

Entwicklung einer LED-Straßenleuchte

Matthias Groß

Ostring 34

91126 Schwabach

Vorwort

Dieser Beitrag ist eine Diplomarbeit an der Georg-Simon-Ohm Hochschule in Nürnberg und stellt einen Auszug dar, da sie zum jetzigen Zeitpunkt (29. Juni 2009) noch nicht beendet ist.



Sollten Sie Fragen haben, können Sie gerne mit meinem Betreuer oder mir in Kontakt treten:

Verfasser: Matthias Groß

GrossMa25244@ohm-hochschule.de

Betreuer: Prof. Dr.-Ing. Alexander von Hoffmann

alexander.vonhoffmann@ohm-hochschule.de

Inhaltsverzeichnis

Vorwort.....	2
Inhaltsverzeichnis	3
Formelzeichen	5
1. Motivation	8
2. Leuchtmittel in der Straßenbeleuchtung	10
3. DIN EN 13201 – Straßenbeleuchtung.....	12
3.1. Erklärung der Gütemerkmale	15
3.1.1. Leuchtdichte	15
3.1.2. Beleuchtungsstärke	18
3.1.3. Gleichmäßigkeit.....	20
3.1.4. Blendungsbegrenzung.....	21
3.1.5. Umgebungs-Beleuchtungsstärkeverhältnis.....	22
3.1.6. Farbwiedergabe.....	22
4. Marktanalyse	23
5. Lastenheft.....	24
6. Optische Auslegung	26
6.1. Straßensimulation („Street Simulation“).....	27
6.2. Erstellen einer Freiform-Fläche („Create optical FF surface“)	30
6.2.1. Erstellen des Rasters („Set Grid / Grid settings“).....	31
6.2.2. Erstellen der Lichtquelle („Set Source“)	33
6.2.3. Definition der Winkelbereiche ("Set Spread").....	34
6.2.4. Sensor konfigurieren ("Set Sensor")	36
6.2.5. Füllmethode zwischen den Segmenten ("Set Gaps")	36
6.3. Ergebnis	37
7. Konstruktion des Gehäuses	39

8. Aussicht	43
Abbildungsverzeichnis	44
Literaturverzeichnis	46

Formelzeichen

Bezeichnung	Beschreibung	Einheit
A	Fläche	[m ²]
a	Abstand zwischen den Leuchten	[m]
b	Straßenbreite	[m]
d	Abstand der Berechnungspunkte in Längsrichtung	[m]
E	Beleuchtungsstärke	[lux]
\bar{E}	mittlere Beleuchtungsstärke	[lux]
E_h	horizontale Beleuchtungsstärke	[lux]
E_{hs}	halbsphärische Beleuchtungsstärke	[lux]
E_{max}	maximale Beleuchtungsstärke	[lux]
E_{min}	minimale Beleuchtungsstärke	[lux]
E_p	gesamte Beleuchtungsstärke am Punkt P	[lux]
E_{sc}	halbzylindrische Beleuchtungsstärke	[lux]
E_v	vertikale Beleuchtungsstärke	[lux]
h	Lichtpunkthöhe	[m]
I	Lichtstärke	[cd]
I	Lichtstärke pro Kilolumen	[cd/klm]
L	Leuchtdichte	[cd/m ²]
\bar{L}	mittlere Leuchtdichte	[cd/m ²]

L_{max}	maximale Leuchtdichte	[cd/m ²]
L_{min}	minimale Leuchtdichte	[cd/m ²]
L_p	gesamte Leuchtdichte am Punkt P	[cd/m ²]
L_v	Schleierleuchtdichte	[cd/m ²]
MF	Produkt aus Lampenwartungsfaktor und Leuchtenwartungsfaktor	-
n	Anzahl der bei der Berechnung zu berücksichtigten Leuchten	-
q	Leuchtdichtekoeffizient	[sr ⁻¹]
r	Reduzierter Leuchtdichtekoeffizient	[sr ⁻¹]
SR	Umgebungs-Beleuchtungsstärkeverhältnis (surrounding ratio)	-
TI	Schwellenwerterhöhung (threshold increment)	[%]
U_0	Gesamtgleichmäßigkeit	-
U_l	Längsgleichmäßigkeit	-
α	Winkel zwischen der Ebene des einfallendem Lichtstrahl und Ebene der Normalen auf der ebenen Oberfläche des Halbzylinders	[°] (Grad)
β	Ausstrahlungswinkel	[°] (Grad)
γ	Vertikaler photometrischer Winkel	[°] (Grad)
ε	Lichteinfallswinkel	[°] (Grad)
θ_m	Messlage der Leuchte	[°] (Grad)

Φ	Lichtstrom	[lm]
φ	Installationsazimut	[°] (Grad)

1. Motivation

Mehr als 40% der Straßenbeleuchtung verwendet zur Lichterzeugung Lampen, die Quecksilber enthalten. In naher Zukunft beabsichtigt die EU-Kommission der Quecksilberdampf-Lampe die CE-Kennzeichnung zu entziehen [1]. Dies bedeutet, dass dieser Lampentyp in Europa nicht weiter verkauft werden darf und durch einen anderen ersetzt werden muss.

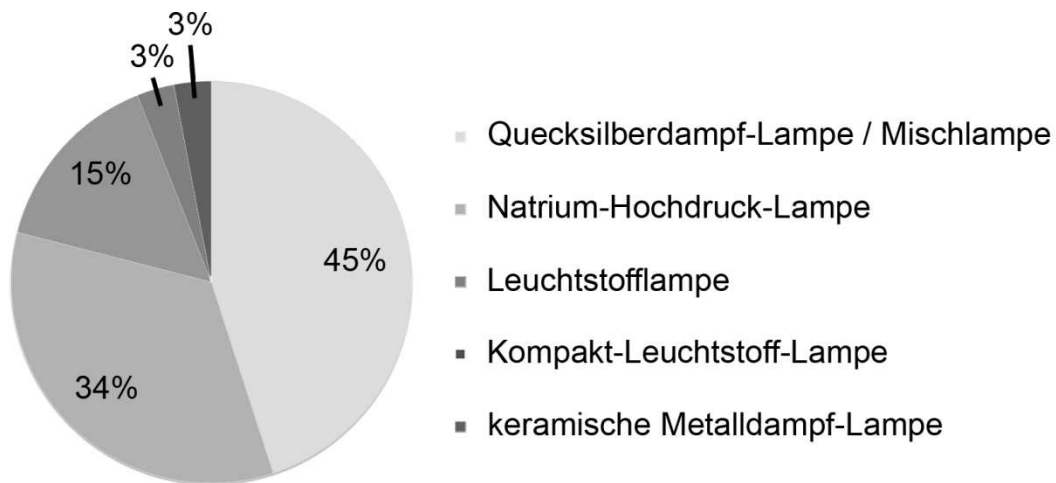


Abbildung 1: Technologieverteilung 2006 (Quelle: Statistisches Bundesamt)

Dazu kommt, dass über ein Drittel der Straßenbeleuchtung älter als 20 Jahre ist. Diese Leuchten besitzen veraltete und verschmutzte Reflektoren und haben einen schlechten Wirkungsgrad.

Leuchtdioden werden immer leistungsfähiger und es liegt nahe, diese auch in der Straßenbeleuchtung einzusetzen. Gegenüber den alternativen Leuchtmitteln, wie z.B. der Natrium-Hochdruck-Lampe bieten, LED's viele Vorteile :

- **Energieeinsparung und Klimaschutz [1]**

Ca. vier Millionen Kilowattstunden Strom werden in Deutschland alleine für die Straßenbeleuchtung verbraucht, dies entspricht ca. 1,6 Millionen Tonnen CO₂-Emission. Die Energieeffizienz bei Leuchtdioden ist im Vergleich zu den anderen Lampentypen deutlich besser. Daher kann der ca. CO₂-Ausstoß halbiert werden und Stromkosten in Höhe von ca. 400 Millionen Euro gespart werden.

- **Wartungskosten**

Aufgrund der hohen Lebensdauer von über 50.000 Stunden (dies entspricht bei einem Betrieb von 4.000 Stunden pro Jahr eine Lebensdauer von über zwölf Jahren) fallen nur sehr geringe Wartungskosten an. Damit amortisieren sich die

höheren Anschaffungskosten einer Straßenleuchte mit Leuchtdioden nach in wenigen Jahren.

- **Sicherheit**

Natrium-Hochdruck-Lampen haben auch einen guten Wirkungsgrad, geben aber gelbes Licht ab, das nicht erwünscht ist. Leuchtdioden, die weißes Licht emittieren, geben Farben sehr gut wieder. Objekte, Farben, Formen und andere Details werden leichter erkennbar. Die bessere Erkennbarkeit bringt eine Verkürzung der Reaktionszeit der Verkehrsteilnehmer mit sich, was eine Zunahme der Sicherheit bedeutet.

- **weitere Vorteile [1]**

Stufenlos dimmbar ohne Änderung der Farbtemperatur, robust und stoßfest.

Ziel dieser Diplomarbeit ist es eine LED-Straßenleuchte zu entwickeln, die eine Anwohnerstraße normgerecht mit einer einzigen Leuchtdiode beleuchten kann. Die Optik der Leuchte soll einen Freiform-Reflektor besitzen, der mit dem Optik-Simulationsprogramm LucidShape entworfen wird. Die Konstruktion des Kühlkörpers für die Leuchte erfolgt mit der 3D-Modelliersoftware Rhinoceros.

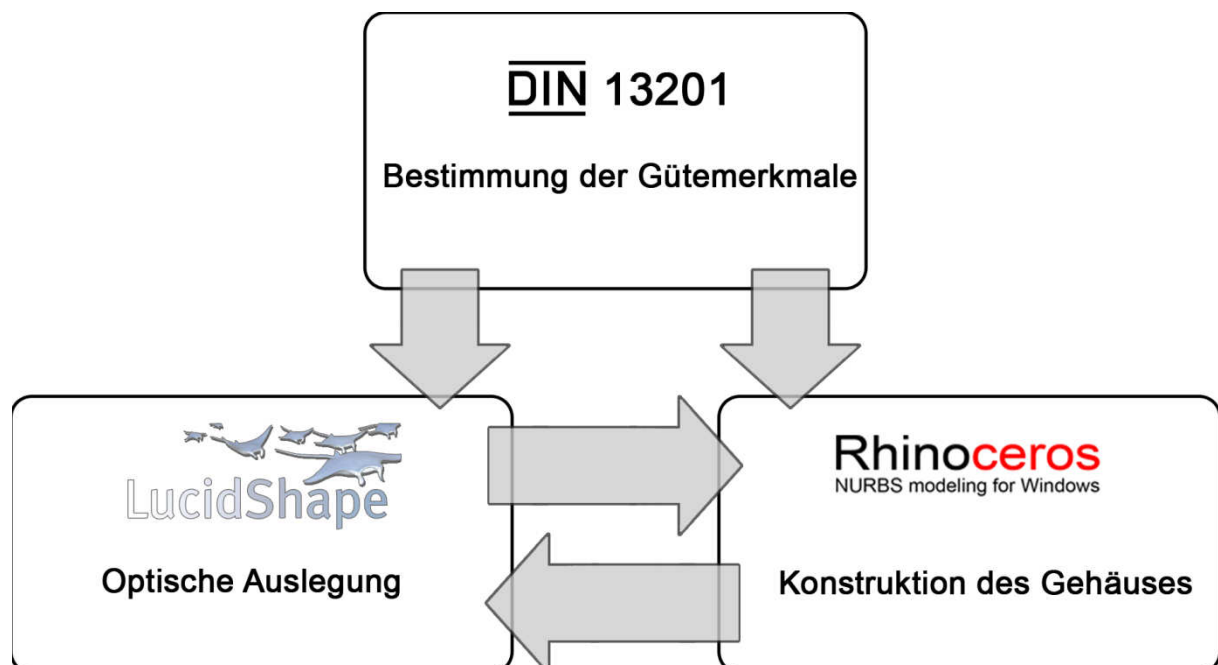


Abbildung 2: Vorgehensweise für die Entwicklung der LED-Straßenleuchte

2. Leuchtmittel in der Straßenbeleuchtung

In der Straßenbeleuchtung werden überwiegend Entladungslampen eingesetzt. Zu unterscheiden sind Nieder- und Hochdrucklampen. Die Funktionsweise ist bei beiden Typen weitgehend gleich und soll nur grob beschrieben werden: ein Gasgemisch oder ein Metalldampf wird mittels einer hohen elektrischen Spannung leitfähig gemacht (Ionisation), so dass ein Strom hindurchfließen kann und die Füllung bzw. einen auf dem Gehäuse aufgetragenen Leuchtstoff zum Leuchten bringt.

Neben Entladungslampen gibt es Temperaturstrahler, wie die Glühlampe oder Halogenlampe. Sie finden im Allgemeinen keine Verwendung in der Straßenbeleuchtung, da sie einen sehr schlechten Wirkungsgrad aufweisen. Der Vollständigkeit halber seien sie aber erwähnt.

Festkörperstrahler sind der dritte Typ von Lampen. Sie unterteilen sich in "normale" und organische Leuchtdioden. Organische Leuchtdioden, sogenannte OLED's, bestehen, wie der Name schon sagt, aus organischen Materialien. Herkömmliche Leuchtdioden verwenden einkristalline Werkstoffe. Leuchtdioden gehören zu der Gruppe von Elektrolumineszenzstrahlern, d.h. sie werden durch eine elektrische Spannung angeregt, Licht abzugeben. Da sie Hauptbestandteil dieser Diplomarbeit sind soll die Funktionsweise näher erläutert werden.

Eine Leuchtdiode besteht aus einem Halbleiterkristall, der wiederum aus zwei Gebieten besteht: dem n- und p-Gebiet. Im n-Bereich herrscht ein Überschuss an Elektronen, im p-Bereich ein Überschuss an Löchern. Legt man eine Spannung in Durchlassrichtung an, wandern Elektronen in Richtung des Grenzbereichs der beiden Schichten, der sogenannten Sperrschicht. Da das p-Gebiet energetisch günstiger ist, überschreiten sie die Grenze und rekombinieren dort mit einem vorhandenen Loch. Dabei wird ein Photon entsandt und man spricht von einem pn-Übergang.

Das emittierte Spektrum einer Leuchtdiode ist schmalbandig. Abhängig von den verwendeten Halbleitermaterialien und dem damit verbundenen Bandabstand kann man die Wellenlänge des emittierten Lichtes einstellen. Um weißes Licht zu erzeugen gibt es verschiedene Möglichkeiten. Zum einen kann man rotes, grünes und blaues Licht mischen, oder man verwendet eine blaue LED, überzieht diese mit einem Leuchtstoff (zum Beispiel einer Phosphorschicht) und erhält so weißes Licht. Beides sind Methoden der additiven Farbmischung.

Während bei einer Glühlampe nur ca. 5 % der verwendeten Energie in Licht umgewandelt werden, sind es bei der LED ca. 20 %, abhängig vom Typ der LED [2]. Da die Leuchtdiode aber so gut wie keine Wärmestrahlung abgibt muss die Wärme anders abgeführt werden. Eine gute Kühlung ist bei Leuchtdioden entscheidend. Mit zunehmender Wärme verringert sich der abgegebene Lichtstrom und die Lebensdauer verkürzt sich.

Leuchtdioden haben eine Lebensdauer von bis zu 100.000 Stunden. Hier machen die Hersteller sehr unterschiedliche Angaben. Unterschieden wird zwischen der Lebensdauer und der Nutzlebensdauer. Liefert die LED nur noch 80 % des anfänglichen Lichtstroms, ist die Nutzlebensdauer erreicht. Der Zeitpunkt der Lebensdauer ist erlangt, sobald nur noch 50 % Lichtstrom vorhanden sind. [2]

Mit einer Lichtausbeute von über $\eta_{NA_HD} = 140 \text{ lm/W}$ ist die Natriumdampf-Hochdrucklampe am effizientesten. Leuchtdioden erreichen momentan in Laborversuchen ca. $\eta_{LED_Labor} = 100 \text{ lm/W}$, in der Praxis ca. $\eta_{LED_Praxis} = 50 \text{ lm/W}$. [3]

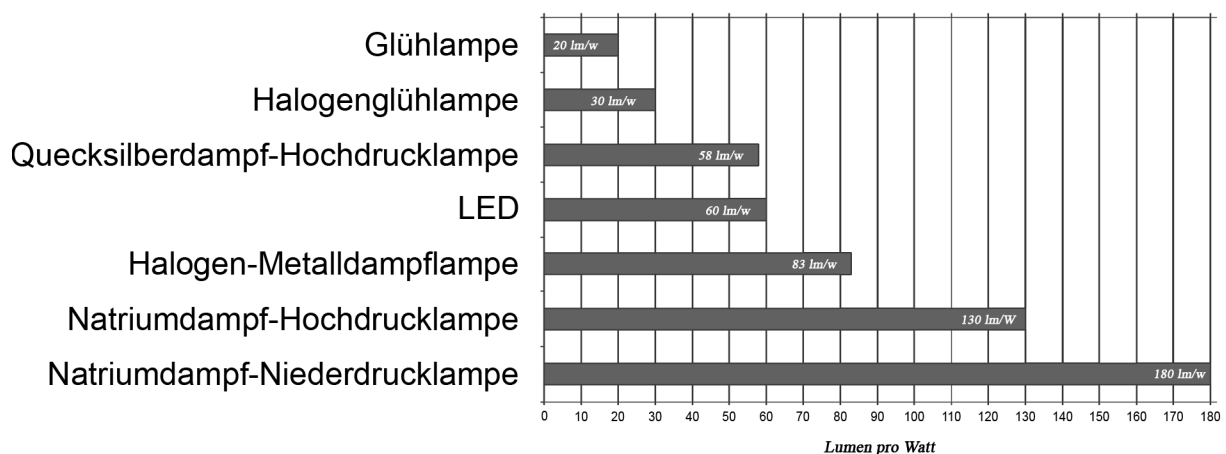


Abbildung 3: Effizient der Lichtquellen [3]

Die Effizienz einer Lichtquelle ist zu einem großen Teil abhängig von dem emittierten Spektrum. Allgemein kann man sagen, je schmalbandiger das Spektrum ist, desto effizienter ist die Lampe. Bei der Natriumdampf-Niederdrucklampe ist dies besonders deutlich: das Spektrum beschränkt sich auf einen sehr engen Bereich und die Effizienz ist sehr hoch. Die Glühlampe hingegen emittiert Licht aus dem gesamten Spektrum, was eine sehr schlechte Effizienz nach sich zieht.

3. DIN EN 13201 – Straßenbeleuchtung

In Europa gelten neben überwiegend einheitlichen Verkehrsregeln nun auch in 28 Staaten einheitliche Mindestanforderungen für die Straßenbeleuchtung. [4]

In Deutschland besteht die Norm aus vier Teilen:

DIN 13201-1	Auswahl der Beleuchtungsklassen
DIN EN 13201-2	Gütemerkmale
DIN EN 13201-3	Berechnung der Gütemerkmale
DIN EN 13201-4	Methoden zur Messung der Gütemerkmale

Der erste Teil ist der nationale Teil der Norm und ist nur in Deutschland gültig. Hier wird anhand verschiedener Verkehrskriterien eine Verkehrssituation erfasst und einer Beleuchtungssituation und Beleuchtungsklasse zugeteilt. Im zweiten Teil werden die lichttechnischen Größen, sogenannte Gütemerkmale, erläutert und Angaben über die Werte gemacht, die es zu erfüllen gilt. Teil drei beschreibt wie und an welchen Stellen die Leuchtdichte, die Beleuchtungsstärke und die anderen Gütemerkmale zu berechnen sind und es werden Verfahren zur Bestimmung der Lichtstärke einer Leuchte und Verfahren zur Interpolation erläutert. Der vierte Teil beschreibt, wie die lichttechnischen Größen messtechnisch zu erfassen sind.

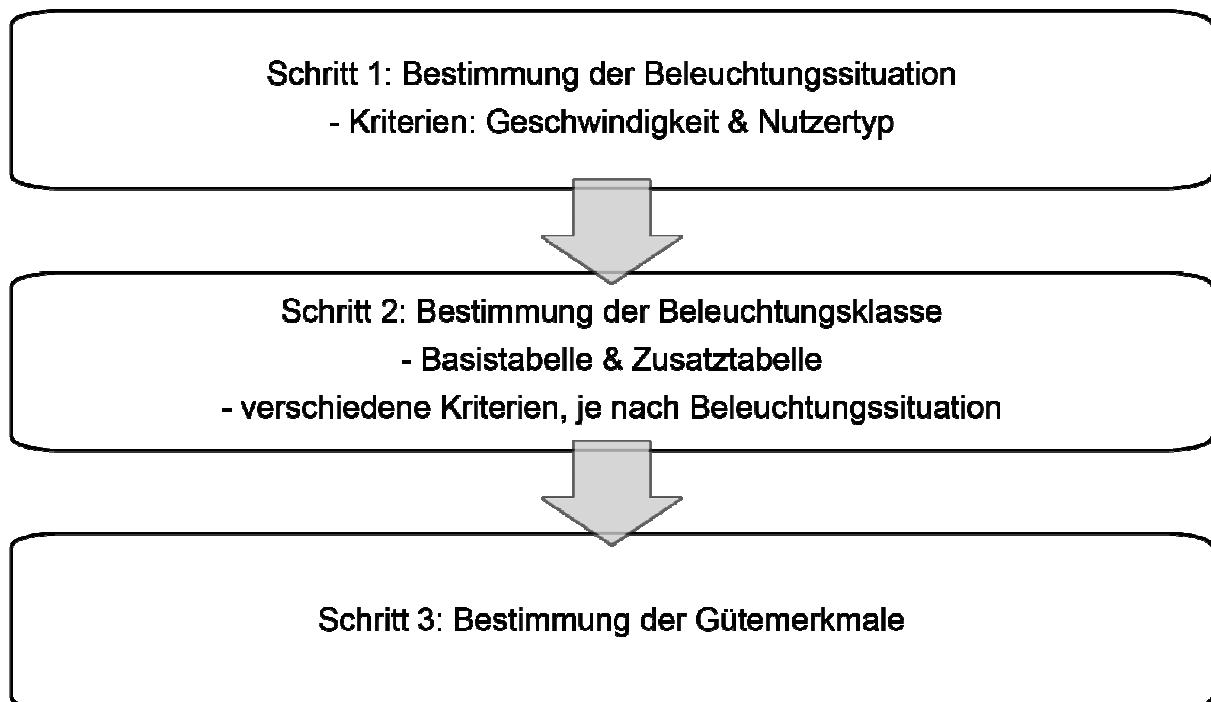


Abbildung 4: Vorgehensweise zur Bestimmung der Gütemerkmale

Im ersten Schritt wird die Beleuchtungssituation festgelegt. Die Beleuchtungssituation klassifiziert eine Straße grob: handelt sich um eine Autobahn, eine Hauptstraße, eine Anwohnerstraße etc. Kriterium sind neben der Geschwindigkeit des Hauptnutzers, die weiteren Nutzer der Straße. Nutzer können der motorisierte Verkehr, langsam fahrende Fahrzeuge (d.h. Fahrzeuge, die weniger als *40 km/h* fahren), Radfahrer (hierzu gehören auch Mopeds mit einer Geschwindigkeit von maximal *60 km/h*) oder Fußgänger sein.

Situation	Beispiele
A1	Autobahnen, Schnellstraßen
A2	Hauptverkehrs- und Durchfahrtsstraßen
A3	Hauptverkehrs- und Durchfahrtsstraßen
B1	Hauptverkehrsstraßen, Sammelstraßen, Anliegerstraßen
B2	Hauptverkehrsstraßen, Sammelstraßen, Anliegerstraßen
C1	Radwege, Fußwege, Bürgersteige
D1	Autobahnrastplätze, Containerplätze
D2	Taxistände, Bahnhofsvorplätze, Busbahnhof
D3	Anlieger- und Wohnstraßen
D4	Verkehrsberuhigte Zonen, Spielstraßen, Marktplätze, Parkplätze
E1	Fußgänger- und Einkaufszonen, Fußwege

Tabelle 1: Beispiele für die verschiedenen Beleuchtungssituationen [4]

Im zweiten Schritt wird auf die unmittelbare Umgebung der Straße eingegangen. Anhand zweier Tabellen, der sogenannten Basis- und Zusatztabelle werden, je nach Beleuchtungssituation, verschiedene Kriterien untersucht. .

Abhängig von der Art der Straße (Anwohnerstraße, Hauptverkehrsstraße, etc.) gibt es verschiedene Gütemerkmale, die es zu Erfüllen gilt.

Beleuchtungssituation	Beleuchtungsklasse	Gütemerkmale
A1, A2, A3	ME1 - ME5	$\bar{L}_m, U_0, U_l, TI, SR$
B1, B2	ME2 - ME6	$\bar{L}_m, U_0, U_l, TI, SR$
C1	S1 - S6	\bar{E}_m, E_{\min}
D1, D2	CE2 - CE5	\bar{E}_m, U_0
D3, D4	S1 - S6	\bar{E}_m, E_{\min}
E1	S1 - S6, CE2	\bar{E}_m, E_{\min}
E2	S1 - S5, CE2	\bar{E}_m, E_{\min}

Tabelle 2: Zuordnung der Beleuchtungsklassen zu den Beleuchtungssituationen zusammen mit den dazugehörigen Gütemerkmalen [4]

Im dritten Schritt sind die Gütemerkmale für die bestimmte Klasse aus DIN EN 13201-2 zu entnehmen.

3.1. Erklärung der Gütemerkmale

Im Folgenden sollen die Gütemerkmale erläutert und beschrieben werden, wie man sie zu berechnen hat.

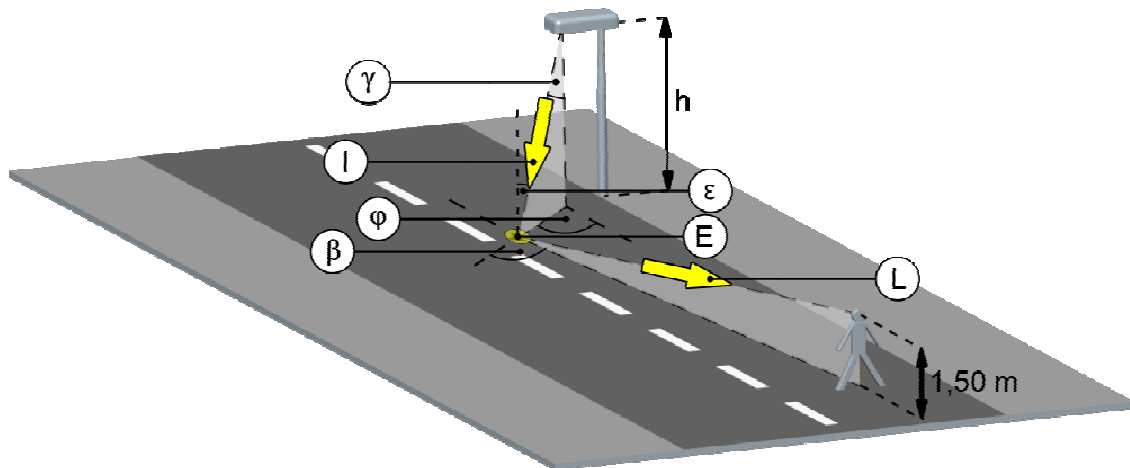


Abbildung 5: erforderliche Größen für die Berechnung der Leuchtdichte bzw. Beleuchtungsstärke

3.1.1. Leuchtdichte

Die entscheidende lichttechnische Größe für den Helligkeitseindruck und die Sehleistung ist die Leuchtdichte. Diese wird an bestimmten Punkten auf der Straße berechnet. Hierzu ist es notwendig, die Fahrbahn in ein Bewertungsfeld einzuteilen. Dieses muss längs der Straße verlaufen und zwei Leuchten einschließen. Quer zur Fahrbahn sind drei Bewertungspunkte vorgesehen, gleichmäßig verteilt. Längs der Fahrbahn ist die Anzahl der Bewertungspunkte abhängig vom Leuchtenabstand [7]:

- ist der Leuchtenabstand $a \leq 30 \text{ m}$, sind zehn Bewertungspunkte nötig.
- überschreitet der Leuchtenabstand $a \geq 30 \text{ m}$ ist die Anzahl der Bewertungspunkte so zu wählen, dass der Abstand zwischen zwei Bewertungspunkten $d \leq 3 \text{ m}$ nicht überschreitet.

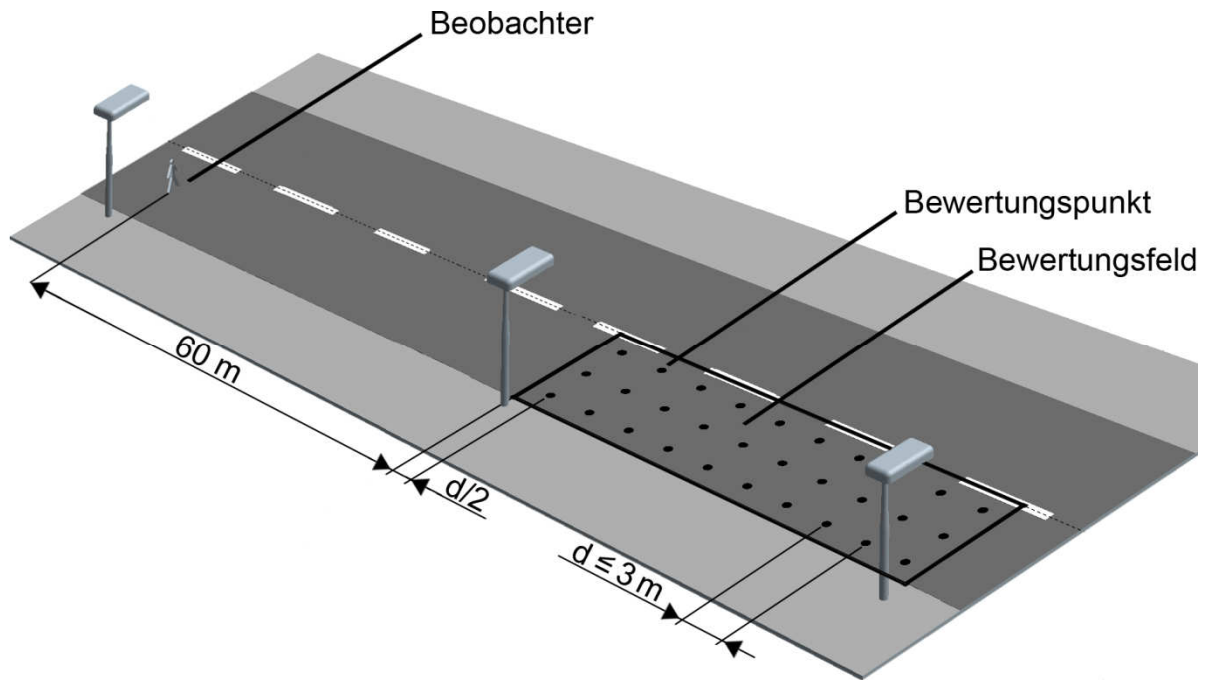


Abbildung 6: Bewertungsfeld

Der Beobachter befindet sich 60 Meter vor Beginn des Bewertungsfeldes, in der Mitte des rechten Fahrstreifens. Bei mehrspurigen Fahrbahnen, ist für jeden Fahrstreifen eine Messung durchzuführen. Gemessen wird auf Augenhöhe, in 1,50 Meter Höhe vom Fahrbahnbelag [7].

Sind beide Fahrtrichtungen symmetrisch beleuchtet, ist es ausreichend die Berechnung für eine Richtung vorzunehmen. Bei unsymmetrischen Anordnungen müssen beide Richtungen berechnet werden [9].

DIN13201-3 gibt für häufig auftretende Anordnungen Beispiele zur Lage des Beobachterstandortes und des Bewertungsfeldes.

Je nach Einfallswinkel ε und dem auf der Fahrbahn projizierten Winkel β zwischen Beobachter und Messpunkt, wird das Licht unterschiedlich reflektiert. Darum ist es üblich nicht mit dem Leuchtdichtekoeffizienten q zu rechnen, sondern mit dem reduzierten Leuchtdichtekoeffizienten r . DIN EN 13201 stellt für verschiedene Fahrbahnbeläge Tabellen zur Verfügung, aus denen der r -Wert bestimmt werden kann [9].

Da die Lichtstärke I einer Leuchte nur selten in alle Richtungen gleich ist, benutzt man meist die Darstellung im C- γ -System nach DIN 5032 um die unterschiedlichen Stärken in den verschiedenen Richtungen darzustellen [9].

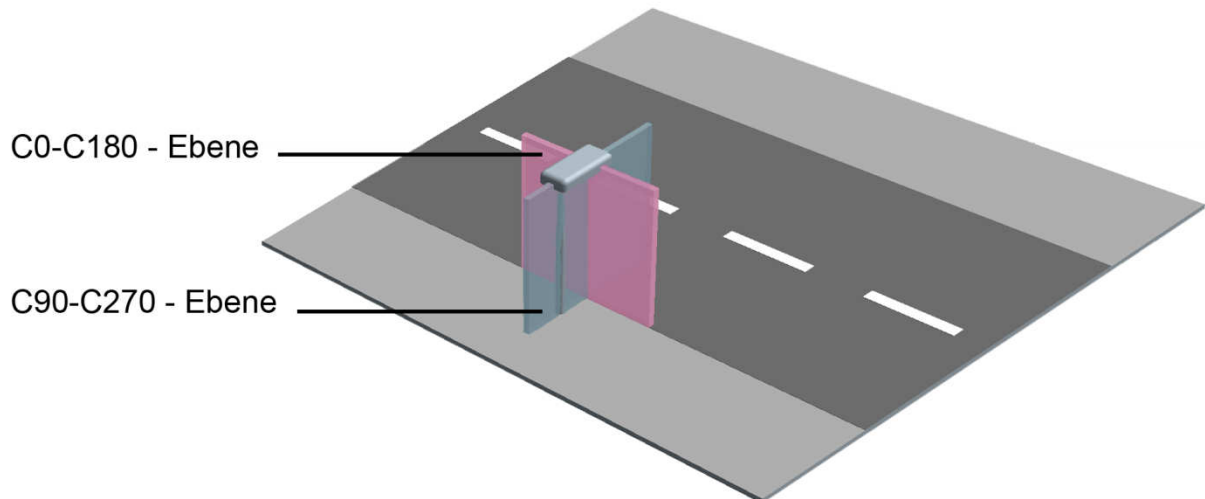


Abbildung 7: Lage der C-Ebenen auf einer Straße

Die Ebenen stehen alle senkrecht zur Fahrbahnoberfläche und die Drehachse ist eine Normale auf der Fahrbahnoberfläche. Jede Ebene ist definiert durch einen Winkel zu einer bestimmten Bezugsrichtung. Eine Messung erfolgt meist in 15°-Abständen der C-Ebene und einer Zunahme der Ausstrahlungswinkel von fünf Grad. Weiterhin ist es üblich, dass die C0-C180-Ebene längs der Fahrbahn verläuft.

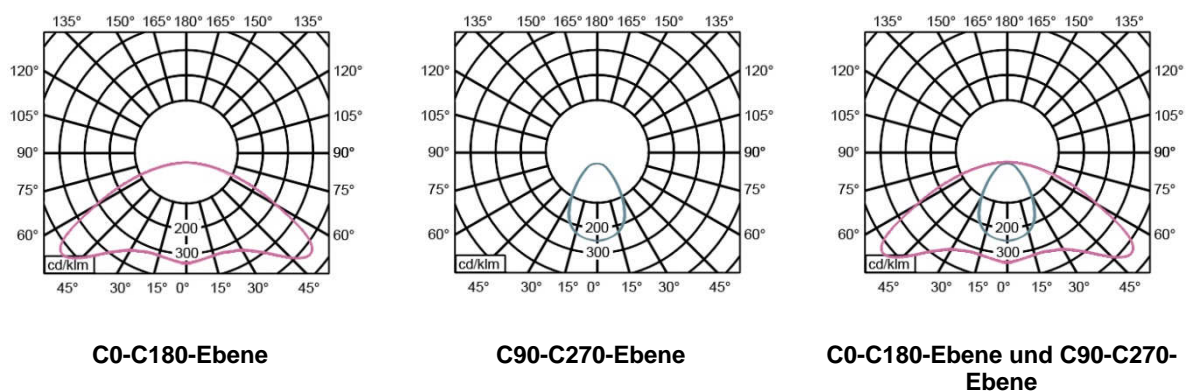


Abbildung 8: Isolux-Diagramm

Die grafische Darstellung erfolgt in einem Polar-Koordinatensystem. Es ist üblich, dass man nur die Werte der C0-C180- und der C90-C270-Ebene darstellt, also längs und quer zur Fahrbahn.

Um einen Vergleich mit anderen Lampen zu ermöglichen, werden die Werte auf 1000 Lumen normiert. Für eine bestimmte Richtung erhält man die Lichtstärke einer Lampe wenn man den Nennlichtstrom mit dem Wert aus dem Isolux-Diagramm für

diese Richtung multipliziert. Emittiert eine Lampe einen Lichtstrom von $\Phi = 100 \text{ lm}$ und wird eine Lichtstärke von $I = 20 \text{ cd}$ gemessen, steht im Isolux-Diagramm ein Wert von 200 cd/klm .

Ist der r -Wert und Lichtstärke für bekannt, kann nun an jedem Punkt im Bewertungsfeld die Leuchtdichte bestimmt werden [7]:

$$L = \frac{I}{h^2} \cdot r \cdot \Phi \cdot MF \cdot 10^{-4} \quad (1)$$

Die Gesamtleuchtdichte L_p in einem Punkt ist die Summe der von allen Leuchten stammenden der Leuchtdichtewerte [7].

$$L_p = \sum_{k=1}^n L_k \quad (2)$$

Zu berücksichtigen sind in Längsrichtung alle Leuchten bis zum fünffachen Abstand der Lichtpunkthöhe vor dem Messpunkt, und alle Leuchten innerhalb des zwölffachen Abstandes nach dem Messpunkt. In vertikaler Richtung müssen nach beiden Seiten hin alle Leuchten, die sich innerhalb des fünffachen Abstandes befinden, einbezogen werden.

Die mittlere Leuchtdichte \bar{L} ist die Summe der aller Leuchtdichtewerte im Verhältnis zu ihrer Anzahl [7].

$$\bar{L} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{k=1}^n L_k \quad (3)$$

3.1.2. Beleuchtungsstärke

Sind die Voraussetzungen für eine Bewertung der Leuchtdichte nicht ausreichend (z.B. bei Einkaufsstraßen, komplexen Straßenkreuzungen, Kreisverkehrsplätzen, Stauräumen), erfolgt die Bewertung mit der Beleuchtungsstärke und ihrer Gleichmäßigkeit. Genau wie der Leuchtdichte, ist auch hier das gleiche Bewertungsfeld festzulegen.

Je nach Beleuchtungsklasse, werden verschiedene Arten der Beleuchtungsstärke benötigt. Es werden folgende Typen unterschieden [7]:

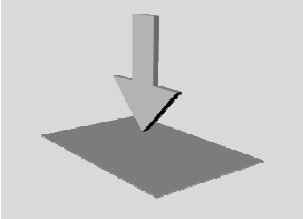
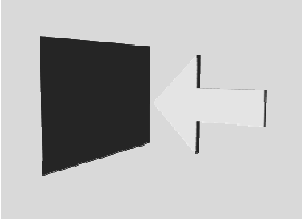
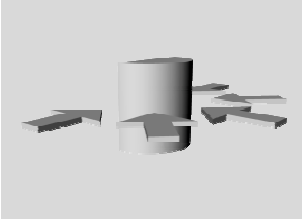
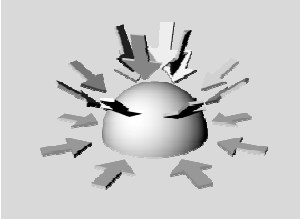
			
E_h	E_v	E_{sc}	E_{hs}
horizontale Beleuchtungs- stärke	vertikale Beleuchtungs- stärke	halbzylindrische Beleuchtungs- stärke	halbsphärische Beleuchtungs- stärke

Abbildung 9: Arten der Beleuchtungsstärke

$$E_h = \frac{I}{h^2} \cdot \cos^3 \varepsilon \cdot \Phi \cdot MF \quad (4)$$

$$E_v = \frac{I}{\pi \cdot (h-1,5)^2} \cdot \cos^2 \varepsilon \cdot \sin \varepsilon \cdot \cos \alpha \cdot \Phi \cdot MF \quad (5)$$

$$E_{hs} = \frac{I}{4 \cdot h^2} \cdot (\cos^3 \varepsilon + \cos^2 \varepsilon) \cdot \Phi \cdot MF \quad (6)$$

$$E_{sc} = \frac{I}{\pi \cdot (h-1,5)^2} \cdot (1 + \cos \alpha) \cdot \cos^2 \varepsilon \cdot \sin \varepsilon \cdot \Phi \cdot MF \quad (7)$$

Anmerkung: die halbzylindrische Beleuchtungsstärke wird nicht auf der Straßenoberfläche gemessen, sondern in einer Ebene 1,5 Meter über dem Fahrbahnbelag.

Die Gesamtbeleuchtungsstärke E_p in einem Messpunkt ist die Summe der Einzelbeleuchtungsstärken aller beteiligten Leuchten in diesem Punkt [7].

$$E_p = \sum_{k=1}^n E_k \quad (8)$$

Berücksichtigt müssen alle Leuchten werden, die maximal den fünffachen Abstand der Lichtpunkthöhe entfernt sind.

Die mittlere Beleuchtungsstärke \bar{E} ist, analog zur mittleren Leuchtdichte, die Summe der Gesamt-Beleuchtungsstärken im Verhältnis zu ihrer Anzahl, im kompletten Bewertungsfeld [7]:

$$\bar{E} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{k=1}^n E_k \quad (9)$$

3.1.3. Gleichmäßigkeit

Das menschliche Auge kann sich in einem gewissen Umfang an eine veränderliche Leuchtdichte anpassen. Treten aber zu große Schwankungen auf, entstehen sogenannte Tarnzonen, die vom Auge nicht mehr wahrgenommen werden können. Aufgrund zu geringer Kontraste in solchen Bereichen sind Personen und Hindernisse nicht vom Hintergrund zu unterscheiden. Tarnzonen stellen für Kraftfahrer und Fußgänger ein großes Gefahrenpotential dar. Um diese Gefahrenquelle zu minimieren müssen zwei Größen eingehalten werden [7]:

- Längsgleichmäßigkeit U_l

$$U_l = \frac{L_{l,\min}}{L_{l,\max}} \quad (10)$$

U_l bezieht sich auf die Mitte des Fahrstreifens. Hier konzentriert sich die Aufmerksamkeit des Kraftfahrers. $L_{l,\min}$ ist die minimale Leuchtdichte im Bewertungsfeld, $L_{l,\max}$ die maximale Leuchtdichte.

Bei Verwendung der Beleuchtungsstärke berechnet sich die Längsgleichmäßigkeit ebenso aus dem Verhältnis Minimalwert zu Maximalwert. Um eine Verwechslung mit der Längsgleichmäßigkeit der Leuchtdichte auszuschließen, wird sie mit g_2 bezeichnet [9].

- Gesamtgleichmäßigkeit U_0

$$U_0 = \frac{L_{\min}}{\bar{L}} \quad (11)$$

U_0 gilt für die gesamte Bewertungsfläche. Tarnzonen sind durch eine unzureichende Gesamtgleichmäßigkeit erkennbar. $L_{l,\min}$ ist wieder die minimale Leuchtdichte im Bewertungsfeld, \bar{L} die mittlere Leuchtdichte.

Ist mehr als ein Fahrstreifen vorhanden, ist es empfehlenswert die Gleichmäßigkeit für jede Spur zu bestimmen. Relevant ist jeweils der kleinste Wert.

Kommt die Beleuchtungsstärke zur Anwendung, ist das Verhältnis von Minimalwert zu Mittelwert zu bilden. Sie wird mit g_1 bezeichnet [9].

3.1.4. Blendungsbegrenzung

Blendung kann die Verkehrssicherheit erheblich verringern und muss so gering wie möglich gehalten werden. Die psychologische Blendung (zum Beispiel Unbehagen, Unsicherheit oder Ermüdung) wird durch die prozentuale Schwellenwerterhöhung TI ("threshold increment") beschrieben [7]:

$$TI = \frac{65}{L^{0,8}} \cdot L_v \quad (12)$$

$$L_v = 10 \cdot \sum_{k=1}^n \frac{E_k}{\theta_k^2} \quad (13)$$

Die Bestimmung des TI -Wertes muss für jeden Messpunkt im Bewertungsfeld erfolgen. Berücksichtigt werden alle Leuchten bis zu einer Entfernung von 500 Metern vom jeweiligen Messpunkt aus gesehen. Liefert eine Leuchte einen Betrag von weniger als zwei Prozent zur gesamten Schleierleuchtdichte, kann die Addition abgebrochen werden. Das Ergebnis ist der höchste berechnete Wert.

Neben der psychologischen Blendung gibt es noch die physiologische Blendung, die eine merkbare Herabsetzung der Sehleistung zur Folge hat. In der DIN EN 13201-2 gibt es die sogenannten Blendindexklassen, die man über folgende Formel bestimmen kann [7]:

$$Blendindex = \frac{I}{A^{0,5}} \quad (14)$$

3.1.5. Umgebungs-Beleuchtungsstärkeverhältnis

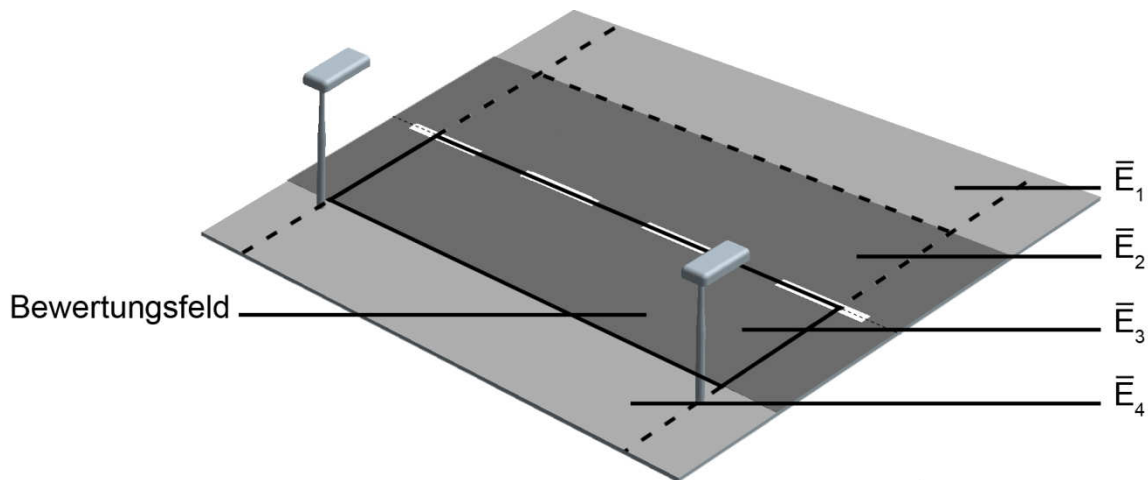


Abbildung 10: Umgebungs-Beleuchtungsstärkeverhältnis

Eine Straßenbeleuchtung sollte nicht nur die Straße ausleuchten, sondern auch die angrenzende Flächen, um den peripheren Bereich des Gesichtsfeldes gerecht zu beleuchten. Das Umgebungs-Beleuchtungsstärkeverhältnis SR ("surrounding ratio") beschreibt diese verbesserte räumliche Orientierung [7].

$$SR = \frac{\bar{E}_1 + \bar{E}_4}{\bar{E}_2 + \bar{E}_3} \quad (15)$$

3.1.6. Farbwiedergabe

Der Ra-Wert beschreibt die Farbwiedergabe eines Leuchtmittels. Je höher er ist, desto besser ist die Farbwiedergabe. Maximal ist ein Wert von 100 möglich.

In der DIN 13201 stehen keine Mindestansprüche an die Farbwiedergabe. Dennoch sollte gute Farbwiedergabe angestrebt werden, da so die Sicherheit im Straßenverkehr erhöht wird: Objekte, Farben, Formen und andere Details werden früher wahrgenommen und verkürzen somit die Reaktionszeit.

Weiß Leuchtdioden haben, je nach Farbtemperatur, eine Ra-Wert zwischen 80 und 90, Natriumdampf-Hochdrucklampen erreichen Werte bis maximal 40 und Quecksilberdampflampen bis etwa 60 [10].

4. Marktanalyse

Straßenleuchten mit LED-Technik gibt es immer mehr. Viele große Hersteller richten Teststraßen ein um die Wirkung dieser Leuchten auf die Verkehrsteilnehmer als auch auf die Anwohner zu untersuchen.

Trotz des immer größer werden Angebotes an LED-Leuchten, war es schwierig an preisliche Informationen zu kommen. Nachstehende Übersicht zeigt nur eine kleine Auswahl an auf dem Markt erhältlichen Leuchten.




				
Leuchte	Siteco - DL 10	Indal - Stela 45	Philips - Citywing	Lanz Manufaktur - Raledlamp 30W
licht- technische Größe	~ 350 cd/klm	550 cd/klm	15 lux (? m)	22 lux (5 m)
Preis (Euro)	6290,-	~ 1000,-	4600,-	~ 600,-

Tabelle 3: Marktanalyse

5. Lastenheft

Das Bundesumweltministerium für Umwelt schrieb im Jahr 2008 einen Wettbewerb zur "energieeffizienten Stadtbeleuchtung" aus. Beteiligen konnten sich Hersteller und Anbieter von Beleuchtungsprodukten, sowie Unternehmen, die Dienstleistungen für die Stadtbeleuchtung anbieten.

Um vergleichbare Ergebnisse zu erhalten, wurden ein Referenzstraßenabschnitt, eine typische Beleuchtungssituation und ein festes Beleuchtungsniveau vorgegeben. Die Teilnehmer mussten für ihre eingereichte Leuchte den Energieverbrauch pro Kilometer und Jahr $[kWh/(km \cdot a)]$, die CO₂-Emissionen $[kg/(km \cdot a)]$ und den Energieeinsatz pro jährlicher Lichtmenge $[kWh/Mlmh]$ für eine Betriebsdauer von 4000 Stunden angeben [11].

Je nach Straßenbreite variierten die Masthöhe und der Mastabstand. Für ein Beleuchtungsniveau von $\bar{E} = 5 \text{ lux}$ gab es die meisten Einsendungen. Mit der Grundlage dieser Daten wurde ein Mittelwert für die Masthöhe, den Mastabstand und den Energieverbrauch errechnet, der als Referenz für die eigene Leuchte gelten soll:

- Mastabstand: $a = 35 \text{ m}$
- Masthöhe: $h = 7 \text{ m}$
- Energieverbrauch: $P_{tot} = 30 \text{ kWh}$

Als Straßenbreite wird $b = 5,5 \text{ m}$ verwendet.

Damit die zu konstruierende Leuchte mit denen aus dem Wettbewerb vergleichbar ist, wird auch eine Beleuchtungsstärke von $\bar{E} = 5 \text{ lux}$ festgelegt. Dieses Beleuchtungsniveau entspricht der Beleuchtungsklasse S4. In dieser Klasse gibt es neben der mittleren Beleuchtungsstärke als Gütemerkmal noch eine minimale Beleuchtungsstärke von $E_{min} = 1 \text{ lux}$, die nicht unterschritten werden darf. Anwendung findet diese Beleuchtungsklasse in den Beleuchtungssituationen C1 (z.B. Fuß- und Radwege), D3 (z.B. Anlieger- und Wohnstraßen), D4 (z.B. verkehrsberuhigte Zonen und Spielstraßen), E1 (z.B. Fußgängerzonen und Bushaltestellen) oder E2 (z.B. Werkstraßen auf Firmengeländen).

Bei einem Mastabstand von $a = 35 \text{ m}$ und einer Straßenbreite von $b = 5,5 \text{ m}$ ergibt sich eine zu beleuchtende Fläche von $A = a \times b = 5,5 \text{ m} \times 35 \text{ m} = 192,5 \text{ m}^2$. Mit der

geforderten Beleuchtungsstärke $\bar{E} = 5 \text{ lux}$ kann man nun den benötigten Lichtstrom berechnen:

$$\Phi_{\text{Überschlag}_1} = E_m \times A = 5 \text{ lux} \times 192,5 \text{ m}^2 = 962,5 \text{ lm}$$

Diese Rechnung soll den benötigten Lichtstrom nur überschlagen. Auftretende Verluste, wie der durch den Reflektor, werden nicht berücksichtigt. Auch eine Überlagerung der Beleuchtungsstärke von benachbarten Leuchten wird hier vernachlässigt.

Leuchtdioden mit einem so hohen Lichtstrom gibt es noch sehr wenige. Die „**Osram Ostar® LE UW E3B**“ besteht aus einem LED-Package mit sechs Chips auf engstem Raum und liefert einen maximalen Lichtstrom von $\Phi_{\text{max}} = 1120 \text{ lm}$. Die Leistungsaufnahme beträgt $P_{\text{tot,LE_UW_E3B}} = 27 \text{ W}$ und liegt damit unter der vereinbarten maximalen Leistung von $P_{\text{tot}} = 30 \text{ W}$ [12].

Kriterium	Wert / Typ
Beleuchtungsklasse	S4
mittlere Beleuchtungsstärke \bar{E}	5 lux
minimale Beleuchtungsstärke E_{min}	1 lux
Masthöhe h	7 m
Mastabstand a	35 m
Fahrbahnbreite b	5,5 m
elektrische Leistung P_{tot}	max. 30 W
Leuchtmittel	Osram Ostar LE UW E3B
Anbringung am Mast	Aufsatzleuchte
Material des Gehäuses	Aluminium
maximaler Preis (netto)	max. 1000 Euro

Tabelle 4: Lastenheft

6. Optische Auslegung

Die optische Auslegung des Reflektors erfolgt mit dem Programm LucidShape. Dies ist eine CAL-Software (**C**omputer **A**ided **L**ighting) der deutschen Firma Brandenburg GmbH. Mit diesem Programm ist es möglich den Strahlenverlauf von Lichtquellen zu simulieren.

Grundlegend besteht eine Simulation aus drei Komponenten:

- eine Lichtquelle
- ein Akteur
- ein Sensor

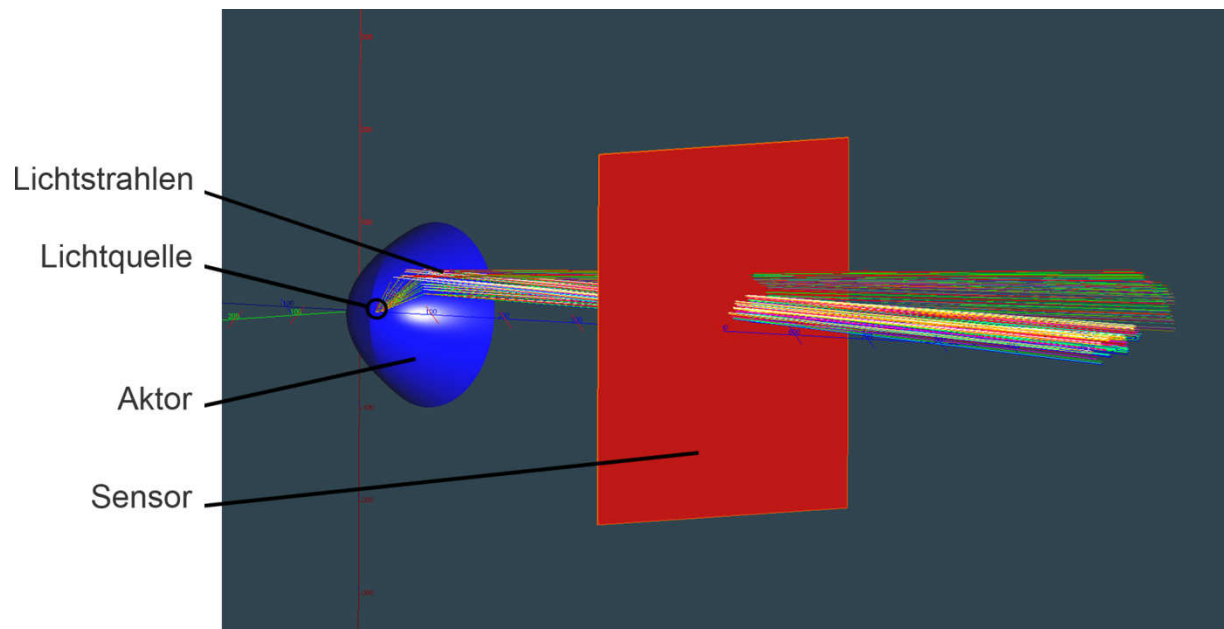


Abbildung 11: Komponenten einer Simulation

Man kann aus einer Vielzahl von vordefinierten Lichtquellen auswählen oder auch eigene Lichtquellen definieren. Es ist auch möglich sogenannte „Ray-Dateien“, die den Strahlenverlauf einer Lichtquelle enthalten, in das Programm zu laden. Diese Dateien werden von Lampen-Herstellern angeboten.

Aktoren sind Flächen, die mit den Lichtstrahlen interagieren. Diesen Flächen können verschiedene Eigenschaften zugewiesen werden, wie z.B. „specular reflective“ („spiegelnde Reflexion“), welche bei der Simulation von der Software berücksichtigt werden.

Genau wie bei den Aktoren kann eine Fläche auch als Sensor definiert werden. Es gibt unter anderem Sensoren zum Messen der Beleuchtungsstärke, der Leuchtdichte und des Lichtstroms. Sobald ein Lichtstrahl eine als Sensor ausgewiesene Fläche durchdringt wird er registriert und auf einem Testschirm sichtbar gemacht.

6.1. Straßensimulation („Street Simulation“)

LucidShape bietet viele Funktionen zur optischen Simulation. Eine davon ist die Straßensimulation:

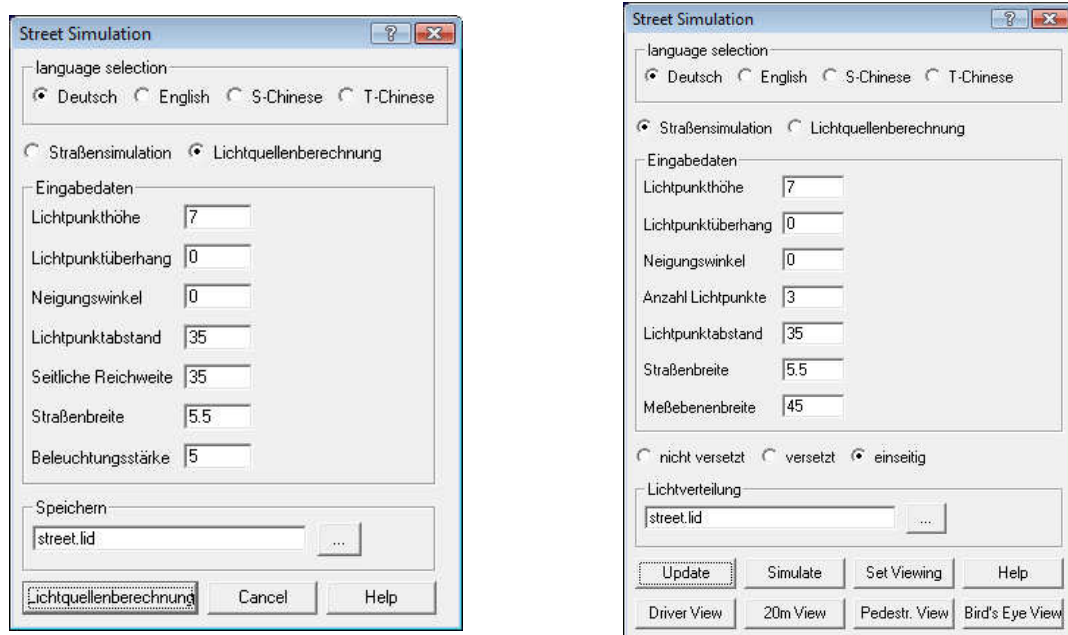


Abbildung 12: Dialogbox „Street Simulation“ - Lichtquellenberechnung (links) und Straßensimulation (rechts)

Anhand der Eingabedaten, die im Lastenheft festgelegt wurden, wird im ersten Schritt die benötigte Lichtstärkeverteilung (LID) der Lampe errechnet.

Da im Lastenheft eine Aufsatzleuchte festgelegt wurde, beträgt der Lichtpunktüberhang null Meter. Der Neigungswinkel wird auch auf null Grad gesetzt. Nachdem alle Parameter eingegeben worden sind, berechnet das Programm die benötigte Lichtstärkeverteilung.

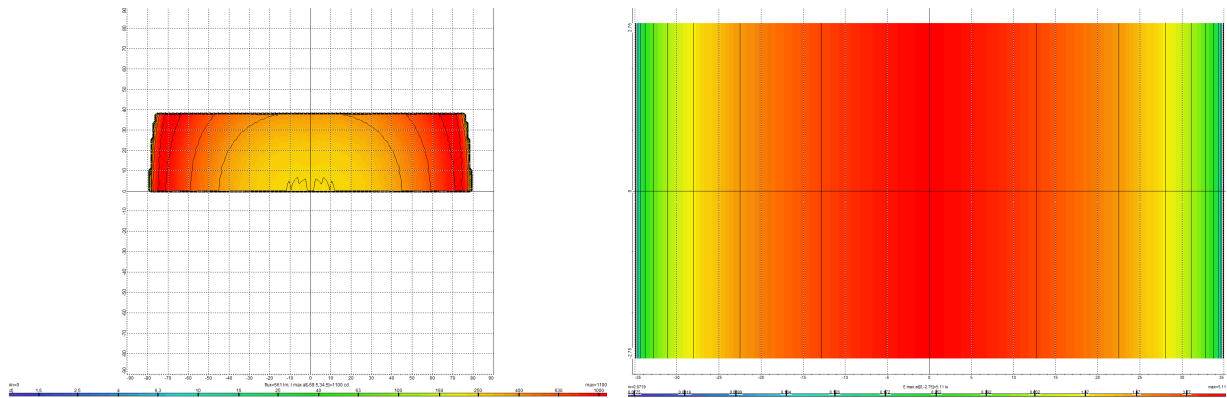


Abbildung 13: Lichtstärkeverteilung (links) und Verteilung der Beleuchtungsstärke (rechts)

Das linke Bild der Abbildung 13 zeigt die Verteilung der Beleuchtungsstärke mit einem Maximum in der Mitte. Da das Licht jeder Leuchte sich mit den benachbarten Leuchten überlagert, nimmt die Beleuchtungsstärke gleichmäßig und symmetrisch nach beiden Seiten ab.

Während bei der überschlagsmäßigen Bestimmung des benötigten Lichtstrom $\Phi_{\text{Überschlag}_1} = 962,5 \text{ lm}$ bestimmt wurden, kann man jetzt aus dem Diagramm der Lichtstärkeverteilung einen genaueren Wert herauslesen: $\Phi_{\text{Überschlag}_2} = 561 \text{ lm}$. Dieser Wert bezieht sich allerdings nur auf die exakte Breite der Straße von $b = 5,5 \text{ m}$. Da natürlich auch Bereiche außerhalb der Straße mit beleuchtet werden und zusätzlich Verluste durch den Reflektor einzukalkulieren sind, benötigt man ca. den doppelten Lichtstrom, also ca. $\Phi_{\text{Überschlag}_3} = 1120 \text{ lm}$.

Lädt man die erzeugte Lichtverteilung in die Straßensimulation, kann das Ergebnis als 3D-Simulation betrachten. Es wird sowohl die einzelne Leuchte als auch die komplette Straße dargestellt. Zusätzlich wird auch ein Falschfarbenbild der Beleuchtungsstärke der Straße erzeugt.

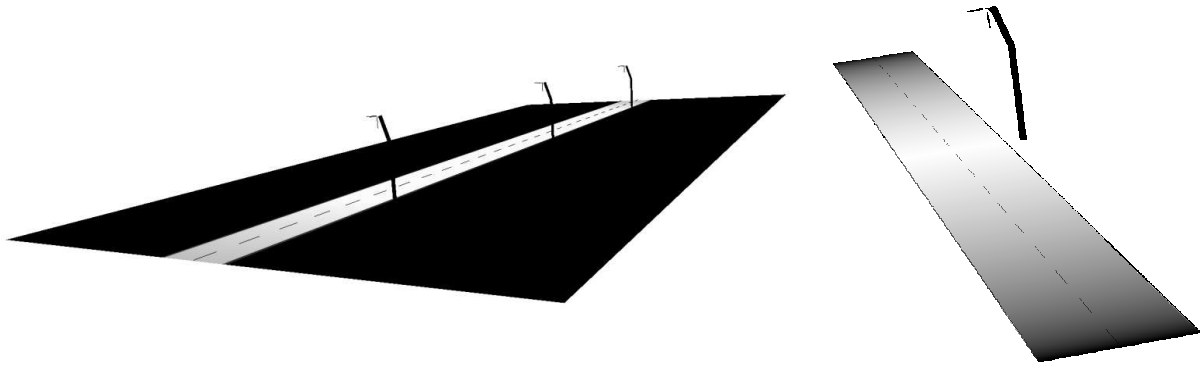


Abbildung 14: 3D-Simulation der beleuchteten Straße (links) und einer einzelnen Leuchte (rechts)

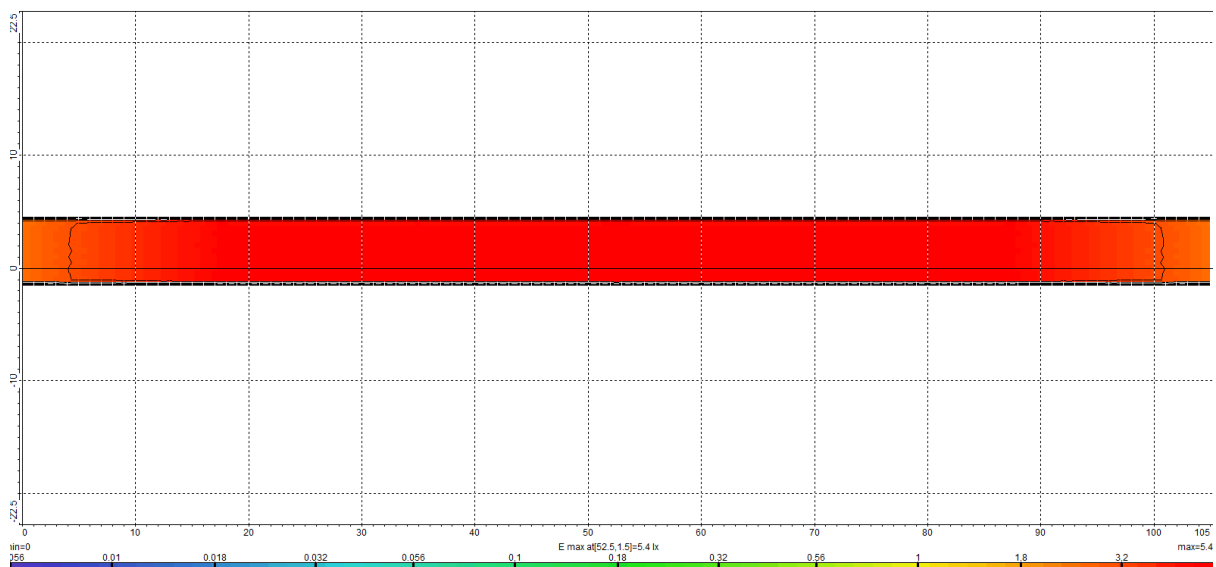


Abbildung 15: Überlagerung der Beleuchtungsstärke auf der Straße

Im Falschfarbenbild der überlagerten Beleuchtungsstärke ist gut die gleichmäßige Ausleuchtung der Straße zu erkennen. Auch wenn eine gleichmäßige Ausleuchtung in der Beleuchtungskategorie S4 nicht als Gütemerkmal festgehalten ist, sondern nur eine minimale Beleuchtungsstärke von $E_{min} = 1 \text{ lux}$, spricht dies für die Qualität der Beleuchtung.

6.2. Erstellen einer Freiform-Fläche („Create optical FF surface“)

Die Lichtstärkeverteilung, die durch die Straßensimulation erzeugt worden ist, gilt es nun, anhand der Ray-Datei der ausgewählten Leuchtdiode und einem Freiform-Reflektor nachzubilden.

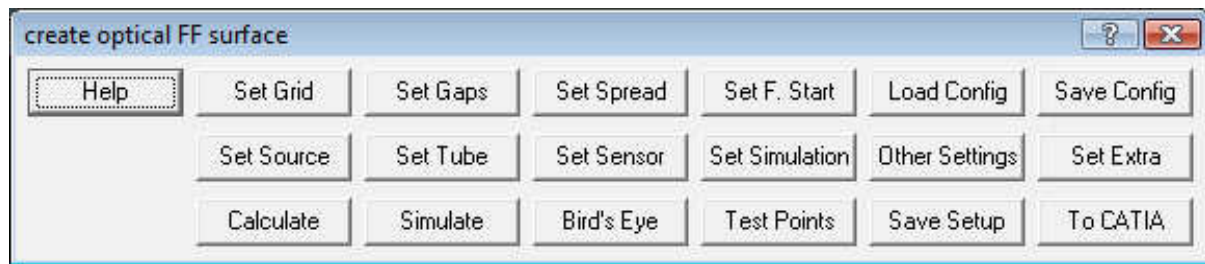


Abbildung 16: "create optical FF surface"-Dialogbox

Um einen Freiform-Reflektor zu berechnen sind mehrere Schritte nötig. Als erstes ist ein Raster („Set Grid“) zu definieren, das auch die Größe und Form des Reflektors bestimmt. Unter "Set Source" wird die Lichtquelle konfiguriert und mit "Set Spread" stellt man die Winkelbereiche ein, in welchen die Strahlen der Lichtquelle gelenkt werden sollen. Außerdem muss ein Sensor erzeugt werden, um die erzielte Lichtverteilung des Reflektors anzuzeigen und mit "Set Gaps" bestimmt man wie die Lücken zwischen, den einzelnen Segmenten ("facets") aufzufüllen sind.

6.2.1. Erstellen des Rasters („Set Grid / Grid settings“)

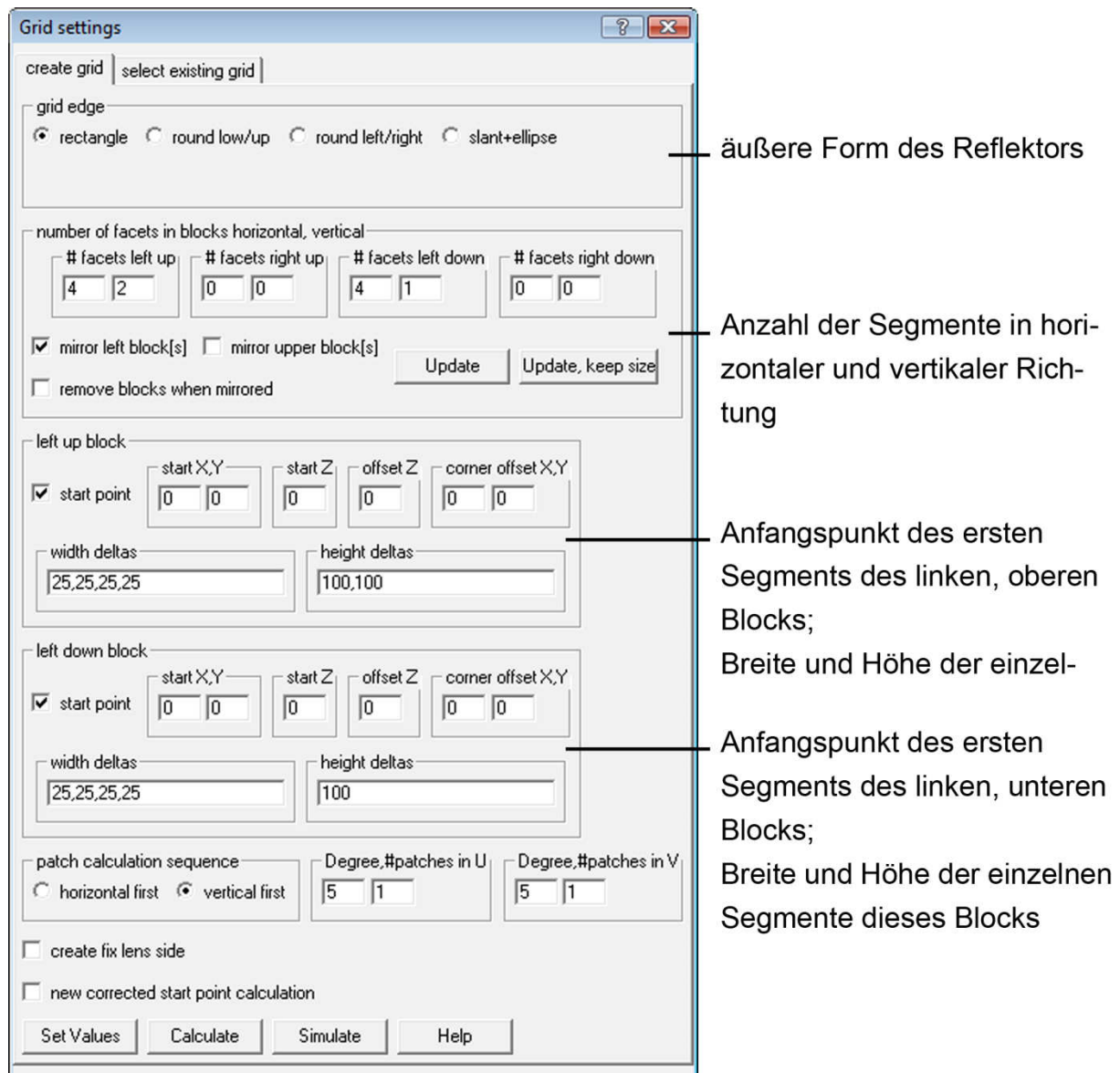


Abbildung 17: Rastereinstellungen („Grid Settings“)

Die äußere Form des Reflektors wird unter „grid edge“ festgelegt. In der Grundeinstellung ist eine rechteckige Form eingestellt. Es ist möglich die äußeren Segmente links und/oder rechts bzw. oben und/oder abzurunden. Weiterhin kann man die Seiten auch anschrägen.

Der Reflektor soll in acht vertikale Segmente geteilt werden und eine Breite $b_{\text{Reflektor}} = 200 \text{ mm}$ haben. Dies bedeutet, dass jedes Segment eine Breite von 25 Millimetern hat. In der Höhe sollen es drei Segmente mit einer Länge von jeweils 100 Millimetern sein, was eine Gesamthöhe von $h_{\text{Reflektor}} = 300 \text{ mm}$ ergibt.

Da die Beleuchtungsstärke auf der Straße symmetrisch ist, und somit auch der Reflektor symmetrisch sein muss, reicht es aus, nur eine Seite des Reflektors zu definieren und diese anschließend zu spiegeln („mirror left block(s)“). Die Anzahl der Segmente wird unter „number of facets in block horizontal, vertical“ festgelegt, die Höhe und Breite wird für jedes Segment unter „width deltas“ und „height deltas“ beschrieben. Abschließend kann man den Reflektor wieder in der 3D-Ansicht betrachten.

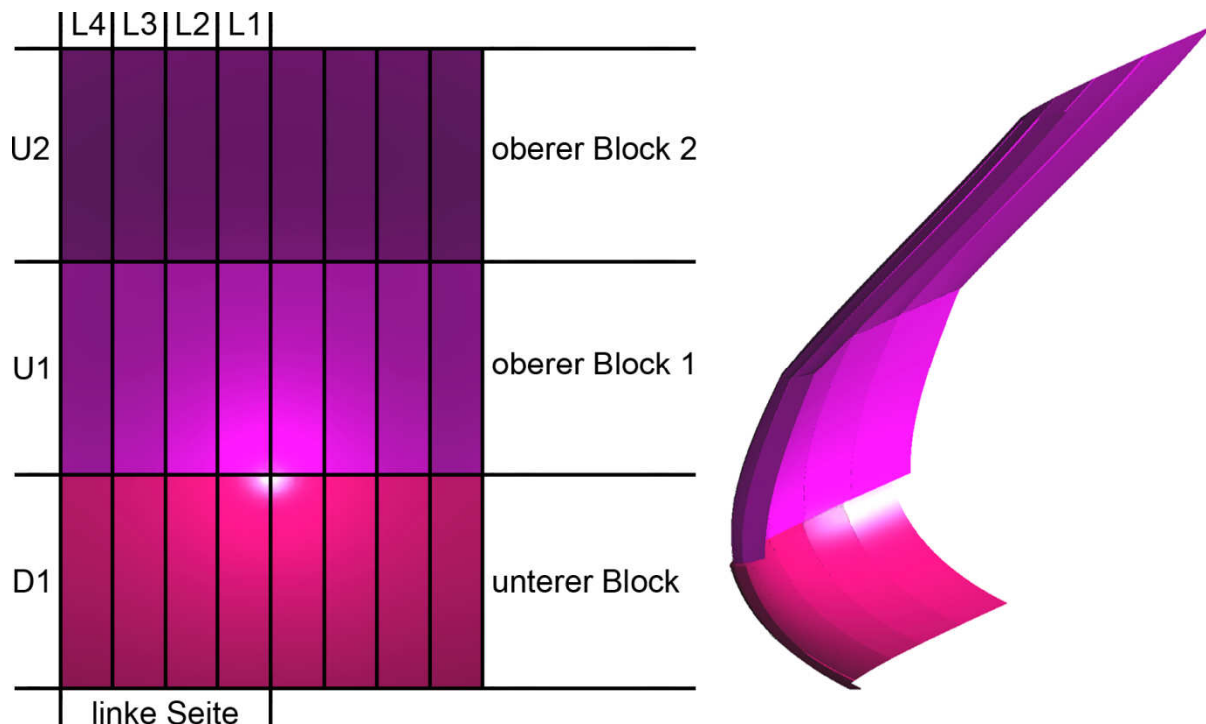


Abbildung 18: 2D- und 3D-Darstellung des Reflektors

Erklärung der Bezeichnungen in Abbildung 18:

- L links ("left")
- U oben ("up")
- D unten ("down")

Durch die nachgestellten Zahlen ist eine eindeutige Festlegung jedes Segments gewährleistet.

6.2.2. Erstellen der Lichtquelle („Set Source“)

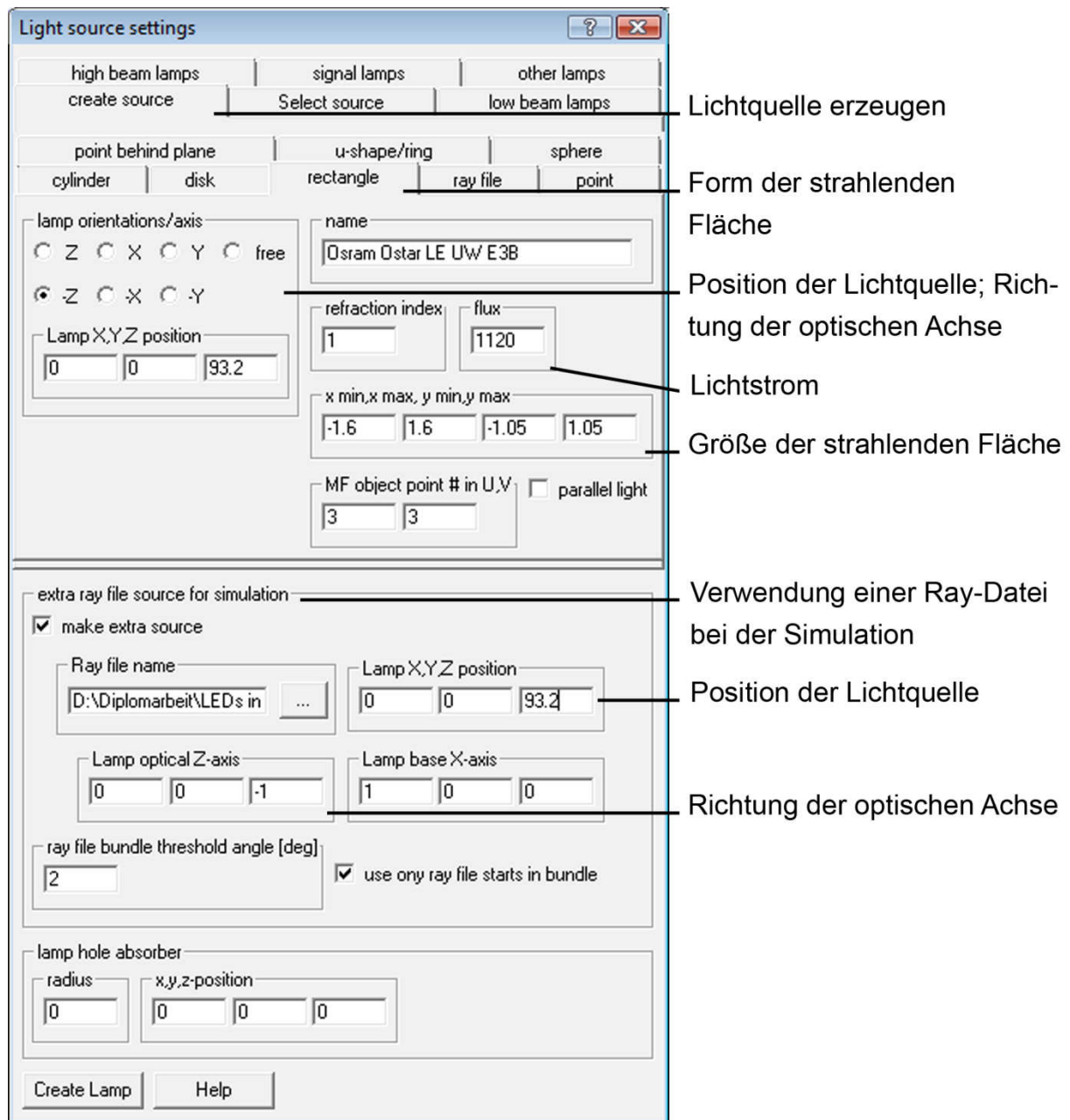


Abbildung 19: Lichtquellen-Einstellung („Light Source Settings“)

Um eine Lichtquelle zu definieren, kann man entweder aus einer Reihe schon in LucidShape vorhandenen Lichtquellen auswählen oder man erstellt selbst eine Lichtquelle. Die benötigten Daten wie Position der Lichtquelle, Richtung der optischen Achse, Reflexionsgrad, Lichtstrom und die Größe der leuchtenden Fläche gibt man per Hand ein oder man lädt eine Ray-Datei und gibt lediglich die Position der Lichtquelle und die Richtung der optischen Achse an. Die Verwendung der Ray-

Datei ist besser geeignet, da sie exakt den Strahlenverlauf der Leuchtdiode enthält, wie er auch in der Realität auftritt.

6.2.3. Definition der Winkelbereiche ("Set Spread")

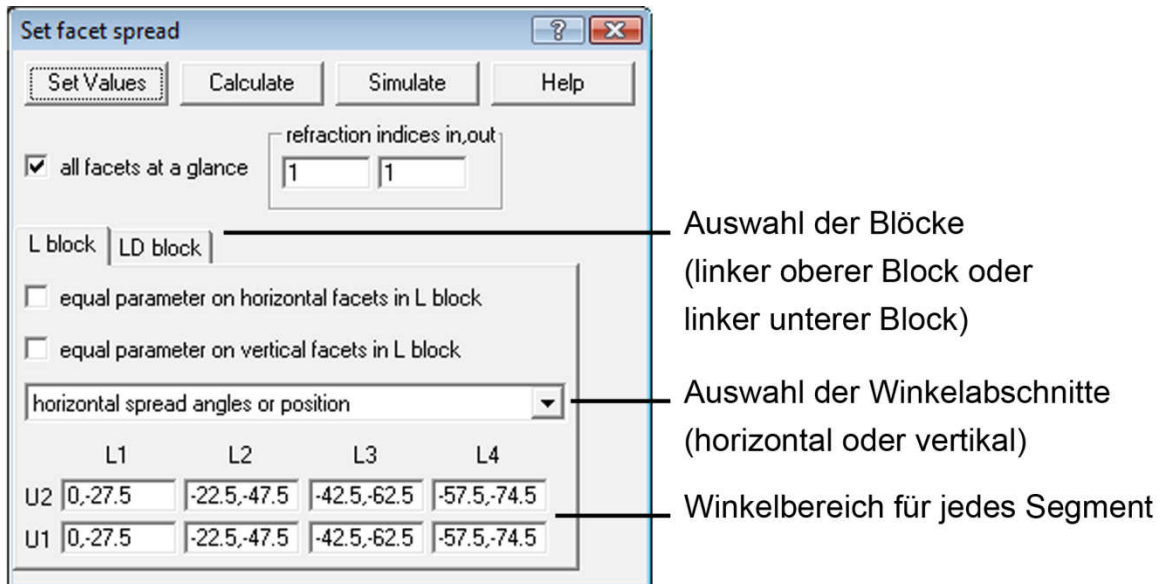


Abbildung 20: "Set Facet Spread"-Dialogbox

Unter "Set Spread" definiert man die Winkelabschnitte, in die die Sektoren des Reflektors die Strahlen lenken sollen. Genau wie bei der Erstellung des Rasters ist es auch hier ausreichend nur die linke Seite zu definieren. Es sind sowohl die horizontalen Bereiche als auch die vertikalen Bereiche zu definieren.

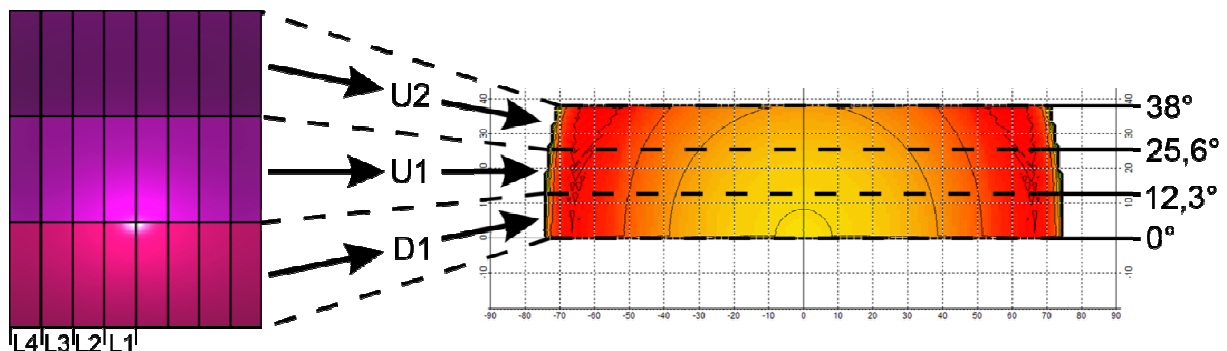


Abbildung 21: Definition der vertikalen Winkelabschnitte

Da die Lichtstärkeverteilung vertikal in allen Bereichen annähernd gleich ist, wurde hier eine Aufteilung in gleich große Winkelbereiche vorgenommen: jedes vertikale Segment soll einen Bereich von 12,3° bestrahlen.

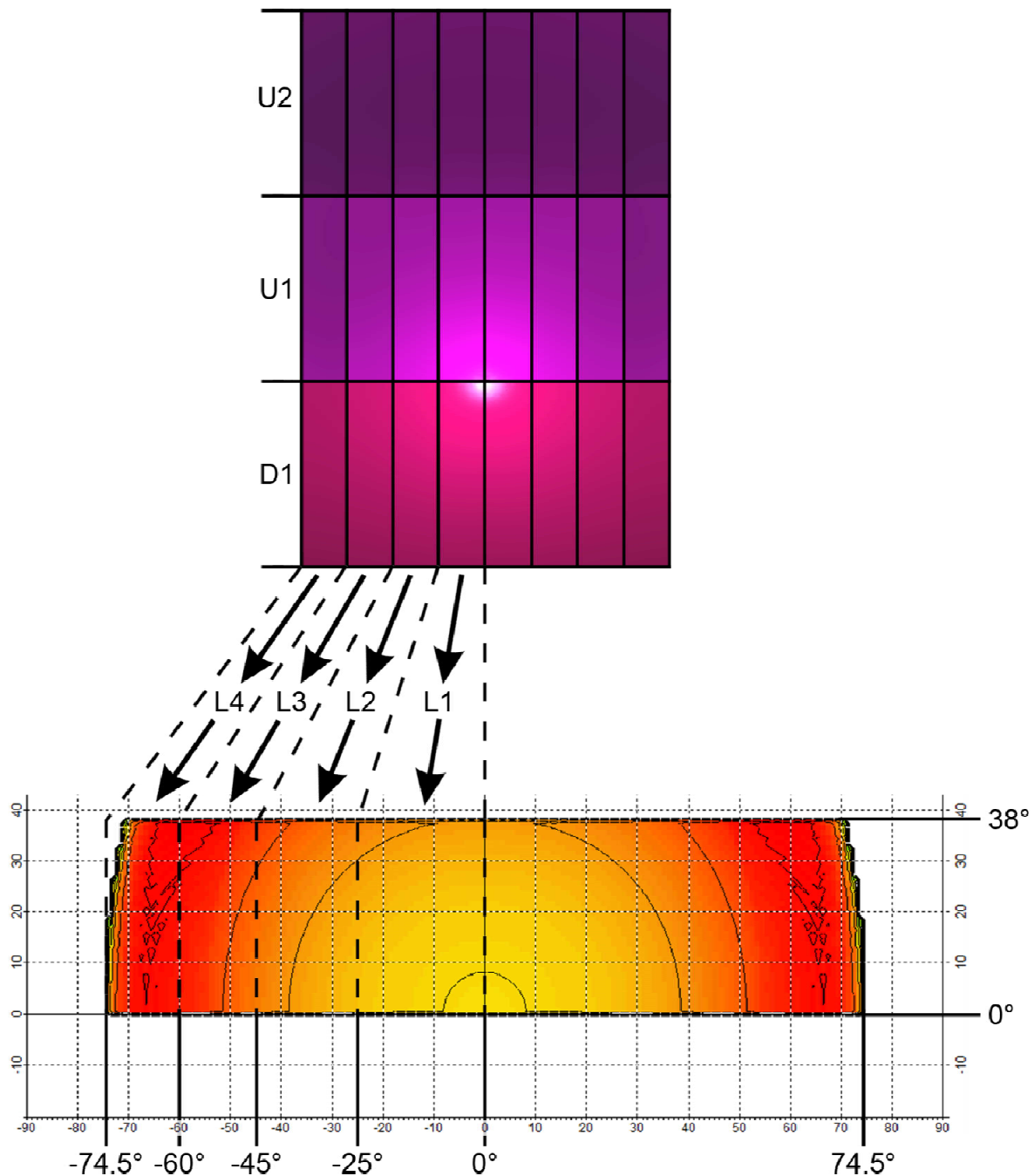


Abbildung 22: Definition der horizontalen Winkelabschnitte

Die Lichtstärke nimmt in der Horizontalen nach außen hin stetig zu. Aus diesem Grund sollen die Segmente der Reihe L1 einen Bereich von 25° ausleuchten, die Segmente der Reihe L2 einen Bereich von 20°, und die Segmente L3 und L4 einen Bereich von ca. 15°. Um einen weichen Übergang der Lichtstärke zu erreichen, sollen die Winkelabschnitte jeweils um einige Grad überlappen.

6.2.4. Sensor konfigurieren ("Set Sensor")

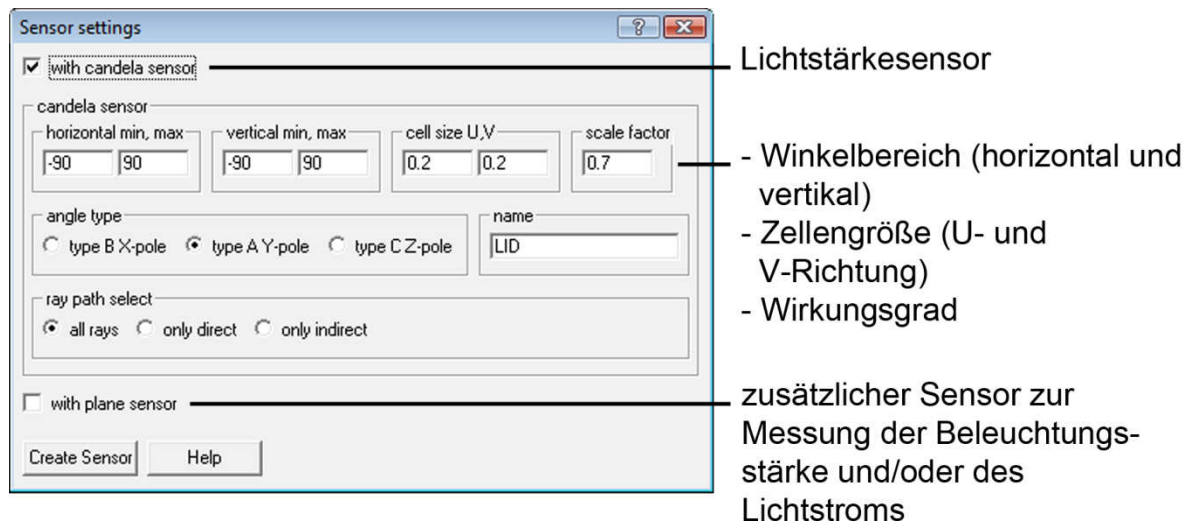


Abbildung 23: "Set Sensor"-Dialogbox

Der Testschirm der berechneten Lichtverteilung hat einen Winkelbereich von -90° bis $+90^\circ$, in horizontaler und vertikaler Richtung. Es bietet sich also an, den Sensor zur Überprüfung der Lichtverteilung des Reflektors mit den gleichen Maßen zu definieren.

6.2.5. Füllmethode zwischen den Segmenten ("Set Gaps")

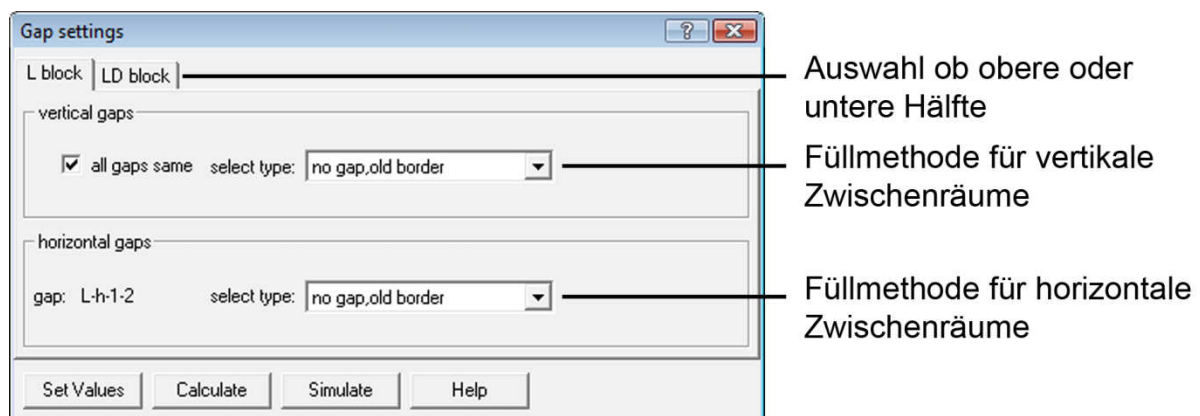


Abbildung 24: "Gap Settings"-Dialogbox

Dieser Menüpunkt klärt, wie die Flächen zwischen den einzelnen Segmenten aufzufüllen sind. Möglich sind u.a. die mit einer einfachen Fläche, ohne Wölbung, aufzufüllen, die Fläche an das folgende oder vorhergehende Segment anzupassen und noch einige weitere Methoden.

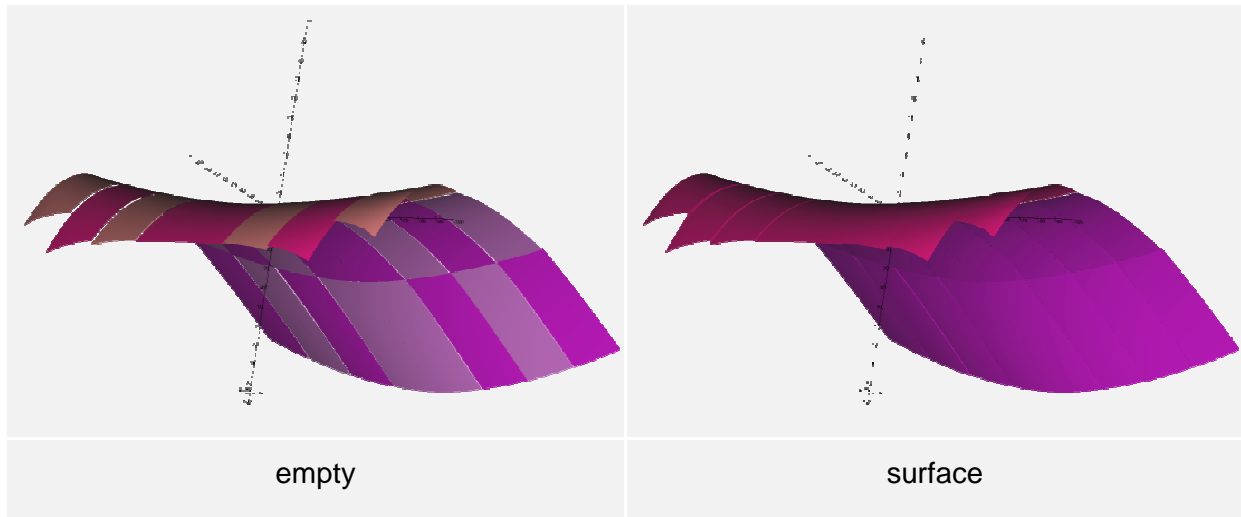


Abbildung 25: Vergleich der Füllmethoden „empty“ und „surface“

6.3. Ergebnis

Man erkennt, dass noch deutliche Unterschiede zwischen der berechneten und der geforderten Lichtstärkeverteilung vorhanden sind. Zum einen fällt auf, dass im Zentrum noch eine sehr hohe Lichtstärke ist, die zum Rand hin stark abfällt. Außerdem konzentriert sich in der Vertikalen die Lichtstärke zwischen 10° und 30° Grad.

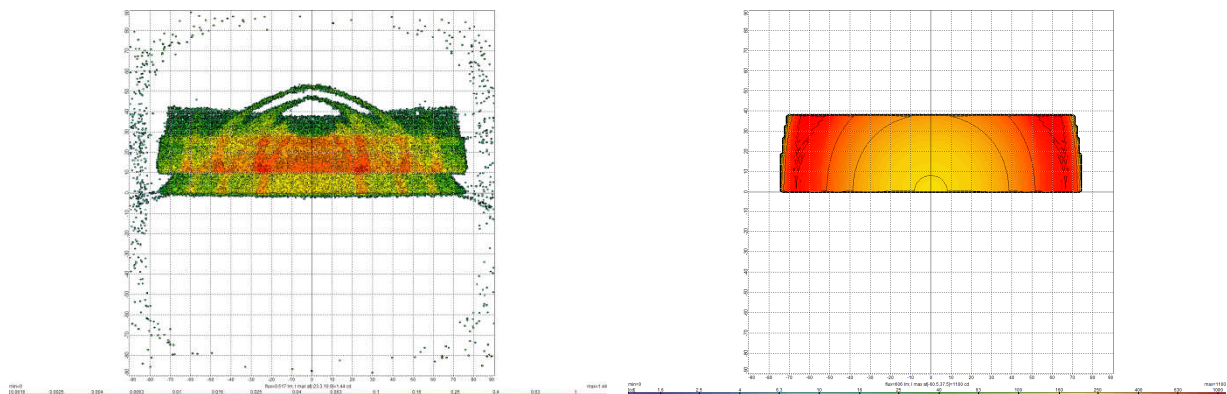


Abbildung 26: Lichtverteilung des überarbeiteten Reflektors (links) und benötigte Lichtstärkeverteilung (rechts)

Durch Variation der Parameter wurde versucht, die Unterschiede zu minimieren. Die Lichtverteilung kommt nun der geforderten schon sehr nahe: die Lichtstärke nimmt nach außen hin zu, wobei sie aber in den äußersten Bereichen immer noch nicht ausreichend ist.

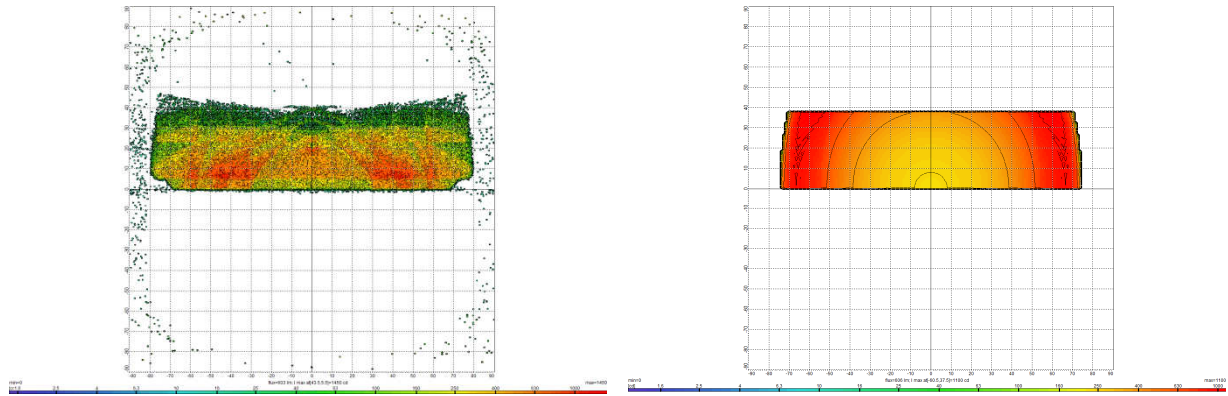


Abbildung 27: Lichtverteilung des überarbeiteten Reflektors (links) und benötigte Lichtstärkeverteilung (rechts)

Die 3D-Simulation der Straße zeigt dies noch deutlicher: die Bereiche direkt unter der Leuchte sind sehr hell, während die Bereiche zwischen zwei Leuchten deutlich dunkler sind bzw. komplett ohne Ausleuchtung. Das Streulicht, das außerhalb der Straße zu sehen ist, wird durch das Gehäuse noch reduziert werden.

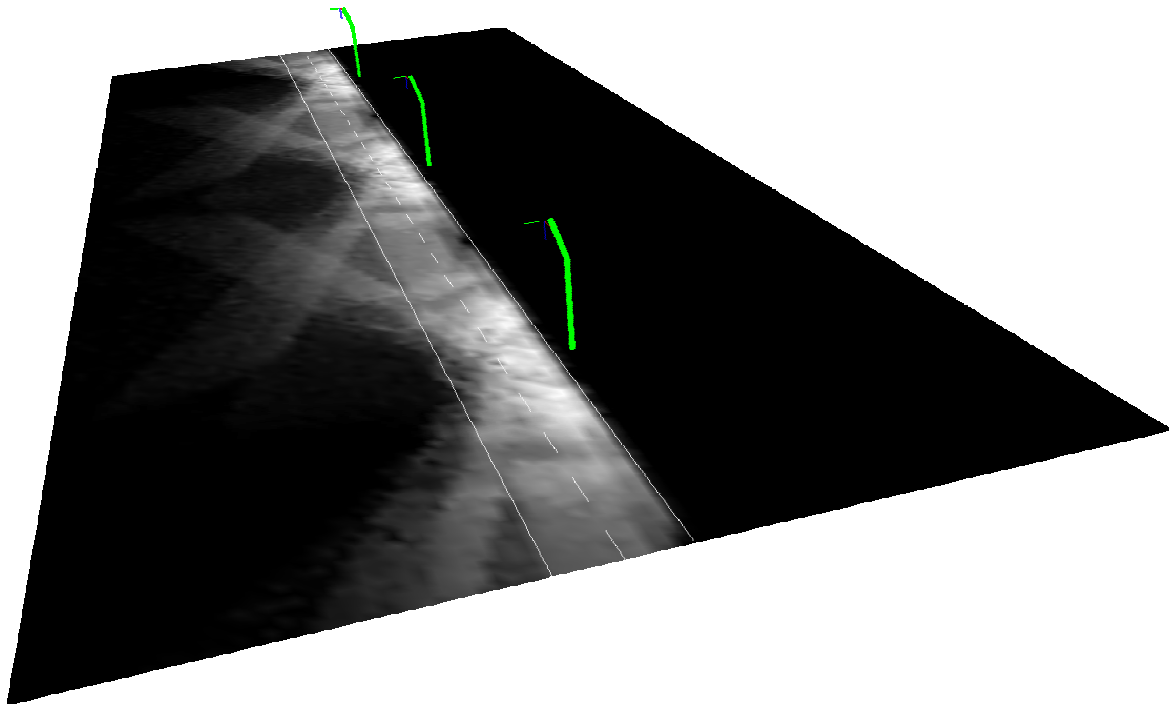


Abbildung 28: 3D-Simulation der Straße mit dem überarbeiteten Reflektors

Nach der Norm darf auf der Straße eine minimale Beleuchtungsstärke von einem Lux auftreten. Blendet man im Falschfarbenbild Bereiche aus, die unter einem Lux sind, sieht man, an welchen Stellen die Lichtverteilung noch nachgebessert werden muss.

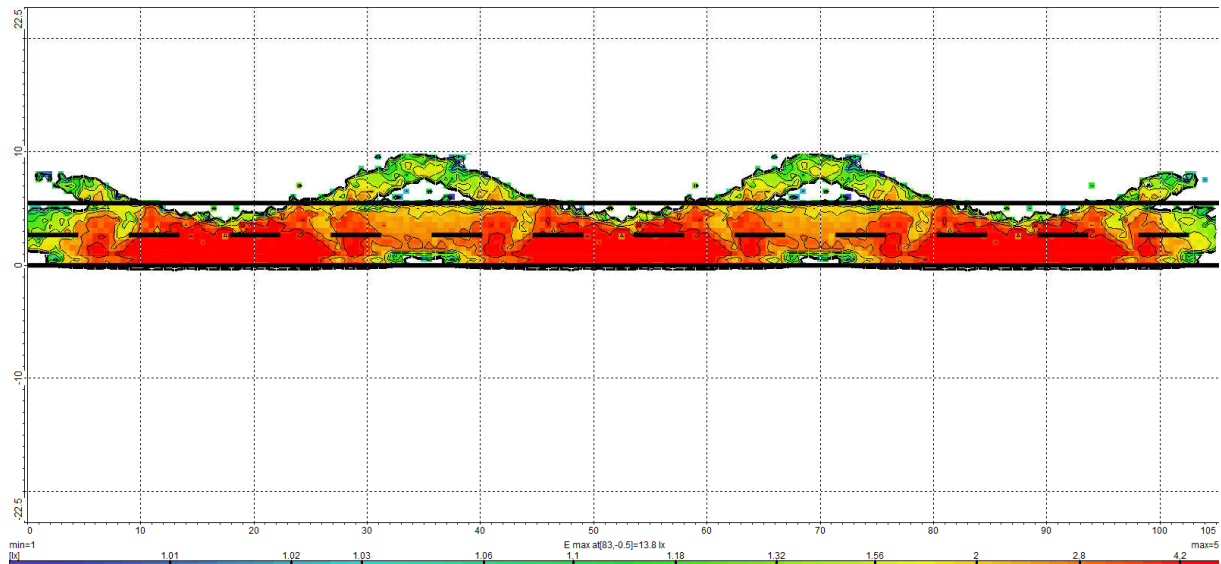


Abbildung 29: überlagerte Beleuchtungsstärke auf der Straße
(weiße Bereiche: $E < 1 \text{ lux}$; rote Bereiche: $E > 5 \text{ lux}$)

Auch wenn eine Gleichmäßigkeit der Beleuchtungsstärke kein Gütemerkmal der Beleuchtungsklasse S4 ist, sollte sie dennoch nicht außer Acht gelassen werden. Die maximale Beleuchtungsstärke hat einen Wert von $E_{\max} = 15 \text{ lux}$. Damit ist die Längsgleichmäßigkeit $g_2 = 0,067$. Dieser Wert ist entscheidend zu gering. Das Auge würde nur Objekte in stark ausgeleuchteten Bereichen erkennen und schafft es nicht sich auf die dunkleren Bereiche zu adaptieren. Dieser Mangel sollte noch beseitigt werden.

Um auch den Einfluss des Gehäuses auf die Lichtstärkeverteilung zu untersuchen, wird dieses im nächsten Schritt konstruiert.

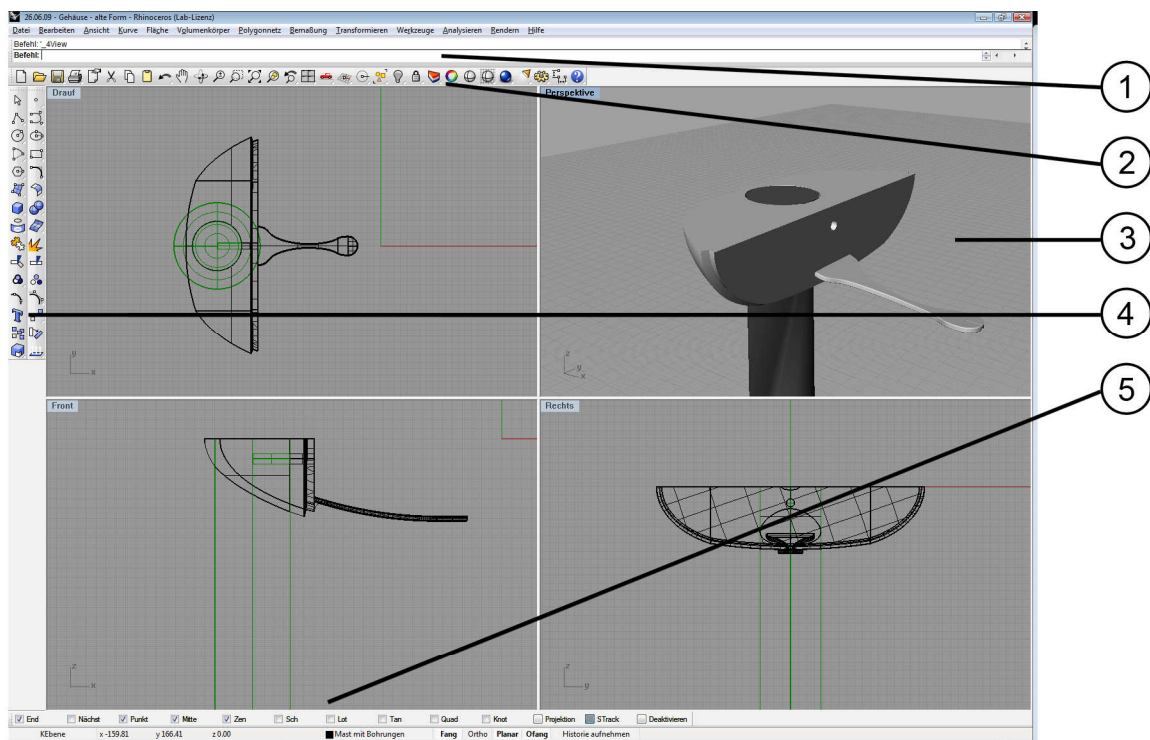
7. Konstruktion des Gehäuses

Bei der Berechnung des Reflektors wurde die LED nur strahlenmäßig, nicht aber als Körper berücksichtigt, das heißt, Strahlen die vom Reflektor zurückkommen und eigentlich mit dem Körper der Leuchtdiode interagieren sollten, wurden nicht abgelenkt.

Auch die Befestigung der LED wurde vernachlässigt. Damit möglichst wenig Strahlen abgelenkt werden soll der Steg, auf dem die Leuchtdiode sitzt, sehr schmal werden.

Im Kapitel Grundlagen wurde schon beschrieben, dass die Temperatur den Lichtstrom und die Lebensdauer der LED enorm beeinflussen. Eine gute Kühlung ist von entscheidender Bedeutung. Wie schon die Befestigung, soll auch der Kühlkörper möglichst klein ausfallen, damit wenig Licht abgelenkt wird. Dies steht natürlich im Widerspruch zur Kühlleistung. Hier gilt es einen akzeptablen Kompromiss zu finden.

Bei der Konstruktion des Gehäuses und des Kühlkörpers kommt das Programm Rhinoceros zum Einsatz. Dies ist eine 3D-Modellier-Software, mit der es möglich ist Freiform-Flächen besonders einfach zu erstellen.



- | | |
|-------------------|-------------------|
| ① Befehlsfenster | ④ Werkzeugleisten |
| ② Hauptwerkzeuge | ⑤ Fangwerkzeuge |
| ③ Ansichtsfenster | |

Abbildung 30: Arbeitsfenster Rhinoceros

Um eine Leuchte zu entwerfen, die auch bei einem breiten Publikum Zuspruch findet, sollte das Gehäuse nicht allzu futuristisch aussehen. Es wurde sich an einer

klassischen Form von Straßenleuchten orientiert und diese mit runden, geschwungenen Flächen kombiniert.



Abbildung 31: 3D-Ansicht der Leuchte

Die Abmessungen des Gehäuses entsprechen denen von herkömmlichen Leuchten:

- Länge: $l_{\text{Gehäuse}} = 600 \text{ mm}$
- Breite: $b_{\text{Gehäuse}} = 400 \text{ mm}$
- Höhe: $h_{\text{Gehäuse}} = 200 \text{ mm}$

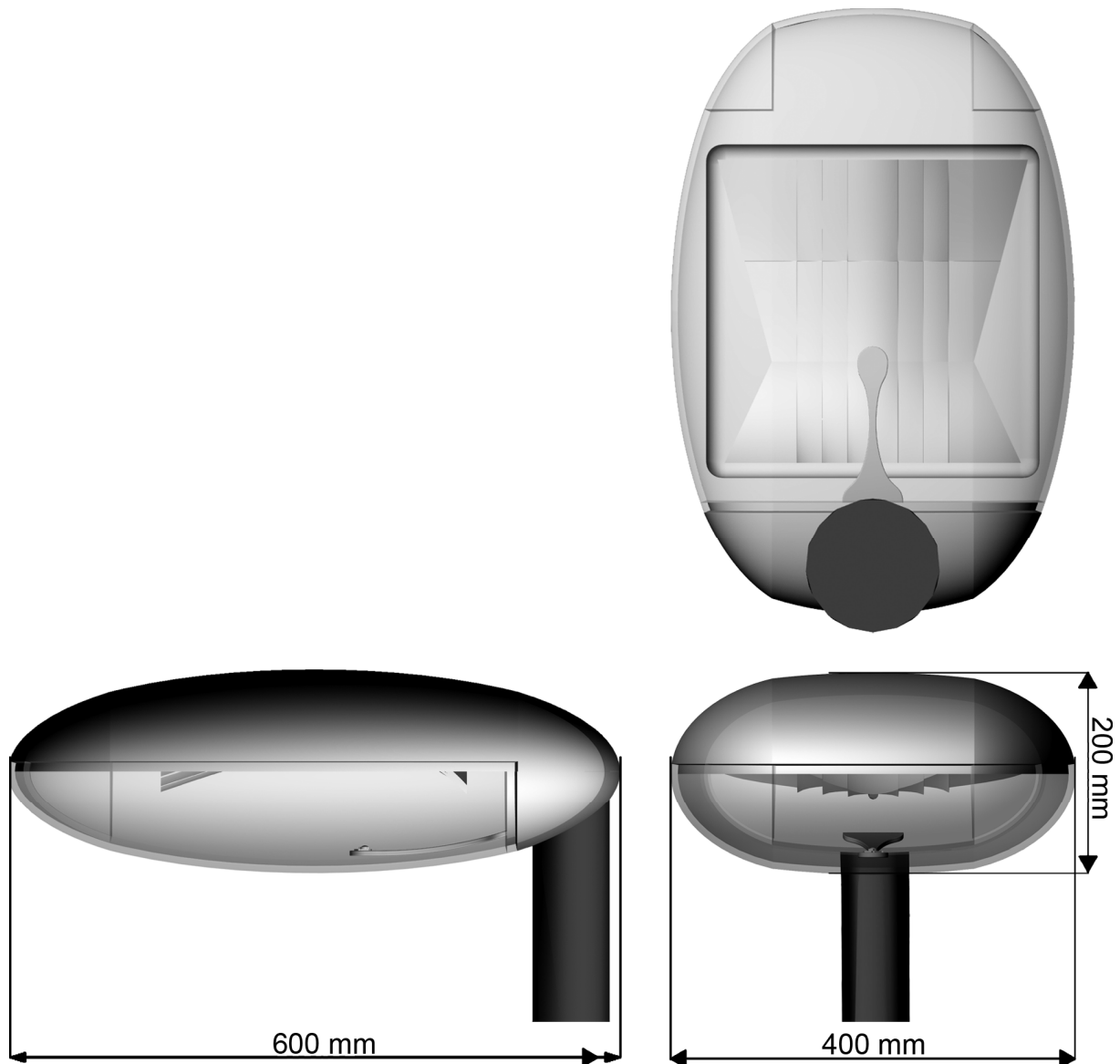


Abbildung 32: Außenmaße des Gehäuses in Millimetern

Auf Möglichkeiten der Befestigung wurde noch nicht eingegangen. Auch Dinge wie eine Dichtung gegen Feuchtigkeit und die Verlegung der Spannungsversorgung für Leuchtdiode müssen noch ausgearbeitet werden.

8. Aussicht

Eine optische Simulation samt Gehäuse wurde noch nicht durchgeführt. Es ist klar, dass der Steg, auf dem die Leuchtdiode sitzt, Lichtstrahlen ablenkt. Inwieweit sich dies negativ auf die Beleuchtung der Straße auswirkt muss erst noch untersucht werden. Das Streulicht sollte durch das Gehäuse reduziert werden. Eventuell ist es möglich Modifikationen am Gehäuse vorzunehmen, so dass dieses verlorene Licht auch auf die Straße gelangt.

Ob die passive Kühlung alleine durch das Gehäuse ausreichend ist kann nicht beurteilt werden. Ebenso kann keine Aussage darüber getroffen werden, ob der Steg genügend Wärme an das Gehäuse weiterleitet. Hier wäre eine thermische Simulation notwendig, die aber nicht Bestandteil dieser Diplomarbeit ist.

Der Lichtstrom, der benötigt wird um die Straße mit einer mittleren Beleuchtungsstärke von $\bar{E} = 5 \text{ lux}$ auszuleuchten, wurde von LucidShape mit $\Phi_{\text{Überschlag}_2} = 561 \text{ lm}$ veranschlagt. Verluste durch den Reflektor und auch Licht, das nicht auf die Straße gelangt, wurden nicht berücksichtigt. Es bleibt abzuwarten ob es möglich ist dies mit einer einzigen Leuchtdiode zu erreichen. Gerade in den äußerten Bereichen, die die Leuchte zu beleuchten hat, fehlt noch viel Lichtstärke.

Mit zwei Leuchtdioden sollte eine DIN-konforme Ausleuchtung dieser Klasse jedoch ohne Probleme möglich sein. Man könnte sogar den elektrischen Strom reduzieren und würde immer noch genügend Lichtstrom erhalten. Dies würde nicht nur Lebensdauer der Leuchtdiode erhöhen, auch die maximale Leistungsaufnahme von ca. 50 Watt wäre sehr energieeffizient.

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Technologieverteilung 2006 (Quelle: Statistisches Bundesamt)	8
Abbildung 2: Vorgehensweise für die Entwicklung der LED-Straßenleuchte	9
Abbildung 3: Effizient der Lichtquellen [3]	11
Abbildung 4: Vorgehensweise zur Bestimmung der Gütemerkmale.....	12
Abbildung 5: erforderliche Größen für die Berechnung der Leuchtdichte bzw. Beleuchtungsstärke	15
Abbildung 6: Bewertungsfeld.....	16
Abbildung 7: Lage der C-Ebenen auf einer Straße	17
Abbildung 8: Isolux-Diagramm	17
Abbildung 9: Arten der Beleuchtungsstärke	19
Abbildung 10: Umgebungs-Beleuchtungsstärkeverhältnis	22
Abbildung 11: Komponenten einer Simulation	26
Abbildung 12: Dialogbox „Street Simulation“ - Lichtquellenberechnung (links) und Straßensimulation (rechts)	27
Abbildung 13: Lichtstärkeverteilung (links) und Verteilung der Beleuchtungsstärke (rechts).....	28
Abbildung 14: 3D-Simulation der beleuchteten Straße (links) und einer einzelnen Leuchte (rechts).....	29
Abbildung 15: Überlagerung der Beleuchtungsstärke auf der Straße	29
Abbildung 16: "create optical FF surface"-Dialogbox.....	30
Abbildung 17: Rastereinstellungen („Grid Settings“).....	31
Abbildung 18: 2D- und 3D-Darstellung des Reflektors	32
Abbildung 19: Lichtquellen-Einstellung („Light Source Settings“)	33
Abbildung 20: "Set Facet Spread"-Dialogbox.....	34
Abbildung 21: Definition der vertikalen Winkelabschnitte	34
Abbildung 22: Definition der horizontalen Winkelabschnitte	35

Abbildung 23: "Set Sensor"-Dialogbox.....	36
Abbildung 24: "Gap Settings"-Dialogbox.....	36
Abbildung 25: Vergleich der Füllmethoden „empty“ und „surface“	37
Abbildung 26: Lichtverteilung des überarbeiteten Reflektors (links) und benötigte Lichtstärkeverteilung (rechts)	37
Abbildung 27: Lichtverteilung des überarbeiteten Reflektors (links) und benötigte Lichtstärkeverteilung (rechts)	38
Abbildung 28: 3D-Simulation der Straße mit dem überarbeiteten Reflektors	38
Abbildung 29: überlagerte Beleuchtungsstärke auf der Straße	39
Abbildung 30: Arbeitsfenster Rhinoceros	40
Abbildung 31: 3D-Ansicht der Leuchte.....	41
Abbildung 32: Außenmaße des Gehäuses in Millimetern	42

Literaturverzeichnis

- [1] TU Darmstadt: Millionen sparen mit moderner Straßenbeleuchtung, 2008,
[http://www.tu-darmstadt.de/vorbeischauen/aktuell/archiv_2/
neuesausdertudeinzelansicht_1344.de.jsp](http://www.tu-darmstadt.de/vorbeischauen/aktuell/archiv_2/neuesausdertudeinzelansicht_1344.de.jsp)
- [2] Philips: LED und OLED - Online-Schulung, 2006
<http://www2.philips.de/licht/onlineacademy/oacademy.html>
- [3] TRILUX GmbH & Co. KG: Beleuchtung und Umwelt, 2008
- [4] TRILUX-LENZE GmbH + Co KG: Licht für Europas Straßen - DIN EN 13201, 2005
[http://www.trilux.de/tx/export/download/de.plan_net.trilux/
Downloads/Lichtplanung/05_15-A-CH-D.pdf](http://www.trilux.de/tx/export/download/de.plan_net.trilux/Downloads/Lichtplanung/05_15-A-CH-D.pdf)
- [5] DIN 13201-1: Straßenbeleuchtung - Teil 1: Auswahl der Beleuchtungsklassen, Beuth Verlag, 2005
- [6] DIN EN 13201-2: Straßenbeleuchtung - Teil 2: Gütemerkmale, Beuth Verlag, 2004
- [7] DIN EN 13201-3: Straßenbeleuchtung - Teil 3: Berechnung der Gütemerkmale, 2004, Beuth Verlag
- [8] DI EN 13201-4: Straßenbeleuchtung - Teil 4: Methoden zur Messung der Gütemerkmale von Straßenbeleuchtungsanlagen, 2004, Beuth Verlag
- [9] LiTG: Methoden der Beleuchtungsstärke- und Leuchtdichteberechnung für Straßenbeleuchtung, 1991
- [10] Bayerisches Staatsministerium: Energieeffiziente Beleuchtung für attraktive öffentliche Plätze, 2007
<http://www.ipp-bayern.de/catalogue/index.php>
[mode=getitem&CatID=4&NewsID=51¤tcat=16&item=367&lang=de](http://www.ipp-bayern.de/catalogue/index.php?mode=getitem&CatID=4&NewsID=51¤tcat=16&item=367&lang=de)
- [11] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit: Sammlung energieeffizienter Techniken für die Stadtbeleuchtung, 2009
<http://www.bundeswettbewerb-stadtbeleuchtung.de/>

pdf_files/090211_SammlungStadtbeleuchtung.pdf

[12] Osram-OS: Osram Ostar ® LE UW E3B Datenblatt, 2008

<http://catalog.osram->

os.com/catalogue/catalogue.do;jsessionid=F9AADBFC936D87BC5B27073D18E9AB8?act=downloadFile&favOid=020000000002548a000200b6