

ZUR WIRKUNG VON GLASFARBLICHT IN HÖFISCHEN INTERIEURS. LICHTTECHNISCHE ASPEKTE DER FARBGLÄSER

Tadeusz Krzeszowiak

Abstract Mit der Frühen Neuzeit beginnt eine rasante Entwicklung der Technologien auf dem Gebiet der Farbgläser und auf dem Gebiet der Beleuchtung. Lichtquellen waren einerseits das natürliche Tageslicht und andererseits künstliches Licht in Form von Kerzen aus Talg oder Wachs, die eine Beleuchtung des Innenraums ermöglichten. In Verbindung mit dem Aufkommen von verbesserten Glasmasserezepten des venezianischen Cristallo, des englischen Bleiglasses, aber auch mit dem gezielt vollfarbigen, opaken Glas sowie komplexeren Oberflächengestaltungstechniken wurden völlig neue Lichteffekte erzeugt. Dieser Beitrag erläutert die Wirkungen unterschiedlichen Lichts auf verschiedene Glassorten und Glasfarben aus lichttechnischer Perspektive.

Keywords Farbglas, subtraktive Farbmischung, additive Farbmischung, Wirkung einer Lichtquelle mit Glassorten, Einfluss der Dicke eines Glaskörpers auf die Lichterscheinungen, Brechung durch prismatischen Schief, Bündelung des Lichts in linsenförmigen Gläsern

1 Gekrümmtes Glas und die additive und subtraktive Farbmischung

Eine Reihe von technischen Erfindungen im Feld der Beleuchtung prägen die Frühe Neuzeit: Leonardo da Vinci erfand eine Lampe mit farbigen Strahlen, die fokussiert werden konnten. Aimé Argand präsentierte eine Lampe, die etwa 10-mal heller leuchtete als eine gewöhnliche Kerze. Isaac Newton experimentierte mit Sonnenstrahlen, Prismen und Linsen. Johann Lambert formulierte das Verhalten der reflektierten Strahlen, die auf eine matte Fläche auffallen oder durch ein Medium hindurchgehen. Willebrord Snellius hinterließ uns unter anderem das Reflexionsgesetz (Einfallswinkel = Ausfallswinkel). Die Fortschritte der Alchemie und der Glasproduktion brachten eine große Vielfalt an prachtvollen Farbgläsern hervor, die in Verbindung mit natürlicher oder künstlicher Beleuchtung zu völlig neuen Wirkungen führten. Die naturwissenschaftlichen Entdeckungen und Erfindungen dieser Zeit waren die allerersten Grundlagen für die Beschreibung der Interaktion zwischen Lichtquelle, Objekt und Beobachter und



Abbildung 1. Die Schusterkugel, nach dem Prinzip von Leonardo da Vinci, mit einer dünnen Wickelwachs-Kerze, drei Kugeln ohne Flüssigkeiten an einem Trapez-Holzgehäuse.



Abbildung 2. Drei Kugeln mit Flüssigkeiten – Rotwein, Safranextrakt (Gelb) und Lackmusextrakt (Blau). Die Kugeln wirkten als Farbfilter und zugleich als Sammellinsen und fokussierten die Lichtstrahlen.

führten letztlich zur Formulierung der bis heute in der Optik geltenden physikalischen Gesetze.¹

In diese Zeit fällt auch die exakte Trennung der Farbmischverfahren in ein subtraktives und ein additives Verfahren: Die Erfindung von Leonardo da Vinci 1487 bestand aus einer Kerze, die sich in der Mitte einer speziell gefertigten Hohlkugel befand.² Die Kugel wirkte dabei als eine plan-konvexe Linse und fokussierte die Strahlen der Kerze rund um die ganze Kugel. Die andere Ausführung dieser Idee bestand aus einer Kerze, um die herum sich vier Glaskolben befanden, die mit Flüssigkeiten gefüllt waren (Abb. 1). Im ersten Kolben befand sich klares Wasser, im zweiten klarer Rotwein, im dritten ein Extrakt von Safran (Gelb) und im vierten ein Extrakt von Lackmus (Blau) (Abb. 2). Durch die Mischung von Safranextrakt mit Lackmusextrakt ergab sich eine neue Farbe im Kolben, nämlich Grün (Abb. 3). Da die Intensität der durch den Kolben hindurchgehenden Kerzenstrahlen stetig abnahm, nannte da Vinci diese Art der Mischung eine »subtraktive« Mischung. Heute, nachdem seit circa einhundert Jahren lichttechnische Messgeräte zur Verfügung stehen und genaue Laboruntersuchungen durchgeführt werden können, wissen wir, dass diese Art der Mischung korrekt »multiplikative Farbmischung« heißen muss.

1 So zum Beispiel dem Brechungsgesetz von Snellius (1613) oder das Schichtdicke-Absorptionsgesetz von Bouguer (1729).

2 Da Vinci 1487. Die Idee und die Handzeichnung sind 1487 datiert.

Abbildung 3. Wirkung der grünen Kugel – subtraktive Mischung der Flüssigkeiten Safran (Gelb) und Lackmus (Blau) zur Farbe Grün. Die resultierende Misch-Flüssigkeit wird in Transparenz immer dunkler, deshalb auch der frühere Name: subtraktive Farbmischung.

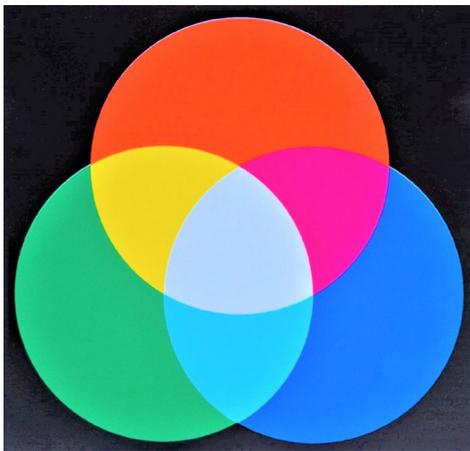


Abbildung 4. Prinzip der additiven Farbmischung: Werden alle drei Kreise der Grundfarben überlappt, entsteht der Eindruck der Farbe Weiß (L – Leuchtdichte in Nit); $L_{\text{weiß}} = L_R + L_G + L_B$.

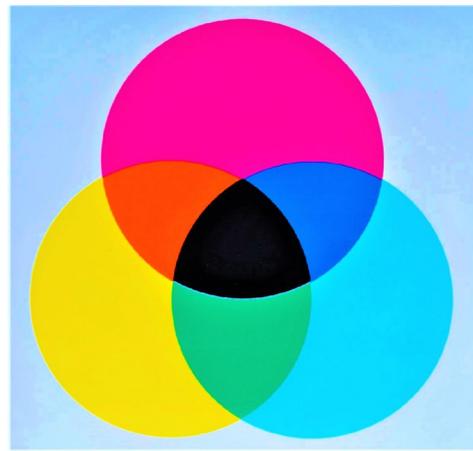


Abbildung 5. Prinzip der subtraktiven (multiplikativen) Farbmischung: Werden alle drei Farben (z.B. Flüssigkeiten) gemischt, entsteht die »Farbe« Schwarz (Leuchtdichte $L = 0$ nt).

Dies ergibt sich aus der präzise aufgestellten wissenschaftlichen »Farbmetrik«.³ Die andere, viel häufigere Art der Farbmischung ist unter dem Namen »additive Farbmischung« bekannt.⁴ Die beiden Arten der Farbmischung ergänzen sich, das heißt, die Primärfarben der einen Mischung sind die Sekundärfarben der zweiten Form und umgekehrt (Abb. 4, 5). Dem Begriff der »multiplikativen (nach Leonardo subtraktiven) Farbmischung« steht also der Begriff der »additiven Farbmischung« gegenüber (Abb. 6).

3 Richter 1981, S. 42 und S. 74.

4 Greisenegger /Krzyszowiak 2008, S. 95.

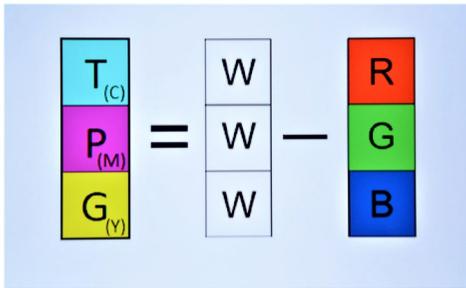


Abbildung 6. Wechselwirkung der subtraktiven und additiven Farbmischung: symbolisch, z. B. T (Türkis) = W (Weiß) – R (Rot). Weil Weiß aus drei Farben (Rot + Grün + Blau) zusammengesetzt ist, bleibt nach dem Abziehen von Rot von Weiß nur Grün und Blau. W (Weiß) – R (Rot) = G (Grün) + B (Blau). Die Mischung von Grün und Blau ergibt T (Türkis).

Leonardos Erfindung veränderte die Beleuchtungsmöglichkeiten in Innenräumen. Es war nun möglich, am Hof oder aber auch im Theater das Licht der Kerzen durch die mit Flüssigkeit gefärbten Kolben hindurchzulenken. Diese Erfindung färbte die ausgehenden Strahlen der Kerzen, und zugleich konnte man durch die Wirkung der gekrümmten Glaskolben als doppelten Sammellinsen die Strahlen fokussieren. Man erhielt damit die Verfärbung der sonst gelblichen Kerzenstahlen zu einer ausschließlich roten, blauen und grünen Erscheinung. Der Lichtfleck war um ein Vielfaches heller und brillanter als die von einer bloßen Kerze divergent ausgehende schwache Strahlung. Der Lichtfleck bewegte sich noch dazu im Rhythmus der Bewegung der Kerzenflamme und erzeugte damit eine geradezu illusionistische und vermutlich für die Zeitgenossen faszinierende Erscheinung.

2 Natürliches Licht als Lichtquelle

Die Interaktion des natürlichen Lichts mit Glasobjekten kann in vier Kategorien unterteilt werden. Die ersten beiden betreffen die Art und Intensität des natürlichen Lichts, nämlich durch direkte Sonnenstrahlung oder indirekt durch einen wolkenbedeckten Himmel. Bei den beiden anderen handelt es sich um die Art der Beobachtung der Glasobjekte: ob sie im Durchlicht oder im Auflicht betrachtet werden. Das sichtbare Spektrum der Sonne ist ein kontinuierliches Spektrum, bei der eine Farbe in die andere übergeht, was durch die sieben Farbanteile (Violett, Blau, Türkis, Grün, Gelb, Orange, Rot) bezeichnet wird.

Bei Sonnenaufgang oder Sonnenuntergang ist das Farbspektrum nahezu identisch (vorwiegend orangerote Anteile), und die Farbtemperatur beträgt etwa 3.000 Kelvin. Wenn die Sonne im Zenit steht, ist das Spektrum ausgeglichen, das heißt, fast alle Farbanteile sind gleich und die Farbtemperatur beträgt um 5.500 Kelvin (neutralweißes Licht). Trifft das Licht auf ein Glas, wird ein Teil davon durch Reflexion an der Oberfläche zurückgeworfen, ein Teil durch die Absorption im Glas zurückgehalten und ein weiterer durch Transmission hindurchgelassen. Was der Betrachter (genauer: das

Sehsystem des Menschen) bei der Beobachtung des Farbglases unter Sonneneinstrahlung als Farbeindruck wahrnimmt, ist immer ein integrierter, über alle Wellenlängen des Lichts (380 bis 780 Nanometer) gesamter Eindruck der Sonnenstrahlung und zugleich der spektralen Eigenschaften des Glases: Im Falle des »Durchlichts« ist die physikalische Eigenschaft seine spektrale Durchlässigkeit. Im Falle des »Auflichts« ist es die spektrale Reflexion des Glases.

2.1 Farbglas im Durchlicht

Zwei Beispiele sollen die Wirkung des Lichts mit Farbgläsern illustrieren. Stellen wir uns vor, dass die Sonne im Zenit steht und wir dabei ein rotes Farbglas im Durchlicht betrachten. Da die spektrale Durchlässigkeit des roten Glases erst ab etwa 620 Nanometer relevant ist, wird nur der Farbanteil Rot ins Auge durchgelassen. Alle restlichen Anteile der Farben der Sonne werden im Glas vorwiegend absorbiert. Das Glas erscheint uns dadurch rot. Bei grünem Glas liegt die relevante Durchlässigkeit bei etwa 510 bis 530 Nanometer. Dadurch werden alle restlichen Anteile der Spektralfarben der Sonne im Glas absorbiert und nur der Grünanteil ausfiltriert und durchgelassen. Uns erscheint das Glas grün. Wenn die Glasmasse des Objekts nicht milchig (matt), sondern klar ist, werden die durchgelassenen Strahlen der Sonne sehr prägnant und farbkünftig zu sehen sein.

2.2 Farbglas im Auflicht

Die Lichtreflexion des farbigen Glases ist stark abhängig vom Einfallswinkel der Sonnenstrahlen und der Struktur der Oberfläche (klar, matt, glatt oder dekoriert). Wie die Messungen zeigten, ist der Reflexionsgrad beim Einfallswinkel zwischen 0° (senkrecht zur Oberfläche) und etwa 50° fast konstant und liegt zwischen 10 und 20 %. Ab etwa 70° Einfallswinkel steigt der Reflexionsgrad rapide an – beginnend mit 50 % bei fast gleitendem Einfallstrahl (um 90°) bis zu nahe 100 %. Ist der Hintergrund hinter dem Glas dunkel oder schwarz und die Sonnenstrahlen fallen auf das Glas nicht flach, sondern senkrecht zur Planoberfläche (Winkel um 0°), so werden praktisch wenig Strahlen der Sonne reflektiert. Je flacher die Sonnenstrahlen auf das Glas fallen, desto stärker die spektrale Reflexion, die Lichtspiegelung. Die Oberfläche des Glases verhält sich bei der Bestrahlung unter diesen Winkeln (etwa ab 70° bis fast 90°) wie ein Silberspiegel. Somit wird das ganze Spektrum des einfallenden Sonnenlichts reflektiert – unabhängig von der Eigenfarbe des Glases. Ist der Hintergrund des Glases dagegen hell oder weiß, verhält sich das beobachtete farbige Glas, als wäre es diffus durchleuchtet. Die reflektierten Farben erscheinen deutlicher und kräftiger.

2.3 Wolkenbedeckter Himmel

Ist der Himmel wolkenverhangen, betrachtet man ihn als eine großflächige, diffuse natürliche Lichtquelle. Die spektrale Zusammensetzung der Farbanteile entspricht allen Sonnenfarben, jedoch vorwiegend mit Blauanteil, wobei die Farbtemperatur bis zu 10.000 Kelvin und mehr betragen kann. Bei der Wirkung dieser Lichtquelle in Verbindung mit den Farbläsern lässt sich kein durchgelassener oder reflektierter einzelner Strahl beobachten, sondern unzählige Strahlen, die in alle Richtungen streuen. Die Wahrnehmung der Farben des Glases, gleichgültig, ob in Durchlicht oder Auflicht, ist aus fast jeder Beobachtungsrichtung gleich stark empfunden (sogenanntes Lambert'sches Gesetz).

2.4 Künstliches Licht

Vor der Einführung der Gasbeleuchtung am Anfang des 19. Jahrhunderts waren Kerzen die wichtigsten künstlichen Lichtquellen. Sie brannten am Hofe zu Hunderten und sogar Tausenden Stück am einen einzigen Abend.⁵ Sie brannten in einfachen Kerzenständern, aber auch in prachtvollen Kronleuchtern und Lüstern mit Kristallbehang. Kerzen sind Verbrennungslichtquellen mit einem monoton steigenden kontinuierlichen Farbspektrum, das heißt, die Rot-, Orange- und Gelbanteile überwiegen gegenüber den Türkis-, Blau- und Violettanteilen. Dadurch wirkten die im Durchlicht präsentierten rötlich bis gelblich gefärbten Gläser sortimente kräftiger. Weniger attraktiv wirkten die Blaugläser, da die ausreichende Intensität der Strahlung dieser Farbe im Spektrum der Kerze schon fehlte. Im Auflicht war die Wahrnehmung dieser Farbe noch wesentlicher schlechter, weil die Reflexion des Blaus im Glas bei den praktischen Bestrahlungswinkeln sehr gering ist.

3 Lichttechnische Eigenschaften von Glas

Zur Herstellung von Glas nutzte man in der Frühen Neuzeit Quarz, Pottasche, Soda und Kalk sowie weitere Zusätze, die zu lichttechnisch relevanten Effekten führten. Die Beimischungen von Bleioxid hatten eine besondere Aufgabe, nämlich eine hohe Farbbrechung des Glases zu erreichen. Je mehr Blei in der Glasmasse vorhanden ist, desto größer ist die Brechungszahl, das heißt, desto breiter wird das weiße Licht in die »Regenbogenfarben« zerlegt.⁶ Für die Herstellung von Buntglas verwendete man seit vielen Jahrhunderten bestimmte Oxide von Metallen, so zum Beispiel einwertiges

⁵ Krzeszowiak 2020, S. 299.

⁶ Die Brechungszahl ist von der Frequenz des Lichts abhängig: Meist wird sie auf die Natrium D-Linie bezogen. Ausgehend von Quarzglas liegt die Brechungszahl bei 1,46. Das Kronglas weist die Brechungszahl

Kupferoxid für Rottöne, Chromoxid für Grün oder Kobaltoxid für Blau. Lichttechnisch gesehen ist die Konzentration der Metalloxide in der Glasmasse für die ausgeprägte Steigung der Flanke der Durchlässigkeit (Durchlässigkeits-Kante) verantwortlich. Das bedeutet, dass die gesehenen Farben bei der Beleuchtung, vor allem im Durchlicht, sehr gesättigt erscheinen. Im Theater verwendet man sie bis heute, um kräftige, nicht pastellartige Lichtstimmungen auf der Bühne zu präsentieren.

3.1 Die Bedeutung der Oberfläche: Schliff, Prisma und Linse

Das oben Beschriebene betraf vor allem das farbige Flachglas. Im Falle von strukturierten Oberflächen (Schliff, Prismen, Linsen) von Hohlgläsern ist die Interaktion zwischen der Lichtquelle, dem Objekt und dem Beobachter viel komplexer.⁷ Die am häufigsten verwendete Basis für den Glasschliff war das farblose venezianische »Cristallo«, das mit Gravuren verziert wurde. Bei den bleifreien Kristallgläsern, denen man Calciumcarbonat in Form von Kreide beimengte (Böhmisches Kristallglas), erreichte man ebenfalls diesen Farbeffekt und auch eine hohe Brillanz. Die Verzierungen hatten die Form von verschiedensten Kanten, die in die Glasstruktur eingeschliffen wurden. Durch den tiefen Glasschnitt löste man die Oberflächen des Kristallglases in stilisierte oder rein geometrische Muster auf.⁸ Die erhöhte Brechungszahl (erhöhte Dispersion) bei den Kristallgläsern rief die Spektrum-Zerlegung des einfallenden weißen Lichts in die beliebten »Regenbogenfarbanteile« hervor (Abb. 7). Vor allem aber durch den Zusatz von Bleioxid zur Glasmasse wurde dieser Farbeffekt erzielt.

Die prismenförmigen Gläser hatten die Aufgabe, den einfallenden Lichtstrahl in seine Spektralfarben zu zerlegen. Ist der Lichtstrahl primär und kontinuierlich weiß, kommt es zur Zerlegung in die sieben bekannten Farbbezirke. Das Glasprisma als ein Medium mit einer höheren Dichte als Luft bricht das weiße Licht zwei Mal: das erste Mal beim Eintreten von Licht in das Glas, dabei wird der weiße Strahl gebeugt und in Farben zerlegt. Da die Spektralfarben (Primärfarben) sich nicht in andere Farben zerlegen lassen, werden die nun farbigen gebeugten Strahlen beim Verlassen des Prismas an der Grenze (Glas–Luft) zum zweiten Mal gebeugt und dadurch entsteht ein breiter Regenbogenfächer. Die Spektralfarben sind monochromatische Farben, somit auch zu 100 % gesättigt. Sie wirken auf uns fast unnatürlich schön, da im alltäglichen Leben solche Sättigung der Farben kaum vorkommt.

von 1,45 bis 1,65 auf, und für Flintglas liegt sie zwischen 1,56 bis 1,93. Bleikristall kann je nach Anteil des Bleioxids (min. 24 % Bleioxid PbO) die Werte bis zu 1,95 aufweisen.

7 Natürlich unterliegt auch hier die Wahrnehmung durch den Betrachter den immer herrschenden optischen Gesetzen wie der Brechung, Reflexion, Absorption, Transmission und der Totalreflexion mit dem Sonderfall der Doppel-Totalreflexion wie auch der Polarisation des Lichts.

8 Mariacher / Causa 1974, S. 86.



Abbildung 7. Regenbogenfarben der Zerlegung des Sonnenlichtes in der Reflexion an einem geschliffenen Plan-Spiegel aus Bleikristall.

Die linsenförmigen Gläser lassen sich in Sammellinsen- oder Streulinsen-Gläser unterscheiden. Da eine Sammellinse als ein Konstrukt, das aus zwei Prismen gebaut ist, zu verstehen ist, lässt sich die Wirkung von solchen weißen Gläsern leicht erklären. Das Licht wird in Farben zerlegt und von beiden »Prismen« so gebeugt, dass die Strahlen bestimmter Farben sich auf der anderen Seite dieser Konstruktion in einem Fokus-punkt bündeln. Dementsprechend bilden sich mehrere farbige Fokuspunkte, die man als chromatische und sphärische Aberration kennt. Sind die Gläser so geschliffen, dass es nach der Verbindung zweier Prismen mit ihren Spitzen aussehen würde, dann ist eine Wirkung des Glases als Streulinse zu erkennen. Die Konsequenz eines solchen Schliffs ist die Zerlegung des einfallenden Lichts in die Spektralfarben. Weitere Effekte der Lichtbrechung wurden schon vor der Oberflächengestaltung im Rahmen des Herstellungsprozesses, etwa durch (farbiges) Eisglas oder Rippen- und Linsendekor erzielt.⁹

3.2 Schichtgläser

Manche Gläser bestehen aus einzelnen farbigen Schichten. Die Wahrnehmung der farbigen Wirkung des zweifachen Schichtglases im Durchlicht unterliegt kolorimetrisch dem Gesetz der »subtraktiven« (multiplikativen) Farbmischung. Wie sich aber

⁹ Drahotova 1991, S. 38.

die Strahlungsleistung des einfallenden Lichts beim Durchgang im Verhältnis zur Schichtdicke des Glases ändert, beschreibt das Bouguer'sche Gesetz.¹⁰ Glas ist eine absorbierende Substanz und zeichnet sich spezifisch durch seine Dichte aus. Im Allgemeinen besagt das Gesetz, dass die Abnahme der Strahlungsleistung der Lichtquelle beim Durchgang einer Glasschicht exponentiell zur Dicke des Glases und dessen Dichte abfällt. Bei mehreren Glasschichten hintereinander nimmt die Strahlungsleistung dann rapide und exponentiell ab. Die Höhe der Abnahme ist stark abhängig von der Wellenlänge des einfallenden Lichts und damit auch von der Farbe des Glases. Praktisch heißt dies, dass sich bei Schichtgläsern die Wahrnehmung der Farben nach multiplikativem und exponentiell fallendem Verhältnis richtet. Die Farben werden schwächer wahrgenommen, je dicker und mehrschichtiger das Glas ist. Im äußersten Falle, wenn ein Glas blau wäre und das andere rot, wird die ganze einfallende Strahlungsleistung der Lichtquelle, zum Beispiel der Sonne oder der Kerze, gar nicht durch die beiden Schichten durchdringen, und die Farbwahrnehmung wäre schwarz.

Ein Beispiel für den Einsatz von Schichtgläsern war die *Laterna Magica* (Zauberlaterne, auch Skioptikon genannt) aus der Mitte des 17. Jahrhunderts zu erwähnen. Die *Laterna Magica* war bis ins 20. Jahrhundert hinein ein in ganz Europa verbreitetes Massenmedium. Sie war ein Projektionsapparat mit einigen dicht aufgestellten Linsen hintereinander (Linsensystem) und dazwischen das Laternenbild, das groß projiziert wurde. Als Lichtquelle verwendete man zuerst Kerzen und Öllampen, später auch die Kalkbrenner. Der Hohlspiegel hinter der Lichtquelle erhöhte die Helligkeit der austretenden Bild-Lichtstrahlen. Das ganze Linsensystem (mehrere konkave und auch konvexe Linsen für die Korrektur der sphärischen wie auch der chromatischen Fehler, wie auch UV- und IR-StopFilter) lassen sich als schichtaufgebaute Gläser betrachten.¹¹ Deshalb war der Lichtwirkungsgrad solcher Projektionsapparate niedrig und betrug nur etwa 20 bis 30 %.

3.3 Exkurs: Die Maßeinheiten *Candela* und *Lux*

Von den vier lichttechnischen Grundeinheiten (Lumen, Candela, Lux und Nit)¹² seien nun zwei präsentiert, die mit dem oben Geschriebenen untrennbar verbunden sind. Spricht man über eine Lichtquelle, dann charakterisiert man sie durch die Maßeinheit Candela. Beschreibt man den Zustand der Beleuchtung einer Fläche, dann drückt man dies durch die Einheit Lux aus. Eine gewöhnliche Haushaltskerze (heute aus Paraffin

¹⁰ Bouguer 1729, S. 164.

¹¹ Greisenegger / Krzeszowiak 2008, S. 57.

¹² Krzeszowiak 2007, S. 31 und S. 34.

oder Stearin) hat eine Lichtstärke von etwa 1 cd. Daher rührt auch der Name der Einheit (lateinisch *candela* »Kerze«). Das Lux (lx) ist die SI-Einheit (franz.: *Système international d'unités*) der vertikalen Beleuchtungsstärke (E_v). Der Name ist vom lateinischen *lux* für »Licht« abgeleitet. Die Lichtstärke in Candela wird heute mittels einer photometrischen Bank ermittelt / gemessen.¹³ Die Beleuchtungsstärke in Lux wird mittels eines Luxmeters direkt gemessen.

Die **Candela (cd)** ist die Einheit der SI-Basisgröße der »Lichtstärke«. Die Lichtstärke in einer bestimmten Richtung ist der Quotient aus dem von der Lichtquelle in diese Richtung ausgesandten Lichtstrom (Einheit Lumen, lm) und dem durchgestrahlten Raumwinkel (Einheit Steradian, sr). Eine Lichtquelle, die einen Lichtstrom von 1 lm erzeugt und dieses Licht in alle Richtungen mit gleichmäßiger Lichtstärke abstrahlt, hat in alle Richtungen die Lichtstärke I_v (I – Stärke, v – visuell):

$$I_v = 1 \text{ lm} / 4\pi \text{ sr} = (1 / 4\pi) \text{ cd} = 0,08 \text{ cd.}$$

Oder praktischer ausgedrückt: Eine punktförmige, in alle Richtungen gleichstrahlende Lichtquelle mit einem gesamten Lichtstrom von $4 \text{ Pi} (\pi)$ (12,56) lm hat eine Lichtstärke I_v

$$I_v = 12,56 \text{ lm} / 4\pi \text{ sr} = 1 \text{ cd, also eine Candela.}$$

Die Maßeinheit Lux ist definiert als die photometrische Beleuchtung E_v , die ein Lichtstrom von 1 Lumen (lm) erzeugt, wenn sie sich gleichmäßig über eine Fläche von 1 Quadratmeter (m^2) verteilt:

$$E_v = 1 \text{ lm} / 1 \text{ m}^2 = 1 \text{ lx}$$

Äquivalent dazu lässt sich formulieren: 1 Lux ist die Beleuchtungsstärke, die eine Fläche erhält, deren Punkte 1 Meter von einer punktförmigen Lichtquelle der Lichtstärke 1 Candela (1 cd) entfernt sind (Abb. 8).

13 Ebd., S. 18 und S. 31. Die photometrische Bank ist ein lichttechnisches Messgerät, das zur Messung der Lichtstärke einer unbekanntem Lichtquelle (z.B. Kerze, Glühlampe) dient. Die Messung beruht auf einem Vergleichsverfahren. Dazu ist eine kalibrierte Normlampe mit bekannter Lichtstärke in Candela nötig. An einem Ende der Bank, die zwischen drei und fünf Meter lang ist, befindet sich der Lichtsensor, und am anderen Ende werden die Normlampe und die zu messende Lampe abwechselnd montiert. Man setzt die Ergebnisse der durchgeführten Messungen beider Lampen ins Verhältnis zueinander und erhält als Resultat den Wert der Lichtstärke der zu messenden Lampe in Candela.

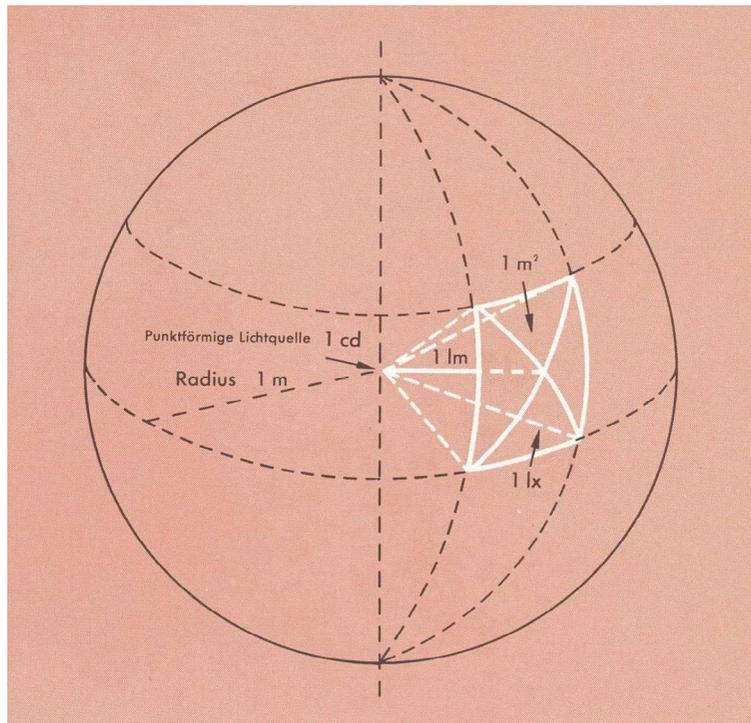


Abbildung 8. Eine punktförmige Lichtquelle mit räumlich gleichmäßiger Ausstrahlung und der Lichtstärke 1 cd (Candela) in jeder Richtung erzeugt in einer Entfernung von 1 m (Meter) eine Beleuchtungsstärke von 1 lx (Lux).

4 Fazit. Lichteffekte im höfischen Interieur

Aus diesem lichttechnischen Exkurs folgt die für uns wichtige Information, dass 1 Candela in der Entfernung vom einem Meter 1 Lux erzeugt. Wir könnten nun also mithilfe dieser Berechnung genau bestimmen, wie hell das frühneuzeitliche, abendliche höfische Interieur war. Die Wirkung stand in Abhängigkeit von der Art und Menge der verwendeten Kerzen und der Art und Menge des Materials Glas in Form von farbigem oder farblosem Hohlglas, Flachglas, das geschliffen oder geschnitten die Lichtbrechung verstärkte und das den Lichtschein der Kerzen in ein lebendiges, der Bewegung der Kerzenflamme folgendes, bezauberndes Farbenspiel überführte.

Im 18. Jahrhundert konnte man dies nur mithilfe eines Schatten-Photometers schätzen oder ermitteln. Die Methode der »Messung der Helligkeit im Raume« geht auf die 1794 gemachte Erfindung des praktischen Photometers durch Graf Rumford (1753–1814) zurück, obwohl die theoretischen Grundlagen eines visuellen Photometers

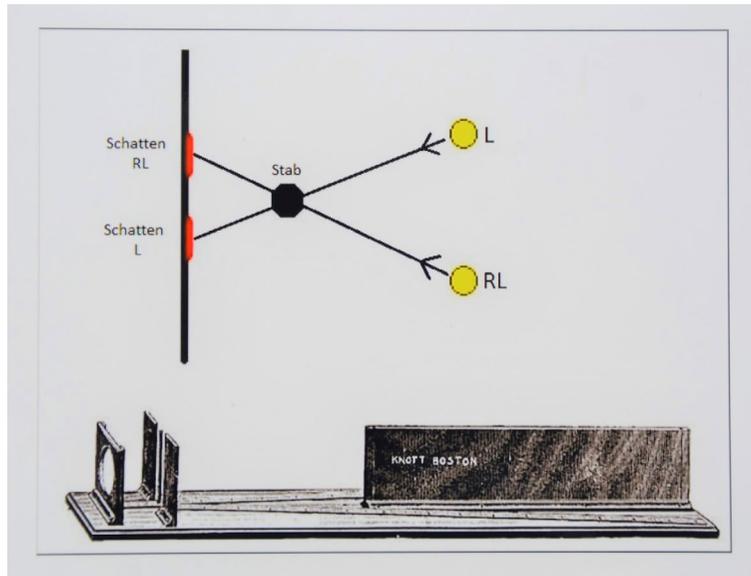


Abbildung 9. Das allererste Lichtmessgerät – das Rumford'sche Schatten-Photometer (1794) für die Schätzung/Ermittlung der »Helligkeit« der Lichtwirkung der Lichtquelle. Es vergleicht zwei Schatten, die ein undurchsichtiger Stab auf einen Schirm wirft. Die Schatten kommen durch die zu vergleichenden Lichtquellen Referenz-Lichtquelle (RL) und die zu untersuchende »Lichterscheinung« (L) zustande.

von Pierre Bouguer (1748) und Johann Lambert (1760) stammten. Die genaue Recherche zu diesem Thema wurde im Sommer 2017 in der weltweit umfangreichsten Klosterbibliothek des Benediktiner-Stifts Admont, Steiermark, Österreich durchgeführt, wo historische Dokumente und historische Abbildungen bezüglich dieses Photometers gefunden wurden.¹⁴ Die einzige Messmethode war eine Vergleichsmethode mit der »Helligkeits-Referenz« mittels einer speziell gefertigten, stabil brennenden Kerze. Man verglich zwei Helligkeitsquellen, einerseits die Referenzlichtquelle und andererseits die »Helligkeit« der zu untersuchenden Lichtquelle und zwar in Form der Bildung der beiden Schatten, die auf einem Flachschirm aus matttransparentem Papier erschienen (Abb. 9). Die Schatten waren die Konsequenz der Beleuchtung eines sich im Photometer befindenden zylindrischen Stabes. Man änderte solange den Abstand der Referenzlichtquelle zum Stab, bis die beide Schatten für das Auge »gleich dunkel« erschienen. War dies der Fall, so konnte man die Zahl der Lux, also die mittlere Beleuchtungsstärke im Raume ermitteln, wissend, dass die »Helligkeit« im Quadrat der Entfernung abnimmt (heute nennen wir dies das photometrische Entfernungsgesetz).

¹⁴ Krzeszowiak 2017, S. 78–80.

5 Ausblick. Versuchsaufbau – Messungen der Lichtwirkung im (historischen) Raum

In der Beleuchtungstechnik werden heutzutage mehrere Begriffe verwendet, die die Lichtwirkung und die Qualität der optischen Wahrnehmung eines Raumes definieren. Der Ausgang jeder lichttechnischen Bewertung der Lichtwirkung ist immer ihre spektrale Energieverteilung. Aus dieser ergibt sich letztlich die Beleuchtungsstärke, Farbtemperatur und Farbwiedergabe im Raume. Um die räumliche Lichtwirkung zu beschreiben, bedient man sich der horizontalen, vertikalen, zylindrischen, halbzyklindrischen, sphärischen und der halbsphärischen Beleuchtungsstärke. Um die oben erwähnten lichttechnischen Größen zu messen, gibt es spezifische Messgeräte. Das Spektrometer dient der Messung der spektralen Energieverteilung des Lichts. Ein Luxmeter mit verschiedenen Aufsätzen ermöglicht die Messung der oben genannten Arten der Beleuchtungsstärken (Abb. 10). Die Lichtmessungen mittels eines speziellen Kolorimeters informieren uns über die Farbtemperatur des Lichts (z.B. Warmton, Neutralweiß, Kaltton) und die Verfälschung der Wahrnehmung der betrachteten Farben im Raume. Diese vielfältigen Messungen führen dann erst zur präzisen Aussage der vorhandenen Lichtwirkung und deren Lichtqualität im Raum.

Um diese Messungen durchzuführen, benötigte man 1 : 1 einen vorhandenen (historischen) Raum, in dem die Beleuchtung entweder aus Tageslicht oder Kerzenlicht besteht.

Hier begrenzen wir uns nur auf die Messungen der Beleuchtungsstärke und Farbtemperatur, die von größter Bedeutung sind. Die Beleuchtungsstärke ist abhängig von der Bezugsrichtung der Messung. Man misst also in mehreren Punkten des Raumes die Beleuchtungsstärken. Liegt beispielsweise zur Charakterisierung des zu beleuchteten Objektes keine definierte Bezugsrichtung vor, so kann die sphärische Beleuchtungsstärke die integrale Lichtwirkung gut beschreiben. Sie ist das

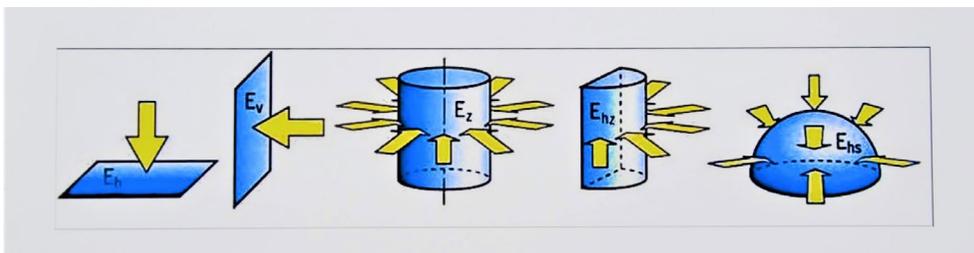


Abbildung 10. Arten der Beleuchtungsstärken (der Messrichtung nach definiert): Horizontale E_h , vertikale E_v , zylindrische E_z , halbzyklindrische E_{hz} und halbsphärische E_{hs} . Die Werte der einzelnen so gemessenen Beleuchtungsstärken im Verhältnis zueinander entscheiden über Entstehung der großen oder kleinen, scharfen oder schwachen Schatten im Raum oder auch der schattenlosen Beleuchtung.

arithmetische Mittel aus den sich aus allen Richtungen ergebenden Beleuchtungsstärken. Für ausgewählte räumliche Gebilde kann man die Raumhelligkeit durch Messung der vertikalen/horizontalen oder halbsphärischen/halbzyklindrischen Beleuchtungsstärken beschreiben. Sie geben ebenso Auskunft über die vorhandene Schattigkeit im Raume. Man vergleiche dabei das Verhältnis der Beleuchtungsstärken zum Beispiel der halbzyklindrischen $E_{h1/2R}$ rechts und der halbzyklindrischen $E_{h1/2L}$ links. Ist das Verhältnis um 1 : 10 und kleiner, bedeutet dies schwache seitliche Schatten. Ist dieses Verhältnis um 1 : 50 und mehr, bilden sich starke Schatten. Wird das Verhältnis der horizontalen Beleuchtungsstärke E_h zur zylindrischen E_z etwa 1 : 1, bilden sich keine sphärischen Schatten, dies entspricht einer schattenlosen Umgebung. Durch die Schattigkeit und die Hell-Dunkel-Strukturierung bekommt der Raum erst die Tiefe, besonders, wenn man im hinteren Teil des Raumes eine helle Fläche als einen »Fluchtpunkt« fürs Auge präpariert. Auf diesem Prinzip der Beleuchtung beruht die atemberaubende Illusionswirkung der Bühnentiefe im Theater. Obwohl sie in Wirklichkeit nur rund ein Dutzend Meter Tiefe hat, empfindet der Betrachter sie als viel tiefer. Besonders spektakulär wirkt die Illusion bei Verwendung der Blau-Lichtstimmungen, wo die wirklichen Grenzen des Raumes zu verschwinden scheinen. Gegenteilig zu Blau wirkt die Farbe Rot im Raum – sie bringt in der Wahrnehmung die beleuchteten oder die mit dieser Farbe selbstleuchtenden Objekte näher zum Betrachter.

Die Messung der Farbtemperatur gibt uns Auskunft, wie wir den Raum psychophysiologisch wahrnehmen. Der Bereich der Wahrnehmung des »neutralweißen« Lichts liegt um 5.500 K (Kelvin). Das bedeutet, dass alle sieben Bezirke der Farben im Spektrum des auffallenden Lichts auf ein Objekt vorhanden sind und keine dieser Farben die andere überwiegt. In diesem Falle sind die im Durchlicht oder im Auflicht betrachteten Objekte ohne Farbverfälschung wiedergegeben. Betragen die Werte der Messung etwa 2.000 K (Kerzenlicht) bis 4.000 K bedeutet dies, dass die Wirkung des Lichts als »warm« empfunden wird – es überwiegt Rot und Orange im Spektrum. Weisen die Messungen die Werte um 7.000 K bis 9.000 K auf, empfinden wir die Umgebung als »kalt« – es dominieren im Spektrum Blau und Türkis.

Eine Lichtwirkung lässt sich auch in einem Versuchsraum simulieren und messen, so wie das im Laboratorium für Lichttechnik an der HTBLuVA Wr. Neustadt möglich ist. In einem speziellen Raum, wo die Simulationen des Tageslichts (direkte Strahlung und bedeckter Himmel) möglich sind, steht auf einem Podest ein Modell (1 : 3) eines Zimmers (H 1,5 m/B 2,5 m/L 3,5 m). Die innere Ausstattung des Zimmers (Möbel und Objekte, austauschbare Wände/Decke/Boden usw.) ermöglicht verschiedene Variationen des inneren Aussehens. Auch mit variablen Miniatur-Leuchten und Miniatur-Fenstern ist das Modellzimmer ausgestattet. Dieses Modellzimmer lässt sich auch mit Kerzenbeleuchtung simulieren. Die Messungen der Lichtwirkung lassen sich in dem Modell identisch wie in einem wirklichen Raum durchführen und die Ergebnisse auf

die Realität der 1:1-Räume übertragen. Hochinteressant waren die Messungen der horizontalen und zylindrischen Beleuchtungsstärke bei verschiedenen Größen der Glasfenster. Bei konstanter Innenbeleuchtung und »schwarzer« Auskleidung/Ausstattung stiegen die Werte der zylindrischen E_z wie auch der horizontalen Beleuchtungsstärke E_h um etwa 30% im Verhältnis zueinander $E_z/E_h = 5:2$ bei der Vergrößerung der Fläche der Glasfenster um 50%. Diese positiven Änderungen sind auf die Reflexion der vergrößerten Flächen des Fensterglases zurückzuführen. Mit einem solchen Experiment mit einem Nachbau eines höfischen Interieurs ließe sich unter Zuhilfenahme historischer Einrichtungsgegenstände aus Glas deren tatsächliche Farbstimmung und Wirkung rekonstruieren.

6 Literaturverzeichnis

6.1 Publierte Quellen

- Bouguer 1729: Pierre Bouguer: Essai d'optique. Sur la gradation de la lumière. Paris 1729.
- Da Vinci 1487: Leonardo da Vinci: Trattato della luce (Traktat über das Licht). 1487. In: Prace Leonarda da Vinci i Girolama Cardano nad rozwojem konstrukcji lampy. Kwartalnik Historii Nauki i Techniki 1 (1979), S. 15.

6.2 Literaturverzeichnis

- Drahatova 1991: Olga Drahatova: Europäisches Glas. 3. Aufl., Prag 1991.
- Greisenegger/Krzeszowiak 2008: Wolfgang Greisenegger/Tadeusz Krzeszowiak: Schein werfen – Theater, Licht, Technik. Wien 2008.
- Krzeszowiak 2007: Tadeusz Krzeszowiak: Lichttechnik, Veranstaltungs- und Eventtechnik. Skriptum – Wirtschaftsförderungsinstitut der Wirtschaftskammer OÖ. Wien 2007.
- Krzeszowiak 2017: Tadeusz Krzeszowiak: Schattenphotometer von Leonardo da Vinci? – Suche nach einer Quantität der Kerzen. In: Neue Fachausbildung – Lichttechnik, hrsg. von Höhere Technische Bundes-, Lehr- und Versuchsanstalt (HTBLuVA). Wiener Neustadt 2017, S. 78–80.
- Krzeszowiak 2020: Tadeusz Krzeszowiak: Licht und Mechanik im Theater des 17. und 18. Jahrhunderts. In: Margret Scharrer/Heiko Laß/Matthias Müller (Hrsg.): Musiktheater im höfischen Raum des frühneuzeitlichen Europa. Heidelberg 2020, S. 289–305.

Tadeusz Krzeszowiak

Mariacher / Causa 1974: Giovanni Mariacher / Marina Causa: Kostbarkeiten der Glas-
kunst. Berlin 1974.

Richter 1981: Manfred Richter: Einführung in die Farbmeterik. 2. Aufl., Berlin / New York
1981.

Abbildungsnachweis

Alle Fotos und Abbildungen stammen aus dem Privatarchiv des Autors.