

**Westsächsische Hochschule Zwickau**  
University of Applied Sciences



# **Diplomarbeit**

**Untersuchung und Erstellung eines Zielkonzepts für eine  
Umstellung der Straßenbeleuchtung auf LED**

Zur Erlangung des akademischen Grades:

**Diplom-Ingenieur für Elektrotechnik (FH)**

**Benjamin Jugelt**

Geb. am 23. April 1989

Hochschullehrer: Prof. Dr.-Ing. Mirko Bodach

Unternehmen: Mitteldeutsche Netzgesellschaft Strom mbH

Magdeburger Straße 36

06112 Halle (Saale)

Betreuer: Dipl.-Ing. Frank Wölfel und Uwe Nothhaas

## **Aufgabenstellung für das Thema:**

„Untersuchung und Erstellung eines Zielkonzepts für eine Umstellung der Straßenbeleuchtung auf LED“

Diese Diplomarbeit entsteht als Industriethema mit dem Unternehmen Mitteldeutsche Netzgesellschaft Strom mbH in Freiberg. Die Beleuchtungstechnik ist mit Einführung neuer Technologien immer effizienter geworden. Gerade im Bereich der Straßenbeleuchtung sind demnach große Energieeinsparpotentiale zu erwarten. Hierzu existieren bereits erste Ansätze für den Austausch der alten Beleuchtung.

Ziel der Arbeit ist die Untersuchung und Erstellung eines Zielkonzepts für eine Umstellung der Straßenbeleuchtung auf LED der Stadtwerke Glauchau Dienstleistungsgesellschaft mbH. Hierzu soll die Nutzung des NS-Netzes für die Straßenbeleuchtung betrachtet werden und die Einbindung eines Batteriespeichers untersucht werden. Weiterhin sollen rechtliche und wirtschaftliche Bewertungen vorgenommen werden.

Folgende Teilaufgaben sind dabei zu lösen:

- Recherche zur Technologie der Straßenbeleuchtung, relevanten Projekten und rechtliche Rahmenbedingungen
- Istnetzanalyse des zu betrachtenden NS-Netzes und der Straßenbeleuchtung
- Planung und Erstellung eines Zielkonzepts für eine Umstellung der Straßenbeleuchtung auf LED unter Beachtung rechtlicher Rahmenbedingungen und der Ausnutzung der „energetischen Dividende“
- Untersuchung zu Möglichkeiten der Einbindung eines Batteriespeichers in das Straßenbeleuchtungsnetz
- Wirtschaftlichkeitsbetrachtung der Umstellung > Investitionen zu eingesparten Kosten und Betreiben des Netzes als Doppelnetz



# Inhaltsverzeichnis

|  |      |
|--|------|
| Inhaltsverzeichnis .....                                     | IV   |
| Abbildungsverzeichnis .....                                  | VII  |
| Tabellenverzeichnis .....                                    | IX   |
| Abkürzungsverzeichnis .....                                  | XI   |
| Einheitenverzeichnis .....                                   | XIII |
| 1 Einleitung .....   | 1    |
| 1.1 Historie der Straßenbeleuchtung .....                    | 2    |
| 1.2 Biologische Grundlagen .....                             | 2    |
| 1.3 Auswirkungen von künstlichem Licht auf Tiere .....       | 3    |
| 1.4 Auswirkungen der Straßenbeleuchtung auf die Umwelt ..... | 5    |
| 1.5 Sicherheitsaspekt .....                                  | 5    |
| 2 Technischer Hintergrund .....                              | 7    |
| 2.1 Beleuchtungstechnik .....                                | 7    |
| 2.1.1 Betriebsmittel .....                                   | 7    |
| 2.1.1.1 Vorschaltgerät .....                                 | 8    |
| 2.1.1.2 Reflektor .....                                      | 10   |
| 2.2 Lampenarten .....  | 11   |
| 2.2.1 Gasentladungslampen .....                              | 12   |
| 2.2.1.1 Quecksilberdampflampen .....                         | 12   |
| 2.2.1.2 Halogenmetallampflampen .....                        | 14   |
| 2.2.1.3 Natriumdampflampen .....                             | 16   |
| 2.2.2 Elektrolumineszenzstrahler .....                       | 21   |
| 2.2.2.1 Leuchtdioden .....                                   | 21   |
| 2.3 Übersicht Lampenarten .....                              | 24   |
| 2.4 Ausphasung .....   | 26   |

|         |   |    |
|---------|---|----|
| 2.5     | Referenzobjekte .....   | 28 |
| 3       | Wirtschaftlichkeitsbetrachtung.....   | 29 |
| 3.1     | Aktueller Bestand der Stadtwerke Glauchau .....   | 30 |
| 3.2     | Energiekosten für ausgewählte Beispiele in der Stadt Glauchau .....                                   | 31 |
| 3.3     | Amortisation .....  | 33 |
| 4       | Möglichkeiten zur Nutzung des Niederspannungsnetzes für die<br>Straßenbeleuchtung und umgekehrt ..... | 40 |
| 4.1     | Istzustand des Niederspannungsnetzes.....   | 40 |
| 4.2     | Nutzung des Straßenbeleuchtungsnetzes für Aufgaben des<br>Niederspannungsnetzes .....                 | 42 |
| 4.3     | Nutzung des Niederspannungsnetzes für Aufgaben der Straßenbeleuchtung<br>.....                        | 45 |
| 4.3.1   | Steuerverfahren für Straßenbeleuchtung.....   | 46 |
| 4.3.1.1 | Bewegungsmelder.....  | 47 |
| 4.3.1.2 | Dämmerungsschalter .....  | 47 |
| 4.3.1.3 | Philips City Touch.....   | 47 |
| 5       | Energiespeicher .....   | 50 |
| 5.1     | Fördermöglichkeiten .....   | 50 |
| 5.2     | Speichertypen.....  | 51 |
| 5.3     | Vergleich Lithium-Ionenspeicher mit Bleiakku .....  | 52 |
| 5.4     | Einbindung des Speichers in das Energieversorgungsnetz.....   | 54 |
| 5.5     | Einbindung des Energiespeichers in das SBL Netz.....  | 55 |
| 5.5.1   | Speicherbetrachtung unter realen Bedingungen.....   | 56 |
| 5.5.2   | Speicherbetrachtung nach Umstellung auf LED .....   | 58 |
| 5.6     | Einbindung des Speichers in das NS oder MS Netz.....  | 59 |
| 5.6.1   | Referenzobjekt.....   | 60 |
| 5.6.2   | Bedeutung für Glauchau .....  | 60 |

|   |                                   |     |
|---|-----------------------------------|-----|
| 6 | Zielkonzept .....                 | 62  |
| 7 | Zusammenfassung und Ausblick..... | 64  |
|   | Quellenverzeichnis .....          | XIV |
|   | Anhang .....                      | A   |
|   | Maste.....                        | A   |
|   | Induktionslampen .....            | D   |

## Abbildungsverzeichnis

|  |    |
|--|----|
| Abbildung 1: Anzahl angelockter Insekten bei versch. Lampenarten (nach [9]) .....  | 4  |
| Abbildung 2: Oszillogramm der Lampenspannung einer Leuchtstofflampe bei 50 Hz (links) und im Hochfrequenzbetrieb (rechts) Nach Quelle: [2] ..... | 9  |
| Abbildung 3: Übersicht Lampenarten (nach [2], eigene Darstellung).....   | 11 |
| Abbildung 4: Quecksilberdampf Lampe [18] .....   | 12 |
| Abbildung 5: Schaltung HME mit VVG [19].....   | 13 |
| Abbildung 6: Halogen-Metall dampflampe [20] .....  | 15 |
| Abbildung 7: Schaltung (Eigene Darstellung) .....  | 15 |
| Abbildung 8: Natriumdampf- Hochdrucklampe [18] .....   | 18 |
| Abbildung 9: Zündgeräte (links: Überlagerungszündgerät, rechts Impulszündgerät) [24] .....   | 18 |
| Abbildung 10: Natriumdampf-Niederdrucklampe nach [24] .....  | 20 |
| Abbildung 11: Schaltung (eigene Darstellung).....  | 20 |
| Abbildung 12: Prinzip LED [24].....  | 22 |
| Abbildung 13: Schaltung (eigene Darstellung).....  | 22 |
| Abbildung 14: Darstellung Lampeneffizienz und Lebensdauer.....   | 25 |
| Abbildung 15: Ausphasungen eigene Darstellung, nach Quelle [26] .....  | 27 |
| Abbildung 16: Kostenstruktur (nach [2], eigene Darstellung).....   | 29 |
| Abbildung 17: Lampenverteilung in Glauchau .....   | 30 |
| Abbildung 18: Amortisation für August-Bebel-Straße .....   | 35 |
| Abbildung 19: Amortisationskennlinie dynamisch.....  | 37 |
| Abbildung 20: Gesamtarmortisation für Bauvorhaben Glauchau.....  | 37 |
| Abbildung 21: Gesamtamortisation ohne Am Ende und Färberstraße .....   | 38 |
| Abbildung 22: Lastprognose für verschiedene WE - Höchstlastanteil je Wohneinheit (Quelle: Intranet MITNETZ STROM) .....                          | 41 |

|  |    |
|--|----|
| Abbildung 23: Simulationsausschnitt Cerberus .....   | 42 |
| Abbildung 24: Übersicht Philips City Touch .....   | 47 |
| Abbildung 25: Das Gewicht von Energieträgern (nach Quelle [40], eigene<br>Darstellung) ..... | 53 |
| Abbildung 26: Beispiel 5 kWh Speicher (Quelle: [34]) .....                                   | 57 |
| Abbildung 27: Li-Ionen Speicher mit 6000 kWh (Quelle: [34]) .....                            | 58 |
| Abbildung 28: Regelenergiestaffelungen nach Zeit [48] .....                                  | 59 |
| Abbildung 29: Technischer Zustand der Straßenbeleuchtungsanlagen (nach Quelle<br>[30]) ..... | 64 |
| Abbildung 30: Masttyp A; gerade, konisch, rund .....   | A  |
| Abbildung 31: Masttyp B; gerade, abgesetzt, rund .....                                       | B  |
| Abbildung 32: Induktionslampe nach [24] .....  | D  |
| Abbildung 33: Schaltung (eigene Darstellung) .....   | D  |
| Abbildung 34: Historische Entwicklung der SBL .....  | G  |
| Abbildung 35: Amortisation Thomas Mann - Straße .....  | J  |
| Abbildung 36: Amortisation Kantstraße .....  | K  |
| Abbildung 37: Amortisation Straße Am Ende .....  | L  |
| Abbildung 38: Amortisation Lungwitzer Straße .....   | M  |
| Abbildung: 39 Amortisation Färbestraße .....   | N  |

## Tabellenverzeichnis

|   |    |
|---|----|
| Tabelle 1: Anzahl angelockter Insekten bei versch. Lampenarten (nach [9]).....    | 4  |
| Tabelle 2: Übersicht Quecksilberdampf Lampe .....                                 | 13 |
| Tabelle 3: Übersicht Halogen-Metaldampf Lampe .....                               | 14 |
| Tabelle 4: Übersicht Natriumdampf-Hochdrucklampe .....                            | 19 |
| Tabelle 5: Übersicht Natriumdampf-Niederdrucklampe .....                          | 21 |
| Tabelle 6: Übersicht LED.....   | 22 |
| Tabelle 7: Lichtausbeute und Lebensdauer.....                                     | 25 |
| Tabelle 8: Übersicht Lampendaten.....   | 26 |
| Tabelle 9: Lampenverteilung in Glauchau .....                                     | 30 |
| Tabelle 10: Szenario 100 % LEDs verbaut.....                                      | 32 |
| Tabelle 11: Daten für Austausch der Lampen .....                                  | 33 |
| Tabelle 12: Grundlage Amortisation (August-Bebel-Straße).....                     | 34 |
| Tabelle 13: Strombelastbarkeit Kupferleiterkabel (nach [33]) .....                | 43 |
| Tabelle 14: Strombelastbarkeit Aluminiumleiter.....                               | 43 |
| Tabelle 15: Querschnitte im NS Netz (nach Quelle [33]) .....                      | 46 |
| Tabelle 16: Speichervergleich (nach Quelle [40]) .....                            | 52 |
| Tabelle 17: Das Gewicht von Energieträgern (nach Quelle [40]).....                | 53 |
| Tabelle 18: Vergleich Speichertechnologien (Nach Quelle [41], [43] und [46])..... | 54 |
| Tabelle 19: (Quelle: Präsentation enviaM).....                                    | C  |
| Tabelle 20: (Quelle: Präsentation enviaM).....                                    | C  |
| Tabelle 21: Daten Induktionslampe .....   | F  |
| Tabelle 22: Anzahl Lampen in der SBL Glauchau (Realität).....                     | G  |
| Tabelle 23: Szenario 50 % LED verbaut.....  | H  |
| Tabelle 24: Daten für Austausch der Lampen .....                                  | H  |
| Tabelle 25: Daten für Austausch der Lampen .....                                  | I  |

|  |   |
|--|---|
| Tabelle 26: Amortisation Thomas - Mann - Straße .....                              | J |
| Tabelle 27: Amortisation Kantstraße .....  | K |
| Tabelle 28: Amortisation Am Ende .....   | L |
| Tabelle 29: Amortisation Lugwitzer Straße .....                                    | M |
| Tabelle 30: Amortisation Färberstraße .....  | N |
| Tabelle 32: Gleichzeitigkeitfakoren / Bedarfsfaktor .....                          | O |
| Tabelle 32: Nennleuchtdichte Quelle: Vorlesungsunterlagen .....                    | P |
| Tabelle 33: Gleichmäßigkeit der Leuchtdichte U1 Quelle: Vorlesungsunterlagen ..... | P |
| Tabelle 34: Klasse der Blendungsbegrenzung KB Quelle: Vorlesungsunterlagen .....   | Q |
| Tabelle 35: Klasse der Blendungsbegrenzung, Quelle: Vorlesungsunterlagen .....     | Q |

## **Abkürzungsverzeichnis**

|         |   |
|---------|---|
| AGM     | Absorbing Glass Mat   |
| BHKW    | Blockheizkraftwerk  |
| BMU     | Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit |
| BSS     | Batteriespeichersystem  |
| DALI    | Digital Adressable Lighting Interface                           |
| EIB     | European Installation Bus                                       |
| EVG     | Elektronisches Vorschaltgerät                                   |
| GSM     | Global System for mobile communication                          |
| GPS     | Global Positioning System                                       |
| GZF     | Gleichzeitigkeitsfaktor   |
| HIT     | Halogenmetaldampflampen   |
| HME/HQL | Quecksilberdampfhochdrucklampe                                  |
| HST     | Natriumdampfhochdrucklampe                                      |
| KfW     | Kreditanstalt für Wiederaufbau                                  |
| KVG     | Konventionelles Vorschaltgerät                                  |
| KWK     | Kraft-Wärme-Kopplung  |
| LED     | Light Emitting Diode (Leuchtdiode)                              |
| LON     | Local Operating Network   |
| LST     | Natriumdampfniederdrucklampe                                    |
| MS      | Mittelspannung  |
| NS      | Niederspannung  |
| OLC     | Outdoor Luminaires Controller                                   |
| PV      | Photovoltaik  |
| RF      | Rundfunk  |
| SAB     | Sächsische Aufbaubank   |

|     |                             |
|-----|-----------------------------|
| SBL | Straßenbeleuchtung          |
| SC  | Segmentcontroller           |
| SIM | Suscriber Identity Module   |
| SWG | Stadtwerke Glauchau         |
| TC  | Kompaktleuchtstofflampen    |
| UW  | Umspannwerk                 |
| VVG | Verlustarmes Vorschaltgerät |
| WE  | Wohneinheit                 |
| WKA | Windkraftanlage             |

## Einheitenverzeichnis

|                     |                |              |
|---------------------|----------------|--------------|
| Arbeit              | $W$            | [kWh]        |
| Farbtemperatur      | $K$            | [Kelvin]     |
| Farbwiedergabeindex | $R_a$          |              |
| Frequenz            | $f$            | [Hz]         |
| Gewinn              | $g$            | [€]          |
| Kapazität           | $C$            | [F]          |
| Ladung              | $Q$            | [As]         |
| Lampenbrenndauer    | $d$            | [h]          |
| Lichtausbeute       |                | [lm/W]       |
| Lichtstärke         | $I_v$          | [cd]         |
| Lichtstrom          | $\Phi$         | [lm]         |
| Leistung            | $P$            | [W]          |
| Leistungsfaktor     | $\cos \varphi$ |              |
| Scheinleistung      | $S$            | [VA]         |
| Spannung            | $U$            | [V]          |
| Strom               | $I$            | [A]          |
| Wellenlänge         | $\lambda$      | [m]          |
| Widerstand          | $R$            | [ $\Omega$ ] |

## 1 Einleitung

Das 1997 in Kyoto verabschiedete Klimaprotokoll sieht einen Rückgang der Treibhausgase (wie Methan, Kohlenstoffdioxid und Lachgas) gegenüber 1990 vor. In der ersten Verpflichtungsperiode 2008 - 2012 gelang es Deutschland, seine Emissionen um 23,6 Prozent gegenüber 1990 zu senken. Deutschland verpflichtete sich, den Ausstoß um 21 Prozent zu reduzieren. Die zweite Verpflichtungsperiode (2013 - 2020) sieht eine Verringerung der Emissionen von 20 Prozent in der EU vor. Das Referenzjahr ist auch hier 1990. Dieses Ziel kann nur mit effektiven Energiesystemen und dem Ausbau erneuerbarer Energien erreicht werden, aber auch Suffizienz trägt zur Verwirklichung des Plans bei. [1]

Durch die Verknappung der fossilen Energieträger, höhere Steuern und den damit verbundenen steigenden Energiepreisen werden Städte und Gemeinden immer stärker finanziell belastet. Meist sind sie ebenfalls für die öffentliche Beleuchtung zuständig. Aufgrund der ohnehin angespannten Finanzsituation der Haushalte sind Kommunen gezwungen, Kosten zu sparen. Darunter fällt auch ein effizienterer Betrieb von Straßenbeleuchtungen. Durch den Einsatz moderner LED Technik in der Straßenbeleuchtung kann diesem Ziel näher gekommen werden.

## 1.1 Historie der Straßenbeleuchtung

Die Geschichte der Straßenbeleuchtung reicht weit zurück. Gegen Ende des Mittelalters (1417) wurde den Londoner Bürgern befohlen, in den Wintermonaten an den Häusern brennende Laternen anzubringen. [2] In Paris sollten die Einwohner eine brennende Laterne in die Fenster ihrer Häuser setzen. Die erste öffentliche Beleuchtung gab es 1556 in Paris mittels Pech- und Kiespfannen, welche in der Mitte und an den Enden der Straßen aufzustellen bzw. an Seilen aufzuhängen waren. In London wurden 1662 die ersten Öllaternen aufgestellt. Viele andere europäische Städte wie Berlin, Leipzig und Kopenhagen folgten diesem Beispiel. Anfang des 19. Jahrhunderts wurden einige Straßen mittels Gaslaternen beleuchtet. Aufgrund zahlreicher Vorteile gegenüber den Öllampen breitete sich die Gasbeleuchtung schnell aus. Als 1866 das elektro-dynamische Prinzip durch Werner von Siemens entdeckt wurde, konnten die bis dahin verwendeten Batterien durch eine Dynamomaschine abgelöst werden und die Gaslampen verschwanden mehr und mehr. Einen weiteren Fortschritt ergab sich in den dreißiger Jahren des vergangenen Jahrhunderts durch die Entwicklung der Hochdruckentladungslampen, wobei die Quecksilberdampf Lampe den Anfang machte. Später kam die Natriumdampf-Hochdrucklampe hinzu. In Kapitel 2 die verschiedenen Lampenarten vorgestellt. In den vierziger Jahren des vergangenen Jahrhunderts wurden die ersten elektrischen Leuchtstellen in Glauchau errichtet.

## 1.2 Biologische Grundlagen

Auf der menschlichen Netzhaut (Retina) im Auge befinden sich zwei verschiedene Arten von Photorezeptoren. Es handeln sich um Zapfen und Stäbchen. Die Stäbchen sind dabei für das Helligkeitssehen oder Tagsehen verantwortlich. Es gibt etwa 120 Mio. Stäbchen auf der Netzhaut. [3] Jedoch kann man mit ihnen keine Farben erkennen, sondern nur Graustufen. Für das Farbsehen sind die etwa sechs Mio. Zapfen verantwortlich. Es gibt drei verschiedene Arten von Zapfen, die jeweils unterschiedliche Farbvalenzen registrieren. Zum einen die L-Zapfen (Long), die den langwelligen Anteil des Lichtes wahrnehmen (bis etwa 700 nm). Zum anderen die M-Zapfen (Medium). Diese sind empfindlich für mittlere Wellenlängen. „Das Absorptionsmaximum liegt hier bei etwa 530 nm, entsprechend einem Gelbgrün.“ [4] Zum Dritten reagieren die S-Zapfen (Short) auf kurzwelliges Licht (mit einem Absorptionsmaximum bei 420 nm).

Bedingt dadurch ist das menschliche Auge in der Lage, das komplette Lichtspektrum von 380 nm bis 780 nm wahrzunehmen, infrarotes und ultraviolettes Licht jedoch nicht. Gewisse Tiere, wie z.B. Bienen und manche Vogelarten, können auch den ultravioletten Teil des Lichtes erkennen. Andere Tiere, wie z.B. Katzen, sehen ein verengtes Spektrum, das heißt, die betroffenen Tiere können nicht das gesamte Spektrum wahrnehmen. Ihnen fehlt eine Zapfenart. Auch Farbenblindheit gibt es im Tierreich, betroffen davon sind zum Beispiel Ratten und Hunde.

### **1.3 Auswirkungen von künstlichem Licht auf Tiere**

Nachtaktive Insekten sehen ultraviolettes Licht und damit die kürzeren Wellenlängen (um 400 nm) intensiver, wie auch Bienen. Von Insekten wird die Farbwahrnehmung im gelben bis roten Wellenlängenbereich schlechter als bei Menschen empfunden. Somit werden Insekten von Lampen mit hohem UV-Anteil angezogen. Mögliche Folgen sind zum einen, dass nachtaktive Insekten durch die direkte Hitzeeinwirkung getötet werden oder sich zum anderen die Flügel versengen, was die Flugfähigkeit stark einschränkt oder völlig zerstört. [4] Größere und schnell fliegende Insekten können durch den Aufprall an das Lampengehäuse erheblichen Schaden davontragen, auch an den empfindlichen Rezeptoren. Wenn diese beschädigt sind, ist mit erhöhter Mortalität zu rechnen. [6] Sofern sich Insekten ins Lampengehäuse verirren und dort gefangen sind, können sie durch die Hitze oder durch Verhungern sterben. Da Insekten in der Nähe von Lichtquellen gut zu sehen sind, werden sie oft zum Ziel von Fressfeinden wie Vögeln, Fledermäusen oder Spinnen. Auch der Tarneffekt von Nachtfalterarten geht in der Nähe von künstlichen Lichtquellen verloren. Ebenfalls wird die Fortpflanzung und Eiablage bei dem Aufenthalt an Lichtquellen verzögert oder unterbunden. Die längeren Aktivitätszeiten durch künstliches Licht und der damit einhergehende gesteigerte Energieverlust gehen zu Lasten der Reproduktion, Nahrungssuche und Ausbreitung. Das Umherschwirren um Lichtquellen stellt einen unnötigen Energieverbrauch dar und kann zur Erschöpfung und damit zum Tod der Insekten führen.

Bereits bei der Auswahl der Leuchte sollte darauf geachtet werden, welches Farbspektrum die Lampe aussendet, um die Anlockwirkung auf Insekten zu minimieren. Sowohl Quecksilberdampf-Hochdrucklampen als auch Metallhalogenlampen locken sehr viele Insekten an. Das verdeutlicht auch Tabelle 1 auf der folgenden Seite. Allerdings ist die Farbwiedergabe bei Entladungslampen mit geringer Anlockwirkung schlechter. Der Farbwiederga-

beindex ist eine Kennzahl für die Qualität der Farbwiedergabe. Er kann einen maximalen Wert von 100 erreichen. Je niedriger der Wert ist, umso schlechter ist das Farbsehen bei der jeweiligen künstlichen Lichtquelle.

Insekten orientieren sich an den Himmelskörpern (Mond und Sterne). Wenn sie jedoch auf eine hellere Lichtquelle stoßen, werden sie regelrecht in deren Lichtbann gezogen. [7] Dort können sie leichte Beute sein oder sterben an Erschöpfung und fehlen damit als Bestäuber oder in der Nahrungskette. LED-Leuchten gelten als verhältnismäßig insektenfreundlich. [8] Das LED Licht strahlt nicht im UV-Bereich, welcher für die Insektenaugen besonders empfindlich ist.

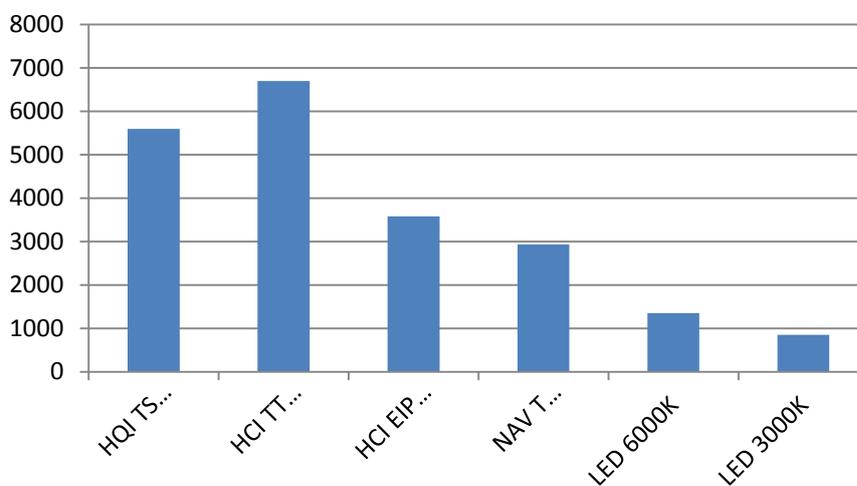


Abbildung 1: Anzahl angelockter Insekten bei versch. Lampenarten (nach [9])

Tabelle 1: Anzahl angelockter Insekten bei versch. Lampenarten (nach [9])

| HQI TS<br>(Halogenmetall-<br>dampflampe) | HCI TT<br>(Halogenmetall-<br>dampflampe) | HCI EIP<br>(Halogenmetall-<br>dampflampe) | NAV T<br>(Natrium-<br>dampflampe) | LED<br>6000K | LED<br>3000K |
|--|--|---|-----------------------------------|--------------|--------------|
| 5597 Insekten                            | 6698 Insekten                            | 3577 Insekten                             | 2933 Insekten                     | 1348 I.      | 848 I.       |
| 27 %                                     | 32 %                                     | 17 %                                      | 14 %                              | 6 %          | 4 %          |

Die in der Tabelle 1 gezeigten angelockten Insekten beziehen sich auf kumulierte Werte aus 18 Erfassungsnächten. Es wird deutlich, dass die warmweiße LED die kleinste Anlockung hervorruft.

## **1.4 Auswirkungen der Straßenbeleuchtung auf die Umwelt**

Die Straßenbeleuchtung trägt etwa 50 Prozent zu der Lichtverschmutzung bei. Damit ist die Aufhellung des Nachthimmels gemeint. Sie trifft nicht nur Insekten, sondern auch andere Organismen und Pflanzen. So sind auch Zugvögel von den Lichtemissionen betroffen, besonders bei schlechter Sicht. Sie brauchen die Dunkelheit der Nacht zum Jagen oder für Ruhezeiten, je nachdem, ob es sich um tag- oder nachtaktive Tiere handelt. Auch Pflanzen benötigen den Tag-Nacht-Rhythmus für die Fotosynthese. [10]

Durch den Einsatz moderner LED-Technik in Straßenlampen soll die Nacht noch heller werden. [11] Der menschliche Biorhythmus hängt ebenso vom Licht ab, insbesondere von der Wirkung des blauen Lichtes. [12] Es lässt uns früh munter werden. Dabei wird das Hormon Serotonin ausgeschüttet, welches das Schlafhormon Melatonin unterdrückt. Dieser Effekt wird auch bei künstlichem Licht hervorgerufen, das den blauen Himmel imitiert. Der blaue Himmel hat eine Farbtemperatur von mehr als 10.000 Kelvin. [13] Das Sonnenlicht am Abend oder am Morgen hat eine Farbtemperatur von etwa 5000 K. Das von LED Lampen ausgesendete Licht hat Farbtemperaturen von 3000 K bis 7000 K. Die Farbtemperaturen werden auch warmweiß (ww; unter 3300 K), neutralweiß (nw; von 3300 K bis 5300 K) und kaltweiß (kw; über 5300 K) genannt.

## **1.5 Sicherheitsaspekt**

Fraglos ist, dass die Verkehrssicherheit durch die Straßenbeleuchtung erhöht wird. Die Unfallfolgen bei Dunkelheit sind schwerwiegender als bei Unfällen am Tage. In Relation zur Verkehrsmenge gesehen, liegen die Unfallzahlen bei Dunkelheit höher als am Tag. Untersuchungen zeigen, dass nach Totalabschaltungen der Straßenbeleuchtung die Zahl der Unfälle auf diesen Straßen ansteigt. Es gibt mehrere Faktoren, die das Unfallgeschehen bei Dunkelheit beeinflussen. Dazu zählen die Verkehrsmengen, Geschwindigkeiten, Beleuchtungsgüte und Streckencharakteristik. [14] Die öffentliche Straßenbeleuchtung hat die Aufgabe, die Verkehrssicherheit aller Verkehrsteilnehmer – darunter Kraftfahrzeuge, Radfahrer und Fußgänger – in den Dunkelstunden zu gewährleisten. Auch soll die öffentliche Sicherheit und Ordnung unterstützt werden. Dazu zählt die frühzeitige Erkennung von potentiellen Gefahren. Nicht zu verachten ist der Aspekt, dass die Straßenbeleuchtung auch zur Attraktivität einer Stadt beiträgt. So werden Kommunikationsbereiche (Plätze,

Brücken, Fußgängerzonen und Einkaufsbereiche) belebt, was eine Steigerung der Lebensqualität zur Folge hat. [5]

Die Straßenbeleuchtung muss so ausgelegt sein, dass man Hindernisse, andere Verkehrsteilnehmer und Fußgänger rechtzeitig und sicher erkennen kann. Dies wird unter Erfüllung der Verkehrssicherungspflicht zusammengefasst. Dabei ist eine Blendung der Verkehrsteilnehmer weitestgehend zu vermeiden. Die Verkehrssicherungspflicht wurde von der Rechtsprechung aus dem § 823 Bürgerlichen Gesetzbuch abgeleitet. Darunter wird verstanden, dass die öffentlichen Straßen in einem verkehrssicheren Zustand sein sollen. Im Sächsischen Straßengesetz ist die Beleuchtungspflicht ebenfalls verankert. Dort heißt es bei § 51 Absatz 1: *„Die Gemeinden haben alle öffentlichen Straßen innerhalb der geschlossenen Ortslage zu reinigen und im Rahmen des zumutbaren zu Beleuchten.“* [15]

## **2 Technischer Hintergrund**

### **2.1 Beleuchtungstechnik**

Die verschiedenen Beleuchtungstechniken in der Straßenbeleuchtung, welche im Laufe dieses Kapitels näher vorgestellt werden, sind sehr vielseitig. So unterscheiden sie sich nicht nur durch verschiedene Bauweisen, sondern ebenfalls durch Lichtfarbe, Lichtausbeute, Lebensdauer, Zündverhalten, Anlaufzeit und Energieverbrauch. Daher können die verschiedenen Lampenarten – entsprechend des jeweiligen Anwendungsfalls – unterschiedliche Vor- und Nachteile aufweisen. Weiterhin ist nicht zu vernachlässigen, dass die von den Herstellern angegebenen Lichtströme für Laborbedingungen bei Umgebungstemperaturen von 25 °C gelten. Dementsprechend können die den Untersuchungen zugrundeliegenden Werte in der Praxis stark abweichen. Das Zündverhalten bzw. die Anlaufzeit beeinflussen beispielsweise das Leuchtmittel in der Hinsicht, dass nach einer Netzunterbrechung im Besonderen Hochdruckentladungslampen mehrere Minuten brauchen, bis es zu einer Wiederezündung kommt. Der volle Lichtstrom wird ebenfalls erst wieder nach einer lampenspezifischen Anlaufzeit erreicht. [16]

#### **2.1.1 Betriebsmittel**

Zu einer kompletten Leuchte, wie sie auf den Straßen in Städten und Gemeinden zu sehen sind, gehören viele Komponenten: angefangen bei dem Vorschaltgerät über den Mast mit dem dazugehörigen Leuchenträger bis hin zum Reflektor, der das Licht bündelt und auf die zu beleuchtende Fläche ausrichtet. Ausführungen zu Masten befinden sich im Anhang A.

### 2.1.1.1 Vorschaltgerät

Für das Betreiben von Gasentladungslampen sind Vorschaltgeräte nötig. Diese begrenzen den Stromfluss, welcher bei konstanter Spannung immer weiter steigen würde, weil die Leitfähigkeit der Gasentladung nach der Zündung immer mehr zunimmt. Dies führt zur Zerstörung der Lampe. Das wird durch eine Strombegrenzung (ohmsche Widerstände) vermieden. Verschiedene Lampentypen erfordern unterschiedliche Typen von Vorschaltgeräten: induktive, (konventionelle KVG und verlustarme VVG) und elektronische Vorschaltgeräte (EVG). [2]

Induktive Vorschaltgeräte bestehen aus einem Eisenkern, welcher mit Kupferdraht umwickelt ist (Drossel mit Eisenkern). Die Unterschiede von KVG und VVG bestehen in der Verwendung von speziellen Elektroblechen, größerer Kupferquerschnitte und ein optimierter Kernaufbau, was zu einer Energieeinsparung bei VVG führt. Allerdings hängt die Leistungseinsparung von VVG gegenüber KVG stark von der Lampenleistung ab. Die Verlustleistung bei KVG ist im Vergleich zu VVG oder EVG am größten. Bei Leuchtstofflampen bzw. Kompaktleuchtstofflampen kommen konventionelle Vorschaltgeräte (KVG) oder verlustarme Vorschaltgeräte (VVG) zum Einsatz, ebenso Starter, Kompensations- und gegebenenfalls Funkentstörkondensatoren sowie Tonfrequenzsperrdrosseln.

Die elektronischen Vorschaltgeräte bieten viele Vorteile, darunter eine reduzierte Anschlussleistung und eine längere Lampenlebensdauer durch Warmstart-EVG, welche die Elektroden der Leuchtstofflampe vorheizen. Dadurch wird die Lebensdauer signifikant erhöht, weil das Startverfahren enorme Auswirkung auf die Lebensdauer hat. Kaltstarts verringern die Lebensdauer, weil die Elektroden der Lampe nicht genügend vorgeheizt sind und stärker beansprucht werden. Wenn die Vorheizzeit und -energie auf die Lampe abgestimmt sind, hat die Schalthäufigkeit nahezu keine Auswirkung auf die Lebensdauer.

Weil der Wirkleistungsfaktor über 0,95 liegt, können Kompensationskondensatoren entfallen. Ein solcher Kondensator wirkt mit seiner kapazitiven Blindleistung der induktiven Blindleistung entgegen. Beim Betrieb mit EVG liegt die Betriebsfrequenz zwischen 30 kHz und 90 kHz, was die Ionisierungsarbeit verringert. Beim Betrieb mit 50 Hz muss die Entladungsstrecke in jeder Stromhalbwellenperiode erneut ionisiert werden. Die Abbildung 2 zeigt den Unterschied der verwendeten Frequenzen.

Links ist der Betrieb bei 50 Hz mit der zusätzlichen Ionisierungsarbeit zu sehen. Rechts ist das Annähern der Kurve an eine Sinuskurve im Hochfrequenzbetrieb zu sehen.

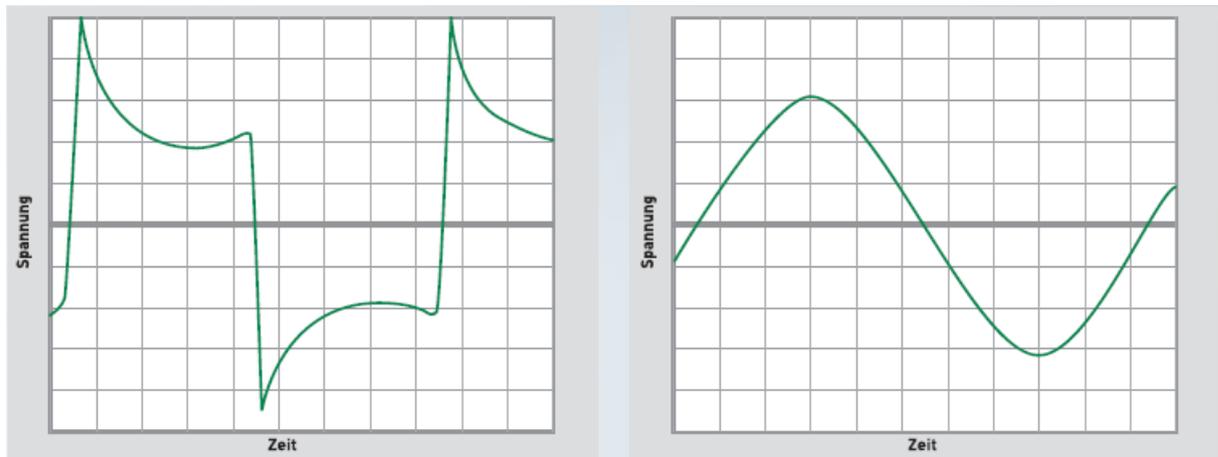


Abbildung 2: Oszillogramm der Lampenspannung einer Leuchtstofflampe bei 50 Hz (links) und im Hochfrequenzbetrieb (rechts) Nach Quelle: [2]

Ein weiterer Vorteil des Hochfrequenzbetriebes ist, dass die Lichtausbeute steigt und die Systemleistung sinkt. Es treten keine stroboskopischen Effekte aufgrund der hohen Frequenzen auf. EVG starten Lampen flackerfrei und ohne Verzögerung. Somit ist ein zusätzlicher Starter nicht notwendig. Funkentstörkondensatoren sind im EVG integriert. Durch die Cut-Off-Technologie werden die Elektroden der Lampe nicht ständig mit Energie beaufschlagt, sondern nur zum Startzeitpunkt. Damit lassen sich Temperaturerhöhungen im Elektrodenbereich vermeiden und somit die Verlustleistung verringern. EVG sind ohne zusätzliche Komponenten für den Einsatz in Notstromversorgungssystemen geeignet, da sie auch für den Gleichspannungsbetrieb ausgelegt sind. Ein weiterer Vorteil von EVG ist, dass der Lichtstrom konstant bleibt, auch bei schwankender Netzspannung. Auch ist es leichter im Vergleich zu den KVG oder VVG. [2] Es gibt auch Multi-Lamp EVG, die durch eine Identifikationsroutine die angeschlossene Lampe erkennen und ihre Betriebswerte optimal darauf einstellen. Davon zu unterscheiden sind die Multi-Watt-EVG, wo eine intelligente Lampenerkennung nicht stattfindet.

Der Bestand an dimmbaren Beleuchtungsanlagen nimmt immer mehr zu, um Beleuchtungskosten zu sparen und je nach Bedarf die Lichtstärke zu regeln. Mittels EVG besteht die Möglichkeit, das Leuchtmittel zu dimmen. Angesteuert wird das EVG dabei über eine genormte zweipolige Schnittstelle. Die Steuergleichspannung, welche im EVG erzeugt wird, befindet sich zwischen 1 und 10 V. Da die analoge Schnittstelle potenzialfrei von der

Versorgungsspannung ist, können mehrere EVG parallel betrieben werden. Dabei erfolgt die Verbindung zwischen Dimmer bzw. Steuergeräten und dimmbaren EVG über eine Zweidrahtleitung. Dimmbare EVG können Teil eines Lichtmanagementsystems werden. Beispiele für Lichtmanagementsysteme sind European Installation Bus (EIB) oder Local Operating Network (LON). Leider werden die Vorschaltgeräte nicht erfasst, wodurch sich keine Aussage treffen lässt, wie viele EVG schon eingebaut sind oder noch ersetzt werden müssen.

Das DALI (Digital Adressable Lighting Interface) EVG ist eine komfortable, benutzerfreundliche Schnittstelle, mit deren Hilfe man jedes EVG einzeln ansteuern oder alle Lampen synchron dimmen kann. Die Verdrahtung ist einfach und ebenso die Programmierung. Es können bis zu 64 Leuchten an einem Bussegment betrieben werden. [17]

#### **2.1.1.2 Reflektor**

Gasentladungslampen strahlen sehr großflächig in alle Richtungen. Ein Reflektor hat die Aufgabe, den Teil des Lichtes, welcher nach oben abgestrahlt wird, zu reflektieren und nach unten umzulenken. Als Spiegelmaterial kommt meist Aluminium zum Einsatz. [2] Die Oberfläche der Aluminiumreflektoren wird mit verschiedenen Verfahren zusätzlich vergütet. Dabei wird zwischen bandeloxiertem, stückeloxiertem und reflexionsverstärkendem beschichtetem Aluminium unterschieden. Bei dem zuletzt genannten Verfahren beträgt die Gesamtreflexion ca. 95 Prozent, bei walzfrischem Reinstaluminium und stückeloxiertem Aluminium beträgt der Reflexionswert ca. 85 Prozent. Noch bessere Reflexionswerte erreicht ein Verfahren, bei dem auf das Aluminiumgrundmaterial ein reflexionsverstärkendes Schichtensystem aus Silber aufgetragen wird. Es können Reflexionsgrade bis zu 98 Prozent erzielt werden.

Bei LEDs wird dieser Spiegel meist nicht benötigt, da sie das Licht nur in eine Richtung abstrahlen. Was bei manchen Lampen allerdings benötigt wird, ist ein Reflektor zur Anpassung der Lichtfarbe. Die LED Lampen strahlen blaues Licht aus und in dem Reflektor befindet sich eine phosphoreszierende Schicht, welche das blaue Licht in weißes Licht umwandelt. Diese Technik nennt sich Fortimo (von Philips).

## 2.2 Lampenarten

Es gibt drei physikalische Grundprinzipien zur Lichterzeugung, die wirtschaftlich Anwendung finden. Diese beruhen alle auf dem Prinzip der Strahlungsemission. Das kann aufgrund hoher Temperatur (Temperaturstrahler), aufgrund Gasentladung und aufgrund elektronischer Vorgänge (Rekombination in Halbleitern) in festen Körpern (Elektrolumineszenz) geschehen. [2] Bei Gasentladung wird zwischen Niederdruckentladung und Hochdruckentladung unterschieden. Eine Übersicht zeigt nachfolgende Abbildung 3.

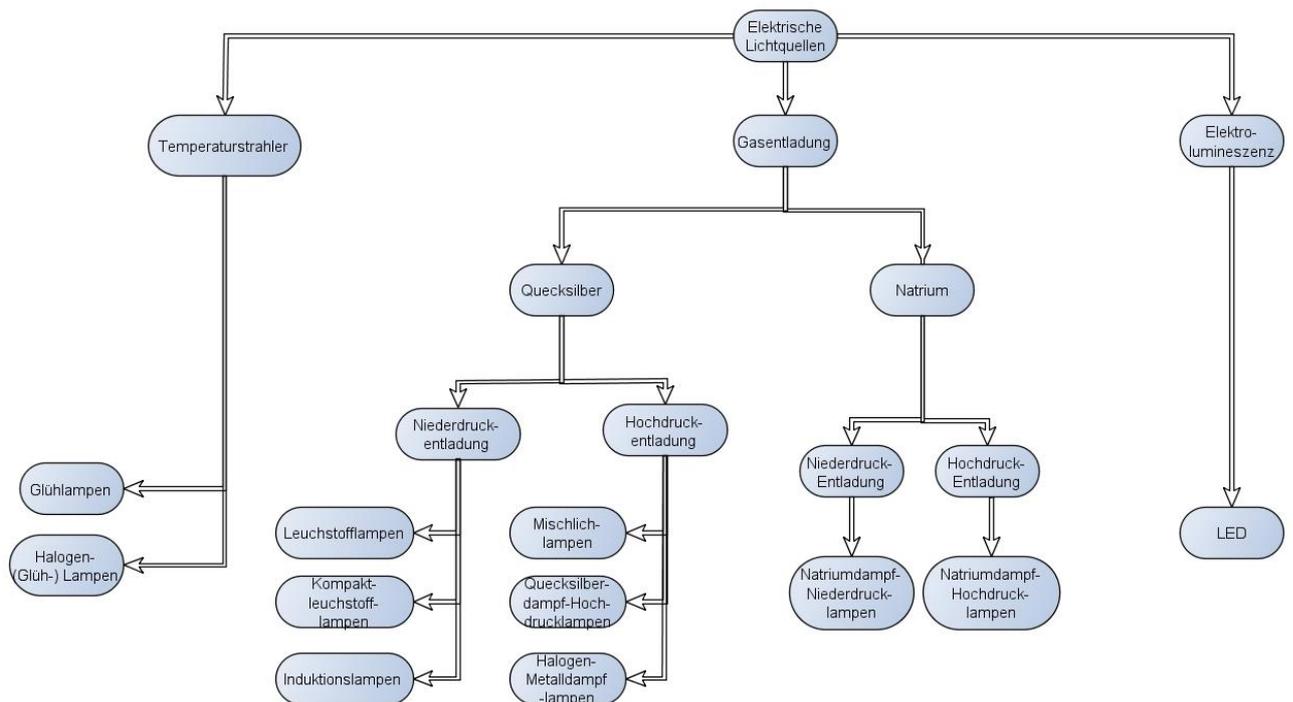


Abbildung 3: Übersicht Lampenarten (nach [2], eigene Darstellung)

In diesem Kapitel wird näher auf die gängigen Leuchtmittel in der Straßenbeleuchtung (Natriumdampflampen, Quecksilberdampflampen, Halogenmetaldampflampen und LEDs) eingegangen. Induktionslampen befinden sich im Anhang D.

## 2.2.1 Gasentladungslampen

### 2.2.1.1 Quecksilberdampflampen

Die üblicherweise in der Straßen- und Verkehrsbeleuchtung verwendeten Quecksilberdampflampen (HME) sind Hochdruckentladungslampen. In ihrer Funktionsweise unterscheiden sie sich deutlich von herkömmlichen Glühlampen. Das Licht wird durch eine Gasentladung erzeugt, die in einem Brenngefäß zwischen zwei Elektroden nach der Zündung entsteht. Die elektrische Leitfähigkeit wird durch die Ionisation bestimmter Füllbestandteile hergestellt. Durch den Stromfluss wird bei der Entladung das Füllgas (in diesem Fall Quecksilber) angeregt und gibt diese Anregungsenergie in Form einer Strahlung wieder ab. [18] Bei Quecksilberdampflampen ist das Brenngefäß gefüllt mit Quecksilber bei einem Druck von zwei bis zehn bar, wodurch der Blauanteil des emittierten Lichtes hoch ist. Die Lampen haben den Vorteil, dass sie ohne zusätzliches Zündgerät zu starten und zu betreiben sind, da die Zündung über Hilfselektroden im Lampenkörper erfolgt. Daher ist der Schaltungsaufbau einfach, bestehend aus einem Vorschaltgerät und dem eigentlichen Leuchtmittel. Abbildungen 4 und 5 zeigen den Aufbau des Leuchtmittels und die Schaltung sowie Tabelle 2 die wichtigsten Daten.

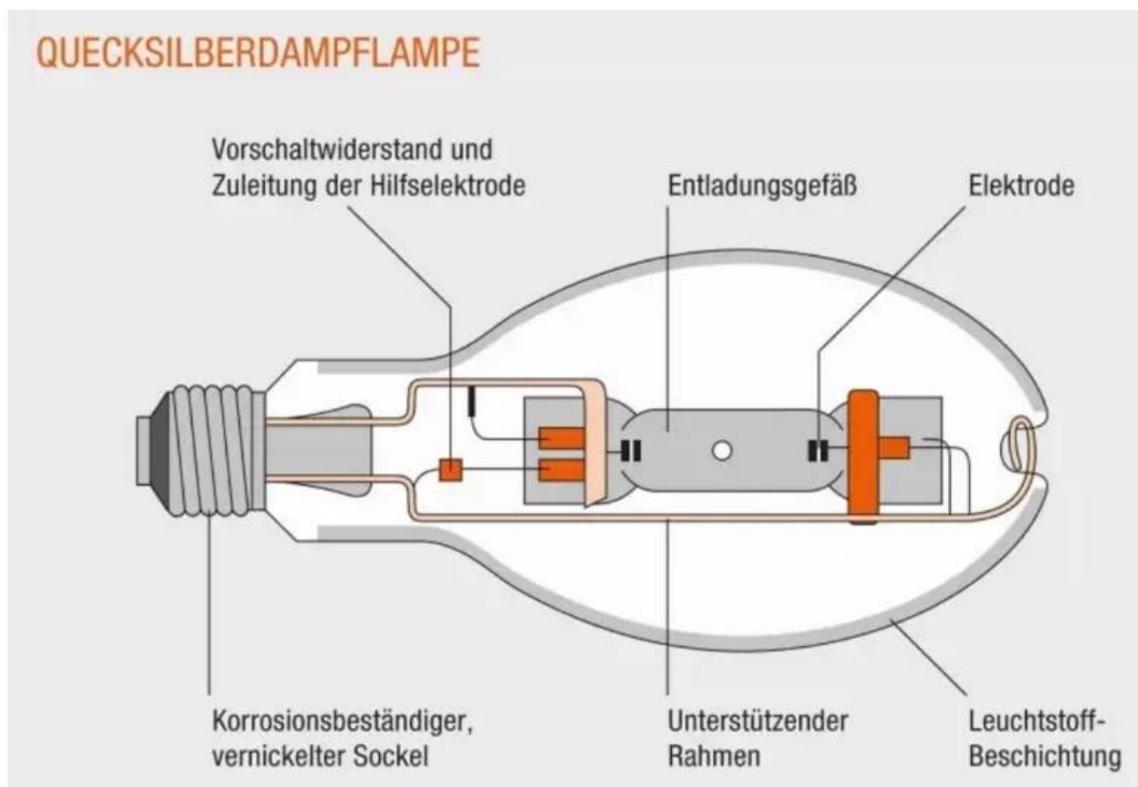


Abbildung 4: Quecksilberdampflampe [18]

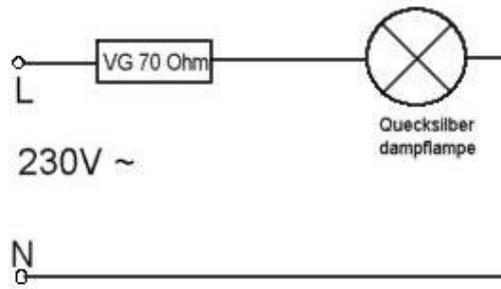


Abbildung 5: Schaltung HME mit VVG [19]

Tabelle 2: Übersicht Quecksilberdampflampe

|                      |                        |
|----------------------|------------------------|
| Elektrische Leistung | 50 – 1000 W            |
| Lichtstrom           | 1800 – 58000 lm        |
| Lichtausbeute        | 36 – 58 lm/W           |
| Lichtfarbe           | Warmweiß, neutralweiß  |
| Farbwiedergabeindex  | 40 – 69 R <sub>a</sub> |
| Sockel               | E27, E40               |
| Startzeit            | ca. 5 min              |

Nach Anlegen der Netzspannung liegt diese in voller Höhe zwischen den beiden Elektroden an. Sie ist ausreichend, um das Gas zu ionisieren und die Gasentladung ohne Vorheizen zu beginnen. Die Entladung wird im weiteren Verlauf des Betriebes durch das Vorschaltgerät begrenzt. Nach wenigen Minuten wird der volle Lichtstrom erreicht. Eine Wiederzündung ist erst nach dem kompletten Abkühlen der Leuchtmittel möglich. [19]

Quecksilberdampflampen wurden vor allem wegen ihrer geringen Investitionskosten häufig in der Straßenbeleuchtung verwendet. Sie haben jedoch einen signifikant schlechteren Wirkungsgrad, d.h. sie benötigen mehr Energie als vergleichbare Leuchtmittel, um eine bestimmte Lichtmenge zu erzeugen. [18] Somit ist ihre Verbreitung in Neuanlagen vor allem zugunsten von Natriumdampflampen auf nahezu null gesunken. In vielen Altanlagen sind sie jedoch immer noch weit verbreitet.

### 2.2.1.2 Halogenmetaldampflampen

Diese Lampenart, welche auch Keramikbrennerlampe genannt wird, ist eine Weiterentwicklung der Quecksilberdampflampe. Sie ist eine Hochdruck-Gasentladungslampe, die jedoch mit einem geringeren Anteil von Quecksilberdampf betrieben wird. Durch Zusätze von Halogenverbindungen verschiedener Metalle sowie Edelgase, wie Xenon oder Neon, haben sich Leistungsmerkmale, wie Lichtausbeute und Farbwiedergabeeigenschaften, verbessert. [17] Sie wurde 1964 von Gilbert Reiling im amerikanischen Großkonzern General Electric entwickelt, wobei andere Hersteller wie Philips oder OSRAM schnell nachzogen. Bis heute existieren viele verschiedene Bauformen und Sockel. Dabei finden in der Straßenbeleuchtung größtenteils die Schraubsockel E27 und E40 Anwendung. Das Kernstück des Leuchtmittels ist das Entladungsgefäß, welches aus Keramik oder Quarz besteht. Zudem befinden sich in diesem Gefäß, wie bei allen Entladungslampen, zwei gegenüberliegende Elektroden, über die der elektrische Strom geführt wird. Abbildung 6 zeigt den Aufbau des Leuchtmittels. Mittels eines externen oder internen Zündgerätes wird die Lampe gezündet. Die Tabelle 3 zeigt die wichtigsten technischen Daten, dessen Schaltung mit dem vorgeschalteten EVG zeigt Abbildung 7. In der Grafik 6 ist die Halogenmetaldampflampe schematisch dargestellt.

*Tabelle 3: Übersicht Halogen-Metaldampflampe*

|                      |                        |
|----------------------|------------------------|
| Elektrische Leistung | 70 – 1000 W            |
| Lichtstrom           | 5000 – 80000 lm        |
| Lichtausbeute        | 68 - 80 lm/W           |
| Lichtfarbe           | warmweiß, neutralweiß  |
| Farbwiedergabeindex  | 80 - 90 R <sub>a</sub> |
| Sockel               | E27, E40               |
| Startzeit            | 3 min                  |

## PRINZIP EINER HOCHDRUCK-ENTLADUNGSLAMPE

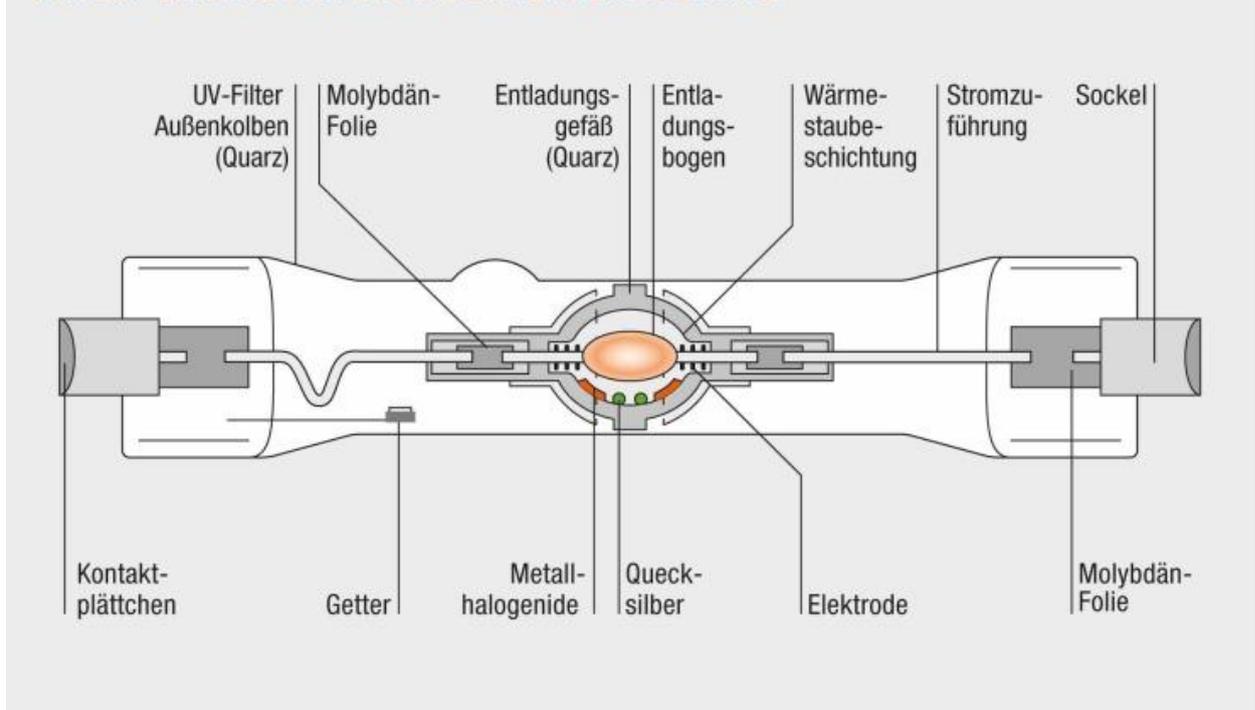


Abbildung 6: Halogen-Metaldampflampe [20]

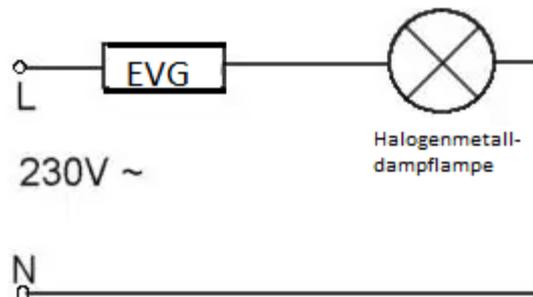


Abbildung 7: Schaltung (Eigene Darstellung)

Nach dem Zündvorgang müssen sich zunächst die Zusätze (darunter Metallhalogene und seltene Erden) erwärmen, damit die festen Bestandteile verdampfen können. Daher erreicht dieser Lampentyp erst nach einigen Minuten die volle Lichtleistung. Da in dem Entladungsrohr sehr große Drücke herrschen, ist der Zylinder meist in einem Schutzkolben eingebettet, um beim Bersten das Umherfliegen von Glasscherben und anderen Bauteilen zu verhindern. Weiterhin soll durch diese Sicherheitsmaßnahme die austretende Menge an giftigen Substanzen, wie z.B. Quecksilber, Thorium oder Krypton auf ein Minimum reduziert werden. [17]

Eine Wiedereinschaltung, beispielsweise nach einer Netzunterbrechung, ist ohne geeignete vorgeschaltete Betriebsmittel erst nach einer kompletten Abkühlung der Leuchtmittel

möglich. Eine sogenannte Heißwiedereinschaltung ist ausschließlich mit einem geeigneten EVG sowie einem hochwertigem externen Zündgerät durchführbar. Dennoch ist davon abzuraten, da diese Lampenart nicht für kurze Brenndauern ausgelegt ist und diese Maßnahme die Lebensdauer aller betroffenen Betriebsmittel stark verkürzt. [17] Halogenmetallampflampen (HIT) rangieren in einer höheren Energieeffizienzklasse als ihr Vorgängermodell, die Quecksilberampflampen. Bis zu 38 Prozent des zugeführten elektrischen Stroms werden von der Lampe in Licht umgewandelt, die Lichtausbeute liegt bei ca. 75 Lumen je Watt. Dies entspricht etwa dem 6-fachen Wert einer herkömmlichen Glühlampe und hat gegenüber dieser eine Energieersparnis von 65 Prozent. Im Verhältnis zur Quecksilberampflampe liegt die Einsparung bei ca. 50 Prozent, wodurch die Mehrkosten bei der Anschaffung durch den geringeren Verbrauch über einen kurzen Zeitraum wieder ausgeglichen werden können. Als energiesparendes Leuchtmittel könnten die Halogenmetallampflampen neben LEDs und Natriumampflampen in Zukunft eine wichtige Rolle spielen, da diese derzeit die energieeffizientesten Leuchtmittel auf dem Markt sind. Mit EVG, langen Brennzeiten und einer dementsprechend geringen Zahl an Startvorgängen erreichen Halogenmetallampflampen eine Lebensdauer von bis zu 20.000 Betriebsstunden, was sie für den Einsatz in der Straßenbeleuchtung qualifiziert. [16]

### **2.2.1.3 Natriumampflampen**

Die Natriumampflampe gehört ebenfalls zur Kategorie der Metallampflampen und beruht, wie bei den bereits vorgestellten Lampenarten, auf dem Prinzip der Gasentladung. Bei dieser Lampenart besteht das Füllgas aus Natrium, das einen Großteil der Eigenschaften dieses Leuchtmittels bestimmt. Je nach Betriebsdruck unterscheidet man hier in Niederdruck- und Hochdrucklampen, welche vor allem in ihrer baulichen Form, aber auch in ihren physikalischen Eigenschaften Abweichungen besitzen.

Die Natriumampf-Hochdrucklampe, auch High Pressure Sodium Elliptical Lamp (HSE) genannt, ist charakterisiert durch ihr gelbes bis warmweißes, chromatisches Licht. Sie wird seit 1969 auf dem Markt angeboten und hat sich durch die weltweite Energiekrise in den 70er Jahren des 20. Jahrhunderts schnell ihren Platz in der Straßenbeleuchtung erobert, da sie vor allem gegenüber der Quecksilberampf-Hochdrucktechnik erhebliche Energieersparpotentiale aufweisen konnte. [22] Das Leuchtmittel besteht aus einem keramischen Brenngefäß, welches zusätzlich zum bereits genannten Natrium auch Bestandteile von Quecksilber und bestimmten Edelgasen bei einem gesamten Überdruck von etwa 10 bar

aufweist. [21] Durch die Beigabe von Xenon wird eine deutliche Verbesserung des Farbwiedergabeindex erzielt. Dies wirkt sich allerdings auf die Zündspannung aus, da nun sehr hohe Spannungen benötigt werden, um ein befriedigendes Startverhalten der Leuchtmittel zu erreichen. Grundsätzlich gilt: je höher der Anteil der Edelgase im Brennkörper, desto höher wird die benötigte Spannung, um einen korrekten Zündvorgang erfolgen zu lassen. Somit können diese Leuchtmittel nicht mit Netzspannung gezündet werden und benötigen ein Zündgerät, welches diese Aufgabe übernimmt. Man unterscheidet zwei Arten der Zündung. [22]

Auf der einen Seite wird das Impulszündgerät in den näheren Fokus dieser Untersuchung rücken, welches direkt mit dem Vorschaltgerät (VG) zusammenarbeitet. Daher wird eine spezielle Wicklungsanzapfung am VG zur Verbindung mit dem Zündgerät benötigt. So wird bei dieser Schaltung eine elektronische Entladung eines Kondensators in der Primärwicklung des Vorschaltgerätes durchgeführt. Dieses wirkt dementsprechend wiederum wie ein Transformator und hebt die Spannung auf den erforderlichen Wert an. Hierbei ist aber darauf zu achten, dass die Parameter zwischen Vorschaltgerät und Zündgerät genau abgestimmt werden müssen, um die erwartete Leistung zu gewährleisten. Während durch das Zündgerät nur ein kleiner Strom fließt und es demzufolge nur zu einer geringen Eigenwärmung kommt, ist das Vorschaltgerät im Gegensatz dazu mit der Zündhochspannung belastet und muss daher isoliert sein. Diese Art der Zündung stellt eine sehr hohe Zündenergie zur Verfügung, wodurch ein großer Abstand zwischen Vorschaltgerät und Lampe möglich ist. Heutige Vorschaltgeräte zur Nutzung von Impulszündgeräten sind vor allem auch mit digitalen Zündzeitbegrenzern ausgestattet, wodurch das zyklische Ein- und Ausschalten der Lampen bei ihrem Lebensdauerende vermieden wird. Dies ist besonders von Vorteil, da die Verdrahtung sowie weitere Komponenten vor einer zyklischen anliegenden Höchstspannung geschützt werden. Ein weiterer Vorzug besteht darin, dass diese Kombination von Vorschalt- und Zündgerät eine kostengünstige Variante zum Starten von Natriumdampf-Hochdrucklampen ist. [22]

Auf der anderen Seite besitzt das vom Vorschaltgerät unabhängige Überlagerungszündgerät einen eigenen eingebauten Hochspannungstransformator, bei dem die Zündspannung direkt an die Lampe angelegt wird. Der Vorteil dieser Zündungsvariante liegt darin, dass keine zusätzliche Anzapfung am Vorschaltgerät notwendig ist. Nachteilig wirkt sich jedoch aus, dass die Kosten für ein solches Gerät höher liegen als beim vergleichbaren Impulszündgerät. Auf Grund der geringeren Zündenergie soll die Leitungslänge zwischen

dem Zündgerät und der Lampe nicht mehr als zwei Meter betragen, da andernfalls die Höhe der Spannung nicht ausreicht, um das Leuchtmittel korrekt zu zünden. Zudem ist das Gerät vom vollen Lampenstrom durchflossen und muss dementsprechend für höhere Temperaturen sowie größere Spannungen ausgelegt sein. Die folgenden Abbildungen 8 und 9 zeigen den Aufbau und die technischen Parameter einer Natriumdampf-Hochdrucklampe sowie Schaltungen zum Betrieb dieses Leuchtmittels unter Nutzung von Impuls- und Übergangszündgeräten. [24]

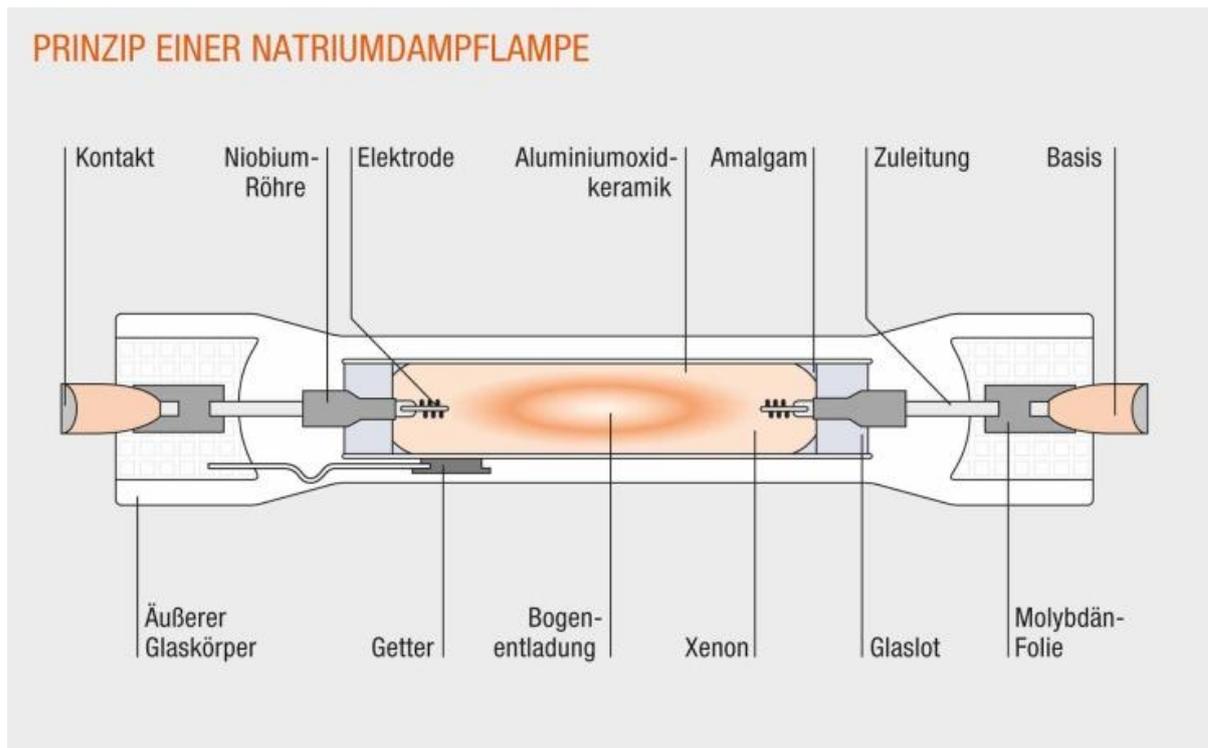


Abbildung 8: Natriumdampf- Hochdrucklampe [18]

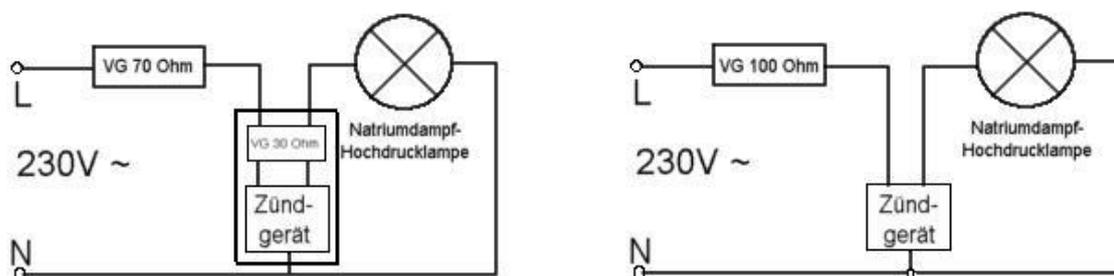


Abbildung 9: Zündgeräte (links: Überlagerungszündgerät, rechts Impulszündgerät) [24]

Diese Zündvorgänge werden ebenfalls beim Einsatz von Halogenmetalllampen verwendet, sofern diese nicht mit einem in das Leuchtmittel integrierten Zündgerät oder ei-

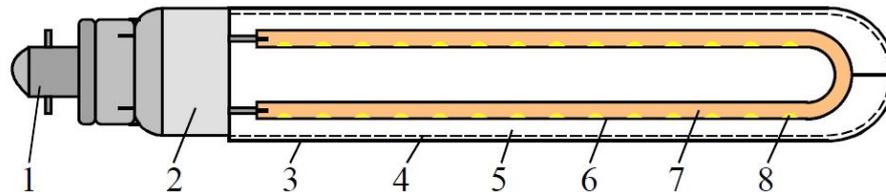
nem EVG betrieben werden. Auf die unterschiedlichen Leistungsparameter der einzelnen Lampenarten wird herstellerseitig Rücksicht genommen. Zudem existieren Natriumdampf-Hochdrucklampen, die mit einem integrierten Zündgerät ausgestattet sind. Diese werden im allgemeinen Sprachgebrauch Retrofit- oder Natriumdampfaustauschlampen genannt. Verschiedene Hersteller wollten eine Alternative zu Quecksilberdampflampen anbieten, so dass diese einfach gegen HSE-Lampen mit integrierten Zündgerät getauscht werden können. Der Wechsel des Vorschaltgerätes würde entfallen, da die Stromaufnahme dieses Lampentyps auf die der HME-Vorschaltgeräte angepasst ist. Tabelle 4 zeigt die allgemeinen Daten der Natriumdampf-Hochdrucklampe.

*Tabelle 4: Übersicht Natriumdampf-Hochdrucklampe*

|                      |                        |
|----------------------|------------------------|
| Elektrische Leistung | 35 - 600 W             |
| Lichtstrom           | 4000 – 90000 lm        |
| Lichtausbeute        | 80 - 130 lm/W          |
| Lichtfarbe           | warmweiß               |
| Farbwiedergabeindex  | 60 - 69 R <sub>a</sub> |
| Sockel               | E27, E40               |
| Startzeit            | 8 min                  |

Die Natrium-Niederdrucklampe (LST) unterscheidet sich maßgeblich vom Hochdruckmodell. Die Gasentladung erfolgt hier bei einem Druck von 0,001 bis 0,01 Millibar in einem deutlich längeren Brennkörper. Sie wurde in den 30er Jahren des letzten Jahrhunderts parallel zur Leuchtstofflampe, einer Quecksilberdampf-Niederdrucklampe, entwickelt. Sie findet heute vornehmlich Anwendung in der Straßenbeleuchtung in den Benelux-Staaten. Der Leuchtkörper besteht aus einem U-förmigen Brenner aus natriumfestem Spezialglas, in dem sich das zur Lichterzeugung notwendige Natrium sowie einige weitere Edelgase, vornehmlich Neon, befinden. Da die Betriebstemperatur des Leuchtmittels bei 300 °C liegt, ist eine geeignete Wärmeisolation notwendig. Daher ist der Außenkolben hoch evakuiert und besitzt auf der Innenseite eine wärmerreflektierende Schicht. Diese Lampenart benötigt ein geeignetes Vorschalt- und Zündgerät, mittels dessen die Netzspannung auf 700 bis 1000 Volt transformiert wird und die Zündung erfolgt. [24] Die zum Starten dieser Lampen

benötigte Spannung ist somit geringer als bei Hochdruckentladungslampen. Nach dem Startvorgang erzeugt eine Hilfsentladung mit Neon eine rötliche Farbe. Erst nach einer Einbrennzeit von circa 15 Minuten ist das Natrium komplett verdampft und die Lampe erreicht ihre lichttechnischen Nennwerte in einem stabilen Arbeitspunkt. [24] Abbildung 10 zeigt den allgemeinen Aufbau einer Natriumdampf-Niederdrucklampe.



- 1 - Sockel BY 22 ;      2 - Getter ;      3 - Außenkolben ;      4 - Infrarotreflektor ;  
 5 - Vakuum ;      6 - Entladungsgefäß ;      7 - Gasfüllung (Neon) ;      8 - Natrium

Abbildung 10: Natriumdampf-Niederdrucklampe nach [24]

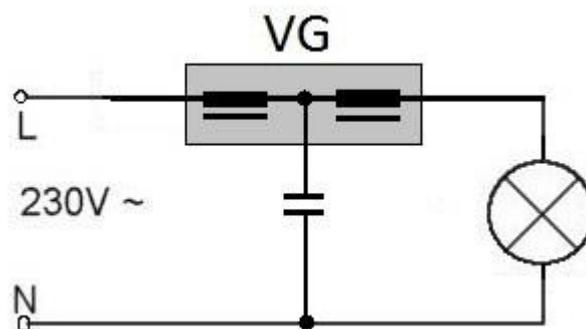


Abbildung 11: Schaltung (eigene Darstellung)

Bemerkenswert ist der hohe Wirkungsgrad, da die Variante mit bis zu 200 Lumen je Watt die höchste Lichtausbeute aller künstlichen Lichtquellen aufweist. Dem gegenüber steht jedoch das emittierte stark monochromatische Licht, welches zwar Dunst und Nebel gut durchdringt, aber Farbsehen unmöglich macht. Vorteilhaft wirkt sich die Lichtfarbe jedoch dahingehend aus, dass Insekten auf Grund des geringen Blauanteils des Lichtes, nur in geringem Maße angezogen werden. Das warmweiße bis gelbe Licht der Natriumdampf-Niederdrucklampen wird von ihnen kaum wahrgenommen. Wegen der relativ geringen Betriebstemperatur des äußeren Kolbens verbrennen auch weniger Insekten, wenn sie in das Leuchteninnere gelangen, wodurch sich Reinigungs- und Wartungsintervalle verlängern. [24] Tabelle 5 zeigt die allgemeinen Daten der Natriumdampf-Niederdrucklampe.

*Tabelle 5: Übersicht Natriumdampf-Niederdrucklampe*

|                      |                        |
|----------------------|------------------------|
| Elektrische Leistung | 35 - 600 W             |
| Lichtstrom           | 1800 – 32500 lm        |
| Lichtausbeute        | 98 - 200 lm/W          |
| Lichtfarbe           | warmweiß               |
| Farbwiedergabeindex  | 20 - 40 R <sub>a</sub> |
| Sockel               | By22d                  |
| Startzeit            | 15 min                 |

## 2.2.2 Elektrolumineszenzstrahler

### 2.2.2.1 Leuchtdioden

Light Emitting Diodes (LEDs) sind seit Mitte der 60er Jahre des 20. Jahrhunderts kommerziell verfügbar. Die ersten Dioden leuchteten in der Farbe rot und waren wegen ihrer Einfarbigkeit und langen Lebensdauer gut geeignet, Kleinstglühlampen als Signallampen zu ersetzen. Die Lichtausbeute war mit 0,1 Lumen je Watt jedoch noch sehr schlecht. Es dauerte weitere 30 Jahre, bis es technisch möglich war, das emittierte Spektrum auf den blauen Bereich zu erweitern sowie den Wirkungsgrad der einzelnen Dioden erheblich zu verbessern. [23]

Leuchtdioden sind Halbleiterdioden und gehören zu den Elektrolumineszenzstrahlern, die nach dem Anlegen einer Durchlassspannung aus der Sperrschicht heraus Licht emittieren. Der Halbleiter einer Diode besteht dabei im Allgemeinen aus einer Verbindung der Elemente Gallium, Silicium, Arsen und Phosphor. Die Wirkungsweise einer LED ist trotz der langjährigen Probleme, ein geeignetes Lichtspektrum zu erzeugen, einfach. Auf ein N-leitendes Grundmaterial wird eine sehr dünne hochdotierte P-Zone aufgewachst. Die Diodenstrecke einer Leuchtdiode wird in Durchlassrichtung betrieben, wodurch sich bei anliegender Spannung die Elektronen von der N-Zone in die P-Zone bewegen. Hier kommt es zu häufigen Rekombinationen und es wird Energie in Form von Licht und Wärme freigesetzt. Abbildung 12 veranschaulicht diesen Prozess und soll zudem einen Überblick über

die wichtigsten technischen Daten dieser Lampenart geben. [24] Die Schaltung mit EVG zeigt Abbildung 13.

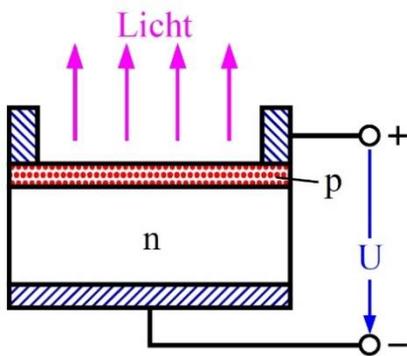


Abbildung 12: Prinzip LED [24]

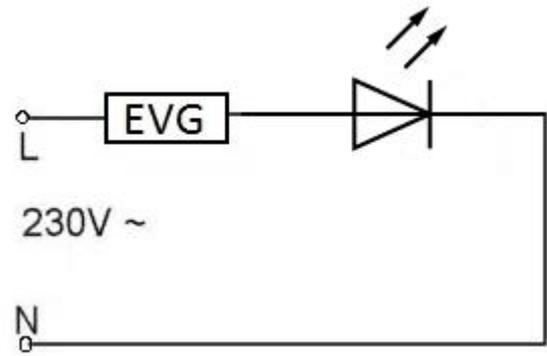


Abbildung 13: Schaltung (eigene Darstellung)

Das Problem, mit einer LED weißes Licht zu erzeugen, wurde gelöst, indem blaue LEDs mit speziellen Lumineszenzkapen ausgestattet werden, die das blaue Licht in weißes Licht umwandeln. Da die Sensibilität des menschlichen Auges größtenteils auf den Gelb-Grünbereich ausgerichtet ist, nimmt dadurch der Lichtstrom auf das Zweieinhalbfache zu. [24] Tabelle 6 zeigt die allgemeinen Daten zur LED.

Tabelle 6: Übersicht LED

|                      |                       |
|----------------------|-----------------------|
| Elektrische Leistung | 0,1 W - offen W       |
| Lichtstrom           | 1 lm - offen          |
| Lichtausbeute        | 20 - 120 lm/W         |
| Lichtfarbe           | warmweiß, neutralweiß |
| Farbwiedergabeindex  | >80 R <sub>a</sub>    |
| Sockel               | Spezial, E27, E40     |
| Startzeit            | sofort                |

Seit der Entwicklung von Leuchtdioden mit einer höheren Lichtstärke erobern diese in einem rasanten Tempo viele Anwendungsgebiete der Beleuchtungstechnik. So haben sie auch ihren Einzug in die Straßenbeleuchtung gefunden. Allgemein zu konstatieren ist,

dass sie robuster sind als konventionelle Leuchtmittel und dabei eine höhere Energieeffizienz und Lebensdauer aufweisen.

Allerdings ist die Lichtausbeute bisheriger Leuchten noch eher mäßig und zudem stark von verschiedenen Faktoren abhängig. So ist die Bestromung und Ansteuerung von LEDs ein sehr wichtiger Parameter, da sie sehr anfällig für Stromschwankungen sind. Die Lichtstärke lässt sich problemlos mit einer Anpassung des Stromes verändern, jedoch müssen sich Strom und Spannung immer auf ihrer gemeinsamen Kennlinie befinden, um das Leuchtmittel nicht zu beschädigen, also keine Phasenverschiebung vorhanden sein. Weiterhin spielen Umgebungstemperatur und Wärmemanagement eine entscheidende Rolle, um einen Alterungs- und Schädigungsprozess zu vermeiden. [23] Temperaturen haben dementsprechend einen großen Einfluss auf die Lebensdauer, die Lichtausbeute sowie den Betrieb einer LED. So kommt es durch das Fehlen einer infraroten Strahlung im Lichtspektrum zu keiner nennenswerten Erwärmung der einzelnen Dioden. [23] Aber nur rund 30 Prozent der eingesetzten Energie wandeln LEDs in sichtbares Licht um. Die restlichen 70 Prozent ergeben sich aus Wärmeemission an der Leuchte. Auch wenn dieser Wärmeanteil an der Gesamtenergie deutlich geringer ist als bei vergleichbaren Entladungslampen, so stellen die Bauformen und -größen viel höhere Anforderungen an eine konstante Temperaturableitung. Eine Vereinfachung soll erklären, warum es durch eine erhöhte Wärmeentwicklung zu einer Schädigung der LED kommt.

Das zur Lichterzeugung verwendete Halbleitermaterial wird mit verschiedenen Stoffen dotiert. Diese eingebrachten Stoffe sind bei Zimmertemperatur fest im Halbleitermaterial gebunden. Steigt die Temperatur jedoch nun über ein zulässiges Maß hinaus, werden die Moleküle des eingebrachten Stoffes in Schwingungen versetzt. Werden diese Schwingungen durch überhöhte Temperaturen zu stark, werden diese Moleküle aus dem Verbund herausgeschleudert, da sie nicht mehr fest im Halbleitermaterial gebunden sind. Dies kann sich wiederum durch einen abnehmenden Lichtstrom, geringere Lebensdauer und eine Änderung der Lichtfarbe bemerkbar machen. Besonders an heißen Sommertagen mit ebenso warmen Nächten kann dies zu einem Problem in der Straßenbeleuchtung führen, da die über den Tag aufgeheizten Leuchten über die hohe Außentemperatur nur sehr langsam abkühlen und Schädigungen davon tragen können.

In Hinsicht auf die Ökodesign-Richtlinie und die bevorstehende Ausphasung von Quecksilberdampflampen bietet die LED-Technik mit sogenannten Retrofit-Modellen theoretisch eine interessante Alternative. In der Regel bedeutet eine Umrüstung einer existierenden

Beleuchtungsinstallation auf eine energieeffizientere Technologie einen hohen Aufwand an Planung und Kosten. Bei der Umrüstung auf LED-Retrofitlampen wird jedoch lediglich das bestehende Leuchtmittel ausgetauscht. So können konventionelle Quecksilberdampf lampen mit einer Anschlussleistung von 80 Watt durch ein entsprechendes LED Leuchtmittel mit einem E27 Schraubsockel und einer Leistung von 20 bis 30 Watt ersetzt werden, sofern das Vorschaltgerät überbrückt wird. Herstellerseitig sind für diese Retrofit-Leuchten Lebensdauern von 35000 bis 70000 Stunden angegeben, was jedoch angesichts der verbauten Technik und dem heutigen Stand der Technik aus Sicht des Autors doch ein sehr optimistischer Wert zu sein scheint. Durch die zusätzlich eingesetzte Elektronik zur Strom- und Spannungsregulierung sinkt die Lebenserwartung in Abhängigkeit der eingesetzten Bauteile und deren Belastung. Die bestehenden Leuchten sind nicht für den Betrieb von LED-Lampen optimiert, wodurch das notwendige Thermomanagement nicht gewährleistet wird. Nicht zu vernachlässigen ist zudem, dass die Berechnung der Lebensdauer nach Messungen unter Laborbedingungen erfolgt ist. Dennoch ist zu erwarten, dass diese Leuchtmittel eine durchschnittliche Lebensdauer von fünf bis sieben Jahren aufweisen werden. Auch wenn die Kosten für LED-Retrofitlampen hoch sind, so sollten in der Straßenbeleuchtung nicht die preiswertesten Leuchtmittel verbaut werden, da eine gute Verarbeitung und der Einsatz hochwertiger Materialien in direktem Zusammenhang mit der Lebensdauer stehen.

Als Weiterentwicklung kann die organische LED gesehen werden, die sogenannte OLED. Sie emittieren nach Anlegen einer Spannung rote, grüne und blaue Spektralanteile, was in der Summe Weiß ergibt. Zurzeit sind Lichtstrom und Leuchtdichte noch nicht ausreichend für praktische Beleuchtungsaufgaben.

### **2.3 Übersicht Lampenarten**

Tabelle 7 und Abbildung 14 auf der folgenden Seite stellen eine Übersicht der verschiedenen Lampenarten (die Induktionslampe befindet sich im Anhang D bis F), deren Effizienz (Lichtausbeute) und Lebensdauer dar. Die Lichtausbeute berechnet sich aus dem Quotient von Lichtstrom [lm] und der Leistungsaufnahme [W]. Der theoretisch maximal erreichbare Wert der Lichtausbeute beträgt 683 lm/W. Diese Lichtausbeute ist natürlich – wenn überhaupt – nur unter Laborbedingungen und nur mit einer bestimmten Wellenlänge erreichbar. Es muss monochromatisches grünes Licht sein mit einer Wellenlänge von

555 nm. Bei weißem Licht (also eine Mischung aus grünem, blauem und rotem Licht) liegt die maximal erreichbare Lichtausbeute bei 237 lm/W. [25]

Tabelle 7: Lichtausbeute und Lebensdauer

| Lampentyp                         | lm/W | h     |
|-----------------------------------|------|-------|
| Natriumdampf-Niederdrucklampen    | 180  | 9000  |
| Natriumdampf-Hochdruckdrucklampen | 130  | 18000 |
| T5-Leuchtstofflampen              | 104  | 20000 |
| Dreibanden-Leuchtstofflampen (T8) | 93   | 16000 |
| Halogen-Metaldampflampen          | 83   | 10000 |
| Induktionslampen                  | 80   | 60000 |
| Kompakt-Leuchtstofflampen         | 75   | 9000  |
| LEDs                              | 100  | 60000 |
| Quecksilberdampf-Hochdrucklampen  | 58   | 16000 |
| Halogenglühlampen                 | 30   | 2500  |
| Glühlampen                        | 20   | 1000  |

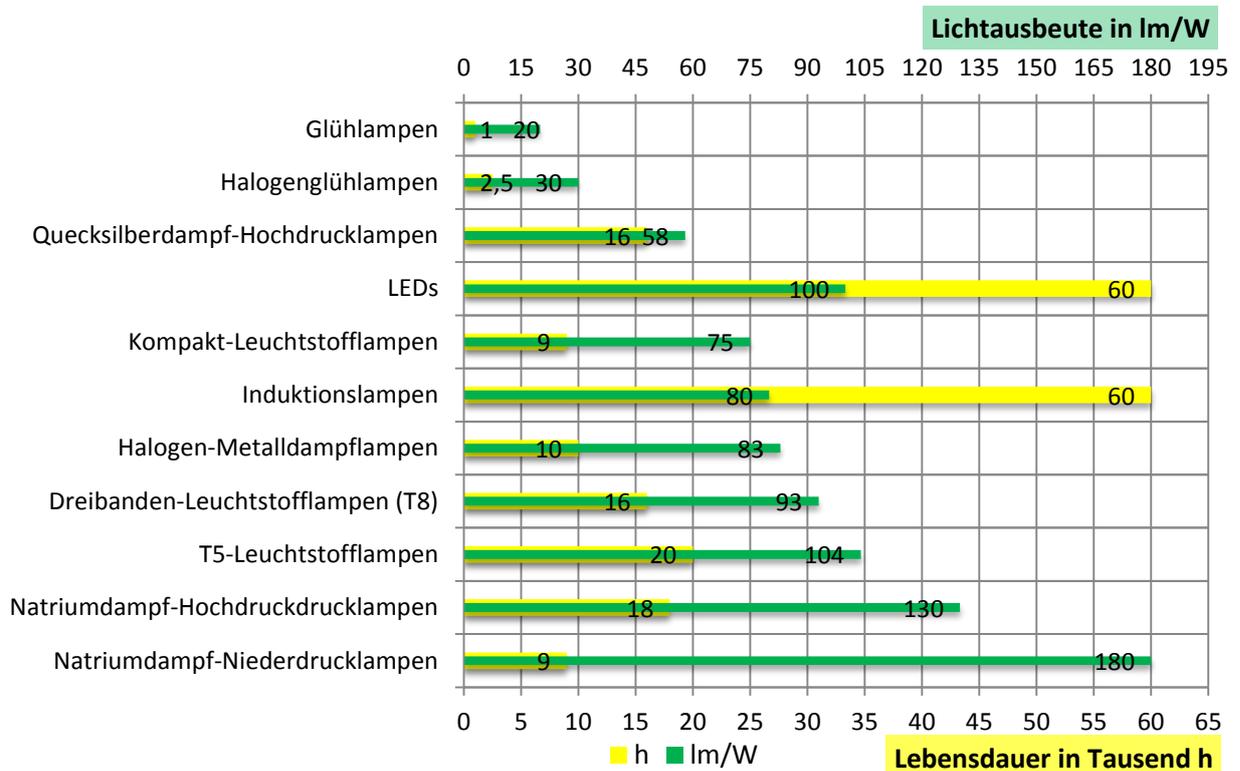


Abbildung 14: Darstellung Lampeneffizienz und Lebensdauer

Tabelle 8 fasst die Lampendaten zusammen und vergleicht sie miteinander.

*Tabelle 8: Übersicht Lampendaten*

|                      | HQM         | Halogen-Metaldampf | Na-Hochdruck | Na-Niederdruck | Induktion         | LED               |
|----------------------|-------------|--------------------|--------------|----------------|-------------------|-------------------|
| El. Leistung [W]     | 50 - 1000   | 70 - 1000          | 35 - 600     | 35 - 600       | 55 - 165          | 0,1 - offen       |
| Lichtstrom [lm]      | 1800 - 5800 | 5000 - 80000       | 4000 - 90000 | 1800 - 32500   | 3500 - 12000      | 1 - offen         |
| Lichtausbeute [lm/W] | 36 - 58     | 68 - 80            | 80 - 130     | 98 - 200       | 65 - 80           | 20 - 120          |
| Lichtfarbe           | WW, NW      | WW, NW             | WW           | WW             | WW, NW            | WW, NW            |
| Farbwiedergabeindex  | 40 - 69     | 80 - 90            | 60 - 69      | 20 - 40        | 80 - 90           | >80               |
| Sockel               | E27, E40    | E27, E40           | E27, E40     | By22d          | Spezial, E27, E40 | Spezial, E27, E40 |
| Startzeit [min]      | 5           | 3                  | 8            | 15             | 0                 | 0                 |

Dabei wird deutlich, dass die LED Technologie eine relativ hohe Lebenserwartung besitzt und somit Wartungs- und Austauschkosten reduziert werden können. Die Lichtfarbe ist bei LEDs auch steuerbar von warmweiß bis neutralweiß. Ein weiterer Vorteil von LED ist, dass sie sehr schnell ihren Lichtstrom erreicht haben (keine Hochbrenndauer) und somit eine sofortige Wiederezündung möglich ist. Auch die Insektenfreundlichkeit darf nicht vergessen werden. Die LED produziert auch wenig Streulicht. Im Anhang G befindet sich noch eine Übersicht mit Hinblick auf die geschichtliche Entwicklung der Straßenbeleuchtung.

## 2.4 Ausphasung

Der Begriff Ausphasen bedeutet, dass die betroffenen Produkte nicht mehr in Umlauf gebracht werden dürfen und deshalb vom Markt verschwinden. Nur vorhandene Restbestände dürfen noch verkauft werden und keine neuen ausgephasten Produkte mehr hergestellt werden. Ein Beispiel hierfür ist die Glühlampe, welche ausgephast wurde. Dies betraf den Verbraucher direkt. Das Glühlampenverbot trat 2009 in Kraft und wird sich bis 2016 fortsetzen. In der europäischen Ökodesign-Verordnung 2005/32/EG, die 2009 durch die Richtlinie 2009/125/EG ersetzt wurde, sind diverse Produkte aufgezählt, welche ausgephast werden sollen. Darunter fallen auch Lampen sowie Vorschaltgeräte, die für die Straßenbeleuchtung verwendet werden. Beispielsweise wurde im April 2015 die Quecksilberdampf-Hochdrucklampe für die Verwendung in der Straßenbeleuchtung verboten. Dies hat zur Folge, dass man sich über neue, effizientere Beleuchtungstechniken Gedanken machen muss. Eine mögliche Lösung kann die Umstellung der Beleuchtung auf neuartige

LED Technik sein. Dazu muss auch das Vorschaltgerät ausgetauscht werden. Die folgende Abbildung 15 zeigt den Zeitplan der Ausphasung in der Straßenbeleuchtung auf. [26]

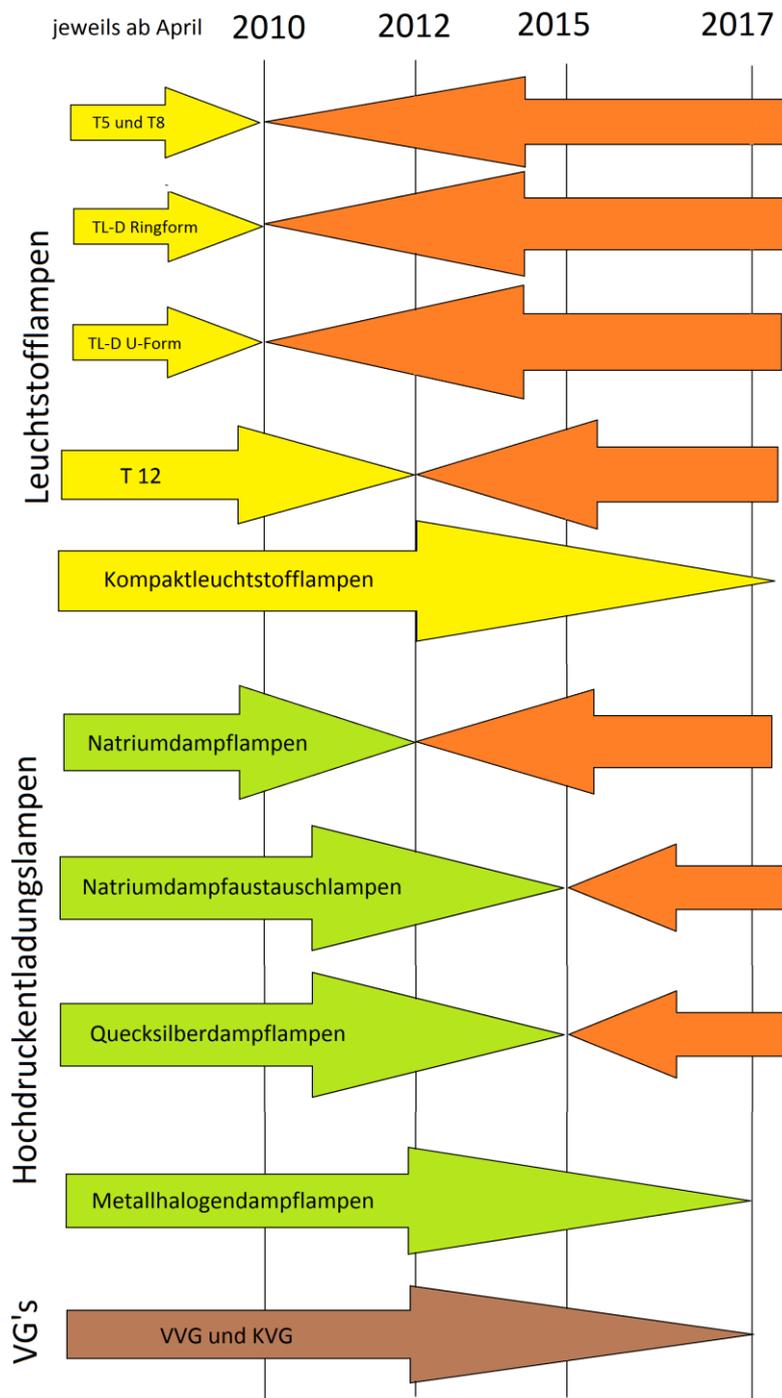


Abbildung 15: Ausphasungen eigene Darstellung, nach Quelle [26]

## 2.5 Referenzobjekte

Um Energiekosten zu sparen, haben mehrere Städte Ambitionen ihre Straßenbeleuchtung umzustellen. In dieser Arbeit wird die Umstellung in Glauchau betrachtet, aber auch beispielsweise Essen will seine Straßenbeleuchtung effizienter gestalten. Zwar schrecken die hohen Investitionskosten noch etwas ab, jedoch spart die Stadt Düsseldorf pro Straßenzug jährlich etwa 1800 Euro. So werden in einem Pilotprojekt in Essen mehrere Straßenzüge mit LEDs ausgestattet, um Erfahrungen mit der neuen Technik zu sammeln. Laut Energieagentur NRW sind die neuartigen Lampen auch um ein vielfaches länger haltbar als die konventionellen Entladungslampen. Es wird von über elf Jahren gesprochen. [27]

In Augsburg wird das Problem der Lichtverschmutzung sehr ernst genommen. Dort richtet man die Lampen so aus, dass sie nicht nach oben, sondern nur auf den Boden strahlen. Eine Dimmfunktion garantiert eine reduzierte Lichtmenge in verkehrsarmen Zeiten. Somit konnten bereits 20 Prozent der Stromkosten in Augsburg gespart werden. [28]

In dem Energiedorf Wildpoldsried im Allgäu wurden alle 250 Leuchtstellen im Zeitraum von 2012 bis 2014 auf LED umgerüstet. [29] Dabei wird von einer geringen Amortisationszeit von etwa zwei Jahren ausgegangen bei Austauschkosten von ca. 14.000 € für 200 Leuchten. Die vorhandenen Leuchten werden weiter verwendet (Pilz-, Laternen, und Hesseleuchten). Der Stromverbrauch wird um ca. 75% gesenkt und bietet eine Ersparnis von 8000 € Stromkosten und 20.000 kg CO<sub>2</sub> jährlich.

Auch kleine Gemeinden wie Oberderdingen mit 10.500 Einwohnern investieren nach umfassender Bestandsanalyse sowie Wirtschaftlichkeitsbetrachtung in neuartige LED Beleuchtung. Davor waren viele HQL-Lampen installiert. Die 1879 Leuchten wurden mit bedarfsgerechter Steuerung ausgestattet. [30] Wie viel Geld in Glauchau gespart werden kann wird im nächsten Abschnitt näher untersucht.

### 3 Wirtschaftlichkeitsbetrachtung

In diesem Punkt wird auf die Wirtschaftlichkeit und die Kosten der Straßenbeleuchtung eingegangen und die Umstellung auf LED Technik bei den Stadtwerken Glauchau (SWG) betrachtet. Abbildung 16 zeigt die Kostenstruktur bei der Straßenbeleuchtung auf. In Glauchau werden die Straßenbeleuchtungsanlagen durch die Stadtwerke Glauchau Dienstleistungsgesellschaft betreut. Die reine Wirtschaftlichkeit setzt lediglich den Erlös und die Kosten ins Verhältnis. Dabei kann das Ergebnis kostendeckend (gleich 1) sein, es kann kleiner 1 sein und damit nicht wirtschaftlich oder größer 1, damit ist eine Wirtschaftlichkeit gegeben. Allerdings zeigt es nicht auf, nach welcher Zeit sich die Investition rechnet, dafür ist die Methode der Amortisationsrechnung geeignet. Diese wird unter Punkt 3.3 verwendet.

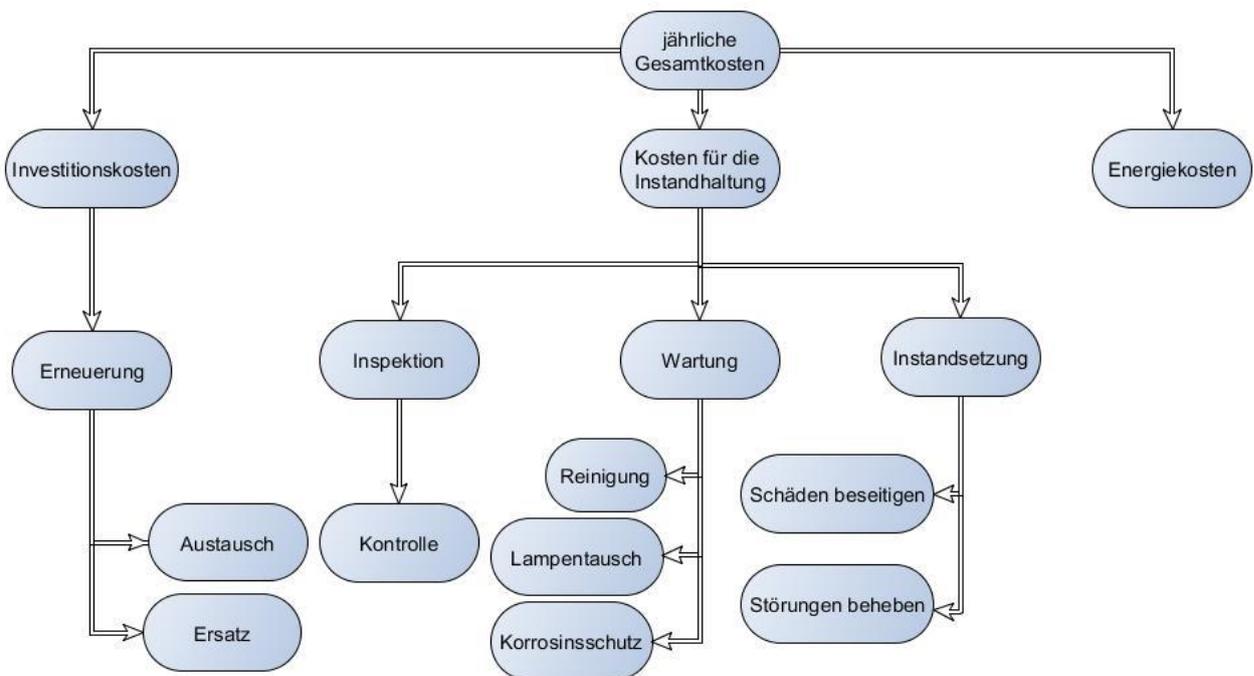


Abbildung 16: Kostenstruktur (nach [2], eigene Darstellung)

Die Kosten für Instandhaltung und Wartung betragen bei den Stadtwerken Glauchau ca. 47.000 € pro Jahr. Die Energiekosten werden unter 3.2 betrachtet.

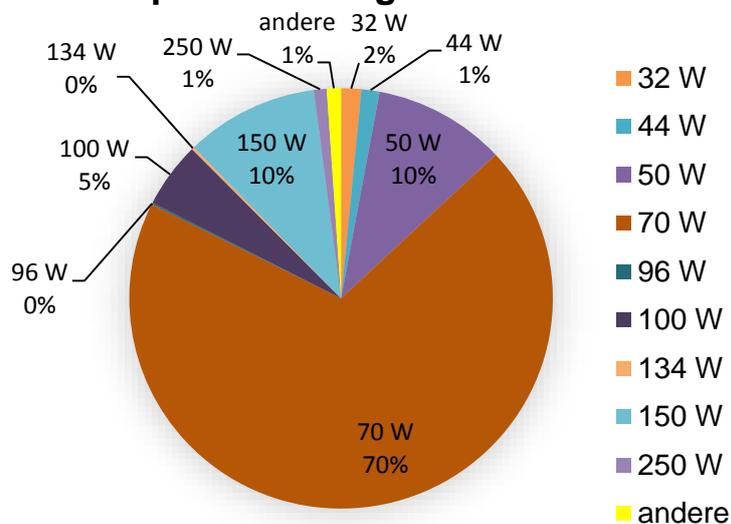
### 3.1 Aktueller Bestand der Stadtwerke Glauchau

Aus den Unterlagen der Stadtwerke Glauchau (SWG) über die Straßenbeleuchtung (SBL) geht hervor, dass die Stadt Glauchau 3090 Leuchtstellen betreibt. Davon sind 40 Leuchtstellen außer Betrieb. Der größte Teil davon sind Natriumdampf-Hochdrucklampen in verschiedenen Wattagen. Tabelle 9 und Grafik 17 zeigen die Verteilung der Lampen.

*Tabelle 9: Lampenverteilung in Glauchau*

| Lampenleistung [W] | Anzahl | Anteil in % | Technologie   |
|--------------------|--------|-------------|---------------|
| 32                 | 47     | 1,5         | LED           |
| 44                 | 42     | 1,4         | LED           |
| 50                 | 308    | 10,1        | LED / Na      |
| 70                 | 2116   | 69,4        | Natrium       |
| 96                 | 4      | 0,1         | Natrium       |
| 100                | 154    | 5,0         | Natrium       |
| 134                | 6      | 0,2         | Natrium       |
| 150                | 310    | 10,2        | Natrium       |
| 250                | 30     | 1,0         | Natrium       |
| andere             | 33     | 1,1         | Natrium / LED |

**Lampenverteilung in Glauchau**



*Abbildung 17: Lampenverteilung in Glauchau*

Im Anhang G befindet sich eine detaillierte Tabelle mit Wattagen und der verwendeten Leuchtstellen. Wie gut zu erkennen ist, dominieren die 70 W Natriumdampf-Hochdrucklampen. Somit ergibt sich eine durchschnittliche installierte Leistung von 71 W.

Nur ein kleiner Teil von den insgesamt 3090 (bzw. 3050 in Betrieb) Leuchtstellen entfallen auf LEDs, zum jetzigen Zeitpunkt etwa 150 Leuchtstellen, dies entspricht ca. 5 Prozent.

### 3.2 Energiekosten für ausgewählte Beispiele in der Stadt Glauchau

Die Energiekosten werden für drei verschiedene Szenarien berechnet. Im ersten Szenario wird die Realität abgebildet. Bei dem nächsten Szenario wird mit 50 % LED Lampen gerechnet. Im dritten Szenario wird von einer vollständigen LED Beleuchtung ausgegangen.

Aus den zur Verfügung gestellten Daten bezüglich der Straßenbeleuchtung in Glauchau geht hervor, dass im Jahr 2015 962.537 kWh für die Beleuchtung der Straßen aufgebracht wurde. Aus der Arbeit und der Leistung lässt sich die Brenndauer der SBL errechnen. Zur Berechnung der Leistung werden die tatsächlichen Wattagen herangezogen und mit deren Anzahl multipliziert und anschließend aufaddiert. Eine Tabelle mit den Lampenleistungen und deren Anzahl befindet sich im Anhang G. Die so ermittelte Leistung beträgt 238.974 W für die gesamte Straßenbeleuchtung der Stadt Glauchau. Die errechnete Lampenbrenndauer  $d$  für Glauchau beträgt nach Gleichung (1) 4028,6 Stunden in 2015.

$$d = \frac{\text{Arbeit}}{\text{Leistung}} = \frac{W}{P} = \frac{962.537 \text{ kWh}}{238.974 \text{ W}} = 4028,6 \text{ h} \quad (1)$$

Der Einkaufspreis der SWG für Strom beträgt  $0,172 \frac{\text{€}}{\text{kWh}}$ . Mit den gegebenen Daten errechnen sich die jährlichen Stromkosten zu:

$$\text{Energiekosten} = W \cdot \text{Strompreis} = 962.537 \text{ kWh} \cdot 0,172 \frac{\text{€}}{\text{kWh}} = 165.556 \text{ €} \quad (2)$$

Das nächste Szenario betrachtet den Austausch der bestehenden Lampen durch LED Lampen. Dabei wird angenommen, dass der Austausch bei 50 Prozent der Leuchtstellen stattfinden wird. Da im Moment LEDs mit 32 W und 44 W verbaut sind, wird in dem Szenario davon ausgegangen, dass eben diese Wattagen zu gleichen Teilen in Glauchau verbaut sind. Somit sind 25 Prozent mit 33 W LED Lampen bestückt und weitere 25 Prozent mit 44 W LED Lampen. Eine Tabelle dazu befindet sich im Anhang H. Bei dem Austausch wird weiterhin angenommen, dass die verschiedenen Wattagen zu gleichen Teilen durch energieeffiziente LEDs ersetzt wurden. Da bereits rund 150 LEDs verbaut sind, wurden 1375 neue LEDs fiktiv hinzugefügt. In Prozent ausgedrückt wurden 45 Prozent hinzugefügt, da 5 Prozent bereits verbaut waren.

Während die Gesamtleistung aktuell rund 239 kW betrug, beträgt sie nach einem 45 % Ersatz durch LED etwa 180 kW. Das entspricht einer Senkung der Leistung um 25 Prozent. Wie sich der Austausch auf die Stromkosten auswirkt, zeigt die nächste Rechnung.

$$\text{Energiekosten} = W \cdot \text{Strompreis} = 180 \text{ kW} \cdot 4028,6 \text{ h} \cdot 0,172 \frac{\text{€}}{\text{kWh}} = 124.725 \text{ €} \quad (3)$$

Die Stromkosten sind analog zur Leistung auch um 25 Prozent gesunken als Folge des Austauschs.

Bei dem letzten Szenario wird davon ausgegangen, dass alle Leuchtstellen mit LEDs bestückt sind, siehe Tabelle 10.

*Tabelle 10: Szenario 100 % LEDs verbaut*

| Lampenleistung [W] | Anzahl | Anteil in % |
|--------------------|--------|-------------|
| 32                 | 1525   | 50,0        |
| 44                 | 1525   | 50,0        |

Die Lampenleistung beträgt in diesem Szenario 115,9 kW. Wie viele Kosten dabei eingespart werden können zeigt die nächste Rechnung.

$$\text{Energiekosten} = W \cdot \text{Strompreis} = 115,9 \text{ kW} \cdot 4050 \text{ h} \cdot 0,172 \frac{\text{€}}{\text{kWh}} = 80.736 \text{ €} \quad (4)$$

Im Vergleich zu den aktuellen Kosten ergeben sich somit 52 Prozent Ersparnis. Das entspricht 84.820 € pro Jahr, die eingespart werden können im Gegensatz zu den jetzigen Stromkosten.

Da heute auch der Faktor der CO<sub>2</sub>-Einsparung interessant ist, wird hier ein grober Vergleich zur Abschätzung der Größenordnung des Einsparungspotentials gerechnet.

$$\text{CO}_2 \text{ einsparung} = (\text{Arbeit aktuell} - \text{Arbeit LEDs}) \cdot \text{CO}_2 \text{ Emission} \quad (5)$$

Für die CO<sub>2</sub> Emission wird ein Braunkohlekraftwerk angenommen, welches 1153  $\frac{\text{g}}{\text{kWh}}$  CO<sub>2</sub> emittiert. [31]

$$\text{CO}_2 \text{ einsparung} = (962.537 \text{ kWh} - 469.395 \text{ kWh}) \cdot 1153 \frac{\text{g}}{\text{kWh}} = 568,6 \text{ t} \quad (6)$$

Somit lassen sich jährlich neben den 84.820 € auch noch 568,6 t CO<sub>2</sub> einsparen bei einer Umstellung auf komplett LED.

Im nächsten Punkt 3.3 wird betrachtet, nach welcher Zeit sich der Austausch rechnet.

### 3.3 Amortisation

Die Amortisationsrechnung zeigt den Zeitraum auf, in dem sich eine Investition rechnet. In diesem Fall werden Natriumdampflampen durch effizientere Leuchtmittel (LEDs) ausgetauscht. Jetzt soll betrachtet werden wie lange es dauert bis die Investitionskosten durch die niedrigeren Verbrauchskosten die Anschaffungskosten decken bzw. wann eine Kosteneinsparung eintritt.

Die folgende Berechnung ist kein Szenario, sondern orientiert sich an den Plänen der Stadtwerke Glauchau. Tabelle 11 zeigt, welche Straßen in Glauchau von einer Umbaumaßnahme betroffen sind, welche und wie viele Lampen derzeit installiert sind und durch welche Lampen sie ausgetauscht werden sollen. Im Anhang H und I befinden sich weitere Straßen, bei denen eine Umbaumaßnahme stattfindet. Insgesamt werden bei sechs Straßen Umstellungsmaßnahmen auf LED stattfinden.

*Tabelle 11: Daten für Austausch der Lampen*

| Straße  | August - Bebel - Straße | Thomas Mann Straße  |
|---|-------------------------|---------------------|
| Schaltstelle Nr.                                | 4                       | 6                   |
| Schaltstelle                                    | Hoffnung                | Franz-Mehring-Platz |
| Maste und Wattage aktuell installiert           | 14 x 100W               | 4 x 70W             |
| Leistung aktuell installiert [W]                | 1400                    | 280                 |
| Arbeit pro a in kWh                             | 5670                    | 1134                |
| Energiepreis für aktuell installiert pro a in € | 975,24                  | 195,05              |
| neu (LEDs)                                      | 14 x Luma 1 65 W        | 4 x Trilux 32 W     |
| Leistung [W] NEU                                | 910                     | 128                 |
| Arbeit pro a in kWh NEU                         | 3685,5                  | 518,4               |
| Energiepreis NEU in €                           | 633,91                  | 89,16               |
| Preis in € für eine Leuchte                     | 369                     | 640                 |
| Preis in € für Leuchten insgesamt               | 5166                    | 2560                |

Die folgende Tabelle 12 zeigt die Grundlage der Amortisation für die August-Bebel-Straße in Glauchau. Die Tabellen für die restlichen fünf Straßen befinden sich im Anhang J bis O. Es wurden jeweils die Energiekosten für ein Jahr summiert. Dabei wurde ein voraussichtlicher Austausch der Natriumdampflampen alle vier Jahre berücksichtigt. [2]

*Tabelle 12: Grundlage Amortisation (August-Bebel-Straße)*

| Jahr                        | Kosten Na-Dampf in € | Kosten LED in € |
|-----------------------------|----------------------|-----------------|
| Anfang (Investitionskosten) | 0                    | 5166            |
| 1. Jahr                     | 975,24               | 5799,91         |
| 2. Jahr                     | 1950,48              | 6433,82         |
| 3. Jahr                     | 2925,72              | 7067,73         |
| 4. Jahr                     | 5300,96              | 7701,64         |
| 5. Jahr                     | 6276,2               | 8335,55         |
| 6. Jahr                     | 7251,44              | 8969,46         |
| 7. Jahr                     | 8226,68              | 9603,37         |
| 8. Jahr                     | 10601,92             | 10237,28        |
| 9. Jahr                     | 11577,16             | 10871,19        |
| 10. Jahr                    | 12552,4              | 11505,1         |
| 11. Jahr                    | 13527,64             | 12139,01        |
| 12. Jahr                    | 15902,88             | 14172,92        |
| 13. Jahr                    | 16878,12             | 14806,83        |
| 14. Jahr                    | 17853,36             | 15440,74        |
| 15. Jahr                    | 18828,6              | 16074,65        |
| 16. Jahr                    | 21203,84             | 16708,56        |
| 17. Jahr                    | 22179,08             | 17342,47        |
| 18. Jahr                    | 23154,32             | 17976,38        |
| 19. Jahr                    | 24129,56             | 18610,29        |
| 20. Jahr                    | 25204,8              | 19244,2         |

Aus Abbildung 18 lässt sich erkennen, dass sich die neuen LEDs in der August-Bebel-Straße nach etwa 7,5 Jahren amortisiert haben. Betrachtet wurde ein Zeitraum von 20 Jahren. Der Anstieg der grünen Kennlinie ist geringer, da effizientere LED Technik eingesetzt wird und dadurch die Energiekosten sinken. Hingegen steigt die rote Kennlinie stärker an, weil der Energiebedarf höher ist. Die Änderungen im Anstieg einer Kurve stellen den Austausch dar, welcher bei Natriumdampflampen aufgrund der geringeren Lebensdauer öfter stattfindet als bei LEDs. Es wurde von einer Lampenlebensdauer bei Natriumdampflampen von 18.000 Stunden ausgegangen und von 50.000 Stunden bei LED. Wenn von 4050 Stunden Brenndauer pro Jahr ausgegangen wird, sollte die Natriumdampflampe etwa alle vier Jahre getauscht werden und die LED nur alle zwölf Jahre. Die LED verliert über die Jahre zwar an Leuchtkraft, welche allerdings bei neueren Produkten nachgeregelt werden kann.

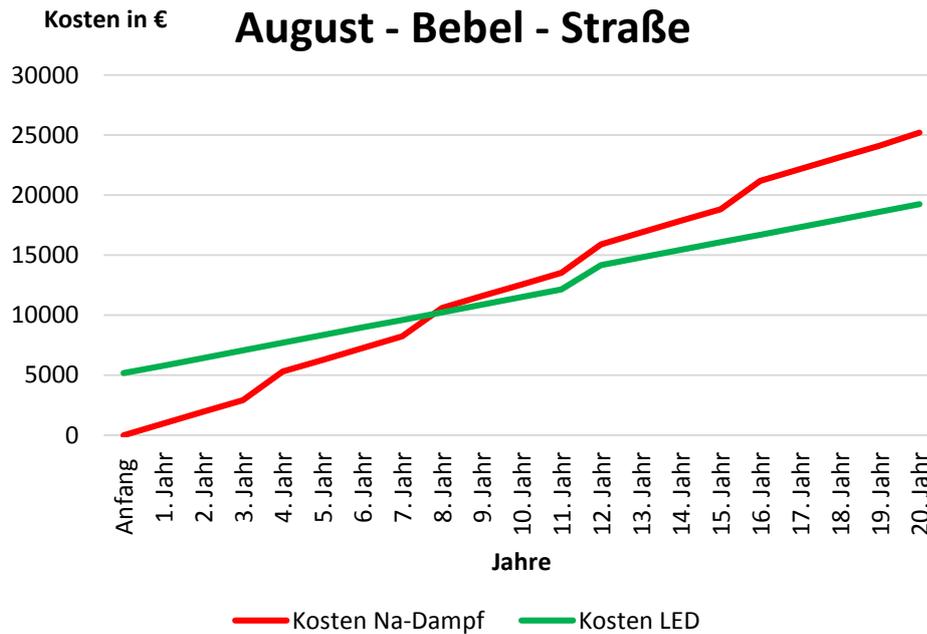


Abbildung 18: Amortisation für August-Bebel-Straße

Die voran gegangene Rechnung wurde ohne Beachtung eines Zinses durchgeführt. In der folgenden Rechnung wird ein Zins von 2 Prozent pro Jahr angenommen und die Rechnung erneut für die August-Bebel-Straße durchgeführt.

Zuerst wird die Differenz der alten und neuen Energiekosten gebildet, was den fiktiven Gewinn  $g$  widerspiegelt.

$$g = \text{Energiekosten Na} - \text{Dampf} - \text{Energiekosten LED} \quad (7)$$

Für das Beispiel der August-Bebel-Straße entspricht dies:

$$g = 975,24 \text{ €} - 633,91 \text{ €} = 341,33 \text{ €} \quad (8)$$

Am Anfang stehen die Investitionskosten von 5166 € für die LED Lampen zu Buche. Abgekürzt werden sie mit  $I_0$ . Bei dieser Art der Amortisationsrechnung beginnt die Rechnung im Negativen (alle Investitionen werden abgezogen) und wenn die Null erreicht ist, hat sich die Investition gerechnet. Auf der x-Achse ist wieder die Zeit aufgetragen. Das Konto wird mit  $C$  abgekürzt. Im Index steht das jeweilige Jahr. Beispielsweise beinhaltet das Konto am Anfang (Jahr Null) die Investitionskosten.  $C_0 = -I_0$

Die allgemeine Formel für die Berechnung lautet:

$$C_n = C_{n-1} + \frac{g}{q^n} \quad (9)$$

Dabei ist  $n$  das Jahr und  $q$  ist der Zinsfaktor, welcher sich aus  $i$  mit eins addiert zusammensetzt. Bei 2 Prozent Kostensteigerung entspricht  $q = 1,02$

$$q = 1 + i = 1 + 0,02 = 1,02 \quad (10)$$

Die Formel für das erste Jahr lautet:

$$C_1 = C_0 + \frac{g}{q^1} = -5166 \text{ €} + \frac{341,33 \text{ €}}{1,02^1} = -4831,36 \text{ €} \quad (11)$$

Für das zweite Jahr ergibt sich folgender Sachverhalt:

$$C_2 = C_1 + \frac{g}{q^2} = -4831,36 \text{ €} + \frac{341,33 \text{ €}}{1,02^2} = -4503,29 \text{ €} \quad (12)$$

Da in dem zwölften Jahr der voraussichtliche Austausch stattfindet, wird es hier noch einmal gesondert betrachtet. Es werden 100 € pro Leuchte angenommen, wobei die Personalkosten 70 € für das Umrüsten betragen. Da 14 Leuchtstellen getauscht werden müssen, belaufen sich die Kosten für den Austausch auf  $a = 1400 \text{ €}$ . Die Formel zur Berechnung des Wertes für das zwölfte Jahr lautet wie folgt:

$$C_{12} = C_{11} + \frac{g}{q^{12}} - \frac{a}{q^{12}} = 922,54 \text{ €} + \frac{341,33 \text{ €}}{1,02^{12}} - \frac{1400 \text{ €}}{1,02^{12}} = 87,79 \text{ €} \quad (13)$$

Abbildung 19 zeigt den Verlauf des Kontos  $C$ . Dabei fällt auf, dass der Zeitpunkt der Amortisation nach hinten verschoben ist. Während sich die Investition laut der statischen Rechnung bereits nach 7,5 Jahren rechnet, geschieht dies bei der dynamischen Variante erst nach 11 Jahren. Da beide Berechnungen jedoch gewisse Unsicherheiten beinhalten, wird im Folgenden mit der statischen Methode weiter gearbeitet.

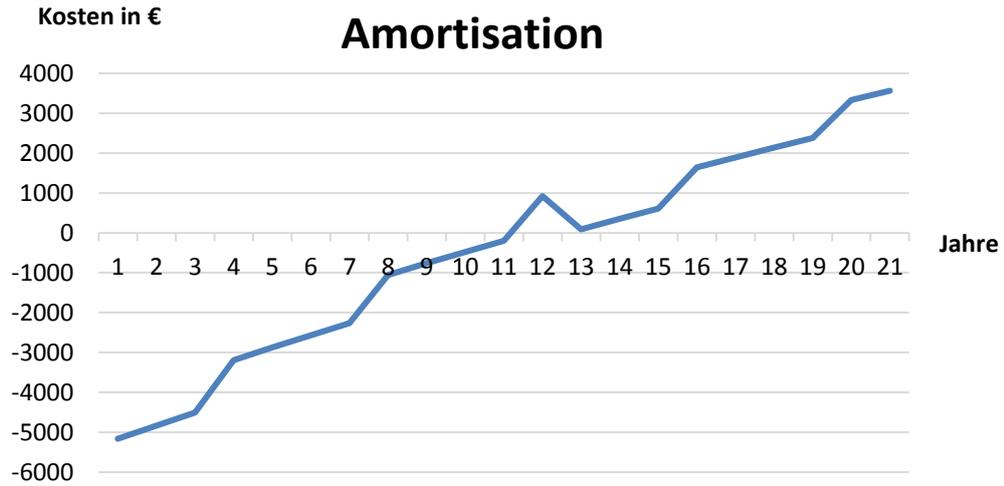


Abbildung 19: Amortisationskennlinie dynamisch (August-Bebel-Straße)

Abbildung 20 zeigt die Gesamtamortisation (statisch) für die sechs Straßen, welche die SWG umbauen wollen. Dabei wurde kein Zinssatz und keine Förderung einbezogen.

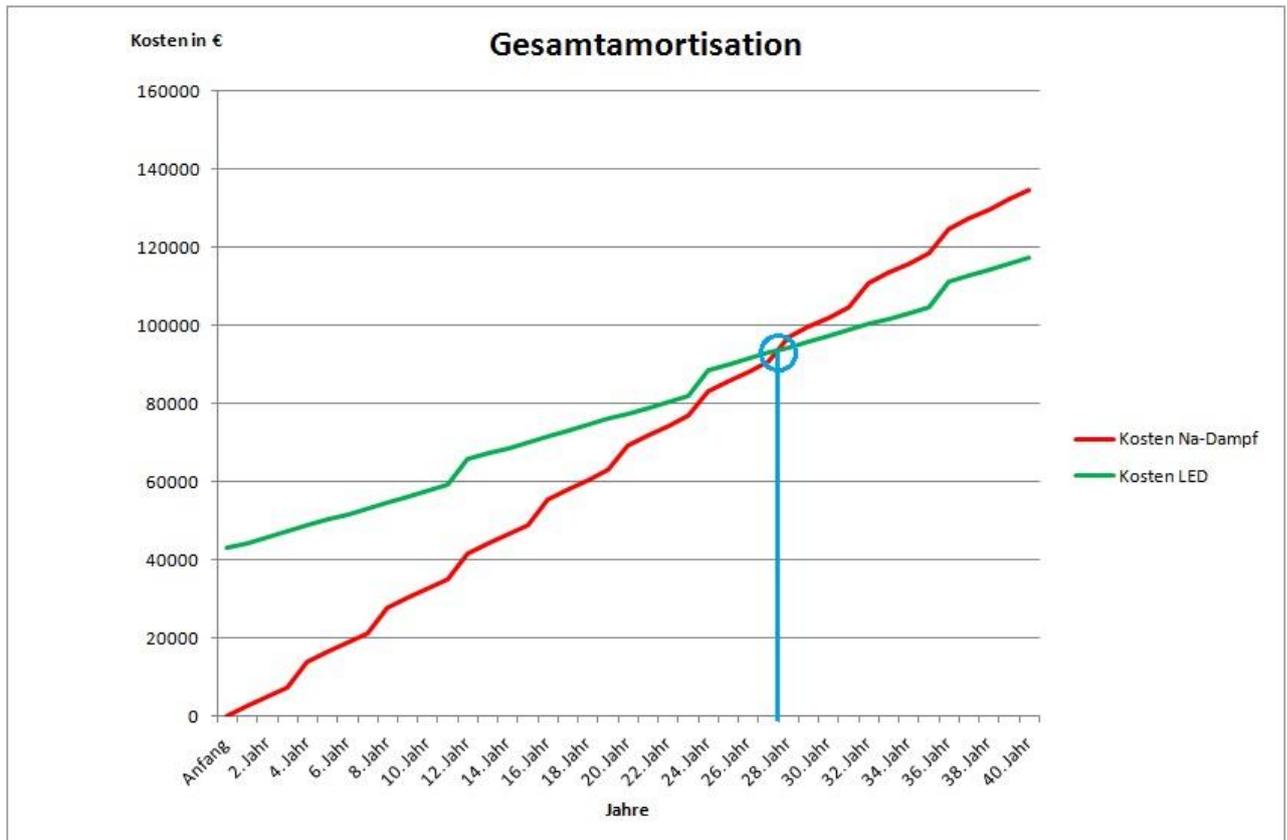


Abbildung 20: Gesamtarmortisation für Bauvorhaben Glauchau

Hier wurde ein Zeitraum von 40 Jahren betrachtet. Nach etwa 28 Jahren ist der Break-Even-Point erreicht, bei dem sich die Verhältnisse umkehren und die LED Technik trotz der Investitionskosten günstiger wird aufgrund des niedrigeren Energiebedarfs. Dieser Punkt wurde blau markiert. In die Berechnung sind auch Straßen mit eingeflossen, bei welchen beispielsweise zwei Natriumdampflampen durch sechs LED Lampen ersetzt werden. Das verfälscht das Ergebnis etwas. Prinzipiell lohnt sich der Umstieg auf LED Technik auf lange Sicht.

Um ein unverfälschtes Ergebnis zu erhalten, wurden die zwei Straßen, bei denen zusätzliche Maste errichtet werden, in der folgenden Betrachtung weggelassen. Bei den Straßen handelt es sich um die Färberstraße und die Straße Am Ende.

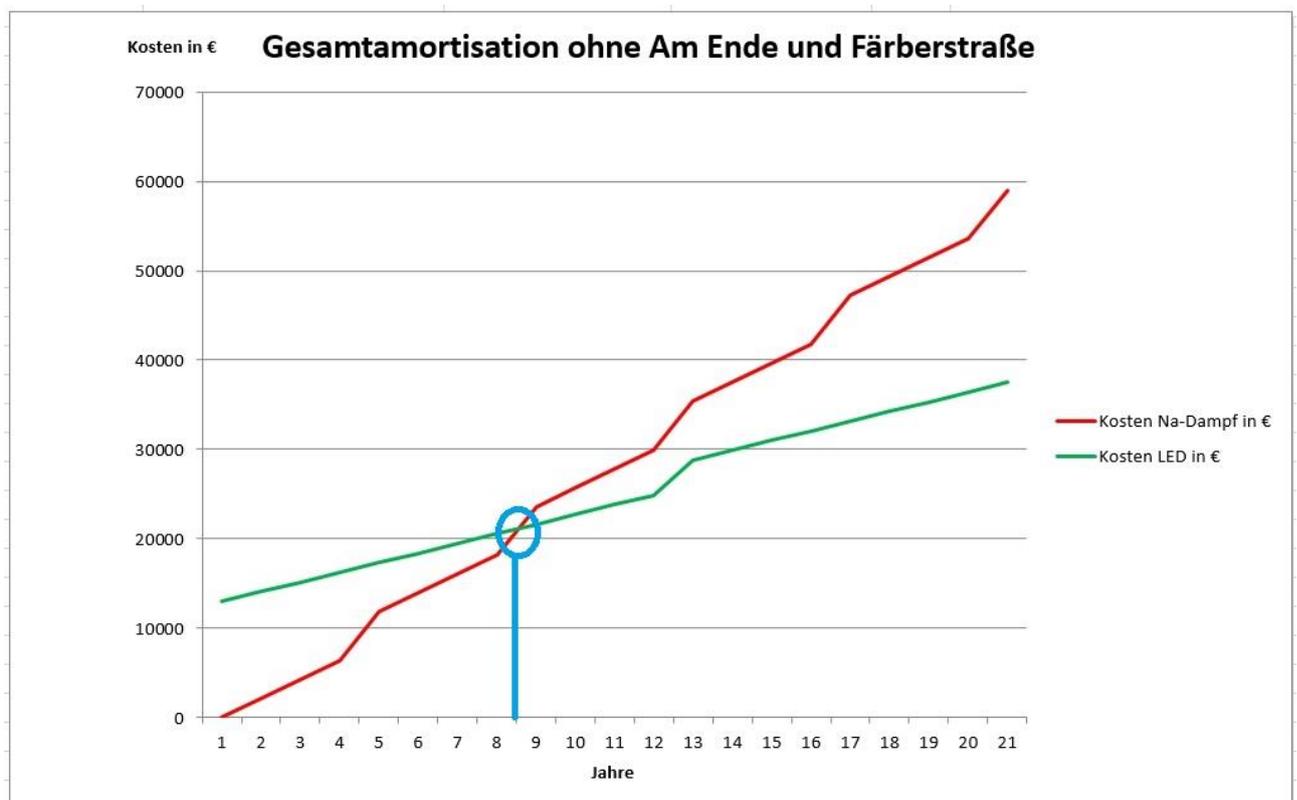


Abbildung 21: Gesamtamortisation ohne Am Ende und Färberstraße

Der Break-Even Point rutscht merklich nach vorn, bereits nach 8 Jahren amortisiert sich die Investition bei dieser statischen Betrachtung, siehe Abbildung 21. Es wurde – wie im vorangegangenen Fall auch – ein Austausch der Natriumdampflampen alle vier Jahre an-

genommen. Laut der Stadtwerke Glauchau halten die Lampen allerdings länger in der Realität, sodass nur alle sieben Jahre ein Austausch stattfinden muss.

Dieser Fall wurde auch betrachtet und dabei verschiebt sich der Break Even Point um zwei Jahre nach hinten. Somit amortisiert sich die Investition in jedem Fall, nur der Zeitpunkt ist verschieden.

## 4 Möglichkeiten zur Nutzung des Niederspannungsnetzes für die Straßenbeleuchtung und umgekehrt

Im Moment existieren drei Netze: das Mittelspannungsnetz, welches außen vorgelassen wird), das Niederspannungsnetz, welches u.a. Gebäude, also Wohneinheiten (WE), versorgt und das Straßenbeleuchtungsnetz. Der nachfolgende Teil dieser Arbeit beschäftigt sich mit den Möglichkeiten, das bestehende Doppelnetz in Frage zu stellen, um nur noch ein Netz (SBL Netz oder NS Netz) instand halten zu müssen bzw. die Nutzung des SBL-Netzes zu erweitern (E-Mobility).

### 4.1 Istzustand des Niederspannungsnetzes

Um den Zustand des NS Netzes zu ermitteln, wurde eine Netzsimulation mit dem Simulationstool Cerberus 9.0 aus dem Hause Adapted Solutions angefertigt. Dabei wurde das 10 kV Mittelspannungsnetz als speisendes Netz angenommen, dessen Spannung über einen Transformator von 10 kV auf 0,4 kV heruntertransformiert wird. Es finden verschiedene Trafotypen in Glauchau Anwendung. Diese unterscheiden sich unter anderem in ihrer Nennleerlaufverlusten  $P_0$ . Die Typenbezeichnung des Herstellers (SGB-SMIT) für den Trafo mit den kleinsten Verlusten lautet DOTUL. [32]

Die Netztopologie des Niederspannungsnetzes ist in den häufigsten Fällen als Strahlennetz realisiert, sehr selten vermascht. Der Netzaufbau besteht größtenteils aus Kabeln, aber auch isolierte Freileitungen kommen in Glauchau vor. In den Stationen, die in der Simulation betrachtet werden, liegen nur Kabel. Die Wohneinheiten (WE) und die SBL wurden in der Simulation als Lasten dargestellt. Bei den WE liegt eine Kennlinie der Gleichzeitigkeiten dahinter. Dabei wird angenommen, dass nicht jede WE gleichzeitig ihre Verbraucher betreibt. Diese unterscheidet zwischen Einfamilienhäusern (EFH) und Doppelhäusern (DH) oder Mehrfamilienhäusern (MFH). Die folgende Abbildung 22 auf der nächsten Seite zeigt den Verlauf der Kennlinie in logarithmischer Abhängigkeit von den WE.

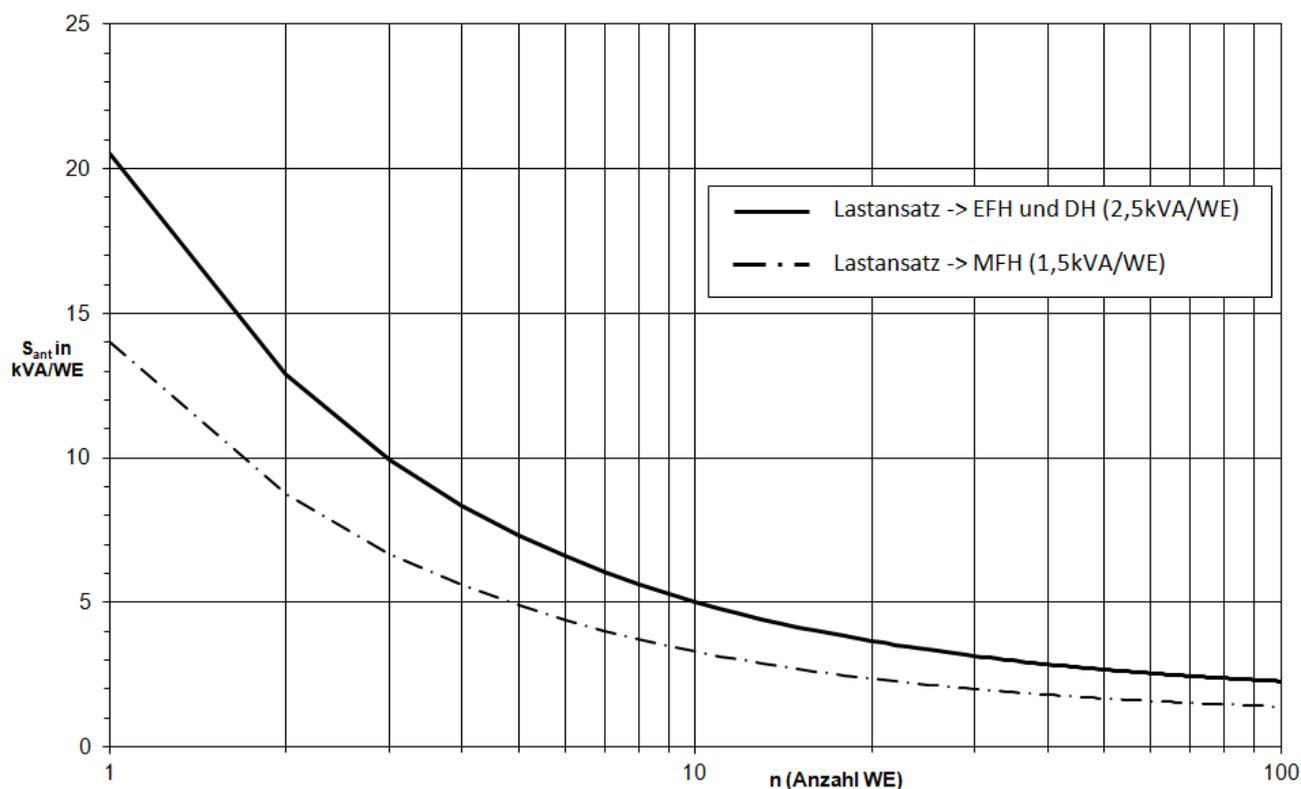


Abbildung 22: Lastprognose für verschiedene WE - Höchstlastanteil je Wohneinheit  
(Quelle: Intranet MITNETZ STROM)

Bei nur einer WE ist der Lastansatz mit 20,5 kVA recht hoch, weil von einem hohen Gleichzeitigkeitsfaktor ausgegangen wird. Je mehr WE hinzukommen, umso mehr ver gleichmäßigt sich der Lastfluss und die Gleichzeitigkeit nimmt ab. So rechnet man bei 100 WE nur mit 2,5 kVA, die je WE hinzukommen. Dieser Sachverhalt wurde bei der Si- mulation ebenfalls berücksichtigt. In Anhang P befindet sich noch eine Tabelle mit Gleich- zeitigkeitsfaktoren für verschiedene Gewerbe und Gebäude. Dort wird es als Bedarfsfaktor bezeichnet. Weiterhin wurden die Leistungen, welche sich auf 230 V beziehen, auf 400 V mittels des Faktors  $\sqrt{3}$  umgerechnet.

Abbildung 23 zeigt einen Ausschnitt aus der angefertigten Simulation für die Station Hoff- nung. Die Unterverteilung für die Straßenbeleuchtung heißt ebenfalls Hoffnung. Die Last- flussberechnung zeigt, dass der Spannungsfall an der letzten Last etwa 6 % beträgt.

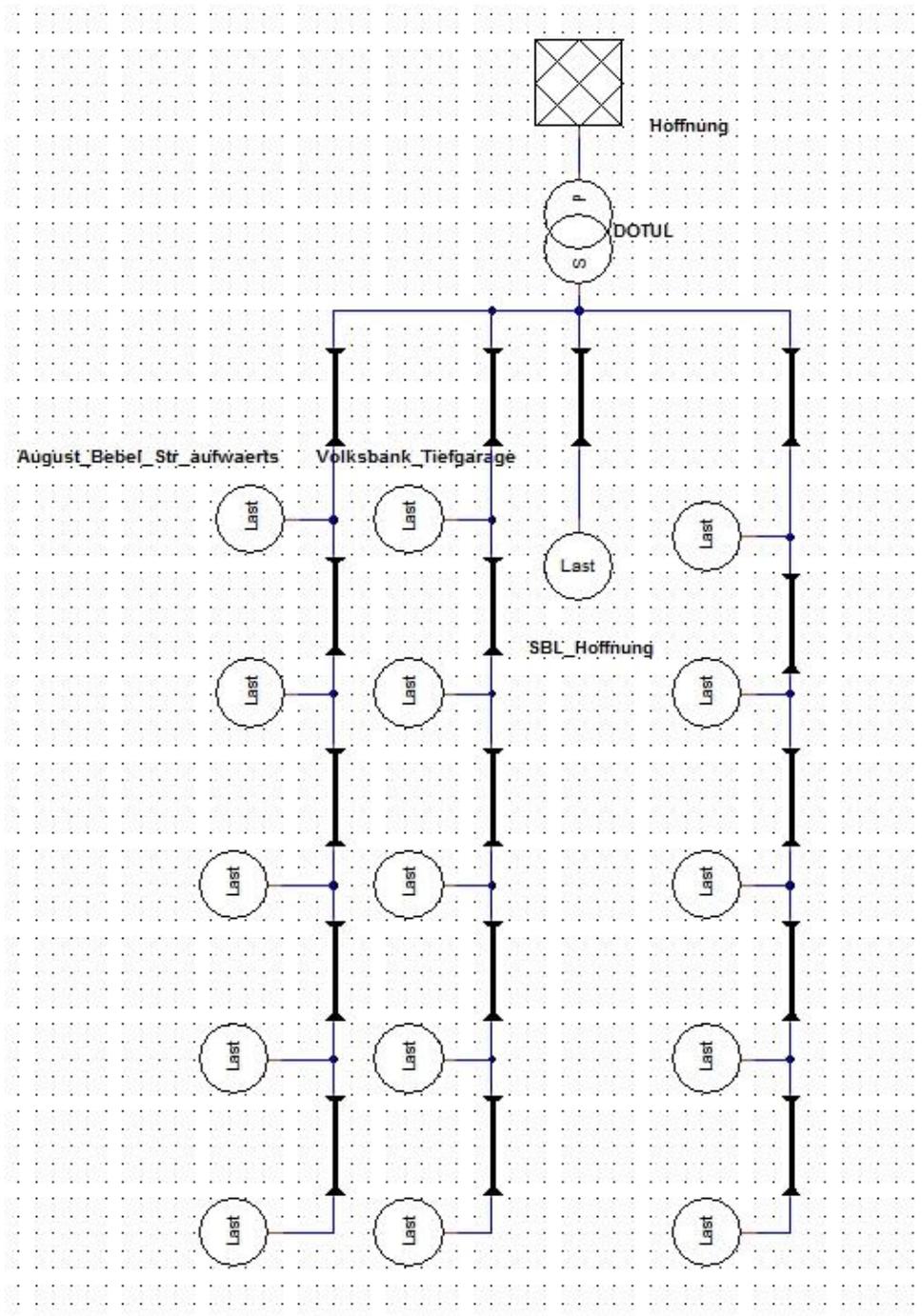


Abbildung 23: Simulationsausschnitt Cerberus

## 4.2 Nutzung des Straßenbeleuchtungsnetzes für Aufgaben des Niederspannungsnetzes

Das SBL Netz ist für die Versorgung der Beleuchtung ausgelegt. Demzufolge sind nur sehr geringe Querschnitte verlegt. In der Stadt Glauchau liegen 62,64 km Kabel und 60,52 km Freileitungen. Die Zahlen stammen von Messungen an dem Straßenbeleuch-

tungsnetz, welches im dxf-Format vorlag. In der Straßenbeleuchtung folgende Querschnitte verlegt: 4 x 25 mm<sup>2</sup> Aluminium, 4 x 6 mm<sup>2</sup>, 4 x 10 mm<sup>2</sup>, 5 x 10 mm<sup>2</sup>, 4 x 16 mm<sup>2</sup> und 5 x 16 mm<sup>2</sup> Kupfer. Mit diesen geringen Querschnitten und den dahinter liegenden geringen Anschlussleistungen von einigen kW (1,1 ... 14) lassen sich allerdings nur sehr wenige Wohneinheiten (WE) versorgen. Die Strombelastbarkeit ist bei den geringen Querschnitten ebenfalls sehr eingeschränkt. Die folgenden Tabellen 13 und 14 zeigen die Strombelastbarkeiten für die in Glauchau verlegten Beleuchtungskabel und Freileitungen.

### PVC-isolierte Kabel mit Kupferleiter (NYY)

*Tabelle 13: Strombelastbarkeit Kupferleiterkabel (nach [33])*

| Aderzahl x Querschnitt | Belastbarkeit Erde [A] | Belastbarkeit Luft [A] |
|------------------------|------------------------|------------------------|
| 4 x 6 mm <sup>2</sup>  | 59                     | 43                     |
| 4 x 10 mm <sup>2</sup> | 79                     | 59                     |
| 5 x 10 mm <sup>2</sup> | 79                     | 59                     |
| 4 x 16 mm <sup>2</sup> | 103                    | 79                     |
| 5 x 16 mm <sup>2</sup> | 103                    | 79                     |

### PVC-isolierte Kabel mit Aluminiumleiter (NAYY)

*Tabelle 14: Strombelastbarkeit Aluminiumleiter*

| Aderzahl + Querschnitt | Belastbarkeit Erde [A] | Belastbarkeit Luft [A] |
|------------------------|------------------------|------------------------|
| 4 x 25 mm <sup>2</sup> | 102                    | 82                     |

Somit ist die Übertragungskapazität der Kabel und Freileitungen gering. Die Kurzschlussleistung ist demzufolge auch nicht hoch. Auf Grund des geringen Querschnitts spricht die Sicherung nicht an, wenn am Leitungsende ein Kurzschluss auftritt. Somit ist die Abschaltbedingung nicht erfüllt. Außerdem ist der Spannungsfall bei dieser Konstellation über den maximal zulässigen drei Prozent. Der Spannungsfall wird an folgendem Beispiel berechnet mit der Formel

$$\Delta u = \frac{2 \cdot 100 \cdot I \cdot l \cdot \cos \varphi}{\kappa \cdot A \cdot U} \quad (14)$$

Beispielsweise wird die Schaltstelle vier, Hoffnung, betrachtet. An dem Verteiler hängen 134 Leuchtstellen mit unterschiedlichen Wattagen, dabei auch einige LED Leuchten. Die

gesamte Leistung beträgt 9872 W ohne Nachtabsenkung für die Schaltstelle Hoffnung. Da in der Formel der Strom  $I$  eingesetzt werden muss, wird er aus der Leistung und Spannung erst errechnet.

$$I = \frac{P}{U} = \frac{9872 \text{ W}}{230 \text{ V}} = 42,9 \text{ A} \quad (15)$$

Meist sind Kupferkabel NYY 4 x 16 mm<sup>2</sup> verlegt und Freileitungen. Es wird mit 16 mm<sup>2</sup> gerechnet. Die elektrische Leitfähigkeit  $\kappa$  beträgt bei Kupfer  $56 \frac{\text{m}}{\Omega \cdot \text{mm}^2}$  bei 20 °C. Der Wirkleistungsfaktor  $\cos \varphi$  beträgt 1 und die Länge wird mit 1000 m angenommen.

$$\Delta u = \frac{2 \cdot 100 \cdot 42,9 \text{ A} \cdot 1000 \text{ m} \cdot 1}{56 \frac{\text{m}}{\Omega \cdot \text{mm}^2} \cdot 16 \text{ mm}^2 \cdot 230 \text{ V}} = 41,6 \% \quad (16)$$

Der Spannungsfall für die betrachtete Station beträgt rund 42 Prozent und liegt damit weit über den geforderten drei Prozent der DIN 18015 Teil 1. Selbst wenn nur ein Straßenzug betrachtet wird, beispielsweise der Parkplatz Hoffnung, liegt der Spannungsfall noch über den in der DIN geforderten drei Prozent. An dem Parkplatz sind 18 x 70 W Lampen installiert, das ergibt eine Gesamtleistung von 1260 W. Das entspricht rund 5,5 A. Es ist wieder 4 x 16 mm<sup>2</sup> Kupferleiterkabel verlegt und die Länge beträgt 580 m. Die Spannung und der  $\cos \varphi$  bleiben gleich.

$$\Delta u = \frac{2 \cdot 100 \cdot 5,5 \text{ A} \cdot 580 \text{ m} \cdot 1}{56 \frac{\text{m}}{\Omega \cdot \text{mm}^2} \cdot 16 \text{ mm}^2 \cdot 230 \text{ V}} = 3,1 \% \quad (17)$$

Die Abschaltbedingung muss in jedem Fall auch erfüllt sein, um einen Kurzschluss zu detektieren und abschalten zu können. Diese besagt, dass der Fehlerstrom  $I_F$  größer sein muss als der Auslösestrom  $I_a$  der Sicherung. In der Straßenbeleuchtung werden üblicherweise Leitungsschutzschalter (25 A, C-Charakteristik) eingesetzt. Geht man von einer Abschaltzeit  $t_a$  von 60 min aus, ergibt sich ein Auslösestrom von

$$I_a = 1,45 \cdot 25 \text{ A} = 36,25 \text{ A} \quad (18)$$

Der Leitungs- und Schutzleiterwiderstand  $R_{L+PE}$  berechnet sich zu

$$R_{L+PE} = \alpha \cdot \frac{2 \cdot l}{\kappa \cdot A} = 1,24 \cdot \frac{2 \cdot 580 \text{ m}}{56 \frac{\text{m}}{\Omega \cdot \text{mm}^2} \cdot 16 \text{ mm}^2} = 1,61 \Omega \quad (19)$$

Dabei ist  $\alpha = 1,24$  der Temperaturfaktor für Kupferleitungen bis 80 °C.

Die kombinierte Impedanz  $Z_K$  errechnet sich aus der Summe von dem Schleifenwiderstand  $Z_V = 4 \Omega$  (hoch geschätzt) und dem eben berechneten Leitungs- und Schutzleiterwiderstand.

$$Z_K = Z_V + R_{L+PE} = 4 \Omega + 1,61 \Omega = 5,61 \Omega \quad (20)$$

Damit ist der maximale Fehlerstrom

$$I_F = \frac{c \cdot U_N}{\sqrt{3} \cdot Z_K} = \frac{0,95 \cdot 400 V}{\sqrt{3} \cdot 5,61 \Omega} = 39,11 A \quad (21)$$

Bei einem hoch geschätzten Schleifenwiderstand von vier Ohm ergibt der maximale Fehlerstrom rund 40 A. Unter diesen Modalitäten ist die Abschaltbedingung erfüllt für eine Kabellänge von 580 m. Es gilt:  $I_F \geq I_a$ . Bei Angabe eines exakten Schleifenwiderstandes kann die maximale Ausdehnung der Kabel über die Abschaltbedingung ermittelt werden. Bei den angenommenen Werten darf sie 580 m nicht weit überschreiten.

Eine größere Sicherung würde benötigt werden, um das SBL-Netz für andere Zwecke als die Beleuchtung zu nutzen. Wenn eine Sicherung mit größerem Bemessungsstrom (35 A) eingesetzt wird, ist die Selektivität nicht mehr gegeben. Diese drückt aus, dass der Fehlerstrom so nah wie möglich am Fehlerfall (Kurzschluss) abgeschaltet werden sollte. Unter Umständen wäre auch die Abschaltbedingung nicht mehr erfüllt.

Es lässt sich sagen, dass das Beleuchtungskabelnetz ungeeignet ist, um die Aufgaben der Niederspannungsversorgung wahr zu nehmen, aufgrund der geringen Querschnitte und daraus resultierend der unzulässig hohe Spannungsfall.

### **4.3 Nutzung des Niederspannungsnetzes für Aufgaben der Straßenbeleuchtung**

Jetzt wird die Speisung der Lampen aus dem NS Netz betrachtet. Diese Methodik ist nicht weit verbreitet. In Brandenburg gibt es einige wenige Leuchtstellen, die aus dem Niederspannungsnetz versorgt werden. Diese Lichtstellen verfügen jede über einen Dämmerungsschalter und eine Schaltuhr, welche zum Ausschalten in den Nachtstunden dient, beispielsweise von zwei Uhr bis fünf Uhr. Wenn dies vom Versorger gewünscht ist.

In Glauchau sind folgende Querschnitte in der Niederspannung verlegt: 4 x 185 mm<sup>2</sup>, 4 x 150 mm<sup>2</sup>, 4 x 120 mm<sup>2</sup>, 4 x 95 mm<sup>2</sup>, 4 x 70 mm<sup>2</sup> (FL), 4 x 50 mm<sup>2</sup> und 4 x 35 mm<sup>2</sup> Alumi-

nium. 4 x 240 mm<sup>2</sup>, 4 x 185 mm<sup>2</sup>, 12 x 120 mm<sup>2</sup>, 4 x 50 mm<sup>2</sup>, 4 x 16 mm<sup>2</sup>, Kupfer als Leitungsmaterial.

NYY und NYY-O

*Tabelle 15: Querschnitte im NS Netz (nach Quelle [33])*

| Aderzahl + Querschnitt  | Belastbarkeit Erde [A] | Belastbarkeit Luft [A] |
|-------------------------|------------------------|------------------------|
| 4 x 16 mm <sup>2</sup>  | 102                    | 79                     |
| 4 x 50 mm <sup>2</sup>  | 188                    | 175                    |
| 4 x 120 mm <sup>2</sup> | 318                    | 285                    |
| 4 x 185 mm <sup>2</sup> | 406                    | 374                    |
| 4 x 240 mm <sup>2</sup> | 473                    | 445                    |

Technisch ist diese Variante realisierbar, dazu muss eine Muffe eingesetzt und die Leuchtstelle mit dem NS Netz verbunden werden. Ein Nachteil dieser Methode ist, dass für Instandhaltungsarbeiten oder Reparaturen das gesamte NS Netz spannungslos geschaltet werden muss.

#### **4.3.1 Steuerverfahren für Straßenbeleuchtung**

Um die Elektroenergie für die Straßenbeleuchtung aus dem Niederspannungsnetz zu beziehen, sind andere Steuerungstechniken nötig als bisher installiert. Gegenwärtig sind Dämmerungsschalter verbaut. Dieser sendet ein Signal zum Einschalten der Straßenbeleuchtung, wenn ein bestimmter Helligkeitswert unterschritten wird. Die Messung wird mit einem Helligkeitssensor durchgeführt, welcher sich oben an dem Unterverteiler für den jeweiligen Straßenzug befindet. Einige Schaltstellen sind zusätzlich noch mit einer astronomischen Uhr ausgestattet. Wenn es jedoch kein gesondertes Netz mehr für die Straßenbeleuchtung gibt, sondern die Lampen aus dem Niederspannungsnetz versorgt werden, müssen die Lampen anders angesteuert werden, da immer Spannung anliegt. Diese Möglichkeiten werden in diesem Kapitel behandelt.

Es gibt bereits verschiedene moderne Ansteuersysteme am Markt, einige davon sind auch im Leuchtenpark der Mitteldeutschen Gesellschaft Strom mbH in Grimma verbaut

#### 4.3.1.1 Bewegungsmelder

Diese Technik arbeitet mit einem Bewegungsmelder im Mast, welcher Bewegungen erkennt und ein entsprechendes Signal an die LED-Lampe sendet. Dabei ist zu beachten, dass für dieses Steuerverfahren keine Gasentladungslampen in Frage kommen, da ihre Aufheizzeit zu lange dauert und kurz nach dem Einschalten ein viel zu geringer Lichtstrom anliegt. Darin unterscheidet sich die LED-Technik, welche sofort nach dem Einschalten ihren vollen Lichtstrom entwickelt. Der Bewegungsmelder reagiert auf Menschen und Autos, wodurch die Sicherheit gegeben ist.

#### 4.3.1.2 Dämmerungsschalter

Ein Dämmerungsschalter dient zum Schalten der Straßenbeleuchtung in Abhängigkeit der Helligkeit. Um einen kurzzeitigen Störeinfluss auf den lichtempfindlichen Sensor zu verhindern, arbeiten die Dämmerungsschalter mit einer einstellbaren Zeitverzögerung. [5] Wenn die Leuchten an das Niederspannungsnetz angeschlossen sind, kann die Schaltung der Lampen nicht zentral erfolgen. Deshalb muss jede Leuchtstelle mit einem Lichtsensor ausgestattet sein. Dabei beeinflussen Abschattung und Streulicht durch künstliche Lichtquellen den optimalen Betrieb. Das bedeutet, dass nicht alle Lampen gleichzeitig eingeschaltet werden.

#### 4.3.1.3 Philips City Touch

Bei Philips City Touch handelt es sich um eine Softwareplattform für die Außenbeleuchtung. Es gibt dabei drei verschiedene Technologien, über welche die Verbindung zur Leuchte hergestellt werden kann. Es gibt die Starsense Technologie, Powerline Technologie und die Remote Technologie. Die Abbildung 24 zeigt die verschiedenen Möglichkeiten.

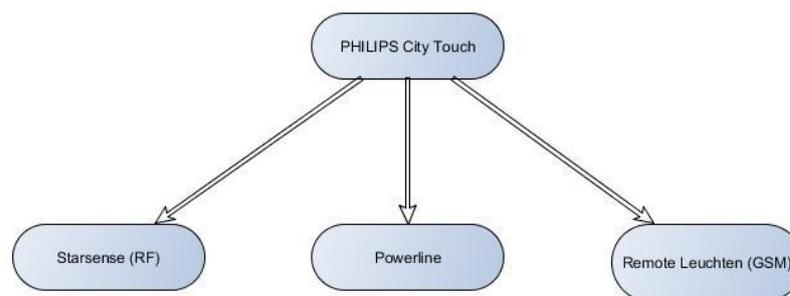


Abbildung 24: Übersicht Philips City Touch

Über einen Outdoor Luminar Controller (OLC) lassen sich die Lampen über die City Touch Software vom Rechner aus steuern und gegebenenfalls auch, wenn ein DALI Vorschaltgerät oder eine analoge 0 bis 10 V Schnittstelle vorhanden ist, dimmen. Für den OLC ist es irrelevant, welches Vorschaltgerät installiert ist. Sofern die Starsense Technologie verbaut ist, welche sich über einen Router mit dem Internet verbindet, lässt sich die SBL über die City Touch Oberfläche steuern. Der Verbindungsaufbau geschieht von der Software an den Router, danach wird der Segment Controller (SC) angesteuert und dieser steuert wiederum den OLC via RF in dem Mast der Leuchte an und der OLC wiederum steuert die Leuchte an. Der OLC kann auch den Energiefluss, also Strom und Spannung, messen und besitzt eine Messungsgenauigkeit gegenüber einem geeichten Messinstrument von kleiner als 2 Prozent. Bei der Starsense Technologie können bis zu 2000 Leuchtstellen, also OLCs, von einem SC angesteuert werden. Dabei ist die Steuerung jeder Lampe möglich. Die Übertragung findet über Funk in Mesh-Netzwerk statt. Die Leuchte fungiert als Repeater. In dem Schaltschrank sind der SC und der Router oder das Modem untergebracht.

Die Powerline Technologie moduliert auf die Netzspannung das Signal. Es ist wieder ein OLC in der Leuchte verbaut und der SC in der Unterverteilung. Dabei sind jedoch nur 200 OLCs von einem SC, aber auch jede Lampe einzeln, ansteuerbar. Der Integrationsaufwand ist recht hoch.

Die Remote Technologie nutzt das Mobilfunknetz GSM für die direkte Ansteuerung der Leuchte. Dabei ist die Ansteuerung jeder Leuchte möglich, wobei die Datenübertragung per Mobilfunkkommunikation stattfindet. Anders als bei den bisher vorgestellten Lösungen ist kein Segmentcontroller nötig, was die Integration vereinfacht. Da jede Lampe mit einem SIM-Modul ausgestattet ist, erfolgt die Anmeldung im System automatisch. Das verringert den Inbetriebnahmeaufwand enorm. Durch das SIM Modul können auch die Geodaten sowie Uhrzeit mittels eines GPS Moduls abgefragt werden. Die Geodaten werden auch direkt an die Zentrale geschickt und ins System eingepflegt. Um zu funktionieren, reicht eine 2G Handynetzabdeckung aus. Es spielt dabei keine Rolle, welcher Provider (Telekom, D2 oder O2) verwendet wird. Es wird immer das stärkste Netz gewählt.

Die Software City Touch ist sehr umfangreich und leistungsstark. Es lassen sich verschiedene Zustände anzeigen sowie diverse Dimmprofile erstellen. Dies ist über einen Kalender möglich. In dem Kalender lässt sich für jeden Tag ein anderes Leuchtprofil einstellen. So können am Wochenende andere Dimmzeiten als in der Woche verwirklicht werden. Auch spontane oder wiederkehrende Ereignisse lassen sich in das System einpflegen. Ebenso

lassen sich Straßenzüge oder Stadtteile zu Gruppen zusammenfassen und gemeinsam ansteuern oder Nebenstraßen und Hauptstraßen. Durch die intuitive Bedienung fällt es leicht, eigene Beleuchtungsszenarien zu erstellen und zu verwirklichen. Wie bereits erwähnt, ist der OLC auch in der Lage, Messungen an Strom und Spannung durchzuführen. Diese Werte werden gespeichert und können im Energiemodus abgerufen werden. Dabei können auch mehrere Lampen miteinander verglichen werden und so ermittelt werden – wenn die Lampen vom selben Typ sind – welche energieeffizienter arbeitet. Weiterhin kann anhand des Energieverbrauchs und der Leuchtzeiten der Dämmerungsschalter oder astronomische Kalender überprüft werden. Die Suchfunktion ist sehr umfangreich. Beispielsweise lässt sich die prozentuale Lebensdauer anzeigen, welche anhand der Betriebsstunden und zu erwartenden Lebensdauer errechnet wird. Die Kommissionierung und Dekommissionierung wird von den Mitarbeitern von Philips durchgeführt, um Fehler im System zu minimieren. Auch ist es möglich, verschiedene Berechtigungen zu vergeben, sodass nicht jeder Nutzer des Systems schalten darf, aber jedoch die Daten sehen kann. Jene können auch in verschiedenen Formaten exportiert werden.

Die SWG besitzen schon einige OLCs und wollen die Technik erproben. Die City Touch Lösung bietet sich an für die Steuerung der SBL, auch unter dem Gesichtspunkt der Versorgung aus dem NS Netz. Bei Verwendung der Technik ist es ohnehin ratsam, die Spannung immer anliegen zu haben.

## 5 Energiespeicher

Ein Energiespeicher ist „eine Anlage, die abhängig vom Betriebsmodus entweder elektrische Energie aus dem kundeneigenen Netz bzw. aus dem öffentlichem Netz beziehen oder einspeisen kann. Dies gilt unabhängig von der Art der technischen Umsetzung.“ [34]

Sie werden zur Erhöhung des Eigenverbrauchs in der Kundenanlage eingesetzt, wodurch das Netz entlastet werden kann. Auch kann die Erzeugerleistung durch Verringerung von Abregelungsmaßnahmen besser in das öffentliche Netz integriert werden. Somit können auch Lastflüsse vergleichmäßigt werden. Effizient ist es, wenn ein Netzausbau durch den Einsatz eines Energiespeichers und durch geschicktes Einspeisemanagement umgangen werden kann. Im Optimalfall werden auch noch Systemdienstleistungen eingebracht, wie Frequenzhaltung und Blindleistungsfahrweise. [34]

### 5.1 Fördermöglichkeiten

Das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU), die Kreditanstalt für Wiederaufbau (KfW) und die Sächsische Aufbaubank (SAB) besitzen Förderprogramme für Energiespeicher.

Die KfW und das BMU bieten ein Marktanreizprogramm für neue Batteriespeichersysteme (BSS) an. Darin enthalten sind zinsgünstige Kredite (1,1 Prozent) und Tilgungszuschüsse von bis zu 30 Prozent der Batteriekosten. [35] Die Laufzeit beträgt bis zu 20 Jahren, ebenso die Zinsbindung. Der Tilgungszuschuss beträgt 600 – 660 € pro kWp und 3000 € pro Anlage. Die Förderung wird nur für PV Anlagen gewährt, nicht für Mischanlagen, z.B. mit Blockheizkraftwerk (BHKW). Die PV Anlage muss nach dem 31.12.2012 in Betrieb genommen worden sein und darf 30 kWp nicht übersteigen. Weiterhin muss die Einspeiseleistung der PV Anlage auf 60 Prozent der installierten kWp am Netzanschlusspunkt dauerhaft begrenzt werden. In diesem Fall bedeutet dauerhaft 20 Jahre. Dies gilt auch, wenn der Speicher nicht mehr in Betrieb sein sollte. Der Wechselrichter der Batterie muss über folgende Schnittstellen verfügen: Kennlinieneingabe und eine Fernsteuerung. Die Kennlinien sollen von  $U$  und  $f$  abhängig sein, sodass man sich beispielsweise  $P(f)$  oder  $Q(U)$  anzeigen lassen kann. Die Anlage muss nach technischen Regelwerken für Speicher aufgebaut werden. Ein Monitoring-Portal muss ebenfalls vorhanden sein.

Bei der SAB ist ein Programm zur Förderung von PV Anlagen mit Speicher größer gleich zwei kWh bereits ausgelaufen. Zurzeit werden nur Speicheranlagen gefördert, welche am

Regelenergiemarkt teilnehmen können. Dabei können auch mehrere kleine Anlagen gebündelt werden, oder die Anlage besitzt die entsprechende Größe. [36] Dabei sind Projekte nicht förderfähig, die eine Zuwendungshöhe von 2000 € unterschreiten.

## 5.2 Speichertypen

Es gibt verschiedene Arten von Speichermöglichkeiten. Hier werden nur die Speicher für elektrische Energie vorgestellt. Es gibt zum einen die chemischen Speicher, zu denen die Akkumulatoren gehören, und zum anderen elektrische Speicher, die mittels eines elektrischen Feldes die Energie speichern.

Zu den elektrischen Speichern gehört der Kondensator. Für Energiespeicher kommen allerdings nicht die üblichen Elektrolytkondensatoren zum Einsatz, sondern die weiterentwickelten Supercaps oder Doppelschichtkondensatoren. Die Lade- und Entladeströme sind bei Superkondensatoren höher als beispielsweise bei Lithium-Ionen-Akkus, ebenso die Kapazitäten von einigen Farad. Auch ist die Zyklenzahl mit ca. 1 Mio. sehr hoch. Die Spannungsfestigkeit ist vom Dielektrikum abhängig und liegt bei Supercaps üblicherweise bei 2,7 V. [37]

Die Kapazität eines Akkus wird in Amperestunden (Ah) angegeben. Dieser Wert beschreibt, wie lange welcher Strom aus dem Akku entnommen werden kann. Bei beispielsweise einer Kapazität von 10 Ah kann man 10 A eine Stunde lang entnehmen oder 5 A für zwei Stunden. Will man Akkus mit verschiedenen Nennspannungen miteinander vergleichen, bietet sich die Einheit Wh an. Dabei wird die Nennspannung ( $U_N$ ) mit zu den Ah multipliziert und man erhält die Energie in Wh. Die Nennspannung wird als fester Wert angegeben, die tatsächliche Spannung variiert allerdings je nach Ladezustand. Beispielsweise beträgt die Nennspannung bei den in Mobiltelefonen verwendeten Li-Ionen Akkus 3,7 V, wenn er vollständig geladen ist, beträgt die Spannung 4,3 V, und wenn er leer ist, beträgt sie 3 V. Eine Tiefenentladung ist schädlich für jeden Akku und kann ihn unbrauchbar machen. [38]

Bei den Akkumulatoren gibt es verschiedene Technologien. Es gibt Blei-Säure-Akkus, die, wenn man die Kosten pro Wh betrachtet, recht günstig sind. Sie sind aber relativ schwer im Vergleich zu anderen Speichertechnologien. Einfach zu laden sind sie ebenfalls und verhalten sich vergleichsweise gutmütig bei Überladung. Nickel-Cadmium-Akkus sind leichter als Bleiakkus und können durch ihren niedrigen Innenwiderstand bedingt sehr ho-

he Stromstärken liefern. Mittlerweile sind sie durch eine EU-Verordnung wegen des Schwermetalls Cadmium bis auf wenige Ausnahmen in Spezialanwendungen verboten. Weiterhin gibt es Nickel-Metallhydrid-Akkus, welche als Ersatz für NiCd-Akkus zu sehen sind. Sie können allerdings aufgrund des höheren Innenwiderstands nicht so hohe Stromstärken liefern. Des Weiteren gibt es noch Nickel-Zink Akkumulatoren, welche allerdings ein besonderes Ladeverfahren benötigen. [39] Sie wurden zwar bereits um 1900 erfunden, aber die Marktreife dauerte fast 100 Jahre an. Die letzte vorgestellte Technologie ist die Lithium-Ionen-Technologie, welche mit vielen Metallen kombiniert werden kann, wie Cobalt, Mangan, Titanat oder Eisen-Phosphat. Auch gibt es die Ausführung als Lithium-Polymer-Akkus. Aufgrund der relativ hohen Energiedichte (bis über 200 Wh/kg [39]) und dem relativ geringen Gewicht wird dieser Akkutyp näher betrachtet und für die Speicherung der Elektroenergie in Betracht gezogen, wie auch der Bleiakku.

### 5.3 Vergleich Lithium-Ionenspeicher mit Bleiakku

Die Blei-Säure Technologie ist erprobt und schon etwa 150 Jahre alt. Dagegen gibt es die Lithium-Technologie erst seit einigen Jahrzehnten. Anfang der 90er Jahre gab es den ersten marktreifen Li-Ionen Akku. [40] Um eine kWh zu speichern, benötigt man bei Blei eine viel höhere Masse als bei Lithium aufgrund der höheren Atommasse. In der Praxis benötigt man, um eine kWh in einem Lithium Akku zu speichern, sieben Kilogramm, während man für die gleiche Energiemenge bei einem Bleiakku 33 Kilogramm benötigt. Somit ist Lithium die erste Wahl für mobile Zwecke, z.B. in der Automobilindustrie (Elektromobilität). Die folgende Tabelle 16 vergleicht die beiden Technologien miteinander. Dabei wurde von einer Speicherkapazität von 5 kWh, Systemlebensdauer von 20 Jahren und einem Kapitalzins von 2 Prozent ausgegangen.

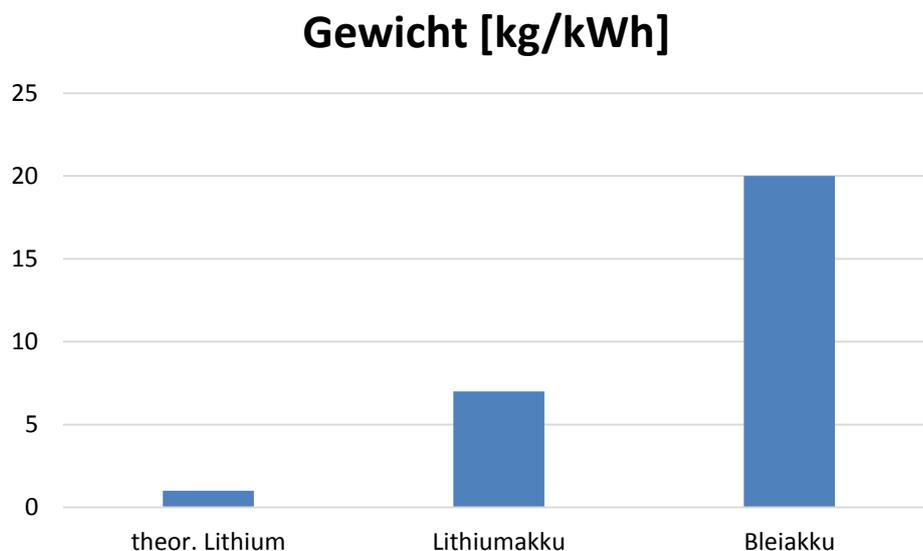
*Tabelle 16: Speichervergleich (nach Quelle [40])*

| Parameter                          | Blei-Säure Batterie  | Lithium-Ionen-Batterie |
|------------------------------------|----------------------|------------------------|
| Wirkungsgrad                       | 82%                  | 95%                    |
| Maximale Entladungstiefe (DOD max) | 60%                  | 80%                    |
| Investitionskosten Batterie        | 100 €/kWh + 20 €/kWh | 250 €/kWh + 50 €/kWh   |
| Leistungselektronik                | 200 €/kWh            | 200 €/kWh              |
| Zykluslebensdauer (DOD max)        | 3900                 | 5400                   |
| Installierte Kapazität             | 9,1 kWh              | 6,4 kWh                |
| Systemkosten                       | 1.700 €              | 2.500 €                |
| Lebenszykluskosten                 | 13,2 ct/ kWh         | 13,2 ct/ kWh           |

Das Gewicht pro kWh ist bei den unterschiedlichen Technologien auch verschieden, die folgende Tabelle 17 und Abbildung 22 zeigt den Unterschied auf.

*Tabelle 17: Das Gewicht von Energieträgern (nach Quelle [40])*

| Material       | Gewicht [kg/kWh] |
|----------------|------------------|
| theor. Lithium | 1                |
| Lithiumakku    | 7                |
| Bleiakku       | 20               |



*Abbildung 25: Das Gewicht von Energieträgern (nach Quelle [40], eigene Darstellung)*

Sofern nicht die neuartigen Blei-Gel-Akkus oder die Vliesakkus (auch AGM – Absorbent Glass Matt – genannt) eingesetzt werden, gasen die Bleiakkus bei hoher Strombelastung Wasserstoff aus. Damit kann Knallgas entstehen. Somit muss nach einiger Zeit wieder Wasser nachgefüllt werden und der Akku wegen der Explosionsgefahr an einem gut belüfteten Ort aufgestellt werden. Bei den neuartigen verschlossenen Batterietypen entfällt dies jedoch, genauso wie bei den Lithiumakkus. Somit ist der Aufstellungsort irrelevant. Die Wartungskosten bei Blei-Säure-Akkus sind demnach höher, da eine regelmäßige Überprüfung stattfinden muss.

Die Selbstentladung liegt bei Blei-Gel-Akkus bei etwa zwei bis sechs Prozent pro Monat. Der Lithium-Ionenakku besitzt eine geringere Selbstentladung von ein bis zwei Prozent pro Monat. [41]

Die Energiedichte gibt an, wie viel Kapazität der Energieträger bei einem bestimmten Gewicht hat. Sie ist bei neuartigen Lithium-Ionenspeichersystemen relativ hoch, hängt aber noch von mehreren Faktoren ab. Meistens besteht die Anode aus Graphit und ist 160 µm dick. Damit lassen sich 600 Wh/l erreichen. Modernere Anoden bestehen aus Silizium, sind 90 µm dick und es lassen sich Energiedichten von bis zu 800 Wh/l erreichen. Die neueste Methode ist, die Anode aus einer 10 µm dicken Kupfer-Lithium Schicht herzustellen. Damit lassen sich Energiedichten von bis zu 1200 Wh/l realisieren. Das ist allerdings noch Gegenstand aktueller Forschung. [42] Tabelle 18 stellt die verschiedenen Speichertechnologien gegenüber.

*Tabelle 18: Vergleich Speichertechnologien (Nach Quelle [41], [43] und [46])*

| Merkmale                  | Lithium-Ion                  | Lithium-Polymer | Blei-Säure Akku | Blei-Gel Akku |
|---------------------------|------------------------------|-----------------|-----------------|---------------|
| Lagerzustand des Akkus    | 60%                          | 60%             | 100%            | 100%          |
| Lagertemperatur des Akkus | 15 - 25 °C                   | 15 - 25 °C      | 5 - 15 °C       | 5 - 15 °C     |
| Selbstentladung im Monat  | 1 - 2 %                      | 1 - 2 %         | 5 - 10 %        | 3 - 5 %       |
| Nachladezyklus des Akkus  | jährlich                     | alle 1-2 Jahre  | monatlich       | monatlich     |
| Entladetiefe (DoD)        | 80%                          | 85%             | 50%             | 50%           |
| Energiedichte [Wh/kg]     | 120 - 180                    | 130 - 150       | 30 - 40         | 30 - 40       |
| Zellspannung              | 3,6 V                        | 3,7 V           | 2 V             | 2 V           |
| Ladewirkungsgrad          | 90%                          | 90%             | 60 - 70 %       | 60 - 70 %     |
| Lebensdauer               | 10 - 15 Jahre                | 7 - 10 Jahre    | 4 - 6 Jahre     | 5 - 8 Jahre   |
| Zyklenanzahl              | bis 7000                     | bis 15000       | bis 3000        | bis 3000      |
| Anschaffungskosten        | zwischen 1000 und 3000 €/kWh |                 | ca. 1000€/kWh   |               |

## 5.4 Einbindung des Speichers in das Energieversorgungsnetz

Wie die eins Energie wollen auch die Stadtwerke Glauchau einen Speicher in das Energieversorgungsnetz einbringen, allerdings ist noch unklar, wo und in welcher Spannungsebene genau. Es ist nicht ausgeschlossen, den Speicher – wie die eins Energie auch – in das Mittelspannungsnetz einzubringen. Es ist ratsam, den Speicher nahe bei der Erzeugeranlage zu platzieren. Somit kann auch ein Zähler eingespart werden und die Verluste sind geringer.

Durch die neuartigen bidirektionalen Leistungsflüsse und die Einbindung regenerativer Energien in das bestehende Netz macht den Ausbau von Energiespeichern notwendig, da die Energie nicht unbedingt immer dann zur Verfügung steht, wenn sie gebraucht wird oder im Umkehrschluss zu viel Energie vorhanden ist, jedoch der Bedarf gering ist.

Eine Anforderung an Energiespeicher ist, dass er nicht Energie aus dem Netz beziehen kann und dann wieder als gesetzlich vergütete Energie (Erneuerbare-Energien-Gesetz, Kraft-Wärme-Kopplungsgesetz) einspeisen darf. [45] Der Anlagenbetreiber muss sich für eine der zwei folgenden Varianten entscheiden:

- Speicher ohne Leistungsbezug aus dem öffentlichem Netz
- Speicher ohne Lieferung in das öffentliche Netz

Wenn die erste Variante gewählt wurde, darf der Speicher nicht aus dem öffentlichen Netz geladen werden, nicht einmal eine Speichererhaltungsladung.

Bei der zweiten Variante *„muss technisch sichergestellt werden, dass der aus dem Netz geladene Strom nicht mehr ins öffentliche Netz zurückgespeist wird.“* [34]

Um dies zu garantieren, wird ein Energieflussrichtungssensor (EnFluRi) installiert.

## **5.5 Einbindung des Energiespeichers in das SBL Netz**

Es ist angedacht, einen Energiespeicher in das Straßenbeleuchtungsnetz einzubringen, um Energie aus erneuerbaren Energien zu speichern und bei Bedarf auch wieder abzugeben. Dabei gilt es noch zu eruieren, welche Technologie zum Füllen des Speichers Verwendung findet. Zur Auswahl stehen eine (oder mehrere) Windkraftanlage(n) (WKA), Photovoltaik (PV) oder ein Blockheizkraftwerk (BHKW).

Zwar ist ein Großteil der Bevölkerung für erneuerbare Energien, jedoch wollen nicht alle eine WKA vor der eigenen Haustür haben. Aufgrund der mangelnden Akzeptanz in der Bevölkerung gegenüber WKA und deren rhythmischen Schattenwurf wird davon abgeraten. Außerdem kann die WKA nicht im Stadtzentrum installiert werden da ein bestimmter Abstand zu Wohnanlagen eingehalten werden muss.

Dagegen ist die Photovoltaik Technologie einfacher auch in Zentrumsnähe zu installieren, beispielsweise auf Gebäudedächern. Auch sind Freiflächen in Stadtrandgebieten für die Nutzung zur Energiegewinnung durch PV möglich. Natürlich unterliegt diese Form der Energiegewinnung Schwankungen durch die Sonneneinstrahlung, nicht nur am Tag, sondern auch auf das Jahr bezogen. So scheint die Sonne im Winter – wenn am meisten Energie für den Betrieb der SBL benötigt wird durch die langen Nächte – am kürzesten. So scheint die Sonne am kürzesten Tag des Jahres, dem 21. Dezember, nur maximal 8 Stunden, das heißt es ist 16 Stunden lang dunkel.

Auch ein Blockheizkraftwerk ist denkbar, um den Energiespeicher zu laden. Dieses könnte als Mini-Kraft-Wärme-Kopplung (Mini-KWK) oder Mikro-KWK ausgeführt werden und sich in einem Wohngebäude befinden.

### 5.5.1 Speicherbetrachtung unter realen Bedingungen

Als erstes wird der Speicherbedarf für eine einzelne Lampe betrachtet. In diesem Fall handelt es sich um eine Natriumdampf Lampe mit 70 W. Weiterhin wird der Extremfall der längsten Nacht beleuchtet, was eine Brenndauer von 16 Stunden bedeutet. Multipliziert man die Leistung von 70 W mit der Brenndauer von 16 h, erhält man die Arbeit pro Leuchte im Extremfall von der längsten Nacht.

$$W_{\text{einzel}} = P \cdot t = 70 \text{ W} \cdot 16 \text{ h} = 1,12 \text{ kWh} \quad (22)$$

Zum Vergleich: eine handelsübliche Starterbatterie für PKWs besitzt 85 Ah, was etwa  $12 \text{ V} \cdot 85 \text{ Ah} \cong 1 \text{ kWh}$  entspricht. Wenn man einen Straßenzug mit 13 x 70 W Lampen hernimmt – was im Reinholdshain Auenblick in Glauchau der Fall ist – braucht man dementsprechend einen größeren Speicher.

$$W_{\text{straße}} = W_{\text{einzel}} \cdot n = 1,12 \text{ kWh} \cdot 13 = 14,6 \text{ kWh} \quad (23)$$

Zur Veranschaulichung dient Abbildung 26 von einem 5 kWh Speicher, von welchem man drei bräuchte, um die genannte Straße zu puffern. Der Speicher wäre dann für den Extremfall der längsten Nacht ausgelegt.



Abbildung 26: Beispiel 5 kWh Speicher (Quelle: [34])

Möchte man die gesamte Straßenbeleuchtung der Stadt Glauchau aus einem Speicher mit Energie versorgen, muss der Speicher eine entsprechende Größe aufweisen. Aus dem aktuellen Bestand geht hervor, dass – wenn man alle Wattagen aufaddiert – 238,97 kW Leistung derzeit installiert sind. Diese Leistung wird wieder mit der Brenndauer der längsten Nacht (16 Stunden) multipliziert, um die Arbeit und somit die Größe des Speichers zu ermitteln.

$$W_{gesamt} = 238974 \text{ W} \cdot 16 \text{ h} = 3823,6 \text{ kWh} \quad (24)$$

Wenn man nur 80 Prozent des Energiebedarfs für die SBL aus dem Speicher puffern will, muss der Speicher entsprechend eine niedrigere Kapazität aufweisen.

$$W_{80\%} = 0,8 \cdot W_{gesamt} = 0,8 \cdot 3823,6 \text{ kWh} = 3058,9 \text{ kWh} \quad (25)$$

Die notwendige Kapazität reduziert sich um rund 800 kWh auf etwa 3.060 kWh. Zum Vergleich: die Abbildung 27 zeigt den Energiespeicher in Schwerin, welcher von der WEMAG betrieben wird. Dieser Lithium-Ionen Speicher besitzt die doppelte Kapazität im Vergleich zu der errechneten Kapazität für Glauchau. Laut WEMAG beliefen sich die Kosten auf 6,7 Mio. €, was bei der halben Kapazität grob 3,35 Mio. € entspricht. [34] Allerdings kann davon ausgegangen werden, dass die Speicherpreise heute niedriger sind als vor etwa drei Jahren, als der Speicher ans Netz ging. Somit kann man von etwa 3 Mio. € ausgehen, die der Speicher kosten würde.



Abbildung 27: Li-Ionen Speicher mit 6000 kWh (Quelle: [34])

### 5.5.2 Speicherbetrachtung nach Umstellung auf LED

Jetzt soll der Fall betrachtet werden, dass die Umstellung auf LED überall in Glauchau stattgefunden hat. Im Kapitel 3.2 wurde ermittelt, dass die LEDs 180 kW verbrauchen. In der längsten Nacht leuchtet die SBL 16 Stunden lang.

$$W_{\text{längste Nacht}} = P_{LED} \cdot t = 180 \text{ kW} \cdot 16 \text{ h} = 2880 \text{ kWh} \quad (26)$$

Der Wert ist etwa 1.000 kWh kleiner als die Arbeit bei den Natriumdampfleuchten. Die Brenndauer der SBL beträgt 4050 Stunden im Jahr. Das entspricht etwa 11,1 Stunden am Tag.

$$W_{\text{durchschnitt}} = P_{LED} \cdot t = 180 \text{ kW} \cdot 11,1 \text{ h} = 1998 \text{ kWh} \quad (27)$$

Das bedeutet, dass der Speicher in diesem Fall nur 2.000 kWh groß sein müsste. Als nächstes wird die kürzeste Nacht betrachtet, der 21. Juni. In unseren Breitengraden leuchtet die Sonne etwa 16 Stunden, und demzufolge dauert die Nacht nur etwa 8 Stunden an diesem Tag.

$$W_{\text{längster Tag}} = P_{LED} \cdot t = 180 \text{ kW} \cdot 8 \text{ h} = 1440 \text{ kWh} \quad (28)$$

## 5.6 Einbindung des Speichers in das NS oder MS Netz

Der Speicher kann auch im Niederspannungsnetz oder Mittelspannungsnetz eingebracht werden. Wenn er nahe eines Umspannwerks (UW) platziert wird, kann man auch am Regenergiemarkt teilnehmen. Das heißt, dass positive und negative Regelenergie bereitgestellt wird. Es wird Energie ins Netz eingespeist, wenn mehr Leistung benötigt wird, aber auch Energie aus dem Netz entnommen, wenn sich – z.B. durch erneuerbare Energien – zu viel Energie im Netz befindet. Allein für die Bereitstellung der Regelenergie werden Vergütungen gezahlt. Es gibt verschiedene Staffellungen nach Zeit, wann und wie schnell die Leistung erfolgen kann bzw. soll. Abbildung 28 zeigt die Staffellungen.

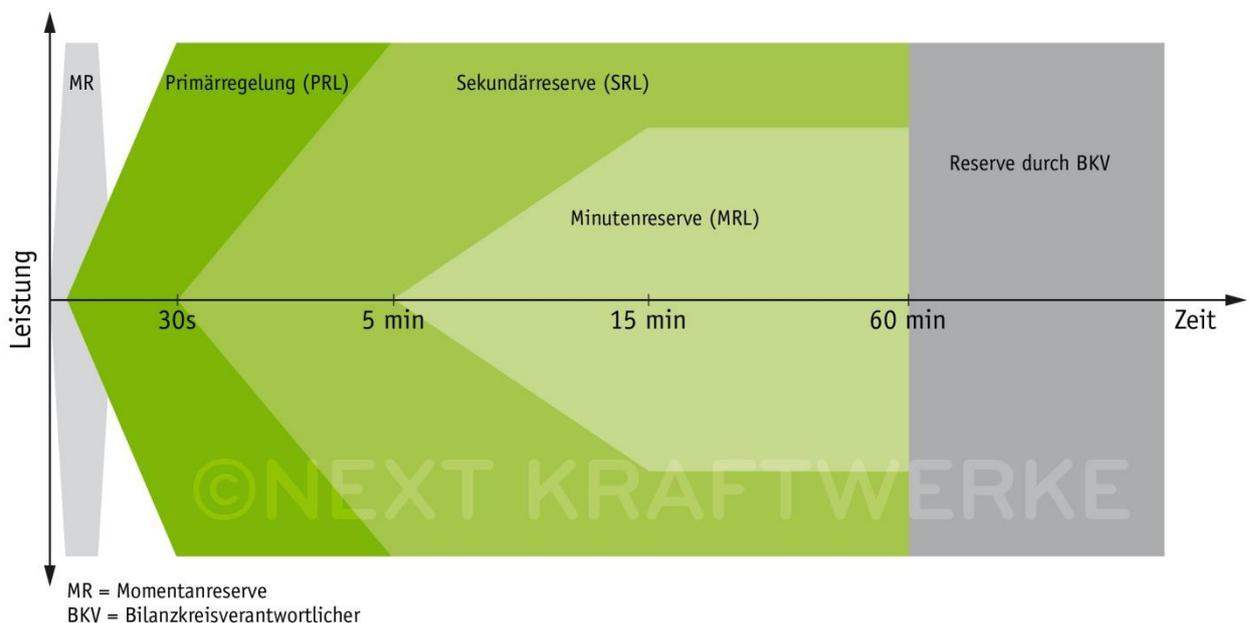


Abbildung 28: Regenergiestaffelungen nach Zeit [48]

### 5.6.1 Referenzobjekt

Die DREWAG (Stadtwerke Dresden) betreibt seit Februar 2015 einen Lithium-Polymer Akku, welcher Systemdienstleistungen für das Stromnetz wahrnimmt. [49] Die Investitionskosten des Speichers betragen 2,7 Mio. €, wovon 760.000 € Fördermittel waren. Der Energiespeicher der DREWAG ist mit einem Batteriemanagementsystem (BMS) ausgestattet. Der Speicher besitzt eine maximale Leistung von 2 MW und eine maximale Kapazität von 2,7 MWh. Es wird von 6000 Ladezyklen ausgegangen und eine Lebensdauer von zehn Jahren für den Einsatzfall garantiert.

Der Speicher ist in zwei 40 ft Containern untergebracht. Die Maße der baugleichen Container sind 8,6 ft x 8 ft x 40 ft. Im metrischen System entspricht das 2,62 m x 2,44 m x 12,2 m. Räumlich sind das rund 78 m<sup>3</sup>. Der Platzbedarf für den reinen 2,7 MWh Speicher beträgt 156 m<sup>3</sup>. Hinzu kommt noch die Leistungselektronik (Umrichtertechnik) und je nach Bedarf ein Transformator.

### 5.6.2 Bedeutung für Glauchau

Als Ort für den Speicher ist das Heizhaus vorgesehen. In der Nähe befindet sich ein Anschluss sowohl für das Niederspannungsnetz als auch für das Mittelspannungsnetz. Angenommen, die SWG besitzen eine Anlage, die erneuerbare Energie produziert, wie eine PV Anlage, kann diese genutzt werden, um den Speicher zu füllen. Man kann von einem verbraucherüblichen Strompreis von  $28,5 \frac{ct}{kWh}$  ausgehen (ohne Erneuerbare Energien Gesetz Förderung). Bei einer 813 kWp (Gleichstrom) Anlage entspricht das 600 kW auf der Wechselstromseite. Wenn von 8 Stunden Sonnenscheindauer ausgegangen wird, produziert die PV Anlage in der Größenordnung eine Energie von 4800 kWh pro Tag. Dieser Wert wird jedoch in den Wintermonaten mitunter noch unterschritten.

$$W_{erzeugt} = P \cdot t = 600 \text{ kW} \cdot 8 \text{ ht} = 4800 \text{ kWh} \quad (29)$$

Da aufgrund der begrenzten Speicherkapazität (angenommen 2 MWh, Speichergröße für das SBL Netz nach Umstellung auf LED, siehe 5.5.2) nicht der volle Ertrag der PV Anlage gespeichert werden kann, wird die Ersparnis mit 2.000 kWh berechnet.

$$Ersparnis = W_{speicherbar} \cdot Strompreis = 2.000 \text{ kWh} \cdot 0,285 \frac{\text{€}}{\text{kWh}} = 570 \text{ €} \quad (30)$$

Man kann bei 8 Stunden Sonnenscheindauer 570 € pro Tag sparen. Anhand des Referenzobjekts wird von Kosten von 2 Mio. € für den Energiespeicher ausgegangen. Die Förderung für den Speicher beträgt 560.000 € analog der Förderung für das Referenzobjekt. Somit müssen noch 1,44 Mio. € aufgebracht werden. Teilt man die Ausgaben von 1,44 Mio. € durch den Ertrag pro Tag von 570 € bekommt man die Tage, nachdem sich die Investition rechnet.

$$Investitionsdauer = \frac{Investition}{Ertrag/d} = \frac{1.440.000 \text{ €}}{570 \text{ €/d}} = 2526 \text{ d} \quad (31)$$

Rechnet man die Tage in Jahre um, erhält man ein aussagekräftigeres Ergebnis.

$$Dauer = \frac{Investitionsdauer}{365 \frac{d}{a}} = \frac{2526 \text{ d}}{365 \frac{d}{a}} = 6,9 \text{ a} \quad (32)$$

Somit ist der Speicher nach rund 7 Jahren wirtschaftlich unter den genannten Bedingungen. (Miteinbeziehung der Fördermittel und ohne Erneuerbare Energien Gesetz Zulage bei der Einspeisung)

## 6 Zielkonzept

Wenn in Glauchau alle Straßenleuchten auf LED umgestellt sind, ist ein besseres Farbsehen – durch die verbesserte Farbwiedergabe – in der Nacht möglich. Die Lichtfarbe kann variiert werden und ist je nach Anwendungsfall anpassungsfähig. So kann in Kreuzungsbereichen eine tageslichtähnliche Lichtfarbe gewählt werden (kaltweiß, ~7000 K), um dem Hormonhaushalt mittels bläulichem Licht zu signalisieren, dass keine Schlafenszeit ist. Weiterhin lassen sich mit den angesprochenen fortschrittlichen Ansteuerungsverfahren (City Touch) Dimmprofile erstellen. Die LED Beleuchtung besitzt eine gute Regulierbarkeit. Durch die sofortige Lichtwiedergabe (keine Hochbrenndauer) kommen auch Bewegungsmelder als Steuertechnik in Frage. Auch weil die LEDs die vielen Schaltvorgänge besser verkraften als Gasentladungslampen, ist sie geeignet für die Kombination mit einem Bewegungsmelder. Eine klare Lichtbegrenzung ist ebenfalls gegeben durch den definierten Abstrahlwinkel der LEDs. Somit kommt es zu weniger Streulicht. Anwohner, welche sich von Lichteinfall gestört fühlten, wird es freuen, wenn das Licht zielgerichtet auf die Straße gelenkt wird. Auch die Leitungsverluste gehen durch die niedrigeren Leistungen zurück. Damit werden die Kabel und Freileitungen weniger belastet.

Durch die Umrüstung auf LED Beleuchtung besteht in Glauchau CO<sub>2</sub> Einsparungspotential von mehreren hundert Tonnen. Außerdem lassen sich die Stromkosten durch den niedrigen Energieverbrauch um bis zu 50 % reduzieren.

Die in der SBL verwendeten Kabel haben nur relativ kleine Durchschnitte (bis 16 mm<sup>2</sup> Kupfer) im Vergleich zu den Kabeln, welche im Niederspannungsnetz Verwendung finden (bis 240 mm<sup>2</sup> Kupfer). Es kann nicht ohne weiteres ein Elektroauto an einer Leuchtstelle geladen werden, da:

- Die Leistung am Anschlusspunkt gering ist (bis 14 kW)
- Nur in den Dunkelstunden Spannung anliegt
- Das Beleuchtungsnetz nicht dafür ausgelegt ist (geringe Querschnitte)

Die Beleuchtung wird zentral vom Schaltkasten mittels Dämmerungsschalter gesteuert. Tagsüber sind die Kabel des SBL Netz spannungslos. Somit ist das Netz nur sehr bedingt für andere Zwecke brauchbar. Anders ist es jedoch im NS Netz: Wenn die Leuchtstellen am NS Netz angeschlossen werden, ist es durchaus denkbar, eine Stromtankstelle im Mast zu installieren, wobei der Platz in dem Mast begrenzt ist und ein Stromzähler darin untergebracht werden muss. Wenn dies geschieht, liegt auch immer Spannung an und die

Anschlussleistung und Querschnitte sind ebenfalls höher. Es könnte auch ein Dreiphasenanschluss eingebaut werden, denn manche Elektroautos lassen sich auch mit Drehstrom laden. Natürlich wird der Strom in dem Fahrzeug gleichgerichtet.

## 7 Zusammenfassung und Ausblick

Die deutschen Städte und Kommunen wenden rund 30 bis 50 Prozent ihres jährlichen Stromverbrauchs für die Straßenbeleuchtung auf. [30] Dabei ist ein großes Einsparpotential vorhanden, im Extremfall bis zu 80 Prozent. Die Modernisierung und dabei die Einsparung von Elektroenergie kann auch einen Beitrag für die Erreichung der in der Einleitung genannten Klimaziele sein. Durch die Ausphasung von Quecksilberdampfampfen müssen neue Lösungen der Beleuchtung gefunden werden. Der Anteil von Quecksilberdampf-hochdrucklampen in deutschen Kommunen beträgt 79 Prozent. Rund die Hälfte der Straßenbeleuchtungsanlagen in Deutschland ist modernisierungsbedürftig. Dies ist in Abbildung 29 dargestellt.

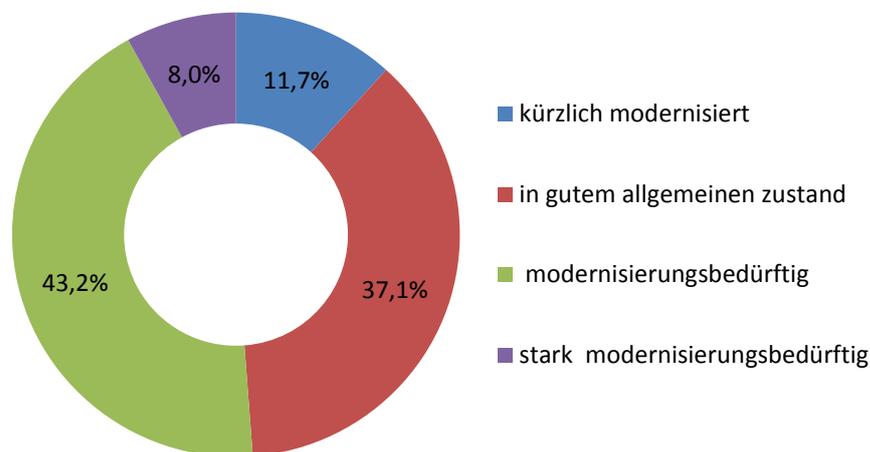


Abbildung 29: Technischer Zustand der Straßenbeleuchtungsanlagen (nach Quelle [30])

Die Stadtwerke Glauchau Dienstleistungsgesellschaft mbH wollen die Straßenbeleuchtung auf LED umstellen, um Energiekosten zu sparen. Der Austausch soll an Stellen stattfinden, wo ohnehin gebaut wird und Erdarbeiten nötig sind. Die dabei anfallenden Investitionskosten sind herstellerabhängig und schmälern die energetische Dividende. Das Verhältnis der Kosten (Investition und Energie) wurde unter Kapitel drei näher betrachtet. Dabei wurden auch die Bestandskosten beleuchtet und mit den Kosten der neuartigen LED Beleuchtung verglichen. Dabei wurde deutlich, dass sich die Investitionen je nach Straßenzug unterschiedlich schnell amortisieren. Es konnte eine Amortisationszeit von ca. acht bis zehn Jahren abgeschätzt werden. Das bestehende Doppelnetz wurde unter Kapi-

tel vier betrachtet und eine mögliche Nutzung des Niederspannungsnetzes für Aufgaben der Straßenbeleuchtung in Erwägung gezogen. Dabei spielen die Leitungsquerschnitte und somit die Belastbarkeit der Kabel und Leitungen eine große Rolle. Während eine Nutzung des Straßenbeleuchtungsnetzes für andere Aufgaben aufgrund der geringen Querschnitte ausgeschlossen ist, wäre die Versorgung der SBL durch das NS-Netz durchaus denkbar. Dabei gibt es allerdings nicht nur Vorteile. Da immer Spannung anliegt, sind andere Management-Systeme notwendig. Es wird das Phillips System City Touch empfohlen, mit dem sich viele Leuchtszenarien realisieren lassen. Eine weitere Empfehlung ist, die Leuchtstellen mit einem DALI-Vorschaltgerät auszustatten, um eine Dimmbarkeit zu gestatten.

Des Weiteren wurde über die Nutzung eines Batteriespeichersystems nachgedacht und an welcher Stelle man es am besten im Netz integrieren kann. So kann der Speicher auch in einer höheren Spannungsebene als das Niederspannungs- bzw. Straßenbeleuchtungsnetz eingebracht werden. Dabei bietet sich das Mittelspannungsnetz an. Somit kann am Regelenergiemarkt teilgenommen werden und durch Bereitstellung von Regelenergie Geld verdient werden.

Die Straßenbeleuchtung befindet sich zurzeit in einem technologischen Wandel. Das Produktportfolio der meisten Hersteller wird sich zukünftig auf innovative Leuchten beschränken. Betrieben werden diese Leuchten dann ausschließlich mit einem elektronischen Vorschaltgerät. Durch die konstante Weiterentwicklung der LED Technik und der in Zukunft auch fallenden Preise werden die konventionellen Mittel zur Lichterzeugung immer mehr vom Markt verdrängt. Der Markt, welcher sehr schnelllebig ist, wird sich bereinigen und manche Produkte werden auch wieder verschwinden, was in der Vergangenheit bereits der Fall war.

## Quellenverzeichnis

- [1] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz , Bau und Reaktorsicherheit:  
<http://www.bmub.bund.de/themen/klima-energie/klimaschutz/internationale-klimapolitik/kyoto-protokoll/>, 11.04.16
- [2] TRILUX; Beleuchtungspraxis, Außenbeleuchtung; Arnsberg; Oktober 2009
- [3] J. Bidder: [http://www.focus.de/gesundheit/ratgeber/sehen/anatomie/staebchen-und-zapfen\\_aid\\_21740.html](http://www.focus.de/gesundheit/ratgeber/sehen/anatomie/staebchen-und-zapfen_aid_21740.html) ; 29.01.16
- [4] G. Püschel: <https://de.wikipedia.org/wiki/Farbwahrnehmung> ; 29.01.16
- [5] VWEW Energieverlag GmbH; Straßenbeleuchtung; Frankfurt am Main; 2009
- [6] H. Höttinger & W. Graf; Licht & Insekten ; 19.04.16
- [7] A. Florenske; [http://www.deutschlandfunk.de/natur-braucht-dunkelheit.697.de.html?dram:article\\_id=242524](http://www.deutschlandfunk.de/natur-braucht-dunkelheit.697.de.html?dram:article_id=242524) ; 04.01.16
- [8] A. Bodenhaupt:  
[http://www.strassenbeleuchtung.de/index.php?option=com\\_content&view=article&id=435:insektenfreundlichkeit-der-led&catid=99&Itemid=53](http://www.strassenbeleuchtung.de/index.php?option=com_content&view=article&id=435:insektenfreundlichkeit-der-led&catid=99&Itemid=53) ; 18.04.16
- [9] P.Heumer, H.Kühtreiber und G.Tarmann;  
[http://www.hellenot.org/fileadmin/user\\_upload/PDF/WeiterInfos/10\\_AnlockwirkungInsektenFeldstudie\\_TLMFundLUA.pdf](http://www.hellenot.org/fileadmin/user_upload/PDF/WeiterInfos/10_AnlockwirkungInsektenFeldstudie_TLMFundLUA.pdf) ; 18.04.16
- [10] A. Hänel: <http://www.lichtverschmutzung.de/> ; 05.01.16
- [11] A. Bojanowski: <http://www.spiegel.de/wissenschaft/natur/lichtverschmutzung-bei-nacht-der-himmel-ueber-staedten-faerbt-sich-rot-a-848985.html> ; 06.01.16
- [12] U. Zimmermann: <http://www.eyemotion-glasses.de/blau-licht/> ; 06.01.16
- [13] R. Puchner: <http://www.puchner.org/Fotografie/technik/physik/licht.htm> ; 07.01.16
- [14] Straßenbeleuchtung und Verkehrssicherheit; Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen; Heft V14
- [15] Sächsische Staatskanzlei: <http://revosax.sachsen.de/vorschrift/4785-Saechsisches-Strassengesetz#p51>, 30.03.16
- [16] A. Bodenhaupt:  
[http://www.strassenbeleuchtung.de/index.php?option=com\\_content&view=article&id=157:lampentechnik&catid=38&Itemid=53](http://www.strassenbeleuchtung.de/index.php?option=com_content&view=article&id=157:lampentechnik&catid=38&Itemid=53) ; 11.01.16
- [17] Dr. J. Waldorf <http://www.licht.de/de/trends-wissen/wissen-kompakt/lichtlexikon/>;  
12.01.16

- [18] Dr. O. Berlien [http://www.osram.de/osram\\_de/news-und-wissen/hid/professionelles-wissen/index.jsp](http://www.osram.de/osram_de/news-und-wissen/hid/professionelles-wissen/index.jsp) ; 12.01.16
- [19] A. Bodenhaupt:  
[http://www.strassenbeleuchtung.de/index.php?view=article&catid=38%3Alampen&id=169%3Aquecksilberdampfhochdrucklampe&option=com\\_content&Itemid=53](http://www.strassenbeleuchtung.de/index.php?view=article&catid=38%3Alampen&id=169%3Aquecksilberdampfhochdrucklampe&option=com_content&Itemid=53) ; 12.01.16
- [20] Dr. O. Berlien [http://www.osram.de/osram\\_de/news-und-wissen/hid/professionelles-wissen/funktionsweise-hochdruckentladung/index.jsp](http://www.osram.de/osram_de/news-und-wissen/hid/professionelles-wissen/funktionsweise-hochdruckentladung/index.jsp) ; 12.01.16
- [21] Dr. R. Paschotta: [https://www.energie-lexikon.info/halogen\\_metalllampen.html](https://www.energie-lexikon.info/halogen_metalllampen.html);  
13.01.16
- [22] A. Bodenhaupt:  
[http://www.strassenbeleuchtung.de/index.php?view=article&catid=38%3Alampen&id=170%3Aanatriumdampfhochdrucklampe&option=com\\_content&Itemid=53](http://www.strassenbeleuchtung.de/index.php?view=article&catid=38%3Alampen&id=170%3Aanatriumdampfhochdrucklampe&option=com_content&Itemid=53) ; 13.01.16
- [23] R. Dohlus (2010): Photonik: Physikalisch-technische Grundlagen der Lichtquellen, der Optik und des Lasers; München
- [24] G. Schenke: [http://www.et-inf.fho-emden.de/~elmalab/beleucht/download/Blit\\_3.pdf](http://www.et-inf.fho-emden.de/~elmalab/beleucht/download/Blit_3.pdf);
- [25] M. Kottas: <http://www.ledshift.com/Die-Lumen-Watt-Effizienz-einer-Lampe.html> ;  
14.01.16
- [26] T. Weihrauch, (2011): Energieeffiziente öffentliche Beleuchtung: Rechtliche, wirtschaftliche und technische Aspekte von bedarfsgerechten, adaptiven Beleuchtungsstrategien, Koblenz; 13.01.16
- [27] P. Szymaniak: <http://www.derwesten.de/staedte/essen/essen-plant-led-strassenbeleuchtung-id3840840.html> ; 22.02.16
- [28] T. Weidenbach:  
<https://web.archive.org/web/20070313112937/http://www.wdr.de/tv/q21/1055.0.phtml> ;  
26.05.16
- [29] S. Vogel: <http://www.wildpoldsried.de/index.shtml?lampen> ; 22.02.16
- [30] U. Benterbusch: [http://www.dena.de/publikationen/stromnutzung/broschuere-energieeffiziente-strassenbeleuchtung-einsparpotenziale-identifizieren-und-erschliessen.html?tx\\_dscoverview%5Bliste%5D=1&tx\\_dscoverview%5Bpluginid%5D=8](http://www.dena.de/publikationen/stromnutzung/broschuere-energieeffiziente-strassenbeleuchtung-einsparpotenziale-identifizieren-und-erschliessen.html?tx_dscoverview%5Bliste%5D=1&tx_dscoverview%5Bpluginid%5D=8) ;  
18.04.16
- [31] H. Herminghaus: <http://www.co2-emissionen-vergleichen.de/Stromerzeugung/CO2-Vergleich-Stromerzeugung.html>; 13.04.16

- [32] R. Dudenhöffer: [https://www.sgb-smit.com/de/produkte/oelverteiltransformatoren/auswahl/reihenspannung-12-kv/sgb/1.html?tx\\_sgbprodukt\\_pi1%5Bpage%5D=0](https://www.sgb-smit.com/de/produkte/oelverteiltransformatoren/auswahl/reihenspannung-12-kv/sgb/1.html?tx_sgbprodukt_pi1%5Bpage%5D=0) ; 20.05.2016
- [33] [http://www.faberkabel.de/upload/datenblaetter/Datenblaetter/DE/DBL\\_NYY.PDF](http://www.faberkabel.de/upload/datenblaetter/Datenblaetter/DE/DBL_NYY.PDF) ; 05.04.16
- [34] R. Hüttner: Präsentation Batterie-Speichersysteme; MITNETZ STROM
- [35] W. Schweickhardt: [https://www.kfw.de/KfW-Konzern/Newsroom/Aktuelles/Pressemitteilungen/Pressemitteilungen-Details\\_310848.html](https://www.kfw.de/KfW-Konzern/Newsroom/Aktuelles/Pressemitteilungen/Pressemitteilungen-Details_310848.html) ; 24.01.16
- [36] R. Rainer: [https://www.sab.sachsen.de/de/p\\_umwelt/detailfp\\_ul\\_80385.jsp](https://www.sab.sachsen.de/de/p_umwelt/detailfp_ul_80385.jsp) ; 24.02.16
- [37] K. Lipinski: <http://www.itwissen.info/definition/lexikon/Super-Kondensator-ultra-capacitor.html>; 15.01.16
- [38] C. Caspari : <http://www.elektronikinfo.de/strom/akkus.htm> ; 14.01.16
- [39] P. Wintermayr: <http://www.elektroniknet.de/power/energiespeicher/artikel/97943/1/> ; 22.01.16
- [40] E. Heindl: <http://energiespeicher.blogspot.nl/2013/06/lithium-oder-blei-batteriespeicher-ein.html> ; 03.03.16
- [41] B. Lenz: <http://www.aku-abc.de/> ; 04.03.16
- [42] R. Opitz: <http://www.heise.de/newsticker/meldung/Lithium-Ionen-Akkus-mit-doppelter-Energiedichte-2534420.html> ; 04.03.16
- [43] R. Doelling: <http://www.energie-experten.org/erneuerbare-energien/photovoltaik/stromspeicher/vergleich.html#c7505> ; 05.03.16
- [44] Dr. J. Heidjann: <http://www.strom-speicher.org/> 29.02.16
- [45] VDE: FNN\_Hinweise\_Anschluss\_u\_Betrieb\_Stromspeicher\_am\_NS-Netz (pdf) ; 25.02.16
- [46] E. Langer: Marktübersicht-Batteriespeicher\_Web ; 07.03.16
- [47] R. Doelling: <http://www.energie-experten.org/erneuerbare-energien/photovoltaik/stromspeicher/lithium-ionen-aku.html>; 12.04.16
- [48] J. Aengenvoort: <https://www.next-kraftwerke.de/wissen/regelenergie> ; 19.05.16
- [49] Dr. Tilman Werner: Battsp\_HKW\_Re (pdf)



## Anhang

### Maste

Der heutige Standard bei Masten sind die Maste aus Stahl. Jedoch kommen auch noch andere, ältere Masttypen vor. In den Stadtwerken Glauchau überwiegen die Stahlmaste, es kommen aber auch Betonmaste und Holzmaste sowie Kunststoffmaste vor. In den Masten sind im Allgemeinen eine oder zwei Öffnungen vorgesehen. Diese dienen der Kabeleinführung (unten) und der Türausschnitt dient als Aufnahme des Sicherungskastens. Im Boden ist eine Stahlplatte (Flanschplatte) versenkt um das Absinken des Mastes zu vermeiden.

Die folgenden Abbildungen zeigen Stahlrohrmaste.



*Abbildung 30: Masttyp A; gerade, konisch, rund*



*Abbildung 31: Masttyp B; gerade, abgesetzt, rund*

## Masttyp gerade konisch rund:

| SAP<br>Mat.Nr. | Wind-<br>zone | Gesamt-<br>länge | Nenn-<br>höhe | Eingrab-<br>tiefe | Auslastung   |              |              | Koniz-<br>ität | Wand-<br>stärke | Durch-<br>messer | Türaus-<br>schnitt    | Tür-<br>radius |
|----------------|---------------|------------------|---------------|-------------------|--------------|--------------|--------------|----------------|-----------------|------------------|-----------------------|----------------|
|                |               |                  |               |                   | Typ 1<br>[%] | Typ 2<br>[%] | Typ 3<br>[%] |                |                 |                  |                       |                |
|                |               | H<br>[mm]        | h1<br>[mm]    | h2<br>[mm]        |              |              |              |                | [mm]            | d1<br>[mm]       | a x b<br>[mm x<br>mm] | R<br>[mm]      |
| 10068032       | 1<br>2        | 4.800            | 4.000         | 800               | 50<br>63     | 50<br>63     | 1*           | 01:12          | 3,0             | 76               | 400 x 85              | 42,5           |
| 10068033       | 1<br>2        | 5.300            | 4.500         | 800               | 63<br>80     | 59<br>75     | 1*           | 01:10          | 3,0             | 76               | 400 x 85              | 42,5           |
| 10068034       | 1<br>2        | 5.800            | 5.000         | 800               | 65<br>82     | 58<br>73     | 1*           | 01:10          | 3,0             | 76               | 400 x 85              | 42,5           |
| 10068035       | 1<br>2        | 7.000            | 6.000         | 1.000             | 69<br>87     | 67<br>84     | 94<br>2*     | 01:10          | 3,0             | 76               | 400 x 85              | 42,5           |
| 10068036       | 1<br>2        | 8.200            | 7.000         | 1.200             | 79<br>100    | 66<br>83     | 90<br>2*     | 01:10          | 3,0             | 76               | 400 x 85              | 42,5           |
| 10111524       | 1<br>2        | 8.200            | 7.000         | 1.200             | 66<br>70     | 56<br>70     | 84<br>89     | 01:10          | 4,0             | 76               | 400 x 85              | 42,5           |
| 10068037       | 1<br>2        | 9.200            | 8.000         | 1.200             | 87<br>108    | 70<br>87     | 89<br>2*     | 01:10          | 3,0             | 76               | 400 x 85              | 42,5           |
| 10111523       | 1<br>2        | 9.200            | 8.000         | 1.200             | 68<br>71     | 57<br>71     | 81<br>85     | 01:10          | 4,0             | 76               | 400 x 85              | 42,5           |
| 10068038*      | 1<br>2        | 11.500           | 10.000        | 1.500             | 62<br>76     | 62<br>59     | 68<br>84     | 01:10          | 4,0             | 76               | 400 x 85              | 42,5           |

\*geeignet für Ausleger bis 1,9m, 1\* keine Ausleger vorgesehen, 2\* statisch nicht zulässig

Tabelle 19: (Quelle: Präsentation enviaM)

## Masttyp gerade abgesetzt rund:

| SAP<br>Mat.Nr. | Wind-<br>zone | Ges.-<br>länge | Nenn-<br>höhe | Eingr.-<br>tiefe | Auslastung   |              | Wand-<br>stärke | Durch-<br>messer |            | Schuss-<br>länge | Türaus-<br>schnitt    | Tür-<br>radius |
|----------------|---------------|----------------|---------------|------------------|--------------|--------------|-----------------|------------------|------------|------------------|-----------------------|----------------|
|                |               |                |               |                  | Typ 1<br>[%] | Typ 2<br>[%] |                 | d1<br>[mm]       | d2<br>[mm] |                  |                       |                |
|                |               | H<br>[mm]      | h1<br>[mm]    | h2<br>[mm]       |              |              | [mm]            | d1<br>[mm]       | d2<br>[mm] | h3<br>[mm]       | a x b<br>[mm x<br>mm] | R<br>[mm]      |
| 10068039       | 1<br>2        | 4.800          | 4.000         | 800              | 52<br>67     | 58<br>75     | 2,9             | 76               | 114        | 1.400            | 400x85                | 42,5           |
| 10068040       | 1<br>2        | 5.300          | 4.500         | 800              | 63<br>82     | 67<br>86     | 2,9             | 76               | 114        | 1.400            | 400x85                | 42,5           |
| 10068041       | 1<br>2        | 5.800          | 5.000         | 800              | 76<br>98     | 75<br>96     | 2,9             | 76               | 114        | 1.400            | 400x85                | 42,5           |
| 10011204*      | 1<br>2        | 5.800          | 5.000         | 800              |              |              | 3,6             | 76               | 133        | 1.400            | 400x85                | 42,5           |
| 10068052       | 1<br>2        | 7.000          | 6.000         | 1.000            | 66<br>85     | 46<br>59     | 3,6             | 76               | 133        | 2.000            | 400x85                | 42,5           |

\* wegen Auslenkung bei größerer Belastung durch Auslegerleuchten

Tabelle 20: (Quelle: Präsentation enviaM)

## Induktionslampen

Das Prinzip, Licht durch eine elektromagnetische Induktion der Gasentladung zu erzeugen, wurde bereits im Jahr 1891 durch Nicola Teslas so genanntes „wireless light“ in New York beschrieben. Die Funktionstheorie heutiger Modelle geht jedoch auf Joseph Thomson aus dem Jahr 1927 zurück. Trotz der frühzeitigen Entwicklung dieser Beleuchtungstechnik, war es erst Ende des 20. Jahrhunderts soweit, dass eine geeignete Elektronik zur effektiven Ansteuerung der Induktionslampen (LMG) zur Verfügung stand und diese auch kostengünstig in Masse produziert werden konnte. Vom Grundaufbau ist sie eine elektrodenlose Quecksilberdampf-niederdrucklampe, jedoch im Gegensatz zur allgemeinen Leuchtstofflampe, in der die notwendigen Elektronen durch zwei Wolframdrähte erzeugt werden, wird der Elektronenfluss der Induktionslampe durch elektromagnetische Felder erzeugt. [16] So wird im Inneren der Lampe ein magnetisches Streufeld generiert, welches das quecksilberhaltige Füllgas ionisiert. Über atomare Wechselwirkungen innerhalb der Metaldampfmoleküle wird UV-Strahlung emittiert, welche in der Leuchtschicht in sichtbares Licht umgewandelt wird. Zu beachten ist jedoch, dass sie ausschließlich mit einem geeigneten elektronischen Vorschaltgerät funktionieren. Zumeist werden diese jedoch genau auf den Einsatz mit diesen Lampentypen abgestimmt, denn auf Grund des Fehlens jedweder Heizwendeln oder elektrischer Kontakte innerhalb der Lampe, ist der Verschleiß des Leuchtmittels sehr gering und dessen Lebensdauer zumeist im Wesentlichen durch das Vorschaltgerät bedingt. Weiterhin ist ein Zündgerät auf Grund des abweichenden Zündverhaltens gegenüber anderen Entladungslampen nicht notwendig. Die Abbildung 27 soll wiederum die Funktionsweise sowie die technischen Daten dieser Lampenart verdeutlichen.

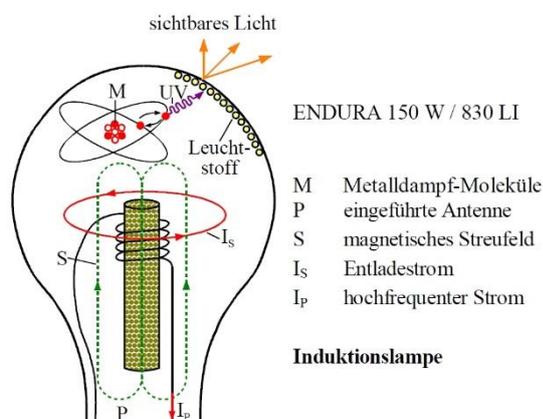


Abbildung 32: Induktionslampe nach [24]

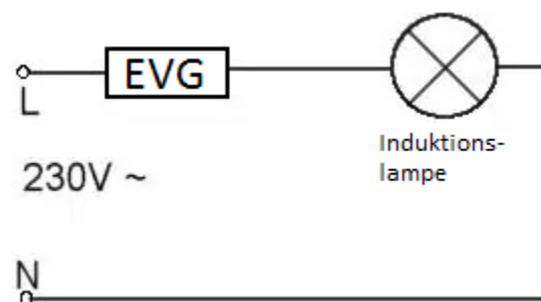


Abbildung 33: Schaltung (eigene Darstellung)

Durch den bereits angesprochenen äußerst geringen Verschleiß innerhalb des Leuchtmittels kann in Kombination mit einem qualitativ hochwertigen elektronischen Vorschaltgerät eine Nutzlebensdauer von bis zu 60.000 Betriebsstunden erreicht werden. Dies stellt im Vergleich zu anderen konventionellen Leuchtmitteln den größten Wert dar. Außerdem ist der Lichtstromrückgang relativ gering. Er liegt nach der oben genannten Betriebszeit bei circa 30 Prozent. [16] Zudem sind die technischen Möglichkeiten dieses Betriebsmittels sehr vielseitig. So ist beispielsweise ein Sofortstart innerhalb von 0,2 Sekunden möglich, wobei die Lampe bereits nach wenigen Sekunden 80 Prozent ihres Nennlichtstroms erreicht. Eine sofortige Wiederzündung mit annähernd voller Leistung ist ebenfalls möglich, während die Anzahl der Schaltvorgänge die Lebensdauer der Betriebsmittel nicht beeinflussen. Weitere Vorteile ergeben sich z.B. einerseits aus dem sehr weiten Umgebungstemperaturbereich in dem dieses Leuchtmittel Anwendung finden kann (sichere Zündung bei -30 °C bei rund 90 Prozent des Lichtstroms) sowie andererseits jedoch auch dessen Resistenz gegen Spannungsschwankungen. Somit sind sie auch für den Einsatz unter extremen Bedingungen sowie in Bereichen mit erhöhter Explosionsgefahr gut geeignet. [24] Problematisch hingegen ist die hochfrequente elektrische Energie, welche abgestrahlt oder leitungsgebunden weitergeleitet wird, da diese andere elektrische Geräte sowie den Funk stören kann. Um diese Störaussendungen zu begrenzen, wurden spezielle Anforderungen in verschiedenen Normen und Vorschriften, wie z.B. der Richtlinie zur elektromagnetischen Verträglichkeit, festgehalten. In einem abgestimmten System, bestehend aus Lampe, Leuchte und Vorschaltgerät, reduzieren Filter und abschirmende Gehäuse die ausgesandten Störungen auf ein Minimum und unter die geltenden Grenzwerte. [16]

Mittlerweile werden heute eine Vielzahl von verschiedenen Lampen- und Lichtleistungen dieses Typs auf dem Markt angeboten. Es existieren sogar schon sogenannte Retrofit-Modelle mit einem integrierten EVG und einem E27, bzw. E40 Schraubsockel, wodurch sie auch in vorhandene Lampenfassungen eingeschraubt werden können. Dementsprechend sind diese Lampen als Austauschlampen für vorhandene Quecksilberdampflampen geeignet. Es muss ausschließlich darauf geachtet werden, dass das bestehende Vorschaltgerät ausgeklemmt bzw. überbrückt wird. Auch wenn dies eine gute Alternative für die kommende Ausphasung von ineffizienten Leuchtmitteln erscheint, hat sich die erste Generation dieser Induktionsaustauschlampen hinsichtlich der Lebensdauer nicht bewährt. Bereits nach sehr kurzer Zeit konnte ein merklicher Leuchtstromverlust verzeichnet werden und nach nur einem Jahr zeigte der Leuchtstoff eine erhebliche Schwärzung. Eben-

falls anfällig waren die integrierten Vorschaltgeräte sowie der verarbeitete Kunststoff. So zeigte das Gehäuse nach einem Jahr hitzebedingte Mängel und zwei Drittel der elektronischen Vorschaltgeräte waren wegen eines Defekts nicht mehr in Betrieb. Dennoch erscheint diese Art der Beleuchtung vielversprechend, so dass dessen zukünftige Entwicklung weiter beobachtet werden sollte. [16]

*Tabelle 21: Daten Induktionslampe*

|                      |                        |
|----------------------|------------------------|
| Elektrische Leistung | 55 - 165 W             |
| Lichtstrom           | 3500 – 12000 lm        |
| Lichtausbeute        | 65 - 80 lm/W           |
| Lichtfarbe           | warmweiß, neutralweiß  |
| Farbwiedergabeindex  | 80 - 90 R <sub>a</sub> |
| Sockel               | Spezial, E27, E40      |
| Startzeit            | sofort                 |

# Entwicklung der künstlichen Straßenbeleuchtung

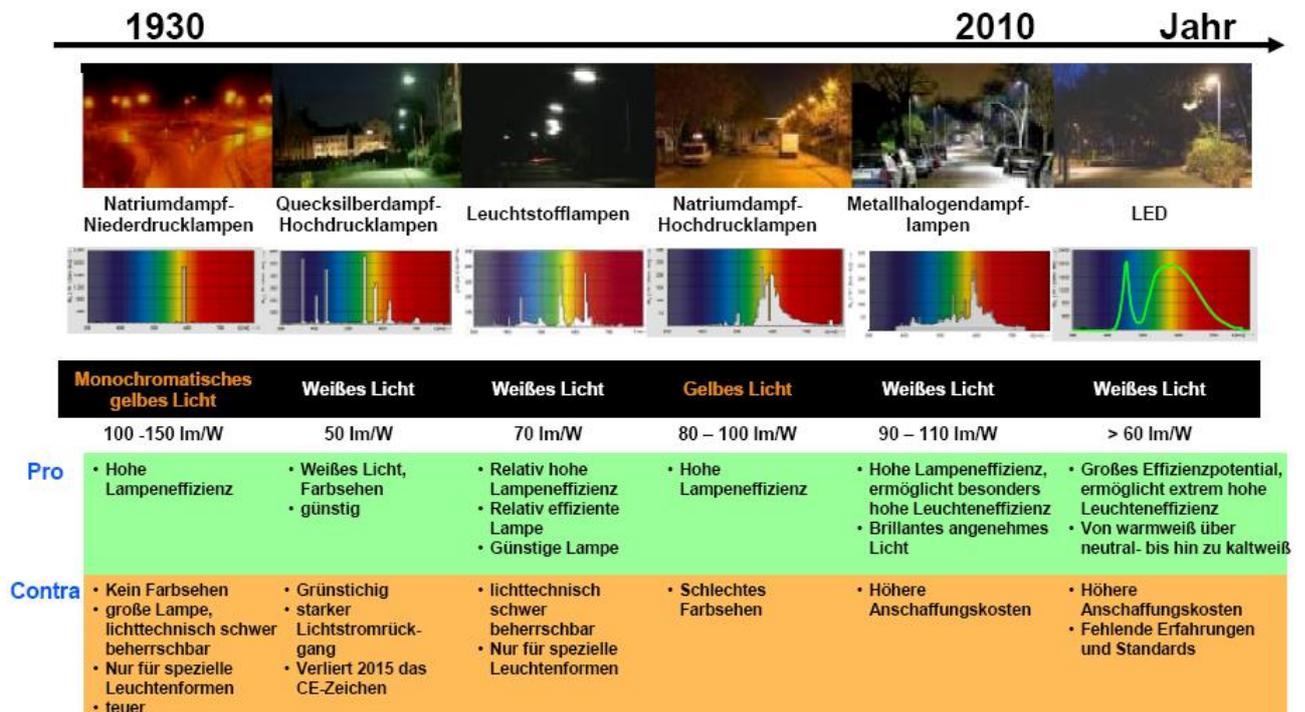


Abbildung 34: Historische Entwicklung der SBL

Tabelle 22: Anzahl Lampen in der SBL Glauchau (Realität)

| Lampenleistung [W] | Anzahl | Anteil in % an Anzahl |
|--------------------|--------|-----------------------|
| 15                 | 1      | 0,0                   |
| 18                 | 1      | 0,0                   |
| 23                 | 1      | 0,0                   |
| 27                 | 2      | 0,1                   |
| 29                 | 5      | 0,2                   |
| 32                 | 47     | 1,5                   |
| 37                 | 5      | 0,2                   |
| 39                 | 2      | 0,1                   |
| 44                 | 42     | 1,4                   |
| 50                 | 308    | 10,1                  |
| 60                 | 9      | 0,3                   |
| 70                 | 2116   | 69,4                  |
| 96                 | 4      | 0,1                   |
| 100                | 154    | 5,0                   |
| 120                | 1      | 0,0                   |
| 134                | 6      | 0,2                   |
| 150                | 310    | 10,2                  |
| 250                | 30     | 1,0                   |

## 50 % LED

Tabelle 23: Szenario 50 % LED verbaut

| Lampenleistung [W] | Anzahl | Anteil in % an Anzahl |
|--------------------|--------|-----------------------|
| 15                 | 1      | 0,0                   |
| 18                 | 1      | 0,0                   |
| 23                 | 1      | 0,0                   |
| 27                 | 2      | 0,1                   |
| 29                 | 5      | 0,2                   |
| 32                 | 763    | 25,0                  |
| 37                 | 5      | 0,2                   |
| 39                 | 2      | 0,1                   |
| 44                 | 762    | 25,0                  |
| 50                 | 122    | 4,0                   |
| 56                 | 3      | 0,1                   |
| 60                 | 4      | 0,1                   |
| 70                 | 1113   | 36,5                  |
| 96                 | 2      | 0,1                   |
| 100                | 81     | 2,7                   |
| 120                | 1      | 0,0                   |
| 134                | 3      | 0,1                   |
| 150                | 163    | 5,3                   |
| 250                | 16     | 0,5                   |

Tabelle 24: Daten für Austausch der Lampen

| Straße  | Kantstraße            | Am Ende             |
|---|-----------------------|---------------------|
| Schaltstelle Nr.                                | 6                     | 7                   |
| Schaltstelle                                    | Franz Mehring Platz   | Kopernikusstraße    |
| Maste und Wattage aktuell installiert           | 5 x 70 W und 4 x 150W | 4 x 70W             |
| aktuell installiert [W]                         | 350 und 600           | 280                 |
| Arbeit pro a in kWh                             | 1417,5 und 2430       | 1134                |
| Energiepreis für aktuell installiert pro a in € | 243,81 und 417,96     | 195,05              |
| neu (LEDs)                                      | 9 x Luma 50 W         | 11 x City Soul 24 W |
| Leistung NEU                                    | 450                   | 264                 |
| Arbeit pro a in kWh NEU                         | 1822,5                | 1069,2              |
| Energiepreis NEU in €                           | 313,47                | 183,9               |
| Preis in € für eine Leuchte                     | 369                   | 1670                |
| Preis für Leuchten insgesamt                    | 3321                  | 18370               |

*Tabelle 25: Daten für Austausch der Lampen*

| Straße  | Lungwitzer Straße | Färberstraße     |
|---|-------------------|------------------|
| Schaltstelle Nr.                                | 8                 | 22               |
| Schaltstelle                                    | Heinrichstraße    | Lindenstraße     |
| Maste und Wattage aktuell installiert           | 6 x 70W           | 3 x 70W          |
| aktuell installiert [W]                         | 420               | 210              |
| Arbeit pro a in kWh                             | 1701              | 850,1            |
| Energiepreis für aktuell installiert pro a in € | 292,57            | 146,29           |
| neu (LEDs)                                      | 2 x Trilux 32 W   | 12 x Trilux 24 W |
| Leistung NEU                                    | 64                | 288              |
| Arbeit pro a in kWh NEU                         | 259,2             | 1166,4           |
| Energiepreis NEU in €                           | 44,58             | 200,62           |
| Preis in € für eine Leuchte                     | 962               | 962              |
| Preis für Leuchten insgesamt                    | 1924              | 11544            |

Tabelle 26: Amortisation Thomas - Mann - Straße

| KOSTEN   | Kosten Na-Dampf in € | Kosten LED in € |
|----------|----------------------|-----------------|
| Anfang   | 0                    | 2560            |
| 1. Jahr  | 195,05               | 2649,16         |
| 2. Jahr  | 390,1                | 2738,32         |
| 3. Jahr  | 585,15               | 2827,48         |
| 4. Jahr  | 1180,2               | 2916,64         |
| 5. Jahr  | 1375,25              | 3005,8          |
| 6. Jahr  | 1570,3               | 3094,96         |
| 7. Jahr  | 1765,35              | 3184,12         |
| 8. Jahr  | 2360,4               | 3273,28         |
| 9. Jahr  | 2555,45              | 3362,44         |
| 10. Jahr | 2750,5               | 3451,6          |
| 11. Jahr | 2945,55              | 3540,76         |
| 12. Jahr | 3540,6               | 4029,92         |
| 13. Jahr | 3735,65              | 4119,08         |
| 14. Jahr | 3930,7               | 4208,24         |
| 15. Jahr | 4125,75              | 4297,4          |
| 16. Jahr | 4720,8               | 4386,56         |
| 17. Jahr | 4915,85              | 4475,72         |
| 18. Jahr | 5110,9               | 4564,88         |
| 19. Jahr | 5305,95              | 4654,04         |
| 20. Jahr | 5901                 | 4743,2          |

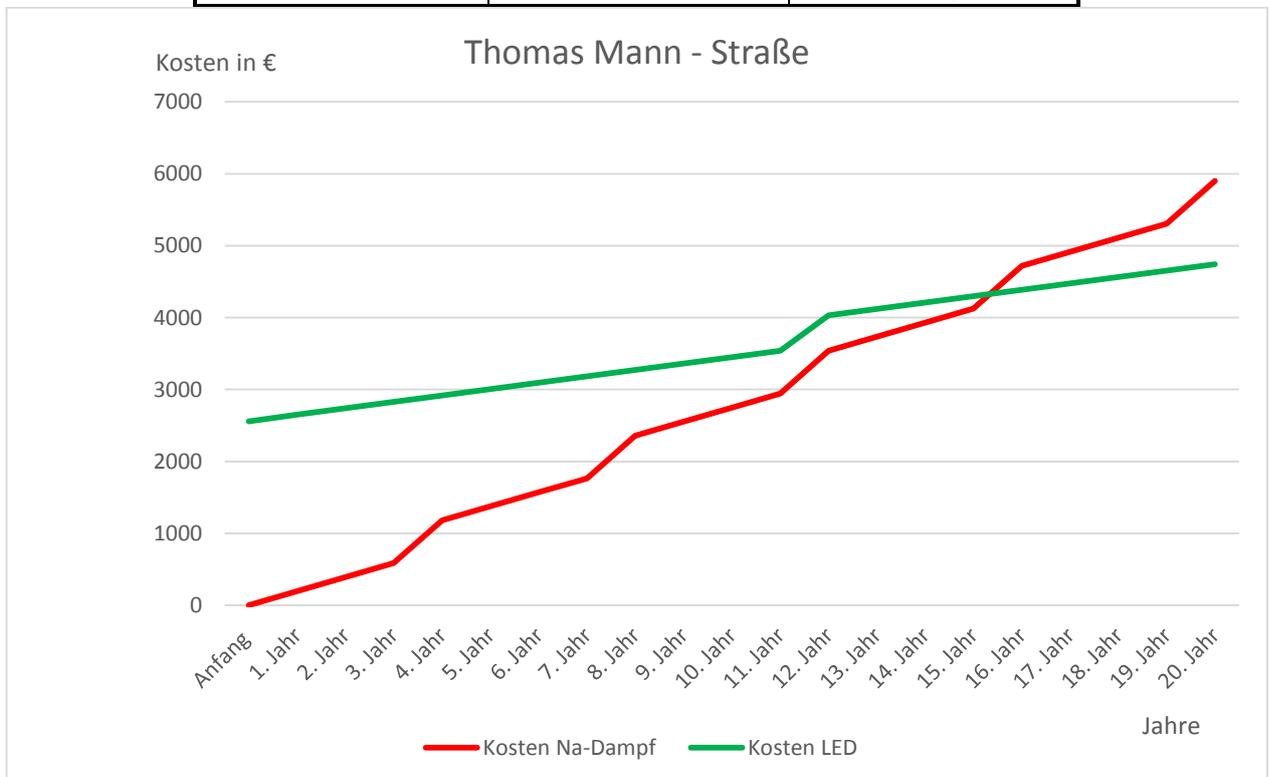


Abbildung 35: Amortisation Thomas Mann - Straße

Tabelle 27: Amortisation Kantstraße

| KOSTEN   | Kosten Na-Dampf in € | Kosten LED in € |
|----------|----------------------|-----------------|
| Anfang   | 0                    | 3321            |
| 1. Jahr  | 661,77               | 3634,47         |
| 2. Jahr  | 1323,54              | 3947,94         |
| 3. Jahr  | 1985,31              | 4261,41         |
| 4. Jahr  | 3547,08              | 4574,88         |
| 5. Jahr  | 4208,85              | 4888,35         |
| 6. Jahr  | 4870,62              | 5201,82         |
| 7. Jahr  | 5532,39              | 5515,29         |
| 8. Jahr  | 7094,16              | 5828,76         |
| 9. Jahr  | 7755,93              | 6142,23         |
| 10. Jahr | 8417,7               | 6455,7          |
| 11. Jahr | 9079,47              | 6769,17         |
| 12. Jahr | 10641,24             | 7982,64         |
| 13. Jahr | 11303,01             | 8296,11         |
| 14. Jahr | 11964,78             | 8609,58         |
| 15. Jahr | 12626,55             | 8923,05         |
| 16. Jahr | 14188,32             | 9236,52         |
| 17. Jahr | 14850,09             | 9549,99         |
| 18. Jahr | 15511,86             | 9863,46         |
| 19. Jahr | 16173,63             | 10176,93        |
| 20. Jahr | 17735,4              | 10490,4         |

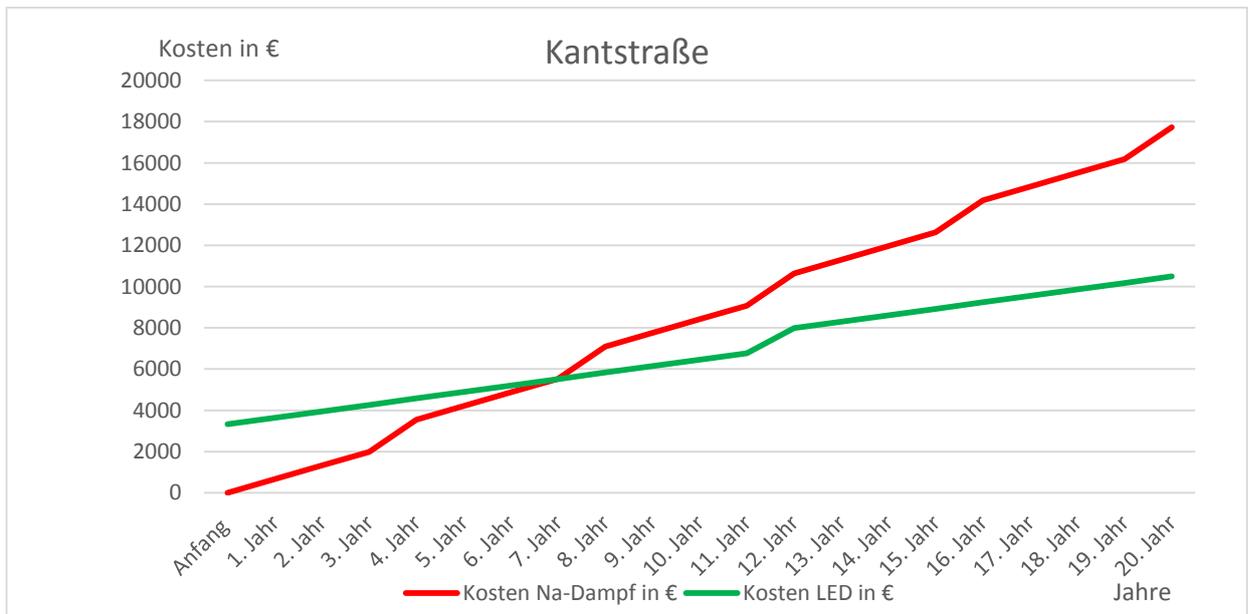


Abbildung 36: Amortisation Kantstraße

Tabelle 28: Amortisation Am Ende

| KOSTEN   | Kosten Na-Dampf in € | Kosten LED in € |
|----------|----------------------|-----------------|
| Anfang   | 0                    | 18370           |
| 1. Jahr  | 195,05               | 18553,9         |
| 2. Jahr  | 390,1                | 18737,8         |
| 3. Jahr  | 585,15               | 18921,7         |
| 4. Jahr  | 1180,2               | 19105,6         |
| 5. Jahr  | 1375,25              | 19289,5         |
| 6. Jahr  | 1570,3               | 19473,4         |
| 7. Jahr  | 1765,35              | 19657,3         |
| 8. Jahr  | 2360,4               | 19841,2         |
| 9. Jahr  | 2555,45              | 20025,1         |
| 10. Jahr | 2750,5               | 20209           |
| 11. Jahr | 2945,55              | 20392,9         |
| 12. Jahr | 3540,6               | 21676,8         |
| 13. Jahr | 3735,65              | 21860,7         |
| 14. Jahr | 3930,7               | 22044,6         |
| 15. Jahr | 4125,75              | 22228,5         |
| 16. Jahr | 4720,8               | 22412,4         |
| 17. Jahr | 4915,85              | 22596,3         |
| 18. Jahr | 5110,9               | 22780,2         |
| 19. Jahr | 5305,95              | 22964,1         |
| 20. Jahr | 5901                 | 23148           |

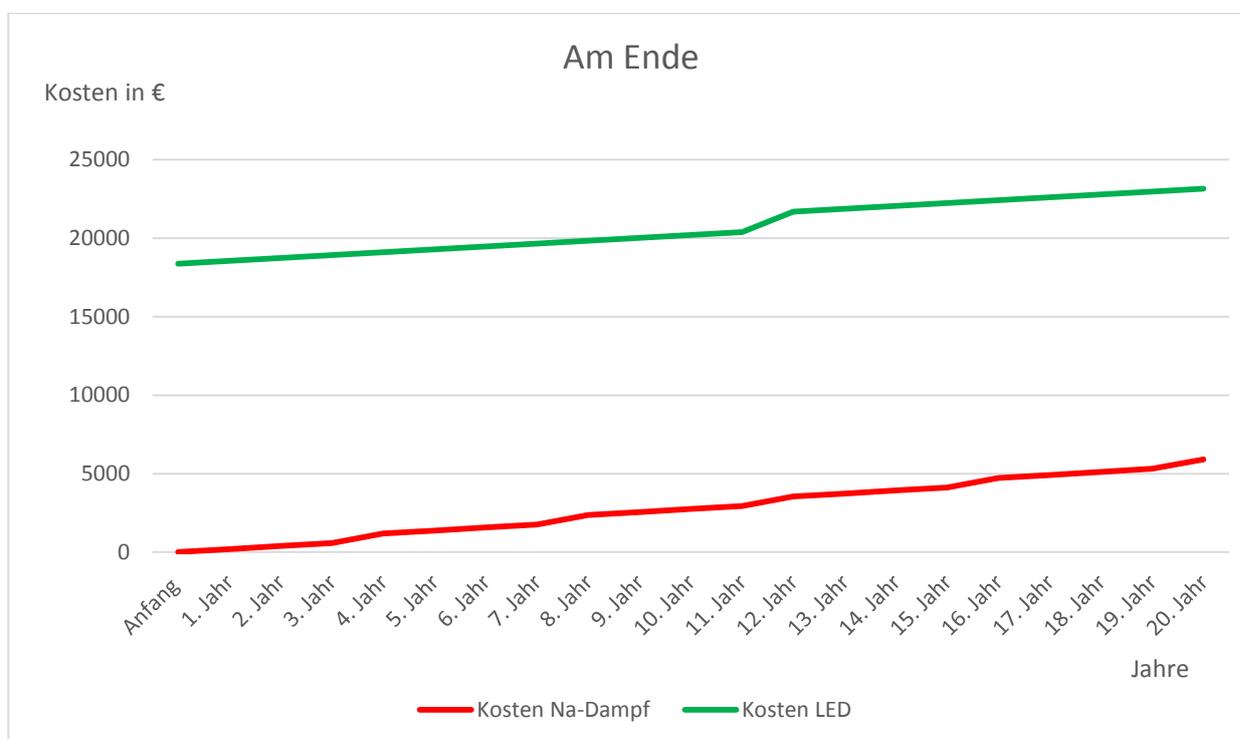


Abbildung 37: Amortisation Straße Am Ende

Tabelle 29: Amortisation Lungwitzer Straße

| KOSTEN   | Kosten Na-Dampf in € | Kosten LED in € |
|----------|----------------------|-----------------|
| Anfang   | 0                    | 1924            |
| 1. Jahr  | 292,57               | 1968,58         |
| 2. Jahr  | 585,14               | 2013,16         |
| 3. Jahr  | 877,71               | 2057,74         |
| 4. Jahr  | 1770,28              | 2102,32         |
| 5. Jahr  | 2062,85              | 2146,9          |
| 6. Jahr  | 2355,42              | 2191,48         |
| 7. Jahr  | 2647,99              | 2236,06         |
| 8. Jahr  | 3540,56              | 2280,64         |
| 9. Jahr  | 3833,13              | 2325,22         |
| 10. Jahr | 4125,7               | 2369,8          |
| 11. Jahr | 4418,27              | 2414,38         |
| 12. Jahr | 5310,84              | 2658,96         |
| 13. Jahr | 5603,41              | 2703,54         |
| 14. Jahr | 5895,98              | 2748,12         |
| 15. Jahr | 6188,55              | 2792,7          |
| 16. Jahr | 7081,12              | 2837,28         |
| 17. Jahr | 7373,69              | 2881,86         |
| 18. Jahr | 7666,26              | 2926,44         |
| 19. Jahr | 7958,83              | 2971,02         |
| 20. Jahr | 8851,4               | 3015,6          |

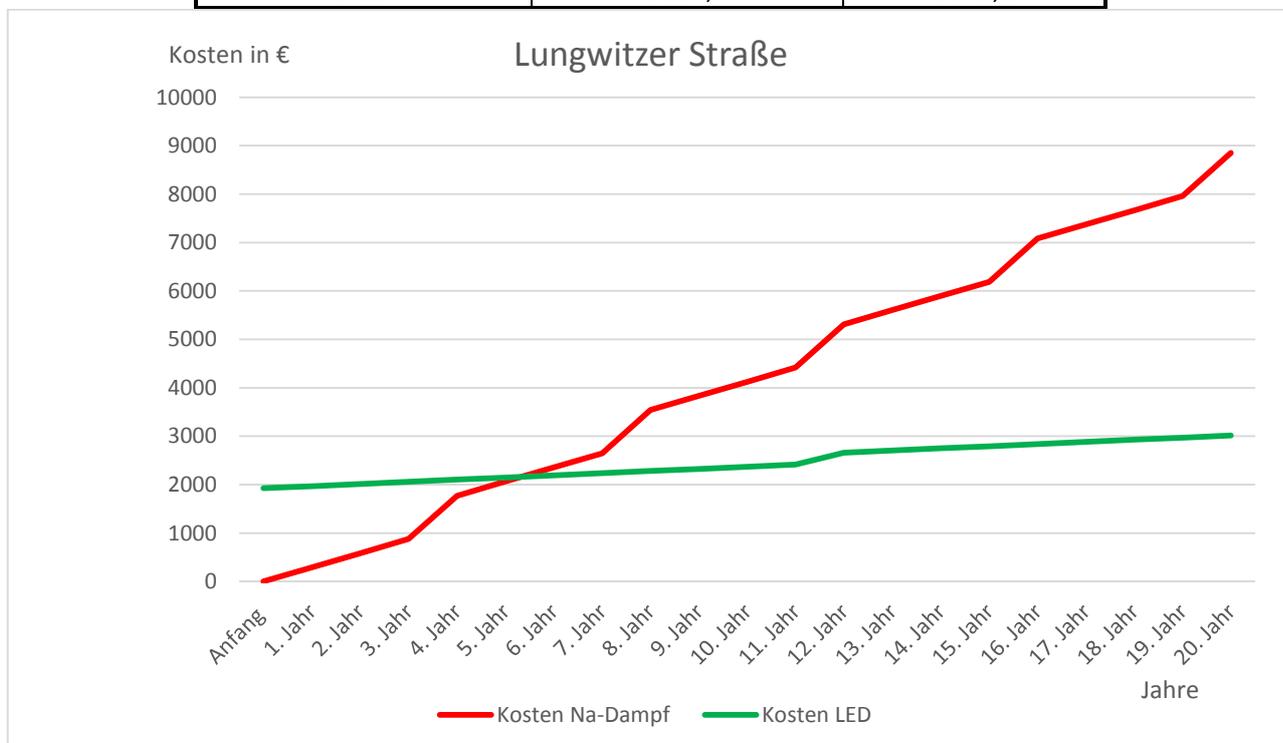


Abbildung 38: Amortisation Lungwitzer Straße

Tabelle 30: Amortisation Färberstraße

| KOSTEN   | Kosten Na-Dampf in € | Kosten LED in € |
|----------|----------------------|-----------------|
| Anfang   | 0                    | 11544           |
| 1. Jahr  | 146,29               | 11744,62        |
| 2. Jahr  | 292,58               | 11945,24        |
| 3. Jahr  | 438,87               | 12145,86        |
| 4. Jahr  | 885,16               | 12346,48        |
| 5. Jahr  | 1031,45              | 12547,1         |
| 6. Jahr  | 1177,74              | 12747,72        |
| 7. Jahr  | 1324,03              | 12948,34        |
| 8. Jahr  | 1770,32              | 13148,96        |
| 9. Jahr  | 1916,61              | 13349,58        |
| 10. Jahr | 2062,9               | 13550,2         |
| 11. Jahr | 2209,19              | 13750,82        |
| 12. Jahr | 2655,48              | 25951,44        |
| 13. Jahr | 2801,77              | 26152,06        |
| 14. Jahr | 2948,06              | 26352,68        |
| 15. Jahr | 3094,35              | 26553,3         |
| 16. Jahr | 3540,64              | 26753,92        |
| 17. Jahr | 3686,93              | 26954,54        |
| 18. Jahr | 3833,22              | 27155,16        |
| 19. Jahr | 3979,51              | 27355,78        |
| 20. Jahr | 4425,8               | 27556,4         |

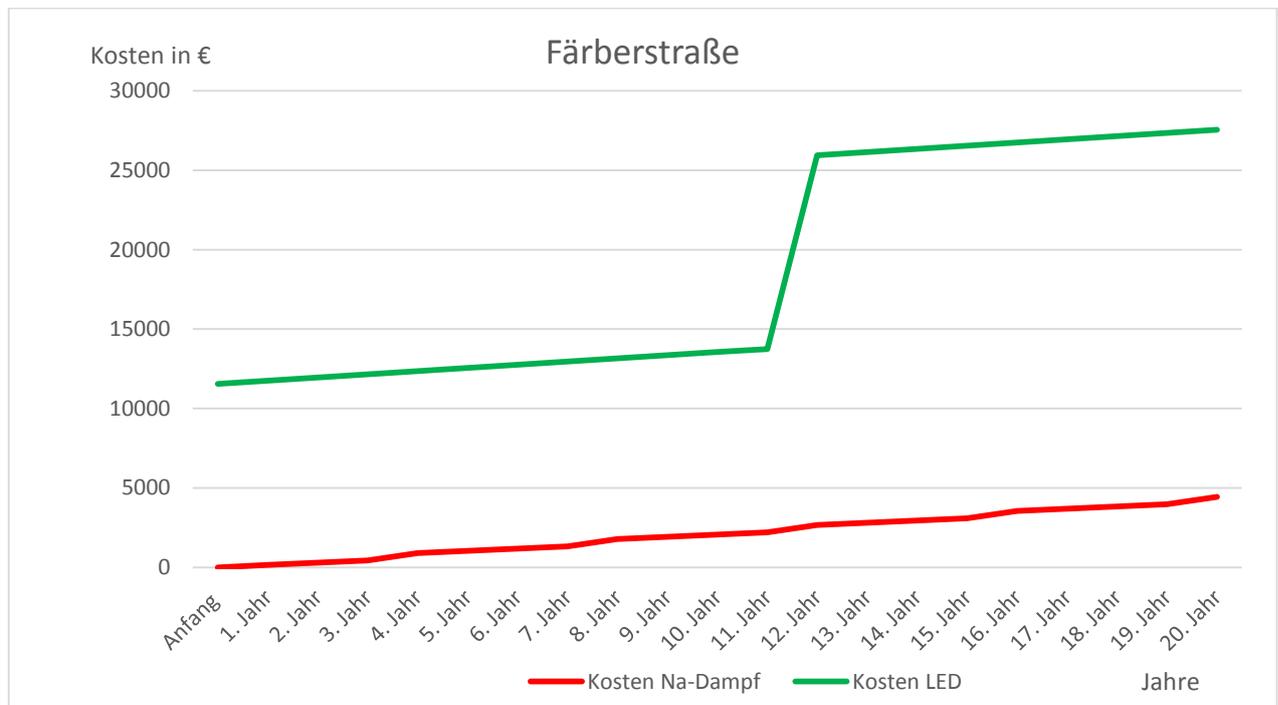


Abbildung: 39 Amortisation Färbestraße

Tabelle 31: Gleichzeitigkeitsfakoren / Bedarfsfaktor

|                                     |               |
|-------------------------------------|---------------|
| Einfamilienhäuser                   | 0,4 bis 0,5   |
| Hotels, Pensionen                   | 0,6 bis 0,8   |
| kleine Büros                        | 0,5 bis 0,7   |
| große Büros                         | 0,7 bis 0,8   |
| Ladengeschäfte                      | 0,5 bis 0,7   |
| Kaufhäuser                          | 0,7 bis 0,9   |
| Schulen                             | 0,6 bis 0,7   |
| Krankenhäuser                       | 0,5 bis 0,75  |
| Restaurants                         | 0,6 bis 0,8   |
| Versammlungsräume                   | 0,6 bis 0,8   |
| Bäcker                              | 0,4 bis 0,8   |
| Fleischer                           | 0,25 bis 0,8  |
| Arztpraxen                          | 0,5 bis 0,8   |
| Sport- und Freizeiteinrichtungen    | 0,5 bis 0,8   |
| Großküchen                          | 0,6 bis 0,8   |
| Wäschereien                         | 0,5 bis 0,9   |
| Bauanschlüsse                       | 0,2 bis 0,8   |
| Bauunternehmen                      | 0,2 bis 0,4   |
| Schlossereien                       | 0,2 bis 0,6   |
| Tischlereien                        | 0,2 bis 0,7   |
| Maschinenbau                        | 0,25          |
| Papier- und Zellstofffabrik         | 0,5 bis 0,7   |
| Nahrungsmittelindustrie             | 0,7 bis 0,9   |
| Textil-industrie                    | 0,6 bis 0,75  |
| Zementwerke                         | 0,8 bis 0,9   |
| Landwirtschaft (Tierproduktion)     | 0,2 bis 0,8   |
| Landwirtschaft (Pflanzenproduktion) | 0,35 bis 0,85 |
| Verkehrsanlagen (Rolltreppen o.ä.)  | 1             |
| Aufzüge                             | 0             |
| Beleuchtung Straßentunnel           | 0,5           |
| Sicherheitsstromversorgung          | 1             |

Straßenbeleuchtung – Nennleuchtdichte in  $\text{cd/m}^2$

Tabelle 32: Nennleuchtdichte Quelle: Vorlesungsunterlagen

| Straßenquerschnitt                     | mit Mittelstreifen |            |            |        | ohne Mittelstreifen |            |            |        |        |
|--|--------------------|------------|------------|--------|---------------------|------------|------------|--------|--------|
|  | 900                | 600        | 200        | 200    | 600                 | 300        | 100        | 100    | 100    |
| Verkehrsstärke bei Dunkelheit in Kfz/h | 900                | 600        | 200        | 200    | 600                 | 300        | 100        | 100    | 100    |
| Überschreitung in h/a                  | $\geq 200$         | $\geq 300$ | $\geq 300$ | $<300$ | $\geq 200$          | $\geq 300$ | $\geq 300$ | $<300$ | $<300$ |
| <i>Ortsstraßen</i>                     |                    |            |            |        |                     |            |            |        |        |
| bebaut, ruhender Verkehr auf/an Straße | 2,0                | 2,0        | 1,5        | 1,0    | 2,0                 | 2,0        | 1,5        | 0,5    | 0,3    |
| bebaut, kein ruhender Verkehr          | 1,5                | 1,5        | 1,0        | 0,5    | 2,0                 | 1,5        | 1,0        | 0,5    | 0,3    |
| anbaufrei, kein ruhender Verkehr       | 1,0                | 1,0        | 0,5        | 0,5    | 1,5                 | 1,0        | 0,5        | 0,5    | 0,3    |
| <i>Landstraßen</i>                     |                    |            |            |        |                     |            |            |        |        |
| zul. Geschwindigkeit über 70 km/h      | 1,5                | 1,0        | 0,5        | 0,5    | 1,5                 | 1,0        | 0,5        | 0,5    |        |
| zul. Geschwindigkeit bis 70 km/h       | 1,0                | 0,5        | 0,5        | 0,5    | 1,0                 | 1,0        | 0,5        | 0,5    |        |
| <i>Autobahnen</i>                      |                    |            |            |        |                     |            |            |        |        |
| zul. Geschwindigkeit über 110 km/h     | 1,0                | 1,0        | 1,0        | 1,0    |                     |            |            |        |        |
| zul. Geschwindigkeit bis 110 km/h      | 1,0                | 0,5        | 0,5        | 0,5    |                     |            |            |        |        |

Straßenbeleuchtung – Gleichmäßigkeit der Leuchtdichte  $U_1$

Tabelle 33: Gleichmäßigkeit der Leuchtdichte  $U_1$  Quelle: Vorlesungsunterlagen

| Straßenquerschnitt                     | mit Mittelstreifen |            |            |        | ohne Mittelstreifen |            |            |        |        |
|--|--------------------|------------|------------|--------|---------------------|------------|------------|--------|--------|
|  | 900                | 600        | 200        | 200    | 600                 | 300        | 100        | 100    | 100    |
| Verkehrsstärke bei Dunkelheit in Kfz/h | 900                | 600        | 200        | 200    | 600                 | 300        | 100        | 100    | 100    |
| Überschreitung in h/a                  | $\geq 200$         | $\geq 300$ | $\geq 300$ | $<300$ | $\geq 200$          | $\geq 300$ | $\geq 300$ | $<300$ | $<300$ |
| <i>Ortsstraßen</i>                     |                    |            |            |        |                     |            |            |        |        |
| bebaut, ruhender Verkehr auf/an Straße | 0,7                | 0,7        | 0,6        | 0,6    | 0,7                 | 0,7        | 0,6        | 0,4    | 0,3    |
| bebaut, kein ruhender Verkehr          | 0,6                | 0,6        | 0,6        | 0,5    | 0,7                 | 0,6        | 0,6        | 0,4    | 0,3    |
| anbaufrei, kein ruhender Verkehr       | 0,6                | 0,6        | 0,5        | 0,5    | 0,6                 | 0,6        | 0,4        | 0,4    | 0,3    |
| <i>Landstraßen</i>                     |                    |            |            |        |                     |            |            |        |        |
| zul. Geschwindigkeit über 70 km/h      | 0,6                | 0,6        | 0,6        | 0,6    | 0,6                 | 0,6        | 0,6        | 0,6    |        |
| zul. Geschwindigkeit bis 70 km/h       | 0,6                | 0,6        | 0,5        | 0,5    | 0,6                 | 0,6        | 0,5        | 0,5    |        |
| <i>Autobahnen</i>                      |                    |            |            |        |                     |            |            |        |        |
| zul. Geschwindigkeit über 110 km/h     | 0,7                | 0,7        | 0,7        | 0,7    |                     |            |            |        |        |
| zul. Geschwindigkeit bis 110 km/h      | 0,7                | 0,6        | 0,6        | 0,6    |                     |            |            |        |        |

## Klasse der Blendungsbegrenzung KB

*Tabelle 34: Klasse der Blendungsbegrenzung KB Quelle: Vorlesungsunterlagen*

| Straßenquerschnitt                     | mit Mittelstreifen |       |       |      | ohne Mittelstreifen |       |       |      |      |
|--|--------------------|-------|-------|------|---------------------|-------|-------|------|------|
|  | 900                | 600   | 200   | 200  | 600                 | 300   | 100   | 100  | 100  |
| Verkehrsstärke bei Dunkelheit in Kfz/h | 900                | 600   | 200   | 200  | 600                 | 300   | 100   | 100  | 100  |
| Überschreitung in h/a                  | ≥ 200              | ≥ 300 | ≥ 300 | <300 | ≥ 200               | ≥ 300 | ≥ 300 | <300 | <300 |
| <i>Ortsstraßen</i>                     |                    |       |       |      |                     |       |       |      |      |
| bebaut, ruhender Verkehr auf/an Straße | 1                  | 1     | 1     | 2    | 1                   | 1     | 1     | 2    | 2    |
| bebaut, kein ruhender Verkehr          | 1                  | 1     | 2     | 2    | 1                   | 1     | 2     | 2    | 2    |
| anbaufrei, kein ruhender Verkehr       | 1                  | 1     | 2     | 2    | 1                   | 2     | 2     | 2    | 2    |
| <i>Landstraßen</i>                     |                    |       |       |      |                     |       |       |      |      |
| zul. Geschwindigkeit über 70 km/h      | 1                  | 1     | 2     | 2    | 1                   | 1     | 2     | 2    |      |
| zul. Geschwindigkeit bis 70 km/h       | 1                  | 1     | 2     | 2    | 1                   | 1     | 2     | 2    |      |
| <i>Autobahnen</i>                      |                    |       |       |      |                     |       |       |      |      |
| zul. Geschwindigkeit über 110 km/h     | 1                  | 1     | 1     | 1    | 1                   |       |       |      |      |
| zul. Geschwindigkeit bis 110 km/h      | 1                  | 1     | 1     | 1    | 1                   |       |       |      |      |

*Tabelle 35: Klasse der Blendungsbegrenzung, Quelle: Vorlesungsunterlagen*

### Klasse der Blendungsbegrenzung

|                         | maximale Lichtstärke      |                            |
|-------------------------|---------------------------|----------------------------|
|                         | KB 1                      | KB 2                       |
| für $\gamma = 90^\circ$ | 10 cd/klm<br>max. 500 cd  | 50 cd/klm<br>max. 1000 cd  |
| für $\gamma = 80^\circ$ | 30 cd/klm<br>max. 1000 cd | 100 cd/klm<br>max. 2000 cd |