenschutzwirkung, Lichtdurchlässigkeit und spektrale Durchlässigkeit unterschiedlich gekennzeichnet. Die Metallfolien, die meist zwischen Fensterkombination oder als innerer Sonnenschutz eingerichtet sind, reflektieren die Sonnen- und Lichtstrahlung zurück und schwächen dadurch die Erwärmung und Leuchtdichte ab. Anders als Beschattungssysteme garantieren die Systeme der Reflexions- und Absorptionsgläser und der Metallfolien einwandfreien Sichtkontakt nach außen. Die UV- bzw. IR-Filter können im besonderen für die lichtempfindlichen Kunstobjekte zum Schutz vor den schädlichen kürzeren bzw. längeren Wellenlängen des Lichts eingesetzt werden.

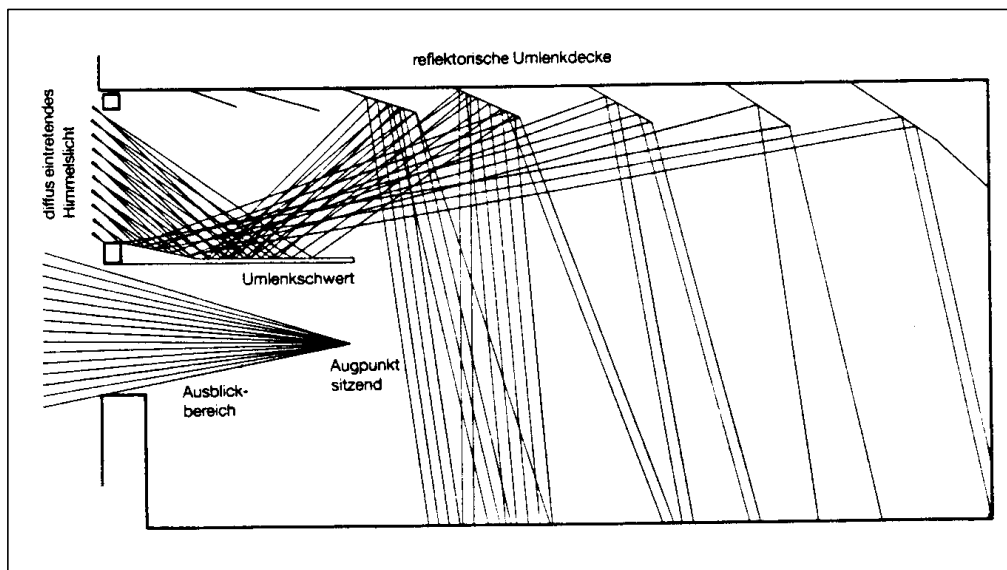


Abb. 6: Schematische Darstellung des Tageslichtumlenksystems /6/

Die innovativen Tageslichtumlenksysteme wie Abb. 6 bieten außer der optimalen Lichtverteilung den besten Blend- und Sonnenschutz sowie Bezug zur Außenwelt. Das Konstruktionsprinzip dieses Tageslichtumlenksystems beruht auf den optischen Gesetzen der Materialeigenschaft der Aluminiumreflektoren oder der Kunststoffprismen. /4,6/ Die erstgenannten Aluminiumreflektoren als Sonnenschutzraster schicken dank der angemessenen Formgestaltung des Reflektors

das gerichtete und parallele Sonnenlicht von Süden (Öffnungswinkel ca. 0.5°) zurück. Dagegen wird das Zenitlicht sowie das diffuse Tageslicht aus den übrigen Himmelsrichtungen in den Innenraum durchgelassen. Die als zweites erwähnten Kunststoffprismen lenken das Sonnenlicht nach dem optischen Brechungsgesetz zurück oder um. Besonders beim Seitenlicht kann das durchkommende diffuse Licht mit Hilfe von den an der Decke montierten Reflektoren in den tieferen Innenraum geleitet werden. Ob ein Prismensystem als Sonnen- oder Blendschutz benutzt werden kann, hängt von den Prismenstrukturen ab. /7/ Die Öffnung, die für die Sicht getrennt eingebaut ist, schafft den gewünschten visuellen Bezug zur Außenwelt.

4.5 Lichtrichtung und Schattenwirkung

Das vorwiegend gerichtete Licht und der dadurch entstehende Schatten können nicht nur eine gute Erkennbarkeit eines Objektes oder einer Oberflächenstruktur, sondern auch Vermeidung der Schleierreflexionen und der Reflexblendung erzielen. Schattigkeit wird im allgemeinen als eine dunkle Fläche definiert, die ein von einer Lichtquelle getroffener nicht transparenter Körper verursacht. Wenn Licht so schräg gerichtet ist, dass nur die Erhebungen direkt beleuchtet werden, werden Schatten auch im Senken einer stark strukturierten Oberfläche geschaffen. Der sogenannte Modelling-Effekt kommt vor, wenn alle Senken direkt und gerichtet beleuchtet werden. Nach DIN 5035 Teil 2 /48/ wird Modellierung als die Ausgewogenheit zwischen diffuser und gerichteter Beleuchtung bezeichnet. Bei den verschiedenen Lichteinfallswinkeln werden die Beleuchtungsstärken unterschiedlich aufgewiesen. Die dadurch entstehenden Kontrastunterschiede lassen die Objekte und die Struktur der Fläche deutlich erkennen.

Mit gerichteter Beleuchtung kann man dramatische und inszenierte Wirkungen erreichen. Außerdem kann eine optimal gerichtete Beleuchtung die Plastizität von dreidimensionalen Objekten, wie Büsten und Plastiken, verstärken. Dafür ist die Wahl der Lichtrichtung besonderes entscheidend. Bei extrem gerichtetem Licht werden die Teile der Objekte in dem harten Schlagschatten verborgen. Die Feinheit und Glanzwirkung von lichtbrechendem oder glänzendem Material, Glas,

Schmuck, Keramik oder Metall, können auch mit Hilfe des gerichteten Lichts betont präsentiert werden. Nach Methling /119/ erreicht Tageslichtbeleuchtung bessere Schattigkeit und Kontrastwerte im Innenraum als Tageslichtbeleuchtung mit zusätzlicher künstlicher Allgemeinbeleuchtung oder als rein künstliche Beleuchtung.

4.6 Farbwiedergabe

Die spektralen Tageslichtveränderungen, die beim Durchlassen des Lichtes entstehen können, üben eine hemmende Wirkung auf die originaltreue Farbwahrnehmung der Exponate aus. Die Ursachen dafür liegen im Einsatz von

- Gläsern
- Textilien zur Beschattung
- UV-Filter

Die spektralen Tageslichtveränderungen sind abhängig von den Remissionen der Eigenschaften der obengenannten Materialien. Bei ihrer Auswahl muss die natürliche Farbwiedergabe bei der Exponatbetrachtung in Museen garantiert werden. Die Gläser haben verschiedene spektrale Durchlässigkeit. /9/ Dabei weisen die Reflexions- und Absorptionsgläser sehr starke Veränderungen auf. Dagegen absorbiert normales Glas Licht nur im Rotbereich. Derartige Farbverschiebungen können auch durch das Sicherheitsglas der Vitrine hervorgerufen werden. Es geht bei der spektralen Veränderung durch UV-Filter um die Kantenlage des Filters. Sie bestimmt den zurückgehaltenen Bereich der kürzeren Wellenlänge. /91/ Nach DIN 6196 /53/ dürfen nur die Wellenlängen unter 410 nm herausgefiltert werden, um keine Farbänderung des Objekts zu erzeugen.

4.7 Lichtschutz der Exponate

Die Lichtstrahlung kann Wirkungen verursachen, die zu einer Schädigung des Ausstellungsobjekts führen, wie:

- photochemische Wirkungen
- thermodynamische Wirkungen

Der Hauptgrund der als letzteres genannten Wirkungen ist auf eine Temperaturerhöhung zurückzuführen, die durch die Absorption der Strahlung einer Lichtquelle entsteht. Dadurch werden häufig Deformation, Längenänderungen, bei hygroskopischem Material durch die Abnahme der Feuchtigkeitsverformungen, Reißen und dergleichen verursacht. Im Fall eines Temperatur- und Feuchtigkeitswechsels, der z. B. durch Tageszyklus im Tageslichtmuseum und Ein- und Ausschalten der künstlichen Beleuchtung hervorgerufen werden kann, werden die gerade erwähnten thermodynamischen Wirkungen intensiver. Die Größe der thermodynamischen Schädigung ist abhängig von: /91/

- der thermischen Empfindlichkeit eines Materials
- der Beleuchtungsstärke
- der thermischen Belastung des Stroms von einigen Anteilen im UV und viel größere Anteile im IR-Bereich

Gegen diese Ursache sind die folgenden Regelungen zweckmäßig /91/

- Reduzierung der Wärmeeinstrahlung (z. B. durch Prismen, Absorptions- und IR-Filter)
- Belüftung für die empfindlichen Gegenstände
- Vermeidung der akzentuierenden Beleuchtung mit hoher Beleuchtungsstärke, die einen gravierenden Temperaturunterschied zwischen den beleuchteten und nicht beleuchteten Flächen und damit Trockenschäden verursacht.

Nach /91,99,104/ sind die erstgenannten photochemischen Farbänderungen bzw. Vergilbungen von den bestrahlten Ausstellungsstücken bedingt durch die

- Materialdaten
- spektrale Verteilung der Lichtquelle
- Beleuchtungsstärke / Bestrahlungsstärke
- spektrale Transmission des Filters

- **Bestrahlungsdauer.**

Diese Kriterien haben eine gegenseitig stehende Beziehung und sollen daher bei der Behandlung des Lichtschutzes der Museumsstücke miteinander abgestimmt werden. Die Materialdaten können nach /99,104/ mit Hilfe der

- relativen spektralen Objektempfindlichkeit $s(I)_{dm,rel}$, die die wellenlängenabhängige Empfindlichkeit von Material angibt
- Schwellenbestrahlung

beschrieben werden. Bei einer Untersuchung von J. Krochmann und S. Aydinli /99,104/ über die Farbänderungen an den bestrahlten 54 Proben des museumstypischen Materials konnte festgestellt werden, dass

- UV-Strahlung und in geringem Maße sichtbare Strahlung für die Farbänderung von Ausstellungsgegenständen im wesentlichen maßgebend sind,
- ausgenommen von einigen wenigen Textilienproben die Strahlung im langwelligen Bereich bei $I > 600 \text{ nm}$ fast keine Wirkung hat ,
- besonders für Papier- und Aquarellproben erhebliche Wirkungen auch noch durch sichtbare Strahlung verursacht werden können.

Die Schwellenbestrahlung wird als der absolute Schwellenwert der wirksamen Bestrahlung H_{dm} definiert, bei dem eine Farbänderung zuerst sichtbar wird. /52/ Die wirksame Bestrahlung der Exponate H_{dm} wird von der wirksamen Bestrahlungsstärke E_{dm} unter Berücksichtigung der Beleuchtungsdauer bzw. Bestrahlungsdauer t , wie folgt, ermittelt:

$$(Gl. 15) \quad H_{dm} = E_{dm} \cdot t$$

Aus den oben diskutierten Ursachen können gegen die photochemischen Farbänderungen letztlich die folgenden Lichtschutzmaßnahmen in Tageslichtmuseen getroffen werden: /16, 91,104/

- Auswahl geeigneter Lichtquelle
- Begrenzung der Beleuchtungsstärke und der Bestrahlungsdauer
- optimale Filterung gegen die schädlichen Strahlungen (z. B. gegen die UV- Bestrahlung)
- Verdunkelung der Exponate außerhalb der Besuchszeiten
- Vermeidung der direkten Sonnenbestrahlung
- Vermeidung der nicht konstanten Beleuchtungsstärke
- die automatisch verstellbaren Einrichtungen gegen Sonneneinfallsänderung

4.8 Bezug nach außen

/9/ gibt die Angabe über generelle Maße und Menge der Öffnungen für den ausreichenden Kontakt mit der Außenwelt. Dafür solle der untere Grenzwert der Glasfläche (Flachglas) 10 bis 20 % der Grundfläche betragen. Damit seien Wohlbefinden und Leistungsfähigkeit auch bei Langzeitbesuchen (4 h) gesichert. Diese Wertung verbessere sich /9/ zufolge bis zu Glasflächen von 30 %.

In Museum kann man mit dem Seitenfenster direkten visuellen Kontakt schaffen. Dagegen können das Wetter und die Tageszeiten in den von oben beleuchteten musealen Räumen mit undurchsichtigen Glasdecken nur indirekt wahrgenommen werden. Die Raumwahrnehmung baut sich vorwiegend vertikal auf. Aus diesem Grund spielt die optische Verbindung mit der Außenwelt durch das Oberlicht eine sekundäre Rolle. Daher empfiehlt Bartenbach /9/ die zusätzlichen seitlichen Öffnungen zum visuellen Außenkontakt in den Oberlichträumen. Bei den transparenten Seitenfenstern müssen wegen der auftretenden Direktblendung der Außenbezug und Sonnen- bzw. Blendschutzsysteme für die optimale Wahrnehmung harmonisch dimensioniert werden. Die Fenster zum visuellen Kontakt zur Umwelt müssen sich nicht unbedingt innerhalb der Ausstellungsräume befinden. Die Pausenräume zwischen den Ausstellungsräumen und die zu den Ausstellungsräumen gehörenden getrennten Flure bzw. Gänge geben eine alternative Möglichkeit, die Sicht nach außen herzustellen. Dabei müssen aufgrund des Adaptionsproblems zu große Leuchtdichteunterschiede zwischen diesen Räumen und den Ausstellungsräumen vermieden werden.

5. Typen der Tageslichtlösungen im Museum

Nach DIN 5034 Teil 3 /45/ lassen sich die Typen der Tageslichtlösung je nach Öffnungsanordnung in

- Oberlichter
- Seitenfenster

einteilen und ihre Tageslichtquotienten getrennt berechnen. Diese grob untergliederten Öffnungskonzepte werden in der Praxis, bedingt durch die lichtgestalterischen und architektonischen Absichten, mehr oder weniger abgewandelt eingesetzt. In Abb. 7 werden die Einflüsse der häufig verwendeten verschiedenen Tagesbelichtungsarten auf den Lichtverlauf in den Innenräumen dargelegt.

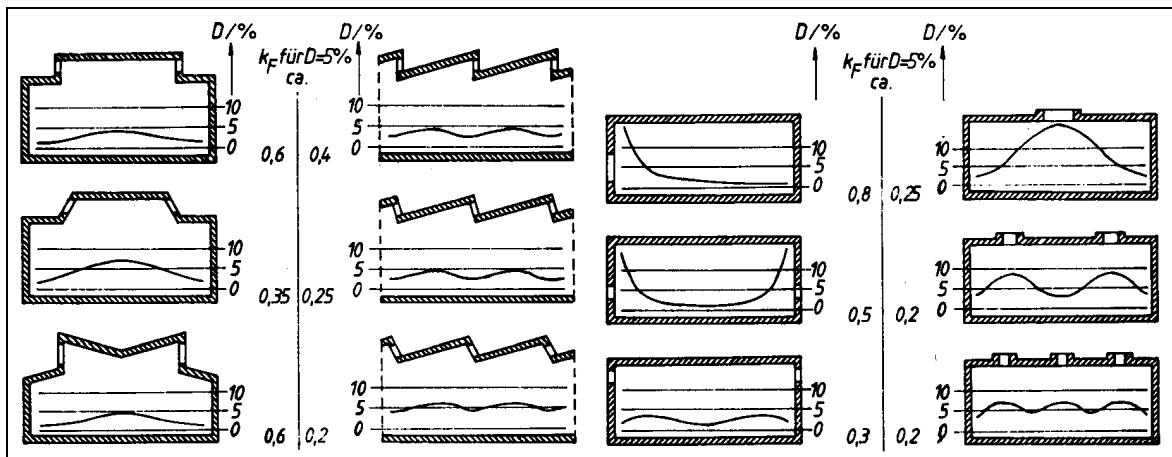


Abb. 7: Einfluss der Art der Tageslichtöffnungen auf den Verlauf des Tageslichtquotienten. /62/

5.1 Tagesbelichtung durch Oberlichtöffnungen im Museum

Nach DIN 5034 Teil 1 /43/ wird Oberlicht als eine Tageslichtöffnung im Dach oder in der Raumdecke eines Gebäudes definiert. Die zahlreichen konstruktiven Lösungen von Oberlichtausführungen und -anordnungen können prinzipiell wie in Abb. 8 dargestellt werden. In Anbetracht der beleuchtungstechnischen Bedeutung unterscheiden sich dabei nur die Einzeloberlichter, die sogenannten Lichtkup-

peln, wesentlich von den Oberlichtbändern, die als Sattel-, Pult-, Laternen- oder Sägedachoberlicht (Shed) ausgeführt sein können. /45/ Bei diesen Oberlichtbändern sind die Neigungswinkel der Glasflächen beliebig möglich. Außerdem können Oberlichter je nach Lichteinfall entweder als Oberes Oberlicht oder als Seitliches Oberlicht unterschiedlich angeordnet werden.

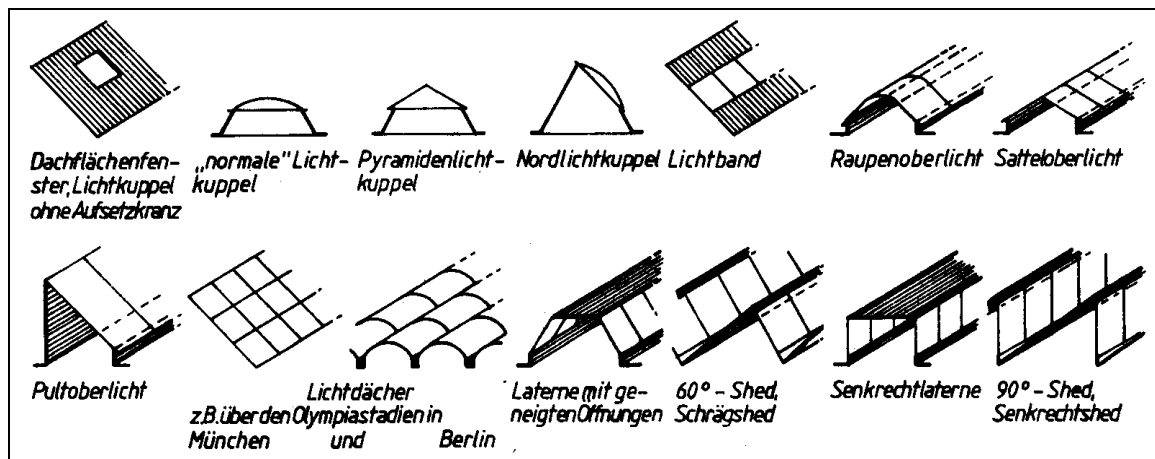


Abb. 8: Verschiedene Oberlichtarten /62/

Die Vorteile des Oberlichts liegen im Vergleich zum Seitenfenster nach /43,62/ im Allgemeinen in der

- gleichmäßigsten Lichtverteilung von allen Tageslichtlösungen
- einzigen Möglichkeit der Tageslichtversorgung mit hinlänglicher Helligkeit in großen Räumen
- Nutzungsmöglichkeit der Wandfläche für die Ausstellung der Exponate
- Besorgung des Zenitlichts, das die beste spektrale Zusammensetzung und die größte Beleuchtungsstärke besitzt
- geringeren Direktblendungsgefahr aufgrund der außerhalb des Blickfeldes des Betrachters liegenden Öffnungsposition
- Leichtigkeit bei Verwendung von Kunststoff.

Dagegen wird der Einsatz des Oberlichts durch die nachfolgenden Nachteile eingeschränkt:

- die Schwierigkeit des Sonnenschutzes
- die größte Wärmeeinstrahlung vor allem im Sommer
- die Abdichtungsschwierigkeit beim Einbau
- die Wartungsschwierigkeit
- die Vergrößerung der notwendigen Öffnungsfläche bei zunehmender Schachthöhe
- der fehlende Ausblick in die Außenwelt
- die Benutzungsreduzierung des obersten Geschosses

In Hinsicht auf die Empfindung der Raumhelligkeit brauchen Oberlichträume generell höhere Tageslichtquotienten als Räume mit Seitenfenstern. Nach /94/ kann für reine Oberlichträume, in denen sich Menschen häufig längere Zeit aufhalten, ein mittlerer Tageslichtquotient von 4,5 % kaum oder nur in Sonderfällen ohne Einbuße für den Helligkeitseindruck unterschritten werden. Nach DIN 5034 Teil 6 /46/ wirkt ein rein durch Oberlichter tagesbelichteter Raum dunkel und bedrückend, wenn der minimale Tageslichtquotient weniger als 2 % ist. Die thermische Behaglichkeit kann hingegen bei großen Tageslichtquotienten, nämlich von über 10 %, durch Sonneneinstrahlung insbesondere bei niedrigen Räumen beeinträchtigt sein.

Die Flächen der horizontalen Raumelemente bekommen in Oberlichträumen üblicherweise mehr Licht als die vertikalen Oberflächen. Daher ist dort der Einfluss des Reflexionsgrades vom horizontal liegenden Fußboden auf die Raumhelligkeit meist hoch, und um so bedeutender, je größer der Raum ist. /43,45,46/ empfehlen, dass zur Vermeidung einer direkten Sonneneinstrahlung im Innenraum Oberlichtöffnungen im Allgemeinen mit lichtstreuender Verglasung versehen werden sollten. Außerdem sollten Oberlichter möglichst über einem Schacht mit schrägen Wänden montiert werden, um eine gute Gleichmäßigkeit der Beleuchtung zu gewährleisten.

5.1.1 Tagesbelichtung durch Lichtkuppeln im Museum

Lichtkuppeln besitzen normalerweise eine horizontale Lichtöffnung, deren Seitenverhältnis von der Länge zur Breite nicht viel größer als 1 ist. /135/ Sie werden

entweder einfach in die Dachhaut eingeklebt, oder mit wärmegeämmten, meistens 20 bis 30 cm hohen Aufsetzkränzen eingebaut. Die verschiedenen Formen der Lichtkuppeln sind in Abb. 8 abgebildet. Der Mittelwert des Tageslichtquotienten in Räumen mit Lichtkuppeln bei gleichem Außentageslichtquotienten und in einem festen Punkt des Raumes ist nach DIN 5034 Teil 3 /45/ abhängig von

- den lichttechnischen Eigenschaften des sich in der Lichtöffnung befindenden Bauteils
- Länge und Breite der Lichtkuppel
- der Schachthöhe
- dem Neigungswinkel der Schachtwand
- dem Reflexionsgrad der Wände, des Bodens, der Decke und der Schachtwand.

Dabei entsteht die Lichtschwächung durch die

- Rahmen und das Sprossenwerk
- Verschmutzung
- Schachtwirkung besonders bei den kleinflächigen Lichtkuppeln.

Klar durchsichtiges Glas für die Kuppel wird nur in einem Ausnahmefall empfohlen. Mit einer Kuppel aus Opalglas kann man diffuses und blendungsfreies Licht im Raum gewinnen. Die Wärmebelastung der Opalkuppel ist niedriger als die der Klarglaskuppel. Klarglaskuppeln dürfen verwendet werden, wo die direkte Sonnenstrahlung und deren Licht- und Schattenwirkung, wie z. B. bei Aquarien, gewünscht ist. In Räumen, die durch Kuppeln beleuchtet werden, ist die Beleuchtungsstärke am höchsten direkt unter der Kuppel und nimmt zum Rand hin rasch ab. /46,94/ erläutern das Lichtverhältnis in Räumen nach Größe und Abstand der Kuppeln und Leibungsformen. Es wird /94/ zufolge im Allgemeinen bei mehreren kleineren Kuppeln gegenüber wenigen größeren gleicher Gesamtfläche gleichmäßiger, was allerdings verbunden ist mit einer gewissen Einbuße an Beleuchtungsstärke. Dieser Verlust wächst mit zunehmender Deckendicke. Nach /94/ kann man in hohen Räumen mit wenigen großen Kuppeln sogar eine mindestens ebenso gute Gleichmäßigkeit erreichen. Aufgrund der oben erwähnten gleichmäßigen Lichtverteilung sind die Kuppeloberlichter vor allem für Wechselausstellungs-

räume geeignet, wo die feste Lage der Ausstellungswände nicht bekannt und daher eine sehr flexible Beleuchtung notwendig ist. Trotz dieses Vorteils wird Kuppelbeleuchtung aus den nachfolgenden Gründen nicht häufig bevorzugt: /62/

- Die große Zahl der Deckendurchbrüche
- Die hinzukommende Dichtungsschwierigkeit
- Notwendigkeit der größeren Öffnungsfläche als bei bandförmigen Oberlichtern

Ein typisches Beispiel der frühen öffentlichen Museen für die Lichtkuppel findet sich im Kuppelsaal der Glyptothek in München, der durch eine einzige Kuppel am Gewölbescheitel nach dem Vorbild des römischen Pantheons tagesbelichtet ist. /157/ Das Tageslicht tritt dorthin sehr gerichtet ein und betont damit die Plastizität der Kassettendecke, der Nischen und der ausgestellten Plastiken. Dadurch wird ein dynamisches Raummilieu erschaffen. /96/



Abb. 9: Kuppelbeleuchtung des frei geformten Kabinetts, Städtisches Museum Abteiberg in Mönchengladbach, Hans Hollein, 1972-1982 /127/

Die einzelne Lichtkuppel kommt häufig zum Einsatz, um einen spotlichtartigen Akzentuierungseffekt für die Exponate zu erzeugen. Dabei sollte die Größe der

Kuppelöffnung so klein und die Raumhöhe so niedrig sein, dass der Beleuchtungsbereich nur die Zone der bestimmten Objekte umfasst. Unter derartiger Kuppel werden meistens die gegenständlichen Ausstellungsstücke aufgrund der stark gerichteten Beleuchtung ausgestellt. Daher setzte Hans Hollein kleine einzelne Kuppeln im Städtischen Museum Abteiberg in Mönchengladbach ein, um die Figuren mit der schlaglichtartigen Tageslichtsstrahlung gezielt zu pointieren. Aufgrund des starken Kontrastes der Beleuchtungsstärke und des gerichteten Lichts erhält dieser Kuppelraum zusammen mit den Figuren einen dynamischen und unverwechselbaren Raumeindruck. (Abb. 9)

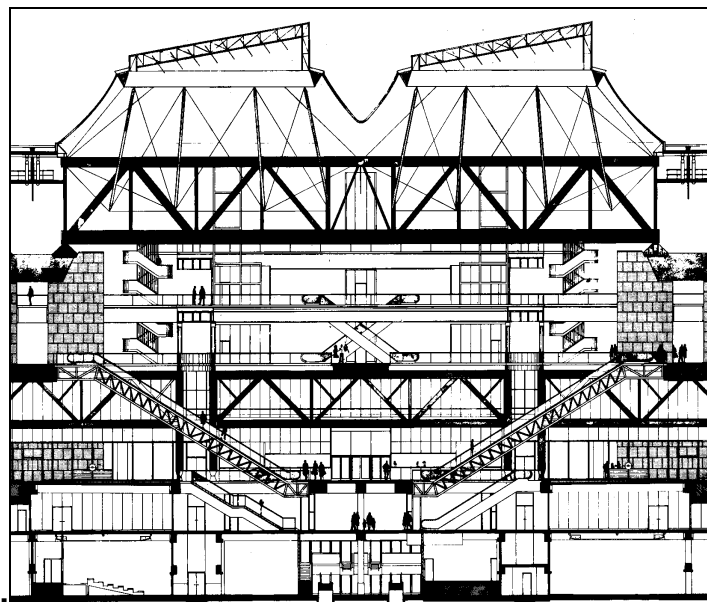


Abb. 10: Schnitt der großen Halle, Staatliches Museum für Wissenschaft, Technologie und Industrie in Paris, Adrien Fainsilber, 1983-1986 /121/

Anders als bei den gerade beschriebenen Kuppellösungen kann man mit großen einzelnen Kuppeln ein gleichmäßiges und körperloses Tageslicht im Ausstellungsraum produzieren. Derartige Kuppelsysteme benötigen normalerweise die große Raumhöhe und haben einen tiefen Schacht. Theodor Fischer konzipierte deswegen eine einzige große Laternenkuppel mit einer seitlichen Öffnung für die König-Wilhelm-Halle des königlichen Kunstgebäudes in Stuttgart, um ein diskretes bzw. neutrales Raummilieu zu ihrer flexiblen Nutzung zu schaffen. /36/ Insbesondere der tiefe zwölfeckige pyramidenartige Lichtschacht, der sich unter der Laternenkuppel befindet, streut das Tageslicht diffus in alle Richtungen des Rau-

mes. Dadurch wirkt das Tageslicht im Raum regelmäßig und konturlos. Aus dem gleichen Grund wird die große Halle des Staatlichen Museums für Wissenschaft, Technologie und Industrie in Paris jedoch von zwei riesigen rotierenden Kuppeln tagesbelichtet. (Abb. 10) Der Durchmesser einer Kuppel beträgt ca. 17 m. Dank der hoch liegender Kuppelposition und der tiefen Schächte wurde der Charakter des Tageslichts in der Halle neutral für die vielseitigen kulturellen und wissenschaftlichen Aktivitäten sowie für die wechselnden Ausstellungen. /121/

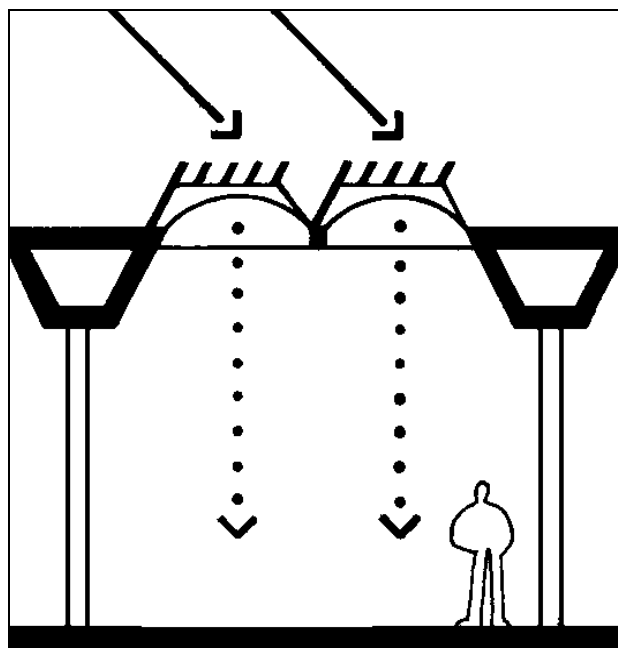


Abb. 11: Schematische Darstellung des Lichteinfalls, Zentrum für Englische Kunst und Forschung an der Yale Universität, Louis Kahn, 1969 – 1977/32/

Was die gleichmäßige Beleuchtung durch mehrere kleine Kuppeln anbelangt, ist das Zentrum für Englische Kunst und Forschung an der Yale Universität ein Beispiel. /32/ (Abb. 11) Jede quadratische Belichtungseinheit der Hauptausstellungsräume dieser Galerie hat eine 6 x 6 m große Deckenöffnung, die jeweils vier Lichtkuppeln besitzt. Das einzelne Kuppellichtsystem besteht aus Metalllamellen, der Kuppel, einer Staubdecke und den V-förmigen Betonunterzügen. Dabei sind die oberhalb der Kuppel konstruierte Metalllamellen so sorgfältig konzipiert, dass das mildere nördliche Tageslicht die Innenräume penetriert und der Tageslichtquotient bei niedrigem Sonnenwinkel zunimmt und bei hohem Sonnenstand abnimmt. Die Kuppel selbst ist für den Zweck der Lichtstreuung mit einem verspiegelten

Lichtdiffusor und zwei Lagen geriffeltem Plexiglas versehen. Die darunter stehenden tiefen V-förmigen Betonunterzüge sorgen für die bessere Lichteinführung in die Räume und die Lichtkontrastmilderung. So sind diese Galerieräume sehr regelmäßig für die Gemälde beleuchtet.

5.1.2 Tagesbelichtung durch Lichtbänder mit Oberen Oberlichtanordnungen im Museum

Unter oberem Oberlicht versteht man eine Lichtöffnung am Dach, die horizontal zum Zenitbereich gerichtet ist. Aus diesem Grund fällt das zenitale Tageslicht in so belichtete Räume senkrecht und direkt ein. Die Formen der Oberen Oberlichter kennzeichnen sich durch die verschiedenartigen Lichtbänder und Sheddächer. Lichtband, Raupenoberlicht, Satteloberlicht und Pultoberlicht sind ihre häufig eingesetzten Konstruktionsformen. /62/ (Abb. 8) Neben den im vorigen Abschnitt erörterten allgemeinen Vorteilen des Oberlichtes ist die Nutzung des oberen Oberlichtes begünstigt zusätzlich durch die

- schnelle Montage (Raupenoberlicht)
- leichte Erreichbarkeit großer Spannweite (Satteloberlicht)
- einfache Konstruktion (Pultoberlicht).

Dagegen sind die speziellen Nachteile des Oberen Oberlichts im Vergleich zu den anderen Oberlichtern die relativ große

- Blendungsgefahr in Längsrichtung
- Blendungsgefahr bei großflächigen Einheiten
- Verschmutzungsgefahr des Glases.

Außerdem verleiht die Shedkonstruktion bzw. Sägedachkonstruktion häufig einen fabrikartigen Eindruck, wie das von Rudolf Schwarz entworfene Wallraf-Richartz-Museum (1953-1957, heute: Museum für Angewandte Kunst) in Köln. Dieser Bau wurde aufgrund seiner sachlich wirkenden Giebeldächer als unwirtschaftliches Fabrikgebäude kritisiert, das allen an das Äußere eines Museumsgebäudes gestellten Erwartungen widerspreche. /128/

Beim Einsatz der Oberlichtbänder im Museum zählen die Blendungsvermeidung der direkten Sonnenstrahlung und die Schaffung besserer bzw. komfortablerer Sehbedingungen zu den primären Aufgaben. Dabei werden gegen die Lichtquelle meistens die folgenden architektonischen Abschirmungsmaßnahmen eingearbeitet. /29/:

- Sekundäre Schicht (Staubdecke) direkt unter dem Oberlicht
- Abdeckung der zentralen Zone
- Lamellen- bzw. Rasterkonstruktion

Beim ersten Konzept handelt es sich um eine Staubdecke, die direkt unter den klarverglasten Oberlichtöffnungen installiert ist. Die Staubdecke besteht normalerweise aus einem Opalglas. Seine undurchsichtigen und lichtreduzierenden Materialeigenschaften lassen das Tageslicht abgeschwächt und diffus in die Ausstellungsräume eindringen. Die Tagesbeleuchtungen zahlreicher Bildergalerien, z. B. des Louvre in Paris, der Alten und Neuen Pinakothek in München /68,69/, der Alten und Neuen Staatsgalerie in Stuttgart etc., sind wegen der Gleichmäßigkeit des Lichtverlaufes an der Wand mit dieser einfachen und schlichten Staubdeckelösung eingerichtet.

Die zweite Abschirmungsmethode beruht auf den undurchsichtigen mittleren Raumdecken. Sie verdecken den mittleren Bereich des Raumes und blenden damit die Oberlichtquelle aus dem Blickfeld des Besuchers aus. Dabei werden generell zwei unterschiedliche Varianten je nach Art der Decke eingesetzt. Die erste ist durch den Deckenreflektor gekennzeichnet. Er wird normalerweise unter den Lichtöffnungen am Scheitel des Daches aufgehängt und lässt einen Teil des Lichtes durch. Dadurch wird

- der visuelle Kontakt mit direkter Sonneneinstrahlung blockiert
- der größte Teil des Tageslichts auf die Oberfläche der Innenseite des Daches zur nochmaligen diffusen Reflexion in die Ausstellungsräume transportiert
- das Tageslicht zur nötigen Erhellung der mittleren Zone des Raumes teilweise durchgelassen.

Die obengenannten drei Anliegen werden im Kimbell Art Museum von Diffusoren bewältigt, die aus perforiertem Metallblech wie ein Segel ausgeformt sind und sich direkt unter dem Lichtschlitz am Tonnengewölbe befinden. (Abb. 12) Die Metalldiffusoren lassen einerseits das Tageslicht teilweise direkt durch und andererseits reflektieren es an die Innenseiten der Zykloidschalen zur indirekten Lichteinführung. /32/ Daraus ergibt sich eine gleichmäßige Lichtverteilung im Ausstellungsraum. Die Kunstsammlung Nordrhein-Westfalen in Düsseldorf übernahm das kahnschen Prinzip des Kimbell Art Museums. Als Reflektoren werden, anders als im Kimbell Art Museum, Schirme aus halbtransparentem Kunstglas zur blendungsfreien und gleichmäßigen Lichtverteilung verwendet. /147/

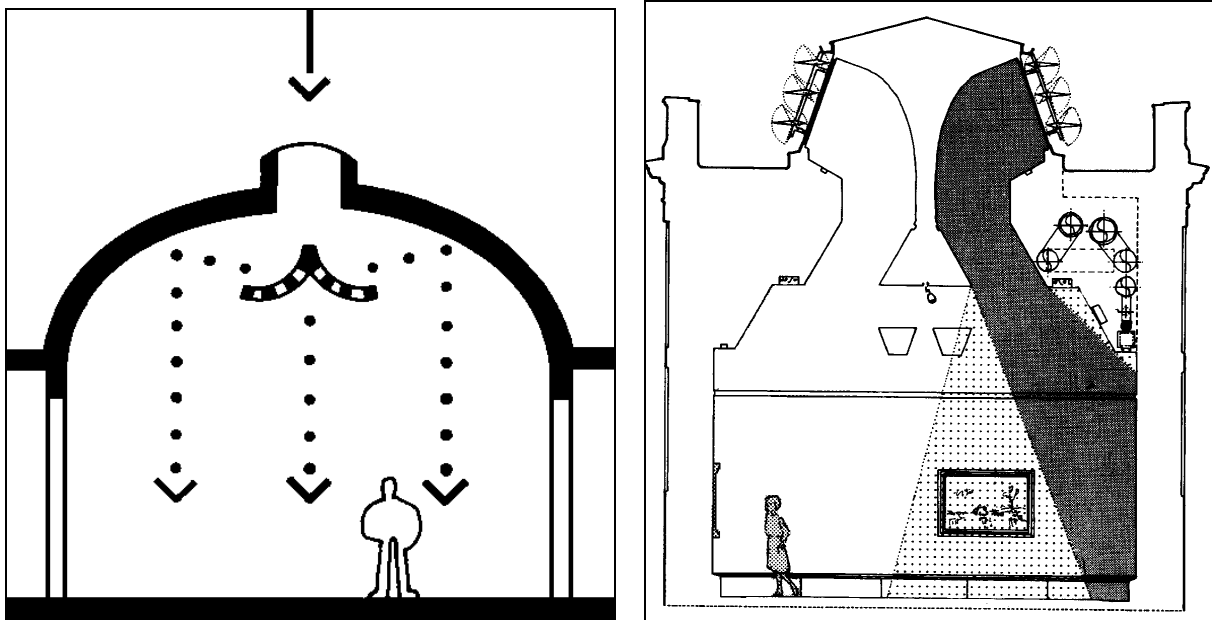


Abb. 12: links; Schematische Darstellung des Lichteinfalls, Kimbell Art Museum, Forth Worth, Texas, Louis Kahn, 1966–72 /32/

Abb. 13: rechts; Schnitt des Ölgemälde-raumes, Clore Galerie (Erweiterungsbau der Tate Galerie) in London, James Stirling, 1980-1987 /120/

Im Vergleich zu dem Kimbell Art Museum und der Kunstsammlung Nordrhein-Westfalen sind die mittleren Raumdecken der nachfolgenden Beispiele lichtundurchlässig. In den Ausstellungsräumen für die Ölgemälde der Clore Galerie (Erweiterungsbau der Tate Galerie) in London (Abb. 13) wird die Direktblendung des Tageslichts in erster Linie von der schmalen Deckenmitte verhindert. Die konk-

ven Schalen der mittleren Abschirmungsdecke und die abgestuften Raumdeckenflächen für bestimmte Lichteinfallswinkel lenken das Licht nicht auf die Betrachterzone, sondern auf die Ausstellungswände ab. /120/ Dadurch ist die blendungsfreie und stabile Wahrnehmung dort gewährleistet.

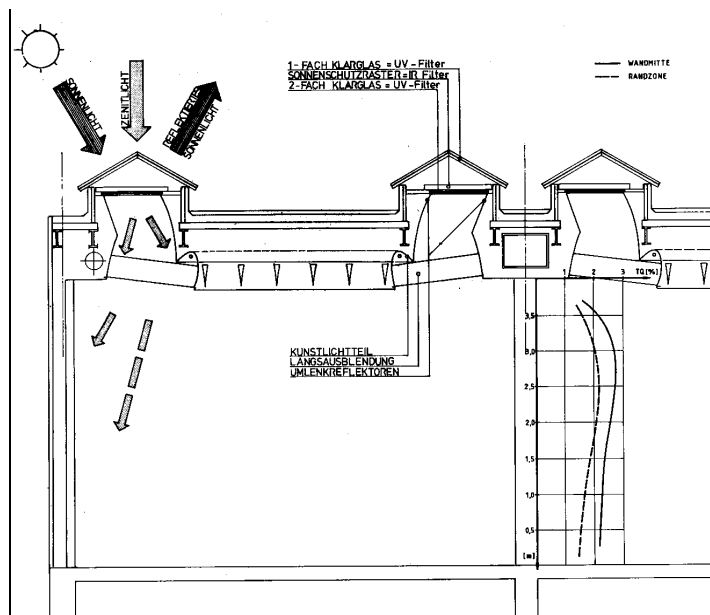


Abb. 14: Kunstmuseum Bern, Atelier 5, 1981-1983 /14/

Bei einer anderen Art der undurchsichtigen Deckenmitte wird der meiste Teil der Raumdecke bedeckt. Die Tageslichtöffnungsflächen werden dabei an die Deckenränder herangerückt und sind meistens bandförmig. Derartige Lösungen erhellen die Wandbereiche deutlicher als die Raummitte und ist die Lichtquelle von fast allen Betrachtungspunkten im Raum nicht direkt zu sehen. Das Tageslichtsystem des Kunstmuseums Bern (Abb. 14) wurde anhand der Lichtbänder und der mittleren Raumdecke so ausgeklügelt, dass /14/

- die Direktblendung der Besucher völlig ausgeschlossen werden kann
- ein stabiler Wahrnehmungszustand nach einem von C. Bartenbach entwickelten theoretischen Leuchtdichtemodell (Abb. 29) entsteht.

Das gefilterte zenitale Tageslicht dringt in die Ausstellungsräume dieses Museums zuerst über die Lichtbänder und durch Prismenreflektoren kontrolliert ein

und erhellt die Ausstellungswände gleichmäßig. Der sorgfältig geplante, steile Tageslichteinfallswinkel verstärkt einerseits die Plastizität der Bildtextur und vermeidet andererseits Reflexblendung der Bilderoberflächen bzw. -schutzgläsern für den Betrachter. /14/

Das Brücke-Museum in Berlin ist von Werner Düttmann ebenfalls mit einer lichtundurchlässigen Deckenmitte und daneben laufenden Lichtbändern entworfen, ebenso sein späteres Werk, der Anbau der Kunsthalle Bremen. /126/ Dort ist die Deckenmitte niedriger als die Verglasung der Lichtbänder angeordnet. Dadurch entstehenden zwei unterschiedliche Zonen innerhalb des Ausstellungsraumes, genauer gesagt der diffus verschattete, Geh- und Aufenthaltsmittelbereich für die Besucher und die helleren Ausstellungsbereiche unter den Lichtbändern. Ein ähnliches Konzept wie das Brücke-Museum hat die neue nördliche Erweiterung der National Galerie in London, in der die Deckenmitte viel tiefer zur Abschirmung der direkten Sonnenstrahlung nach unten gezogen wurde. /56/

Die dritte und letzte architektonische Abschirmungsmittel für die direkte Sonnenblendung im Oberlichtmuseum stellt Lamellen oder Raster dar. Beide können unterhalb und / oder oberhalb des Oberlichts eingebaut werden. Hierfür ist das Tageslichtsystem des Glasdaches des Museums in Wolfsburg ein Beispiel. Dort befinden sich die Mikrostrukturraster zum Sonnenschutz innerhalb des doppel-scheibigen Dachglases und Alu-Lamellen als Ausblendraster unterhalb des Glasdaches. /13, 148/ Die Lamellen halten einen Teil der Lichtmenge und einen überhöhten Wärmefluss ins Rauminnere durch die Teilreflexion der direkten Sonnenstrahlung zurück. Alle anderen durchgelassenen Tageslichtanteile werden durch die von den Rastern gebildeten kleinen Lichtschächte in den Raum umgelenkt. Diese Lichtschächte heben die Vertikalbeleuchtungsstärke an und minimieren gleichzeitig die Blendung der ansonsten hellen Glasdachflächen.

Das Dach und die Wand des Sainsbury Center for the Visual Arts der University of East Anglia in Norwich enthalten ein Lichteinlenkungssystem durch zweischichtige Lamellen, die eine total flexible, variable Ausstellung ermöglichen. /110,121/ Platten ihrer Außenhaut können mit dem klaren Glas, opaken Glas oder dem lichtundurchlässigen Aluminium zur flexiblen Lichtöffnungsposition rasch gegenein-

ander ausgetauscht werden. Die perforierten und lichtstreuenden verstellbaren Aluminiumlamellen als Innenhaut kontrollieren das durch die Außenhaut nach innen geholte Tageslicht nochmals.

Eine andere Variante des Lamellensystem ist in der Menil Collection in Houston zu erleben. Die blattförmigen Abdeckungen aus einem dünnen Eisenbetonprofil wurden zur Bestimmung des Tageslichts entwickelt. /129/ (Abb. 15) Sie werden als ein modulares Element an der Raumdecke aufgehängt und funktionieren nach dem Prinzip der Lamelle. Diese Blätter lenken das Tageslicht um und gewähren Schutz vor der direkten Strahlung und UV-Strahlung der Sonne. Sie führen gleichzeitig das nötige Tageslicht in den Raum.

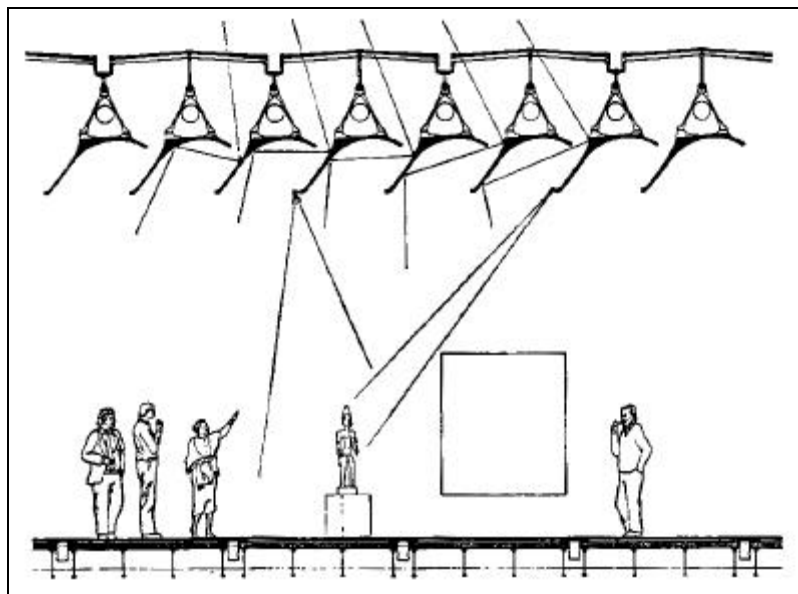


Abb. 15: Menil Collection in Houston Texas, Renzo Piano, 1982-1986 /129/

Eine der radikalsten, modernsten Oberlichterlösungen befindet sich im Haus der Geschichte in Bonn. Die drei Dächer des Museums bestehen aus einer reinen Glaskonstruktion, um durch die Transparenz die Demokratie zu symbolisieren. Die Glaskonstruktion hat 7 cm starke Mehrschicht-Elemente, ähnlich einer an den Randbereichen gefassten Isolierglasscheibe. Sie reguliert das Tageslicht, um die Tageslichtverhältnisse der Ausstellungsräume möglichst regelmäßig und konstant zu halten, die schädliche UV-Strahlung zurückzuhalten und den Wärmedurchgang zu reduzieren. /16,65/

5.1.3 Tagesbelichtung durch Oberlichtbänder mit Fensteranordnungen

Ein Oberlichtband mit Fensteranordnung bzw. seitliches Oberlicht wird als Deckenöffnung mit traditioneller Fensteranordnung bezeichnet. Bei diesem Arrangement dringt das Tageslicht trotz der Oberlichtöffnung seitlich ein. Dabei wird zwischen seitlichem Laternen- und Shedoberlicht unterschieden. (Abb. 8)

5.1.3.1 Tagesbelichtung durch Laternenoberlichterbänder mit Fensteranordnungen

Seitliche Laternenoberlichter enthalten im Allgemeinen zwei seitliche Verglasungen. Dabei sollte eine Sonnenschutzmaßnahme besonderes bei den zur Sonne hin geöffneten Fenstern ergriffen werden. Bei einer Öffnungsorientierung von Nord-Süd kann ein günstigeres Raumklima geschaffen werden. Im Vergleich zur Shedkonstruktion der Oberlichter bildet sich in einem Raum mit seitlichen Laternenoberlichtern eine wenig stärkere Vorzugsrichtung der Beleuchtung heraus. Außerdem ist bei seitlichen Laternenoberlichtern im Vergleich zu den anderen Oberlichtern /62/

- die Lichtverteilung unregelmäßiger
- eine größere wärmeabstrahlende Verglasungsfläche zur befriedigenden Erhellung des Raumes notwendig.

Le Corbusier entwickelte für das Nationalmuseum für Westliche Kunst in Tokio ein galerieartiges Oberlichtersystem aus Laternenfenstern. /25,26/ (Abb. 16) Diese Lichtverteilungsgalerie ragt sowohl über das Dach hinaus als auch in den Raum hinein. Dadurch dient sie den Ausstellungsräumen einerseits Tageslichtöffnung und andererseits Tageslichtsausblendung. Die Laternenfenster sind mit UV-Filtern für den Sonnenschutz ausgerüstet. Unter der mittleren Raumdecke der Lichtgalerie ist die Raumhöhe und die Beleuchtungsstärke niedriger als in der Ausstellungs- bzw. Wandzone. Das Tageslicht, das durch die Laternenfenster herein kommt, überschneidet sich zuerst innerhalb der Lichtgalerie diagonal und trifft dann die jeweils gegenüberliegenden Ausstellungswände.

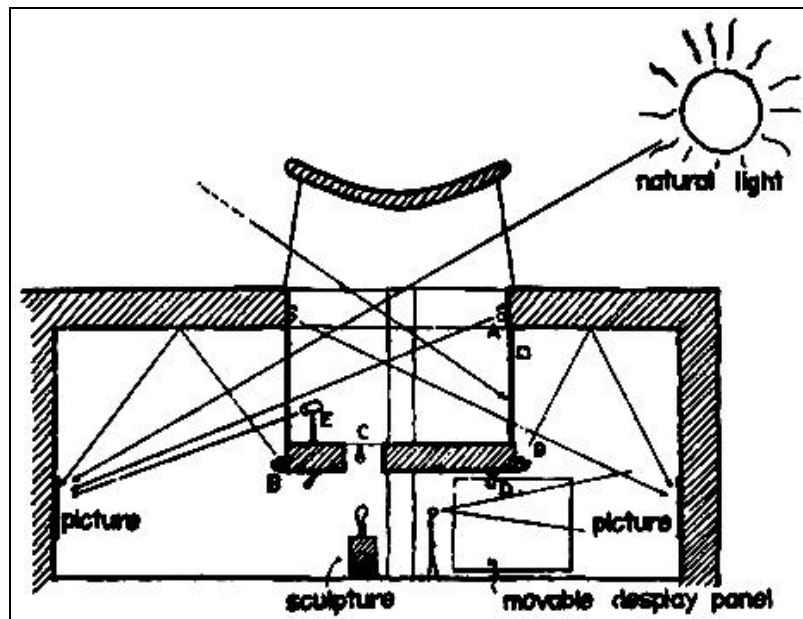


Abb. 16: Nationalmuseum für Westliche Kunst, Tokio, Le Corbusier, 1957 /26/

5.1.3.2 Tagesbelichtung durch Shedoberlichter mit Fensteranordnungen

Seitliches Shedoberlicht wird als eine Shedkonstruktion definiert, die nur an einer Seite mit einer Glasfläche und an der anderen Seite mit lichtundurchlässigem Material versehen ist. Die Sheds mit Fensteranordnung sind die am häufigsten angewendete Konstruktion unter den Oberlichtern, und zwar wegen

- keiner Blendung bei Nordorientierung der Glasöffnung
- keinem zusätzlichen Sonnenschutz
- gleichmäßiger Lichtverteilung
- des fensterähnlichen Eindrucks durch Ausbildung einer Vorzugslichteinfallsrichtung
- direkter Spürbarkeit der Präsenz des Tageslichts durch leichte Wahrnehmbarkeit der Lichtöffnungen und durch die Betrachtung des Himmelsausschnitts
- der Reduzierung der notwendigen Öffnungsfläche durch die Verwendungsmöglichkeit der klaren Verglasung
- großer Stützabstände bei Schalenkonstruktion. /62/

Neigungen der Verglasung, insbesondere zwischen 60 Grad und 90 Grad gegen die Horizontale, gewährleisten, dass die Sonne nur während kurzer Zeiten im Sommer direkt in Räume scheint und blendet. /62/ Aufgrund des Unterschieds der Beleuchtungsstärke zwischen den klaren Glasöffnungen und den undurchsichtigen Flächen lässt sich die Vorzugsrichtung der Beleuchtung deutlicher als bei Laternenoberlichtern erkennen. Dadurch entsteht eine relativ starke Wechselwirkung von Licht und Schatten. Dies verlangt eine dementsprechende Positionierung der Exponate zum effektiven Beleuchten. Die lichtundurchlässigen Teile der Seitlichen Shedoberlichter fungieren als Lichtreflektoren. Sie können beliebig eine gerade, konkave oder konvexe Form erhalten. Dabei geht es nach /62/ weniger um den Wert der Tageslichtquotienten, sondern eher um die Frage nach der architektonischen Raumgestaltung und der Charakteristik der Beleuchtung. Derartige Lichteinführungsideen kann man vor allem auf die Barockarchitektur zurückführen. Dabei wurde Oberlicht mittels der Raumschale gefiltert bzw. verändert, jedoch durchflutet das Tageslicht den Raum in indirekter Art hell /95/ und die Oberlichtquelle blieb dem Betrachter mehr oder weniger verborgen. /142/

Die gerade Form und das Tonnengewölbe werden als das Reflexionsbauteil der Seitlichen Shedoberlichter am häufigsten eingesetzt. Ein Beispiel ist das Museum Abteiberg in Mönchengladbach. Seine Tageslichtsäle besitzen seitliche Shedoberlichter mit dem flachen lichtundurchlässigen Bauteil. Durch ihn kommt der Reflexionsanteil des Tageslichts in die Räume hinein. Dagegen sind die senkrecht stehenden Öffnungsteile aus klarem Glas aufgrund Direktblendungsgefahr nach Norden gerichtet. In diesen Räumen wurde die Shedkonstruktion diagonal zur Anordnung der Saalfolge konzipiert. Aus diesem Grund sind die Wände nicht gleichmäßig ausgeleuchtet. /127/ Im Erweiterungsbau des Rijksmuseums Kröller-Müller in Otterlo in Holland wurde ebenfalls die gerade Shedform angewendet. (Abb. 17) Dort sind die Verglasungen der Sheds nach Norden, jedoch schräg ausgerichtet. Deswegen ist die Tageslichtöffnung bzw. -quelle ohne große Mühe auszumachen. Damit kann man die sich ständig ändernden Himmelszustände auch innerhalb des Museumsraumes gleichzeitig und direkt erleben. Der opake Reflektorteil der Sheds aus tiefen Aluminiumrippen unter den Oberlichtern ermöglichen (Abb. 17) /29,105/

- gleichmäßige Lichtverteilung durch das Reflektieren des Lichtes
- Licht- und Schattenwirkung
- Blickversperrung auf die Glasöffnungen von vielen Betrachtungspunkten aus
- Vermeidung der Direktblendung der leicht wahrnehmbaren Lichtöffnungen.

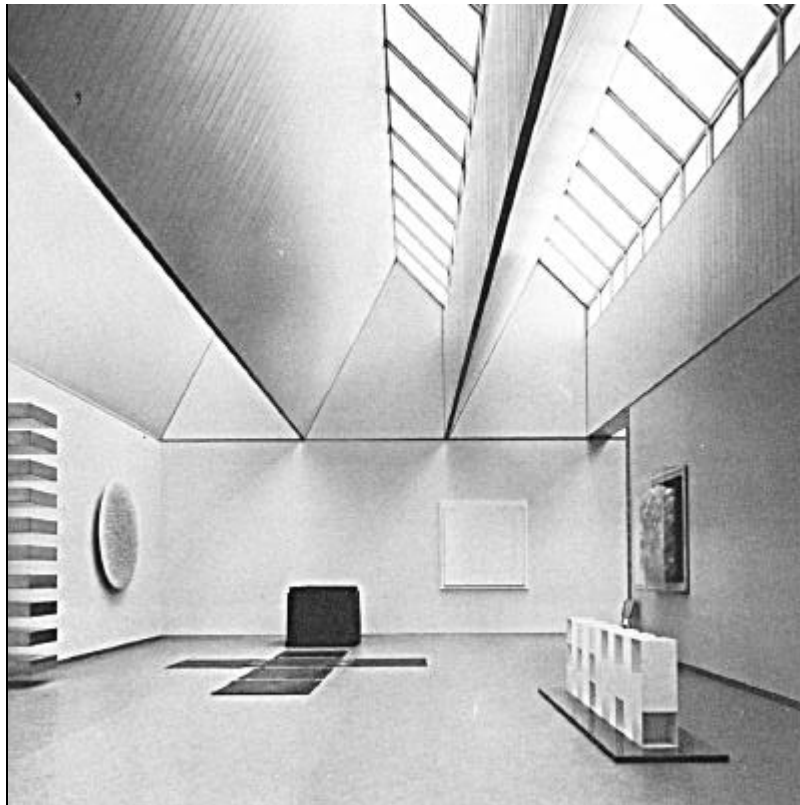


Abb. 17: Ausstellungsraum des Erweiterungsbaus an das Rijksmuseum Kröller-Müller in Otterllo Holland, W.G. Quist, 1975-77 /105/

Alvar Alto´s Tageslichtkonzept für das Nordiyllands Kunstmuseum Aalborg in Dänemark besteht aus einer konkaven Shedkonstruktion. Sie ist unter einem erhöhten Dachteil abgehängt und durch schräg eingebaute fensterartige Oberlichtverglasungen am Dach und durch reflektorartige konkave Laibungen gekennzeichnet. (Abb. 18) Diese Laibungen besitzen eine asymmetrische Gestalt aufgrund der je nach Himmelsrichtung unterschiedlichen Lichteinfallswinkel. /66/ Für das tief einfallende Nordostlicht werden die nach Norden angelegten konkaven Reflektoren steiler und etwas höher als die der anderen Seite gestaltet. Dadurch wird das Licht von deren oberem Teil diffus gestreut und anschließend zu den Wänden hingeführt. Dagegen sind die niedrigeren Reflektoren der südwestlichen Himmels-

richtung so eingeschnitten, dass das Tageslicht auf deren unteren Teil trifft. Dies hat zur Folge, dass das Licht die Innenräume nicht nur direkt, sondern auch indirekt durch die nochmalige Reflexe der Decken- und oberen Wandflächen erreicht. Die Raummitte wird durch eine mittlere Decke abgedunkelt. Dennoch kann ein Museumsbesucher gelegentlich die obenliegende Fensteröffnung ausfindig machen. Darüber hinaus treffen die Sonnenstrahlen während kurzer Zeiträume zusätzlich auf den Boden, so dass das sich im Lauf der Zeit ändernde Tageslicht im Rauminnen direkt erlebt werden kann.

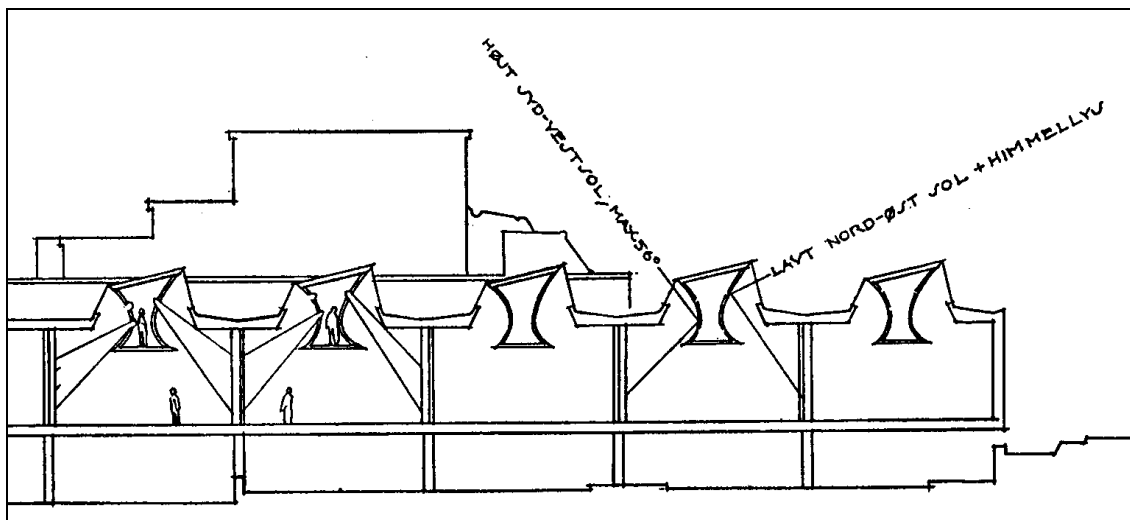


Abb. 18: Nordjyllands Kunstmuseum Aalborg in Dänemark, Elissa und Alvar Alto und Jean-Jacques Barué, 1958-72 /66/

Tonnenoberlicht mit seitlicher Fensteranordnung kann als eine Variante der konkaven Shedkonstruktion betrachtet werden. Dabei wird in den meisten Fällen ein halbiertes klassisches Tonnengewölbe für Museen konstruiert. Im Vergleich zu den geraden Sheds, die häufig eine fabrikartige Atmosphäre entstehen lassen, können die Dachformen des klassischen Tonnengewölbes den Museen eine charakteristische Silhouette verleihen. Das zeigt die Tageslichtlösung des Wallraf-Richartz-Museums / Museums Ludwig in Köln. Sie beruht auf der Lichtbrechung an den Tonnengewölben, die mit dem Kölner Dom eine eindrucksvolle architektonische Rheinuferlandschaft bilden. /28/ Die Fenster der Tonnengewölbe selbst sind klar verglast und nach Norden gerichtet. Über diese schräg eingebauten Shedfenster strömt das Tageslicht ins Gebäude ein und erreicht die Ausstel-

lungswände entweder direkt oder indirekt. Der indirekte bzw. reflektierte Lichtteil stammt aus der konkaven inneren Seite des Gewölbes. Ein Teil wird zur Wandzone eingelenkt. Der restliche Teil erreicht zunächst die konvexe Wölbung unterhalb der Fenster und wird von dort wieder an die Ausstellungswand zurückgestrahlt. Dadurch kommt der Unterschied der Leuchtdichte zwischen der direkt tagesbeleuchteten Wand und der gegenüber stehenden verschatteten Wandseite zustande. Damit wird versucht, das diffuse Licht im Raum nicht charakterlos bzw. körperlos, sondern gerichtet bzw. plastisch wirksam werden zu lassen.



**Abb. 19: Außensicht des Bauhaus-Archives in Berlin, Walter Gropius, 1976-78
/Verfasser/**

Walter Gropius konzipierte eine funktionelle und konstruktive Tageslichtlösung mit den schlanken und halbierten runden Tonnengewölben für die Ausstellungsräume des Bauhaus-Archives in Berlin. /132/ Die Dächer mit ihren Formen und Anordnungen verleihen diesem Museum einerseits einen unverwechselbaren Ausdruck. (Abb. 19) Andererseits ist damit die Funktion dieses Baus von Außen deutlich ablesbar. Die vertikalen Verglasungen der Sheds sind nach Norden gerichtet, um das blendfreie nördliche Tageslicht direkt und an der Wölbung diffus reflektiert in den Raum einfallen zu lassen.

5.2 Tagesbelichtung durch Seitliche Fensteranordnungen

Seitliche Seitenlichtöffnung wird durch die vertikale Öffnungsanordnung der traditionellen Fenster definiert. Aufgrund der seitlichen Lichteinfallposition wird dabei im Normalfall nur der horizontale Himmelsausschnitt erfasst. Deswegen kann das Zenitlicht nur mit Hilfe von Lichtlenkungssystem in so belichtete Räume aufgenommen werden. Bei Seitenlichtöffnungen können je nach Lage der Fensterhöhe seitliches Seitenfenster oder hohes Seitenfenster variiert werden.

5.2.1 Tagesbelichtung durch Seitliche Seitenfenster

Unter seitlichen Seitenfenstern versteht man die seitlichen Fensteröffnungen, entweder ihre ganze Flächen geöffnet sind, oder ihre untere Kante wie bei der klassischen Fensteranordnung unterhalb der Augenhöhe bleibt. Dabei können die seitlichen Wände für die Ausstellung nicht verwendet werden. Daher müssen die zusätzlichen Ausstellungswände bereitgestellt werden. Sie werden zur effektiven Beleuchtung normalerweise im rechten Winkel zu den Außenwänden gestellt. Anderenfalls verhindern Ausstellungswände das Durchdringen des seitlichen Tageslichts ins tiefere Rauminnere. Außerdem fällt der Schatten des Besuchers, der mit dem Rücken gegen die seitlichen Lichtquellen steht, auf die musealen Gegenstände.

Die Beleuchtungsstärke in so belichteten Räumen ist, bedingt durch die seitliche Lichteinfallposition, am Fenster am größten und fällt mit zunehmender Entfernung progressiv ab. (Abb. 20) /88/ Dieser Lichtverlauf führt zur Beschränkung der Nutzungsmöglichkeit auf den Bereich in der Nähe der Fenster. Deswegen wurden seitliche Seitenfenster für Kunstkabinette mit kleiner Raumtiefe bevorzugt. Aber in dieser unmittelbaren Fensternähe kann die Direktblendung treten. Außerdem beeinträchtigt dort die schlagartige Schattenbildung auf der Bilderoberfläche die Bildbetrachtung stark, wie die Abb. 21 zeigt. Es ist dennoch möglich, das Lichtmaximum des Seitenlichtsaals durch die Verlagerung der Fensteröffnung nach oben zum Rauminnern einigermaßen zu verschieben. /7,9/ Aber dieser ungünstige Lichtverlauf kann nur mit Hilfe von einem im vorigen Abschnitt diskutierten Lichtumlenkungssystem befriedigend korrigiert werden. /7/ Insbesondere bei Raumtie-

fen von über 5 Metern kann das Rauminnere bei seitlichen Seitenfenstern vom Tageslicht allein selten ausreichend beleuchtet werden. Aus diesem Grund wird dort in der Regel Kunstlicht als Ergänzungsbeleuchtung eingesetzt. Dabei kann es jedoch aufgrund des Farbtemperaturunterschieds zwischen Tages- und Kunstlicht zu unerwünschten zwispältigen Lichtsituationen in der Übergangszone kommen. Diese Probleme finden sich im Centre Pompidou in Paris und im oberen Geschoss der Nationalgalerie in Berlin. Die beiden Galerien sind mit einer großen Spannweite gebaut, so dass beide Galerien einen offenen und flexiblen räumlichen Charakter erhalten. Trotz der großzügig geöffneten seitlichen Fenster kann deren Rauminnere ohne zusätzliche Kunstlichter nicht ausreichend beleuchtet werden.

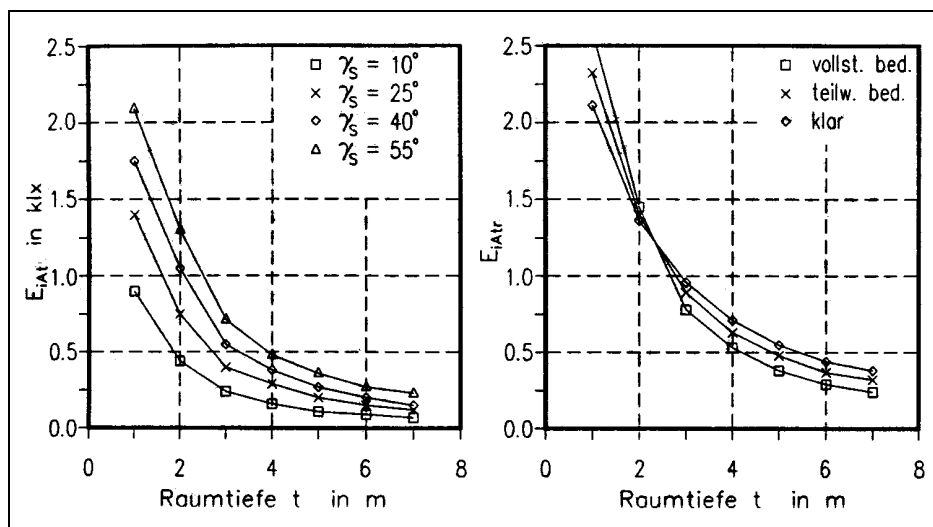


Abb. 20: Typische Verläufe der Beleuchtungsstärke beim seitlichen Seitenfenster in Gruppen des Sonnenhöhenwinkels γ_s bei vollständig bedeckten Himmel (links) und bei verschiedenem Himmel (rechts) /88/

Das seitliche Tageslicht kommen traditionell häufig zum Einsatz für die gegenständlichen Objekte in Museen. Das ist auf die gerichtete Lichtcharakteristik und den Schlagschatten des seitlichen Tageslichts zurückzuführen. Dadurch können die plastische Wirkung und die Silhouette der dreidimensionalen Sammlungsgüter, also der Büsten, Skulpturen und Vasen betont werden. Deshalb werden die Ausstellungsräume, abgesehen von den Kuppelsälen, der Glyptothek in München von Leo von Klenze für Statuen über die hochgelegenen Thermenfenster tagesbe-

lichtet. /23/ Daraus ergibt sich die starke Licht- und Schattenwirkung für die Plastiken sowie für die nacheinander angeschlossenen Ausstellungsräume.

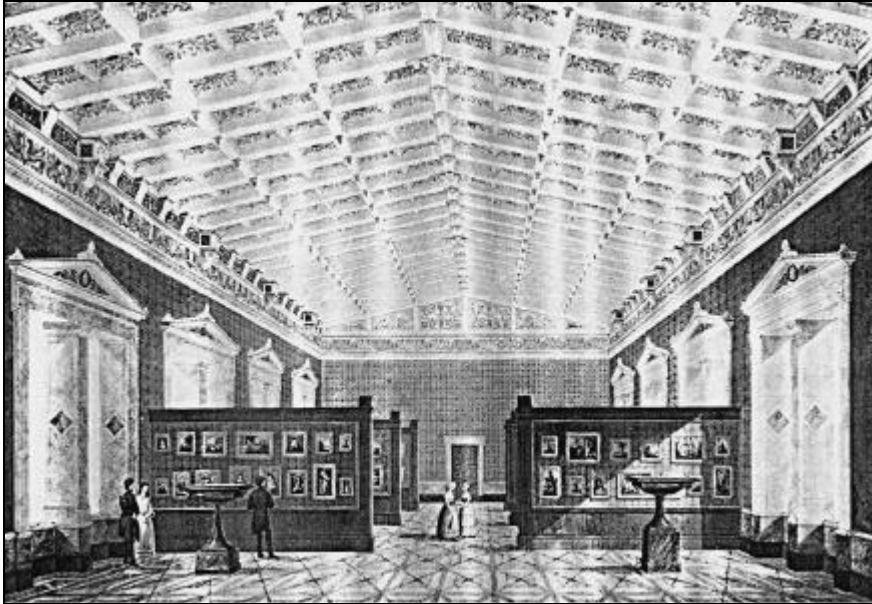


Abb. 21: Gemäldesaal der Eremitage in St. Petersburg, aquarellierte Zeichnung Klenzes, Leo von Klenze, 1839-1851 /130/



Abb. 22: Neue Nationalgalerie in Berlin, Mies van der Rohe, 1962-1968 /24/

Die leichte Herstellung von ideellen Bezügen durch die Transparenz zwischen Innen- und Außenräumen kann als ein anderer Vorteil der Beleuchtung durch die Seitlichen Seitenfenster genannt werden. Diese Transparenz wird in den Museumsbauten als das Thema einerseits für Demokratie im übertragenen Sinn und andererseits für die Schaffung der Beziehungen nach außen vorgesehen. Aus diesen Anlässen wurde der sogenannte Seitenlichtsaal in der Museumsarchitektur direkt nach dem zweiten Weltkrieg konzipiert. Die beiden Längsseiten des Seitenlichtsaales waren zum Tageslicht großzügig geöffnet. Dadurch wollte man die damals dringend benötigte Demokratisierung sowie eine neue Sachlichkeit nach der Bauhaustradition ausdrücken. /147/ nennt als das aller erste Beispiel dafür den Seitenlichtsaal des Kunsthauses in Glarus und als die nachfolgenden Beispiele das Stedelijk Museum in Amsterdam und den Theodor-Heuss-Bau des Germanischen Nationalmuseums in Nürnberg.

In der Erweiterung des Stedelijk Museums fließt das Tageslicht von beiden Seiten in relativ schmale Ausstellungsräume durch weit geöffnete Seitenfenster östlich und westlich ein. Im Gegensatz zu den traditionellen gedämpften Oberlichtbildergalerien ist die Raumcharakteristik dieses Museums klar und durchsichtig. Dadurch werden die Umrisse der Ausstellungsstücke und der Stellwände so deutlich betont, dass sie wie eine Verzierung dieses hellen Ausstellungsraumes wirken. Dies gilt auch für die südliche sowie die nördliche Seite des zwischen 1955 und 1958 errichteten Theodor-Heuss-Baus des Germanischen Nationalmuseums in Nürnberg. Die Exponate wurden dort damals ohne jeglichen Sonnenschutz vollständig der direkten Sonnenstrahlung ausgesetzt. Damit wollte man die Kunstobjekte ohne jegliche Filterung unter dem klaren Sonnenlicht präsentieren. Die beeindruckende Sachlichkeit und die hohe Glasfassade waren in jener Zeit architekturgeschichtlich revolutionierend. Jedoch waren die direkte Lichtstrahlung und die thermodynamische Wirkung, was der Exponatschutz die Sammlungsgüter und die Lichtführung anbelangt, nicht nur positiv. /77/ Das identische Lichtprinzip kann man im Erdgeschoss der schon oben erwähnten Nationalgalerie in Berlin ausfindig machen. (Abb. 22) In der oberen Etage wurden alle vier Wände aus klarverglasten Fenstern total lichtdurchlässig bzw. durchsichtig konstruiert. Dadurch ist dort der vollständige Ausblick in die Außenwelt garantiert.

Die Lichteinführungsidee des oben erklärten Seitensaals ist trotz des Vorteils der Transparenz zwischen Innen- und Außenraum aus dem Grund des Exponatschutzes heutzutage fast undenkbar. Die fotochemische Beschädigung der Sammlungsgüter durch die direkte ungefilterte Sonneneinstrahlung wurde später bemerkt, so dass man vom Tageslicht als Museumsbeleuchtung zum Kunstlicht überwechselte.



Abb. 23: Seitenfenster, Centre Pompidou, Paris, Renzo Piano, 1971-1978 /129/

Darüber hinaus schafft die Transparenz zwischen Innen- und Außenraum einen Sehkomfort und zusätzlich eine Attraktivität durch den Blickkontakt zur Außenwelt. Bei derartiger Transparenz handelt es sich um ein häufig auftauchendes Thema in Museen mit seitlicher Fensteranordnung. Die Leitidee von Bo und Wohlerter für das Louisiana Kunstmuseum in Humlebaek in Dänemark ist die Schaffung vielfältiger Beziehungen zwischen Innen- und Außenräumen. /31/ Dabei werden durch seitliche Fenster die Kontakte und die Harmonie mit dem umgebenden Naturpark, Meer und den dort ausgestellten Kunstgegenständen gesucht. Die Wege in den langgestreckten Baukörpern führen durch die Ausstellungskorridore mit den verschiedenen seitlichen Fensterarten, nämlich entweder mit einseitiger oder mit doppelseitiger Verglasung in unterschiedlichen Höhen. Von dort ergeben sich während des Rundganges die abwechslungsreichen Blickbeziehungen nach außen zu dem Park, den dort ausgestellten Skulpturen und dem künstlichen See.

Beim Centre Pompidou in Paris spielt der städtebauliche Kontext, nämlich enge Zusammenhänge mit dem Stadtviertel bzw. mit der ganzen Stadt, eine wesentliche Rolle. /129/ Dabei sollten ferner offizielle Kunst und Straßenkultur in den großen öffentlichen Räumen im und vor dem Gebäude aufeinander treffen. Dieses Vorhaben kommt bei Centre Pompidou neben der räumlichen Komposition durch den visuellen Kontakt über die transparenten Seitenfenster zustande. (Abb. 23)

Seitliche Fenster beziehen sich in vielen Museen auf den Innenhof. Auf dieser Grundlage sind die Innenräume des Museums für Ostasiatische Kunst in Köln an den ostasiatisch geatleteten Innengarten angeknüpft. Seitliche Fensteröffnungen eröffnen dem Besucher eine ständige Blickverbindung aus den verdunkelten Ausstellungsräumen zum helleren Innenhof wie in einen mittelalterlichen Kreuzganghof. Man könnte damit während des Aufenthalts in diesem Museum metaphorisch in die ostasiatische Welt eintreten. /28/ Die Innenräume des Wilhelm-Lehmbruck-Museums orientieren sich auch zu den Skulpturen des Atriums über völlig geöffnete seitliche Glaswände. (Abb. 24) Die Verknüpfung mit dem Innenhof über die seitlichen Fenster ist ein Grundgedanke ebenfalls bei dem Theodor-Heuss-Bau im Germanischen Museum in Nürnberg und dem Wallraf-Richartz-Museum (heute; Museum für Angewandte Kunst) in Köln. Der Bezug zwischen dem unteren Geschoss und dem hinteren Skulptureninnenhof in der Neuen Nationalgalerie in Berlin zählt auch zu einer Variante der obengenannten Idee.

5.2.2 Tagesbelichtung durch Hohe Seitenfenster

Hohe Seitenlichter können als die seitliche Fensteranordnung bezeichnet werden, die sich oberhalb der Augenhöhe des Beobachters befindet. Der direkte Bezug nach Außen geht dabei trotz des visuellen Kontaktes zum Himmel im Gegensatz zu seitlichen Seitenfenstern verloren. Das Licht fällt von oben und dennoch seitlich in so belichteten Räumen ein. Dieses schräg gerichtete Tageslicht verstärkt den Umriss der Figuren, sowie die Oberflächenstruktur der dreidimensionalen Objekte durch den im vorigen Absatz diskutierten Modelling-Effekt. Der Antikensaal der Eremitage in Leningrad ist ein klassisches Beispiel dafür. /130/ Die Silhouette und Plastizität der dort ausgestellten antiken Skulpturen werden durch das gerichtete Tageslicht der Hohen Seitenfenster enorm betont. Darüber hinaus werden

die Strukturen der sorgfältig dekorierten Oberflächen der Decke, der Wände und der Stützen dadurch deutlich wahrgenommen. Das Raummilieu wird damit lebendig und plastisch. Das Deutsche Hygiene-Museum in Dresden /131/ und das Volkswang Museum in Essen /147/ sind die Musterbeispiele der 20er Jahre für ein derartiges Tageslichtkonzept. Ein späteres Beispiel ist das zwischen 1968 und 1975 erbaute Diözesanmuseum in Paderborn des Architekten Gottfried Böhm. /27/



Abb. 24: Innenansicht des Lehmbruck-Sammlungssaals, Wilhelm-Lehmbruck-Museum in Duisburg, Manfred Lehmbruck, 1959-1964 /96/

Eine Variante der oberen Seitenlichter ist ein schmales oberes Fensterband, wie das von Knut Lohrer und Dieter Hermann entworfene Limesmuseum in Aalen aufweist. /61/ Das obere Lichtband läuft in der Regel eine Wand entlang durch oder rund um das ganze Haus fort. Im Lehmbruck-Sammlungssaal des Wilhelm-Lehmbruck-Museums setzt sich ein schmales oberes Fensterband rund um das Haus fort. (Abb. 24) Die primäre Funktion dieses Bandes liegt in erster Linie im Belichten der vor den Wänden ausgestellten Figuren. Außerdem bewirkt es, dass die Decke über den Seitenwänden zu schweben scheint.

Im Gegensatz zum seitlichen Seitenfenster können bei dem Hohen Seitenfenster die darunter stehenden Wände als Ausstellungsfläche genutzt werden. Die Aus-

stellungssäle des Saarland-Museums (Moderne Galerie) in Saarbrücken werden von Lichtstreifen tagesbelichtet, die das ganze Gebäude umlaufen. Die Lichtbänder werden dort so schmal und hoch gesetzt, dass die unter ihnen freistehende Wandfläche zum Aufhängen von Bildern genutzt werden kann. Auch im Guggenheim Museum werden die Bilder ausschließlich an den Wänden unter den oberen Lichtbändern ausgestellt, die entlang der Spiralform des Gebäudes von unten bis oben durchlaufen. (Abb. 25)

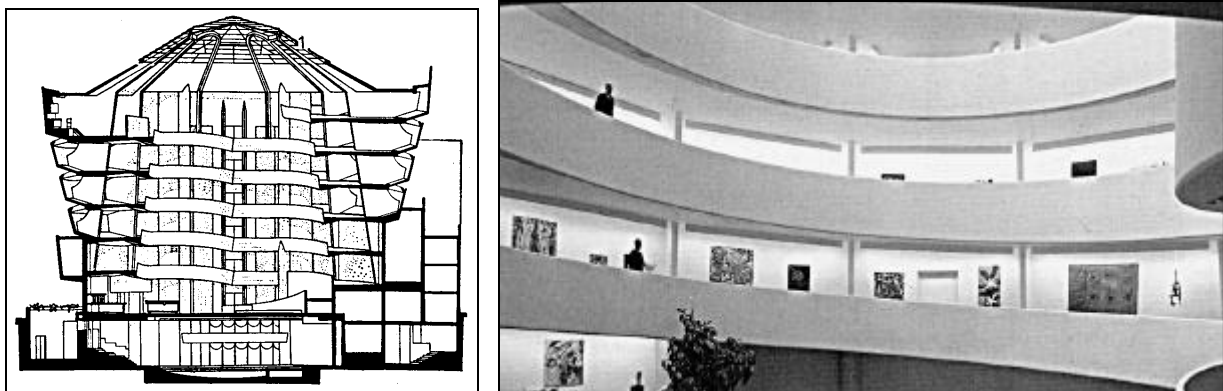


Abb. 25: links; Schnitt /29/, rechts; Innenansicht /125/, Solomon R. Guggenheim Museum in New York, Frank Lloyd Wright, 1956-1959

Bei der Betrachtung der Bilder, die an den Wänden unter hohen Seitenfenstern aufgehängt sind, können zwei Probleme auftreten. Erstens gibt es einen großen Helligkeitsunterschied zwischen den helleren Lichtbändern und den dunkleren Wandflächen. Dieser Helligkeitskontrast führt zu Schwierigkeit bei der Bilderbetrachtung. Eine direkte Blendung kommt dort auch oft vor, da sich die Lichtquelle innerhalb des Blickfeldes des Betrachters befindet. Derartige Sehstörung kann man in der Sammlung zeitgenössischer Kunst des Essener Volkwangmuseums ebenfalls beobachten. /147/

Der zweite Mangel der hohen Seitenfenster ist der Schatten, der an der zur Sonnenseite stehenden Wand entsteht. Da diese Wand dunkler als die übrigen Wände erscheint, setzt sie unsere Sehleistung herab. Dazu existiert bei direktem Sonnenschein ein starker Schlagschatten an der Wand, die im rechten Winkel zu den Fenstern steht. Zur Schwächung eines derartigen Schlagschattens sind seitliche

Oberlichtbänder an der höher abgestuften Galerie im Erweiterungsbau der Städtischen Kunsthalle Mannheim zusätzlich installiert. /96/ Diese Tageslichtöffnungen belichten die Ausstellungswände mild und sorgen im Raum für ein gleichmäßiges Lichtverhältnis.

5.3 Tageslicht als Mittel der Ausformung des Raummilieus

Die Art der Beleuchtung und die in diesem Kapitel untersuchten Lichttypen können neben der Belichtung der Exponate Ausformung des Raummilieus bestimmen. Die Räume der klassischen Bildergalerie mit Oberlichtern sehen gedämpft aufgrund der Lichtfilterung des Milchglases der Decke aus. Im Gegensatz dazu entsteht bei seitlichem Oberlicht und Tonnengewölbe ein heller und von Licht beherrschter Raum, in den das nördliche Tageslicht über eine klare Verglasung und von der inneren Seite des Gewölbes mehrmals reflektiert hereinkommt. Die Charakteristik des Tageslichts im vorher diskutierten Wallraf-Richartz-Museum in Köln ist deswegen relativ gerichtet bzw. plastisch. Dagegen existiert ein körperloses und diffuses Raummilieu durch das regelmäßige Lichtverhältnis in den Ausstellungsräumen der Kunstsammlung Nordrhein-Westfalen in Düsseldorf und der neuen Pinakothek in München. /147/ Ein pantheonartiger Kuppelsaal erweckt dank der stark gebündelten Tageslichteinführung einen dramatischen Raumeindruck wie im Kuppelsaal der Glyptothek in München. Beim Seitenlichtsaal geht es um die Quantität des Lichtes. Insbesondere in die in diesem Kapitel untersuchten Seitenlichtsälen dringt das Tageslicht durch eine geschosshohe klare Verglasung ungehindert ein. Dadurch entsteht ein lichterfüllter Raum.

Im Gegensatz dazu wird das Tageslicht in vielen Museen wie z. B. dem Lehmbruck-Sammlungssaal des Wilhelm-Lehmbruck-Museums, dem Louisiana Kunstmuseum, dem Museum Abteiberg in Mönchengladbach und dem Naturkundemuseum in Stuttgart als ein Raumbegrenzungsmittel genutzt. Das Tageslicht wurde dort eher aus Sicht seiner qualitativen Bedeutung interpretiert. Abb. 24 stellt dar, dass der Lehmbruck-Sammlungssaal des Wilhelm-Lehmbruck-Museums durch Abstufung mit den unterschiedlichen Tageslichtarten in verschiedene Ebenen aufgeteilt ist. Der zentrale Innenhof versorgt dort die anschließenden Bereiche

des Innenraumes durch die rahmenlosen klaren Glaswände mit seitlichem Tageslicht. Die Belichtung über eine relativ große Kuppel innerhalb des Raumes konzentriert sich auf eine scheibenförmige Stütze. Die breiten Flächen dieser Stütze stehen als Hängeplätze für Gemälde zur Verfügung. Die kleinen Kuppeln erhellen dagegen die einzelne Plastik. Die Raumbereiche vor den gewölbten Wandschalen werden von den schmalen Fensterbändern beleuchtet. Darüber hinaus grenzt der schmale horizontale Lichtschlitz über den gewölbten Betonschalen das Dach von der Wand ab. Ebenfalls werden die zweiteiligen Betonschalen durch die vertikale Schlitzöffnung voneinander abgetrennt bzw. voneinander abgegrenzt.

Im Museum Abteiberg in Mönchengladbach kommen ebenfalls die verschiedenen Lichttypen für die Raumunterteilung zum Einsatz. Dort werden der der Eingangshalle angeschlossene Ausstellungsbereich durch ein großzügig zur Landschaft und Stadt geöffnetes seitliches Fenster, die fünf quadratischen Säle durch die Shedlichtöffnungen für die Gemälde, der Wechselausstellungsraum durch die mehreren kleinen Kuppeln zur flexiblen Ausstellung und die Kabinette der Plastiken durch einzelne Lichtkuppeln zur Akzentuierung tagesbelichtet.

Die Ausstellungsräume des Naturkundemuseums in Stuttgart sind ebenfalls durch variierte Tageslichtarten in die unterschiedlichen Zonen geteilt. Dort belichten die Kuppeln das einzelne Objekt und obere Schlitzöffnungen an der Decke die Wände. Außerdem ermöglichen die Seitenfenster eine Blickbeziehung nach Außen.

Die Tageslichtanwendung als ein Raumbegrenzungsmittel, die in diesem Teil diskutiert wurde, spielt vor allem bei den späteren Bauten von Le Corbusier in den fünfziger Jahren, genannt sei das Kloster La Tourette und die Kapelle von Ronchamp eine wesentliche Rolle. /95/ Das kann auch in dem von ihm 1957 gebauten Nationalmuseum für westliche Kunst in Tokio begutachtet werden. Von den Ausstellungssälen (Abb. 16), die durch die seitlichen Oberlichter das Tageslicht gewinnen, unterscheidet sich die Haupthalle durch ihre mannigfaltigen Tageslichtöffnungen. (Abb. 26) Das Tageslicht wird insbesondere in der Haupthalle als Mittel verwendet, um unterschiedliche Raumbereiche bzw. -elemente in ihrer Bedeutung

hervorzuheben und voneinander abzugrenzen. Dadurch wird eine plastische Raumwirkung in dieser Haupthalle erzeugt, wie Abb. 26 zeigt.



Abb. 26: Haupthalle, Nationalmuseum für westliche Kunst in Tokio, Le Corbusier, 1957 /26/

6. Ökologische Optik

Die insbesondere von J. J. Gibson /74,75/ vorgeschlagene ökologische Optik unterscheidet sich von der physikalischen Optik sowie von der geometrischen bzw. physiologischen Optik. Die physikalische Optik befasst sich mit der ausgesendeten Strahlungsenergie aus selbst leuchtenden Körpern wie dem Sonne, einer Lampe und dem Feuer. In Bezug auf die physiologische Optik handelt es sich bei Licht um die visuellen Reize. Nach Annahme der ökologischen Optik /75/ können allein die Reize keine Wahrnehmung zustande bringen. Die Reize sind alles, was den Rezeptor erregt oder eine Reaktion hervorruft. Dagegen wird Licht bei der ökologischen Optik als Information für die Wahrnehmung behandelt. Gibson nennt dieses Licht Umgebungslicht. /75/ Umgebungslicht entsteht in Folge der Beleuchtung, die von der Oberfläche der nichtleuchtenden Körper reflektiert wird. Umgebungslicht ist deswegen angewiesen auf die Umwelt, wird durch sie strukturiert und enthält letztlich Information. Falls diese Reizinformation vorhanden ist, wird die Wahrnehmung durch das Bewusstwerden hervorgerufen. Die Wahrnehmung ist im Endeffekt ein Akt der Informationsentnahme. Aus den oben geklärten Darlegungen können bezüglich der Wahrnehmung /11,19,95/

- Beleuchtung
- Oberflächenausbildung
- Oberflächenbeschaffenheit

als Gestaltungsmittel des Umgebungsraumes begriffen werden.

6.1 Oberfläche und Entstehung der Struktur im Umgebungslicht

Unter der Strukturierung des Umgebungslichtes versteht man die Bildung der Differenzen und der Grenzen der Lichtenergien an einer Oberfläche. Die Strukturierung im Umgebungslicht beruht auf /74/

- der Lage der reflektierenden Flächen zum Licht
- der Zusammensetzung der Oberflächen

- den Beleuchtungsunterschieden der verschiedenen Flächenteile in der Beschattung.

Das erstgenannte Kriterium hat mit der Neigung der reflektierenden Flächen zur vorherrschenden Lichtquelle zu tun. In der Regel wird der zur Lichtquelle gerichtete Oberflächenteil stärker als der Lichtquelle abgewandte Oberflächenteil beleuchtet. Dadurch werden die Differenzen der Lichtstärke zwischen den unterschiedlichen Teilen und die Strukturierung des Umgebungslichts hervorgerufen. Derartige Strukturierung gilt nicht nur für die großen Flächen, sondern auch für die Teilausschnitte einer Oberfläche. Durch das Zusammenfügen der beiden Oberflächengrößen werden vielfache Grenzen und damit auch Hierarchien von unterschiedlich großen Strukturen erzeugt. Die feinere Struktur wird als Textur bezeichnet, die gröbere als die Form. Den genauen Übergang zwischen beiden Flächenanordnungen kann man schwer feststellen. Die Textur gibt Information über die Art der Materie, die Materialeigenschaft und den Oberflächenzustand an. Die Form beschäftigt sich eher mit der Umschließung der Oberflächen. Diese Umschließung wird durch die verschiedenartigen zwei- bzw. dreidimensionalen Formen und die Arten der Raumbildungen gekennzeichnet.

Bei der zweiten Grundlage der Strukturierung handelt es sich um die chemische Zusammensetzung. Durch die chemische Zusammensetzung werden die verschiedenen Lichtreflexionen, je nach den verschiedenen Materialien, hervorgerufen. Die bunte und unbunte Farbe, die Art der Substanz und die Glätte und der Glanz der Oberflächen treten durch die unterschiedlich reflektierenden Lichtteile zu Tage.

Aus den Gründen der oben erklärten beiden Kriterien betrachtet Gibson /75/

- Oberflächenanordnung
- Charakteristische Textur
- Charakteristische Form
- Beleuchtungsstärke
- Reflexions- bzw. Absorptionsgrad
- Verteilung der Reflexionsgrade der verschiedenen Wellenlängen

als die ökologischen Gesetze zur visuellen Wahrnehmung von Oberflächen.

Der dritte Grund für die Oberflächenstrukturierung wird Schattenwurf genannt. Schatten wird von einem undurchsichtigen Objekt auf einer der Lichtquelle zugekehrten Fläche gebildet, das sich zwischen der Lichtquelle und der betreffenden Oberfläche befindet. Mit Hilfe der Schattenwurfung können sich Teile einer Fläche unterschiedlich aufhellen bzw. verdunkeln. Bewegt sich die Lichtquelle selbst, wird der Beleuchtungszustand der Oberfläche zwischen Beleuchtung und Beschattung nach ihren Bewegungsbahnen ständig verändert.

6.2 Visuelle Raumwahrnehmung in der ökologischen Optik

6.2.1 Raum

Raum ist umschlossen von den vier Wänden, von dem Fußboden und der Decke des Bauwerks. Trotzdem ist er nicht identisch mit diesen begrenzenden Elementen, sondern kann nur bei ihrer Existenz wahrgenommen werden. Diese raumbildenden Elemente trennen gleichzeitig Innen und Außen voneinander. Bei der Geschlossenheit bzw. der Offenheit der Begrenzung eines Raumes wird zwischen Raumbehälter und Raumfeld unterschieden. /95/ Der Raumbehälter wird als Raum mit einer strengen Trennung zwischen Innen und Außen durch seine Begrenzungselemente gekennzeichnet. Dagegen versteht man unter dem Raumfeld Raum mit offenen bzw. transparenten Raumelementen zwischen Innen und Außen.

J. Joedicke /85/ hat die Beziehung zwischen dem Betrachter und den raumbildenden Körpern untersucht. Es wurde dabei beobachtet, dass sie bezüglich des Abstands zwischen dem Beobachter und dem raumbildenden Körper von der Wahrnehmung und dem Betrachtungspunkt abhängt und sich subjektiv ändert. Daher wurde schließlich erkannt, dass der Raum als die Summe der zeitlich und räumlich nacheinander erfahrenen Beziehungen zwischen Orten definiert wird. /85/

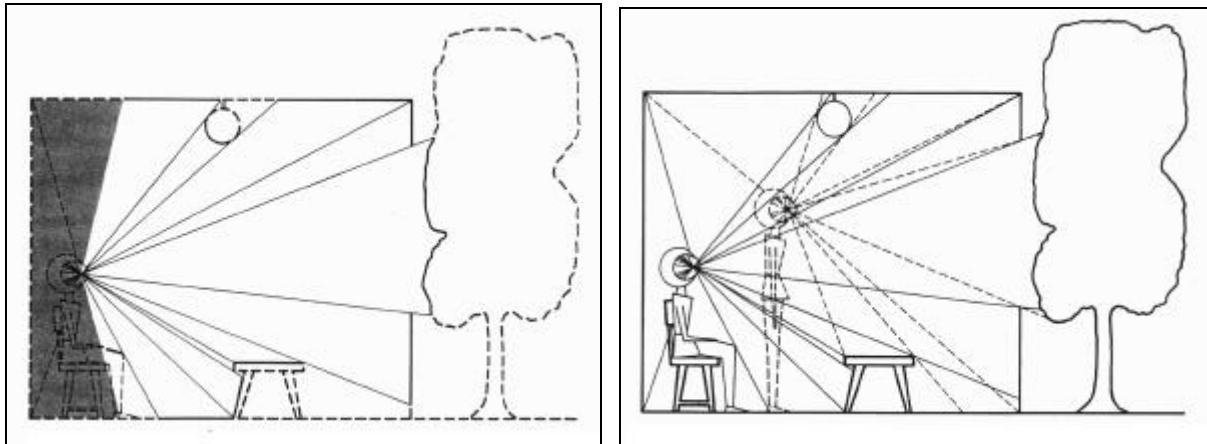


Abb. 27: links; Die umgebende optische Anordnung /75/

Abb. 28: rechts; Die Änderung der optischen Anordnung, hervorgerufen durch eine Fortbewegung des Betrachters /75/

6.2.2 Visuelle Raumwahrnehmung aus der Sicht der ökologischen Optik

Nach Gibson´s ökologischer Optik /75/ ist Information zur Wahrnehmung des Umgebungsraumes in der dort umgebenden optischen Anordnung enthalten. Diese optische Anordnung wird aus Licht, Oberfläche und dem Betrachter herausgebildet. Abb. 26 stellt eine umgebende optische Anordnung eines Raumes schematisch dar. Schaut sich ein Betrachter den Raum von einer stationären Position an, wird die Oberfläche der verschiedenen Bestandteile des Raumes zum Beobachtungspunkt projiziert. Dadurch wird eine umgebende optische Anordnung gebildet, die aus vielen verschiedenen Raumwinkeln besteht. Die Raumwinkel haben ihren Scheitelpunkt am Auge und ihre Basis an der Oberfläche der Bestandteile des Raumes. Die Raumwinkel sind dabei ineinandergeschachtelt und damit hierarchisiert. Die großen Raumwinkel kommen von den größeren Flächen, von den Vorderseiten freistehender Objekte und von den Lichtöffnungen. Die kleinen Raumwinkel ergeben sich aus der Textur der Oberfläche. Die Grenzen, die zwischen den benachbarten Dreieckszonen gezogen sind, bezeichnen die Unterschiede der Lichtenergien, die Informationen über den Umgebungsraum sind.

Im normalen Fall bewegen sich die Menschen zur Erforschung des Umgebungsraumes. Dabei verändert sich die optische Anordnung. (Abb. 33) Dadurch werden

die Form, Größe, Farbe und der Abstand zwischen Orten aufgrund der unterschiedlichen Perspektive trotz der unveränderten objektiv messbaren Relationen ständig anders gesehen. Ebenfalls verändert sich dabei sowohl der Raumwinkel, als auch die Raumwinkelgröße zu den Umgrenzungen der Oberflächen. Diese in räumlichen und zeitlichen Reihen wahrgenommene Ausschnitten nimmt man aber nicht als Bruchteile, sondern als eine Szene wahr.

6.3 Erkundungsverhalten des Menschen im Umgebungsraum

Die Menschen bewegen sich zur Wahrnehmung im Umgebungsraum. Diese Erkundungsaktivität bezieht sich nach Gibson /74/ nicht auf die Augen allein, sondern auf die unterscheidbaren Bewegungen des ganzen visuellen Systems. Dieses System besteht aus dem Körper, dem Kopf und den Augen. Das explorative Verhalten zur visuellen Wahrnehmung geht mit tätigkeitsabhängiger Gewichtung auf mindestens drei folgenden Erkundungsebenen vor sich: /14,74/

- Mobile Ebene
- Lokale Ebene
- Fokussive Ebene

Auf der mobilen Ebene werden Reizinformationen mit Hilfe der Körper-, Kopf- und Augenbewegung in der generellen Fortbewegung des Betrachters aus dem Umgebungsraum entnommen. In dieser Erkundungsaktion kann ein Museumsbesucher allgemeine Informationen über die Museumsräume überblicksartig erhalten. Das bedeutet, Raum und Raumzusammenhänge, z. B. etwa die Raum- und Baustruktur oder die Wegeführung innerhalb des Gebäudes, können auf dieser Ebene erfasst werden.

Auf der lokalen Ebene vollzieht sich die optische Wahrnehmung durch das Drehen des Kopfes und durch die zusätzlichen Augenbewegungen an einem festen Standpunkt. Diese Bewegungen verleihen dem Museumsbesucher einen umfassenden Eindruck des Raumes und ermöglichen weiterhin das Erkennen des einzelnen Exponates. Dabei entsteht auch ein Zusammenhang zwischen den unmit-

telbar ausgestellten Objekten. Die wesentlichen Details und Strukturen der Ausstellungsstücke können schon hier beobachtet werden.

Die letzte Ebene beschränkt sich nur auf die Bewegung des Auges bei der stationären Kopf- und Körperhaltung. Das Auge ist dabei entweder fest fixiert oder in sakkadischer bzw. sprunghafter Bewegung. Der Sehbereich dieser Ebene ist viel mehr eingengt als der Sehbereich der ersten beiden Stufen. Man kann nur das halbkugelförmige Sehfeld mit einem kleinen Sehwinkel (ca. 2°) betrachten. Da die Exponate auf der Fovea der Netzhaut exakt fokussiert sind, können sie im einzelnen und in ihren Details am feinsten wahrgenommen werden. Dadurch wird die Wahrnehmung anhand sämtlicher Eigenschaften des visuellen Systems, wie Sehschärfe, Form-, Farb-, Kontrast- und Gestaltsehen und dergleichen, gewährleistet.

Die Erkundungsprozesse der visuellen Wahrnehmung folgen trotz ihrer obigen Einstufung diesem Schema in der realen Situation nicht isoliert nach, sondern gehen ineinander über.

6.4 Stabilität der Wahrnehmung

6.4.1 In- und Umfeld

Eine hierarchisierte Planung des In- und Umfeldes ermöglicht dem Betrachter die organisierte und strukturierte Reizinformation aus den visuellen Umgebungen optimal zu entnehmen. Dabei kommt die Zweiteilung in In- und Umfeld am häufigsten vor. Das Infeld wird als der Sehbereich definiert, in dem das Sehobjekt liegt, während das Umfeld das periphere Sehgebiet umfasst. C. Bartenbach und W. Witting /20/ schlagen folgende, präzisere und verfeinerte Infeld–Umfeld-Gliederung des Gesichtsfeldes vor.

- Primäres Infeld
- Sekundäres Infeld
- Primäres Umfeld
- Sekundäres Umfeld
- Tertiäres Umfeld

Das primäre Infeld betrifft jenen punktuellen Bereich des visuellen Infeldes, auf den das Auge aktuell fixiert. Aufgrund des fovealen Sehens können die dort existierenden Objekte mit der maximalen Sehschärfe, der größtmöglichen Auflösung und dem höchsten Bewusstseitsgrad angesehen werden. Die Details bzw. die kleinen Facetten der Exponate gehören in der musealen Situation zum primären Umfeld. Ein aktives Sehen oder Blickverhalten ist dabei immer an einen zielbewussten Wechsel des primären Infeldes gebunden.

Unter dem sekundären Infeld versteht man die Sehfläche, die sich in der direkten Nähe des primären Infeldes befindet. Zwischen ihm und dem primären Feld besteht ein sehr stark räumlicher, vor allem ein kognitiver Zusammenhang. Hinsichtlich des Museums kann es als ein einzelnes Ausstellungsstück ausgelegt werden. Mit Hilfe der sakkadischen Augenbewegungen kann ein Überblick über ein ganzes Objekt leicht erreicht werden. Dabei wird ihre Summe vom Gehirn kognitiv verarbeitet, um als ein Ganzes verstanden werden zu können.

Das primäre Umfeld wird als die unmittelbare Nahumgebung des Infeldes definiert. Bezüglich der Museumssituation versteht das primäre Umfeld sich als die Hintergrundwand, die sich unmittelbar hinter den Exponaten befindet. Die Hintergrundwand spielt im Museum eine enorm wichtige Rolle bei der Gestaltung eines Ausstellungsraumes, besonders aufgrund der direkten Beeinflussung der Exponatbetrachtung. Dabei sollte ein ausgewogenes Leuchtdichteverhältnis zwischen dem Infeld und dem primären Umfeld zur optimalen Wahrnehmung geschaffen werden.

Das sekundäre Umfeld bilden alle raumbegrenzenden Elemente, die nicht zu dem Infeld und dem primären Umfeld angeordnet sind. Das ganze Umfeld kann von den Augen-, Kopf- und Körperbewegungen erfasst werden. Dadurch wird ein Eindruck über den Raum und seine Struktur vermittelt. In der Museumssituation können die sich nicht unmittelbar am beobachteten Objekt befindenden Wände, die Lichtsysteme für Tages- und Kunstlicht, die im Raum existierenden Personen, die nicht fokussierten Objekte, der Boden und die Decke als das sekundäre Umfeld gekennzeichnet werden. Sie wirken auf das Erscheinungsbild des ganzen Raumes mit unterschiedlicher Dominanz ein.

Das tertiäre Umfeld ist die Außenwelt, die durch die Fensteröffnung gesehen wird. Sie funktioniert als Informationsspender über die umgebende Außenwelt. Dadurch entsteht der Bezug nach Außen.

6.4.2 Stabile Wahrnehmung

Stabilität der Wahrnehmung kann man mittels der behutsam abgestimmten Leuchtdichteverhältnisse zwischen dem Infeld und dem Umfeld erzielen. Im Allgemeinen wird die Wahrnehmung stabil, sofern die Umfeldleuchtdichte kleiner als die Infeldleuchtdichte ist. Nach C. Bartenbach und W. Witting /11/ liegt, basierend auf der Adaptation und Kontrasterscheinung des menschlichen Auges, die Breite der ausgewogenen Helligkeitsproportion zur stabilen Wahrnehmung zwischen $1/2$ und $1/10$ (Infeld : Umfeld). (Abb. 29)

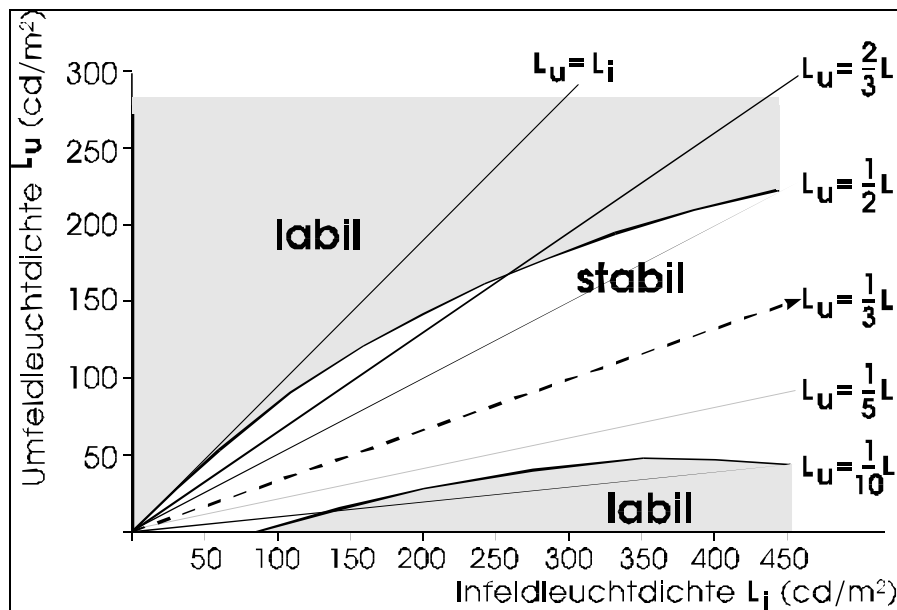


Abb. 29: Belastungsfreie stabile Wahrnehmung erfordert optimale Leuchtdichteverhältnisse zwischen Infeld und Umfeld /11/

7. Versuchsaufbau und Versuchsdurchführung

In einer experimentellen Erprobung werden neben den lichttechnischen bzw. physikalischen Messwerten hauptsächlich der visuelle Raum der Bildergalerie, der durch das Tageslicht beleuchtet wird, ermittelt. Dabei werden

- das Beleuchtungsniveau
- die Helligkeitsverteilung
- die Lichtrichtung und die Schattigkeit
- das Raumerscheinungsbild
- die Erfüllung der Sehaufgaben
- der Komfort des Museumsbesuchers
- Sehstörungen

jeweils für die verschiedenen Lichtkonzepte und die gestalteten Raumelemente unter Berücksichtigung des Lichtschutzes der Exponate erfasst und bewertet. Im Besonderen geht es dabei um die Bedeutung der von den Menschen subjektiv wahrgenommenen Auswirkungen auf das visuelle Raum bzw. -ästhetik aus Sicht der ökologischen Optik. Unberücksichtigt bleiben jedoch dabei die Einflüsse der momentanen Situation und der relativ überdauernden Persönlichkeitseigenschaften der wahrnehmenden Person.

Um die obengenannten Versuchsziele zu erreichen, werden die Auswirkungen der unterschiedlichen Lichtbedingungen und der Materialgestaltung untersucht. Dabei variieren bei ersteren das Lichteinführungssystem und damit die Lichteinfallswinkel bzw. -positionen des Bodens, der Wand und des Bilderrahmens. Bei den an zweiter Stelle genannten Untersuchungen ändern sich die Materialart und die Beschaffenheit der Materialoberfläche. Im Gegensatz dazu bleiben im gesamten Experiment neben dem Himmelszustand die nachfolgenden Kriterien unverändert.

- Beleuchtungsstärke im Außenbereich
- Farbtemperatur der Leuchte des künstlichen Himmels
- Größe und die Geometrie des Raumes

- **Himmelsrichtung des Raumes**
- **Position des Modells innerhalb des Kunsthimmels**
- **Positionen und Zahl der sich im Raum befindenden Menschen**
- **Positionen und Zahl der aufgehängten Bilder und der Skulpturen**
- **Summe der gesamten Öffnungsfläche zum Tageslicht**

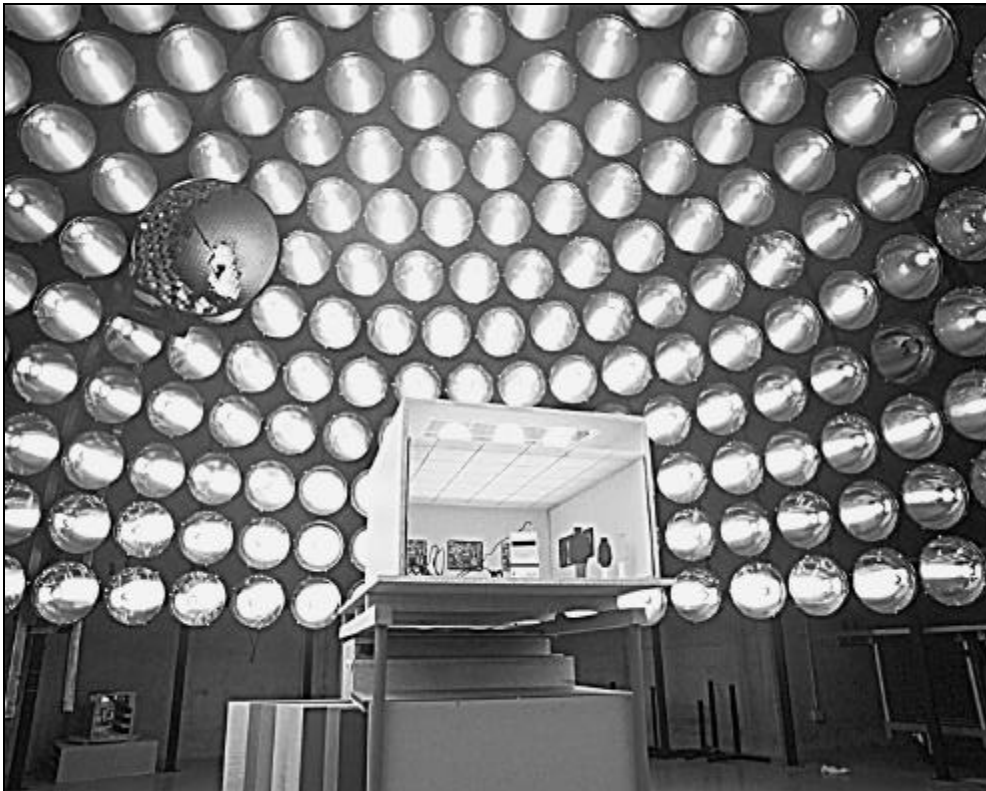


Abb. 30: Kunstlicht-Himmel (KLH) vom Bartenbach Lichtlabor in Innsbruck und der Versuchsmodellraum

Der durch das Tageslicht beleuchtete Raum kann mit Hilfe des

- **realen Raumes unter natürlichem Himmel**
- **Modellraumes unter natürlichem Himmel**
- **Modellraumes unter künstlichem Himmel**

rein experimentell untersucht werden. Mit der ersten Methode können die besten Ergebnisse erzielt werden. Der Nachteil dieses Verfahrens liegt allerdings in einem hohen Zeit- und Kostenaufwand. Außerdem ist es dabei fast unmöglich, auf

Dauer die gleiche Tageslichtsituation zur Verfügung zu stellen, da sich die Himmelsbedingungen ständig ändern. Der Modellraum bietet anders als der reale Raum die Möglichkeit für eine schnelle und ausreichende Variabilität der Raumbedingungen. Der maßstäblich verkleinerte Modellraum wird dabei detailtreu nachgebildet. Die Untersuchung unter dem künstlichen Himmel ist aufgrund der beliebigen Einstellungsmöglichkeit der Himmelsbedingungen zu bevorzugen. Bei der Tageslichtsimulation können aber einige reale Himmelsbedingungen wie die direkte Sonnenstrahlung und deren spektrale Verteilungen nur eingeschränkt hergestellt werden. Deshalb ist es notwendig, die dafür geeignet charakterisierten Randbedingungen bei der Erprobung unter dem künstlichen Himmel sicherzustellen. Für diese Arbeit wurde die Untersuchung in einem Modellraum unter dem künstlichen Himmel aus den drei oben genannten Versuchsmöglichkeiten ausgewählt. Die Daten des bereitgestellten künstlichen Himmels und des Versuchsmodells sind in den nachfolgenden Abschnitten aufgeführt.

7.1 Daten des Kunstlicht-Himmels und erprobter Himmelszustand des Experiments

Sämtliche Experimente werden im Kunstlicht-Himmel des Bartenbach Lichtlabors in Innsbruck durchgeführt. Der Kunstlicht-Himmel ist in Abb. 30 und 31 dargestellt. Durch den Kunstlicht-Himmel können ein Himmelszustand sowie der Sonneneinfallswinkel beliebig simuliert werden. Dabei ermöglicht der Kunstlicht-Himmel die Lichtmessung und die Fotografie eines architektonischen Modells bei unterschiedlichen Tageslichtauflösungen und –situationen. Die Daten des Kunstlicht-Himmels sind wie folgt:

Abmessung:	R = 7.5 m (Innenkante Leuchte)
Leuchtenzahl:	393
Höhenkreiszahl der Leuchten:	13
Steuerkreiszahl der Leuchten:	100
Anteil der Reflektorfläche an der KLH-Oberfläche:	ca. 20 %
Lampenbestückung:	HK1 bis 2: 75 w (Osram 4613)
	HK3 bis 13:150 w (Osram 4633)

Ges. Anschlussleistung:	52 kw
Max. Leistung pro Dimmer:	64
Dimmbereich:	0 – 100 % $K \pm 1 \%$
Anzahl der Register:	7
Anzahl der Stimmungen:	120
Anzahl der Adressen (Kreise):	128
Emax (diffus) :	ca. 23,000 lx
Emax (bedeckt):	ca. 18,000 lx
Durchmesser der künstlichen Sonne:	90 cm
Lampenbestückung der künstlichen Sonne:	220 v/1000 w (Halogen)
Beleuchtungsstärke der künstlichen Sonne:	10 000 lx

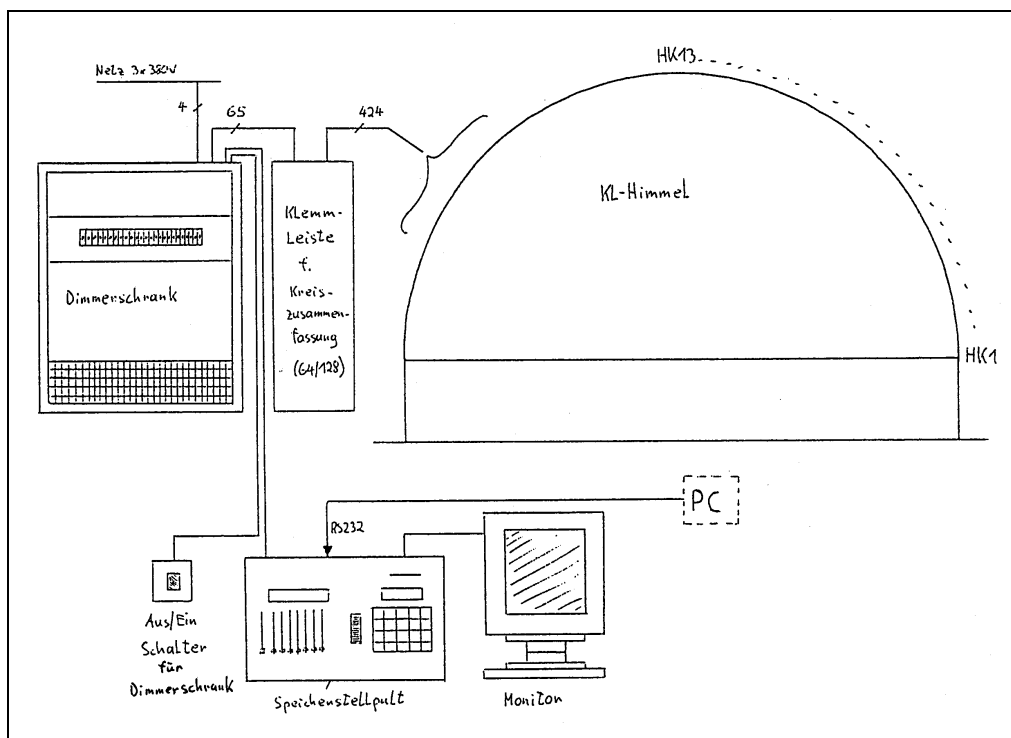


Abb. 31: Skizze des Kunstlicht-Himmels /114/

Die installierte künstliche Sonne ist am Himmel beweglich. Jeder Kreis der angeordneten Leuchten kann einzeln über Computer bzw. Steuerpult geregelt werden, wie Abb. 31 darstellt. Findet die Untersuchung unter diesem Himmel statt, können die Genauigkeit der realen Situation bzw. des Messungsergebnisses beeinflusst bzw. verfälscht werden durch:

A. Himmelszustände

- Diskreditierung der Himmelsleuchtdichte, d.h. Auflösung des Tageslichtsystems
- Leuchtdichteschwankungen der Lampen (Alter, Verschmutzung etc.)
- Vom Dimmzustand abhängige spektrale Zusammensetzung und Farbtemperatur

B. Modell

- Grenze der Detailtreue
- Unmöglichkeit der Verkleinerung der Oberflächenstruktur
- Bedingte Möglichkeit der Nachbildung der Lichttechnik

C. Abmessung: Beeinträchtigung der visuellen Wahrnehmung durch die maßstäbliche Verkleinerung

Um die realräumlichen Ergebnisse ermitteln zu können, werden die oben genannten Faktoren von der Vorbereitung, über die Durchführung des Experiments bis hin zur Beurteilung der Werte berücksichtigt und entsprechend korrigiert.

Die gesamte Untersuchung wird unter einer völlig bedeckten Himmelsbedingung durchgeführt, die durch den Kunstlicht-Himmel simuliert wird. Dafür wird die Stimmungs-Nummer eins ausgewählt, die am Steuerpult vorprogrammiert ist. Sie erzeugt einen diffusen Himmelszustand und enthält die schwächere (ca. 30 %) Bestückung des Kunstlicht-Himmels eins, zwei und drei.

7.2 Versuchsraum und -modell

Abb. 30 stellt sich das rechteckige Versuchsmodell im Kunstlicht-Himmel. Die Raumabmessungsdaten des Versuchsraumes sind nachfolgend aufgelistet. (Abb. 32,33,34)

Raubbreite	7 m
Raubtiefe	8 m
Raubhöhe bis zur Decke	3.5 m
Gesamthöhe des Raumes	4.5 m

Der Versuchsmodellraum wird im Maßstab 1:10 gebaut. Er ist so konzipiert, dass die variierenden Elemente einfach und schnell ausgetauscht werden können. Zu diesem Zweck sind zwei Schienen an den beiden seitlichen Wänden und eine kleine Lücke an der hinteren Wand vorgesehen. Die Bauteile des Lichtsystems kann man entweder über die oben erwähnten Wandschienen oder über das Dach auflegen. Auf der vorderen Wand, wo die Kamera positioniert ist, befindet sich eine Textildecke. Diese Decke dient dazu, die für die Fotografie bzw. Messung geöffnete Seite abzudecken. Die Raumtiefe wird einen Meter tiefer als die Raumbreite geplant, um die mögliche Beeinflussung der oben erwähnten Textildecke zu verringern und den Fotografierwinkel des Raumes zu erweitern.

7.3 Beschreibung der sich ändernden Elemente und Ausstellungsobjekte

7.3.1 Erprobte Tageslichtkonzepte

Insgesamt drei verschiedene Lichteinführungskonzepte des oberen Oberlichts werden bei diesem Experiment untersucht. Abb. 32 zeigt den Querschnitt des erprobten Tageslichtkonzepts 1. Dieses Konzept wird als die klassische Lösung des Oberlichtes im Museum bezeichnet und sein Aufbau besteht aus zwei Glasschichten. Eine davon befindet sich in der Öffnung am Dach mit klarem Glas zur Sonne. Dieses Glas lässt ca. 90 % des Tageslichts ins Gebäude hereinfallen. Die Größe der quadratischen Dachöffnungsfläche zur Sonne beträgt ca. drei mal vier Meter. Ein anderes wichtiges Element von den oben erwähnten zwei Glasschichten ist die Staub- bzw. Raumdecke. Sie besteht aus einem transluzenten Milchglas und wird direkt unter dem Dach eingebaut. Dieses Milchglas lässt des Lichts ca. 50 %, diffus durch.

Eine Besonderheit des Konzepts 2 liegt in den asymmetrischen Aluminiumrastern, wie Abb. 33 andeutet. Diese Raster sind direkt über der klar verglasten Raumdecke konstruiert und lenken mit einem Einfallswinkel von 45° das vertikal einfallende Tageslicht zu Rand- bzw. Wandbereichen des Raumes ab. Die Ausmaße und die Position der Dachöffnung sind identisch mit dem Konzept 1. Im Gegensatz zu diesem wurden bei dem zweiten Tageslichtkonzept die Positionen des Milch- und Klarglases ausgetauscht.

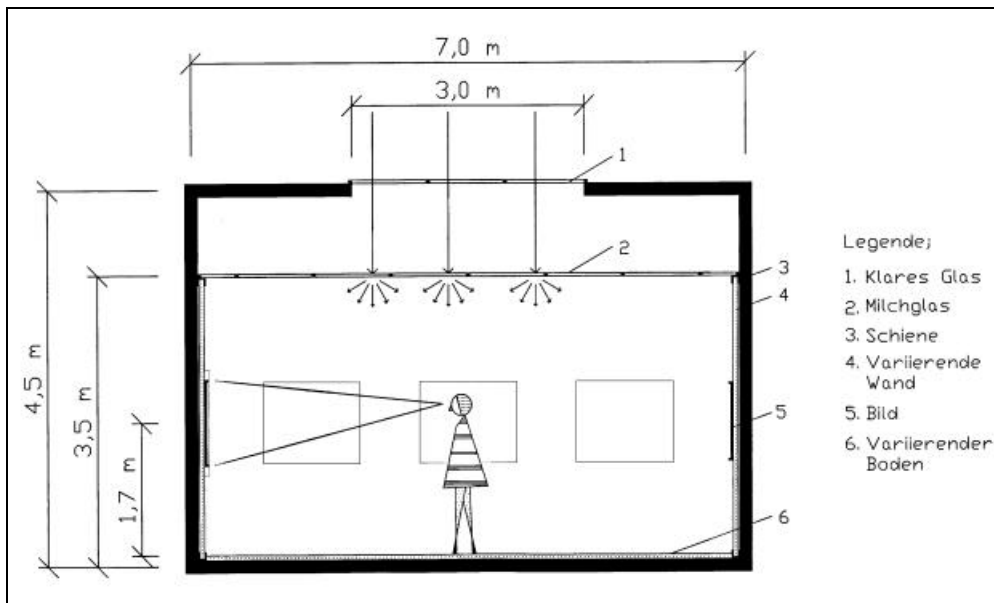


Abb. 32: Querschnitt des Versuchssaumes des Tageslichtkonzepts 1, ohne Maßstab

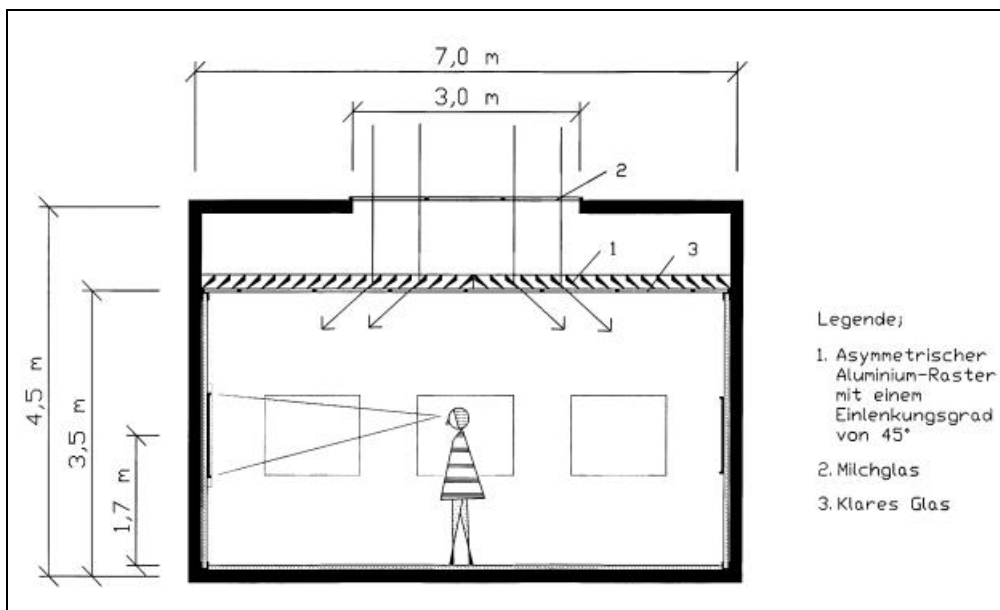


Abb. 33: Querschnitt des Versuchssaumes des Tageslichtkonzepts 2, ohne Maßstab

Das dritte Lichtkonzept wird in Abb. 34 gezeigt. Es ist charakterisiert durch die undurchsichtige mittlere Raumdecke und die schlitzartigen Lichtbänder zur Tageslichtöffnung. Erstere ist zur Abschirmung des Lichts vom mittleren Raumbereich

reich konzipiert. Letztere verläuft mit einem Abstand von einem Meter entlang der Wandlinie durch den ganzen Raum. Die inneren Oberflächen dieser Lichtbänder sind mit einem Winkel von 75 Grad eingeschnitten und leiten so das Tageslicht zur Ausstellungswandzone hin. Die eingeschnittenen inneren Oberflächen der Lichtbänder sind außerdem mit einem eloxierten matten Blechreflektor, Blech Nummer 1500, verkleidet. Die Gegenblender sind zur Vermeidung der Direktblendung aus der Längsrichtung der Lichtbänder ebenfalls aus Blech Nummer 1500 in einem Abstand von zwei Metern eingebaut. Die gesamte Größe der Dachöffnungsfläche des Tageslichtkonzepts 3 erreicht zwölf Quadratmeter, genau wie bei den Tageslichtkonzepten 1 und 2.

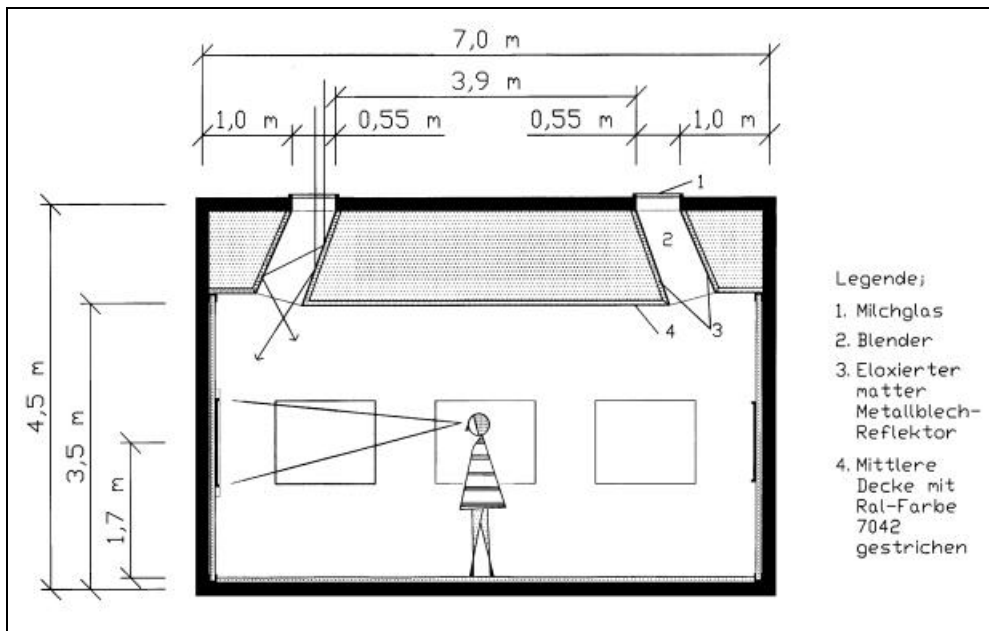


Abb. 34: Querschnitt des Versuchsraumes des Tageslichtkonzepts 3, ohne Maßstab

7.3.2 Wandprobe

Die Beschaffenheit und Art der Wandoberflächen wird nach Kriterien ausgewählt, die für die physikalische und ökologische Optik mehr oder weniger bedeutsam sind. Die gestrichenen Betonwände können gleichzeitig als Gipsplatten aufgrund des kleinen optischen Unterschieds der beiden Materialien in diesem verkleiner-

ten Maßstab betrachtet werden. Sämtliche Materialarten und Oberflächenbeschaffenheiten der erprobten Wände sind, wie folgt, tabellarisch aufgelistet.

Pro- be-Nr.	Art der Oberfläche	Behandlung der Oberfläche	Farbe	Reflexion sgrad [%]
W-1	Beton, RAL-Farbe 9010	matt	Reinweiß	88
W-2	Beton, RAL-Farbe 9001	Matt	Cremeweiß	74
W-3	Beton, RAL-Farbe 7035	matt	Lichtgrau	55
W-4	Beton, RAL-Farbe 7042	matt	Verkehrsgrau A	38
W-5	Beton, RAL-Farbe 7043	matt	Verkehrsgrau B	15
W-6	Beton, RAL-Farbe 3027	matt	Himbeerrot	20
W-7	Verputzt	matt, strukturiert	Weiß	85
W-8	Verputzt, RAL-Farbe 9001	matt, strukturiert	Cremeweiß	74
W-9	Verputzt, RAL-Farbe 7035	matt, strukturiert	Lichtgrau	52
W-10	Verputzt, RAL-Farbe 7042	matt, strukturiert	Verkehrsgrau A	35
W-11	Verputzt, RAL-Farbe 7043	matt, strukturiert	Verkehrsgrau B	14
W-12	Verputzt, RAL-Farbe 3027	matt, strukturiert	Himbeerrot	20
W-13	Holz-Spanplatte I	glatt, gemustert	Naturholz	53
W-14	Holz-Spanplatte II	glatt, gemustert	Naturholz	38
W-15	Holz-Spanplatte III	glatt, gemustert	Naturholz	30
W-16	Holz-Paneel I	matt, strukturiert		31
W-17	Holz- Paneel II	matt, strukturiert		12
W-18	RAL-Farbe 1018	matt	Zinkgelb	69
W-19	RAL-Farbe 6010	matt	Graugrün	19
W-20	RAL-Farbe 5015	matt	Blau	15

Abb. 35: Liste der Wandprobe

7.3.3 Bodenprobe

Bei der Untersuchung der Bodenauswirkungen werden neben den herkömmlichen Bodenarten einige außergewöhnlich erscheinenden Materialien, wie hoch glän-

zendes Aluminium oder spiegelnder Granit, ebenfalls eingesetzt. Der Grund dafür ist, dass durch deren Eigenschaften optische Wirkungen in diesem Raummilieu deutlicher werden, als dies bei den herkömmlichen Materialien der Fall wäre. In der folgenden Tabelle sind die Materialarten und die Oberflächeneigenschaften der untersuchten Böden zusammengestellt.

Probe-Nr.	Art der Oberfläche	Behandlung der Oberfläche	Gestrichene Farbe	Reflexionsgrad [%]
B-1	Beton, RAL-Farbe 9010	matt	Reinweiß	88
B-2	Beton, RAL-Farbe 9001	matt	Cremeweiß	74
B-3	Beton, RAL-Farbe 7035	matt	Lichtgrau	55
B-4	Beton, RAL-Farbe 7042	matt	Verkehrsgrau A	38
B-5	Beton, RAL-Farbe 7043	matt	Verkehrsgrau B	15
B-6	Holz– Spanplatte I	glatt, gemustert	Naturholz	53
B-7	Holz– Spanplatte II	glatt, gemustert	Naturholz	38
B-8	Holz– Spanplatte III	glatt, gemustert	Naturholz	30
B-9	Holz – Paneel	matt		45
B-10	Teppich I	ohne Muster	Dunkelblau	10
B-11	Teppich II	ohne Muster	Dunkelgrau	23
B-12	Aluminium	matt, eloxiert		41
B-13	Aluminium	spiegelnd, eloxiert		70
B-14	Granit	matt		44
B-15	Granit	spiegelnd		46

Abb. 36: Liste der Bodenproben

7.3.4 Ausstellungsobjekte

Die Position der aufgehängten Bilder wird so festgelegt, dass der vertikale Mittelpunkt der Bilder auf der menschlichen Augenhöhe von 170 cm über dem Fußbo-

den eingestellt wird. Die Daten der aufgehängten Bilder sind in Abb. 37 tabellarisch zusammengestellt. Außer den Bildern werden drei Skulpturen vor der vorderen Wand auf einem Sockel ausgestellt und deren visuelle Erkennbarkeit überprüft. Davon sind zwei Figuren aus Metall und eine aus Keramik hergestellt. Die Merkmale dieser Plastiken sind in Abb. 38 beschrieben.

Probe-Nr.	Position	Größe [m]	Rahmen	Glas	Durchschnittlicher Reflexionsgrad [%]
B-1	links der vorderen Wand	1.25 x 1	ohne	ohne	ca. 40
B-2	mitte der vorderen Wand	1.25 x 1	schwarz	entspiegelt	ca. 40
B-3	rechts der vorderen Wand	1.25 x 1	schwarz	normal	ca. 40
B-4	links vorne	0.9 x 1.3	schwarz	ohne	ca. 60
B-5	links hinten	1.15 x 1	Naturholz	entspiegelt	ca. 18
B-6	rechts vorne	1.25 x 0.95	schwarz	normal	ca. 19
B-7	rechts mitte	0.73 x 0.95	schwarz	entspiegelt	ca. 12
B-8	rechts hinten	0.90 x 1.3	schwarz	normal	ca. 32

Abb. 37: Liste der aufgehängten Bilder

Probe-Nr.	Material	Position	Höhe der Skulptur [m]	Höhe des Sockels [m]	Farbe
S-1	Metall	Links	0.78	0.28	schwarz
S-2	Metall	Mitte	0.52	0.28	schwarz
S-3	Keramik	Rechts	0.48	0.53	weiß

Abb. 38: Liste der ausgestellten Skulpturen

7.4 Fotoaufnahme

Alle sich ergebenden Raummilieus werden zur Bewertung der Ergebnisse mit einem Fotoapparat der Marke Leica R7 aufgenommen und somit dokumentiert. Sämtliche Fotografien werden ohne Blitz, jedoch mit einem Stativ, aus einem festem Punkt gemacht. Folgende Blickwinkel, deren Auswahl auf der Einteilung der in Kapitel fünf diskutierten Erkundungsverhaltensebenen basiert werden bei den Fotoaufnahmen erfasst:

- Aufnahme des ganzen Raumes, sodass der Raum und dessen Struktur grob und umfassend erforscht werden können.
- Aufnahme des hinteren Wandbereiches, wo die wesentlichen Details und Strukturen der einzelnen Objekte, der Zusammenhang zwischen den sich unmittelbar befindlichen Exponaten und die simultanen Kontrastwirkungen zwischen den Exponaten und der Hintergrundwand beobachtet werden können.
- Aufnahme eines Exponates mit der unmittelbar umgebenden Wandoberfläche, sodass die direkte Kontrastwirkung zwischen dem einzelnen Bild und der Wandoberfläche in unmittelbarer Nähe erkannt werden kann.

Dabei werden die nachfolgenden Objektive von Leica mit unterschiedlichen Brennweiten eingesetzt:

- Elmarit – R 1:2,8/19 mm, mit einem diagonalen Blickwinkel von 96°
- Summilux – R 1:1,4/50 mm, mit einem diagonalen Blickwinkel von 45°
- Macro-Elmarit-R 1:4/100 mm, mit einem diagonalen Blickwinkel von 25°

Das Objektiv Elmarit – R 1:2,8/19 mm wird für die Aufnahme des ganzen Raumes, Summilux – R 1:1,4/50 mm für das Fotografieren eines Wandbereiches und Macro-Elmarit-R 1:4/100 mm für die Nahaufnahme benutzt. Um die maximale Tiefenschärfe zu erreichen, werden die Blenden der Objektive jeweils auf die kleinste Stufe (22, 16 und 22) bei allen Aufnahmen eingestellt.

Die Belichtungsmessung für die Fotoaufnahme geschieht mit dem Lichtmesser der Kamera Leica 7. Dieser Lichtmesser wird von einem 8-Bit Mikrocomputer ge-

steuert und erzielt damit ein sehr gutes Messergebnis. /113/ Es gibt nach /113/ zwei verschiedene Methoden bei der Lichtmessung der Kamera Leica R7, und zwar die Großfeldintegralmessung und die Selektivmessung. Die Messfläche der Großfeldintegralmessung entspricht in etwa dem gesamten Sucherbild der Kamera. Daher ist die Integralmessung geeignet für die Aufnahme des gesamten Raummilieus und wird für diesen Zweck während dieses Experimentes verwendet. Das Messfeld der Selektivmessung besteht dagegen nur aus einem zentralen Kreis von sieben Millimeter Durchmesser, der auf der Einstellscheibe der Leica Kamera markiert ist. Diese Lichtmessung eignet sich für die Aufnahme der Details und für die Beurteilung des Kontrastes. Die Selektivmessung wird deswegen für die Aufnahme eines ganzen Wandbereiches und des einzelnen Bildes mit benachbarten Wandflächen eingesetzt.

Die Abstimmung auf die unterschiedlichen Farbtemperaturen ist beim Fotografieren anders als beim menschlichen Auge, was nur durch den Wechsel der dazu passenden Filme ausgeglichen werden kann. Die Farbtemperatur innerhalb des Kunstlicht-Himmels während des gesamten Experiments liegt im Durchschnitt bei ca. 3180 Kelvin. Aus diesem Grund wird der Dianegativfilm Ektachrome 64T für Kunstlicht der Marke Kodak (E.I. 64/19°), der für die Farbtemperatur 3200 Kelvin geeignet ist, für die Aufnahme dieser Arbeit ausgewählt.

Alle möglichen Kombinationen zwischen den vorher angegebenen Tageslichtkonzepten, Böden, Wänden und Bilderrahmen ergeben insgesamt 1003 Fotoaufnahmen der Betrachtungssituationen in diesem Experiment. Dazu werden alle oben genannten Betrachtungssituationen außer den Nahbetrachtungen des einzelnen Bildes mit einer Belichtungskorrektur (Override) der Kamera /113/ zusätzlich jeweils einmal fotografiert.

7.5 Messungen

7.5.1 Messung der Beleuchtungsstärke

Um den Tageslichtquotienten zu ermitteln, wird ein Luxmeter 106e zur Beleuchtungsstärkemessung eingesetzt. Dabei werden insgesamt acht Messpositionen

der Beleuchtungsstärke ausgesucht. In Abb. 44 werden diese Messpunkte an die Wand gezeichnet. Im einzelnen sind diese

- | | |
|---|----------|
| an der Wand | 6 Punkte |
| in der Raummitte (in einer Höhe von 170 cm) | 1 Punkt |
| auf dem Dach außerhalb des Modellraumes | 1 Punkt. |

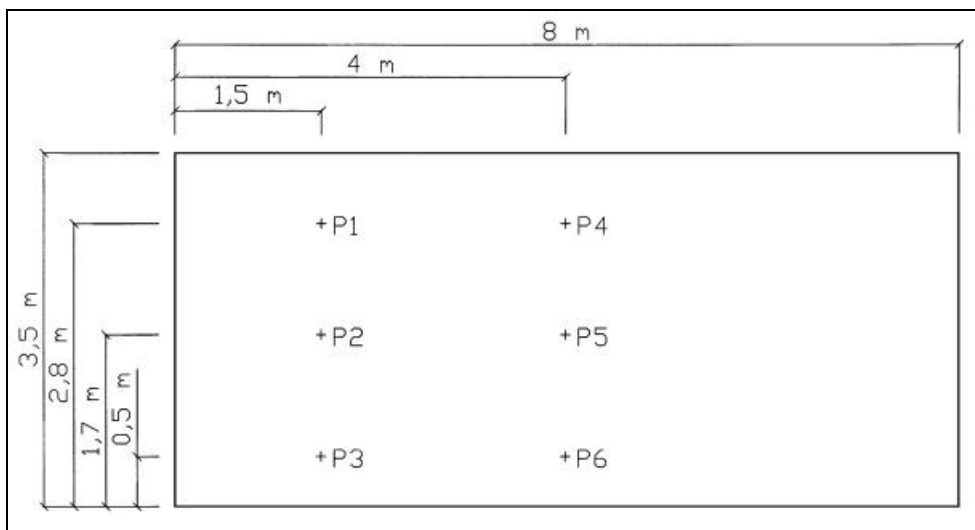


Abb. 39: Messpunkte der Beleuchtungsstärke an der Wand (ohne Maßstab)



Abb. 40: Ulbrichtkugel

7.5.2 Messung des Reflexionsgrades

Die Werte der oben tabellarisch angegebenen Reflexionsgrade der verschiedenen Proben ergaben sich mit Hilfe der Ulbrichtkugel (Abb. 40). Sie wurden dabei aus den Messdaten der beiden Referenzen und der Probe nach Gl. (16) berechnet.

$$\text{Gl. (16)} \quad r_{dif} = \frac{(E_X - E_O)E_N}{(E_N - E_O)E_X} r_N$$

- r_{dif} : Reflexionsgrad der Probe (%)
- r_N : Reflexionsgrad der weißen Referenz (%)
- E_N : Wert der weißen Referenz (Ix)
- E_O : Wert der schwarzen Referenz (Ix)
- E_X : Wert der Probe (Ix)

7.5.3 Messung der Farbtemperatur

Die Messung der Farbtemperatur innerhalb des Modellraumes ist notwendig, um die Abweichung der realen Farbe durch das Fotografieren zu vermeiden. Die Farbtemperaturmessung wird in DIN 5033 Teil 8 /42/ erklärt. Danach wird die Angabe der Normfarbwertanteile in x und y durch die Messung des Farbtemperaturmessers gewonnen. Der endgültige Wert der Farbtemperatur ergibt sich aus der Umrechnung mit Hilfe der sogenannten Normfarbtafel. Die Messpositionen für die Farbtemperatur sind wie folgt:

An der vorderen Wand	1 Punkt
An den beiden seitlichen Wänden	2 Punkte
In der Raummitte	1 Punkt
Auf dem Dach	1 Punkt

Der durchschnittliche Wert der Farbtemperaturen, der an den oben aufgelisteten Punkten gemessen wurde, ergab ca. 3180 Kelvin.

8. Versuchsergebnisse

Divergente Auswirkungen auf die Raumerscheinung bzw. -ästhetik und die visuellen Wahrnehmungszustände ergaben sich aus den im letzten Kapitel präparierten Konzepten bzw. Varianten während des Experimentes dieser Arbeit. Wie erwartet, beeinflussten dabei die erprobten unterschiedlichen Lichteinführungssysteme zunächst den Lichtverlauf in den Versuchsräumen. Diese Lichtverteilung veränderte demnach die Korrelation des Helligkeitseindrucks zwischen den Raumelementen, nämlich zwischen den Wänden, der Raumdecke und dem Boden. Dabei spielten die Materialarten und -oberflächen zusätzlich eine Rolle. Schließlich entstanden die unterschiedlichen Raummilieus und die Sehkonstellation für die Sehobjekte den obengenannten Auswirkungen entsprechend. Darüber hinaus waren dabei die Suggestionen der Bildrahmen auch nicht zu unterschätzen. Außerdem war die Wahrnehmung des visuellen Raumes auch von der Beobachtungsposition der wahrnehmenden Person abhängig. Die Einflüsse durch die Kognition und die psychische Verfassung des wahrnehmenden Individuums wurden in dieser Arbeit außer acht gelassen.

Aus den oben erwähnten Gründen werden in den nachfolgenden Abschnitten die relevanten Ergebnisse der Auswirkungen durch das Tageslichtkonzept, die Wand, den Boden und den Bilderrahmen beschrieben. Dabei werden die Resultate nicht nur mathematisch bzw. physikalisch, sondern überwiegend fotografisch dokumentiert und anschließend bewertet. Diese Ergebnisse werden ferner begründet und diskutiert. Die Begründungen der experimentellen Untersuchungsergebnisse dieser Arbeit können in der Regel erklärt werden durch

- allein die Größe der physikalischen Messwerte
- allein die physiopsychologischen Funktionsweisen der menschlichen visuellen Wahrnehmung
- diese beiden objektiven und subjektiven Faktoren.

Die Bewertung des visuellen Wahrnehmungszustandes basiert auf den im Kapitel 4 genau studierten

- Anforderungen an die visuelle Wahrnehmung in Tageslichtmuseen

- Erfüllungen der Sehaufgaben nach DIN 5035 Teil 1 /47/ und
- daraus folgenden lichttechnischen Güteigenschaften.

Dagegen werden die Raumercheinungsbilder bzw. -ästhetik auf den Fotoaufnahmen beurteilt und müssen manchmal mit relativ abstrakten Worten ausgedrückt werden.

8.1 Charakterisierung des visuellen Raumes durch das Tageslichtkonzept

Der Verlauf des Tageslichtquotienten im Innenraum hängt zuerst vom Tageslichtöffnungskonzept bzw. -system in besonderem Maße ab. Die dadurch entstandene Lichtverteilung beeinflusst danach den Wahrnehmungszustand und die Raumcharakteristik mehr oder weniger. Aus diesem Grund folgt zunächst die Diskussion über die Ergebnisse dieser experimentellen Untersuchungsteils.

8.1.1 Auswirkungen des Tageslichtkonzeptes auf das Lichtverhältnis

8.1.1.1 Horizontale Beleuchtungsstärke

In Abb. 41 ist der typische Verlauf des horizontalen Tageslichtquotienten D_h in einem Versuchsraum mit der Bodenprobe B-3 und der Wandprobe W-3 jeweils für das Tageslichtkonzept 1, 2 und 3 aufgetragen. Der horizontale Tageslichtquotient D_h des Lichtkonzeptes 1 ist nach Abb. 41 gekennzeichnet durch

- den gravierenden Unterschied zwischen der Raummitte (Messpunkt P-7) und den Wandzonen (Messpunkt P-4, P-5 und P-6)
- die ausgeglichene Lichtverteilung innerhalb der Wand

Der horizontale Tageslichtquotient D_h ist Abb. 41 zufolge in der Raummitte mindestens doppelt so hoch wie in den Wandbereichen im Versuchsraum, der mit Tageslichtkonzept 1 geplant ist. Diese ungleichmäßige Lichtverteilung resultiert vor allem aus der zentral liegenden Position der Dachöffnung zur Sonne. Ein wei-

terer Grund dafür liegt darin, dass der Aufbau des Öffnungssystems des Tageslichtkonzepts 1 den größten Teil des Tageslichts ohne beachtliche Ablenkung bzw. Abschirmung direkt in die Raummitte durchlässt. (s. Abb. 32) Andererseits bleibt nach Bild 41 der Unterschied des horizontalen Tageslichtquotienten D_h innerhalb der Ausstellungswandbereiche des so belichteten Raumes sehr gering. Dabei werden die Wände nicht direkt oder gerichtet, sondern regelmäßig und diffus reflektiert tagesbelichtet.

Beim Tageslichtkonzept 2 (s. Abb. 33) wird Abb. 41 zufolge eine sehr regelmäßige horizontale Lichtverteilung im Versuchsraum festgestellt. Außerdem stellt sich dabei der geringste Unterschied des horizontalen Tageslichtquotienten D_h unter den drei erprobten Lichtsystemen ein. Dieses ebene Lichtverhältnis beruht insbesondere auf den in der Raumdecke konstruierten Aluminiumrastern. Diese Raster schirmen die in die Raummitte eindringende Lichtstrahlung teilweise ab, verhindern damit den direkten Einfall des Tageslichts auf den Boden und führen das Zenitlicht zur Wand hin. Dadurch wird die Leuchtdichte der Raumdecke und des Bodens reduziert und dementsprechend die der Wand erhöht. Das führt zuletzt zur oben erklärten gleichmäßigen Lichtverteilung im Raum.

Der Versuchsraum, der durch das Tageslichtkonzept 3 (s. Abb. 34) belichtet wird, stellt in Abb. 41 eine umgekehrte Lichtverteilung gegenüber dem Tageslichtkonzept 1 dar. Der horizontale Tageslichtquotient D_h ist an den Wandbereichen deutlich höher als in der Raummitte. Da sich die Lichtöffnungsbänder unmittelbar über den Wänden befinden, fällt das Tageslicht von dort mit einem Einfallswinkel von 75 Grad steil ein. Aus demselben Grund ist der horizontale Tageslichtquotient D_h am Messpunkt P-4, nämlich direkt unter den Lichtbändern, am stärksten und nimmt an den Wänden abwärts stark ab. Diese tendenzielle Abnahme der Beleuchtungsstärke setzt sich bis zum Messpunkt P-7, d. h. bis zur Raummitte weiter fort. Der schwächste horizontale Tageslichtquotient D_h in der Raummitte entsteht durch die Tageslichtabschirmung der lichtundurchlässigen mittleren Raumdecke.

8.1.1.2 Vertikale Beleuchtungsstärke

Abb. 42 zeigt einen typischen Verlauf des vertikalen Tageslichtquotienten D_v in einem Versuchsraum nach den drei unterschiedlichen Tageslichteinführungskon-

zepten. Nach Abb. 42 lässt das Tageslichtkonzept 1 die größte Menge der vertikal gemessenen Tageslichtstrahlung herein, wie bei der horizontalen Innenbeleuchtungsstärke. Darüber hinaus verteilt das Tageslichtkonzept 1 gemäß Abb. 42 das Tageslicht innerhalb der Wandzone in die vertikale Richtung am gleichmäßigsten, wie bei der horizontalen Beleuchtungsstärke. Der vertikale Tageslichtquotient D_v ist beim ersten Tageslichtkonzept nach Abb. 42 im mittleren Bereich etwas höher als in den oberen und unteren Bereichen an der Wand.

Im Vergleich zum ersten Tageslichtkonzept bringen die Tageslichtkonzepte 2 und 3 nach Abb. 42 insgesamt viel geringere vertikal gemessene Lichtmengen in den Raum ein. Der vertikale Tageslichtquotient D_v bei den Tageslichtkonzepten 2 und 3 ist vor allem in den mittleren und unteren Wandbereichen am geringsten. Dagegen ist die Leuchtdichte der Messpunkte P-4 und P-7 bei den Tageslichtkonzepten 2 und 3 fast identisch. Außerdem sind die Verteilungen des vertikalen Tageslichtquotienten D_v bei den Tageslichtkonzepten 2 und 3 nicht nur im gesamten Raum, sondern auch in den Wandbereichen viel unebenmäßiger als beim Tageslichtkonzept 1. Außerdem fällt der vertikale Tageslichtquotient D_v beim Tageslichtkonzept 3 in den Wandbereichen vom Messpunkt P-4 zum P-5 sehr steil ab.

In Abb. 43 wird ein unverkennbarer Lichtverlauf des vertikalen Tageslichtquotienten D_v zwischen P-2 und P-5 in der horizontalen Richtung innerhalb des Wandbereiches nach den untersuchten drei Tageslichtsystemen dargestellt. Dabei beleuchtet das Tageslichtkonzept 3 den Wandbereich in der horizontalen Richtung sehr gleichmäßig. Dagegen besteht ein großer Unterschied des Tageslichtquotienten zwischen dem Wandrand (P-2) und der Wandmitte (P-5) bei den Tageslichtkonzept 1 und 2.

8.1.2 Auswirkung des Tageslichtskonzepts auf die Helligkeitskorrelation zwischen den Raumbegrenzungselementen

Die im letzten Absatz beobachteten Lichtverteilungen in den Versuchsräumen, die durch die unterschiedlichen Tageslichtsysteme zustande kamen, beeinflussen vor allem das Helligkeitserscheinungs-bild der Raumelemente, genauer gesagt die Korrelation des Helligkeitseindrucks zwischen den Raumbegrenzungselementen.

8.1.2.1 Helligkeitsdominanzbildung der Raumdecke

Die Tageslichtöffnung zur Sonne befindet sich beim Oberlicht am Dach des Gebäudes. Aus diesem Grund wird dort die unter dem Dach liegende lichtdurchlässige Raumdecke in der Regel am hellsten wahrgenommen. Die Beschaffenheit und die Stärke der Helligkeitsdominanz sind dabei von Oberlichtlösung zu Oberlichtlösung verschieden. Die Helligkeitsdominanz der Raumdecke tritt unter den erprobten Oberlichtlösungen beim Tageslichtkonzept 1 am stärksten auf. Dies ist auf die direkte Lichteinführung des Tageslichtsystems 1, d.h. ohne Abschirmung und Einlenkung der Tageslichtstrahlung in den Innenraum zurückzuführen. Außerdem liegt die einzige große Lichtöffnung bei diesem Lichtkonzept in der Mitte des Daches. Daher wird dabei die hell erscheinende Raumdecke von den Besuchern von den meisten Positionen des Raumes aus zwangsläufig und leicht wahrgenommen. In Abb. 44, 45, 46, 47 und 48 kann man die obengenannte optische Helligkeitsdominanz der Raumdecke in mit dem Tageslichtkonzept 1 entworfenen Räumen deutlich erkennen, jedoch ebenfalls bei allen erprobten unterschiedlichen Wand- und Bodenmaterialarten. Gemäß oben genannten Abb. 46, 47 und 48 wird die Helligkeitsdominanz der Raumdecke mit dem abnehmenden Reflexionsgrad des Bodens und der Wände im Allgemeinen stärker. Das gilt auch, wenn die Oberfläche dieser Raumbegrenzungselemente immer matter wird.

Das Tageslichtsystem 2 verursacht im Vergleich zum Lichtkonzept 1 beim Betrachter generell einen geringeren oder keinen dominierenden Helligkeitseindruck der Raumdecke. Das erklärt sich zunächst durch die im vorausgegangenen Abschnitt erklärte regelmäßige Lichtverteilung durch die Aluminiumraster des Tageslichtsystems 2. Abb. 49 zeigt deswegen eine deutliche Verminderung der Helligkeitsdominanz der Raumdecke im Vergleich zum ersten Tageslichtkonzept in Abb. 47. Die Raumdecke erscheint in Versuchsräumen mit dem Tageslichtkonzept 2 nur bei den weniger reflektierenden Wandproben W-5 (Reflexionsgrad 15 %), W-6 (Reflexionsgrad 20 %), W-11 (Reflexionsgrad 14 %), W-12 (Reflexionsgrad 20 %) und W-17 (Reflexionsgrad 12 %) etwas heller als die Wände. Abb. 50 bietet dafür ein Beispiel. Dabei sieht die Raumdecke dann am hellsten aus, wenn die dunkleren Böden wie B-5 (Reflexionsgrad 15 %) und B-10 (Reflexionsgrad 10 %) mit den oben genannten fünf helleren Wänden, auch ebenfalls B-13 mit W-6, kombiniert sind. Abb. 51 vermittelt uns einen Beweis dafür.

In Versuchsräumen, die mit dem Tageslichtkonzept 3 konzipiert sind, werden nach den Ergebnissen dieses Experimentes festgestellt, dass die Raumdecke insgesamt bei fast keinem Raummilieu besonders dominierend hell ist. Die Gründe dafür sind, dass

- der größte Teil der Raumdecke undurchsichtig verdeckt ist
- die Lichtöffnungsbänder, die am Rand der Raumdecke lokalisiert werden, gezielt die Ausstellungswandbereiche erhellen
- die Lichtöffnungsbänder so schmal und klein geschnitten sind, dass sie nicht leicht ausfindig gemacht werden können.

Diese geringere bzw. nicht vorhandene Helligkeitsdominanz der Raumdecke beim Tageslichtkonzept 3 kann man bereits durch dessen physikalischen Messwert in Abb. 41 zur Kenntnis nehmen. Man kann das optisch in Abb. 52 erkennen. Der Versuchsraum dieser Abbildung ist mit einer niedrig reflektierenden Wandprobe W-5 (Reflexionsgrad 15 %) und einer hoch reflektierenden Bodenprobe B-1 (Reflexionsgrad 88 %) gestaltet. Dieses Raummilieu spricht deutlich aus, dass die Helligkeit des undurchsichtigen mittleren Raumdeckenteils trotz der weniger reflektierenden und deswegen optisch zurückhaltenden Wände und des hohen Bodenreflexlichtanteils nicht übersteigert wird.

Dagegen sind die Lichtbänder beim Lichtsystem 3 meistens die helldominierenden Faktoren aufgrund ihrer höheren Leuchtdichte als die anderen Raumbegrenzungselemente. Das stellt Abb. 54 tabellarisch dar. In ihr ist das hellste Raumelement in den Versuchsräumen, die durch das Lichtkonzept 3 belichtet werden, aufgelistet. Nach dieser tabellarischen Abbildung werden die Lichtbänder, abgesehen von einigen sehr hoch reflektierenden Wänden und Böden, z. B. W -1, W-7 und B-1, in fast allen untersuchten Räumen des Tageslichtkonzepts 3 am hellsten wahrgenommen. Abb. 52 und 53 bestätigen das optisch musterhaft. Der Boden B-1 dominiert in Abb. 52 in der Helligkeit über die Lichtbänder. Dagegen hat der Boden B-2 in Abb. 53, der nur etwas weniger als B-1 reflektiert, weniger Helligkeit als die Lichtbänder. Eine eindeutige Sehbeeinträchtigung durch die Helldominanz dieser Lichtbänder ist dennoch bei der Exponatbetrachtung nicht gegeben, wie alle in diesem Kapitel abgebildeten Fotobilder des Lichtkonzepts 3 bestätigen. Das basiert einerseits auf der schmalen Ausformung der Lichtöffnungsflächen

andererseits werden diese Lichtbänder aus den meisten Positionen im Raum perspektivisch vom Auge des Museumsbesuchers verdeckt gesehen.

8.1.2.2 Helligkeitskorrelation zwischen dem Boden und den Wänden

Die Korrelation der Helligkeitsunterschiede zwischen dem Boden und den Wänden änderte sich je nach den Lichtkonzepten im sonst gleich gebliebenen Versuchsraum. Darüber kann man einen Überblick in der Abb. 55 gewinnen, in der die obengenannte Helligkeitskorrelation nach der Beobachtung der fotografischen Ergebnisse tabellarisch aufgelistet ist. Diese Abbildung stellt zunächst dar, dass die Böden beim Lichtkonzept 1 bei den gleich gehaltenen Wänden viel heller im Vergleich zu den Lichtkonzepten 2 und 3 erscheinen. Der Grund dafür liegt darin, dass das in den Raum hereinfallende Tageslicht beim Tageslichtkonzept 1 den Boden direkt und ohne jede Richtungsänderung trifft. Daraus ergibt sich dort die besonders starke Helligkeitsdominanz des Bodens über die Wände. Ausgenommen davon sind die Räume mit extrem dunklen Böden, wie B-5 und B-10, wie Abb. 55 zeigt. Die oben diskutierte Helligkeitsdominanz des Bodens ist beim ersten Tageslichtkonzept so stark, dass sie bei den Wänden, die sogar viel höher reflektieren als der Boden, noch vorhanden ist. Das beste Beispiel dafür bietet die Raumvariante von W-1 (Reflexionsgrad 88 %) und B-9 (Reflexionsgrad 45 %), nämlich Abb. 56. Ein visueller Eindruck wird dort erweckt, als würde der Boden einen höheren Reflexionsgrad als die Wände besitzen. Aber der Boden reflektiert das Licht nach der physikalischen Messung in der Tat 43 % weniger als die Wände.

Die Helligkeitsdominanz des Bodens über die Wände ist beim Tageslichtkonzept 2 größer im Vergleich zum Tageslichtkonzept 1, vorausgesetzt, dass der Boden einen höheren Reflexionsgrad als die Wände besitzt. Die Spannweite des Reflexionsunterschieds zwischen dem Boden und den Wänden, wobei der Boden über die Wände heller erscheint, ist beim zweiten Tageslichtkonzept viel geringer als beim ersten Tageslichtkonzept. Das wird durch einen Vergleich der Abb. 56 und 57 schnell sichtbar. Letztere ist ein mit dem Oberlichtsystem 2 vorgesehene Raummilieu mit W-3 (Reflexionsgrad 55 %) und B-9 (Reflexionsgrad 45 %), erstere ein mit dem Oberlichtsystem 1 vorgesehene Umgebungsbild mit W-1 (Reflexionsgrad 88 %) und B-9 (Reflexionsgrad 45 %). Der Reflexionsgradunterschied

zwischen dem Boden und den Wänden beträgt bei Abb. 57 ca. 10 % und bei Abb. 56 ca. 43 %. Deswegen wird in Abb. 56 eine hellere Erscheinung des Bodens über die Wände erwartet als in Abb. 57. Aber diese Helligkeitsdominanz des Bodens ist unerwartet stärker in Abb. 56 als in Abb. 57, wenn die Wände der Abb. 56 einen fast doppelt so hohen Reflexionsgrad besitzen als die von Abb. 57. Dadurch wird klar, dass das Lichtsystem 1 den Boden viel stärker erhellt als das zweite Lichtkonzept.

Die Auswirkungen auf die Helligkeitskorrelation zwischen dem Boden und den Wänden sind beim Lichtsystem 3 genau umgekehrt wie beim Tageslichtkonzept 1. Das Lichtsystem 3 vermittelt dem Museumsbesucher meistens den Eindruck, dass die Wände heller als der Boden sind, obwohl dieser einen viel größeren Reflexionsgrad als jene besitzt. Abb. 54 zeigt, dass auch die Böden B-1 und B-2 beim Tageslichtkonzept 3 trotz ihrer hohen Reflexionsgrade nur gegenüber den geringer reflektierenden Wänden wie W-3, W-4 und W-5 heller wahrgenommen werden können. Diese typische Helligkeitskorrelation beim Tageslichtkonzept 3 kann man durch einen Vergleich der Abb. 56, 57 und 58 visuell ebenfalls erfassen. Abb. 58 ist eine Fotoaufnahme des durch das Lichtsystem 3 belichteten Versuchsaumes, der mit W-4 (Reflexionsgrad 38 %) und mit der identischen Bodenprobe B-9 (Reflexionsgrad 45 %) wie die Räume der Abb. 56 und 57 ausgestattet ist. Die subjektiv wahrgenommene Leuchtdichte der Wände ist in Abb. 58 deutlich höher als die vom Boden, obwohl der Boden dort 7 % mehr Reflexionsgrad als die Wände aufweist. Die Helligkeitskorrelationen zwischen dem Boden und den Wänden in Abb. 56 und 57, bei den Lichtsystemen 1 und 2, sind dagegen fast umgekehrt. Wie oben schon erklärt, erscheinen die Wände trotz der höheren Reflexionsgrade nur gleich oder dunkler als der Boden. Die oben erklärte visuelle Helligkeitsdominanz der Wand beim Tageslichtkonzept 3 erklärt durch seine stärkere Lichtverteilung für die Wandzone als für die Raummitte.

8.1.3 Auswirkungen des Tageslichtkonzeptes auf den visuellen Raum

Das Tageslichtkonzept kann, wie in den vorigen Abschnitten angesprochen, zunächst die Lichtverteilung in den Versuchsräumen und damit die Korrelation des Helligkeitseindrucks zwischen den Versuchsräumelementen trotz deren konstan-

ten Haltung beeinflussen. Daraus ergibt sich demnach einerseits die visuelle Wahrnehmungskonstellation der Sehobjekte und andererseits die Charakteristik bzw. das Erscheinungsbild des Versuchsraumes.

8.1.3.1 Visueller Wahrnehmungszustand und Raumcharakteristik beim Tageslichtkonzept 1

Die Raumcharakteristik und der optische Wahrnehmungszustand der Versuchsräume, die mit dem Lichtsystem 1 tagesbelichtet werden, kann im Allgemeinen als

- störend bzw. blendend beim Betrachten des ganzen Raumes
- störungsfrei bei der Beobachtung innerhalb der Wandbereiche

bezeichnet werden. Diese Raumcharakteristika werden in den nachfolgenden Punkten im einzelnen erklärt.

Als erster Punkt kann die Herabsetzung der Sehleistung beim Betrachten der Wandzone und der dort aufgehängten Bilder durch die Helldominanzbildung der Raumdecke und des Bodens genannt werden. Abb. 59 ist eine typische Aufnahme dieses unerfreulichen Erscheinungsbildes. Der dort abgebildete Versuchsraum wird aus den Wänden W-3 (Reflexionsgrad 55 %) und dem Boden B-9 (Reflexionsgrad 45 %) aufgebaut und durch das Lichtsystem 1 erhellt. Gemäß dieser Abbildung wird die Raumdecke so hell wahrgenommen, dass die visuelle Wahrnehmung und die Aufmerksamkeit auf die Wandzone stark reduziert werden. Daneben ist der Boden aufgrund seiner Reflexion ebenfalls helldominierend über die Wände. Das führt ebenfalls zur Verminderung der visuellen Erkennbarkeit der Wandzone und der Bilder. Diese Sehstörung kommt in diesem Raum vor, obwohl der Boden einen etwa 10 % niedrigeren Reflexionsgrad als die Wände besitzt. Diese Sehschwierigkeit tritt dann nicht mehr auf, wenn der Reflexionsgrad des Bodens, wie bei B-5 und B-10, entweder sehr niedrig, oder viel geringer als der von der Wandprobe ist. Bei der bereits erwähnten Abb. 55 lässt sich das erkennen. Ein unverkennbares Beispiel dafür liefert die Fotoaufnahme in Abb. 60. Die Erkennungsschwierigkeit der Wandzone und der Bilder bleibt dort trotz des Verschwindens der Helligkeitsdominanz des Bodens aufgrund der helleren Raumdecke noch bestehen.

Die physiologische Erklärung der oben diskutierten visuellen Beeinträchtigung liegt in der Sehfunktion des menschlichen Auges. Befinden sich die unterschiedlichen Helligkeitsstärken innerhalb des Blickfeldes im Raum, adaptiert unser Auge normalerweise auf die mittlere Leuchtdichte des Raumes. Dabei wird die Aufmerksamkeit der wahrnehmenden Person in diesem Fall automatisch auf die Raumdecke und den Boden, die stärker als die mittlere Leuchtdichte beleuchtet sind, gerichtet. Dagegen wird die Deutlichkeit bzw. Auffälligkeit der Ausstellungswände und der dort aufgehängten Bilder aufgrund ihrer niedrigeren Leuchtdichten als die mittlere Raumleuchtdichte herabgesetzt. Der Grund der obengenannten Beeinträchtigung für die Wand- und Bildbetrachtung liegt jedoch nicht in einem Mangel der Lichtmenge. Abb. 41 und 42 zufolge besitzen die Ausstellungsbereiche beim ersten Lichtkonzept einen ausreichenden Tageslichtquotienten, den in Kapitel 1 zitierten DIN 5031 Teil 2 zum Sehen vorschreibt. Außerdem sind diese Wandbereiche stärker beleuchtet als die beim zweiten oder dritten Lichtkonzept. Trotzdem werden diese Wandbereiche aufgrund der unharmonischen Lichtverteilung und der darauf reagierenden menschlichen Sehfunktionsweise subjektiv schlechter und dunkler wahrgenommen. Dadurch lässt sich feststellen, dass es sich bei der visuellen Wahrnehmung nicht allein um den physikalischen bzw. mathematischen Wert handelt.

Zweitens tritt im Raum mit dem ersten Lichtkonzept die Sehschwierigkeit auf, sein volles Volumen und seine gesamte Struktur nicht optimal erkennen zu können. Dafür bietet bereits die erwähnte Abb. 59 wiederum ein typisches Beispiel. Dieses Sehproblem ist ebenfalls im unharmonischen Lichtverhältnis innerhalb des Raumes begründet. Da die Wandzone viel dunkler als die anderen Raumelemente ist, erscheint die Wandzone dem Besucher optisch gedrückt. Andererseits können die Wandbereiche beim ersten Lichtkonzept kein Zenitlicht erhalten, welches das qualitativ beste Tageslicht ist. Diese beiden Gründe führen dazu, dass der so beleuchtete Raum meistens glanzlos und karg erscheint. Dabei spielt ein psychologischer Faktor zusätzlich mit. Wie im Kapitel 6 diskutiert wurde, ist das menschliche Auge eine aktive Wahrnehmungsmaschine. Infolgedessen orientiert und richtet es sich generell nach dem Interesse des Besuchers im Museum. Aus diesem Grund sucht der Besucher während des Museumsbesuchs nach den Wänden, an denen sich die Bilder befinden, bewusst und gezielt. Da diese Betrachtungszielzone in den durch das Lichtsystem 1 belichteten Museumsräumen schlecht wahrnehmbar ist,

bewertet man den Raum als düster. Obengenannte Sehbeeinträchtigungen des Lichtkonzepts 1 können durch einen Vergleich zwischen den Abb. 57 und 59 optisch erfasst werden. Die Wände und die Böden der beiden abgebildeten Räume sind identisch. Nur aufgrund des unterschiedlichen Tageslichtkonzepts ist die visuelle Erkennbarkeit der Wandbereiche und der Bilder in Abb. 59 schlechter als in Abb. 57. Außerdem macht der Versuchsraum in Abb. 59 keinen brillanten Eindruck, während der Raum der Abb. 57 viel lebendiger erscheint. Ein derartig nachteiliges Raumerscheinungsbild kann, abgesehen von der lichttechnischen Maßnahme, allein durch die Gestaltung mit relativ helleren Wänden und mit dunklen matten Böden bis zu einem gewissen Maße verbessert werden. Das zeigt Abb. 61.

Das dritte Merkmal des Raummilieus beim Lichtkonzept 1 sind die Blendungen. Bei ihnen handelt es sich um die Direktblendung durch die hellere Decke und um die Reflexblendung durch den hoch reflektierenden Boden. Nach Abb. 46 sind die Blendungen extrem stark, wenn ein so beleuchteter Raum aus hoch reflektierenden Böden und Wänden besteht. Abb. 61 stellt dar, dass diese Blendungsgefahren durch die Raumdecke und den helleren Boden bei den dunkleren Wänden größer sind. Wie weit die Reflexblendungsgefahr des Bodens durch das Lichtkonzept 1 sein kann, stellt Abb. 62 dar. Im Raum dieser Abbildung tritt die Blendung durch den Boden trotz seines mittleren Reflexionsgrads von ca. 55 % noch auf, obwohl die Wände relativ dunkler als der Boden werden.

Der Blickwinkel des Beobachters ist für die oben erklärte direkte Blendung neben der Beleuchtungsstärke der Leuchtquelle entscheidend. Nach DIN 5034, Teil 1 /43/ handelt es sich dabei um einen flacheren Blickwinkel als 45 Grad des Betrachters, wie Abb. 64 und 65 schematisch erläutern. Gemäß Abb. 64 kommt die Direkt- und Reflexblendungsgefahr in einem durch Lichtkonzept 1 beleuchteten Raum insbesondere vom Betrachtungspunkt der Fotoaufnahme 1 zustande. Nach Abb. 64 befindet sich dort der größte Teil des Blickfeldes des Betrachters innerhalb des oben analysierten kritischen Blendungswinkels. Dadurch werden die Augen des Betrachters direkt mit der Blendungsquelle, d.h. der Raumdecke und dem Boden, konfrontiert. Diese Direktblendung führt durch die Schleierwirkung im Auge zu einer extremen Herabsetzung des Sehvermögens des Besuchers durch die Seh-

schärfeverminderung. Die Reflexblendung führt ebenfalls bei der wahrnehmenden Person zur Blendung und Kontrastminderung.

Das vierte Kriterium für den Wahrnehmungszustand der Versuchsräume mit dem ersten Lichtkonzept betrifft den Adaptationsvorgang des Auges. Wie bereits erwähnt, enthalten die Bilder an den Wänden im so belichteten Ausstellungsraum eine geringere Leuchtdichte als dessen mittlere Adaptationsleuchtdichte. Das Blickfeld des Museumsbesuchers wechselt zur optischen Erkundung der Bilder häufig von der helleren Raummitte zu dunkleren Wandbereichen. Die Dunkeladaptationsvorgänge folgt dabei zwangsläufig der Umstimmung dieses Leuchtdichteunterschieds. Wie im Kapitel 1 beschrieben, kann der Endstand eines Dunkeladaptationsvorganges nach 30 Minuten oder längerer Zeit erreicht werden. Aus diesem Grund verursacht die Dunkeladaptation beim Besucher im Museum nachfolgende negative Wirkungen:

- **die Verminderung der Geschwindigkeit der Objekterkennung**
- **die vorzeitige Ermüdung des Auges bei längerem Aufenthalt im Raum**
- **die Beeinträchtigung des Sehkomforts**
- **dadurch bedingte psychologische Unannehmlichkeiten.**

Infolgedessen muss man in den durch das erste Tageslichtkonzept erhellten Ausstellungsräumen manchmal verzichten, die Exponate an den dunkel erscheinenden Wänden in ihren vollen Farbnuancen zu genießen.

Die oben untersuchten Blendungsprobleme bzw. Sehbeeinträchtigungen werden nicht mehr existieren, wenn das Blickfeld des Auges des Museumsbesuchers nur auf die Wandbereiche beschränkt bleibt. Das beruht darauf, dass

- **nach Abb. 41 und 42 die Lichtverteilung an den Wandbereichen im Versuchsräum des Lichtkonzepts sehr regelmäßig ist und deswegen kein Adaptationsvorgang nötig ist.**
- **die Wandbereiche vom reflektierten und diffusen Licht beleuchtet sind.**
- **die dominierende bzw. blendende Raumdecke und der Boden von diesem Beobachtungspunkt 2 aus nicht mehr gesehen werden.**

Die drittgenannte Konstellation erklärt Abb. 65 schematisch. Nach ihr befindet sich das Blickfeld des Betrachters bei dieser visuellen Erkundungssituation beim Lichtkonzept 1 in keinem kritischen Blendungswinkelbereich. Aus den oben erklärten Gründen ist eine optimale Bilderbetrachtung nur aus dem Betrachtungspunkt 2 aus in so belichteten Räumen gewährleistet, worauf die Abb. 63 hinweist. Dadurch wird die Bevorzugung des Lichteinführungssystems 1 in den Gemäldegalerien verständlich, wo ein ausgewogenes bzw. regelmäßiges Lichtverhältnis besonders in den Ausstellungswandbereichen erwünscht ist. Der oben erklärte problemlose Wahrnehmungszustand kann aber dem Betrachter im Museum nur erlaubt sein, solange sein Blick entweder weiter auf den Wandbereich gerichtet ist oder zu den gleich stark beleuchteten Orten wechselt. Ein Positions- oder Blickwechsel zu den unterschiedlich erhellten Orten verursacht einen Adaptationsvorgang aufgrund des plötzlich auftretenden Helligkeitsunterschieds. Dabei ist vor allem die vorher erwähnte länger dauernde Dunkeladaptation viel kritischer als die nur ein paar Sekunden lang verlaufende Helladaptation. Aus der Helladaptation erfolgt neben der physiologischen Blendung eine psychologische Blendung für den Besucher im Museum, die jedoch nicht so stark ist wie bei der Dunkeladaptation. Jene führt zu einer Herabsetzung des Sehvermögens, wie Unterschiedsempfindlichkeit und Formerkennbarkeit. Helladaptation ist eine Blendung, die allein unter dem Gesichtspunkt der Störempfindung bewertet wird. Sie ermüdet den Besucher bei längerem Aufenthalt vorzeitig und führt zu einer Herabsetzung der Sehleistung, der Aktivierung und des Komforts. /47/ Da der Mensch ein exploratorisches Wesen ist, wandert er ständig aktiv und bewusst zur visuellen Erkundung der Ausstellungsstücke in den Räumen des Museums. Aus diesem Grund ist die Konfrontation mit den obengenannten visuellen Erschwernissen, in durch das Lichtkonzept 1 belichteten Räumen in der Regel unvermeidbar.

8.1.3.2 Visueller Wahrnehmungszustand und Raumcharakteristik beim Tageslichtkonzept 2

Aus dem Experiment dieser Arbeit ergibt sich, dass die Verwendung des Tageslichtkonzepts 2 bezüglich der visuellen Wahrnehmung generell positivere Auswirkungen hat als Lichtkonzept 1. Insbesondere die im vorigen Absatz untersuchten Sehbeeinträchtigungen des Tageslichtkonzepts 1 können vom Tageslichtkonzept 2 entweder verbessert oder beseitigt werden. Darüber und über die anderen spe-

ziellen Umgebungsraummilieus des Tageslichtskonzepts 2 wird in diesem Abschnitt diskutiert.

Erstens kann das zweite Tageslichtkonzept die Wahrnehmungsprobleme durch die Helldominanz bzw. die Blendungen der Raumdecke und des Bodens im Vergleich zum Tageslichtskonzept 1 entweder eindeutig verringern oder aufheben. Für diese Verbesserungen kann man Abb. 66 als ein gutes Exempel heranziehen. Dieser Versuchsraum besitzt identische Wand- und Bodenproben wie der Versuchsraum der Abb. 46, nämlich W-1 und B-1. Die beiden Proben weisen einen sehr hohen Reflexionsgrad auf, nämlich einen Reflexionsgrad von jeweils 88 %. Wie im vorherigen Teil schon erörtert, sind die extremen Direkt- und Reflexblendungen in Abb. 46 aufgrund des Tageslichtkonzeptes 1 vorhanden. Dagegen stellt Abb. 66 dar, dass diese beiden Blendungen bzw. Helligkeitssehstörungen durch den Einsatz des Tageslichtkonzepts 2 in beachtlichem Maße verringert sind. Dies beruht auf der Abschirmung und Ablenkung der Lichtstrahlung durch die Aluminiumraster und die daraus resultierende gleichmäßige Lichtverteilung. Aus den gleichen Gründen wird dort die Reflexionsblendungsgefahr der Bodenoberfläche stärker herabgesetzt als beim Tageslichtkonzept 1.

Ein weiterer Vergleich zwischen den Abb. 67 und 68 bestätigt die oben festgestellten Korrekturen ebenfalls. Die beiden Versuchsräume unterscheiden sich nur nach dem Tageslichtsystem 1 und 2. Dort gibt es aber jeweils einen großen Reflexionsgradunterschied von 53 % zwischen den Wänden und dem Boden. Die hellere Raumdecke und der höher reflektierende Boden erscheinen wegen des niedrigen Wandreflexionsgrads von 15 % in Abb. 67 um so mehr blendend. Dieses Blendungsproblem wird laut Abb. 68 durch die Verwendung des zweiten Tageslichtskonzepts ansehnlich verbessert. Eine Direktblendung durch die Raumdecke kann in einem durch das Lichtkonzept 2 belichteten Raum nur zustande kommen, wenn der Blick des Betrachters direkt mit der von den Aluminiumrastern abgelenkten Tageslichtstrahlung konfrontiert wird. Diese mögliche Blendungsgefahr kann durch die sorgfältige Planung der Lenkungsrichtung der Aluminiumraster völlig ausgeschlossen werden.

Zweitens verstärkt das Tageslichtkonzept 2 unsere visuelle Aufmerksamkeit auf die Ausstellungswände und die sich dort befindenden Exponate im Vergleich zum

ersten Lichtkonzept deutlich. Das basiert insbesondere auf dem gleichmäßigen Lichtverhältnis in so konzipierten Räumen. Aus diesem Grund kann das menschliche Auge die Ausstellungswände und die sich dort befindenden Bilder ohne jegliche Sehkorrektur bzw. Adaptation gleich wahrnehmen. Aus dem gleichen Grund kann man dort die Details der Bilder deutlicher und in der genaueren Farbnuance im Gegensatz zum Ausstellungsraum mit dem Tageslichtkonzept 1 anschauen. Diese Vorteile sind beim Vergleich der bereits erwähnten Abb. 46, 66, 67 und 68 schnell sichtbar.

Drittens lassen sich mit dem zweiten Tageslichtkonzept wiederum die nachfolgenden positiven Auswirkungen bezüglich der Raumästhetik im Vergleich zum ersten Lichtkonzept erzielen:

- Das leichtere und problemlose optische Erfassen der ganzen Raumstruktur und -umfangs und der Begrenzungselemente
- Die dadurch entstandene bessere Raumorientierung
- Der brillantere, lebendigere und angenehmere Raumeindruck

Die eben erwähnte Abb. 68 spricht deutlich für die oben erklärten Kriterien. Der Raum und die Raumelemente in Abb. 68 werden visuell schöner und genauer identifiziert als in Abb. 67. Diese obengenannten Merkmale sind neben der ausgewogenen Lichtverteilung auf die Ablenkung des in Qualität sowie in Quantität besten Zenitlichtes in die Wandzone durch die Aluminiumraster zurückzuführen.

Der vierte Vorzug des Tageslichtkonzepts 2 im Unterschied zum Tageslichtkonzept 1 kann als kein oder kürzerer Zeitaufwand durch den Adaptationsvorgang bezeichnet werden. Das auf die mittlere Leuchtdichte adaptierte Auge braucht dank des bereits erklärten regelmäßigen Lichtverlaufs in Räumen, die mit dem zweiten Tageslichtkonzept konzipiert werden, keine Anpassungsreaktion bzw. keine Korrektur an die unterschiedlichen Helligkeiten. Falls der Boden einen viel stärkeren Reflexionsgrad als die Wände wie in Abb. 68 besitzt, wird doch eine gewisse Adaptationszeit beim Blickwechsel von ihm zu den dunkleren Wandbereichen in Anspruch genommen. Dabei ist die Adaptationszeit jedoch viel kürzer als im mit dem ersten Lichtkonzept eingerichteten Versuchsraum der Abb. 67. Aus den obengenannten Gründen erhöht das zweite Tageslichtkonzept generell die

Geschwindigkeit und die Konzentration bei der Objekterkennung im Vergleich zum ersten Tageslichtkonzept. Dadurch vermindert sich für den Museumsbesucher die psychologische Belastung durch die Blendung bzw. Ermüdung, woraus sich ein besserer Sehkomfort ergibt. Das beruht darauf, dass unser Gehirn aufgrund der leichter gewordenen Sehaufgabe weniger gefordert ist und daher seine freie Rechenkapazität langsamer oder fast nicht erschöpft werden kann.

Die zuletzt festgestellte Bemerkung des Tageslichtkonzeptes 2 hat allerdings eine nachteilige Auswirkung. Es geht hier um die unregelmäßige Lichtverteilung in der horizontalen Richtung innerhalb einer Wand. Nach Abb. 69 sind die Randbereiche der Wand schwächer als ihre mittlere Zone beleuchtet. Deswegen enthalten die beiden Bilder an den Randbereichen der Wand im Vergleich zum mittleren Bild die niedrigeren Leuchtdichten. Daraus folgt die Sehkorrekturarbeit beim Blickwechsel zwischen den unterschiedlich erhellten Bildern und Orten an dieser Wand. Dieses Problem kann durch die Einstellung der Lichtlenkungsrichtung der Aluminiumraster zur ausgewogenen Lichtverteilung entstehen.

8.1.3.3 Visueller Wahrnehmungszustand und Raumcharakteristik beim Tageslichtkonzept 3

Im Vergleich zu den Tageslichtkonzepten 1 und 2 ergeben sich durch das Lichtsystem 3 erwartungsgemäß ganz andere Raummilieus, wie Abb. 70 und 71 exemplarisch darstellen. Die Auswirkungen des Tageslichtkonzeptes 3 bezüglich der Sehleistungen und der Raumästhetik werden, wie folgt, diskutiert.

Erstens ist die Geschwindigkeit zur visuellen Erkennung der an den Wänden ausgestellten Bilder beim dritten Tageslichtkonzept am schnellsten unter den in dieser Arbeit erprobten drei Tageslichtkonzepten. Das Tageslichtkonzept 3 beleuchtet nach Abb. 70 und Abb. 41 die Wandbereiche optisch und physikalisch viel heller als die mittleren Zonen. Deswegen wird unsere visuelle Aufmerksamkeit automatisch zuerst auf die heller erscheinenden Wände und die dort ausgestellten Bilder gerichtet. Damit können diese Gemälde von unserem Auge ohne jedwede Bemühung zur Sehkorrektur und deswegen mit größerer Konzentration und in höherer Geschwindigkeit erfasst werden als bei den anderen zwei Lichtkonzepten. Dieser Wahrnehmungszustand wird durch einen Vergleich zwischen vorher darge-

legten Abb. 70 und 71 klar. Fast alle Raumelemente und Objekte können im Versuchsraum, der mit dem zweiten Lichtkonzept konzipiert wird, gemäß Abb. 71 gleichzeitig erkannt werden. Abgesehen von den Lichtbändern werden dagegen die Wände und die Bilder in Abb. 70 des Lichtkonzepts 3 schneller als die Raumdecke und der Boden optisch erfasst.

Zweitens werden die Sehstörungen durch die helle bzw. blendende Raumdecke beim Tageslichtkonzept 3 ohne eine sonderliche lichttechnische Maßnahme entweder viel geringer gehalten oder völlig ausgeschlossen als bei den anderen beiden Tageslichtkonzepten. Der Grund dafür liegt vor allem in der undurchsichtigen Raumdecke und der Position bzw. Größe der Lichtöffnungen. Wie alle Abbildungen für das Lichtkonzept 3 dieser Arbeit zeigen, kann die undurchsichtige Raumdecke die mittleren Raumbereiche vor dem Oberlicht abschirmen und von seinen Blendungen befreien. Als die einzige helldominierende möglicherweise blendende Lichtquelle bleiben dabei die Lichtöffnungsbänder bestehen. Tabellarischer Abb. 54 zufolge erscheinen die Lichtbänder tatsächlich am hellsten in fast allen mit dem Tageslichtkonzept 3 untersuchten Räumen. Aber die Störungen bei der Bildbetrachtung, die dadurch entstehen, sind jedoch nicht in besonderem Maße beachtlich. Wie in Kapitel 3 festgestellt, handelt es sich bei der Stärke der Helligkeitsdominanz und Blendung neben der Leuchtdichte der Lichtquelle, dem Blickwinkel des Beobachters zur Lichtquelle und dem Leuchtdichtekontrast zur Sehaufgabe insbesondere um

- die Größe der helldominierenden bzw. blendenden Quelle
- den Abstand zwischen dem Betrachter und der Blendungsquelle.

Nach Abb. 71 sind die Lichtbänder an der Raumdecke sehr schmal geschnitten. Daher wird deren vom Betrachter erfassten Größe innerhalb dessen Blickfelds sehr klein. Außerdem sind die Lichtbänder von der Besucherzone am Rand der Raumdecke innerhalb des Raumes am weitesten entfernt lokalisiert. Darüber hinaus werden diese Lichtbänder aufgrund der Perspektive aus den meisten Positionen innerhalb des Raumes mehr oder weniger verdeckt bzw. kleiner gesehen. Aus den oben erklärten Gründen ist die oben genannte Blendungsgefahr durch die Lichtbänder nicht sehr groß.

Drittens kann die Reflexblendung des Bodens durch das Tageslichtkonzept 3 im Gegensatz zu den Tageslichtkonzepten 1 und 2 meistens vermieden werden. Das beruht vor allem darauf, dass das Tageslicht durch die undurchsichtige mittlere Raumdecke über den Bodenbereich fallig abgeschirmt wird. Daher kommt die Reflexblendung des Bodens beim Lichtkonzept 3 selten zustande. Das zeigt Abb. 52 am deutlichsten. Der dort abgebildete Raum enthält eine sehr hoch reflektierende Bodenprobe B-1 mit einem Reflexionsgrad von 88 %. Deswegen ist die Reflexblendung des Bodens in diesem Raum nicht auszuschließen. Trotzdem ist diese Blendung jedoch viel geringer als in den Räumen mit den Tageslichtkonzepten 1 und 2. Durch den Vergleich zwischen dieser Abb. 52 (Lichtkonzept 3) und den Abbildungen 67 (Lichtkonzept 1) und 68 (Lichtkonzept 2) kann man zur Kenntnis nehmen, dass eine derartige Sehbeeinträchtigungsgefahr beim Lichtkonzept 3 deutlich geringer ist als bei den anderen zwei Lichtkonzepten.

Außerdem lässt sich beim Lichtsystem 3 die Reflexblendung der hoch reflektierenden oder spiegelnden Wand- und Bildoberfläche deutlich schwächer wahrnehmen. Das erkennt man durch einen Vergleich zwischen den Versuchsräumen mit den folgenden Abbildungen. Das Lichtkonzept 3 nach Abb. 72 zeigt eine viel geringere Blendungsauswirkung als das Lichtkonzept 1 der Abb. 46 und das Lichtkonzept 2 der Abb. 66. Das verdankt es vor allem dem eingestellten steilen Tageslichteinfallswinkel. Er ermöglicht, dass das Auge des Betrachters der Hauptrichtung der Tageslichteinstrahlung, die von den Wand- und Bildoberflächen bzw. Schutzgläsern der Bilder reflektiert wird, ausweichen kann. Dieses steil und gerichtet herein fallende Tageslicht bringt uns noch einen zusätzlichen Vorteil für die Ausstellungen, die Plastizität bzw. Dreidimensionalität der Bildtextur steigern zu lassen. Abb. 73 des Tageslichtkonzepts 3 stellt die oben erklärten Vorteile im Vergleich zu Abb. 69 des Tageslichtkonzepts 2 dar.

Viertens bringt die gerade erwähnte, steil und gerichtet hereinfallende Tageslichtstrahlung jedoch eine negative Wirkung. Der Einfallswinkel von 75 Grad ist so steil, dass die langen Schatten durch die Bilderrahmen bestehen bleiben, wie in Abb. 151 im Vergleich zu Abb. 150 zu sehen ist. Insbesondere ist dabei die Schattengrenze, die direkt auf die Bildoberfläche durch die obere Rahmenkante entsteht, sehr kritisch. Diese zwiespältige Lichtsituation innerhalb einer gleichen Farbfläche erschwert die Bildbetrachtung.

Fünftens ist die Leuchtdichte der Wandbereiche beim dritten Tageslichtkonzept in horizontaler Richtung sehr regelmäßig verteilt. Daher kann man die dort ausgestellten Objekte um so konzentrierter und bequemer genießen. Diese optische Konstellation spricht nochmals Abb. 73 im Gegensatz zu Abb. 69 aus.

Der sechste Punkt, der aus dem Raummilieu des Tageslichtskonzepts 3 resultiert, ist die Helladaptation. Sie entsteht vor allem während der Erkundungsaktivitäten der Exponate an den Wänden. Die Wandzonen des Raumes mit dem Tageslichtkonzept 3 sind stärker als die übrigen Raumbereiche beleuchtet. Daher muss das auf die mittlere Leuchtdichte des Raumes adaptierte Auge des Museumsbesuchers beim Blickwechsel insbesondere von der dunkleren Raummitte zu den heller belichteten Ausstellungswänden helladaptiert werden. Wie bereits mehrmals erklärt, nimmt dieser Helladaptationsvorgang maximal nur eine Zeit von wenigen Sekunden in Anspruch, weshalb die Sehleistung dadurch kaum herabgesetzt wird. Wie beim ersten Punkt festgestellt wurde, ist eine derartige Lichtverteilung für die Bilderkennung eher vorteilhaft.

Im siebten Punkt geht es um das Raumerscheinungsbild beim Lichtsystem 3. Der Raum mit dem dritten Tageslichtkonzept sieht wegen der stärkeren Leuchtdichte der Wände exzentrischer aus als die Versuchsräume mit den Tageslichtkonzepten 1 und 2. Außerdem könnte auf Grund der Massivität des undurchsichtigen Raumdecketeiles unter Umständen dem Betrachter einen niederdrückenden Eindruck vermitteln. Eine zusätzliche durch das Tageslichtkonzept 3 entstehende Raumatmosphäre wird im nächsten Punkt getrennt diskutiert.

Als ein spezielles Merkmal der Versuchsräume des Lichtkonzepts 3 kann die Raumteilung durch das Licht genannt werden. Dabei wird der Raum durch die unterschiedlichen Helligkeitsstärken des Tageslichts in zwei verschiedene Zonen, nämlich in die abgedunkelte Raummitte und die hellere Wandzone, architektonisch bewusst aufgeteilt. Die Wandzone hat aufgrund ihrer Helligkeit öffentlichen Charakter und somit eine ausstellende Funktion. Dagegen wird die erstgenannte Raummittelzone als intimer empfunden und ist daher für den Besucherbereich bestimmt. Die oben erklärte Zonenverteilung erlaubt dem Besucher daneben einen besonderen Vorteil bei der Bildbetrachtung. Der Besucher kann die heller und mit der ganzen Kraft des Tageslichts belichteten Bilder bis ins Detail aus der

dunkleren Besucherzone sehr bequem genießen. Das bestätigen alle in dieser Arbeit gezeigten Abbildungen mit dem Lichtkonzept 3. Insbesondere Abb. 73 stellt die oben genannte Wahrnehmungskonstellation exemplarisch dar. Vergleicht man diese Abb. 73 mit Abb. 63 (Tageslichtkonzept 1) und Abb. 69 (Tageslichtkonzept 2), kann man den oben genannten visuellen Vorteil bei der Bildbetrachtung ohne Schwierigkeiten erkennen. Darüber hinaus bietet ein derartiger Raum aus dem gleichen Grund den Museumsbesuchern eine gute Orientierung.

Darüber hinaus läuft der Ermüdungsprozess des Besuchers aus den oben festgestellten vorteilhaften Gründen beim Tageslichtkonzept 3 viel langsamer ab als bei den anderen Tageslichtkonzepten. Das gewährleistet den besseren psychologischen Komfort als bei den anderen beiden Tageslichtkonzepten.

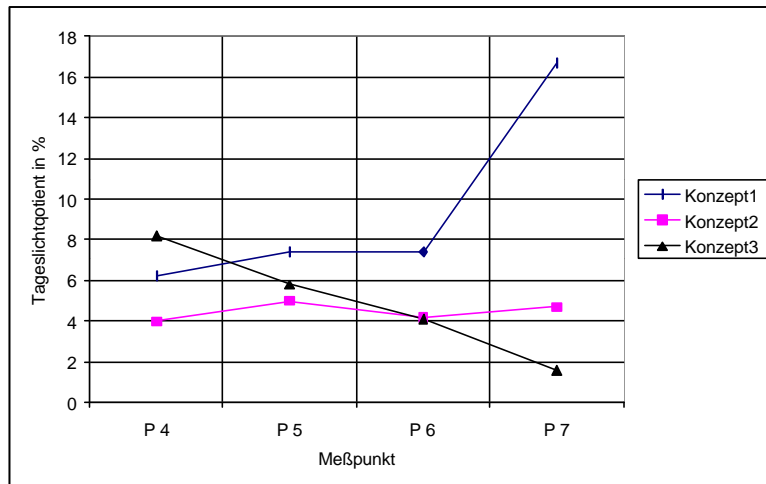


Abb. 41: Horizontaler Tageslichtquotient D_h je nach dem Tageslichtkonzept

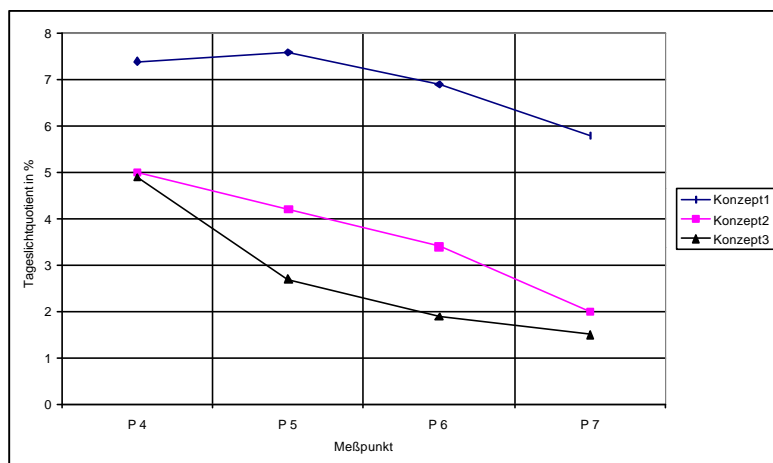


Abb. 42: Vertikaler Tageslichtquotient D_v je nach dem Tageslichtkonzept

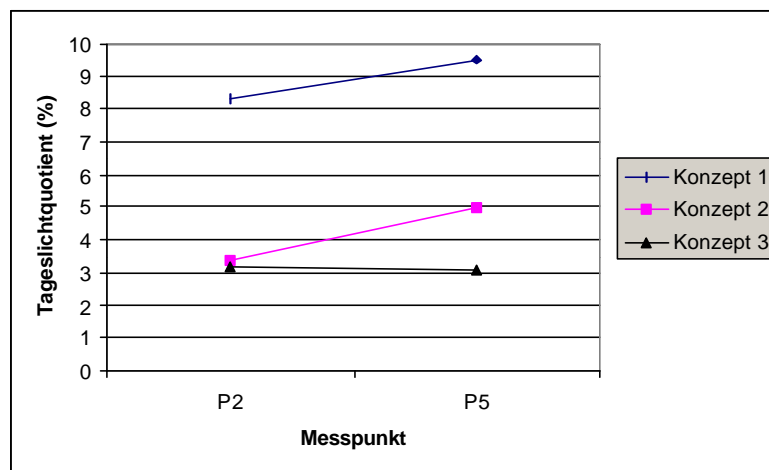


Abb. 43: Horizontale Lichtverteilung an der Wand je nach dem Tageslichtkonzept



Abb. 44: Raummilieu des Tageslichtkonzeptes 1 bei W-14 und B-14



Abb. 45: Raummilieu des Tageslichtkonzeptes 1 bei W-1 und B-13



Abb. 46: Raummilieu des Tageslichtkonzeptes 1 bei W-1 und B-1



Abb. 47: Raummilieu des Tageslichtkonzeptes 1 bei W-3 und B-3



Abb. 48: Raummilieu des Tageslichtkonzeptes 1 bei W-5 und B-5



Abb. 49: Raummilieu des Tageslichtkonzeptes 2 bei W-3 und B-3



Abb. 50: Raummilieu des Tageslichtkonzeptes 2 bei W-11 und B-6



Abb. 51: Raummilieu des Tageslichtkonzeptes 2 bei W-17 und B-5



Abb. 52: Raummilieu des Tageslichtkonzeptes 3 bei W-5 und B-1



Abb. 53: Raummilieu des Tageslichtkonzeptes 3 bei W-13 und B-2



Abb. 56: Raummilieu des Tageslichtkonzeptes 1 bei W-1 und B-9



Abb. 57: Raummilieu des Tageslichtkonzeptes 2 bei W-3 und B-9



Abb. 58: Raummilieu des Tageslichtkonzeptes 3 bei W-4 und B-9



Abb. 59: Raummilieu des Tageslichtkonzeptes 1 bei W-3 und B-9



Abb. 60: Raummilieu des Tageslichtkonzeptes 1 bei W-2 und B-3



Abb. 61: Raummilieu des Tageslichtkonzeptes 1 bei W-5 und B-1



Abb. 62: Raummilieu des Tageslichtkonzeptes 1 bei W-4 und B-3

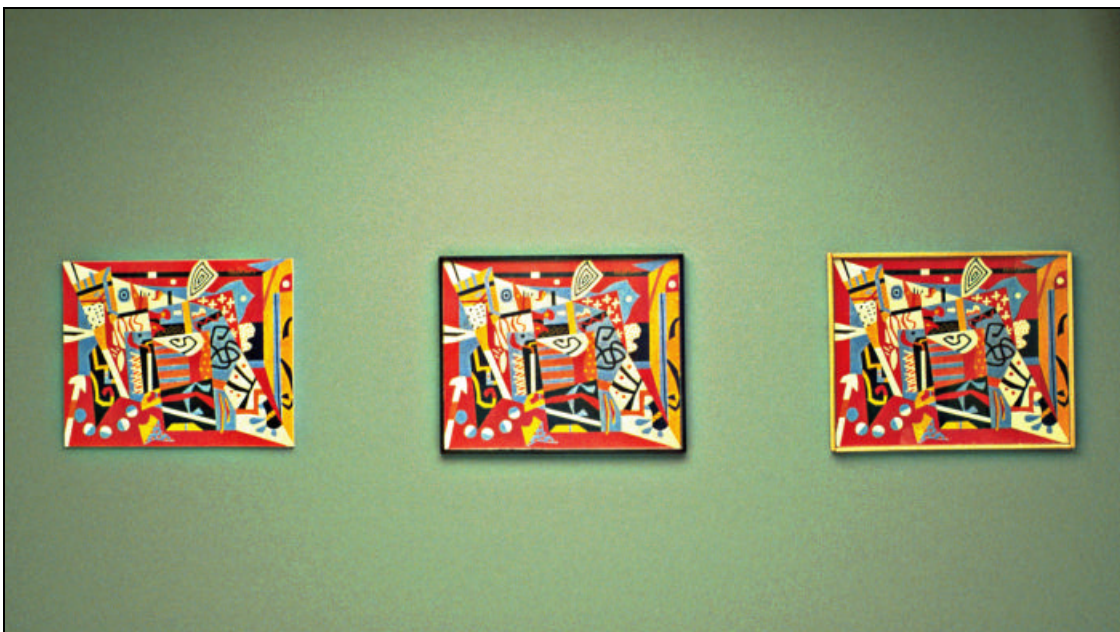


Abb. 63: Betrachtungssituation einer Wand beim Lichtsystem 1, W-4 und B-3

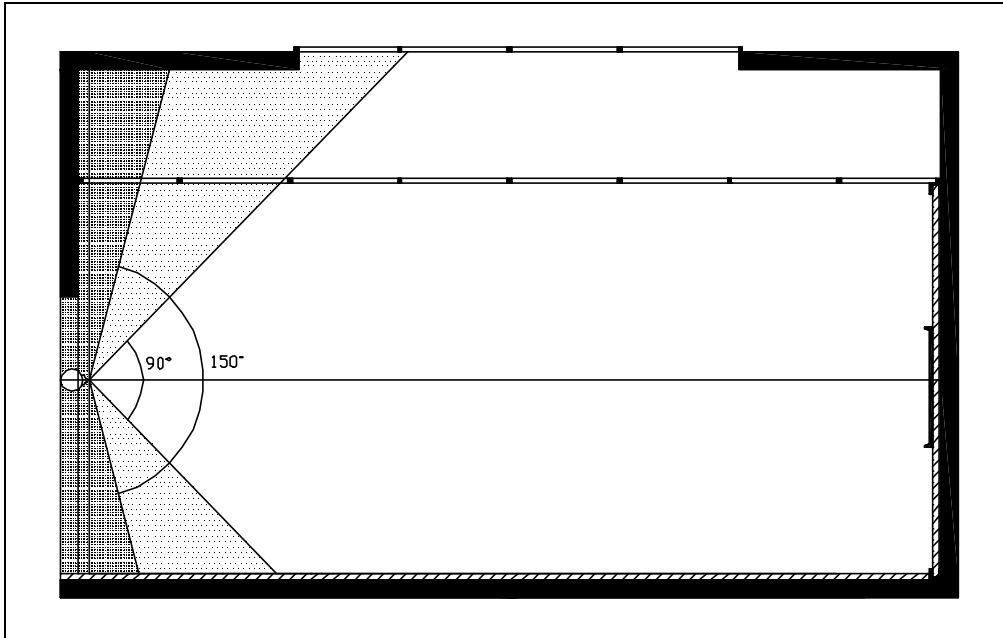


Abb. 64: Darstellung der Blendungszone aus dem Fotoaufnahmepunkt 1 nach den Kriterien von DIN 5034

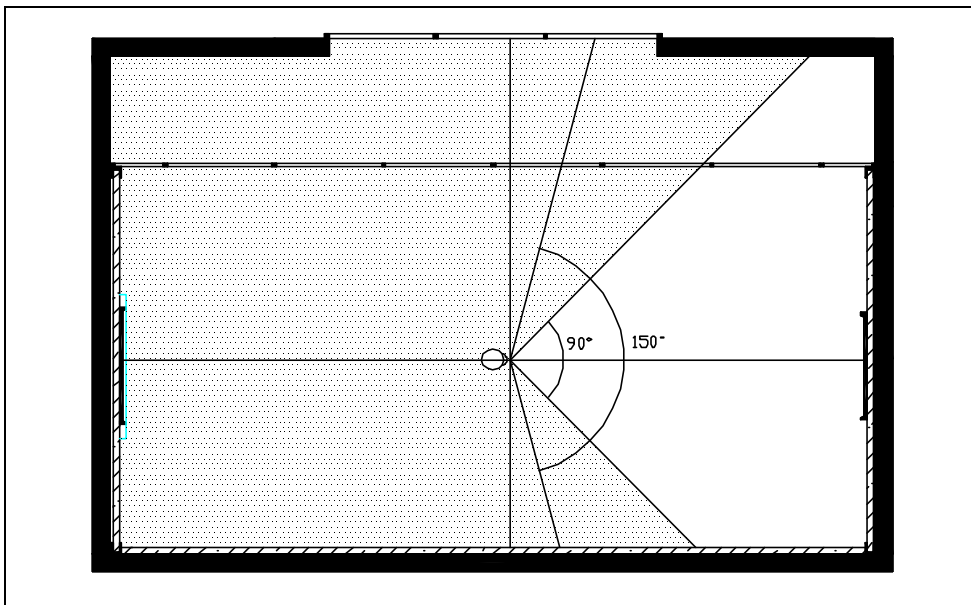


Abb. 65: Darstellung der Blendungszone aus dem Fotoaufnahmepunkt 2 nach den Kriterien von DIN 5034



Abb. 66: Raummilieu des Tageslichtkonzeptes 2 bei W-1 und B-1



Abb. 67: Raummilieu des Tageslichtkonzeptes 1 bei W-5 und B-1



Abb. 68: Raummilieu des Tageslichtkonzeptes 2 bei W-5 und B-1

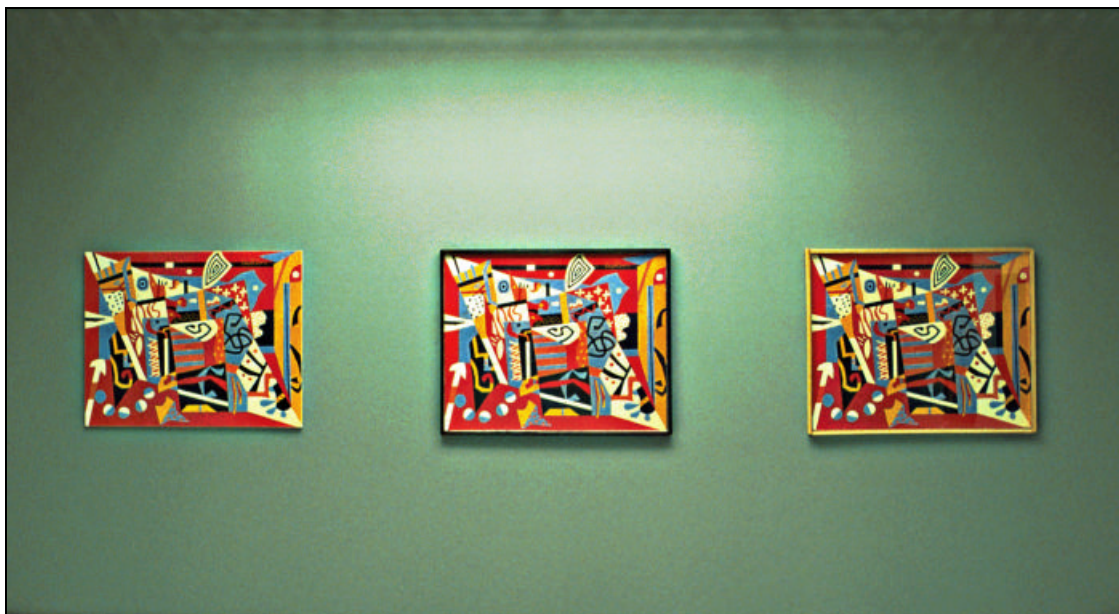


Abb. 69: Betrachtungssituation einer Wand bei dem Tageslichtkonzept 2, W-4 und B-3



Abb. 70: Raummilieu des Tageslichtkonzeptes 3 bei W-17 und B-5



Abb. 71: Raummilieu des Tageslichtkonzeptes 2 bei W-17 und B-5



Abb. 72: Raummilieu des Tageslichtkonzeptes 3 bei W-1 und B-1

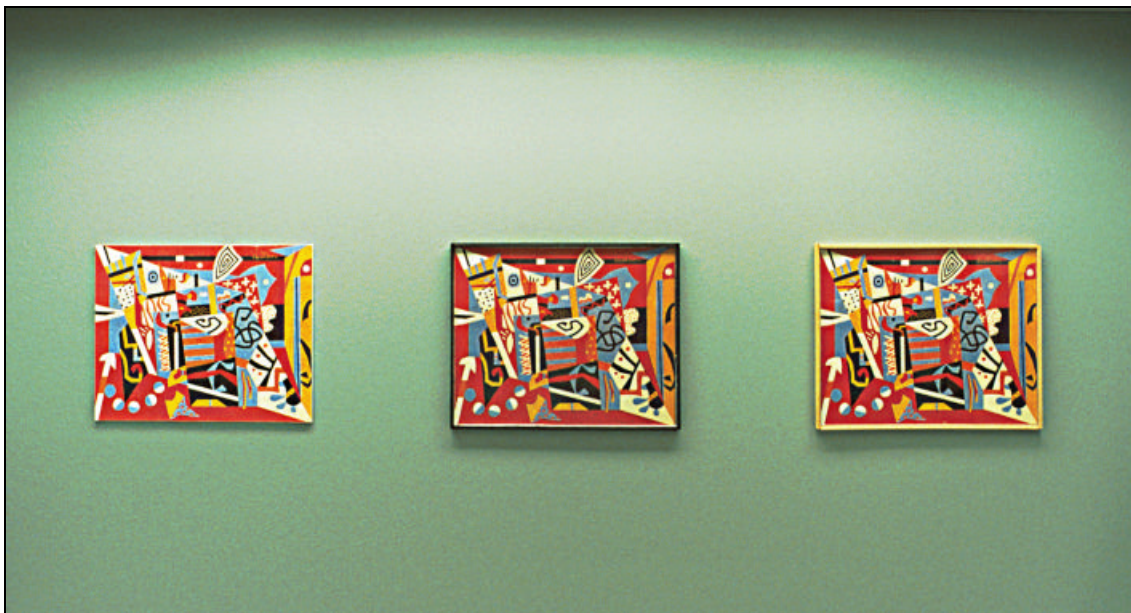


Abb. 73: Betrachtungssituation einer Wand bei Tageslichtkonzept 3, W-4 und B-3

8.2 Charakterisierung des visuellen Raumes durch Oberflächenbehandlung und Materialart der Wand

Die Wände werden in einem Raum von unserem Auge bewusst oder unbewusst ständig erfasst, da sie sich dort meistens innerhalb des Blickfeldes des Betrachters bei der normalen senkrechten Kopf- und Körperhaltung befinden. Deswegen ist die Wandgestaltung für die optische Wahrnehmung des Umraumes ausschlaggebend. Vor allem in den Bildergalerien ist die Wandoberflächengestaltung bei der Bildbetrachtung um so bedeutender. Dort werden die Wände üblicherweise als die Hängeplätze der Gemälde zur Ausstellung benutzt. Daher üben die Ausstellungswände als das direkte Umfeld des Bildes unmittelbaren Einfluss auf die Bildwahrnehmung durch den Simultankontrast aus. Aus den oben erklärten Gründen folgt in den nachkommenden Abschnitten die Untersuchung über die Auswirkungen der Wandgestaltung auf die visuelle Wahrnehmung.

8.2.1 Auswirkungen des Wandreflexionsgrads auf den visuellen Raum

8.2.1.1 Auswirkungen des Wandreflexionsgrads auf den vertikalen Tageslichtquotienten

Die vertikale Leuchtdichte der Wand ist bedeutsam bei der Bildbetrachtung wegen der vertikalen Körper- und Augenhaltung des Betrachters. Abb. 74, 75 und 76 stellen die typischen Abläufe der vertikalen Tageslichtquotienten D_v in den Versuchsräumen je nach den unterschiedlich reflektierenden Betonwänden und den erprobten drei Lichtsystemen dar. Dabei steigen die vertikalen Tageslichtquotienten D_v mit dem zunehmenden Reflexionsgrad der Wand erwartungsgemäß an allen Messpunkten parallel an. Die sich ändernde Größe von D_h ist indessen von Tageslichtkonzept zu Tageslichtkonzept unterschiedlich. Sie ist nach Abb. 75 und 76 bei den Tageslichtkonzepten 2 und 3 fast identisch. Dagegen ist gemäß Abb. 74 diese Änderungsgröße von D_v beim Tageslichtkonzept 1 fast doppelt so groß als bei den Tageslichtkonzepten 2 und 3.

8.2.1.2 Auswirkungen des Wandreflexionsgrads auf den Wahrnehmungszustand und das Raumerscheinungsbild

Die aufgenommenen Fotobilder der Versuchsräume sprechen über die Auswirkungen des Reflexionsgrads der Wandoberfläche aus der Sicht der Sehleistung und des Raumerscheinungsbildes etwas anderes an als die physikalischen bzw. mathematischen Lichtmessungswerte. Die niedriger reflektierenden Wände üben dabei trotz des verringerten Tageslichtquotienten generell positive Wirkungen auf den visuellen Umraum aus. Diese Auswirkungen werden in den nachfolgenden Teilen unter die Lupe genommen. Dabei werden sie in den im Kapitel 6 diskutierten drei unterschiedlichen Erkundungssituationen geteilt untersucht.

Auswirkungen in der mobilen Ebene

Auf der mobilen Ebene werden die Reizinformationen vom Betrachter mit Hilfe der Körper-, Kopf- und Augenbewegung aus dem Umraum entnommen. Dabei kann er die allgemeinen Informationen über einen gesamten Museumsraum nur grob erforschen. Daher werden Abb. 77, 78, 79 und 80, die aus der im vorigen Kapitel dargelegten Aufnahmeposition 1 zum Überblick des ganzen Raumes aufgenommen sind, hier als Beispiele vorgestellt. In diesen Abbildungen sind die Versuchsräume abgebildet, die mit dem Lichtsystem 2 und der Bodenprobe B-10 (Reflexionsgrad 10 %), jedoch mit den unterschiedlich reflektierenden Betonwandproben, nämlich W -1 (Reflexionsgrad 88 %), W -3 (Reflexionsgrad 55 %), W -4 (Reflexionsgrad 38 %) und W -5 (Reflexionsgrad 15 %), konstruiert sind. Aus diesen Bildern werden die nachfolgenden Merkmale für die Einflüsse des Wandreflexionsgrads auf den visuellen Raum ersichtlich.

Erstens zeigen die obengenannten Abbildungen, dass die subjektiv empfundene Raumgröße mit dem zunehmenden Wandreflexionsgrad immer erweitert wird. Im Gegensatz dazu vermittelt die weniger reflektierende Wand ein rein optisch reduziertes bzw. gedämpftes Raumerscheinungsbild. Der Grund liegt darin, dass die höher reflektierenden Wände von unserem Auge entmaterialisierter als die niedriger reflektierenden Wände eingeschätzt werden. Dadurch wird die optische Festigkeit der Wände abgeschwächt, was zur vergrößerten Raumerscheinung führt.

Zweitens ändert sich der Helligkeitseindruck des gleich gebliebenen Bodens und der unveränderten Raumdecke je nach dem Reflexionsgrad der Wand. Je größer der Wandreflexionsgrad wird, desto dunkler erscheinen der Boden und die Raumdecke gemäß den obengenannten Abb. von 77 bis 80. Das basiert auf der Verschiebung der mittleren Leuchtdichte des Raumes, die aus der Verminderung des Reflexionsgrads der Wand resultiert. Diese Leuchtdichteverchiebung des Raumes verstärkt die subjektiv wahrgenommene Helligkeit des Bodens und der Raumdecke dementsprechend.

Drittens verändert sich der Stabilitäts- und Sicherheitseindruck des Raumes durch den Reflexionsgrad der Wand. Die Erhöhung des Wandreflexionsgrads führt den Betrachter trotz der Zunahme der Beleuchtungsstärke innerhalb des Raumes zu keinem besseren Wahrnehmungszustand. Nach Abb. 77, 78 und 79 wird die Erfassbarkeit des Raumes mit dem ansteigenden Wandreflexionsgrad sogar eher schlechter. Dagegen wird sie während der Verringerung des Wandreflexionsgrads immer besser, was bedeutet, dass der Versuchsraum immer beruhigender und stabiler wirkt. Das setzt aber voraus, dass die Wände heller als der Boden erscheinen. Falls der Boden heller als die Wände wird, wird der Raum trotz des abnehmenden Reflexionsgrads der Wände jedoch nicht mehr als stabiler empfunden. Das zeigt Abb. 80. Der Versuchsraum wirkt hier instabiler als die Versuchsräume in Abb. 77, 78 und 79, obwohl die Wände in Abb. 80 einen geringeren Reflexionsgrad besitzen als die in Abb. 77, 78 und 79. Der Grund dafür ist, dass der Boden in diesem Fall durch die Verschiebung der Wandleuchtdichte in bezug auf die Helligkeit über die Wände dominiert.

Viertens können die folgenden Sehleistungen zur Betrachtung der Bilder durch die Verminderung des Wandreflexionsgrades gesteigert werden:

- Erfassungsgeschwindigkeit
- Gewünschte Sicherheit des Erkennens
- Begrenzung der Reflexblendung

Anders als der im vorigen Punkt diskutierte Sicherheitseindruck über den Raum bleiben die obengenannten Sehleistungsverbesserungen auch dann, wenn der

Boden heller als die Wände erscheint. Das wird durch den Vergleich zwischen Abb. 79 und 80 sichtbar. Der Grund dafür kann man in der Veränderung des Hauptblickfeldes sehen. Um ein Bild an der Wand aus dem Beobachtungspunkt 1 ausfindig zu machen, richtet sich die Sehachse des menschlichen Auges auf das Bild und die umgebende Wandfläche. Dabei beherrscht besonders die mittlere Leuchtdichte des Bildes und der benachbarten Wandoberflächen das Blickfeld, aber nicht den ganzen Raum. Das heißt, dass die Leuchtdichte des Bodens, der gegenüber der Wand helldominierend ist, in diesem Fall von unserem Auge wenig beachtet wird. Daher ist die positive Auswirkung bei der Bildbetrachtung durch die Leuchtdichteverchiebung der umgebenden Wandfläche unabhängig von dieser Helligkeitsdominanz des Bodens weiterhin vorhanden. Der oben diskutierte Vorteil ist auf die schon mehrmals erklärte Helligkeitsumstimmung des menschlichen Auges zurückzuführen. Die von unserem Auge adaptierte mittlere Leuchtdichte innerhalb des Versuchsraumes wird immer kleiner während der Abschwächung des Wandreflexionsgrades. Andererseits wird die subjektiv wahrgenommene relative Leuchtdichte des Bildes dementsprechend größer. Das führt zur Erhöhung der Aufmerksamkeit und der visuellen Erkennbarkeit bzw. Reizempfindlichkeit für das Bild.

Alle oben untersuchten Auswirkungen treten bei den anderen Wandmaterialien, den unterschiedlichen Oberflächenbehandlungen und den anderen Tageslichtkonzepten ebenfalls auf. Von den als Muster ausgewählten Abb. 81, 82, 83 und 84 können wir uns überzeugen lassen.

Auswirkungen auf der lokalen Erkundungsebene

In der realen Situation der lokalen Erkundungsebene im Museum ist das Blickfeld des Besuchers normalerweise entweder auf eine ganze Wand gerichtet, oder auf einen ihrer Teilbereiche beschränkt. Dabei bleiben die Raumdecke und der Boden meistens außerhalb dessen Blickfeldes. Diese visuelle Situation kommt insbesondere während des Besuchs der Bildergalerien sehr häufig vor, wenn die Besucher zur Erkundung der Bilder

- sich entlang der Ausstellungswand von Bild zu Bild bewegen oder

- ohne Positionswechsel nur die Blickrichtung von einem Bild zu einem benachbarten Bild wechseln.

Aus den obengenannten Situationen ergibt sich neben der sukzessiven Bilderscheinung die simultane Kontrastwirkung zwischen den Bildern und den umgebenden Ausstellungswänden. Diese Einflüsse stellen Abb. 85, 86, 87, 88 und 89 dar. Bei ihnen variiert nur der Reflexionsgrad der Wandproben, nämlich W -1 (Reflexionsgrad 88 %), W -3 (Reflexionsgrad 55 %), W -4 (Reflexionsgrad 38 %) und W -5 (Reflexionsgrad 15 %). Nach diesen Abb. von 85 bis 89 steigern sich unsere Sehleistungen im Allgemeinen mit dem abnehmenden Wandreflexionsgrad. Vor allem die visuelle Aufmerksamkeit sowie die Sensibilität bzw. Erkennbarkeit für die Bilder werden trotz der dadurch abnehmenden Leuchtdichte erhöht. Insbesondere die Stabilität des visuellen Wahrnehmungszustands bei der Bilderbetrachtung tritt von den obengenannten fünf Abbildungen nur in Abb. 85 und 86 auf. Dabei beträgt das Leuchtdichteverhältnis zwischen dem Bild und der Wandoberfläche fast 1:1. In Abb. 85 besteht zwischen der umgebenden Wand und den Bildern ein Leuchtdichteverhältnis von ca. 1:2,7. Dabei ist die mittlere Adaptationsleuchtdichte so verschoben, dass unser Auge die Informationen viel mehr von den gleich gebliebenen Bildobjekten bezieht als von der Wand. Der visuelle Wahrnehmungszustand ist dadurch stabil im Vergleich zu den mehr reflektierenden Wänden. Das führt zur besseren Gewährleistung der Erfassungsgeschwindigkeit, der Dauer der Seharbeit, der Begrenzung der Blendung, der Farbwiedergabe und der Detailerkennung bei der Bildbetrachtung. Dagegen beginnt ein instabiler Wahrnehmungszustand der Bilderbetrachtung in Abb. 87 bei der Wandreflexion 55 %. Abb. 88 und 89, deren Wände den Reflexionsgrad von jeweils 55 %, 74 % und 88 % besitzen, stellen den sehr instabilen Wahrnehmungszustand dar. Dabei dominiert die Helligkeit der umgebenden Wandflächen über die Bilder stark. Daher richtet sich unsere Aufmerksamkeit dort zuerst nicht auf die Bilder, sondern auf die hellere Wandfläche, was zur Verminderung der Sehleistung bei der Bildbetrachtung führt. Der Verlust der Sehleistung wird Abb. 87, 88 und 89 zufolge mit dem zunehmenden Wandreflexionsgrad immer größer. Der visuelle Wahrnehmungszustand in Abb. 89 ist so instabil, dass man den Blick an einem Punkt des Gemäldes nicht ruhig halten kann.

Aus den oben diskutierten Gründen kann nochmals die Schlussfolgerung abgeleitet werden, dass es sich beim visuellen Wahrnehmungszustand in bezug auf die Sehleistungen nicht allein um die objektive Größe der Lichtmenge handelt; dabei spielt das ausgewogene Lichtverhältnis zwischen dem Infeld (dem Bild) und dem Umfeld (den umgebenden Wandflächen) eine entscheidende Rolle.

Auswirkungen auf der fokkusiven Ebene

Die im vorigen Absatz untersuchten visuellen Auswirkungen des Wandreflexionsgrades, nämlich der Simultankontrast zwischen In- und Umfeld, können auf der fokkusiven Erkundungsebene noch schärfer beobachtet werden. Nach den ausgewählten Abb. 90, 91, 92, 93 und 94 bringen uns wiederum die weniger reflektierenden Wände die besseren Sehleistungen bei der Gemäldebetrachtung in dieser fokkusierten Bilderbetrachtung. Dabei erfolgen insbesondere die Verbesserungen der Dauer der Seharbeit, der Farbwiedergabe, der Detailerkennung und der Konzentration. Das unterstützt nochmals die Aussage, dass für eine Verbesserung des Wahrnehmungszustandes bei der Raumgestaltung nicht allein die absolute Lichtmenge berücksichtigt werden sollte, sondern vor allem auch das harmonische Lichtverhältnis zwischen In- und Umfeld sowie die menschliche Sehfunktionsweise. Ein Vergleich der Korrelationen zwischen den absoluten Beleuchtungsstärken und den Wahrnehmungszuständen des Gemäldes bei den unterschiedlichen Wänden ist bemerkenswert, um diese Behauptung zu betonen. Nach Abb. 74 ergibt sich durch den Wechsel der Wandproben von W-1 zu W-5 ein Rückgang des Tageslichtquotienten um ca. $\frac{2}{3}$. Trotzdem verbessert die Wandprobe W-5 unsere Sehbedingungen bei der Betrachtung der gleichen Bilder im Vergleich zu W-1 enorm, und zwar auch auf den drei Erkundungsebenen, wie die oben gezeigten Abbildungen mit den Wänden W-1 und W-5 demonstrieren.

Die oben erklärten Sehleistungssteigerungen durch die Reduzierung des Reflexionsgrads der umgebenden Wandoberfläche gelten ebenfalls für alle Material- und Behandlungsarten, auch bei allen in dieser Arbeit erprobten Tageslichtkonzepten. Abb. 95, 96, 97 und 98 sind dafür als Nachweise ausgewählt.

8.2.1.3 Auswirkungen des Wandreflexionsgrades auf die Betrachtung der Skulpturen

Den Auswirkungen des Wandreflexionsgrades auf die Betrachtung der Skulpturen widmen wir eine besondere Aufmerksamkeit. In Abb. 99, 100, 101, 102 und 103 werden zwei schwarze Figuren und eine weiße Skulptur jeweils vor den unterschiedlich reflektierenden Wänden W-1, W-2, W-3, W-4 und W-5 ausgestellt. Nach diesen Abbildungen kann man zunächst feststellen, dass die Geschwindigkeit der visuellen Erfassung bei den schwarzen Skulpturen erwartungsgemäß mit dem zunehmenden Reflexionsgrad der Hintergrundwand immer schneller wird. Das ist durch den wachsenden Schwarz-Weiß-Kontrast zwischen der schwarzen Figur und der heller werdenden Hintergrundwand zu begründen. Das Ausmachen der schwarzen Skulpturen geht auch deshalb vor der weniger reflektierenden Wand schneller vonstatten als dies vor der höher reflektierenden Hintergrundwand der Fall wäre. Interessant ist jedoch, dass die visuelle Erkennbarkeit der Details dabei einen umgekehrten Verlauf zeigt. Nach obengenannten Abb. 99, 100, 101, 102 und 103 wird die Detailerkennbarkeit der schwarzen Figuren überraschend mit dem abnehmenden Wandreflexionsgrad immer besser. Die Details der schwarzen Skulpturen können in Abb. 99 trotz des kleinsten Helligkeitskontrasts zwischen ihnen und den Umfeldoberflächen am besten wahrgenommen werden. Dagegen erscheinen die Details der schwarzen Skulpturen in Abb. 103 mit dem höchsten Helligkeitsumfeldkontrast sehr undeutlich. Man kann dabei jedoch ihre Umrisse am deutlichsten erfassen. In Abb. 100 und 101, deren Wandreflexionsgrad jeweils 38 % und 58 % beträgt, kann man schon fast keine Details mehr erkennen. Im Gegensatz dazu sind die Details der weißen Figur bei allen unterschiedlich reflektierenden Wänden nach Abb. von 99 bis 103 optisch wahrnehmbar. Abb. 103 zufolge kann man den Umriss der weißen Menschenfigur vor der weißen Wand aufgrund des sehr geringen Kontrasts zwar nicht sehr gut erkennen, dafür jedoch ihre Details. Diese Wahrnehmbarkeit wird mit der abnehmenden Leuchtdichte der Hintergrundwand immer besser, wie Abb. von 99 bis 103 verdeutlichen.

Die obengenannten visuellen Phänomene sind auf die Adaptation und die simultane Kontrastwirkung des menschlichen Auges zurückzuführen. Die Steigerung der Erkennbarkeit des Skulpturumrisses durch die Reduzierung des Wandreflexi-

onsgrads ist auf die schon mehrmals erwähnte Verschiebung der mittleren Leuchtdichte innerhalb des Blickfeldes und auf die dadurch dementsprechend stärker wahrgenommene Leuchtdichte der Skulpturen zurückzuführen. Die Wahrnehmungsschwierigkeit der Details der schwarzen Skulpturen vor der höher reflektierenden Wand basiert darauf, dass die Leuchtdichte der Details der schwarzen Skulpturen niedriger als die mittlere Leuchtdichte des Blickfeldes ist. Dagegen ist die Leuchtdichte der weißen Figur vor allen Wänden gleich oder höher als die mittlere Adaptationsdichte. Daher werden die Details und auch die Silhouette der weißen Figuren vor allen unterschiedlichen Wänden wahrgenommen, und zwar vor der niedriger reflektierenden Hintergrundwand erwartungsgemäß um so deutlicher.

8.2.2 Auswirkungen der Materialart und Oberflächenbehandlungen der Wand auf den visuellen Wahrnehmungszustand und das Raumercheinungsbild

Die Fotoergebnisse dieses Experimentes zeigen, dass die Materialart und Oberflächenbehandlungen der Wand neben dem Wandreflexionsgrad das Raummilieu erwartungsgemäß beeinflussen. Der Informationsgehalt der Raumbegrenzung erhält einen inhaltlichen Bezug zum Objekt. Daher führt allein eine andere Materialart und die Oberflächenbehandlung der Wand zu einer anderen visuellen Beurteilung. Zu dieser Begründung werden die physiopsychologischen Faktoren genannt, die dem Betrachter zunächst eine informativ andere Rückkoppelung zum Raum und zu den Exponaten vermitteln. Demnach nimmt man nicht die Originale des Raumes und der Exponate, sondern die durch die obengenannte Rückkoppelung entstandene Reproduktion des Raumes und der Exponate wahr.

Abb. 105 und 106 stellen deutlich dar, wie unterschiedlich die Räume allein durch die unterschiedlichen Wandmaterialarten erscheinen. In den beiden Abbildungen ändert sich nur die Art der Wandproben, nämlich bemalte matte Betonwand W-4 und gemusterte glatte Holzwand W-14 mit dem gleichen Reflexionsgrad. Der Raum in Abb. 105 vermittelt im Vergleich zu Abb. 106 einen erweiterten Raumein-

druck dank dessen hellerer Holzfarbe. Außerdem erzielt die Wand in Abb. 105 ein Raummilieu von bequemerem, wärmerem und weicherem Gefühl. Die Holzhintergrundwand ist daher im Allgemeinen für Bilder mit Porträts besser geeignet. Dagegen macht der Raum mit der Betonwand in Abb. 106 einen sachlichen, kälteren und gedämpften Eindruck. Diese Betonwand eignet sich deshalb besser für die Bilder mit geometrischen Darstellungen, beispielsweise für die Bilder an der vorderen Wand des Versuchsraumes dieser Arbeit.

Bezüglich der Oberflächenbehandlung können die strukturierten Wände, z. B. die verputzte Wand, im Vergleich zu den unstrukturierten Wänden eine plastische Raumwirkung erzielen. Das beruht auf dem im Kapitel 4 schon erklärten Modelling-Effekt. Die Wände in Abb. 108 sind aufgrund der Schattenwirkung durch die Strukturierung modellierfähiger als die unstrukturierten Wände in Abb. 107. Das führt dazu, dass der Raum in Abb. 108 tiefer erscheint als der in Abb. 107. Dadurch kommt eine optische Täuschung zustande, die die Bilder in Abb. 108 nach vorne treten und dadurch größer erscheinen lassen. Deshalb kann man die Bilder an der strukturierten Wand besser ausmachen als an der unstrukturierten Wand, wie man durch einen Vergleich der beiden Abb. 107 und 108 feststellen kann. Bei der Nah- und Detailbetrachtung eines Bildes kann die Strukturierung sogar als störender Faktor bezeichnet werden. Das kann man in Abb. 109 und 110 beurteilen. Nach Abb. 110 schwächt die strukturierte Wand die Sehkonzentration des Betrachters ab, da die Licht- und Schattenwirkung der strukturierten Oberfläche-textur seine Aufmerksamkeit auf die Wandfläche verstärkt. Das erfordert mehr Rechenarbeit des Gehirns des Museumsbesuchers bei der Bildbetrachtung in einer derartigen Wahrnehmungskonstellation. Daraus folgt eine schnellere Erschöpfung der Kapazität des Gehirns, was schließlich zu Herabsetzung der Sehleistung und der schnelleren Ermüdung des Bildbetrachters führt. Die oben untersuchten Strukturierungswirkungen kann man bei der Skulpturenausstellung in Abb. 103 und 104 ebenfalls erkennen. Bei der Betrachtung des ganzen Wandbereiches können die Umrisse der Figuren bei der strukturierten Wand in Abb. 104 besser wahrgenommen werden als bei der unstrukturierten Wand in Abb. 103. Die strukturierte Wand verursacht dagegen bei der Nah- bzw. Detailbetrachtung einer einzelnen Figur in Abb. 103 einen instabileren und unkonzentrierten Wahrnehmungszustand.

Die Auswirkungen auf die visuelle Wahrnehmung im Raum durch die glänzenden und matten Wände lassen sich anhand der hier ausgewählten Abb. 111, 112, 113 und 114 erklären. Die weniger gemusterten Wände in Abb. 112 vermitteln uns erwartungsgemäß einen ruhigeren Raumeindruck als die mehr gemusterten Wände in Abb. 111. Das beruht darauf, dass die Wände mit weniger Mustern uns weniger Gehirnarbeit als die gemusterten Wände abverlangen. Diese eben erwähnten beiden Abbildungen präsentieren außerdem, dass matte Wandoberflächen im Vergleich zu glänzenden Wandoberflächen in der Regel einen stabileren Wahrnehmungszustand schaffen. Matte und weniger gemusterte Wandoberflächen ermöglichen bei der Nahbetrachtung eines Bildes in Abb. 113 eine bessere Aufmerksamkeit als gemusterte und glänzende Wandoberflächen in Abb. 114.

Die Wandfarbe übt selbstverständlich eine maßgebliche Beeinflussung auf die Bild- und Raumerscheinungen aufgrund der simultanen Farbkontrastwirkung aus. Viele Abbildungen dieses Kapitels zeigen, wie stark die Wände durch ihre Farbgestaltung, sowie der Boden, das Raumerscheinungsbild ändern. Besonders in Abb. 115 und 116 kann man beobachten, wie dasselbe Bild in Größe, Farbe und der Entfernung vom Betrachter je nach der Farbe des umgebenden Hintergrundes variieren kann. Deswegen sollten diese Beeinflussungen beim Einsatz buntfarbiger Wände im Museum sehr behutsam überprüft und beachtet werden. Das Grau sei, wie /165/ betont, neutral und unauffällig und verstärke die Wirkung aller Farben des Infelds. Aus diesem Grund konzentriert sich diese Arbeit hauptsächlich auf die Untersuchung der Auswirkungen von unterschiedlichen Reflexionsgraden unbuntfarbiger Wände. Die Simultanwirkungen zwischen den sich im Blickfeld gleichzeitig befindlichen Farbflächen sind in der zitierten Literatur /118/ sorgfältig und umfangreich beschrieben.

Es ist schließlich schwer festzustellen, welche Materialart und Oberflächenbehandlung im Allgemeinen die besseren Sehbedingungen im Museum schafft. Dies hängt nicht nur von der Art der Ausstellungsstücke ab, sondern auch von dem gewünschten Ambiente eines Museums und der damit verbundenen architektonischen Gestaltung.

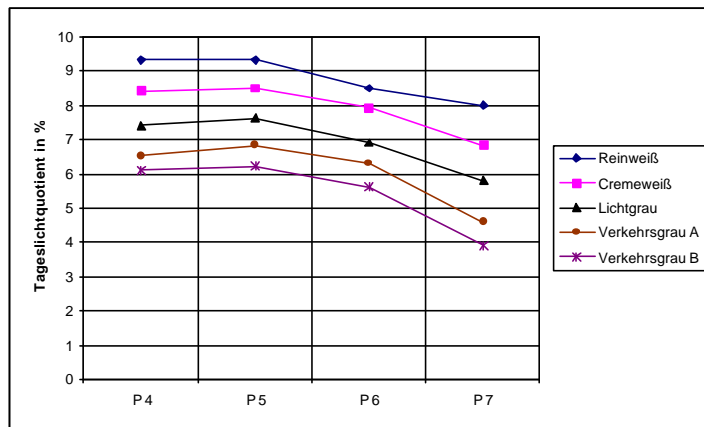


Abb. 74: Vertikaler Tageslichtquotient D_v je nach den unterschiedlich reflektierenden Wandproben im Versuchsraum bei Tageslichtkonzept 1 und B-3

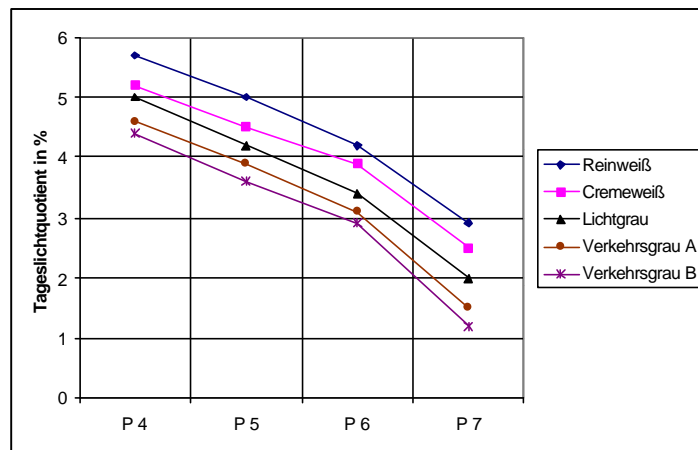


Abb. 75: Vertikaler Tageslichtquotient D_v je nach den unterschiedlich reflektierenden Wandproben im Versuchsraum bei Tageslichtkonzept 2 und B-3

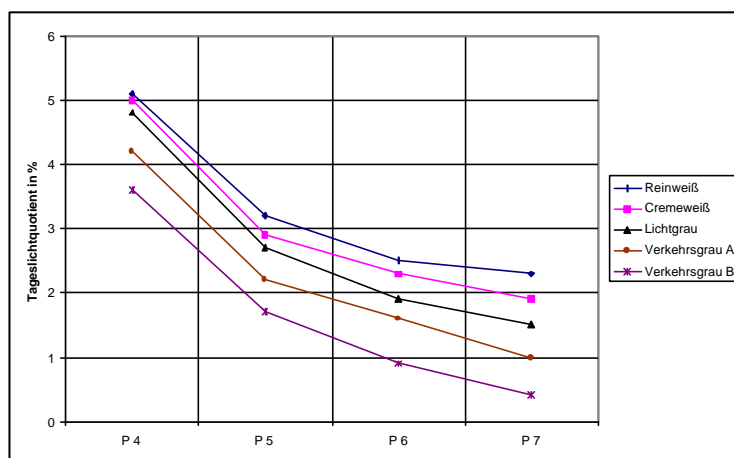


Abb. 76: Vertikaler Tageslichtquotient D_v je nach den unterschiedlich reflektierenden Wandproben im Versuchsraum bei Tageslichtkonzept 3 und B-3



Abb. 77: Raummilieu des Lichtsystems 2 bei B-10 und W-1



Abb. 78: Raummilieu des Lichtsystems 2 bei B-10 und W-3



Abb. 79: Raummilieu des Lichtsystems 2 bei B-10 und W-4



Abb. 80: Raummilieu des Lichtsystems 2 bei B-10 und W-5



Abb. 81: Raummilieu des Lichtsystems 2 bei B-4 und W-13



Abb. 82: Raummilieu des Lichtsystems 2 bei B-4 und W-15



Abb. 83: Raummilieu des Lichtsystems 3 bei B-10 und W-1



Abb. 84: Raummilieu des Lichtsystems 2 bei B-10 und W-5



Abb. 85: Betrachtungssituation einer Wand bei W-5, B-3 und Tageslichtkonzept 1



Abb. 86: Betrachtungssituation einer Wand bei W-4, B-3 und Tageslichtkonzept 1



Abb. 87: Betrachtungssituation einer Wand bei W-3, B-3 und Tageslichtkonzept 1



Abb. 88: Betrachtungssituation einer Wand bei W-2, B-3 und Tageslichtkonzept 1



Abb. 89: Betrachtungssituation einer Wand bei W-1, B-3 und Tageslichtkonzept 1

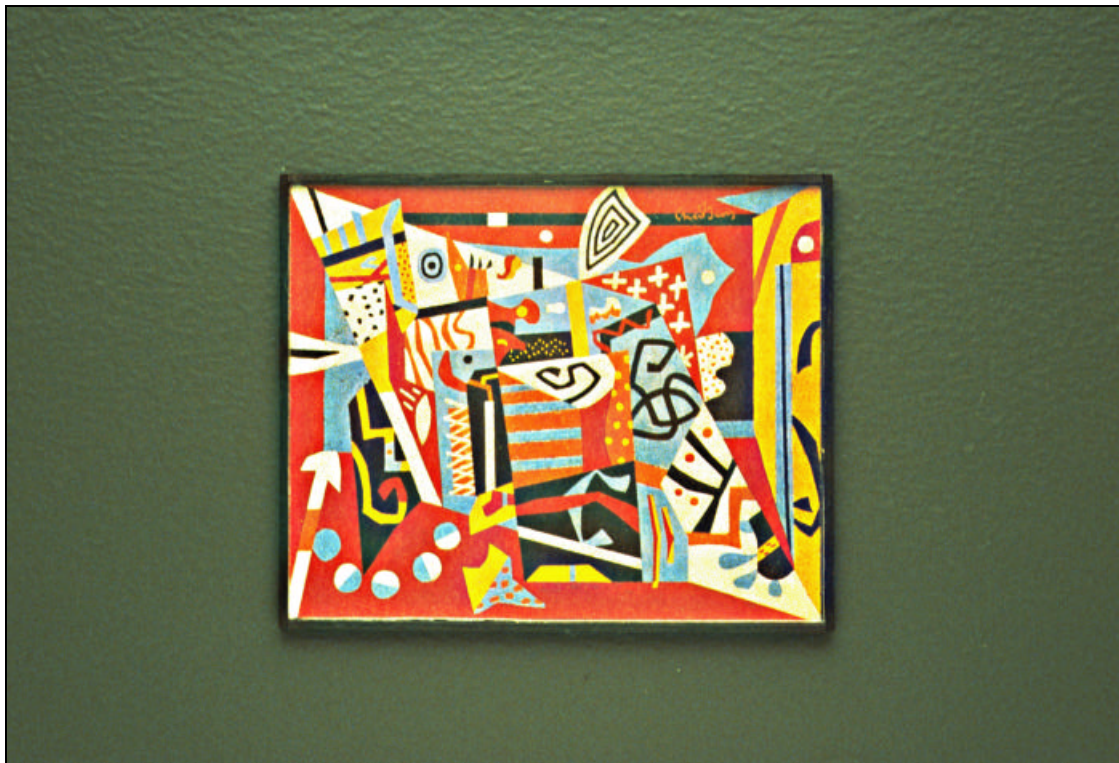


Abb. 90: Nahbetrachtung eines Bildes mit umgebender Wandfläche W-5



Abb. 91: Nahbetrachtung eines Bildes mit umgebender Wandfläche W-4

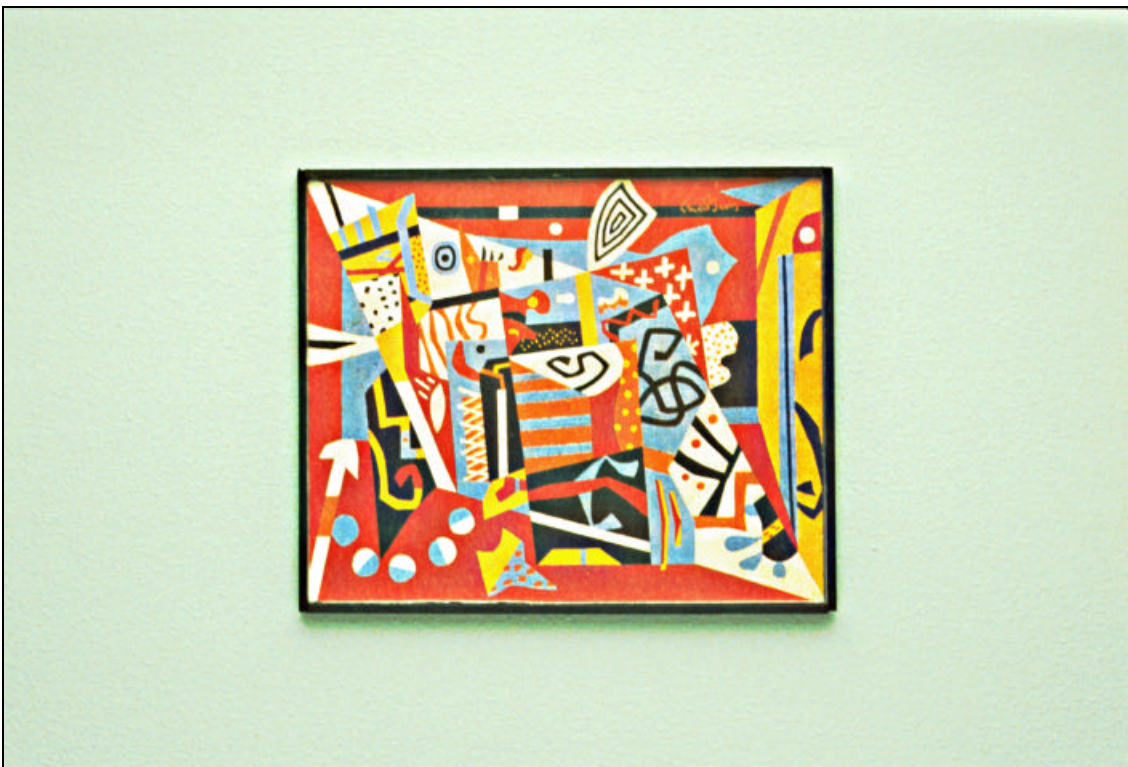


Abb. 92: Nahbetrachtung eines Bildes mit umgebender Wandfläche W-3



Abb. 93: Nahbetrachtung eines Bildes mit umgebender Wandfläche W-2



Abb. 94: Nahbetrachtung eines Bildes mit umgebender Wandfläche W-1



Abb. 95: Betrachtungssituation einer Wand W-15 bei B-3 und Tageslichtsystem 3



Abb. 96: Betrachtungssituation einer Wand W-13 bei B-3 und Tageslichtsystem 3



Abb. 97: Nahbetrachtung eines Bildes mit umgebender Wandfläche W-17 bei B-3 und Tageslichtkonzept 2

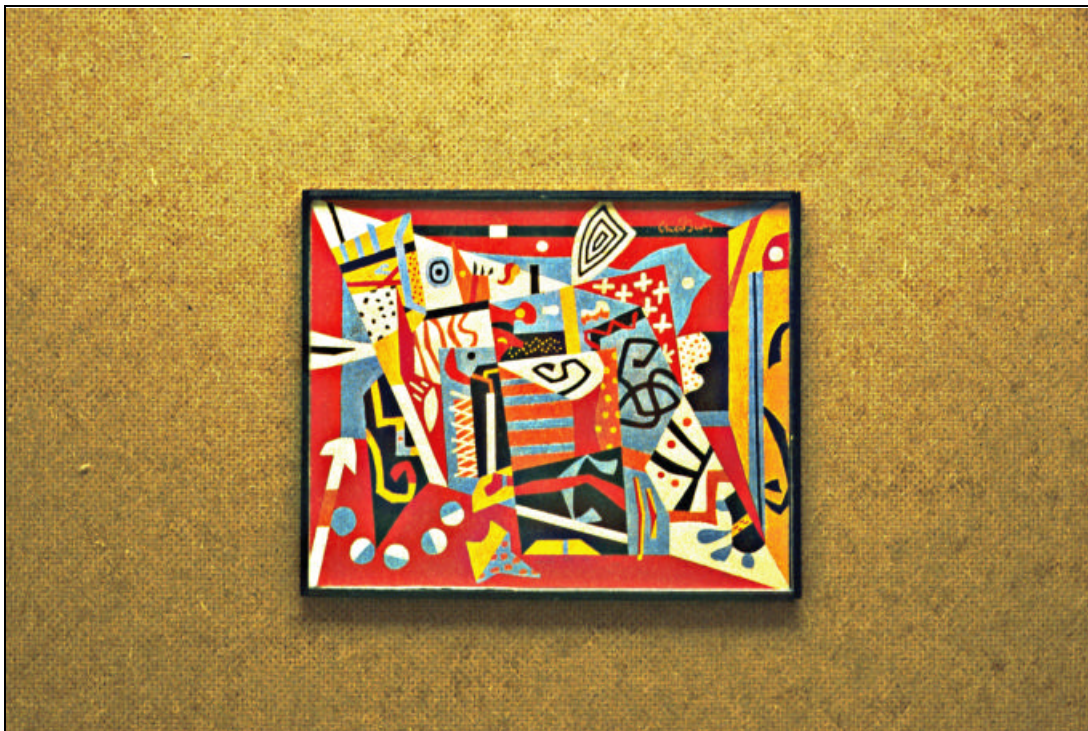


Abb. 98: Nahbetrachtung eines Bildes mit umgebender Wandfläche W-17 bei B-3 und Tageslichtkonzept 2



Abb. 99: Skulpturenbetrachtung vor W-5 bei B-3 und Tageslichtkonzept 1



Abb. 100: Skulpturenbetrachtung vor W-4 bei B-3 und Tageslichtkonzept 1



Abb. 101: Skulpturenbetrachtung vor W-3 bei B-3 und Tageslichtkonzept 1



Abb. 102: Skulpturenbetrachtung vor W-2 bei B-3 und Tageslichtkonzept 1



Abb. 103: Skulpturenbetrachtung vor W-1 bei B-3 und Tageslichtkonzept 1

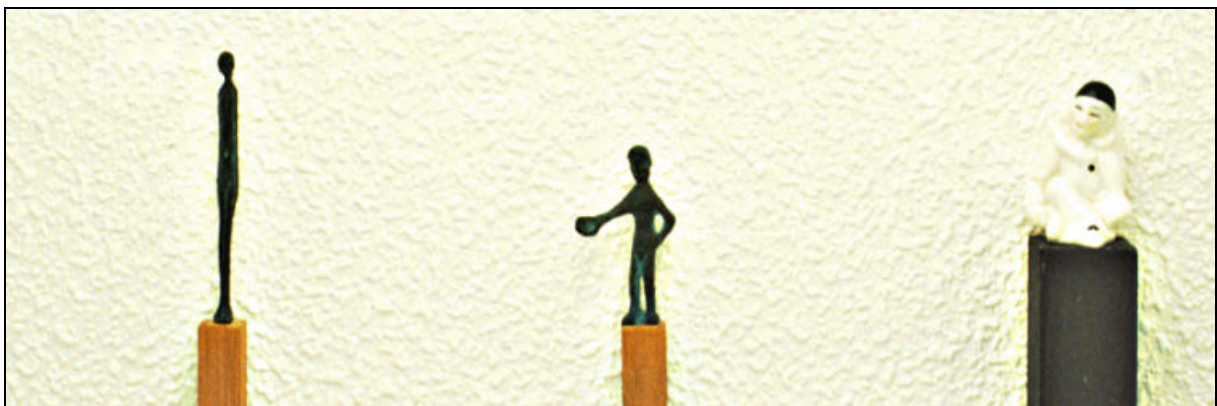


Abb. 104: Skulpturenbetrachtung vor W-7 bei B-3 und Tageslichtkonzept 1



Abb. 105: Raummilieu der W-14 bei Lichtsystem 2 und B-3



Abb. 106: Raummilieu der Wandprobe W-4 bei Lichtsystem 2 und B-3



Abb. 107: Raummilieu der Wandprobe W-3 bei Lichtsystem 1 und B-4



Abb. 108: Raummilieu der Wandprobe W-9 bei Lichtsystem 1 und B-4

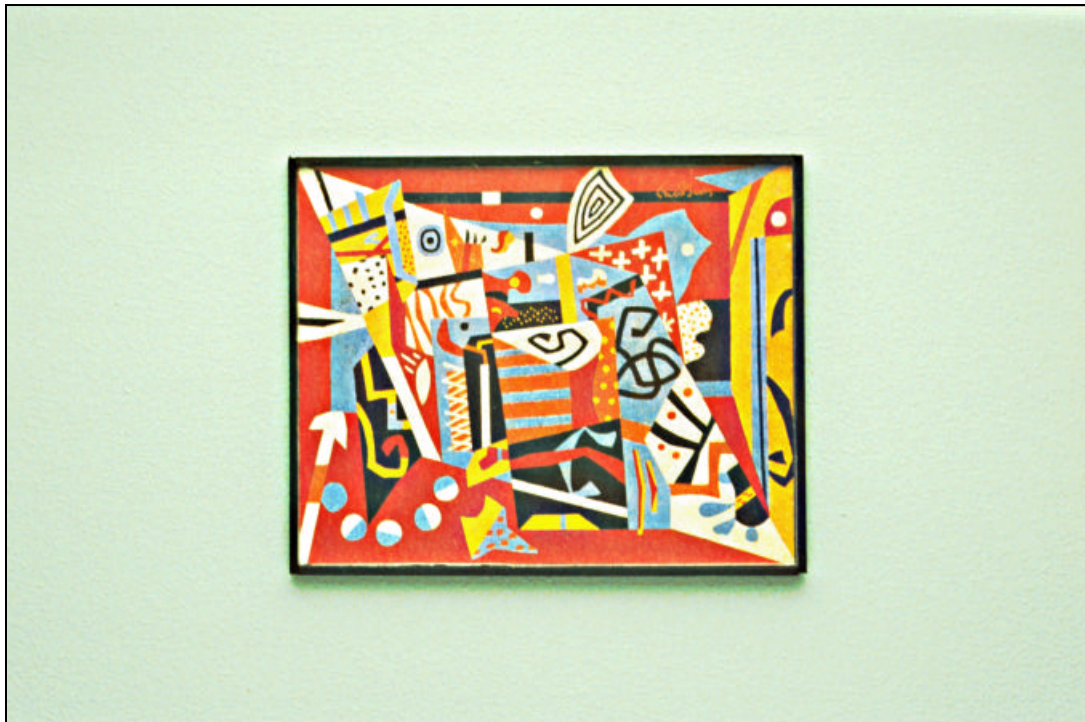


Abb. 109: Nahbetrachtung eines Bildes mit umgebender Wandoberfläche W-3

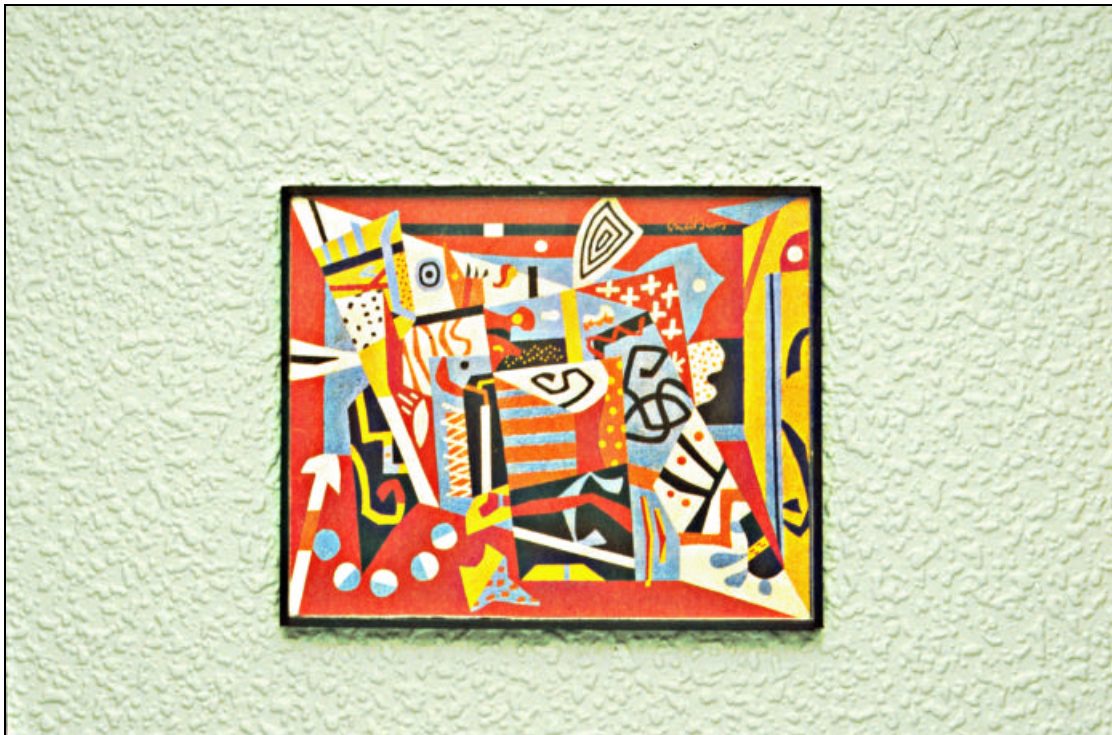


Abb. 110: Nahbetrachtung eines Bildes mit umgebender Wandoberfläche W-9



Abb. 111: Raummilieu der Wandprobe W-15 bei Tageslichtkonzept 1 und B-5



Abb. 112: Raummilieu der Wandprobe W-16 bei Tageslichtkonzept 1 und B-5

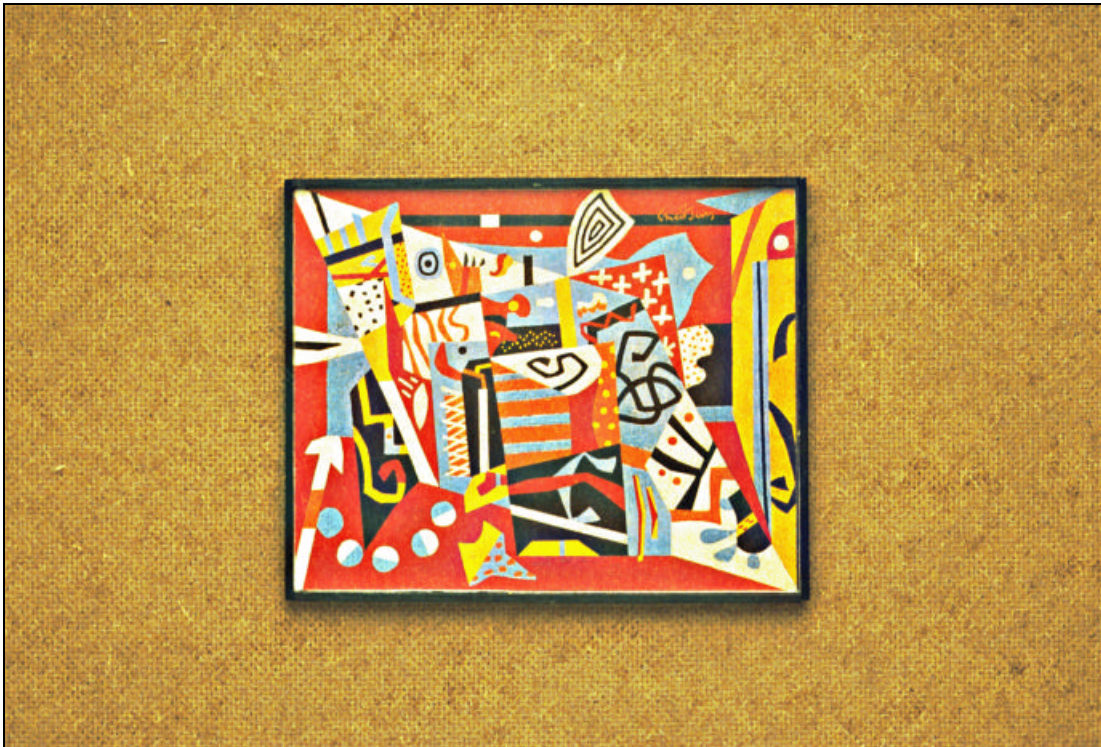


Abb. 113: Nahbetrachtung eines Bildes mit umgebender Wandoberfläche W-16

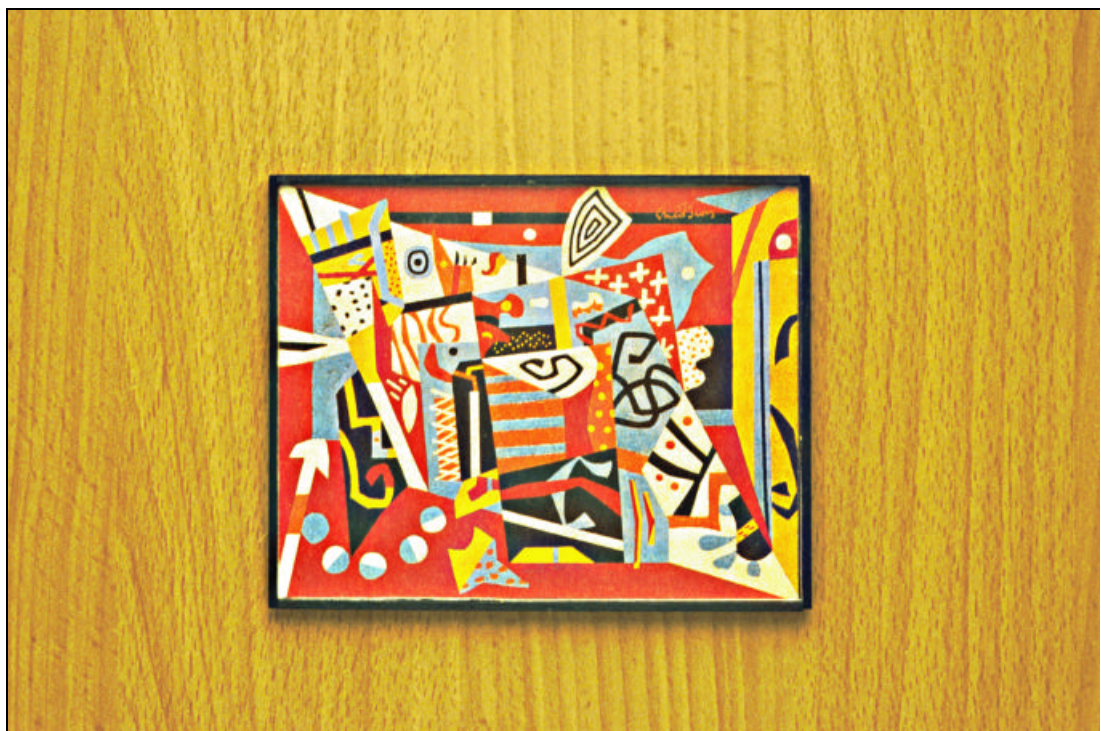


Abb. 114: Nahbetrachtung eines Bildes mit umgebender Wandoberfläche W-15

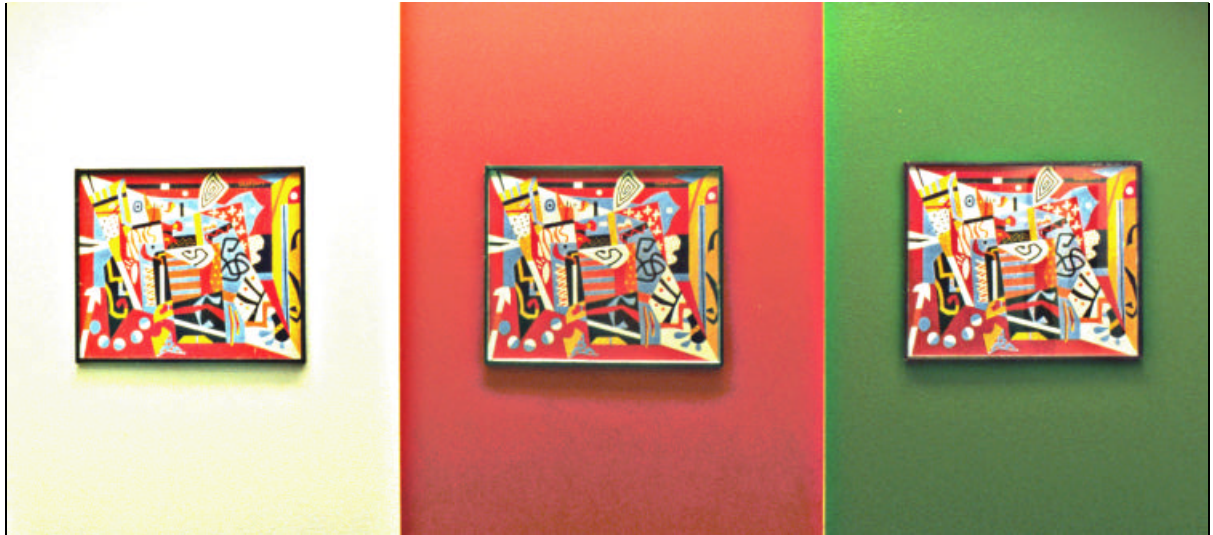


Abb. 115: Simultanwirkung zwischen der Farbwand und dem Bild bei W-1, W-6 und W-19

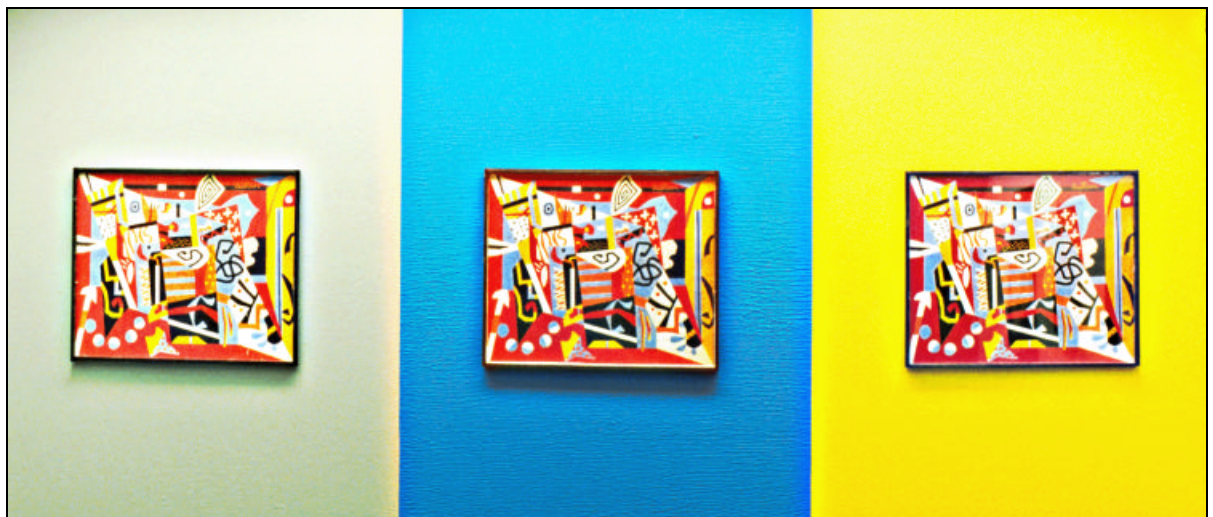


Abb. 116: Simultanwirkung zwischen der Farbwand und dem Bild bei W-3, W-20 und W-18

8.3 Charakterisierung des visuellen Raumes durch Oberflächenbehandlung und Materialart des Bodens

Es wurde in dieser Arbeit mehrmals darauf hingewiesen, dass die Oberflächengestaltung des Bodens, vor allem in durch Oberlichter belichteten Räumen, die Beleuchtungsstärke und das Raummilieu in großem Maße beeinflusst. Der Grund dafür ist, dass das eintretende Tageslicht dort normalerweise den Boden direkt trifft. Aus diesem Grund werden die Auswirkungen von dem Reflexionsgrad und der Stoffeigenschaft bzw. Behandlungsart der Bodenoberflächen auf das Lichtverhältnis und besonders auf den visuellen Raum in diesem Teil überprüft.

8.3.1 Auswirkungen des Bodenreflexionsgrads auf das Lichtverhältnis

In Abb. 117, 118 und 119 sind die Auswirkungen der unterschiedlich reflektierenden Bodenproben B-1, B-2, B-3, B-4 und B-5 auf die vertikalen Tageslichtquotienten D_v dargestellt. Nach diesen Abbildungen steigen die vertikalen Tageslichtquotienten D_v erwartungsgemäß mit dem zunehmenden Bodenreflexionsgrad an allen Messpunkten parallel an. Wie stark die Werte der Beleuchtungsstärke dabei zunehmen, ist jedoch von den einzelnen Lichtkonzepten abhängig. Die Stärke dieser Zunahme ist nach oben erwähnten Abbildungen beim Lichtkonzept 1 am größten und bei den Lichtkonzepten 2 und 3 fast identisch. Damit weiß man, dass die Bodenreflexion den Tageslichtquotienten beim Tageslichtkonzept 1 stärker beeinflusst als bei den Tageslichtkonzepten 2 und 3.

Welches Raumelement, genauer gesagt der Boden oder die Wand, eine stärkere Wirkung auf den vertikalen Tageslichtquotienten D_v durch die Änderung des Reflexionsgrads ausübt, ist unterschiedlich je nach dem Tageslichtkonzept. Nach Abb. 117 und 74 beeinflusst der Bodenreflexionsgrad den vertikalen Tageslichtquotienten D_v beim Tageslichtkonzept 1 mehr als der Wandreflexionsgrad. Der Grund dafür ist, dass der meiste Teil des ins Gebäude herein fallenden Tageslichts dabei direkt auf den Boden fällt. Beim Tageslichtkonzept 2 kann die Größe des Tageslichtquotienten wegen der regelmäßigen Lichtverteilung im Versuchs-

raum durch den Wand- und Bodenreflexionsgrad in fast gleichem Maße manipuliert werden. Man kann das durch einen Vergleich zwischen Abb. 118 und 75 erkennen. Außerdem stellen Abb. 119 und 76 dar, dass beim Tageslichtkonzept 3 die Wand mit der Reflexionsgradänderung dank ihrer höheren Leuchtdichte einen größeren Effekt für den Tageslichtquotienten erzielt als der Boden.

8.3.2 Auswirkungen des Bodenreflexionsgrads auf den visuellen Raum

Die Fotoaufnahmen der Versuchsräume dieses Experimentes zeigen, dass das Erscheinungsbild des Bodens und damit auch des Versuchsaumes je nach dem Bodenreflexionsgrad variiert. Diese Auswirkungen werden in den nachfolgenden Abschnitten im einzelnen beschrieben.

Erstens ändert sich der Festigkeitseindruck des Bodens je nach dessen Reflexionsgrad. Abb. 120, 121, 122 und 123 zeigen, dass die optische Beständigkeit des Bodens mit dem zunehmenden Reflexionsgrad immer schwächer wird. Ein höher reflektierender Bodenanstrich löst bei uns die visuellen Informationen aus, dass der Boden entmaterialisierter erscheint. Dadurch vermittelt ein derartiger Boden uns eine optisch instabile Empfindung, wie Abb. 120 darstellt. Dagegen erfolgt eine Rückkoppelung der stärkeren optischen Festigkeit durch den niedriger reflektierenden Boden nach Abb. 123. Damit sieht dieser Boden stabiler und beruhigender aus als der heller erscheinende Boden. Wodurch die oben erwähnte Rückkopplung entsteht, kann man mit Hilfe der Invariante-Theorie von J.J. Gibson erklären. /75/ Das menschliche Gehirn erhält von einem Boden visuelle Reize, die uns ermöglichen, den Raum nach unten abzugrenzen. Inzwischen nimmt unser Gehirn die Schwerkraft aus der Umwelt ständig als eine universale und dauernd wirksame Konstante wahr. Der Boden ist für das menschliche Gehirn eine beständige Invariante. Wenn die visuelle Information des Bodens ihr widerspricht, dann bekommt man einen oben erklärten unsicheren visuellen Raumeindruck.

Zweitens bewirkt der Bodenreflexionsgrad ferner die Veränderung der visuellen Wahrnehmung des Raumumfangs. Ein höher reflektierender Boden, z. B. B-1 und B-2, stößt die Wände aufgrund dessen Helldominanzbildung rein optisch zurück. Deswegen wird der Raum in der Breite subjektiv weiter wahrgenommen als nor-

mal. Das zeigt Abb. 120. Der Versuchsraum in ihr sieht andererseits in der Höhe gedrückt aus, da sich der helle Boden und die helle Raumdecke gleichzeitig in unserem Blickfeld befinden. Das menschliche Auge nimmt nach dem im Kapitel 1 erklärten Ähnlichkeitsprinzip der Gestaltungstheorie die ähnliche Gestaltung als zusammen verbunden wahr. Daher werden diese beiden heller erscheinenden Raumelemente näher zusammengerückt angesehen. Daraus ergibt sich Abb. 120 zufolge keine befreiende, sondern eine eher erdrückende und deswegen unangenehme visuelle Raumempfindung. Dieses Raumerscheinungsbild verschwindet, wenn die Raumdecke nicht mehr helldominierend erscheint, wie Abb. 124 verdeutlicht. In dieser Abbildung bleibt jedoch der oben erklärte Raumerweiterungseffekt, nämlich in die Höhe sowie in die Breite, durch den höher reflektierenden Boden im Gegensatz zu Abb. 125.

Drittens besteht ein Zusammenhang zwischen dem Reflexionsgrad des Bodens und der Erfassbarkeit der Raumstruktur bzw. Räumlichkeit. Der höher reflektierende Boden verursacht die Schleierwirkung auf der Netzhaut des menschlichen Auges durch die Reflexblendung. Diese Schleierwirkung bereitet dem Betrachter eine Sehbeeinträchtigung in Form einer erschwerten Erkennung der Räumlichkeit und damit der Raumorientierung. Die Nachweise stellen ebenfalls die bereits oben erwähnten Abb. 120 und 124 dar. Dagegen lässt der stärker gesättigte Boden, wie Bodenprobe B-5 in Abb. 123 und 125, die Räumlichkeit des Versuchsraums kompakter erscheinen. Da ein derartiger Boden nicht helldominierend über die Wände aussieht, rücken sie optisch dementsprechend nach vorne. Das führt zu einem erleichterten Erfassen der Raumstruktur bzw. der Räumlichkeit, da die Ausstellungswände als die visuellen Zielorte vom Museumsbesucher ständig gesucht und in so gestalteten Räumen leicht ausgemacht werden können.

Viertens beeinflusst die Abnahme des Bodenreflexionsgrads die Bildbetrachtung ebenfalls positiv. Der mehr reflektierende Boden lässt den Tageslichtquotienten nach Abb. 117, 118 und 119 zunehmen, jedoch keinen besseren Wahrnehmungszustand wie bei den im letzten Teil dieser Arbeit untersuchten Wandauswirkungen. Abb. 120, 121, 122, 123, 124 und 125 weisen das nach. Nach ihnen verbessert die Verringerung des Bodenreflexionsgrads die nachfolgenden Sehleistungen bei der Bildbetrachtung:

- **Sehgeschwindigkeit**
- **Gewünschte Sicherheit des visuellen Erkennens**
- **Dauer der Seharbeit**
- **Begrenzung der Blendung**
- **Farbwiedergabe**
- **Schaffung des Sehkomforts.**

Die oben erklärte Bodenwirkung ist wie die im letzten Abschnitt untersuchten Wandauswirkungen wiederum auf die Helligkeitsumstimmung des menschlichen Auges zurückzuführen. Je niedriger der Reflexionsgrad des Bodens wird, desto schwächer wird die mittlere Adaptationsleuchtdichte des Raumes. Dadurch wird die wahrgenommene relative Leuchtdichte der gleich gebliebenen Bilder vom so adaptierten Auge dementsprechend stärker als ihre objektive Leuchtdichte eingeschätzt. Das führt zur Erhöhung der oben erklärten Sehleistungen bei der Bildbetrachtung.

Die als Muster ausgewählten Abb. 126 und 127 zeigen, dass die oben vorgebrachten Wirkungen des Bodenreflexionsgrades in den Räumen mit den anderen Materialproben und den anderen Lichtsystemen in gleicher Weise auftreten.

8.3.3 Auswirkungen der Materialart und Oberflächenbehandlung des Bodens auf das Raummilieu

8.3.3.1 Auswirkungen der Oberflächenbehandlung des Bodens auf seine Helligkeitserscheinung

Die Helligkeitserscheinung des Bodens ändert sich je nach dessen Materialeigenschaft und Oberflächenbehandlung. Es wird eigentlich erwartet, dass der spiegelnde bzw. glänzende Boden heller als der matte Boden erscheint. Das betrifft nach den Ergebnissen dieses Experiments aber nicht alle Bodenmaterialarten. Die Bodenoberflächen der Versuchsräume in Abb. 128, 129 und 130 sind matt behandelt und besitzen gegenüber den Wänden den niedrigeren Reflexionsgrad von jeweils ca. 19 %, 29 % und 28 %. Dabei erscheinen alle Böden heller als die Wände. Trotz der unterschiedlichen Wand- und Bodenmaterialien ist die Helldominanz

des Bodens über die Wände in Abb. 128 verständlicherweise schwächer als in Abb. 129 und 130. Das bedeutet, dass der Helligkeitskontrast durch den Reflexionsunterschied zwischen dem Boden und den Wänden in Abb. 128 kleiner ist als in den anderen beiden Abbildungen.

Ein glänzender Boden zeigt erwartungsgemäß stärkere Helldominanz über die Wände als ein matter Boden. Der glänzende Holzboden in Abb. 131 hat gegenüber den Wänden einen niedrigeren Reflexionsgrad von ca. 23 %. Im Vergleich dazu reflektiert der matte Boden in Abb. 128 nur 19 % weniger als die Wände. Der glänzende Boden in Abb. 131 zeigt trotz des weniger objektiven Reflexionsgradkontrasts ein stärkeres optisches Helligkeitsüberwiegen über die Wände als der matte Boden in Abb. 128.

Die eloxierten Metallböden, wie B-12 (matt, Reflexionsgrad 41 %) und B-13 (spiegelnd, Reflexionsgrad 70 %), bringen aber überraschende Ergebnisse bei der Helligkeitskorrelation zwischen dem Boden und den Wänden. Aufgrund der Oberflächeneigenschaften der eloxierten Metallböden wird eine sehr starke optische Helligkeitsdifferenz über die Wände von ihnen erwartet. Das Resultat lautet nach den Ergebnissen dieser Arbeit jedoch ganz im Gegenteil. Abb. 132 zeigt das deutlich. Der Metallboden B-12 in Abb. 132 besitzt nur einen 10 % geringeren Reflexionsgrad als die Wände. Im Vergleich dazu besteht bei den vorher angeführten Raummilieus in Abb. 130 und 131 ein Reflexionsunterschied zwischen dem Boden und den Wänden von ca. 20 %. Dennoch zeigt der Metallboden in Abb. 132 schwächere Helldominanz über die Wände als die Böden in Abb. 130 und 131. Um so überraschender ist das Ergebnis der Helligkeitserscheinung der Bodenprobe B-13. Dieser Metallboden behauptet eine sehr schwache Helligkeitsdominanz über die Wände ungeachtet der spiegelnden Oberflächenbehandlung und des hohen Reflexionsgrads von 70 %. Das kann ein Vergleich zwischen Abb. 128 und 133 deutlich machen. Das Raummilieu in Abb. 128 ist mit dem angestrichenen matten Betonboden B-3 (Reflexionsgrad 55 %) und den Wänden W-2 (Reflexionsgrad 74 %) abgebildet. Der Versuchsraum in Abb. 133 enthält den oben genannten Metallboden B-13 und die identischen Wände W-2 wie in Abb. 128. Der Boden in Abb. 128 ist an Helligkeit über die Wände viel klarer beherrschend als in Abb. 133. Der spiegelnde Metallboden in Abb. 133 reflektiert nur 4 % weniger als die Wände im

Vergleich zu 19 % des Betonbodens in Abb. 128. Trotzdem ist die Helldominanz des Metallbodens B-13 in Abb. 133 über die Wände viel schwächer als beim matten Betonboden B-3 in Abb. 128. Die Fotobeweise dieser Arbeit zeigen, dass die Helligkeitsdominanz des Metallbodens B-13 über die Wände voraussetzt, dass sein Reflexionsgrad gegenüber den Wänden bis über 50 % liegt.

Der spiegelnde Granitboden B-15 (Reflexionsgrad 46 %) zeigt einen stärkeren optischen Helligkeitseindruck im Vergleich zum oben untersuchten spiegelnden Metallboden B-13. Abb. 133 und 134 haben die identische Wandprobe W -2. Die Helligkeitsdominanz von B-15 über die Wände in Abb. 134 ist viel stärker als die von der hoch spiegelnden Metallbodenprobe B-13 in Abb. 133, jedoch schwächer als der ähnlich stark reflektierende matte Holzboden, wie B-9 (Reflexionsgrad 45 %) in Abb. 129.

Aber die schwächere Helldominanz der oben erwähnten spiegelnden Böden bedeutet nicht gleichzeitig, dass sie ein stabiles Erscheinungsraumbild zustande kommen lassen können. Ein derartiger Boden liefert uns unrealistische visuelle Reize aufgrund der entmaterialisierenden Materialeigenschaft, die eher zu einem labilen optischen Wahrnehmungszustand führen.

Außerdem wird durch dieses Experiment nachgewiesen, dass die Auswirkungen der Bodenoberflächen auf die in diesem Abschnitt diskutierte wahrgenommene Helligkeitskorrelation zwischen dem Boden und den Wänden auf alle Versuchsräume mit Lichtsystem 2 und 3 übertragbar sind.

8.3.3.2 Auswirkungen der Materialart und Oberflächenbehandlung des Bodens auf das Raumerscheinungsbild

Optisch weicher oder wärmer aussehende Bodenmaterialien, z. B. Teppich in Abb. 130 und Holz in Abb. 129 und 131, verleihen erwartungsgemäß den ruhigeren Eindruck als der härter erscheinende Boden, wie Metall in Abb. 132 und 133, Granit in Abb. 134 oder Beton Abb. 128 und 128. Ein härter aussehendes Bodenmaterial dominiert im Raum, denn ein derartiges Material wird aus der Erfahrung mit solchen Empfindungen assoziiert.

Darüber hinaus beeinflusst die Beschaffenheit der Bodenoberfläche das Raumercheinungsbild. Ein matter bzw. diffus reflektierender Boden verstärkt die optische Beständigkeit und Sicherheit mehr als eine glänzende Bodenoberfläche. Das kann durch den Vergleich zwischen Abb. 128 und 133 eingeschätzt werden. Daneben wiegt bei einem spiegelnden bzw. glänzenden Boden der verunsichernde Faktor über die Wirkung der optischen Raumerweiterung aufgrund der entmaterialisierten Erscheinung. Diese Labilität des Raumeindrucks erreicht das Maximum beim sehr hoch spiegelnden und lackierten Metallboden oder beim polierten Marmorboden gemäß Abb. 133 und 134. Im schlimmsten Fall beeinträchtigen derartige Bodenoberflächen durch den Blendungseffekt nicht nur die Geschwindigkeit der visuellen Erkennung und die Konzentration bei der Objekt- und Raumerkennung, sondern auch die Orientierung im Raum und den Sehkomfort des Museumsbesuchers.

Die Auswirkungen der reflektierenden Bodenfarbe müssen ebenfalls bei der Raumgestaltung des Museums erwähnt werden. Die Farbtöne des Bodens werden durch die Reflexion zur Wand abgelenkt. Dadurch kann die Farbwiedergabe der dort ausgestellten Bilder verfälscht werden. Wie Abb. 135 zeigt, wirkt diese Farbübertragung bei einem glänzenden und spiegelnden Boden viel stärker. Es besteht dabei auch die Gefahr, dass ein derartiger Boden die Farbtöne einer Wand auf gegenüber liegende Wände spiegelt. Diese Farbbeeinflussung wird in Abb. 135 ersichtlich. Im Vergleich zu Abb. 136 enthalten die ausgestellten Bilder der Abb. 135 den Gelbfarbton, der von der gegenüber liegenden Wand durch den Boden reflektiert wird. Aus den oben erklärten Gründen wird empfohlen, bei Anwendung des bunten und spiegelnden Bodens im Museum derartige Farbbeeinträchtigungen für die Bilderbetrachtung zu beachten. Im Museumsraum, der durch das Tageslichtkonzept 3 tagesbelichtet wird, trifft das hereinfliegende Tageslicht nicht den Boden, sondern zunächst die Wände. Trotzdem ist die obengenannte Farbverfälschung Abb. 137 zufolge dort vorhanden, je doch geringer als in Räumen, die durch die Lichtkonzepte 1 und 2 belichtet sind.

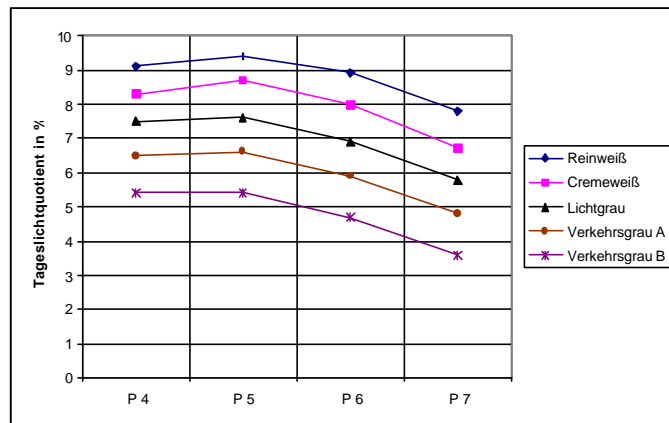


Abb. 117: Vertikaler Tageslichtquotient D_v je nach den unterschiedlich reflektierenden Böden im Versuchsraum bei Tageslichtkonzept 1 und B-3

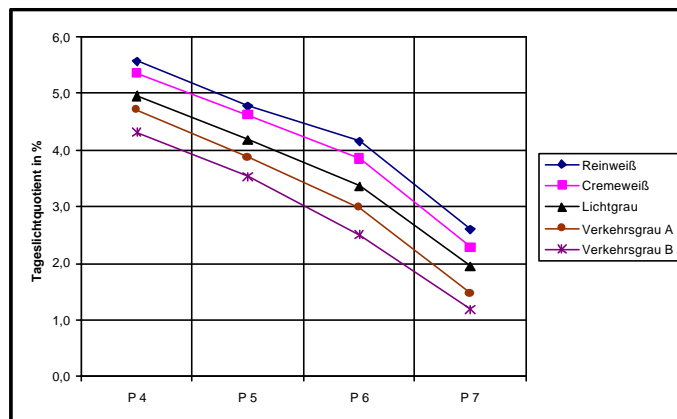


Abb. 118: Vertikaler Tageslichtquotient D_v je nach den unterschiedlich reflektierenden Böden im Versuchsraum bei Tageslichtkonzept 2 und B-3

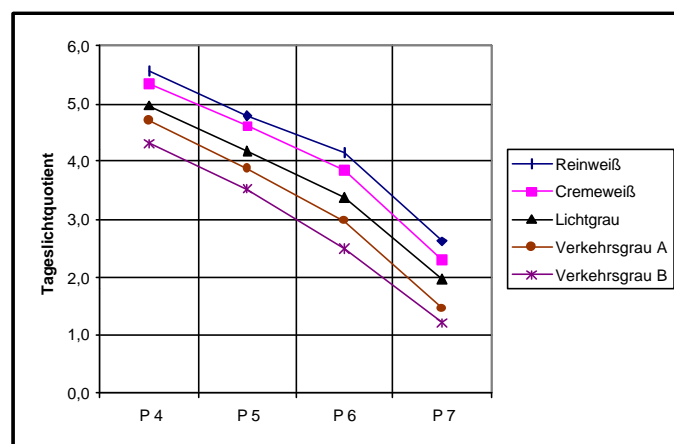


Abb. 119: Vertikaler Tageslichtquotient D_v je nach den unterschiedlich reflektierenden Böden im Versuchsraum bei Tageslichtkonzept 3 und B-3



Abb. 120: Raummilieu des B-1 bei Tageslichtkonzept 1 und W-3



Abb. 121: Raummilieu des B-3 bei Tageslichtkonzept 1 und W-3



Abb. 122: Raummilieu des B-4 bei Tageslichtkonzept 1 und W-3



Abb. 123: Raummilieu des B-5 bei Tageslichtkonzept 1 und W-3



Abb. 124: Raummilieu des B-1 bei Tageslichtkonzept 2 und W-3



Abb. 125: Raummilieu des B-5 bei Tageslichtkonzept 2 und W-3



Abb. 126: Raummilieu des B-10 bei Tageslichtkonzept 3 und W-17



Abb. 127: Raummilieu des B-11 bei Tageslichtkonzept 3 und W-17



Abb. 128: Raummilieu des B-3 bei Tageslichtkonzept 1 und W-2



Abb. 129: Raummilieu des B-9 bei Tageslichtkonzept 1 und W-2



Abb. 130: Raummilieu des B-10 bei Tageslichtkonzept 1 und W-14



Abb. 131: Raummilieu des B-8 bei Tageslichtkonzept 1 und W-13



Abb. 132: Raummilieu des B-12 bei Tageslichtkonzept 1 und W-13



Abb. 133: Raummilieu des B-13 bei Tageslichtkonzept 1 und W-2



Abb. 134: Raummilieu des B-15 bei Tageslichtkonzept 1 und W-2



Abb. 135: Raummilieu des B-6 bei Tageslichtkonzept 2 und W-1



Abb. 136: Raummilieu des B-3 bei Tageslichtkonzept 2 und W-1



Abb. 137: Raummilieu des B-6 bei Tageslichtkonzept 3 und W-1

8.4 Charakterisierung des visuellen Raumes durch Bilderrahmen

Die Bilderrahmen können nach dem in Kapitel 6 diskutierten In- und Umfeldbegriff als das primäre Umfeld des ausgestellten Bildes verstanden werden. Die Farben der Bilderrahmen können daher zuallererst das optische Erscheinungsbild der gerahmten Bilder beeinflussen. Die fotografischen Beobachtungen des Experiments dieser Arbeit lassen feststellen, dass die Bilderrahmen auch den Raumeindruck ändern. Die Bilderrahmen können deswegen ferner neben dem herkömmlichen Zweck des Bilderschutzes auch bewusst als ein Raumgestaltungsmittel in Hinsicht auf die Raumästhetik eingesetzt werden. Aus den oben genannten Gründen werden die Auswirkungen der typischen Bilderrahmen auf die Bildbetrachtung und auf den visuellen Raum in diesem Abschnitt untersucht und diskutiert.

Die goldfarbigen Rahmen und die dunkelrotfarbigen Wände sind die typische Lösung in klassischen Bildergalerien. Zur Begründung für derartige Gestaltung wird die Betonung der Plastizität des Raumes genannt. Abb. 138 zeigt ein Beispiel dieser räumlichen Erscheinung. Aus dieser Abbildung wird ersichtlich, dass die Bilder durch das Zusammenspiel der Goldrahmen und der dunkelrotfarbigen Wände aus der Ebene der roten Wand und der goldenen Rahmen optisch zurücktreten. Eine derartige optische Täuschung ist durch sogenannte chromatische Aberration begründet, die als Abbildungsfehler unseres Auges im zweiten Kapitel dieser Arbeit diskutiert wurde. Dabei wird langwelliges Licht schwächer gebrochen als kurzwelliges Licht. Dadurch wird die rote Wandfarbe von unserem Auge im Vergleich zu anderen Farben näher wahrgenommen. Die goldenen Bilderrahmen scheinen zwischen der Wand und den scheinbar nach hinten gerückten Bildern zu stehen. Dadurch entsteht der Eindruck, die Bilder seien die Aussicht aus einem Fenster, wobei die goldenen Bilderrahmen die Fensterrahmen bilden. Damit gewinnt der so gestaltete Raum schließlich eine verstärkte perspektivische Dreidimensionalität bzw. Plastizität. Dagegen verlieren die Gemälde aus dem gleichen Grund mehr oder weniger die eigene Bedeutung. Die oben untersuchte plastische Auswirkung verschwindet, falls sich andere erprobte Rahmenfarben vor der roten Hintergrundwand oder die Goldrahmen vor anders farbigen Wänden befinden. Abb. 139, 140, 141 und 142 stellen dar, dass die Bilder dort keineswegs als hinter die Wand zurückgetreten empfunden werden.

Die weißen Bilderrahmen erregen unsere visuelle Aufmerksamkeit besonders bei den weniger reflektierenden Wänden wie W -3, W -4, W -5 und W -13. Das kann man auf die starke Helligkeitsdominanz der weißen Bilderrahmen über die Wände zurückführen. Abb. 141 und 143 stellen dar, dass unsere visuelle Aufmerksamkeit auf die Bilder mit den weißen Rahmen aufgrund des starken Helligkeitskontrasts zwischen den Bilderrahmen und den Wänden stark gerichtet wird. Dadurch wird einerseits die Geschwindigkeit der Erfassung der Bilderpositionen erhöht. Andererseits geht die optische Erfassung des Bildinhaltes dementsprechend verloren. Da die Bildrahmen im Museum normalerweise nicht die Zielobjekte der Betrachtung sind, stören die zu stark helldominierenden Bilderrahmen außerdem die Erkennung der anderen Raumelemente und der Raumstruktur. Abb. 141 verdeutlicht das. Abb. 144 zeigt die Betrachtungssituation des weißen Bilderrahmens bei der niedriger reflektierenden Wand wie W -5 (Reflexionsgrad 15 %) auf der lokalen Erkundungsebene. Die weißen Bilderrahmen üben dort aufgrund ihrer obengenannten Helldominanz über die Wand und das Bild ausschließlich negativen Einfluss für die Bild- und Detailbetrachtung aus, jedoch eine positive Auswirkung auf das Ausmachen des Bildes. Die Konzentration und die Aufmerksamkeit bei der inhaltlichen Betrachtung des Bildes werden dort sehr beeinträchtigt. Die weißen Bilderrahmen bei den höher reflektierenden Wänden können ebenfalls als die störenden Faktoren für die Bildbetrachtung sowie das Raummilieu bezeichnet werden. Nach Abb. 145 verstärken die weißen Bilderrahmen die Helldominanz und die Reflexblendung der weißen Wände zusätzlich. Das erschwert die visuelle Wahrnehmung der Bilder und der Räumlichkeit um so mehr. Ein Vergleich zwischen Abb. 144 und 146 lässt erkennen, dass die gerade erklärte stärkere Sehbeeinträchtigung durch die weiße Bildrahmung vor der höher reflektierenden Wand ebenfalls bei der Nahbetrachtung der Bilder auftaucht.

Im Vergleich zu den weißen Rahmen erhöhen die schwarzen Rahmen die optische Erkennbarkeit des Bildes bzw. seiner Details bei allen Wänden. Abb. 147 und 148 zeigen, dass die schwarzen Rahmen unsere Sehleistung bei der Nahbetrachtung des Bildes sowohl bei dunkleren als auch bei helleren Wänden verbessern. Abb. 149 zufolge sind die schwarzen Rahmen keineswegs die dominierenden Elemente im Raum trotz des großen Schwarz- Weiß-Kontrastes zwischen den Rahmen und den weißen Wänden. Die schwarzen Rahmen erhöhen dort jedoch die Geschwin-

digkeit der Bilderfassung. Darüber hinaus vermitteln uns die schwarzen Bilderrahmen einen ruhigeren und stabileren Raumeindruck als die weißen Rahmen. Das wird deutlich, wenn man die Versuchsräume der Abb. 141, 142, 145 und 149, bei denen nur die Farben der Bilderrahmen verändert wurden, vergleicht. Außerdem lassen nach Abb. 142 die schwarzen Rahmen den Raum flacher erscheinen als die goldenen oder weißen Rahmen in Abb. 138 und 141, sie wirken jedoch plastischer als dies bei keiner Rahmung in Abb. 140 der Fall wäre.

Man kann aus den Ergebnissen des Bilderrahmenexperiments dieser Arbeit feststellen, dass alle erprobten Rahmen die Erkennbarkeit des Bildes im Vergleich zu keinen Bilderrahmen generell verstärken. Im Gegensatz dazu ergibt sich ein flacher, banal und bescheiden wirkender Raum aus den ungerahmten Bildern, wie Abb. 140, 150 und 152 deutlich machen. Außerdem ist die Geschwindigkeit des Ausmachens bei den ungerahmten Bildern viel langsamer als bei den gerahmten Bildern, wie Abb. 143 und 152 zeigen. Man braucht deswegen in Abb. 150 zumindest eine große Konzentration und Mühe auch bei der Nahbetrachtung des einzelnen Bildes aufgrund des fehlenden Bilderrahmens im Vergleich zu Abb. 151.

Aus den oben diskutierten Ergebnissen und aus den in diesem Abschnitt gezeigten Bildern kann die Schlussfolgerung gezogen werden, dass die Einflüsse der Bilderrahmen auf die Raumästhetik und das Betrachten des Bildes bzw. dessen Details nicht als zu gering eingeschätzt werden dürfen. Die Abbildungen des Experimentes dieser Arbeit zeigen im Gegenteil, dass die Bilderrahmen unter Umständen eine beachtliche Bedeutung für das Raummilieu haben können.



Abb. 138: Raummilieu mit den goldfarbigen Bilderrahmen und der roten Wand W-12 bei Tageslichtkonzept 3 und B-5



Abb. 139: Raummilieu mit den goldfarbigen Bilderrahmen bei dem Tageslichtkonzept 3, W-5 und B-5



Abb. 140: Raummilieu ohne Bilderrahmen bei dem Tageslichtkonzept 3, W-12 und B-5



Abb. 141: Raummilieu mit den weißfarbigen Bilderrahmen bei dem Tageslichtkonzept 3, W-12 und B-5



Abb. 142: Raummilieu mit den schwarzen Bilderrahmen bei dem Tageslichtkonzept 3, W-12 und B-5



Abb. 143: Raummilieu mit den weißen Bilderrahmen bei dem Tageslichtkonzept 3, W-4 und B-5



Abb. 144: Betrachtung einer Wand mit den weißen Bilderrahmen bei dem Tageslichtkonzept 3 und W-5



Abb. 145: Raummilieu mit den weißen Bilderrahmen bei dem Tageslichtkonzept 3, W-1 und B-5



Abb. 146: Betrachtung einer Wand mit den weißen Bilderrahmen bei dem Tageslichtkonzept 3 und W-1

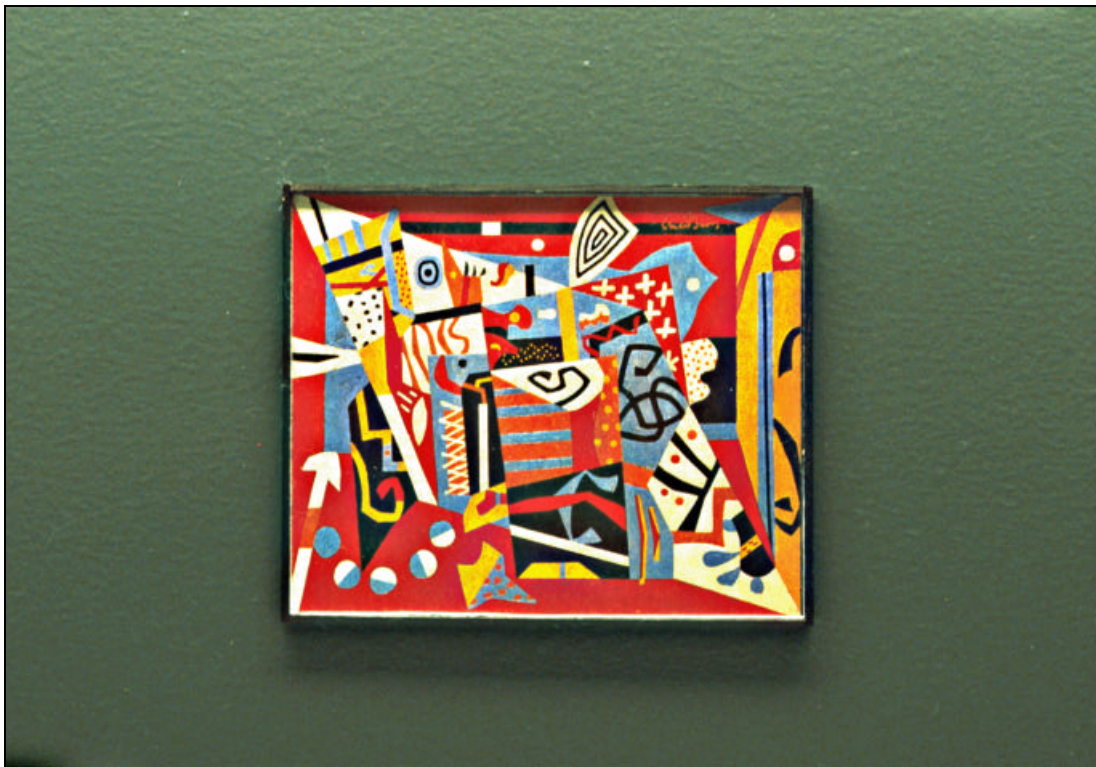


Abb. 147: Nahbetrachtung eines Bildes mit dem schwarzen Bilderrahmen mit umgebender Wandfläche W-5 beim Tageslichtkonzept 3



Abb. 148: Nahbetrachtung eines Bildes mit dem schwarzen Bilderrahmen mit umgebender Wandfläche W-1 beim Tageslichtkonzept 3



Abb. 149: Raummilieu mit den schwarzen Bilderrahmen bei dem Tageslichtkonzept 3, W-1 und B-5

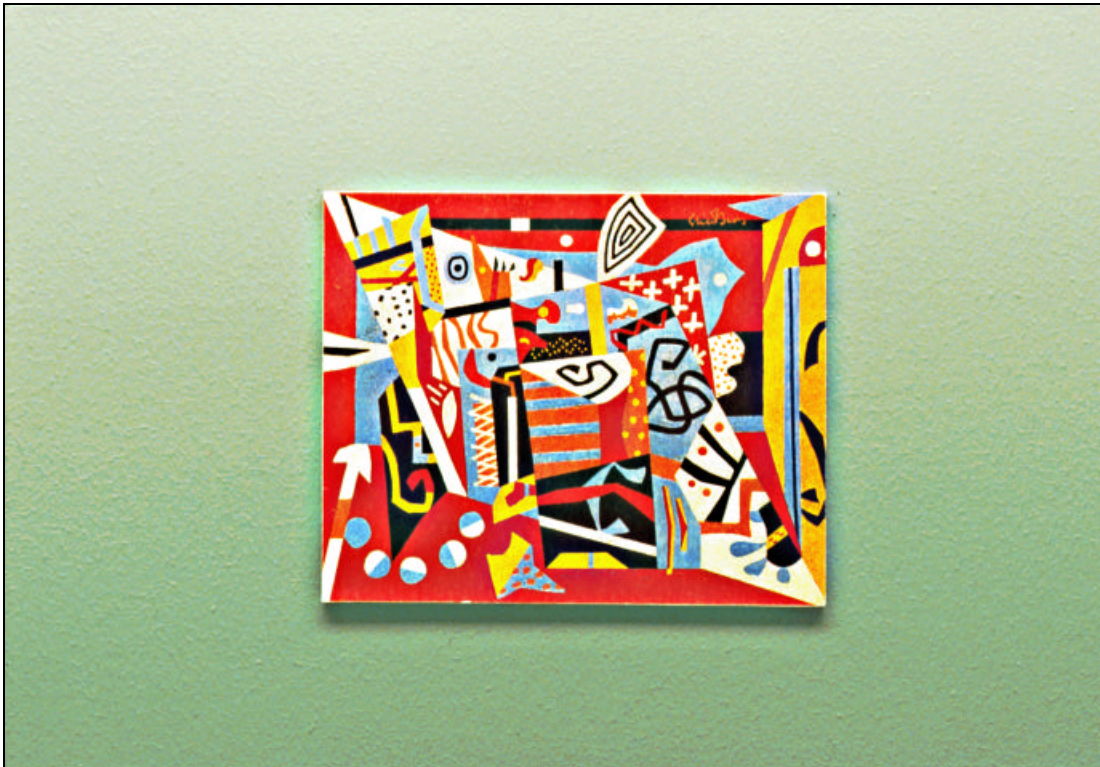


Abb. 150: Nahbetrachtung eines Bildes ohne Bilderrahmen mit umgebender Wandfläche W-4 beim Tageslichtkonzept 3



Abb. 151: Nahbetrachtung eines Bildes mit dem schwarzen Bilderrahmen mit umgebender Wandfläche W-4 beim Tageslichtkonzept 3



Abb. 152: Raummilieu ohne Bilderrahmen bei dem Tageslichtkonzept 3, W-4 und B-5

9. Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

Zusammenfassung

Die visuelle Wahrnehmung des Umgebungsraumes aus Sicht der ökologischen Optik steht in Beziehung zu den visuellen Informationen, die in der umgebenden optischen Anordnung enthalten sind. Diese Anordnung wird aus Licht, Oberfläche und Betrachter gebildet. In den Räumen, die mit Tageslicht belichtet werden, bestimmt zunächst das Lichtöffnungskonzept den Verlauf der Lichtverhältnisse und beeinflusst damit den Wahrnehmungszustand und das Raumerscheinungsbild. Man kann dabei in Museen je nach Öffnungsanordnung zwischen oberem Oberlicht, Oberlicht mit Seitenfenster, seitlichem Seitenfenster und hohem Seitenfenster unterscheiden. Das dadurch hereinfallende Tageslicht wird von der Oberfläche des Materials im Raum reflektiert und dadurch modifiziert bzw. strukturiert. Dieses sekundäre Licht enthält im Gegensatz zum primären Strahlungslicht die visuellen Informationen und ist daher von unserem Auge wahrnehmbar. Aus den oben erklärten Gründen können einerseits das Licht und die Materialoberfläche als Raumgestaltungsmittel begriffen werden. Andererseits stehen unsere optischen Sinnesorgane für die Entnahme der obengenannten visuellen Information zur Verfügung. Die grundlegenden Funktionen des menschlichen Auges sind die Akkommodation, Helligkeitsempfindung, Kontrastunterscheidung, Adaptation, Größekonstanz, Formkonstanz, Farbkonstanz und Täuschung. Durch diese Sehfunktionen nehmen wir Größe, Form, Farbe, Helligkeit, Abstand, Textur und Tiefe aus dem umgebenden Raum wahr. Darüber hinaus sind die Menschen aktiv wahrnehmende Wesen. Sie erkunden den umgebenden Raum bzw. die Umwelt mit Hilfe der Bewegungen des ganzen Körpers, des Kopfes und der Augen. Dieses Explorationsverhalten geht mit tätigkeitsabhängiger Gewichtung im Allgemeinen auf mindestens drei Erkundungsebenen, nämlich auf der mobilen, lokalen und fokussiven Ebene, vor sich. Die visuelle Wahrnehmung ist in Museen besonders gefordert. Der Museumsentwurf mit Tageslicht muss neben dem gewünschten architektonischen bzw. raumästhetischen Charakter auch der bestmöglichen Präsentation der Exponate, dem Lichtschutz der Exponate, der Schaffung des Komforts für Besucher, dem Sonnen- und Blendschutz und dem Bezug zur Umwelt gerecht werden.

Daher wurden in einer experimentellen Untersuchung die Auswirkungen auf den Wahrnehmungszustand und die Raumästhetik einer Bildergalerie in einem Modellraum unter dem Kunstlicht-Himmel untersucht, wobei drei unterschiedliche Oberlichtkonzepte, zwanzig Wand- und fünfzehn Bodenproben erfasst wurden. Das Tageslichtangebot weist in einem geografisch und geometrisch festgesetzten Raum eine durch Wetter, Tages- und Jahreszeiten bedingte Dynamik in der Intensität, der spektralen Zusammensetzung, der Farbtemperatur und der Lichtverteilung auf. Aus diesem Grund ist das Tageslichtangebot weder speicherbar noch beliebig einstellbar. Dagegen simuliert der Kunstlicht-Himmel die Tageslichtbedingung wunschgemäß, weshalb das ganze Experiment unter einem im Kunstlicht-Himmel simulierten völlig bedeckten Himmel durchgeführt wurde. Diese festgesetzte Himmelsbedingung ermöglichte den Vergleich der Auswirkungen der erprobten unterschiedlichen Konzepte und Varianten bezüglich der Tageslichtöffnung und Materialoberfläche. Der Prüfraum wurde als ein Modellraum im Maßstab 1:10 gebaut, da Experimente in diesem großen Maßstab im Vergleich zum Maßstab 1:1 den Vorteil haben, dass nicht nur weniger Aufwand an Zeit und Kosten entstehen, sondern auch eine einfachere visuelle bzw. fotografische Kontrolle der Lichtverhältnisse möglich war. Aus dem gleichen Grund wurde der Prüfraum so konzipiert, dass die variierenden Tageslichtsysteme und Bauteile durch die dort eingebauten Schienen schnell und einfach umgebaut bzw. ausgetauscht werden konnten. So konnten in einem einzigen Versuchsraum die Ergebnisse verschiedener Konzepte und Varianten untersucht bzw. zum Vergleich herangezogen werden. Außerdem ist der obengenannte Maßstab 1:10 des Modellraumes zur problemlosen Ermittlung der gewünschten Wirkungen in dieser Arbeit ausreichend. Darüber hinaus wurde der Modellraum maßstäblich detailgetreu konstruiert, um möglichst reale Resultate zu erzielen. Die fotografische Methode wurde hauptsächlich zur Erfassung der Ergebnisse angesichts der visuellen Wahrnehmung eingesetzt. Dabei wurde die Fotoaufnahme aus drei verschiedenen Positionen durchgeführt. In diesen Aufnahmen wurden entsprechend den oben erwähnten drei visuellen Erkundungsverhaltensebenen der Überblick über den Raum, ein Wandbereich und ein einzelnes Bild mit der unmittelbar dazu gehörenden Hintergrundwandfläche zu seiner Nah- bzw. Detailbetrachtung erfasst. Daneben wurde zusätzlich eine Lichtmessung zur Ermittlung des physikalischen Lichtverhältnis-

ses im Versuchsraum durchgeführt. Diese objektiven Ergebnisse wurden schließlich mit dem subjektiv wahrgenommenen Raummilieu verglichen.

Auf Grundlage des experimentell ermittelten Tageslichtquotienten wies der Versuchsraum aufgrund seiner unterschiedlichen Lichtverteilungen, die durch die erprobten Tageslichtkonzepte entstanden, einen anderen Charakter auf. Das Tageslichtkonzept 1 (Abb. 32) ließ von den erprobten drei Lichtkonzepten dieser Arbeit die größte Lichtmenge in den Versuchsraum herein. Das Tageslichtkonzept 1 verteilte dort das Tageslicht aber am ungleichmäßigsten wegen der zentral liegenden Dachöffnungsposition und des Aufbaus seines Lichtsystems. Der Tageslichtquotient war dabei in der Raummitte mindestens doppelt so hoch wie in den Wandzonen, innerhalb der Wandbereiche jedoch sehr ausgeglichen. Die Räume, die durch das Tageslichtkonzept 2 (Abb. 33) belichtet wurden, wiesen das gleichmäßigste Lichtverhältnis von den drei erprobten Tageslichtkonzepten auf. Dabei gab es fast keinen Unterschied in der Beleuchtungsstärke zwischen der Raummitte und den Wandzonen. Dieser Lichtverlauf beruhte vor allem auf der Lichteinlenkung zur Wandzone durch die Aluminiumraster, die direkt über die Raumdecke konstruiert wurden. Das Tageslichtkonzept 3 (Abb. 34) ergab im Vergleich zum Tageslichtkonzept 1 einen umgekehrten Verlauf des Tageslichtquotienten. Dabei wurde ein kontinuierlicher Abfall des Tageslichtquotienten vom Messpunkt P-4 (oberer Teil der Wand) über P-6 (unterer Teil der Wand) und bis P-7 (Raummitte) registriert. Die Wandzone wurde in so belichteten Räumen im Gegensatz zur Raummitte in doppeltem bis zu vierfachem Maße ausgeleuchtet. Diese Lichtverteilung war auf die Positionierung der Lichtöffnungen am Rand der Raumdecke und die Lichtabschirmung durch die undurchsichtige mittlere Raumdecke über der Raummitte zurückzuführen.

Hinsichtlich des subjektiv wahrgenommenen Raummilieus der erprobten Lichtkonzepte führten die fotografischen Beobachtungen im Vergleich zu den physikalisch erfassten Messergebnissen zu anderen Beurteilungen. Aufgrund der Helligdominanz bzw. Blendungen der Raumdecke und des Bodens vermittelte das Tageslichtkonzept 1 trotz des größten Lichtquantums innerhalb des Versuchsraumes nachfolgende fast ausschließlich negative Wirkungen in den Sehbedingungen und der Raumästhetik:

- Herabsetzung der visuellen Erkennbarkeit und der Aufmerksamkeit bei der Exponatbetrachtung
- Erkennungsschwierigkeit des Volumens und der Struktur des Raumes
- Der dadurch entstehende düstere Raumeindruck
- Die Anforderungen des länger andauernden Dunkeladaptationsvorgangs beim Blick- oder Ortswechsel von der helleren Besucherzone zu den dunkleren Ausstellungswandbereichen
- Die durch die obengenannten Nachteile auftretende psychologische Belastung und die frühere Ermüdung besonders bei langem Aufenthalt im Museumsraum

Dagegen wurde die Gewährleistung der störungsfreien Exponatbetrachtung innerhalb des gleichmäßig belichteten Wandbereiches als ein Vorteil des ersten Tageslichtkonzepts bewertet.

Das Tageslichtkonzept 2 konnte die oben erklärten Sehbeeinträchtigungen durch das Tageslichtkonzept 1, vor allem wegen des regelmäßigen Lichtverhältnisses im Versuchsraum, entweder verbessern oder beseitigen:

- Ausschluss oder kürzerer Zeitaufwand für den Dunkeladaptationsvorgang
- Eindeutige Reduzierung oder Aufhebung der Blendungen durch die Raumdecke und den Boden dank der teilweisen Lichtabschirmung und der Lichtablenkung
- Verstärkung der visuellen Aufmerksamkeit für die Ausstellungsobjekte
- Bessere visuelle Erfassbarkeit der Raumstruktur und des Raumumfangs und die daraus resultierende bessere Raumorientierung
- Der brillante und lebendige Raumeindruck aufgrund des Erhalts der ausgewogenen Lichtmenge und des qualitativ besten Zenitlichts auf der Wandzone
- Der bessere Sehkomfort und die geringere psychologische Belastung

Im Gegensatz dazu wurde die relativ unregelmäßige Lichtverteilung in der horizontalen Richtung innerhalb der Wand als ein Nachteil für die Bildbetrachtung beim Lichtkonzept 2 beobachtet. Dabei wurden die Bilder in den Randbereichen schwächer als in der mittleren Zone der Wand beleuchtet. Das führte zur zusätzlichen Sehkorrektur bzw. Adaptation bei Blickwechsel zwischen den Bildern.

Das Tageslichtkonzept 3 sicherte begründet durch das im vorigen Absatz erklärte Lichtverhältnis die nachfolgenden meistens vorteilhaften Auswirkungen auf die Exponatbetrachtung und die Raumästhetik.

- **Die verstärkte visuelle Aufmerksamkeit für die Gemälde aufgrund der betonten Erhellung in der Ausstellungswandzone im Vergleich zur Raummitte**
- **Verminderung oder Vermeidung der Sehstörungen durch die Helligkeitsdominanz und Blendungen der Raumdecke und des Bodens ohne gesonderte lichttechnische Maßnahmen**
- **Vermeidung der Reflexblendung der spiegelnden Wand- und Bild- bzw. Schutzglasoberfläche dank des steilen Lichteinfallswinkels von 75 Grad**
- **Die aus demselben Grund resultierende Steigerung der Plastizität bzw. Dreidimensionalität der Bild- und Wandtextur**
- **Die Raumaufteilung durch das Licht in die abgedunkelte Raummitte als die Besucherzone und in die hellere Wandzone zur Ausstellung**
- **Die dadurch auftretende gute Raumorientierung**
- **Bequeme Bildbetrachtung von der verdunkelten Besucherzone aus zu den helleren Ausstellungswandzonen in vollen Farbnuancen des Bildes**
- **langsamerer Ermüdungsprozess und der bessere Komfort des Besuchers aufgrund der obengenannten Vorteile**
- **Die regelmäßige Lichtverteilung des Wandbereichs in horizontaler Richtung**
- **Exzentrischer Raumeindruck**

Die zwiespältige Lichtsituation der Schattengrenze, die auf der Bildoberfläche durch die obere Bildrahmenkante wegen der steil herabfallenden Tageslichtstrahlung entstand, wurde jedoch als ein Nachteil des Tageslichtkonzepts 3 beurteilt.

Die Wandgestaltung übte einen entscheidenden Einfluss auf die Bildbetrachtung neben dem Räumerscheinungsbild aus. Aus diesem Grund wurden die Auswirkungen des Wandreflexionsgrads als das Hauptthema dieses Experimentes erachtet. Dabei brachte die Zunahme des Wandreflexionsgrads erwartungsgemäß eine Steigerung des Tageslichtquotienten parallel an allen Messpunkten des Versuchsraums. Aber diese Steigerungsgröße war beim Tageslichtkonzept 1 fast doppelt so hoch wie bei den Tageslichtkonzepten 2 und 3, dagegen bei den Licht-

konzepten 2 und 3 fast gleich. Der obengenannte Zuwachs des Tageslichtquotienten konnte aber im Versuchsraum weder Sehbedingungen noch das Raumer-scheinungsbild verbessern. Die Verminderung des Wandreflexionsgrads verschob die mittlere Leuchtdichte des Raumes und verstärkte dementsprechend die wahrgenommene Leuchtdichte der Exponate. Das brachte die nachfolgenden positiven Veränderungen bei der Wahrnehmung der Gemälde und des Raumes:

- Erhöhte Ausfindigkeitsgeschwindigkeit und die gewünschte Erkennungssicherheit der Ausstellungsobjekte
- Sichere Erfassbarkeit und beruhigendes Erscheinungsbild des Raumes
- Daraus resultierendes Hemmen der Ermüdung für den Museumsbesucher

Die niedriger reflektierenden Wände sowie Böden vermittelten einen rein optisch reduzierten bzw. gedämpften Raumeindruck. Dagegen ließ die Erhöhung des Wandreflexionsgrads den Versuchsraum rein optisch größer erscheinen, brachte jedoch keineswegs ein sichereres, sondern instabileres Raumer-scheinungsbild.

Die simultane Kontrastwirkung der Hintergrundwand bei der Nahbetrachtung der Bilder war um so direkter und größer. Dabei machte die Abnahme des Wandreflexionsgrades den Wahrnehmungszustand bei der Bildbetrachtung trotz der verminderten Beleuchtungsstärke stabiler. Daraus folgte die Steigerung der Sehleistungen, wie die visuelle Aufmerksamkeit, Erkennbarkeit bzw. Sensibilität, bei der Bild- und Detailbetrachtung. Im Gegensatz dazu beeinträchtigte die Wandoberfläche, die einen höheren Reflexionsgrad besitzt als die Bilder, den stabilen Wahrnehmungszustand aufgrund ihrer verstärkten Aufmerksamkeit. Besonders eine sehr hoch reflektierende Wand wie die Wandprobe W-1 (Reflexionsgrad 88 %) stellte einen extrem labilen Wahrnehmungszustand her, so dass man den Blick an einem Punkt des Gemäldes nicht ruhig halten konnte. Damit kamen als Folge die ständige Änderung der Akkommodation zwischen Bild- und Wandoberfläche, was zur psychologischen Belastung und schnelleren Ermüdung des Bildbetrachters führt.

Die visuelle Erkennbarkeit des Umrisses der schwarzen Skulptur wurde mit dem zunehmenden Reflexionsgrad der Hintergrundwand aufgrund des stärkeren

Schwarz-Weiß-Kontrasts erwartungsgemäß immer besser, die visuelle Wahrnehmung der Details jedoch unerwartet schlechter. Die Detailbetrachtung des Bildes wurde mit abnehmendem Reflexionsgrad der Hintergrundwand sogar besser trotz des geringeren Schwarz-Weiß-Kontrasts. Der Umriss der weißen Skulptur vor der niedrig reflektierenden Wand konnte auch wie erwartet visuell sehr deutlich erfasst werden. Im Gegensatz zu der schwarzen Skulptur waren die Details der weißen Figur bei allen unterschiedlich reflektierenden Hintergrundwänden optisch einwandfrei erfassbar. Dabei stieg die visuelle Erkennbarkeit der Details der weißen Figur mit der abnehmenden Leuchtdichte der Hintergrundwand an. Die unerwartete Wahrnehmungsschwierigkeit der Details der schwarzen Figur vor der höher reflektierenden Wand beruhte darauf, dass unser auf die mittlere Leuchtdichte des Blickfeldes eingestelltes Auge die niedrigere Leuchtdichte der Details der schwarzen Figur nicht empfinden konnte. Dagegen war die Wahrnehmbarkeit der Details der weißen Skulptur vor allen erprobten Wänden dadurch begründet, dass die Leuchtdichte der weißen Skulptur wegen deren hohen Reflexionsgrads die mittlere Leuchtdichte des Blickfeldes überstieg.

Hinsichtlich der Oberflächenbehandlungsart waren strukturierte Wände, z. B. eine verputzte Wand, modellierfähiger als unstrukturierte Wände. Dadurch wurde ein Versuchsraum mit strukturierten Wandoberflächen subjektiv tiefer und plastischer wahrgenommen. Dagegen wirkten sich strukturierte Wandoberflächen bei der Nahbetrachtung eines Bildes eher störend aus. Eine stärker gemusterte Wand führte ebenfalls zur Verminderung der Wahrnehmungskonzentration im Gegensatz zu einer schwächer gemusterten Wand. Darüber hinaus erhöhten glänzende Wandoberflächen im Vergleich zu matten Wandoberflächen den Helligkeitseindruck des Raumes. Glänzende Wände schufen aber aufgrund des Entmaterialisierungseffekts einen labilen Raumeindruck und setzten damit die Sehleistung herab.

Bei der Untersuchung des Bodens stieg der Tageslichtquotient an allen Messpunkten innerhalb des Versuchsraumes parallel mit dem zunehmenden Reflexionsgrad an. Trotz dieses Anstiegs brachte nicht der höher reflektierende, sondern der niedriger reflektierende Boden die folgenden Vorteile für das Raummilieu bzw.

die Sehleistung, was auf die optische Zurückhaltung des Bodens und die Verschiebung der mittleren Leuchtdichte des Raumes zurückzuführen ist:

- Verstärkter Festigkeits- bzw. Beständigkeitseindruck des Bodens und das dadurch aufkommende beruhigendere Raumerscheinungsbild
- Begrenzung der Reflexblendung des Bodens
- Die bessere Erfassbarkeit der Raumstruktur
- Die verstärkte Aufmerksamkeit für die Ausstellungsobjekte

Der höher reflektierende Boden, z. B. B-1 und B-2, ließ die Wände rein optisch zurücktreten. Dadurch wurde der Versuchsraum subjektiv weiter als normal wahrgenommen, aber nur bei der nichthelldominierenden Raumdecke, wie es bei Lichtkonzept 3 der Fall war. Der hell erscheinende Boden beim Lichtkonzept 1 verlieh dagegen aufgrund des optischen Zusammenhangs mit der helldominierenden Raumdecke einen erdrückenden Raumeindruck.

Die Helldominanz einer glänzenden Bodenoberfläche war ausgenommen von den eloxierten Metallbodenproben B-12 und B-13 stärker als die einer matten Bodenoberfläche. Der Boden und der Raum erschienen dadurch unsicher. Überraschenderweise konnten die Metallböden B-12 und B-13 trotz der hoch glänzenden Oberflächeneigenschaften ihre Helligkeitsüberlegenheit nicht so stark wie andere Böden ausspielen. Diese beiden Metallböden lieferten uns außerdem die irrealen visuellen Reize wegen der entmaterialisiert wirkenden Oberfläche, was damit ebenfalls zu einem labilen optischen Wahrnehmungszustand führte. Die als optisch weicher oder wärmer angesehenen Bodenmaterialien, z. B. Teppich und Holz, verliehen hinsichtlich der Materialart des Bodens erwartungsgemäß einen ruhigeren optischen Eindruck als die härter erscheinenden Böden, wie Metall, Granit oder Beton. Außerdem wurden die Farbbeeinträchtigungen auf die Bilder durch die Bodenreflexion fotografisch aufgenommen. Insbesondere der hoch glänzende buntfarbige Boden übertrug seine Farben von ihm und die der gegenüber stehenden Wand zu den Bildern an der Wand der anderen Seite. Dadurch wurde die Farbwiedergabe der Bilder beeinträchtigt. Derartige Sehstörungen, die bei den Lichtkonzepten 1 und 2 in hohem Maße vorhanden waren, fielen beim Lichtkonzept 3 wesentlich geringer aus.

Die Auswirkungen der Bilderrahmen auf das Raumerscheinungsbild sowie auf die Bildbetrachtung waren nicht zu unterschätzen. Die Farben der Bilderrahmen hatten dabei als das primäre Umfeld des Bildes einen beachtlichen Einfluss. Insbesondere die goldfarbigen Bilderrahmen vor einer roten Hintergrundwand ließen durch den Illusionseffekt eine verstärkte perspektivische Dreidimensionalität bzw. Plastizität im Raum entstehen. Die weißen Bilderrahmen führten aufgrund deren Helldominanz, besonders bei den niedriger reflektierenden Wänden, wie W-3, W-4, W-5 und W-13, einerseits zur Erhöhung der Geschwindigkeit der Bildwahrnehmung und andererseits zur erschwerten visuellen Erkennbarkeit des Bildinhaltes und der Raumstruktur. Im Vergleich zu den weißen Rahmen waren die schwarzen Rahmen keineswegs die dominierenden Elemente, auch vor den weißen Wänden trotz des vorhandenen großen Schwarz-Weiß-Kontrastes. Die schwarzen Bilderrahmen erhöhten trotzdem unsere visuelle Aufmerksamkeit auf die Bilder und die optische Stabilität des Raumes. Außerdem ließen die schwarzen Bilderrahmen den Raum flacher wirken als das bei den goldenen oder weißen Bilderrahmen der Fall war. Im Allgemeinen gewannen die Bilder mit den Rahmen im Vergleich zu den ungerahmten Bildern eine verstärkte Erkennbarkeit. Außerdem ließen die ungerahmten Bilder den Versuchsraum flacher, banal und bescheidener aussehen.

Schlussfolgerungen

Aus den Ergebnissen dieser experimentellen Untersuchung lassen sich die Schlussfolgerungen ziehen, dass die ökologische Optik als die angemessene theoretische Grundlage für die Raumgestaltung angenommen und in der Praxis weiter empfohlen werden sollte. Darauf aufbauend werden deshalb die bisher bekannten und neue Entwurfsmethoden der Museumsarchitektur durch das Tageslicht und die Materialoberfläche aus Sicht der ökologischen Optik auf ihre Richtigkeit überprüft. Dabei werden die subjektive physiopsychologische Sehfunktionsweise und die visuelle Erkundungstätigkeit der Menschen vorrangiger behandelt als die objektiven und physikalischen Messwerte. Die im Kapitel 2 diskutierte Behauptung, dass die Unterschiedsempfindlichkeit und damit die Sehschärfe generell bis ca. 500 cd/m^2 mit zunehmender Leuchtdichte erhöht werden kann, ist

daher nicht allgemein gültig. Die Untersuchung dieser Arbeit zeigt, dass eher das ausgewogene Lichtverhältnis bei der Sehleistung und bei der raumästhetischen Auswirkung die ausschlaggebendere Rolle spielt.

Als erste Referenz zur Raumgestaltung und Exponatbetrachtung unter dem Tageslicht wird die Lichteinführung in die Museumsräume durch die verschiedenen Tageslichtöffnungskonzepte und die zusätzlichen tageslichttechnischen Hilfen betrachtet. Aus den Resultaten dieser experimentellen Untersuchung werden die folgenden Entwurfsmethoden durch das Tageslicht insbesondere bei der oberen Oberlichtlösung hergeleitet.

- **Die Sehstörungen durch die starke Helligkeitsdominanz und die Blendungen der Raumdecke und des Bodens beim Tageslichtkonzept 1 sollen durch die Lichtabschirmung und -ablenkung korrigiert werden.**
- **Die Ausstellungsobjekte und -wandzonen müssen zur stabilen visuellen Wahrnehmung der Exponate und des Raumes mindestens gleich stark oder stärker als die übrigen Raumbereiche belichtet werden.**
- **Die Tageslichteinlenkung des Zenitlichts über die Gemälde und Wände ist sinnvoll für die Gewährleistung der besten Farbwiedergabe der Exponate und der brillanten Raumerscheinung.**
- **Die Raumaufteilung durch das Tageslicht in Beleuchtungsstärke und Belichtungsart ist zweckmäßig für die Charakterisierung bzw. Definition der unterschiedlich funktionierenden Raumzonen und die Schaffung des geeigneten Ambientes für die Ausstellung.**
- **Gravierende zwiespältige Belichtungssituationen innerhalb des Ausstellungsraumes und der Exponatoberflächen sollte vermieden werden.**

Als zweites Gestaltungsmittel steht die Materialoberfläche zur Verfügung. Die Ergebnisse des Experimentes dieser Arbeit lassen die folgenden relevanten Vorschläge für die Oberflächengestaltung des Museumsentwurfs zu.

- **Der Reflexionsgrad des Bodens und der Wand sollte zur Verstärkung der optischen Stabilität des Raumes und der Aufmerksamkeit der Exponate möglichst niedrig gehalten werden.**

- Die Leuchtdichte der Ausstellungswand (das Umfeld) sollte zur stabilen Exponatwahrnehmung einen niedrigeren Reflexionsgrad aufweisen als das Ausstellungsobjekt (das Infeld). Der im Kapitel 6 zitierte Vorschlag von Bartenbach und Witting für das ausgewogene Lichtverhältnis zwischen In- und Umfeld für den stabilen Wahrnehmungszustand (Abb. 34) ist eigentlich für Büroarbeitsplätze vorgesehen. Die Ergebnisse des Experiments dieser Arbeit lassen sich aber ebenfalls auf die Museumsplanung übertragen.
- Zur schnelleren Wahrnehmung der Skulpturen ist der größere Kontrast zwischen ihnen und der Hintergrundwand besser geeignet. Die Leuchtdichten der Skulpturen sollten für die sichere Erkennbarkeit der Details jedoch zumindest gleich stark oder stärker als die der Hintergrundwand sein.
- Das Grau als die Hintergrundwand wirkt neutral und unauffällig und verstärkt alle Farben der Exponate. Bei der Verwendung der farbigen Raumbegrenzungselemente sollte die optische Farbverschiebung der Exponate durch die simultane Kontrastwirkung und durch farbliche Reflexion beachtet werden.
- Eine matte Oberfläche ist zweckmäßig für einen sichereren Wahrnehmungszustand als eine glänzende Materialoberfläche. Die Wirkung des labilen Raumercheinungsbildes durch den glänzenden Boden sollte beachtet werden.
- Die Wirkungen auf die Sehkonzentration und das Raumercheinungsbild durch den Modelling-Effekt der Strukturierung der Wandoberflächen sollte mitgedacht werden.
- Die Materialart der Raumbegrenzungselemente sollte für die gewünschte Raumästhetik und das zur Ausstellungsart passende Raummilieu ausgewählt werden, da eine andere Materialart eine andere visuelle Beurteilung durch eine informativ andere Rückkoppelung vermittelt.

Die Bilderrahmen können über die Funktion des Bilderschutzes hinaus auch bewusst als ein Raumgestaltungsmittel eingesetzt werden. Durch deren Farbe und Reflexionsgrad können nicht nur die verstärkte Aufmerksamkeit der Bilder erhöht werden, sondern auch bestimmte raumästhetische Auswirkungen erzeugt werden.

Die oben dargelegten Entwurfsmethoden der musealen Raumgestaltung sollten schließlich mit dem im Kapitel 6 diskutierten menschlichen Erkundungsverhalten verknüpft werden. Die Beeinflussung der früheren Erfahrung und der momenta-

nen Emotion des Betrachters auf die visuelle Wahrnehmung kann aufgrund der extremen Subjektivität schwer festgestellt werden. Trotzdem darf man nicht vergessen, dass das Raumerlebnis ebenfalls von ihr sehr abhängig ist.

Literaturverzeichnis

- /1/ **Ahlheim, K.-H. / Grill, G. / Kneifel, D.:** Wie funktioniert das? Wetter und Klima
Meyers Lexikonverlag, Mannheim - Wien - Zürich (1989), S. 16-17, 82-85
- /2/ **Alonso, M. / Finn, E. J.:** Physik
Addison-Wesley, Bonn - München (1988), S. 576-579
- /3/ **Arnold W.** (Hrsg.): Farbgestaltung
VEB Verlag für Bauwesen, Berlin, 3.Auflage (1979)
- /4/ **Buntkiel-Kuck, K.:** Tageslichttechnik
Licht - Raum Raum - Licht / Die Inszenierung der Räume mit Licht, Hrsg. von
Schricker, R., Deutsche Verlags-Anstalt, Stuttgart (1994), S. 42-45
- /5/ **Bartenbach, C.:** Ergonomie des Sehens
8. Innsbrucker Licht-Kolleg, Lichttechnisches Ingenieurbüro Bartenbach, Inns-
bruck - München (1991), S. 7
- /6/ **Bartenbach, C. :** Neue Tageslichtkonzepte
Tageslicht, SLG-Tagungsband, Bern (1989), S. 61-67
- /7/ **Bartenbach, C. :** Neue Konzepte und Systeme für Seitenfenster
8. Innsbrucker Licht-Kolleg `Neue Licht-Konzepte für das Büro der Zukunft`,
Akzente Studiengemeinschaft, Aldrans (1991)
- /8/ **Bartenbach, C.:** Licht und Farbe
Firmen Broschüre, Bartenbach Lichtlabor, Aldrans/Innsbruck, S. 5
- /9/ **Bartenbach, C.:** Tageslicht – Kunstlicht
Licht - Raum Raum - Licht / Die Inszenierung der Räume mit Licht, Hrsg. von
Schricker, R., Deutsche Verlags-Anstalt, Stuttgart (1994), S. 22-39
- /10/ **Bartenbach, C.:** Tageslicht
Jahrbuch für Licht und Architektur 1995, Hrsg. von Flagge I., Ernst & Sohn
Verlag, Berlin (1996), S. 88-116
- /11/ **Bartenbach, C. / Witting, W.:** Licht- und Raummilieu
Bartenbach LichtLabor, Innsbruck (1997), S. 4 ff.
- /12/ **Bartenbach, C.:** Tageslicht und Kunstlicht im Museum
Innsbruck, Sonderdruck aus arcus, 1984 / 2
- /13/ **Bartenbach, C.:** Kunstmuseum Wolfsburg
Bartenbach Lichtlabor, Aldrans (1993)
- /14/ **Bartenbach, C.:** Die optische Wahrnehmung des Kunstwerks
Für das Kunstwerk Kunstmuseum Bern Atelier 5, R. Zaugg, Ammann Verlag,
Zürich (1983) S. 59-101

- /15/ **Bartenbach, C. / Klingler, M.:** Tageslicht
Sonderdruck Jahrbuch für Licht und Architektur 1995, Hrsg. von Flagge I.,
Ernst & Sohn Verlag, Berlin (1996), S. 88-115
- /16/ **Bartenbach, C. / Klingler, M. / Witting, W.:** Haus der Geschichte
Bartenbach L'chtLabor
- /17/ **Bartenbach, C. / Klingler, M. / Witting, W.:** Kunstmuseum Wolfsburg
Bartenbach L'chtLabor (1993)
- /18/ **Bartenbach, C. / Witting, W.:** Bildschirmarbeit in unterschiedlichem Licht
Sonderdruck Jahrbuch für Licht und Architektur 1995, Hrsg. von Flagge I.,
Ernst & Sohn Verlag, Berlin (1996), S.156-172
- /19/ **Bartenbach, C. / Witting, W.:** Der visuelle Raum aus der Sicht der ökologi-
schen Optik
Bartenbach LichtLabor, Innsbruck, S. 3
- /20/ **Bartenbach, C. / Witting, W.:** Erweitertes Theoretisches Leuchtdichtemodell
Wahrnehmungspsychologische Aspekte
Bartenbach LichtLabor, Innsbruck
- /21/ **Bartenbach Lichtlabor GmbH:** Bartenbach Lichtlabor / Firmenprofil und Refe-
renzen
Bartenbach Lichtlabor GmbH, Aldrans (1999)
- /22/ **Baumgartner, G. (Mitarb.) :** Sehen / Sinnesphysiologie 3
Physiologie des Menschen 13, Hrsg. von O. H. Gauer, K. Kramer und R. Jung,
Urban & Schwarzenberg, München- Wien - Baltimore (1978)
- /23/ **Bayerische Staatsgemäldesammlungen:** Ihm, welcher der Andacht Tempel
baut...
Karl M. Lipp Verlag, München (1986), S.194
- /24/ **Blaser, W.:** Mies van der Rohe / Die Kunst der Architektur
Verlag für Architektur Artemis, 5 Auflage, Zürich (1991), S.187
- /25/ **Boesiger, W. (Hrsg.):** Le Corbusier
Verlag für Architektur Artemis, Zürich, 6. Auflage (1972) S. 230-237
- /26/ **Boesiger, W. / Girsberger, H.:** Le Corbusier 1910-65
Birnenhäuser-Verlag für Architektur, Basel-Boston-Berlin (1999), S. 246-251
- /27/ **Böhm, Gottfried:** Vorträge, Bauten, Projekte / Gottfried Böhm
Hrsg. Von S. Raév, Krämer, Stuttgart / Zürich (1988), S. 204-207
- /28/ **Borger, H.:** Die Kölner Museen
Vista-Point-Verlag, Köln (1990), S.33-42, 66-67
- /29/ **Brawe, M.:** Das neue Museum und seine Einrichtung
Verlag Gerd Hatje, Stuttgart (1982), S.109-111

- /30/ **Brawe, M.:** Neue Museen
Hatje, Stuttgart (1965)
- /31/ **Brawne, M.:** Jørgen Bo, Vilhelm Wohlert / Louisiana Museum, Humlebæk
Ernst Wasmuth Verlag, Tübingen/Berlin (1993), S. 6
- /32/ **Büttiker, U.:** Louis I. Kahn: Licht und Raum
Birkhäuser Verlag, Basel – Berlin – Boston (1993), S. 142-147, 158-161
- /33/ **Campbell, F.W. / Maffei, L.:** Kontrast und Raumfrequenz
Wahrnehmung und visuelles System, Hrsg. von M. Ritter, Spektrum-der-Wissenschaft-Verlagsgesellschaft, Heidelberg (1987), S. 132-139
- /34/ **Campenhausen, C. von:** Die Sinne des Menschen
Georg Thieme Verlag, Stuttgart - New York (1981), S. 63-182
- /35/ **Corthésy, R. G.** (Hrsg.): Bartenbach Lichtlabor / Bauen mit Tageslicht, Bauen mit Kunstlicht
Vieweg, Braunschweig/Wiesbaden (1998), S. 20, 22
- /36/ **Daiber, H.:** Das Kgl. Kunstgebäude Stuttgart
Sonderdruck aus „Der Profanbau“, Verlag J.J. Arnd, Hrsg. Württembergischer Kunstverein Stuttgart, Leipzig (1998), S. 2-4
- /37/ **DIN:** DIN 5030 Teil 2 (Strahler für spektrale Strahlungsmessungen Auswahlkriterien)
Beuth Verlag, Berlin (1982)
- /38/ **DIN:** DIN 5031 Teil 1 (Strahlungsphysik im optischen Bereich und Lichttechnik)
Beuth Verlag, Berlin (1982)
- /39/ **DIN:** DIN 5031 Teil 2 (Strahlungsphysik im optischen Bereich und Lichttechnik)
Beuth Verlag, Berlin (1982)
- /40/ **DIN:** DIN 5031 Teil 3 (Strahlungsphysik im optischen Bereich und Lichttechnik)
Beuth Verlag, Berlin (1982)
- /41/ **DIN:** DIN 5033 Teil 1 (Farbmessung)
Beuth Verlag, Berlin (1979)
- /42/ **DIN:** 5033 Teil 8 Farbmessung
Beuth Verlag, Berlin (1982)
- /43/ **DIN:** DIN 5034 Teil 1 (Tageslicht in Innenräumen/Allgemeine Anforderungen)
Beuth Verlag, Berlin (1983)
- /44/ **DIN:** DIN 5034 Teil 2 (Tageslicht in Innenräumen/Grundlagen)
Beuth Verlag, Berlin (1985)
- /45/ **DIN:** DIN 5034 Teil 3 (Tageslicht in Innenräumen/Berechnung)
Beuth Verlag, Berlin (1994)

- /46/ **DIN:** DIN 5034 Teil 6 (Tageslicht in Innenräumen/Vereinfachte Bestimmung zweckmäßiger Abmessungen von Oberlichtöffnungen in Dachflächen)
Beuth Verlag, Berlin (1995)
- /47/ **DIN:** DIN 5035 Teil 1 (Beleuchtung mit künstlichem Licht)
Beuth Verlag, Berlin (1990)
- /48/ **DIN:** DIN 5035 Teil 2 (Beleuchtung mit künstlichem Licht)
Beuth Verlag, Berlin (1990)
- /49/ **DIN:** 5036 Teil 1 (Strahlungsphysikalische und lichttechnische Eigenschaften von Materialien)
Beuth Verlag, Berlin (1978)
- /50/ **DIN:** DIN 5045 Teil 6 (Tageslicht in Innenräumen)
Beuth Verlag, Berlin (1995)
- /51/ **DIN:** DIN 5340 (Begriffe der physiologischen Optik)
Beuth Verlag, Berlin (1996)
- /52/ **DIN:** DIN 6174 (Farbmetrische Bestimmung von Farbabständen bei Körperfarben nach der CIE LAB-Formel)
Beuth Verlag, Berlin (1979)
- /53/ **DIN:** DIN 6196 (Farbwiedergabe)
Beuth Verlag, Berlin (1976)
- /54/ **Dodt, E.:** Lichtsinn
Kurzgefasstes Lehrbuch der Physiologie, Hrsg. von W.-D. Keidel, Georg Thieme Verlag, Stuttgart - New York, 6. Auflage (1985), S.17.4
- /55/ **Epsten, D. B.:** Tageslicht & Architektur
Müller, Karlsruhe (1986)
- /56/ **Erco:** Lichtbericht 15 / Museum Abteiberg Mönchengladbach
Druckhaus Maack, Lüdenscheid (1982), S.53
- /57/ **Eysel, U.:** Sehen
Neuro- und Sinnesphysiologie, Hrsg. R. F. Schmidt, Springer-Verlag, Berlin - Heidelberg - New York, 2. Auflage (1995), S. 263-304
- /58/ **Eysel, U.:** Sehsystem
Lehrbuch der Physiologie, Hrsg. R. Klinke und S. Silbernagel, Georg Thieme Verlag, Stuttgart - New York, 2. Auflage (1996), S.585-610
- /59/ **Fachinformationszentrum Karlsruhe / Gesellschaft für wissenschaftlich-technische Information mbH:** Tageslichtsysteme
Bine Projekt Info-Service, Nr.2 / April (1993)

- /60/ **Falk, D. S. / Brill, D. R. / Stork, D. G.** : Ein Blick ins Licht
Springer / Birkhäuser Verlag, Berlin - Heidelberg / Basel - Boston - Berlin
(1990)
- /61/ **Filtzinger, P.**: Limesmuseum Aalen
Hrsg. v. der Gesellschaft zur Förderung des Württembergischen Landesmuseums
Stuttgart, Württembergisches Landesmuseum Stuttgart, 4. erweiterte
Auflage (1991)
- /62/ **Fischer, U.**: Tageslichttechnik
Verlagsgesellschaft Rudolf Müller, Köln - Braunsfeld (1982), S. 56-58, 62 ff.
- /63/ **Flagge, I.**: Architektur - Licht - Architektur
Karl Krämer Verlag, Stuttgart/Zürich (1991)
- /64/ **Flagge, I.**: Jahrbuch für Licht und Architektur 1995
Verlag für Architektur und technische Wissenschaften GmbH, Berlin (1996)
- /65/ **Flagge, I. / Stiftung Haus der Geschichte der Bundesrepublik Deutschland**
(Hrsg.): Haus der Geschichte
Gustav Lübbe Verlag, Bonn, S. 112-133
- /66/ **Fleig, K.**: Alvar Aalto
Band I 1922-1962, Verlag für Architektur Artemis, Zürich-München, 5. Auflage
(1990), S. 210-212
- /67/ **Flemming, G.**: Einführung in die Angewandte Meteorologie
Akademie-Verlag, Berlin (1991)
- /68/ **Freymuth, H.**: Tageslichttechnik im Museumsbau
Esslingen, J. Eberspächer-Firmendrucksache (1982), S. 22 ff.
- /69/ **Freymuth, H.**: Tageslichttechnische Entwurfsunterstützung am Beispiel von
Museumsräumen
Bauwelt, Heft 32 (1989)
- /70/ **Freymuth, H. / Lutz, P. / Jenisch, R. / Klopfer, H. / Krampf, L.**: Schall Wärme
Feuchte Licht Brand / Lehrbuch der Bauphysik
B. G. Teubner, Stuttgart (1989), S. 487-558
- /71/ **Freymuth, H.**: Licht
Lehrbuch der Bauphysik, Hrsg. von Lutz, P., B.G.Teubner, Stuttgart (1989),
S.489-560
- /72/ **Ganslandt, R. / Hofmann, H.**: Handbuch der Lichtplanung
Vieweg, Braunschweig/Wiesbaden (1992), S.79,236
- /73/ **Gekeler, H.**: Taschenbuch der Farbe
DuMont Buchverlag, Köln (1991)

- /74/ **Gibson, J. J.:** Die Sinne und der Prozess der Wahrnehmung
Huber, Bern - Stuttgart - Wien, 2. Auflage (1982), S. 219 ff., 260 ff, 317 ff.
- /75/ **Gibson, J.J.:** Wahrnehmung und Umwelt / der ökologische Ansatz in der visuellen Wahrnehmung
Urban & Schwarzenberg, München-Wien-Baltimore (1982), S. 23,49,53,56,69 ff.,75,77,307 ff.
- /76/ **Goldstein, E. B.:** Wahrnehmungspsychologie
Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg - Berlin - Oxford (1997), S.1-312
- /77/ **Grossmann, G. U.:** Architektur und Museum - Bauwerk und Sammlung / Das Germanische Nationalmuseum und seine Architektur
Verlag Gerd Hatje, Ostfildern-Ruit (1997), S.34
- /78/ **Grüsser, O.-J. / Grüsser-Cornehls, U.:** Gesichtssinn und Okulomotorik
Physiologie des Menschen, Hrsg. R. F. Schmidt und G. Thews, Springer-Verlag, Berlin - Heidelberg - New York, 26. Auflage (1995), S. 278-313
- /79/ **Grüsser, O.-J. / Grüsser-Cornehls, U.:** Physiologie des Sehens
Grundriß der Sinnesphysiologie, Hrsg. R. F. Schmidt, Springer-Verlag, Berlin - Heidelberg - New York, 2. Auflage (1976), S. 94-154
- /80/ **Grütter, J. K.:** Ästhetik der Architektur / Grundlagen der Architektur - Wahrnehmung
Kohlhammer, Stuttgart - Berlin - Köln - Mainz (1987), S. 19
- /81/ **Häckel, Hans:** Meteorologie
Ulmer, Stuttgart (1985)
- /82/ **Haferkorn, H.:** Optik / Physikalische - technische Grundlagen und Anwendungen
Johann Ambrosius Barth, Leipzig - Berlin - Heidelberg, 3. Auflage (1994)
- /83/ **Hagner, M.:** Zur Geschichte vom Licht im Auge und der Physiologie des Druckphosphens im Verhältnis zu jeweils zeitgenössischen Sehtheorien
Dissertation, Berlin (1987)
- /84/ **Hartmann, E.:** Licht und Mensch
Handbuch für Beleuchtung, Hrsg. Von SLG, ecomed-Fachverlag, Landsberg, 5. Auflage (1992), Kapitel I-2
- /85/ **Hauske, G.:** Systemtheorie der visuellen Wahrnehmung
Teubner, Stuttgart (1994), S.63
- /86/ **Hentschel, H.-J.:** Licht und Beleuchtung / Theorie und Praxis der Lichttechnik
Hüthig, Heidelberg, 2. Auflage (1982), S.71-72,240-243
- /87/ **Hentschel, H.-J.:** Zur Frage der leistungsorientierten Bewertung der Beleuchtung
Lichttechnik 23 Nr.5 (1971), S. 304-307

- /88/ **Heusler, W.:** Experimentelle Untersuchung des Tageslichtangebotes und dessen Auswirkungen auf die Innenraumbeleuchtung
Dissertation, Technische Universität Berlin (1991), S.101,104
- /89/ **Hilbert, G.S.:** Lichtschutz / Die Empfindung der 50 Lux
Restauro 4/97, Zeitschrift, S.238-239
- /90/ **Hilbert, G.S.:** Museum und Ausstellung
Handbuch für Beleuchtung, Hrsg. Von SLG, ecomed-Fachverlag, Landsberg, 5. Auflage (1992), Kapitel II-3.3
- /91/ **Hilbert, G.S.:** Sammlungsgut in Sicherheit
Mann Verlag, Berlin, 2. Auflage (1996), S. 68,88,89,97-105
- /92/ **Hubel, D. H.:** Auge und Gehirn / Neurobiologie des Sehens
Spektrum-der-Wissenschaft-Verlagsgesellschaft, Heidelberg, 2. Auflage (1990), S. 45ff, 165 ff.
- /93/ **Hubert, B. J.:** Louis I. Kahn, Le Yale Center for British Art
Éditions Parenthèses, Marseille (1992)
- /94/ **Institut für Tageslicht – Technik Stuttgart (ITT):** Tagesbeleuchtung durch Lichtkuppeln
Mitteilungen NR.7 (1965), S.3-5
- /95/ **Joedicke, J.:** Raum und Form in der Architektur
Karl Krämer, Stuttgart (1985), S. 8-24,106-107
- /96/ **Klotz, H. / Krause, W.:** Neue Museumsbauten in der Bundesrepublik Deutschland
Klett-Cotta, Stuttgart (1985), S. 62,76,101
- /97/ **Kluxen, Guido:** Ungeahnte Bilder / über die Wahrnehmungen zusätzlicher Seheindrücke
Kaden Verlag, Heidelberg (1992), S.157
- /98/ **Koretz, J. F. / Handelman, G, H.:** Altersweitsichtigkeit
Physiologie der Sinne, mit einer Einf. Von H. P. Zenner und E. Zrenner, Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg(1994), S.68-75
- /99/ **Krochmann, J.:** Farbänderungen durch optische Strahlung an museumstypischen Materialien
Museumskunde, Band 51, Heft 1, Hrsg. Vom Deutschen Museumsbund (1986), S.155-164
- /100/ **Krochmann, J.:** Neuere vom Tageslicht in Innenräumen
Lichttechnik, 16.Jahrgang, Nr.12 (1966), S. 585-590
- /101/ **Krochmann, J.:** Über die Horizontalbeleuchtungsstärke der Tagesbeleuchtung
Lichttechnik, 15.Jahrgang, Nr.11 (1963), S. 559-562

- /102/ **Krochmann, J.:** Über die Berechnung des Himmelslichtanteils und des Außenreflexionsanteils des Tageslichtquotienten
Lichttechnik, 20.Jahrgang Nr.7, (1968)
- /103/ **Krochmann, J.:** Über die Berechnung des Tageslichtquotienten beim klarem Himmel
Lichttechnik, 17.Jahrgang, Nr.8 (1965), S. 91A-94A
- /104/ **Krochmann, J. / Aydinli, S.:** Farbänderungen durch optische Strahlung an museumstypischen Materialien
PRC Krochmann GmbH, Berlin (1987), S.13-14,54-55
- /105/ **Kröller-Müller Foundation:** Kröller-Müller Museum
Joh. Enschedé en Zonen Grafische in Richting B.V, Otterlo, Holland (1981), S. 26-29
- /106/ **Krystek, M. :** Optische Strahlung und ihre Messung
Lehrbuch der Experimentalphysik von Bergmann und Schaefer / Band III Optik, Hrsg. von N. Heinz, Walter de Gruyter, Berlin - New York, 9. Auflage (1993), S. 675
- /107/ **Küppers, H.:** Farbe
Callwey, München, 4. Auflage (1987)
- /108/ **Küppers, H.:** Harmonielehre der Farbe / theoretische Grundlagen der Farbgestaltung
DuMont Buchverlag, Köln (1989)
- /109/ **Lam, W.M. C.:** Sunlighting as Formgiver for Architecture
Van Nostrand Reinhold Company, New York, 1986
- /110/ **Lambot, L. (Hrsg.):** Norman Forster / Buildings and Projects of Forster Associates
Ernst & Sohn, Berlin (1989), S. 89-120
- /111/ **Lampugnani, V. M.:** Museumsarchitektur in Frankfurt 1980-1990
München, Prestel-Verlag (1990)
- /112/ **Lang, H.:** Farbmetik
Lehrbuch der Experimentalphysik von Bergmann und Schaefer / Band III Optik, Hrsg. von N. Heinz, Walter de Gruyter, Berlin - New York, 9. Auflage (1993), S.665-685
- /113/ **Landt, A.:** Leica R7
Laterna Magica, München (1992), S.53-68
- /114/ **Lichtplanung Christian Bartenbach:** Kunstlicht Himmel
Bartenbach Lichtlabor, Aldrans (1992)
- /115/ **Liljequist, H.:** Allgemeine Meteorologie
Friedr.Vieweg & Sohn, Braunschweig - Wiesbaden, 3. Auflage (1984), S.16, 18

- /116/ **Malberg, H.:** Meteorologie und Klimatologie
Springer, Berlin - Heidelberg - New York - Tokyo (1985)
- /117/ **Masland, R. H.:** Die funktionelle Architektur der Netzhaut
Physiologie der Sinne, mit einer Einf. Von H. P. Zenner und E. Zrenner, Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg (1994), S.94-103
- /118/ **Marx, E.:** Farbintegration und Simultankontrast
Muster - Schmidt Verlag, Göttingen - Zürich (1989), S.14, 15, 39, 85
- /119/ **Methling, D. / Peschke, M.:** Licht, Beleuchtung und Sehen
Verlag Tribüne, Berlin (1978), S. 44-48, 150, 158, 161
- /120/ **Montaner, J. M.:** Neue Museen / Räume für Kunst und Kultur
Krämer, Stuttgart - Zürich (1990), S.91,95
- /121/ **Montaner, J. M. / Oliveras, J.:** Die Museumsbauten der neuen Generation
Krämer, Stuttgart (1987), S. 51-52,123
- /122/ **Moore, F.:** Concepts and practice of architectural daylighting
Van Nostrand Reinhold Company, New York (1985)
- /123/ **Mundt, B.:** Die deutschen Kunstgewerbemuseen im 19.Jahrhundert
München, Prestel-Verlag (1974)
- /124/ **Neisser, U.:** Kognition und Wirklichkeit
Verlagsgemeinschaft Klett - Cotta, Stuttgart (1979), S.21, 26-29, 55
- /125/ **Newhouse, V.:** Wege zu einem neuen Museum / Museumsarchitektur im 20. Jahrhundert
Verlag Gerd Hatje, Osterfeldern-Ruit (1998), S.167
- /126/ **Ochs H. (Bearb.):** Architekt für Berlin 1921-1983 / Werner Düttmann / Verliebt ins Bauen
Birnenhäuser, Basel-Berlin-Boston (1990), S. 104-117
- /127/ **Pehnt, W.:** Hans Hollein Museum in Mönchengladbach / Architektur als Collage
Fischer Taschenbuch Verlag, Frankfurt (1986), S.40-41
- /128/ **Pehnt, W. / Strohl, H.:** Rudolf Schwarz / Architekt einer anderen Moderne
Verlag Gerd Hatje, Osterfeldern-Ruit (1997), S.174
- /129/ **Piano, R.:** Mein Architektur-Logbuch
Verlag Gerd Hatje, Osterfeldern-Ruit (1997), S. 38-47,70-77
- /130/ **Plagemann, V.:** Das deutsche Kunstmuseum 1790-1870
München, Prestel-Verlag (1967), Tafelteil 123,124

- /131/ **Preiß, A.:** Das Museum und seine Architektur / Wilhelm Kreis und der Museumsbau in der ersten Hälfte des 20. Jahrhunderts
Verlag und Datenbank für Geisteswissenschaften Alfter, Habilitation an der Wuppertal Uni. (1993), S.217
- /132/ **Probst, S. / Schädlich, C.:** Walter Gropius
Band 2, Ernst & Sohn, Berlin (1987), S. 60
- /133/ **RAL:** RAL / Farbenübersicht RAL - K1
RAL, Bonn (1981)
- /134/ **Ramachandran, V. S.:** Kompensation des blinden Flecks
Physiologie der Sinne, mit einer Einf. Von H. P. Zenner und E. Zrenner, Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg (1994), S.114-120
- /135/ **Rattunde R.:** Optimierung der Tageslichtbeleuchtung großer Räume durch Oberlichter unter Berücksichtigung des zur Verfügung stehenden Tageslichtes
Dissertation, Technische Universität Berlin (1980), S.67
- /136/ **Reinhold-Postina, E.:** Tageslicht in Museen
Lichtbericht 20/21, ERCO, Lüdenscheid (1985), S.52-56
- /137/ **Ritter, M.:** Wahrnehmung und visuelles System
Hrsg. von M. Ritter, Spektrum-der-Wissenschaft-Verlagsgesellschaft, Heidelberg (1987)
- /138/ **Rock, I.:** Wahrnehmung / Vom visuellen Reiz zum Sehen und Erkennen
Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg-Berlin (1998), S.96-125
- /139/ **Rohde, M. F.:** Licht für Stätten der Kunst
Licht - Raum Raum - Licht / Die Inszenierung der Räume mit Licht, Hrsg. von Schrickler, R.,
Deutsche Verlags-Anstalt, Stuttgart (1994), S.122-131
- /140/ **Roth, Günter D.:** Sterne und Planeten
BLV Verlagsgesellschaft mbH, München - Wien - Zürich (1972), S.19, 34
- /141/ **Schild, E / Casselmann, H.-F. / Dahmen, G. / Pohlenz, R.:** Bauphysik / Planung und Anwendung
3. Auflage, Friedr.Vieweg & Sohn, Braunschweig - Wiesbaden (1982), S.68-101
- /142/ **Schivelbusch, W.:** Licht, Schein und Wahn
Ernst & Sohn, Berlin (1992), S.36
- /143/ **Schmielau, F.:** Einführung in die Sinnesphysiologie
Teubner Studienbücher der Biologie, Hrsg. von H. Stieve und E. Hildebrand, B. G. Teubner, Stuttgart (1987), S. 50-75

- /144/ **Schnaph, J. L. / Bayler, D. A.:** Die Reaktion von Photorezeptoren auf Licht
Physiologie der Sinne, mit einer Einf. Von H. P. Zenner und E. Zrenner, Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg (1994), S. 92
- /145/ **Schober H. / Rentschler I.:** Das Bild als Schein der Wirklichkeit
Moos Verlag, München (1979), S.10
- /146/ **Schricker, R.:** Licht - Raum Raum - Licht
Stuttgart, Deutsche Verlags-Anstalt (1994)
- /147/ **Schubert, H.:** Moderne Museumsbau
Stuttgart, Deutsche Verlags-Anstalt (1986), S. 8-9, 32, 55, 169
- /148/ **Schweger, P.P. / Wöhler, F. / Reifenstein, H. / Kohl, B. / Schneider, W.:**
Kunstmuseum Wolfsburg
Ernst & Sohn, Berlin (1994), S. 32-33
- /149/ **Schweizerische Lichttechnische Gesellschaft** (Hrsg.): Handbuch für die
Beleuchtung
Ecomed, Landsberg, 5. Auflage (1992), Kap. I-5
- /150/ **Siemens AG.:** Design & Licht
Erlangen, 1. Jahrgang September 2/1991
- /151/ **Silbernagl, S. / Despopoulos, A.:** Taschenatlas der Physiologie
Georg Thieme Verlag, Stuttgart - New York, 4. Auflage (1991), S. 300-315
- /152/ **Spieser, R./ Herbst, C.-H./ Höfler, K./ Wuillemin, A.O.:** Handbuch für Beleuchtung
Essen, Verlag W. Girardet (1975)
- /153/ **Steele, J.:** Museums Bilder
Berlin, Ernst & Sohn (1994)
- /154/ **Stolzenberg, K.:** Lichttechnische Gütermerkmale der Innenraumbeleuchtung
Handbuch für Beleuchtung, Hrsg. Von SLG, ecomed-Fachverlag, Landsberg,
5. Auflage (1992), Kapitel II-1.2, S.11-18
- /155/ **Szerman, M.:** Auswirkung der Tageslichtnutzung auf das energische Verhalten von Bürogebäuden
Doktorarbeit, Uni. Stuttgart (1994)
- /156/ **Tipler, P. A.:** Physik
Hrsg. von D. Gerlich / G. Jerke, Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg - Berlin - Oxford (1994), S. 1007 ff.
- /157/ **Vierneisel, K. / Leinz, G.** (Hrsg.): Glyptothek München 1830-1980
Prestel, München (1980), S. 198
- /158/ **Warnecke, G.:** Meteorologie und Umwelt
Springer-Verlag, Berlin - Heidelberg - New York (1991)

- /159/ **Wegner, J.:** Berechnung der mittleren Beleuchtungsstärke durch Tageslicht in Innenräumen auf der Grundlage der mittleren Leuchtdichteverteilung des Himmels
Dissertation, Technische Universität Berlin (1975)
- /160/ **Wimmer, H. / Perner, J.:** Kognitionspsychologie
Verlag W. Kohlhammer, Stuttgart - Berlin - Köln - Mainz (1979)
- /161/ **Wittling, W.:** Einführung in die Psychologie der Wahrnehmung
Hoffmann und Campe, Hamburg (1976), S.34-40
- /162/ **Witting, W.:** Psychologische Grundlagen und physiologische Mechanismen der visuellen Wahrnehmung
Barthenbach Lichtlabor, Aldrans (1995)
- /163/ **Witting, W.:** Lichttechnische Grundlagen
Barthenbach Lichtlabor, Aldrans (1995)
- /164/ **Zajonc, A.:** Die gemeinsame Geschichte von Licht und Bewußtsein
Rowohlt, Reinbek bei Hamburg (1994)
- /165/ **Zaug, R.:** Gespräche mit Jean-Christophe Ammann Portrait
Cantz-Parkett, Stuttgart (1994), S. 220
- /166/ **Zimbardo, P. G.:** Psychologie
Hrsg. von S. Hoppe-Graff und B. Keller, Springer-Verlag, Berlin - Heidelberg - New York, 5.Auflage (1992), S.137-150
- /167/ **Zürcher, C. / Frank, T.:** Bauphysik / Bau und Energie
Hochschulverlag AG an der ETH Zürich und B.G. Teubner, Stuttgart (1998), S.97-108