Projekt „Stirnleuchten im Oberleitungsbau“

Bearbeiter:

Technische Universität Ilmenau

Fakultät Maschinenbau

Fachgebiet Lichttechnik

Dr.-Ing. Karin Bieske

Dr.-Ing. Cornelia Vandahl

Univ.-Prof. Dr. sc. nat. Christoph Schierz

Auftraggeber:

Berufsgenossenschaft Energie Textil Elektro Medienerzeugnisse (BG ETEM)

Ilmenau, Juli 2018

Zusammenfassung

Beim Oberleitungsbau im Bahnnetz müssen dringende Montagetätigkeiten auch bei Nacht durchgeführt werden. Aufgrund der elektrischen Gefährdung und der entlegenen Einsatzorte bleibt zur Ausleuchtung der Sehaufgaben oftmals als Lösung nur die Verwendung von Helmleuchten. Für gute Sehbedingungen und zur Vermeidung von Unfällen müssen deren lichttechnische Anforderungen optimal ausgelegt sein. Dies ist ein Kompromiss aus Anforderungen an Lichtstrom, Lichtverteilung, Leuchtdauer und Handhabung bei Vermeidung von Blendung und Störungen der Dunkeladaptation. Bei den derzeit üblichen Modellen besteht aus lichttechnischer Sicht deutlicher Optimierungsbedarf. Im Rahmen des Projektes wurde Anforderungen an Helmleuchten für den Einsatz im Oberleitungsbau bei der Bahn untersucht.

Nach Analyse der Situation und Tätigkeiten beim nächtlichen Arbeiten an Oberleitungsanlagen an Baustellen sowie nach umfangreichen Recherchen wurden Tätigkeiten klassifiziert, Sehdetail und Sehweiten definiert und typische Tätigkeiten für die Durchführung von Probandenbewertungen ausgewählt. Anhand theoretischen Überlegungen wurden maximale Lichtstärken, Öffnungswinkel des Lichtkegels und damit Lichtverteilungen für die verschiedenen Tätigkeiten abgeleitet. Es erfolgte eine Untersuchung und Vermessung handelsüblicher Stirnleuchten und eine Auswahl für weiterführende Studien. Mit Hilfe geeigneter Filter und Folien war es möglich, für eine Stirnleuchte unterschiedliche stabile Beleuchtungsniveaus und Lichtverteilungen zu erzeugen. Diese wurden in einer Laborstudie von 22 Probanden untersucht. Im Ergebnis konnten Parameter für Beleuchtungsniveau, Lichtverteilung, Lichtstrom, Übergang zwischen Lichtkegel und Umgebung sowie die Blendung abgeleitet werden.

Für ausgewählte Stirnleuchte erfolgte eine Vermessung und Bewertung der lichttechnischen Eigenschaften. Eine Helmleuchte, die genau diese Eigenschaften besitzt, ist derzeit auf dem Markt so nicht verfügbar. Die Ergebnisse der Studie wurden vor dem Sachgebiet Fahrleitungsbau und zwei interessierten Herstellern präsentiert. Zurzeit wird mit Herstellern an der Anpassung von Leuchten gearbeitet.

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung 1

2 Analyse der Sehbedingungen 2

3 Untersuchung 5

3.1 Individuelle Einstellung (Mindestanforderungen) 6

3.2 Bewertung vorgegebener Beleuchtungssituationen 6

3.3 Untersuchung zur Direktblendung 6

3.4 Probanden 7

3.5 Ergebnisse 8

4 Lichttechnische Eigenschaften von Helmleuchten 12

4.1 Größe des Lichtkegels 12

4.2 Beleuchtungsniveau in dunkler Umgebung 13

4.3 Größe der Lichtaustrittsfläche 15

5 Zusammenfassung 16

Literaturverzeichnis 18

1 Einleitung

Seitens der gesetzlichen Unfallversicherung wird bei aktuell eingesetzten Helmleuchten im Oberleitungsbau aus lichttechnischer Sicht deutlicher Optimierungsbedarf gesehen. Besonders problematisch sind zu kleine und zu stark gebündelte Lichtkegel. Sie erlauben nur das Sehen innerhalb eines begrenzten Bereiches, ohne dass in der Umgebung etwas zu erkennen ist. Störend sind z.T. stark inhomogene Lichtverteilungen. Hohe Lichtströme begrenzen die Leuchtdauer der Leuchte aufgrund der begrenzten Kapazität von Batterien oder Akkus, und sind in kurzer Sehentfernung zu hell. Dies kann durch Reflexion an glänzenden Oberflächen zu Reflexblendung führen und beim direkten Blick in die Leuchte mitarbeitende Kollegen störend und gefährdend blenden (Abb. 1).

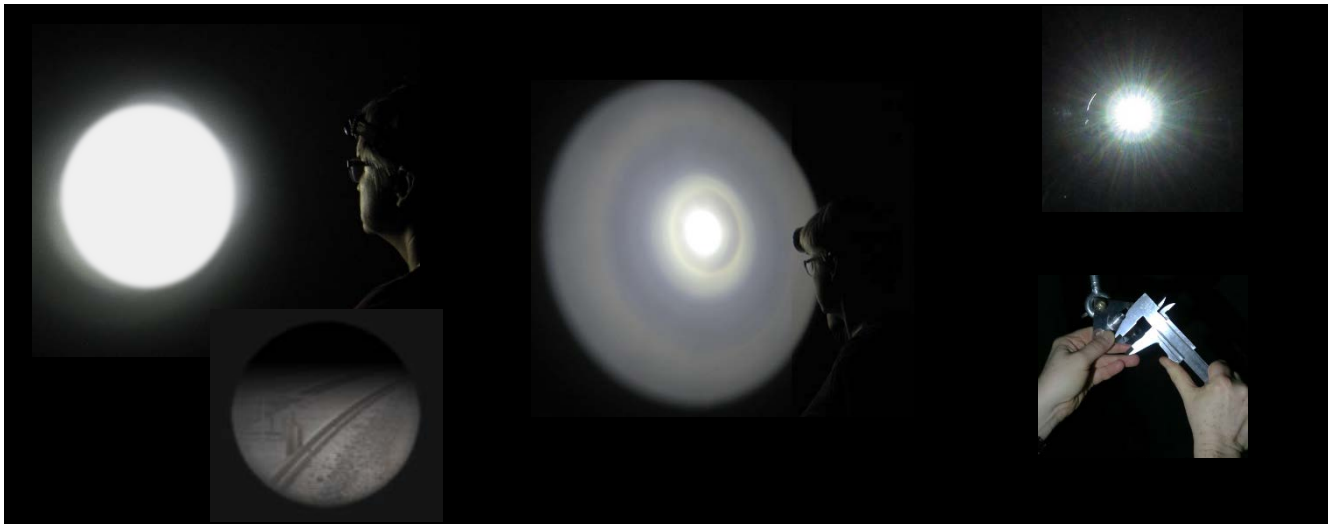

Abb. 1: Stark gebündelter Lichtkegel und begrenzter Sehbereich (links), inhomogene Lichtverteilung (Mitte), Blendung beim direkten Blick in die Leuchte (rechts oben) und Reflexblendung auf glänzenden Oberflächen (rechts unten) sind Beispiele für die Störungen beim Einsatz von Helmleuchten.

Ein gemeinsames Projekt von Berufsgenossenschaft Energie Textil Elektro Medienerzeugnisse (BG ETEM) und Fachgebiet Lichttechnik der Technischen Universität Ilmenau thematisiert die Anforderungen an Helmleuchten. Ziel war es, die Unfallgefahr zu minimieren und die lichttechnischen Anforderungen für Helmleuchten im Oberleitungsbau zu untersuchen und zu konkretisieren.

2 Analyse der Sehbedingungen

Die Auswahl geeigneter Leuchten richtet sich nach der jeweiligen Tätigkeit und den Einsatzbedingungen. Auf einer Baustelle im Gleisbereich wurden typische Arbeitsabläufe, Sehaufgaben und Sehbedingungen sowie Sehweiten analysiert. Abbildung 2 zeigt typische Arbeitssituationen.

Abb. 2: Typische Arbeitssituation beim Oberleitungsbau; kleinstes Sehdetail: Splinte, typische Arbeitsmaterialien haben einen gewissen Glanz (rechts unten). Besonders im Neuzustand reflektieren sie stark gerichtet.

Die Einsatzzwecke für Helmleuchten lassen sich klassifizieren in:

1. Arbeiten im Greifraum: Montage- und Reparaturarbeiten, Inspektions- und Messaufgaben sowie das Besteigen von Leitern oder Masten
2. Gehen in der Gleisanlage zum und vom Einsatzort
3. Orientierungsblick zu Einsatzort und Sicherheitseinrichtungen (z. B. Bahnerdung)

Als notwendige Sehentfernungen wurden entsprechend den Praxiserfahrungen dabei die in Tabelle 1 zusammengefassten Werte abgeschätzt.

Tab. 1: Relevante Sehentfernungen nach Einsatzzweck

Einsatzzweck	**Relevante Sehentfernung**	**Notwendige Breite des ausgeleuchteten Bereichs**
Arbeiten im Greifraum	0,5 m	0,7 m (70° Öffnungswinkel)
Gehen in der Gleisanlage	3 m bis 5 m	Gleisabstand: 1,5 m, Gleisbett: 2,4 m (30° Öffnungswinkel)
Orientierungsblick	10 m	1 m (5° Öffnungswinkel)

Die Erkennung von Objekten hängt im Wesentlichen von deren Leuchtdichtekontrast zur Umgebung und deren Detailgröße ab. Typische Arbeitsmaterialien, Werkzeuge und Materialien im Gleisbett und am Arbeitsort wurden daher hinsichtlich ihrer Reflexionseigenschaften betrachtet. Sie bestehen vorwiegend aus Kupfer, Aluminium, Legierungen, Keramik und Kunstoffen sowie Gestein bzw. Beton und weisen Reflexionsgrade zwischen 0,1 bis 0,5 sowie z.T. Glanz auf der Oberfläche auf. Kleinste Sehdetails sind Splinte von 5 mm Dicke und Einkerbungen in der 12 mm dicken Fahrleitung, in die die Schellen der Hänger montiert werden (Abb. 2 und Abb. 3).

Abb. 3: Montage von Hängern, die Fahrleitung und Tragseil verbinden. Gezeigt ist der Anbau von Schellen.

Besonders kritisch ist es nachts im unbeleuchteten Gelände. Die Helligkeit beträgt dabei etwa 0,1 lx bis 2 lx (bei Vollmond). Für ungestörtes Sehen sollte der Helligkeitsunterschied zwischen dem beleuchteten Sehobjekt im Lichtkegel und der dunklen Umgebung ideal 10:1 bis maximal 100:1 sein [Bod62]. Demnach sollte das Beleuchtungsniveau in der Arbeitsebene in dunkler Umgebung unter der Voraussetzung ähnlicher Reflexionseigenschaften für das Infeld zwischen 1 bis 10 lx bzw. 20 bis 200 lx betragen. In heller nächtlicher Umgebung orientiert sich das Beleuchtungsniveau entsprechend am Verhältnis für den Helligkeitsunterschied bei angehobenem Beleuchtungsniveau. Ein großer Gradient zwischen der Helligkeit des Lichtkegels und der Umgebung führt zu einem scharf begrenzen Lichtkegel und behindert das periphere Sehen. Der Übergang sollte daher weich erfolgen. Entsprechend wird ein Verhältnis zwischen der Helligkeit im Zentrum und am Rand des Lichtkegels von 3:1 empfohlen.

Das Auge passt sich an die jeweiligen Beleuchtungsverhältnisse an. Dieser Adaptationsprozess hat Einfluss auf wichtige Sehfunktionen. Im Gegensatz zum Sehen in heller Umgebung am Tage sind beim Sehen in der Dunkelheit die Sehschärfe geringer, die Kontrastwahrnehmung schlechter und die Blendempfindlichkeit größer. Zusätzlich ist das Farbensehen eingeschränkt. Die Anpassung des Auges an die Dunkelheit dauert mehrere Minuten. Erst dann können auch sehr geringe Helligkeitsunterschiede gesehen werden, wie sie Objekte vor dem dunklen Himmel oder auf Wegen haben. Die Helladaptation dagegen benötigt nur ca. 5 Sekunden. Zu helles Licht im Sehbereich beeinträchtigt das Sehen geringer Helligkeitsunterschiede in dem dunkleren Umfeld. Außerdem blenden Lichtquellen in der Dunkelheit viel stärker als in heller Umgebung, was zeitweilig das Sehen und damit die Sicherheit beeinträchtigen kann.

3 Untersuchung

Unter praxisähnlichen Bedingungen erfolgte eine dreiteilige Laborstudie zur Überprüfung der theoretischen Ansätze. Untersucht wurden:

1. Individuelle Einstellung von Helligkeit und Lichtkegelgröße,
2. Bewertung von vorgegebenen Beleuchtungssituationen sowie
3. Blendung und Flächengröße der Lichtaustrittsfläche.

Abbildungen 4 und 5 zeigen die Testsituationen für Tätigkeiten im Greifraum, für das Gehen in unebenem Gelände und bei der Handhabung mit einer Teleskopstange. Die Tests erfolgten in vollkommen dunkler Umgebung in einem Raum mit schwarzen Begrenzungsflächen und 4 m Breite, 6 m Länge und 2,8 m Höhe.

Abb. 4: Typische Tätigkeiten im Greifraum in der Laborstudie. Von links nach rechts: Montieren, Messen mit Meterstab und Schieblehre, Einsetzen eines Splintes

Abb. 5: Im Labor nachgestelltes unebenes Gelände mit verschiedenen Reflexionsgraden. Die Teleskopstange (rechts) simuliert die Bahnerdung. Links: Beleuchtungssituation mit klar begrenztem Lichtkegel von 50° und Spot; Mitte: Diffuse Ausleuchtung mit breitem Lichtkegel 70° bis 100° bei Versuchssituation Gehen; Rechts: Lichtkegel 50° bei Test mit Teleskopstange

3.1 Individuelle Einstellung (Mindestanforderungen)

Mit einer Stirnleuchte, die über einen variablen Fokus verfügt und dimmbar ist, war eine stufenlose Einstellung der Lichtkegelgröße zwischen 12° bis 54° Öffnungswinkel und der Beleuchtungsstärke in einer Messentfernung von 0,5 m zwischen 26 lx bis 450 lx (bis 11 400 lx fokussiert) möglich. Die Probanden hatten die Aufgabe, jeweils eine Einstellung zu wählen, die sie mindestens für die Arbeit im Greifraum und für das Gehen in einem unebenen Gelände benötigen. Zusätzlich wurde die Blendung für die gewählte Einstellung beim Blick in einen Spiegel bewertet, womit eine Begegnungssituation simuliert wurde.

3.2 Bewertung vorgegebener Beleuchtungssituationen

Mit einer marktüblichen Stirnleuchte wurden mit optisch klaren und diffusen Filtern und Filterkombinationen je acht Beleuchtungssituationen für typische Arbeiten im Greifraum und für das Gehen im Gleisbett realisiert. Getestet wurden Lichtkegelgrößen von 50° bis 100° Öffnungswinkel für unterschiedliche Beleuchtungsstärken. Tabelle 2 gibt einen Überblick über die Versuchsparameter. Die Bewertung der Blendung der jeweiligen Beleuchtungssituation erfolgte für jede Testsituation über den Blick in einen Spiegel.

Tab. 2: Versuchsparameter der 8 Testsituationen

Versuchs-situation	E_0 *) (Abstand 0,5 m)	E_{Spot} *) (Abstand 0,5 m)	**Öffnungswinkel des Lichtkegels** (E_0/10) *)	L_{max} **bei direktem Blick in Leuchte**
Arbeiten im Greifraum	5 lx bis 45 lx	ohne Spot	50° bis 100°	10 500 cd/m² bis 866 000 cd/m²
Gehen im Gelände	10 lx bis 90 lx	10 lx bis 270 lx **) ≈ 3 E_0	50° bis 100°	13 750 cd/m² bis 1 162 000 cd/m²

*) siehe Abb. 11 rechts oder 12 links

**) nur bei Öffnungswinkeln von 50°; Beim Einsatz von diffusen Filtern war die Beleuchtungsstärke im Zentrum E_0 am höchsten.

3.3 Untersuchung zur Direktblendung

Für gleiche Beleuchtungsstärkewerte am Auge wurden unterschiedlich große leuchtende Flächen bezüglich ihrer Blendwirkung in vier Stufen untersucht. Abbildung 7 zeigt den Versuchsaufbau. Die Blendung wurde anhand einer Bewertungsskala von 0 (unmerklich) bis 5 (unerträglich) beurteilt (Abb. 6). Zusätzlich wurde der gerade erkennbare Kontrast für die darüber angeordneten Felder mit verschiedenen Helligkeitsstufen bestimmt (Abb. 7).

0 unmerklich	1 erkennbar	2 gerade nicht störend	3 etwas störend	4 störend	5 unerträglich

Abb. 6: Skala zur Bewertung der Blendung beim direkten Blick in die Leuchte über einen Spiegel

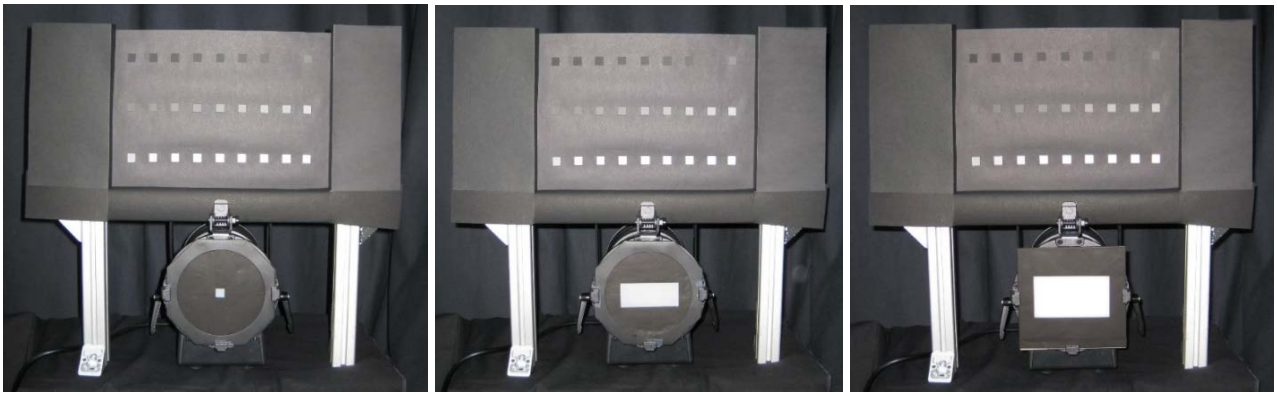

Abb. 7: Versuchssituation zur Bewertung der Blendung bei unterschiedlichen Flächengrößen: 1 cm x 1 cm (links), 3 cm x 7 cm (Mitte), 5 cm x 9 cm (rechts)

3.4 Probanden

An den Untersuchungen nahmen insgesamt 22 Probanden teil, darunter vier Personen, die im Fahrleitungsbau tätig sind. Ausgewählt wurden Personen, die über Erfahrungen im Umgang mit Stirnleuchten verfügen, sei es durch ihre berufliche Tätigkeit oder in der Freizeit. Da im Oberleitungsbau typischerweise Männer arbeiten, wurden nur Männer in die Untersuchung einbezogen. Für Personen ab einem Alter von etwa 45 Jahren ist zu erwarten, dass durch die Alterung des Auges Veränderungen in Sehschärfe, Lichtbedürfnis und Blendempfinden auftreten, die bei der lichttechnischen Auslegung von Stirnleuchten beachtet werden müssen. An der Untersuchung nahmen Probanden im Alter zwischen 40 und 75 Jahren teil (Ø 51 ± 7 Jahre).

3.5 Ergebnisse

Die Bewertungen der Vergleichsgruppe der Praktiker decken sich mit den Aussagen der anderen Probanden. Daher wurden die Ergebnisse über alle Probanden zusammengefasst.

3.5.1 Individuelle Einstellung – Arbeiten im Greifraum

Im Mittel wurde von den Probanden ein Beleuchtungsniveau von 65 lx gewählt. Zwei Probanden akzeptierten Beleuchtungsniveaus von unter 15 lx, 10 Personen wählten Beleuchtungsstärken bis 35 lx. Maximal wurde eine Beleuchtungsstärke von 177 lx eingestellt.

Probanden wählten Lichtkegelgrößen zwischen 35° und 55° mit einem Mittelwert von 50°. Also wird ein Lichtkegel mit einem Öffnungswinkel von 50° als notwendig erachtet. Nur vier Personen stellten kleinere Lichtkegelgrößen zwischen 35° bis 40° ein. Für die gewählten Einstellungen wurde die Blendung beim direkten Blick in die Leuchte zwischen 2: *gerade nicht störend* bis 5: *unerträglich* und im Mittel mit 3,3: als *etwas störend* bis *störend* bewertet.

3.5.2 Individuelle Einstellung – Gehen im Gleisbett

Für das Erkennen von Hindernissen und Unebenheiten beim Gehen wählten die Probanden im Mittel 140 lx, was etwa der doppelten Beleuchtungsstärke im Vergleich zum Arbeiten im Greifraum entspricht. 2/3 der Probanden stellten Lichtkegel mit einem Öffnungswinkel von 50° ein, 6 Probanden waren mit Öffnungswinkeln zwischen 30° und 40° zufrieden. Bezüglich der Blendung ist die Bewertung identisch zur Einschätzung beim Arbeiten im Greifraum.

Zusätzlich wurde der Blickabstand (Abstand Standort der Person – Zentrum Lichtkegel auf dem Weg) bestimmt. Es ergab sich eine Entfernung zwischen 0,6 m bis 3,4 m mit einem Mittelwert von 1,6 ± 0,7 m. Demnach blickt die Mehrheit der Probanden in einen Bereich zwischen 1 m bis 2 m voraus, was Sehentfernungen von 2 bis 3 m entspricht.

3.5.3 Bewertung vorgegebener Beleuchtungssituationen – Arbeiten im Greifraum

Die Bewertung der Gesamtsehsituation ist in Abbildung 8 dargestellt. Danach werden Beleuchtungsniveaus ab 18 lx mit breitem Lichtkegel und geringer Blendung bevorzugt. Für die getesteten Montage- und Messtätigkeiten ist diese Helligkeit ausreichend, ohne dass störende Reflexblendung auftritt, wie sie bei höheren Beleuchtungsniveaus kritisiert wurde.

Mechanische Arbeiten wie Schraubverbindungen oder das Setzen von Splinten sind sehr robust in den getesteten Beleuchtungssituationen. Selbst bei geringen Beleuchtungsstärken

waren diese Tätigkeiten für die Probanden ohne Probleme möglich. Kritischer sind Messtätigkeiten, besonders aufgrund glänzender Oberflächen, wie sie beim Messen mit einem analogen Messschieber vorkommen. Vorteile bieten digitale Anzeigen.

Eine breite Ausleuchtung erzwingt wenig Nachjustierung des Lichtkegels und kommt ohne zusätzliche Kopfbewegungen aus, um den gesamten Arbeitsbereich erfassen zu können und auch in der Peripherie das Sehen zu ermöglichen.

Wird ein Diffusor am Leuchtenkopf verwendet, führt dies zu einem breit ausgeleuchteten Lichtkegel und verhindert den direkten Blick auf die LED. Durch den Diffusor wird die maximale Leuchtdichte der Lichtaustrittsfläche und so die störende Blendwirkung reduziert. War der LED-Chip sichtbar, wurde die Blendung um eine Stufe kritischer bewertet.

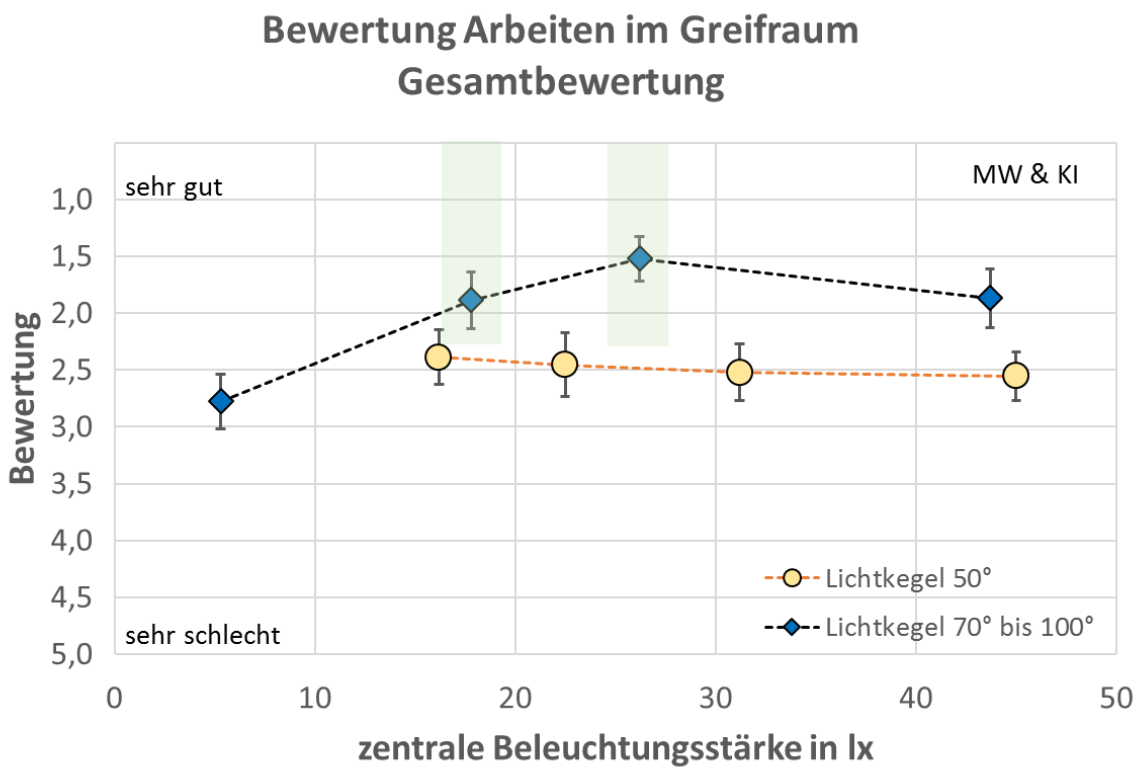

Abb. 8: Gesamtbewertung der Beleuchtungssituation zum Arbeiten im Greifraum (N = 22)

3.5.4 Bewertung vorgegebener Beleuchtungssituationen – Gehen im Gleisbett

Abbildung 9 zeigt die Gesamtbewertung für die getesteten Beleuchtungssituationen beim Gehen im unebenen Gelände und für die Nutzung einer Teleskopstange. Danach werden Beleuchtungsniveaus ab 40 lx mit breitem Lichtkegel bei geringerer Blendung bevorzugt. Beleuchtungssituationen mit breitem Lichtkegel wurden besser bewertet, da weniger Kopfbewegungen oder die Ausrichtung der Leuchte notwendig sind.

Im Vergleich zu fokussierten Lichtverteilungen war ein sanfter, nicht sprunghafter Übergang in der Lichtverteilung vom Lichtkegel zur Dunkelheit wichtig, da dies das Sehen in der Peripherie und Erfassen der Gesamtsituation ermöglicht. Ein großes Sehfeld wurde von den Probanden als angenehm bewertet. Für räumliches Sehen ist eine gewisse Lichtrichtung förderlich.

Aufgrund der höheren Lichtströme im Vergleich zu den Beleuchtungssituationen beim Arbeiten im Greifraum wird die Direktblendung kritischer bewertet. Aber auch hier zeigte sich, dass niedrigere Leuchtdichten bei diffuser Abstrahlung weniger stören. Während Leuchtdichten bis 100 000 cd/m² *etwas störend* bis *störend* bewertet wurden, beurteilten die Probanden die um etwa den Faktor 10 höheren Leuchtdichten bei gerichteter Abstrahlung als *störend* bis *unerträglich*.

Da der Lichtkegel beim Gehen in die Laufebene abgebildet wird, ist eine Verschiebung des Lichtzentrums ins obere Drittel sinnvoll. Damit kann eine bessere Gleichmäßigkeit der Beleuchtungsstärke innerhalb des auf dem Weg ausgeleuchteten Bereichs durch den schräg auf den Weg fallenden Lichtkegel erreicht werden.

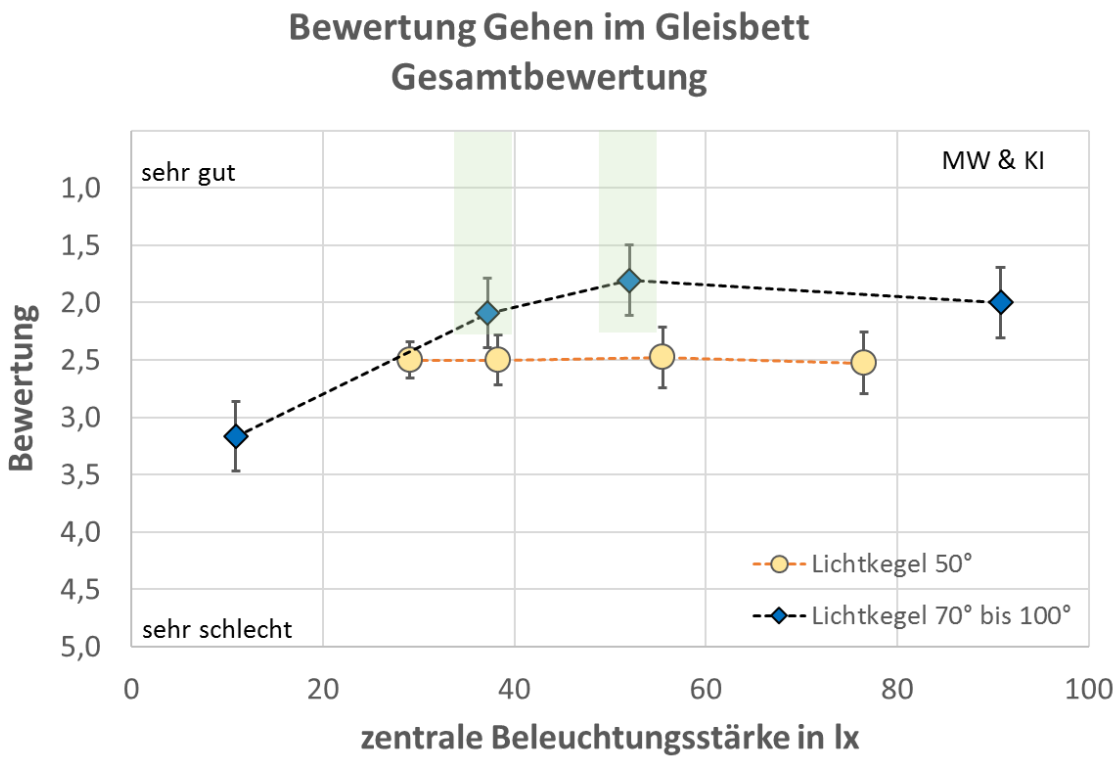

Abb. 9: Gesamtbewertung der Beleuchtungssituation zum Gehen im Gleisbett (N = 22)

3.5.5 Bewertung von Blendung und Flächengröße

Die Ergebnisse zu diesem Untersuchungsteil sind in Abbildung 10 dargestellt.

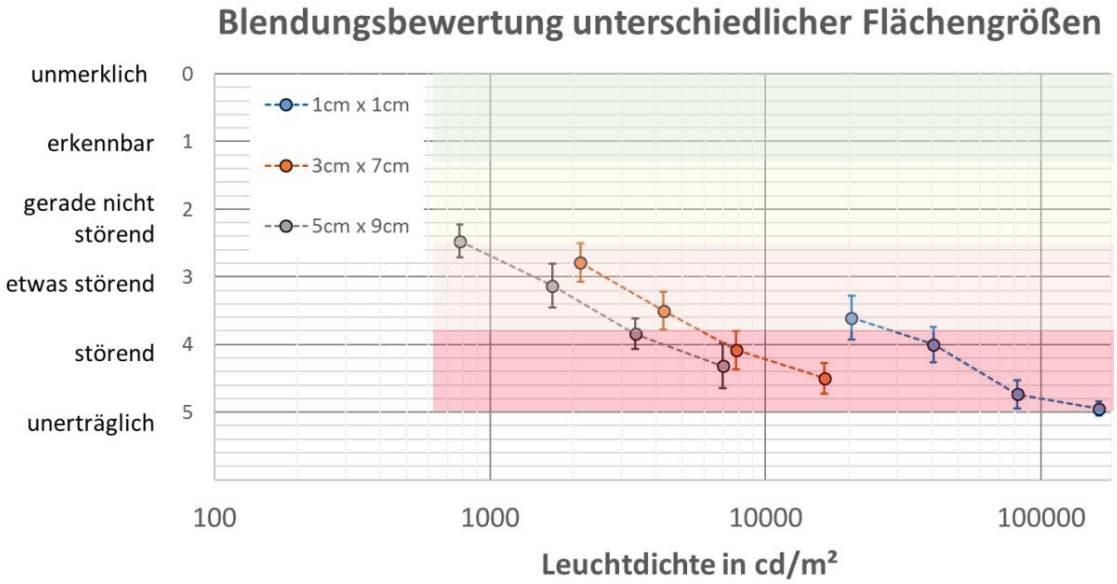

Abb. 10: Blendurteile in Abhängigkeit von der Größe der leuchtenden Fläche (N = 19)

Klar zeigt sich auch hier der Zusammenhang zwischen Leuchtdichte und Blendwirkung. Im Vergleich zum kurzen Blick in den Untersuchungen zuvor, war der Blick des Probanden hier längere Zeit auf die Blendquelle gerichtet, da zusätzlich noch die erkennbaren Kontraste ermittelt wurden. Entsprechend fielen die Blendungsurteile noch kritischer aus. Zu erwarten ist, dass Personen störender Blendung durch Änderung der Blickrichtung versuchen auszuweichen. Größere leuchtende Flächen werden weniger störend empfunden, da sie bei gleichem Lichtstrom für niedrigere Leuchtdichten ausgelegt werden können. Außerdem zeigt die Untersuchung, dass je größer die Leuchtdichte der Blendquelle ist, desto weniger können geringe Kontraste erkannt werden. Größere Lichtaustrittsflächen am Leuchtenkopf stören weniger bei der Erkennung geringer Kontraste.

4 Lichttechnische Eigenschaften von Helmleuchten

Die Auswertung der experimentellen Daten und die messtechnische Analyse der Lichtverteilungen ermöglicht Empfehlungen für lichttechnische Parameter. Eine sehr gut akzeptierte Lichtverteilung für das Arbeiten im Greifraum zeigt Abbildung 11, links. Diese kann mit der Funktion $I(\gamma_1) = I_0 \cdot cos^x \gamma_1$ angenähert werden. Exponenten x zwischen 1,8 bis 5 wurden sehr gut bewertet. Auf dieser Basis lassen sich zum einen die Gleichmäßigkeit der Lichtverteilung innerhalb des Lichtkegels und zum anderen der Übergang zur dunklen Umgebung beschreiben (Abb. 11, rechts).

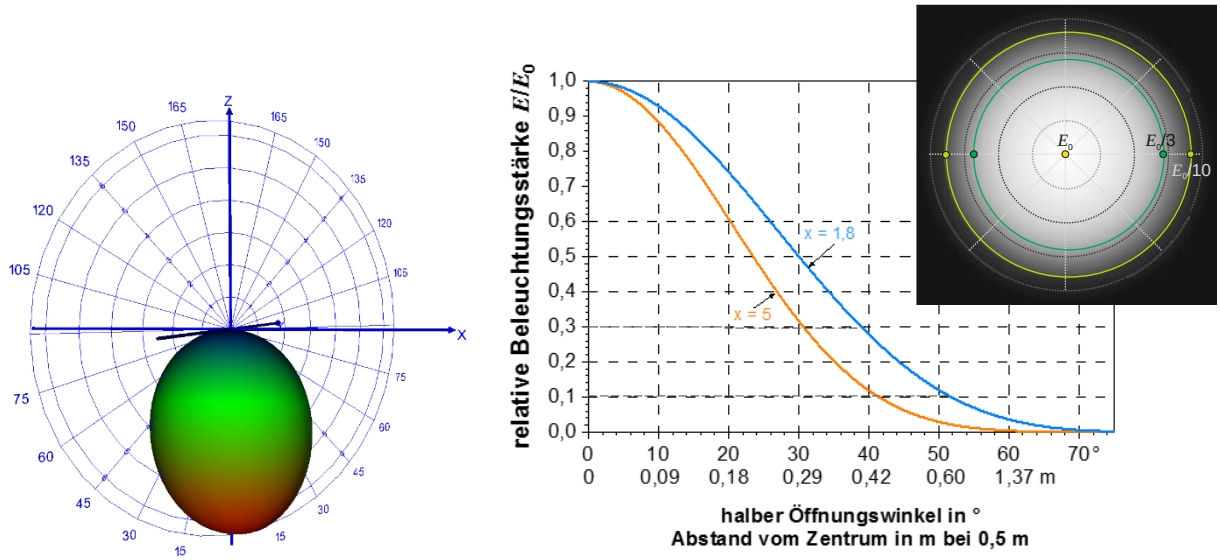

Abb. 11: Sehr gut bewertete Lichtstärkeverteilung für Arbeiten im Greifraum (links) und relativer Beleuchtungsstärkeverlauf für Exponenten x von 1,8 (blaue Kurve) und 5 (orange Kurve) für den senkrecht auf die Messebene ausgerichteten Lichtkegel (rechts)

Innerhalb des erforderlichen Sehbereichs, sollte die Beleuchtungsstärke zum Rand hin $E_0/3$ der zentralen Beleuchtungsstärke E_0 betragen und in einem gewissen Bereich auf $E_0/10$ sanft abfallen. Sprunghafte Änderungen sollten vermieden werden.

4.1 Größe des Lichtkegels

Aus den Untersuchungen folgt, dass Lichtkegel mit einem Öffnungswinkel von > 50° gewünscht werden. Im Versuch wurden Lichtkegel mit 100° Öffnungswinkel ($E_0/10$) am besten bewertet, sowohl für das Arbeiten im Greifraum als auch für das Gehen im Gleisbett. Eine Anpassung der Größe des Lichtkegels ist wünschenswert. Mit einer fokussierten Einstellung lassen sich größere Leuchtweiten erzielen, wie sie beim Orientierungsblick notwendig sind. Ist der Lichtkegel zu klein, werden Kopfbewegungen erzwungen und sind Positionsanpas-

sungen der Lichtrichtung der Helmleuchte erforderlich. Das Sehen in der Peripherie ist eingeschränkt, da zu wenig Licht in diese Sehbereiche einstrahlt. Eine zu breite Abstrahlung birgt das Risiko der Zunahme ablenkender Reflexe und erfordert einen höheren Lichtstrom bei Abnahme der Leuchtdauer, da die Kapazität der Stromversorgung begrenzt ist.

4.2 Beleuchtungsniveau in dunkler Umgebung

Das Beleuchtungsniveau in der Sehebene wird durch Lichtstrom und Lichtverteilung (Größe des ausgeleuchteten Bereichs) bestimmt und durch die Kapazität der Stromversorgung für die Leuchte und die Mindestleuchtdauer begrenzt. Ist es zu dunkel, ist das Sehen erschwert und Gefahren können nicht sicher erkannt werden. Zu viel Licht im Sehbereich kann zu störenden Reflexen auf glänzenden Oberflächen führen und erhöht gleichzeitig die Blendung beim Blick in die Leuchte, da ein höherer Lichtstrombedarf mit einer Zunahme der Leuchtdichte der Lichtaustrittsfläche einhergeht. Gleichzeitig bestimmt die Helligkeit im Sehbereich den Adaptationszustand der Augen. Das Erkennen geringer Helligkeitsunterschiede setzt ein gewisses Maß an Dunkeladaptation voraus, die durch zu helles Licht gestört wird und damit das Sehen in der Peripherie reduziert. Für ungestörtes Sehen sollte der Helligkeitsunterschied zwischen dem beleuchteten Sehobjekt im Lichtkegel und der dunklen Umgebung ideal 10:1 bis maximal 100:1 sein. Demnach sollte das Beleuchtungsniveau in der Arbeitsebene unter der Voraussetzung ähnlicher Reflexionseigenschaften für das Infeld zwischen 1 bis 10 lx bzw. 20 bis 200 lx betragen.

Für Arbeiten im Greifraum in dunkler Umgebung sind zentral E_0 = 25 lx in einem Abstand von 0,5 m ein guter Kompromiss zwischen Beleuchtungsstärke und Blendungsbegrenzung. Dies kann bei der breiten Lichtverteilung gemäß Abbildung 11 mit einem Lichtstrom von 15 lm realisiert werden.

Beim Gehen wurde in der Gesamtbewertung das doppelte Beleuchtungsniveau im Vergleich zum Arbeiten im Greifraum bevorzugt (E_0 = 50 lx bei 0,5 m Abstand). Innerhalb des typischen Blickabstands von 1 m bis 2 m voraus beträgt die horizontale Beleuchtungsstärke auf dem Weg mindestens 1 lx, was sogar auf Rettungswegen in Innenräumen ohne vorherige Dunkeladaptation normkonform ist. Die Kombination der breiten Ausleuchtung mit einem Spot im oberen Drittel des Lichtkegels ist sinnvoll, wobei die Beleuchtungsstärke im Spot mit $3 \cdot E_0$ abgeschätzt wird (Abb. 12). Dies ist gleichbedeutend mit der dreifachen Lichtstärke in diese Richtung.

Im Vergleich zur freien Einstellung aus dem ersten Versuchsteil für das Gehen (Mittelwert E_0 = 140 lx) wurden im zweiten Versuchsteil bei der Vorgabe von Beleuchtungssituationen etwas niedrigere Beleuchtungssituationen (E_0 = 50 lx) akzeptiert. Für die Bewertung befanden sich die Probanden bereits längere Zeit in dunkler Umgebung. Bezogen auf den Spotbereich ähneln sich die Werte.

Für den kurzzeitigen Orientierungsblick sind Sehentfernungen von bis zu 10 m relevant. Die Beleuchtungsstärke sollte 2 lx nicht unterschreiten. Dies entspricht einer Lichtstärke von 200 cd. So kann auch eine abgefahrene, geschwärzte Fahrleitung gegen den dunklen Himmel noch erkannt werden (Abb. 13).

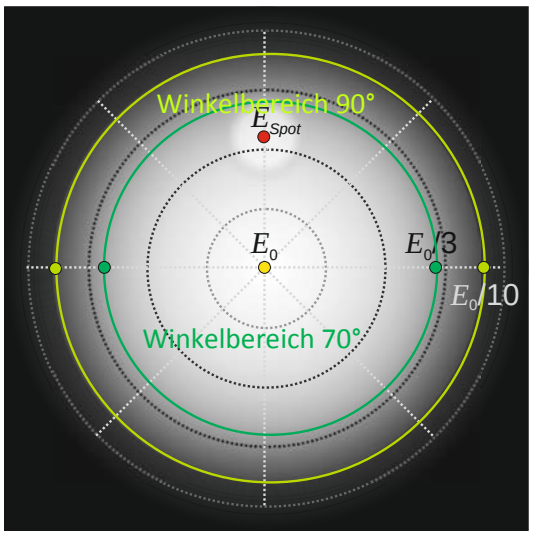

Abb. 12: Lichtverteilung für den senkrecht auf die Messebene ausgerichteten Lichtkegel

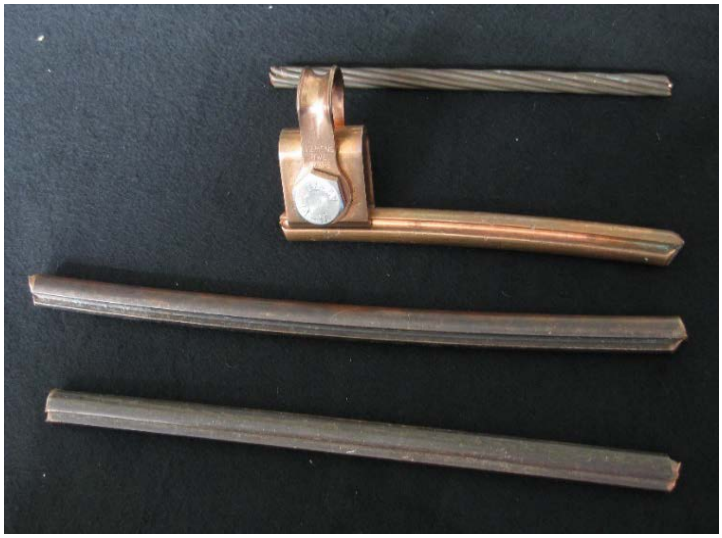

Abb. 13: Beispiele für Zustände von Fahrleitung: beide unten nach Nutzungsdauer, darüber im Neuzustand und oben Beispiel für Tragseil

4.3 Größe der Lichtaustrittsfläche

In den Versuchen wurde die Blendung bei Leuchtdichten bis 100 000 cd/m² *etwas störend* bis *störend* bewertet. Messungen der Leuchtdichte an Lichtaustrittsflächen zeigen sehr hohe Leuchtdichten, die diesen Wert um mehr als den Faktor 10 übersteigen, sobald der Blick direkt auf den LED-Chip möglich ist (Abb. 13).

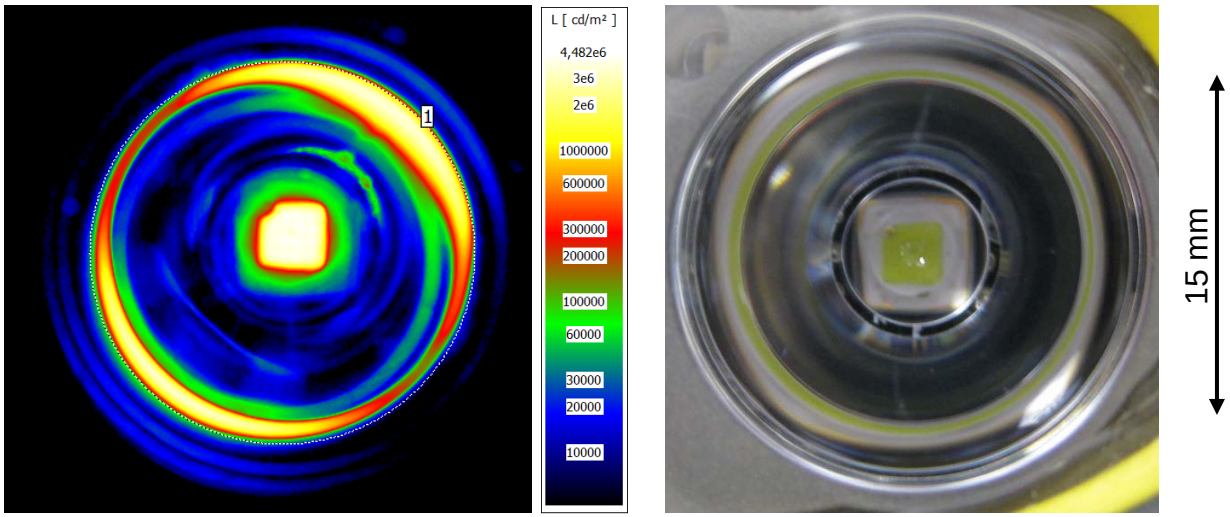

Abb. 13: Leuchtdichtebild einer Stirnleuchte mit sichtbarem LED-Chip (links) und deren Foto (rechts)

Der direkte Blick in die LED sollte über Entblendungsmaßnahmen (Optiken/ Diffusoren) verhindert werden. Gleichzeitig gilt: Je größer die Licht abstrahlende Fläche ist, umso geringer ist deren Leuchtdichte bei gleichem Lichtstrom.

5 Zusammenfassung

Für die unterschiedlichen Einsatzzwecke sind verschiedene Lichtmodi zur Anpassung von Lichtleistung und Lichtverteilung erforderlich. Nur so kann gewährleistet werden, dass mit „so viel Licht wie nötig“ und so „wenig Licht wie möglich“ der Sehbereich für die jeweiligen Einsatzzwecke ausgeleuchtet ist, ohne die Adaptation der Augen an die Dunkelheit zu stören und Blendung und damit unfallrelevante Sehstörungen zu vermeiden. Die Ergebnisse der Untersuchungen sind in Tabelle 3 zusammengefasst. Die Lichtverteilung im Lichtkegel sollte eine gewisse Gleichmäßigkeit aufweisen und der Übergang zur dunklen Umgebung sanft und nicht sprunghaft erfolgen (Übergangsbereich $E_0/3$ zu $E_0/10$).

Tab. 3: Ergebnisse der Untersuchung

Einsatz-zweck	**Typische Sehdistanz**	**Lichtkegel Öffnungswinkel $\alpha^{+)}$**	**Beleuchtungs-stärke E_0 *)**	**Lichtstärke I_0**
Greifraum	0,5 m	70° ($E_0/3$); 75° bis 100°	25 lx	6,5 cd
Gehen	1 m bis 2 m	70° bis 100°	50 lx**)	13 cd
Orientierung	*bis 10 m*	*≈ 15°*	*800 lx*	*200 cd*

+) bezieht sich auf den Bereich bei $E_0/10$

*) in 0,5 m Entfernung

**) auch mit Spot im oberen Drittel kombinierbar, hier $E_{Spot} \approx 3 \cdot E_0$

Wichtig für den Einsatz der Helmleuchte ist, dass die Lichtleistung mit schwächer werdenden Batterien nicht abnimmt, sondern die Beleuchtungsverhältnisse über die Einsatzzeit konstant sind. Erst wenn die Batterien fast entladen sind, darf eine automatische Umschaltung in den Reservemodus erfolgen, sodass in jedem Fall eine gefahrlose Rückkehr in einen beleuchteten Bereich möglich ist. In den Herbst- und Wintermonaten sind bis zu 8 Stunden Leuchtdauer erforderlich. Die Kapazität der zur Stromversorgung eingesetzten Batterien oder Akkus muss diese Leuchtdauer ermöglichen. Je höher der Lichtstrom der Leuchte ist, umso kürzer ist die Leuchtdauer. Begrenzend ist auch das Gewicht des Akku- bzw. Batteriepacks, das alternativ im Leuchtenkopf oder am Halteband montiert wird. Die im Versuch getestete Leuchte hatte ein Gewicht von 165 g und wurde von den Probanden in Kombination mit dem Helm nicht als zu schwer empfunden. Da die Dimmung von Leuchten mit LED-Lichtquellen über Pulsweitenmodulation (PWM) üblich ist, muss in jedem Falle die PWM-Frequenz ausreichend hoch sein, damit nicht Flimmern oder Pulsation zu Unfallgefahren

oder Ermüdung führen. Die Auslegung mit einer PWM-Frequenz oberhalb der Flimmerverschmelzungsfrequenz von etwa 100 Hz kann mögliche Stroboskopeffekte nicht vermeiden. Aus Untersuchungen im Innenraum werden 400 Hz empfohlen [Fog18]. Jedoch ist das Thema in Fachkreisen noch in der Diskussion. Die Regelung des Lichtstroms der LED ist auch mittels Konstantstromregelung realisierbar. Im Gegensatz zur Pulsweitenmodulation treten hier keine zeitlichen Änderungen des Lichtstroms auf. Mögliche spektrale Änderungen sind beim Einsatz von Helmleuchten tolerierbar.

Die Ausführungen hier beschreiben nur die lichttechnischen Eigenschaften einer Helmleuchte für den Einsatz im Oberleitungsbau. Bei der Auswahl sind aber auch ergonomische Aspekte, Bedienphilosophie und Handhabung wesentlich, die zweckmäßig für die Arbeit im Freien sein müssen. Abbildung 14 zeigt die Vielzahl möglicher Kriterien für die Auswahl einer geeigneten Leuchte.

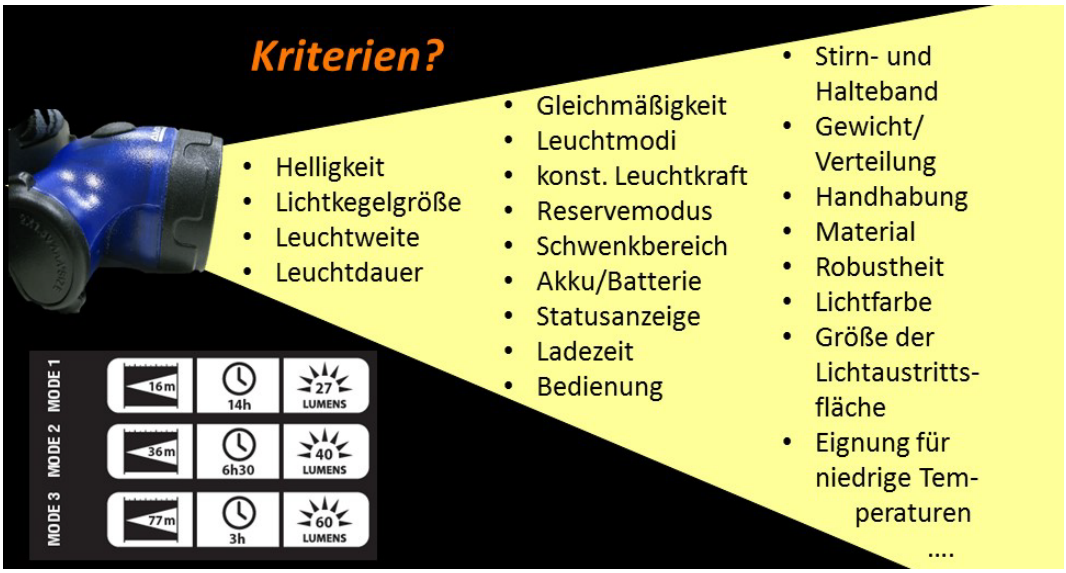

Abb. 14: Beispielhafte Kriterien für die Auswahl einer geeigneten Leuchte

Recherchen zu auf dem Markt erhältlichen Stirn- und Helmleuchten ergaben, dass eine Helmleuchte, die genau die hier beschriebenen lichttechnischen Eigenschaften besitzt, derzeit so nicht verfügbar ist. Zurzeit wird mit Herstellern an der Anpassung von Leuchten gearbeitet. Eine Evaluierung im Praxiseinsatz ist geplant.

In der Arbeitsstättenregel ASR A3.4 werden für normale Tätigkeiten Mindestbeleuchtungsstärken von 100 lx sowie 200 lx für feine Arbeiten gefordert. Im Bodenbereich von Verkehrswegen sind 20 lx vorgeschrieben. Für Arbeitsplätze im Freien ist in Anlage 2 der ASR für Tätigkeiten im Gleisbereich und auf Verkehrswegen in Bahnanlagen eine Mindestbeleuchtungsstärke von 10 lx verlang [ASR11]. Unter den besonderen Einsatzbedingungen im Oberleitungsbau in dunkler Umgebung sind diese Anforderungen so nicht erfüllbar.

Literaturverzeichnis

[ASR11] Technische Regeln für Arbeitsstätten ASR A3.4: Beleuchtung, April 2011 Tabelle 2: Mindestwerte der Beleuchtungsstärken auf Baustellen, S. 13

[Bod62] Bodmann H W., Voit E A.: Versuche zur Beschreibung der Hellempfindung. Lichttechnik 14(8) 394-400 (1962)

[Fog18] Oberhollenzer B., Kraushaar A., Wittmann J., Byshko R., Betzler F., Bieske K., Schierz Ch.: *Kriterien für LED-basierte Allgemeinbeleuchtung in Druckereien*. Fogra-Forschungsbericht 11.003 (2018)