

Untersuchungen zur Gleichmäßigkeit vertikaler Beleuchtungsstärken im Arbeitsbereich

Carolin Liedtke, Semperlux AG, Berlin (D)

KURZFASSUNG

Vertikale Beleuchtungsstärken und deren Gleichmäßigkeit als Grundlage zur Ermittlung der zylindrischen Beleuchtungsstärke und Ergänzung dieser um die Kenntnis der Lichtrichtung standen im Fokus von Untersuchungen unter Feld- und Laborbedingungen. An realen Arbeitsplätzen wurden unter Tageslichtbeleuchtung vertikale Beleuchtungsstärken gemessen und deren Wirkung hinsichtlich der Beleuchtung von Gesichtern von Personen an Büroarbeitsplätzen bewertet. Im Anschluss wurden bevorzugte vertikale Beleuchtungsstärkeverhältnisse unter Laborbedingungen mittels Einstellversuchen ermittelt.

MOTIVATION UND HINTERGRUND

Für die Beleuchtung von Arbeitsbereichen in Innenräumen werden in aktuellen Normen [1,2] und Richtlinien [3,4] lichttechnische Gütekriterien wie z.B. Beleuchtungsniveau, Leuchtdichteverteilung, Begrenzung von Direkt- und Reflexblendung, Lichtrichtung und Schattigkeit aufgeführt und beschrieben. Diese Kriterien zielen dabei nicht nur auf Mindestanforderungen für die optimale Unterstützung der Sehleistung, sondern verfolgen darüber hinaus den Ansatz zur Förderung von Licht- bzw. Beleuchtungsqualität. Deutlich wird dies durch die Erweiterungen der Empfehlungen für Leuchtdichten und Beleuchtungsstärken, sowie deren Gleichmäßigkeiten über den Bereich der horizontalen Sehaufgabe auf der Arbeitsfläche hinaus. Anforderungen an vertikale Beleuchtungsstärken an Regalflächen, Wand- und Deckenbeleuchtungsstärken [5] sowie zylindrische Beleuchtungsstärken auf einer Ebene von 1,20 m zeigen den ganzheitlichen räumlichen Beleuchtungsansatz, der eine ausreichende Helligkeit im gesamten Arbeits- und Umgebungsbereich gewährleistet. Ferner soll vor allem durch ein Mindestmaß an zylindrischer Beleuchtungsstärke die Kommunikation zwischen den Personen im Raum durch eine Beleuchtung unterstützt werden. Sie wird deshalb als Größe für eine gute räumliche Erkennbarkeit von dreidimensionalen Strukturen und Objekten bzw. für die Modellierung von Gesichtern eingesetzt. Durch die näherungsweise Beschreibung der zylindrischen Beleuchtungsstärke als Mittelwert von vier senkrecht aufeinander stehenden Vertikalbeleuchtungsstärken geht jedoch keine empfohlene Vorzugsrichtung des Lichts oder Gleichmäßigkeitsanforderung hervor. Die Kenntnis über eine bevorzugte Helligkeitsverteilung auf Gesichtern von Personen kann die Anforderungen an eine kommunikationsunterstützende Beleuchtungssituation im Arbeitsbereich ergänzen. Die vertikale Beleuchtungsstärke als Grundlage für die zylindrische Beleuchtungsstärke sowie deren Gleichmäßigkeit kann im praxisnahen Planungsansatz als geeignete Größe für die Beschreibung der Beleuchtung von Gesichtern angesetzt werden.

Folgenden Forschungsfragen sollte in den Untersuchungen zur Gleichmäßigkeit vertikaler Beleuchtungsstärken nachgegangen werden:

Welche typischen vertikalen Beleuchtungsstärkewerte und -gleichmäßigkeiten werden unter Tageslichtbeleuchtung an Büroarbeitsplätzen erreicht? Lassen sich diese Situationen auf Beleuchtungskonzepte bei der Lichtplanung übertragen? Welches sind bevorzugte vertikale Beleuchtungsstärkeverhältnisse bezüglich eines guten Modellingeffekts auf Gesichtern und wo sind die Grenzen der Akzeptanz?

MESSUNG UND BEWERTUNG VERTIKALER BELEUCHTUNGSSTÄRKEN IM FELD

Im ersten Untersuchungsschritt erfolgte eine Messung vertikaler Beleuchtungsstärken an typischen Büroarbeitsplätzen. Dafür wurden drei reale Arbeitsplätze ausgewählt, die in Büroräumen unterschiedlicher Größe und Himmelsrichtung angeordnet waren:

Arbeitsplatz	Bürogröße	Bürotyp	Ausrichtung des Büros	Position des Arbeitsplatzes
A	ca. 24 m ²	Einzelbüro	Westen	Parallel zur Gebäudeachse, fensternah, Fenster rechts neben AP
B	ca. 35 m ²	Gruppenbüro, 3 Arbeitsplätze	Osten	Parallel zur Gebäudeachse, fensternah, Fenster rechts neben AP
C	ca. 45 m ²	Gruppenbüro, 4 Arbeitsplätze	Westen	Parallel zur Gebäudeachse, fensternah, Fenster links neben AP

AP= Arbeitsplatz

Die Messungen erfolgten in einem Zeitraum von Mai bis Juli 2008. An 15 Tagen wurden jeweils stündlich während der Arbeitszeit von 9 Uhr bis 18 Uhr die Beleuchtungsstärkewerte aufgenommen. Das Wetter wurde zusätzlich qualitativ erfasst.

Für die Messung der vertikalen Beleuchtungsstärke wurde eine Messapparatur entwickelt, mit der unmittelbar aufeinander folgend die Werte in vier Hauptrichtungen in einer Höhe von 1,20m (entsprechend der Bezugsebene der zylindrischen Beleuchtungsstärke) aufgenommen werden konnten. Zusätzlich wurde die horizontale Beleuchtungsstärke auf der Höhe des Tisches gemessen, um die Beleuchtungssituation des Arbeitsplatzes einzuordnen.

Aufbauend auf den Beleuchtungsstärkemessungen im Feld wurde eine Probandenbefragung durchgeführt. Die zuvor ermittelten Messwerte sollten damit durch subjektive Bewertungen ergänzt werden. Das Befragungskonzept sah eine Befragungssituation vor, in der zwei Versuchspersonen gleichzeitig die natürliche Beleuchtungssituation durch das Tageslicht bewerten. Der Fragenbogen war, entsprechend der vorangestellten Forschungsfragen, in zwei Hauptthemen gegliedert: Zuerst erfolgte eine „Beurteilung der allgemeinen Beleuchtungssituation“ mit Fragen zur Beleuchtung des Arbeitsplatzes, des Umgebungsbereichs und des Raumes insgesamt. Anschließend wurde eine „Beurteilung der Beleuchtung des Gesichts“ der jeweils gegenüberstehenden Person unter emotionalen und lichttechnischen Kriterien erfragt.

Vor und nach jedem Befragungstermin wurde entsprechend des Messaufbaus der Vormessungen die vertikalen und horizontalen Beleuchtungsstärken an den Arbeitsplätzen gemessen. Ergänzend dazu wurde nach jeder Befragung ein Leuchtdichtebild des Gesichts der Versuchsteilnehmer aufgenommen, um die Leuchtdichteverteilung ebenfalls zu erfassen.

Insgesamt nahmen 33 Versuchspersonen in 25 Befragungssituationen teil. Für die Befragung wurden zwei der in den vorangegangenen Messungen dokumentierten Arbeitsplätze (A, B) um jeweils einen gegenüberliegenden Arbeitsplatz ergänzt und eingesetzt. Die Termine fanden innerhalb von zwei Wochen im August 2008 zu verschiedenen Tageszeiten während der Arbeitszeit sowie bei unterschiedlichem Wetter statt. Das Probandenfeld setzte sich zu einem Drittel aus weiblichen und zwei Dritteln aus männlichen Versuchspersonen im Alter von 20 bis 60 Jahren zusammen.

EINSTELLVERSUCHE ZUR GLEICHMÄßIGKEIT VERTIKALER BELEUCHTUNGSSTÄRKEN

Die einseitige Beleuchtung des Gesichts einer am Tisch sitzenden Person bei einer Arbeitsplatzanordnung senkrecht zum Fenster, die durch den seitlichen Tageslichteinfall hervorgerufen wird, wurde in einem weiteren Untersuchungsschritt in einem Mock-up eines Büroraums nachempfunden. Ein künstliches Fenster (24 x T26, 36W Leuchtstofflampen) zur Simulation der Lichtrichtung im Feld sowie ein sich gegenüber befindendes vertikales Lichtband (10 x T16, 28W Leuchtstofflampen) ermöglichten einstellbare seitliche vertikale Beleuchtungsstärkeverhältnisse von 1:1 bis 1:20 am Gesicht einer am Tisch sitzenden Person. Ergänzt wurde die Beleuchtungsanlage durch eine schwenkbare Langfeldleuchte an der Decke und einem Wandfluter zur rückwärtigen gleichmäßigen Wandaufhellung. Durch satinierte und opale Leuchtenabdeckungen und indirekte Beleuchtungskomponenten wurde das Entstehen von harten Schatten vermieden, um den Fokus einzig auf die Helligkeitsunterschiede zu richten. Alle Beleuchtungskomponenten des Versuchsaufbaus wurden über DALI (**D**igital **A**dressable **L**ighting **I**nterface) gesteuert. Die Einstellversuche wurden so konzipiert, dass die Versuchsperson außerhalb des mit lichtdichten Vorhängen abgetrennten Büros saß und durch eine fenstergroße Öffnung eine weitere, im Raum an einem Arbeitstisch sitzende Person sehen konnte. Über einen Dimm-Taster konnte die Versuchsperson das vertikale Beleuchtungsstärkeverhältnis am Gesicht der zweiten Person im Rahmen des Einstellbereichs variieren. Der Versuch wurde jeweils zweimal nacheinander mit verschiedenen Ausgangssituationen durchgeführt. Im ersten Durchlauf startete die Versuchsperson mit der ungleichmäßigsten Beleuchtungssituation, d.h. bei einem vertikalen Beleuchtungsstärkeverhältnis von 1:20 und stellte eine für sie bezüglich der Erscheinung des Gesichts optimale Beleuchtung ein. Anschließend erfolgten Einstellungen des unteren und oberen Akzeptanzlimits. Der zweite Durchlauf wurde mit der gleichmäßigsten Situation begonnen und ebenfalls die beschriebenen drei Einstellaufgaben abgefragt. An den Einstellversuchen nahmen insgesamt 44 Versuchspersonen teil.

Zur Dokumentation des Einstellverhaltens erfolgte eine Aufzeichnung der vorgenommenen Einstellungen mit Hilfe einer Screenshot-Software.

Für den gesamten Dimmbereich wurden, vergleichbar mit der Messanordnung im Feld, die vertikalen Beleuchtungsstärken an der Sitzposition der betrachteten Versuchsperson auf einer Höhe von 1,20 m und die horizontale Beleuchtungsstärke auf dem Tisch gemessen. An fixen vertikalen Beleuchtungsstärkeverhältnissen ist außerdem die Leuchtdichteverteilung auf dem Gesicht einer Versuchsperson erfasst worden.

ERGEBNISSE

Beleuchtungsstärkemessung im Feld

Während der Feldmessung wurden an den Arbeitsplätzen vertikale Beleuchtungsstärken zwischen 50 lx und 10000 lx gemessen. Der Mittelwert der Beleuchtungsstärken in den vier Hauptrichtungen, der näherungsweise die zylindrische Beleuchtungsstärke repräsentiert, ergab sich zwischen 80 lx und 5000 lx. Zum Vergleich: die horizontale Beleuchtungsstärke auf dem jeweiligen Arbeitstisch lag im Mittel bei 1600 lx. Die vertikale Beleuchtungsstärke in der Raumtiefe war bei der Beleuchtung durch das Tageslicht immer die kleinste der vier Vertikalbeleuchtungsstärken, die zum Fenster hin gemessene Beleuchtungsstärke die größte, gefolgt von der frontalen Beleuchtungsstärke. Das Verhältnis zwischen der kleinsten und der größten Vertikalbeleuchtungsstärke wies eine große Dynamik auf mit Werten von 1:3 bis 1:13, im Mittel kann es mit 1:8 angegeben werden.

Die Schwankungen der vertikalen Beleuchtungsstärken und deren Gleichmäßigkeit im Tagesverlauf sind erheblich und entsprechen in etwa denen der gesamten Messung.

Verglichen nach der Wetterlage bei Unterscheidung zwischen unbewölktem, leicht und stark bewölktem Himmel, nahm die Gleichmäßigkeit der Vertikalbeleuchtungsstärken mit zunehmender Bewölkung leicht ab. Als Grund dafür ist die Aufhellung der vertikalen Flächen in der Raumtiefe und der Raumbegrenzung (z. B. Wände, Interieur) bei unbewölktem Himmel anzugeben.

Zwischen den drei verschiedenen Arbeitsplätzen konnten keine signifikanten Unterschiede für die vertikalen Beleuchtungsstärken und deren Gleichmäßigkeit festgestellt werden.

Aufgrund des kurzen Messzeitraumes, der die Beleuchtungsverhältnisse hervorgerufen durch das Tageslicht nur einen kleinen Bereich beispielhaft abbilden kann, können keine allgemeingültigen Aussagen über die vertikalen Beleuchtungsstärken an Arbeitsplätzen getroffen werden. Mit Hilfe der Messungen konnten jedoch orientierend reale Situationen erfasst und damit die Grundlage für die Konzeption der weiteren Untersuchungsschritte geschaffen werden.

Bewertung im Feld

Während der 25 Befragungen wurden vergleichbare Beleuchtungsstärken ermittelt wie in den Vormessungen. Die beiden Büroräume, die für die Bewertung genutzt wurden, waren nach Osten und Westen ausgerichtet, so dass sich trotz gleichmäßiger Verteilung der Befragungszeiten im Tagesverlauf unterschiedliche mittlere vertikale und horizontale Beleuchtungsstärken ergaben:

	\bar{E}_h	\bar{E}_v
Büro 1 mit Arbeitsplatz A und gegenüberliegendem Arbeitsplatz	1320 lx	1110 lx
Büro 2 mit Arbeitsplatz B und gegenüberliegendem Arbeitsplatz	1910 lx	1340 lx

Tab. 1 Mittelwerte der vertikalen und horizontalen Beleuchtungsstärken während der Befragungssituationen

Das Beleuchtungsstärkeverhältnis war im Mittel 1:6, während das Verhältnis der mittleren Leuchtdichte auf der rechten und linken Gesichtshälfte etwa 1:3 betrug.



Abb. 1 Photographie und Leuchtdichtebild des Gesichts einer Versuchsperson kurz nach der Befragung

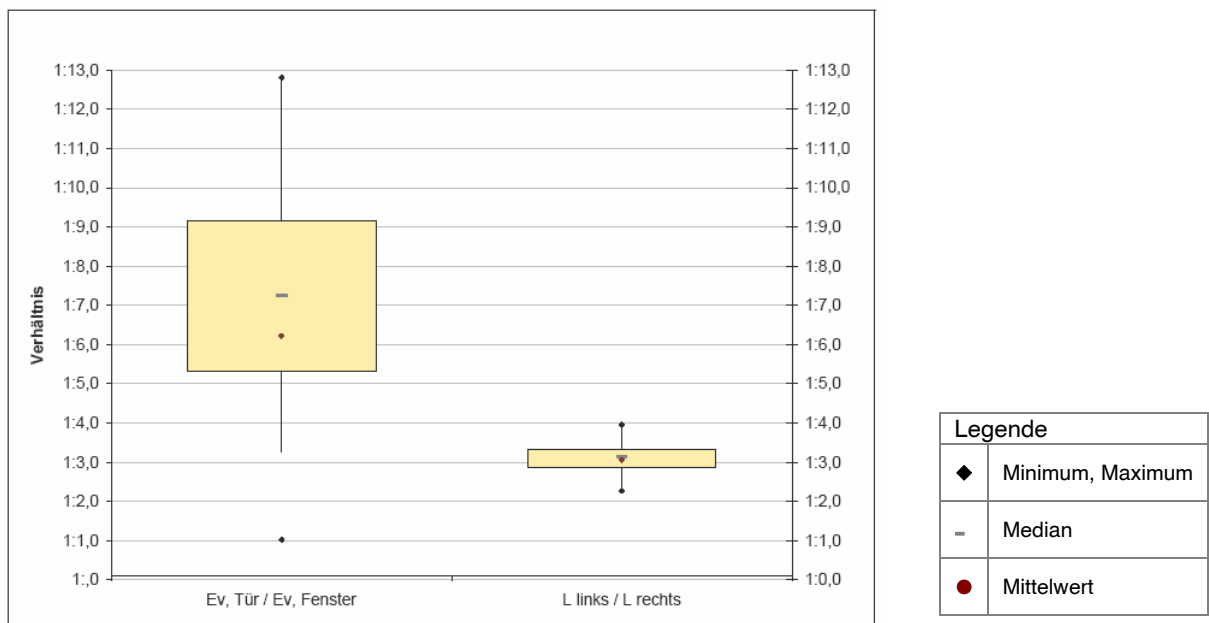


Abb. 2 *links*: Vertikales Beleuchtungsstärkeverhältnis am Gesicht der Versuchspersonen, *rechts*: Verhältnis der mittleren Leuchtdichte auf dem Gesicht der Versuchspersonen während der Befragung im Feld

Die Bewertungen der Beleuchtung durch das Tageslicht waren insgesamt durchgehend positiv bezüglich der Erscheinung des Gesichts einer gegenüberstehenden Person, der allgemeinen Beleuchtung des Raumes und der Helligkeit des Schreibtisches.

Im Einzelnen gaben über 80% der Versuchsteilnehmer bezüglich der allgemeinen Beleuchtungssituation ein neutrales bis positives Urteil ab, knapp ein Viertel der Befragten wählte sogar die Antwort „sehr zufrieden“ aus. Über die Hälfte der Personen bewertete die Helligkeit des Schreibtisches als „weder zu hell noch zu dunkel“, während ein weiteres Drittel mit „eher zu hell“ antwortete. 40% der Befragten fühlten sich durch Blendung „überhaupt nicht“ oder nur „leicht“ beeinträchtigt, trotzdem die Versuche ohne Einsatz von Lichtschutzvorrichtungen durchgeführt wurden und sich etwa 60% der Teilnehmer „geblendet“ fühlten. Insgesamt lässt sich daraus ableiten, dass die Personen unter Beleuchtungsbedingungen befragt wurden, die sie an ihrem Arbeitsplatz ebenfalls vorfinden und akzeptieren würden.

Die Bewertung der Beleuchtung des Gesichts der jeweils gegenüberstehenden Person wurde im nächsten Schritt nach emotionalen Kriterien erfragt. Die Versuchspersonen sollten anhand von fünf Eigenschaftspaaren die Wirkung des Gesichts der Ihnen gegenüberstehenden Person beschreiben. Die relative Häufigkeitsverteilung der Antworten stellt die folgende Abbildung Abb. 3 dar:

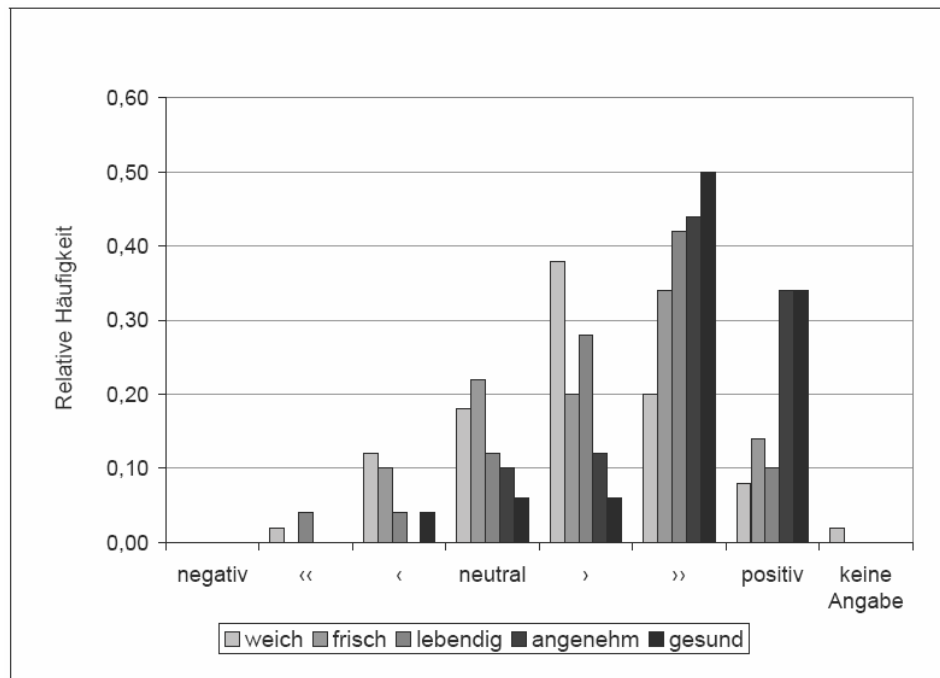


Abb. 3 Relative Häufigkeit der Bewertung der Erscheinung des Gesichts der gegenüberstehenden Person

Die Erscheinung des Gesichts wurde ebenfalls überwiegend positiv bewertet. Die Beschreibungen anhand der Wortpaare „*unangenehm - angenehm*“ und „*gesund - krank*“ wurden deutlich in Richtung der positiven Skalenrichtung angegeben, abstuft gefolgt von den weiteren Kategorien „*lebendig – starr*“, „*frisch – abgespannt*“ und „*hart – weich*“.

Anschließend wurde erfragt, inwieweit sich die Beleuchtung auf die Kommunikation zwischen den beiden Versuchsteilnehmern auswirkt. Drei Viertel der Befragten gaben an, dass die Beleuchtung die Kommunikation neutral bis positiv beeinflusst, während 60 % der Personen die Beleuchtungssituation sogar als kommunikationsfördernd beschrieben.

Der letzte Befragungsteil zielte auf die Beschreibung der Beleuchtung des Gesichts nach lichttechnischen Kriterien ab. Die Helligkeit des Gesichts beurteilten über 60 % der Versuchspersonen als „*weder zu hell noch zu dunkel*“, für ein Viertel der Teilnehmer erschien das Gesicht jedoch „*eher zu dunkel*“. Positiver fielen die Urteile zur subjektiven Einschätzung der Beleuchtung des Gesichts aus: etwa die Hälfte der Teilnehmer befanden diese als „*eher gut*“ bis „*sehr gut*“.

Im anschließenden Fragenteil wurde die Erscheinung des Gesichts in Bezug auf die Schattigkeit thematisiert. Nur 22 % der Versuchspersonen beschrieben eine „*schattenfreie*“ oder „*leicht schattige*“ Erscheinung, die übrigen Urteile zeigten eine deutlicheres „*schattiges*“ Aussehen des Gesichts auf. Jedoch störten fast 80% der Probanden die Schatten auf dem Gesicht nur „*leicht*“ oder „*überhaupt nicht*“. Der letzte Teil des Fragebogens fragte die Erscheinung des Gesichts bezüglich des Glanzes ab. Das jeweilige Gesicht wurde fast durchgehend als „*matt*“ bis „*leicht glänzend*“ beschrieben, was insgesamt nicht als „*störend*“ empfunden wurde.

Die Ergebnisse der Untersuchung „Bewertung im Feld“ zeigen insgesamt die große Akzeptanz und Toleranz bezüglich großer vertikaler Beleuchtungsstärkeunterschiede und Gleichmäßigkeiten unter der Beleuchtung durch Tageslicht.

Einstellversuche unter Laborbedingungen

Bei den Einstellversuchen wählten die Versuchspersonen einen Akzeptanzbereich bezüglich eines vertikalen Beleuchtungsstärkeverhältnisses von 1:1 bis 1:15 (Median). Als optimale Gleichmäßigkeit wurde ein Verhältnis von 1:2 empfunden. Für die Leuchtdichte-Verhältnisse der mittleren Leuchtdichten auf den Gesichtshälften ergeben sich analog eine Spannweite des Akzeptanzbereichs von 1:1 bis 1:4 und ebenfalls ein optimales Verhältnis von 1:2. Auffallend bei allen Werten sind jedoch die großen Streuungen der eingestellten Parameter. Dies zeigt zum einen die sich stark von einander unterscheidenden Präferenzen der einzelnen Versuchsteilnehmer. Zum anderen weist es, ebenso wie die Ergebnisse der Bewertung im Feld, auf die große Akzeptanz gegenüber eines ungleichmäßig beleuchteten, zum Teil schattig erscheinenden Gesichts hin.

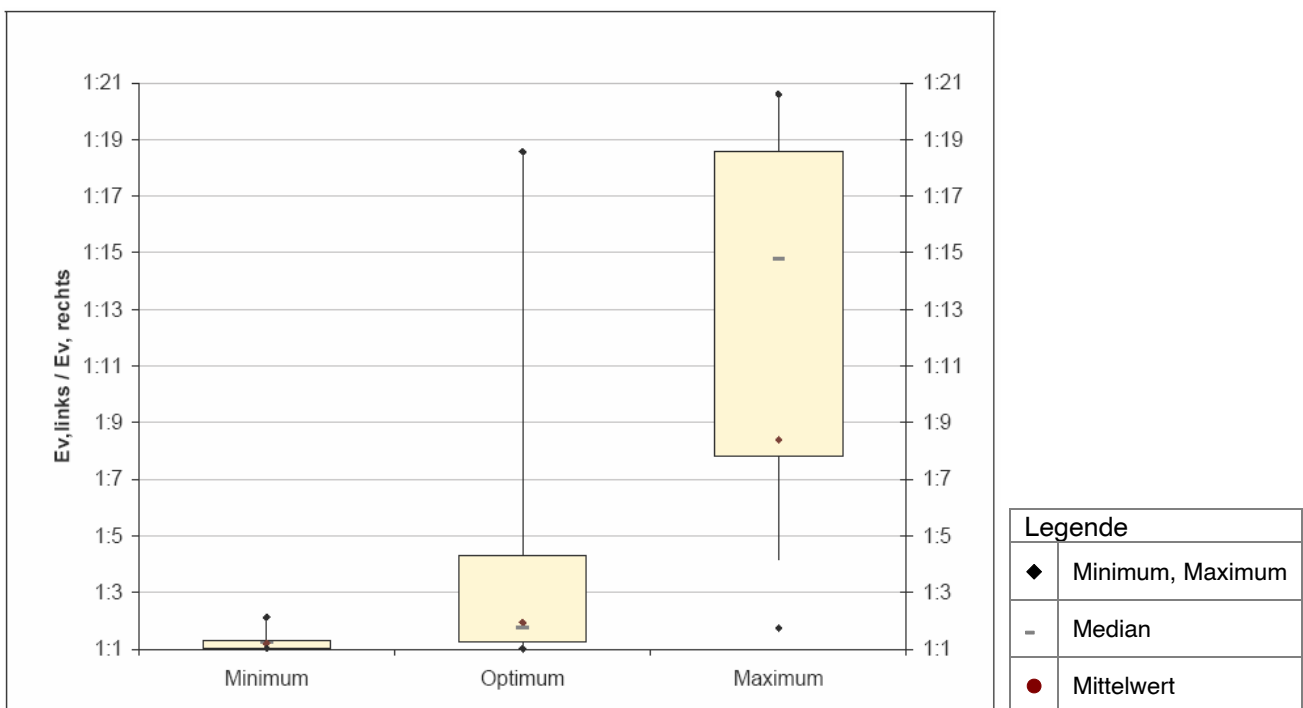


Abb. 4 Lage- und Streumaße des Beleuchtungsstärkeverhältnisses der drei Einstellaufgaben

Für die Ergebnisse der beiden direkt nacheinander erfolgten Einstelldurchläufe ausgehend von den beiden Einstellbereichsgrenzen konnte keine Abhängigkeit erkannt werden, ob es sich um Einstellungen des ersten oder zweiten Durchlaufs handelte. Des Weiteren waren die Einstellungen nicht nachweisbar von Alter, Geschlecht oder lichttechnischen Vorkenntnissen abhängig.

FAZIT

Die Ergebnisse der Untersuchungen zeigen den großen Akzeptanzbereich bezüglich der (Un-)Gleichmäßigkeit vertikaler Beleuchtungsstärken bezüglich der Beleuchtung von Gesichtern auf. Der Versuchsaufbau der Einstellversuche im Labor wurde so konzipiert, dass die an realen Arbeitsplätzen ermittelten Beleuchtungsverhältnisse simuliert und darüber hinaus erweitert einstellbar waren. Trotzdem konnten kaum einheitliche eindeutige Akzeptanzgrenzen vor allem bezüglich der Ungleichmäßigkeit ermittelt werden. Eine Begrenzung der Gleichmäßigkeit vertikaler Beleuchtungsstärken für Arbeits- und Kommunikationsbereiche in Büroräumen in Hinblick auf ein gutes Modelling bzw. eine die visuelle Kommunikation fördernde Beleuchtung von Gesichtern ist daher nicht notwendig.

QUELLEN

- [1] Deutsche Norm DIN EN 12464-1 Licht und Beleuchtung. Beleuchtung von Arbeitsstätten. Teil 1: Arbeitsstätten in Innenräumen, 2003
- [2] Deutsche Norm DIN 5035-7 Beleuchtung mit künstlichem Licht. Teil 7: Beleuchtung von Räumen mit Bildschirmarbeitsplätzen, 2004
- [3] Berufsgenossenschaftliche Regel BGR 131-2 Natürliche und künstliche Beleuchtung von Arbeitsstätten. Teil 2: Leitfaden zur Planung und zum Betrieb der Beleuchtung, 2006
- [4] Berufsgenossenschaftliche Information BGI 856 Beleuchtung im Büro. Hilfen für die Planung der künstlichen Beleuchtung in Büroräumen, 2008
- [5] CIBSE SLL Lighting Guide 7: Office Lighting, 2005