

Energieoptimierung Gleisfeldbeleuchtung



Autor: Matthias Zurflüh
Betreuer: Volker Wouters
Experten: Stefan Gerber + Daniel Peter

Studiengang: MAS Energieingenieur Gebäude
Klasse: MAS_PASE.1401
Datum: 06. Mai 2016

Schule

Lucerne University of
Applied Sciences and Arts
**HOCHSCHULE
LUZERN**

Technik & Architektur

Auftraggeber



Arbeitgeber



Master-Thesis

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	7
1.1	Ausgangslage	7
1.2	Ziele	7
1.3	Grundlagen	7
1.4	Annahmen und Rahmenbedingungen	8
2	Methodik	8
2.1	Aufnahme Ist-Zustand Rangierbahnhof Basel	8
2.2	Definition der Teilsysteme	9
2.3	Studie Technologievarianten der Teilsysteme	10
2.4	Analyse der Sparpotentiale	14
2.5	Definition der Technischen Lösungen	17
2.6	Ermittlung der Lebenszykluskosten für den RB II	19
3	Resultate	22
3.1	Tätigkeiten im Gleisfeld	22
3.2	Beleuchtungsstärke in Abhängigkeit der Tätigkeiten	22
3.3	Beleuchtungsleistung pro Gleismeter	22
3.4	Energieverbrauch pro Gleismeter und Jahr	23
3.5	Steuerungstechnische Anforderungen	24
4	Diskussion	25
4.1	Entwicklung	25
4.2	Vorgaben der Gleisfeldbeleuchtung	28
4.3	Fazit	29
4.4	Realisierungsvorschlag Rangierbahnhof Basel	30
4.5	Potentialabschätzung Gleisfeldbeleuchtung	31
5	Dank	32
6	Lebenslauf	33
7	Anhang	34
8	Abkürzungsverzeichnis	35
9	Abbildungsverzeichnis	36
10	Tabellenverzeichnis	37
11	Literaturverzeichnis	38
12	Quellenverzeichnis	39

Änderungen

Version	Kapitel	Beschreibung	Datum	Verfasser
1.0		Grundversion	06.05.2016	mzu

Autor / Student

Matthias Zurflüh
Moosstrasse 58
3425 Koppigen
matthias.zurflueh@iub-ag.ch

Schule

Studienleitung MAS Energieingenieur Gebäude
c/o
HSLU
Weiterbildungszentrum
Technikumstrasse 21
6048 Horw
wb.technik-architektur@hslu.ch

Klasse:
MAS_PASE.1401

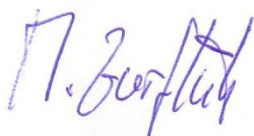
Auftraggeber

SBB AG
Infrastruktur, Energie, Telecom und Elektroanlagen
Industriestrasse 1
3052 Zollikofen

Eidesstattliche Erklärung

Ich erkläre hiermit, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig und ohne unzulässiger Mithilfe Dritter verfasst habe, dass ich alle verwendeten Quellen sowie alle verwendete Literatur angegeben und die Urheberrechtsbestimmungen der Hochschule Luzern respektiert habe.

Bern, 04.05.2016



Matthias Zurflüh

Vertraulichkeit

Die Master-Thesis "Energieoptimierung Gleisfeldbeleuchtung" wurde für die Schweizerischen Bundesbahnen erstellt. Der Bericht inkl. der Anhänge ist vertraulich. Der Bericht wird dem Betreuer der HSLU, den Experten der SBB, der Studienleitung und dem Autor in je 1 Exemplar Papierform abgegeben.

Betreuer HSLU

Volker Wouters
HSLU
Technikumstrasse 21
6048 Horw
volker.wouters@hslu.ch

Experten SBB

Stefan Gerber
SBB AG
Infrastruktur, Energie,
Telecom und Elektroanlagen
Industriestrasse 1
3052 Zollikofen
stefan.gerber@sbb.ch

Daniel Peter
SBB AG
Infrastruktur, Energie,
Telecom und Elektroanlagen
Industriestrasse 1
3052 Zollikofen
daniel.peter3@sbb.ch

Institutionen

Schule

Lucerne University of
Applied Sciences and Arts
**HOCHSCHULE
LUZERN**
Technik & Architektur

Auftraggeber



SBB AG
Infrastruktur, Energie, Telecom
und Elektroanlagen
Industriestrasse 1
3052 Zollikofen

Arbeitgeber

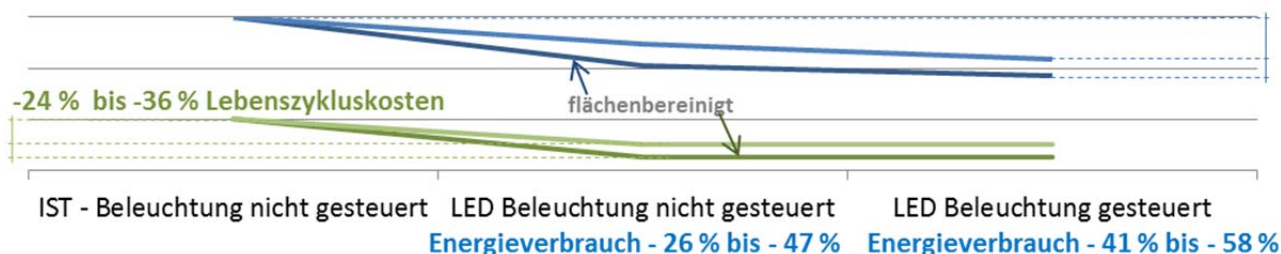


IUB Engineering AG
Belpstrasse 48
Postfach
3000 Bern 14

Studienleitung MAS
Energieingenieur Gebäude
c/o
HSLU
Weiterbildungszentrum
Technikumstrasse 21
CH-6048 Horw
wb.technik-
architektur@hslu.ch

Zusammenfassung

In der Energiestrategie der SBB kommt der Steigerung der Energieeffizienz und somit dem Energiesparen eine Schlüsselrolle zu. Daher werden sämtliche bestehenden Anlagen der SBB, die Energie verbrauchen analysiert und auf Potenziale geprüft. Im Rahmen der Masterarbeit wurde das Potential der Gleisfeldbeleuchtung zur Effizienzsteigerung untersucht und entsprechende Vorgaben für Beleuchtungsstärke und Energieverbrauch erarbeitet. Dazu wurde eine Aufnahme des Ist-Zustands des Rangierbahnhofs Basel (RB) durchgeführt und mögliche Sparpotentiale evaluiert. Für die Teilsysteme Leuchte, Kommunikation Feldebene und Sensorik wurde mittels Nutzwertanalyse ein Vergleich der definierten Technologievarianten durchgeführt und Vorgaben für die Planung und Realisierung definiert. Für die gewählten Teilsysteme wurden die Lebenszykluskosten über 25 Jahre pro Variante berechnet. Mittels Würfelmatrix wurden aus 48 möglichen Kombinationen die drei Bestvarianten evaluiert. Die Evaluation erfolgte für den Neubau der Anlage sowie den Ersatz der Lichtpunkte. Aus den bestplatzierten Varianten, wurden drei Realisierungsvorschläge für den RBII definiert. Diese wurden im Rahmen der Vorstudie für den RBII angewendet. Pro Variante wurden objektbezogen die Lebenszykluskosten ermittelt und verglichen. Die drei Varianten der Vorstudie unterscheiden sich primär in der Kommunikation auf der Feldebene und der Sensorik. Für die Leuchte ist aus energetischer Sicht die LED-Leuchte immer zu bevorzugen. Aus wirtschaftlicher Sicht ist der Einsatz einer Metaldampfleuchte bei einer Betriebsdauer von < 800 h pro Jahr wirtschaftlicher als die LED. Für die Kommunikation der Feldebene wurden die Varianten "Energie schalten", Übertragung des DALI-Bussignals drahtgebunden sowie die Übertragung des DALI-Signals mittels Funkstrecke untersucht. Die ermittelten Lebenszykluskosten während 25 Jahren liegen für alle drei Varianten im Bereich < 2 % Kostenunterschied und damit weit unter der Genauigkeit der Kostenschätzung von +/- 30 %. Dadurch wird die Wahl der zu realisierenden Lösung aufgrund der nicht monetären Kriterien aus der Nutzwertanalyse entscheidend beeinflusst. Aufgrund des günstigsten Kosten-Nutzen-Verhältnisses ist die Variante mit der Übertragung des DALI-Signals über das Energieversorgungskabel ab dem Elektroverteilsraum die heute zu realisierende Variante. Für die Sensorik ist wenn möglich ein ohnehin bestehendes System zu verwenden, damit keine zusätzlichen Kosten zulasten der Beleuchtungsanlage anfallen. Dabei ist eine Kombination von mehreren Sensorvarianten sinnvoll, weil dadurch eine optimale Bedarfserfassung möglich ist. Aufgrund der tiefen Energiepreise und der steigenden Lichtausbeute der LED Leuchten, steigt der Kostendruck auf die Beleuchtungssteuerung weiter an. Die grösste Energieeinsparung bei der Gleisfeldbeleuchtung kann mit dem Wechsel auf eine LED Leuchte erreicht werden. Mit einer bedarfsgerechten Steuerung kann in Abhängigkeit der Nutzung 20 % Energie eingespart werden. Jedoch werden die eingesparten Energiekosten bei einer Lichtausbeute von 100 lm/W und einem Energiepreis von durchschnittlich 0.14 CHF/kWh für die Kommunikation und Sensorik benötigt. Damit die Beleuchtungssteuerung aufgrund der Energieeinsparung über den Lebenszyklus refinanziert werden kann, sollten die Kosten für Kommunikation und Sensorik während 25 Jahre < CHF 200.- pro Lichtpunkt betragen. Aufgrund der aktuellen Entwicklung mit IoT und LORA wird das Lichtmanagement in Zukunft an Bedeutung gewinnen. Eine bedarfsgerechte Steuerung ist ab 2'000 Betriebsstunden der Beleuchtung pro Jahr zu realisieren. Die Systeme Kommunikation, Sensorik und Lichtmanagement sind aktuell in einem Technologiewandel, welcher zur Folge hat, dass in den kommenden drei Jahren neue Systeme auf dem Markt erhältlich sind.



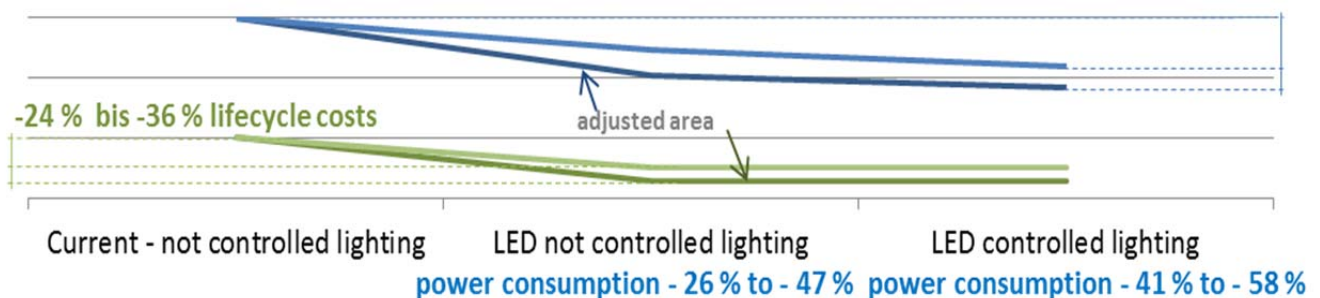
Executive Summary

To increase energy efficiency and thus to save energy plays a key role in the SBB energy strategy. Therefore, all existing SBB plants that consume energy will be analyzed and evaluated for potential. As part of the master's thesis, the potential of the track field lighting to improve efficiency was investigated and corresponding guidelines for illuminance and power consumption were defined. To do this, the actual state of the marshalling yard of Basel (RB) was determined and possible savings were evaluated. Cost-benefit analyses of the defined technology variants were conducted for the subsystems light, field communication and sensor systems. Then, specifications for planning and construction were defined.

For the selected partial systems, life-cycle costs were calculated for the next 25 years for each variant. Using cube matrix, the three best options were evaluated from 48 possible combinations. The evaluation was carried out for the new construction of the plant as well as the replacement of the light points. From the top ranked variants three implementation proposals for the RBII were defined. These have been applied to the RBII in the context of the preliminary study. For each variant, the lifecycle costs were determined and compared. The three variants of the preliminary study differ primarily in the communication on the field level and the sensor. For the light, the LED light is always preferable in terms of energy. From an economic perspective, the use of a metal vapor lamp with an operating time of < 800 hours per year is cheaper than the LED. For the communication of the field level the variants were "Energy switch", transfer of the DALI bus signal by wire and the transmission of the DALI signal via radio link.

The cost difference of the determined life cycle costs for the next 25 years are in the range < 2 % for all three variants and well below the accuracy of the cost estimates by +/-30 %. So the choice of the solution to be realized is heavily influenced by the non-monetary criteria of the cost-benefit analysis. Due to cost benefit ratio, the variant with the transfer of the DALI signal via power supply cable from the electrical distribution is the variant to be realized today. For the sensor, an already existing system should be used so that no additional cost at the expense incurred the lighting system. A combination of multiple sensor types is useful because this allows an optimal detection. Due to the low energy prices and the rising light efficiency of the LED, the cost pressure on the lighting control will increase. The largest energy savings in the track field lighting can be achieved by changing to a LED lamp. Depending on the use up to 20% energy savings are possible with a needs-based control. However, the saved energy costs with a luminous efficacy of 100 lm/W and an energy price of an average 0.14 CHF/kWh are needed for communication and sensor technology. So that the lighting control to be refinanced through energy savings over the life cycle the cost of communications and sensor technology should amount to < CHF 200 per light point during 25 years.

Due to the current development with IoT and LORA, lighting management will become more important in the future. A demand-oriented control should be implement at 2'000 operating hours of lighting a year. The three systems communication, sensors and lighting management are currently in a technological change, which will result that new systems being available on the market in the next three years.



1 Einleitung

1.1 Ausgangslage

In der Energiestrategie [1] der SBB kommt der Steigerung der Energieeffizienz und somit dem Energiesparen eine Schlüsselrolle zu. Bis zum Jahr 2025 will die SBB nur noch mit Strom aus erneuerbaren Energien fahren. Dafür will sie rund 20 Prozent des prognostizierten Jahresverbrauchs – 600 Gigawattstunden oder den Stromverbrauch von rund 150'000 Haushalten – einsparen.

Um dieses ambitionierte Ziel zu erreichen, müssen sämtliche bestehenden Anlagen die Energie produzieren, übertragen oder verbrauchen analysiert und auf Potenziale geprüft werden. Das Portfolio innerhalb der SBB ist gross und reicht von Wasserkraftwerken über Immobilien bis hin zum Rollmaterial.

Vom Gesamtenergieverbrauch (Elektrizität) der SBB von rund 2'600¹ GWh pro Jahr entfallen rund 10 % auf den Bereich Gebäude und Anlagen. Darin enthalten ist unter anderem die Beleuchtung der Gleisfeldanlagen. Die SBB betreiben ca. 22'000 Lichtpunkte im Gleisbereich mit einem jährlichen Energieverbrauch von rund 15 GWh. Davon entfallen rund 4'000 Leuchten auf die vier Rangierbahnhöfe Basel, Chiasso, Lausanne und Limmattal.

Im Rahmen der Masterarbeit sind zur Effizienzsteigerung der Gleisfeldbeleuchtung entsprechende Vorgaben zu erarbeiten und zu definieren. Es ist ein Vorschlag für die Umsetzung des ermittelten Energiesparpotentials, unter Berücksichtigung der notwendigen Investitionskosten, aufzuzeigen.

1.2 Ziele

Zur Effizienzsteigerung der Gleisfeldbeleuchtung werden im Rahmen dieser Arbeit folgende Vorgaben erarbeitet und definiert:

- Tätigkeiten im Gleisfeld
- Beleuchtungsstärke in Abhängigkeit der Tätigkeiten und Gleisbelegung
- Beleuchtungsleistung pro Gleismeter
- Energieverbrauch pro Gleismeter und Jahr
- Steuerungstechnische Anforderungen

Anhand einer Vorstudie für den Ersatz der Gleisfeldbeleuchtung des Rangierbahnhofs Basel, werden die Optimierungspotentiale eruiert. Unter Berücksichtigung des Energieverbrauchs und der Lebenszykluskosten folgt ein Vorschlag für die SBB-internen Vorgaben der Gleisfeldbeleuchtung.

1.3 Grundlagen

Basierend auf den folgenden Grundlagen wurde die Arbeit erstellt:

- SN EN 12464-2 Beleuchtung von Arbeitsstätten - Teil 2: Arbeitsplätze im Freien [1]
- Regelwerk SBB I-50103, Beleuchtung der Bahnhöfe, Gleisfelder und Tunnel [2]
- CEN/TR 13201-1 Strassenbeleuchtung - Teil 1: Auswahl der Beleuchtungsklassen [3]
- SN EN 13201-2 Strassenbeleuchtung - Teil 2: Gütemerkmale [4]
- SIA 491 Vermeidung unnötiger Lichtemissionen im Aussenraum [5]

Weiterführende Literatur und Quellen sind im Bericht referenziert und in den entsprechenden Verzeichnissen am Schluss des Dokuments aufgeführt.

Der Infrastrukturplan (Anhang 10) des Rangierbahnhofs Basel wurde von der SBB für die Arbeit elektronisch zur Verfügung gestellt. Ebenso das Dokument der Plattformenbeleuchtungen² der SBB.

Zudem wurden zur Ermittlung von Kosten und Technologievarianten Unternehmengespräche mit Elektron, Phoenix und Sick durchgeführt. Im Weiteren wurden Preisanfragen bei Wago, Osram, Tridonic und Virtual Extension durchgeführt.

1.4 Annahmen und Rahmenbedingungen

- Die Auswahl von Systemkomponenten für den Variantenvergleich erfolgt in Absprache mit der SBB. Es werden nur marktübliche Technologien miteinander verglichen.
- Die Gleisfeldbeleuchtung wird als eigenständiges System mit einer Schnittstelle zum übergeordneten Leitsystem betrachtet. Die Schnittstelle zum LSS ist seitens SBB definiert.
- Die Kommunikationsschnittstelle zwischen Betriebsgerät und Feldbus wurde seitens SBB mit dem DALI-Bus vorgegeben.
- Lichtmanagementsysteme zur Beleuchtungssteuerung werden nicht untersucht. Im Rahmen der Vorstudie werden die Kosten für die zentrale Steuereinheit (Master) als Blackbox definiert.
- Allfällige bauliche Veränderungen im Sinne einer Anpassung der Anzahl Rangiergeleise werden nicht berücksichtigt. Basis für die Vorstudie ist der Ersatz der Beleuchtungsanlage auf dem RBII gemäss IST-Situation.
- Allfällige widersprüchliche Vorgaben der Beleuchtungsstärke zur SUVA/EKAS werden nicht weiter untersucht. Zur Definition der Beleuchtungsstärken werden die Normen der Lichttechnik [1-4] hinsichtlich ausreichender Beleuchtung betreffend Arbeitssicherheit nicht in Frage gestellt.

2 Methodik

Für die Zielerreichung wurde folgendes Vorgehen gewählt:

- Aufnahme Ist-Zustand Rangierbahnhof Basel
- Definition der Teilsysteme
- Studie Technologievarianten der Teilsysteme
- Analyse der Sparpotentiale für die Beleuchtung des RBII
- Definition der Technischen Lösungen für die Erneuerung der Beleuchtung des RBII
- Ermittlung der Lebenszykluskosten während 25 Jahren für die Beleuchtung des RBII

Für die Berechnung der Lebenszykluskosten und dem Vergleich der Technologievarianten wurde ein Excel-tool entwickelt.

2.1 Aufnahme Ist-Zustand Rangierbahnhof Basel

Zur Aufnahme des Ist-Zustands wurde eine Begehung vor Ort und ein Interview mit dem Betriebspersonal durchgeführt. Das Interviewdokument ist im Anhang 1 enthalten.

2.1.1 Infrastruktur

Der Rangierbahnhof ist funktionell in den RBI für den Nord-Süd Verkehr und den RBII für den Süd-Nord Verkehr unterteilt. Der betriebliche Ablauf auf beiden RB's ist identisch.

Der RBI wurde im Bereich Ablaufberg und Rangierbereich in den Jahren 2010 - 2012 vollständig erneuert. Nebst den Trassen und der Rangiertechnik wurde auch die Beleuchtung erneuert.

Die bestehende Beleuchtung auf dem RBII und den Ein- und Ausfahrtsbereichen auf dem RBI und dem Transitbereich ist mit 824 Stk. 150 W Natriumdampflampen realisiert. Die Leuchten sind auf den Fahrleitungsmasten 12 m - 14 m über der Gleisanlage angeordnet. Auf dem sanierten Teil des RBI wurden 35 neue Hochmasten mit einer Höhe von 30 m erstellt. An diese Hochmasten wurde pro Masten vier neue Halogen-Metaldampflampen à 1 kW montiert. Die Beleuchtung wird mittels Dämmerungsschalter ein- und ausgeschaltet.

Fläche Rangierbahnhof	ca. 1 km ²
Länge	ca. 4 km
Gleismeter	Total:158.8 km, 17.7 km W&T Wartungs- und Transitbereich 74.3 km RBI Nord-Süd, 66.8 km RBII Süd-Nord
Lichtpunkte	1'147 Stk (245 Stk W&T, 267 Stk RBI, 635 Stk RBII)
Installierte Bel. Leistung	319.3 kW (51.6 kW W&T, 157.9 kW RBI, 109.8 kW RBII)
Leistung pro Lichtpunkt	Metaldampf 1 kW 140 Stk / 1224 Stk NA 150 W

Energieoptimierung Gleisfeldbeleuchtung

Energieverbrauch	Total RB inkl. Rangiertechnik und Gebäude: 5.5 GWh (2014) Beleuchtungsanlage berechnet unter Annahmen: 955'608 kWh/a 154'352 kWh/a W&T, 472'628 kWh/a RBI, 328'628 kWh/a RBII Total Beleuchtung RB entspricht 17.5 % von Total EVB RB 2014
Steuerung	1 Dämmerungsschalter - Ansteuerung Energieversorgung über LSS
LCC	CHF 8'818'212.-

Tabelle 1: Infrastruktur Beleuchtungsanlage Rangierbahnhof Basel - Ist-Situation

Die Stromversorgung der Beleuchtung erfolgt ab dem öffentlichen Energieversorgungsnetz der EBM. Über zwei Mittelspannungsanschlüsse 13 kV wird die 50 Hz Stromversorgung des RB Basel ab dem Netz der EBM sichergestellt. Energiemessstellen gibt es daher nur auf der Mittelspannungsebene bei den beiden Mittelspannungsanschlüssen. Die Energieverteilung auf dem RB Basel erfolgt in einem MS-Ring, an welchem die Trafostationen angeschlossen sind.

Die Beleuchtung RBI und RBII wird direkt ab den Trafostationen mit Energie versorgt. Mittels eines Dämmerungsschalters wird die gesamte Beleuchtung ein- und ausgeschaltet. Die Schaltelemente (Relais) für die Beleuchtung sind in der NS-Hauptverteilung der Trafostationen eingebaut.

2.1.2 Tätigkeiten und Bereiche im Gleisfeld

Für die Beurteilung von allfälligen Energiesparpotentialen mittels Regelung der Beleuchtungsanlage, ist die Nutzung des Rangierbahnhofs von zentraler Bedeutung. Daher wurden die unterschiedlichen Bereiche der Gleisfelder besichtigt und tabellarisch erfasst. Im Weiteren wurden die Tätigkeiten, welche vom Rangierpersonal im Gleisfeld ausgeführt werden untersucht. Erfasst wurde auch die Belegung der Gleise durch Güterwagons. Aufgrund der erfassten Kriterien, wurde die Grundlage für die Definition der Beleuchtungsstärke pro Tätigkeit und Bereich im Gleisfeld erarbeitet. Die Weiterverwendung der Kriterien ist im Kapitel 3.1 ersichtlich.

2.1.3 Definition Projektperimeter für die Vorstudie

Die Vorstudie wird nicht für den gesamten Perimeter des Rangierbahnhofs durchgeführt. Die ermittelte Technologievariante wird anhand des RBII mittels Vorstudie an einem konkreten Objekt umgesetzt. Für die Beleuchtungsberechnungen werden Gleisbereiche im RBII definiert.

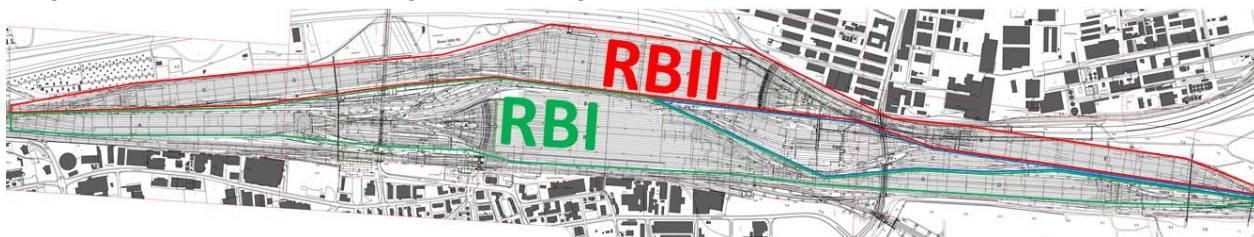


Abbildung 1: Rangierbahnhof Basel

2.1.4 Definition Gleismeter

Für die weiteren Betrachtungen und Vergleiche ist eine Bezugsgrösse erforderlich. Aufgrund der Begehung vor Ort wurde als praxisnahe Einheit ein Gleismeter definiert. Der mittlere Gleisabstand auf dem Rangierbahnhof beträgt 4.00 m. Ein Gleismeter (GLM) besteht somit aus einer Fläche von $1.00 \text{ m} \times 4.00 \text{ m} = 4 \text{ m}^2$.

2.2 Definition der Teilsysteme

Das System Gleisfeldbeleuchtung besteht aus den Teilsystemen Leuchte, Kommunikation Feldebene, Sensorik und der Beleuchtungssteuerung. Die weiteren Überlegungen im Bericht basieren auf der Definition, dass diese Teilsysteme unabhängig voneinander ihre Funktion erfüllen und beschafft werden können.

Das Teilsystem Beleuchtungssteuerung wird im vorliegenden Bericht nicht ausführlich behandelt. Wo erforderlich, wird das System als Steuerungsmaster (Blackbox) mit Anbindung zum Übergeordneten Leitsystem der SBB (LSS) definiert.

Energieoptimierung Gleisfeldbeleuchtung

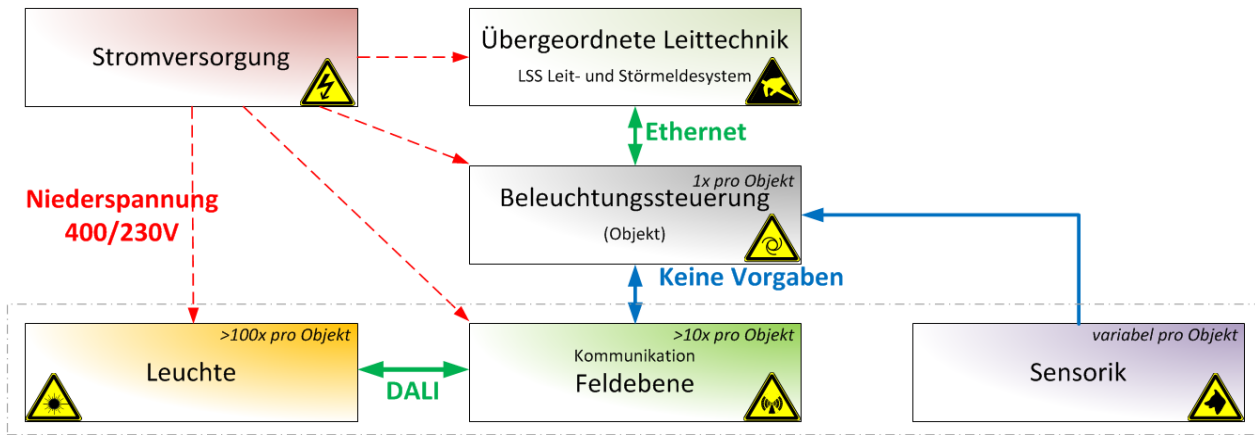


Abbildung 2: Teilsysteme der Gleisfeldbeleuchtung

Die Systeme Stromversorgung und LSS werden nicht betrachtet und als bestehend vorausgesetzt.



Abbildung 3: Eigenschaften der Teilsysteme

Aufgrund der Menge von Eigenschaften, welche jedes Teilsystem hat, kann im vorliegenden Bericht nur auf die wesentlichen eingegangen werden. Im Anhang 2 sind unter der Beschreibung der Technologievarianten der Teilsysteme die erwähnten Eigenschaften kurz erläutert.

2.3 Studie Technologievarianten der Teilsysteme

2.3.1 Technologievergleich der Teilsysteme

Im Rahmen des Variantenstudiums der Technologien wurde für die Teilsysteme Leuchte, Kommunikation Feldebene und Sensorik ein Variantenvergleich durchgeführt. Für das Teilsystem Beleuchtungssteuerung wurde kein Variantenvergleich durchgeführt. Die Beleuchtungssteuerung wird in den weiteren Überlegungen als Blackbox mit einem definierten Einheitspreis betrachtet. Der Einheitspreis ist in der Kommunikation Feldebene enthalten. Allfällige Schnittstellen zur Beleuchtungssteuerung sind in den Teilsystemen Kommunikation Feldebene und Sensorik berücksichtigt. Im Anhang 2 sind die definierten Technologien erläutert. Neben dem Lösungsansatz zum Einsatz der Technologie im Rahmen der Gleisfeldbeleuchtung ist eine Grobkostenschätzung mit Angabe über die Herkunft der Daten enthalten. Folgende Technologien wurden für den Vergleich ermittelt:

Leuchte	Kommunikation Feldebene	Sensorik
Halogen-Metaldampf ³	Schalten Energieversorgung	Dämmerungsschalter
LED	Kom. via Energieversorgung	GPS Ortung
Natriumdampf *	CU-Feld-Verkabelung	Anbindung Rangierleitsystem
	RF (868 MHz - 2.4 GHz)	Bewegungsmelder
	GSM	Lasersensor *
	WLAN IEEE 802.11	Radarerfassung *
* Erläuterung graue Markierung Seite 12	LWL-Feld-Verkabelung *	Kameraüberwachung *

Tabelle 2: Berücksichtigte Technologievarianten

2.3.2 Nutzwertanalyse der technischen Varianten

Mittels Nutzwertanalyse gemäss Anhang 3, wurde für die drei untersuchten Teilsysteme eine Vorselektion von Technologien vorgenommen. In der Nutzwertanalyse wurden folgende nicht monetären Kriterien beurteilt:

Kriterium	Beschreibung
Teilsystem Leuchte	
Lichtausbeute System	Die Systemlichtausbeute beschreibt den effektiven Lichtstrom in lm/W welcher von der Leuchte ausgeht. Bei Reflektor Leuchten ist zur Ermittlung des Systemwirkungsgrad der Lichtstrom der Lampe mit dem Leuchten Wirkungsgrad zu multiplizieren.
Farbwiedergabe	Die Farbwiedergabe Ra der Leuchte wird gemäss der DIN Norm 6169 aus 8 Testfarben bestimmt.
Lebensdauer Leuchtmittel	Die Brenndauer des Leuchtmittels in Stunden.
Teilsystem Kommunikation Feldebene	
System und Komplexität	Systemeigenschaften inkl. der erforderlichen Bauteile sowie deren Komplexität.
Zuverlässigkeit und Reaktionszeit	Mögliche Störgrössen, welche einen Einfluss auf die Systemverfügbarkeit haben sowie die Reaktionszeit des Systems für die Übermittlung der Daten.
Nachhaltigkeit der Infrastruktur und Technologie	Beurteilung über die systemunabhängige Weiterverwendung der Netzinfrastruktur sowie der Kostensicherheit (Standardisierung) in die investierte Technologie.
Teilsystem Sensorik	
System	Systemeigenschaften der erforderlichen Bauteile sowie deren Komplexität.
Steuerbarkeit und Auflösung	Steuerbarkeit und Auflösung der Sensorik zur bedarfsgerechten Beleuchtungssteuerung.
Voraussetzungen	Grundvoraussetzungen für die Funktion der Detektion.

Tabelle 3: Nicht monetäre Kriterien

Für alle Teilsysteme wurden folgende monetären Kriterien beurteilt:

Kriterium	Beschreibung
Investitionskosten	Investitionskosten des Teilsystems
Betriebskosten	Jährliche Betriebskosten des Teilsystems

Tabelle 4: monetäre Kriterien

Bewertung	Bedeutung
0	weniger Wichtig
1	gleich Wichtig
2	wichtiger

Tabelle 5: Rangreihverfahren

Die Gewichtung der Kriterien erfolgte nach dem Rangreihverfahren⁴, wobei jedes Kriterium mit dem anderen verglichen und bewertet wurde. Dabei wurde die Bewertung gemäss Tabelle 5 beim Vergleich der Kriterien angewendet: Die Tabellen der Rangreihbewertung und der daraus folgenden Gewichtung sind im Anhang 3 ersichtlich.

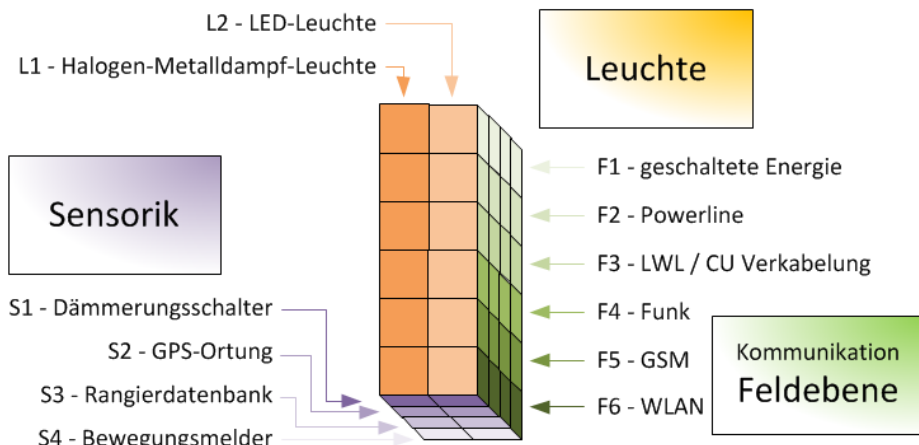
Bei den Leuchten wurde im Rahmen der Ermittlung der Investitions- und Betriebskosten eine Gleichsetzung der Kosten über die Leistung pro Quadratmeter bei 20 Lux vorgenommen.

L1 - Halogen-Metaldampf	L2 - LED	L3 - Natriumdampf
bei E_M 16.6 lx 0.470 W/m ²	bei E_M 20.0 lx 0.250 W/m ²	bei E_M 12.5 lx 0.290 W/m ²
bei E_M 20.0 lx 0.572 W/m ²	bei E_M 20.0 lx 0.252 W/m ²	bei E_M 20.0 lx 0.470 W/m ²
Bereinigungsfaktor 1.22	Bereinigungsfaktor 1.01	Bereinigungsfaktor 1.62

Tabelle 6: Flächenbereinigungsfaktor der Leuchten

Energieoptimierung Gleisfeldbeleuchtung

Damit kann ein Kostenvergleich unter den gleichen Bedingungen für alle Leuchten erfolgen. Daher wurden die Bereinigungs-faktoren pro Leuchte gemäss Tabelle 6 berechnet. Die Relux-Berechnungen für die Grundlage der Flächenbereinigung sind im Anhang 9 enthalten. Aufgrund



der Nutzwertanalyse wurden die Technologien pro Teilsystem gemäss Abbildung 4 evaluiert. Diese Technologien bilden die Grundlage für die weiteren Überlegungen und werden mit der entsprechenden Abkürzung gemäss Abbildung 4 nachfolgend erwähnt. Die in Tabelle 2

Abbildung 4: *Evaluierte Technologien pro Teilsysteme*

grau markierten Technologien sind in der Vorselektion aus folgenden Gründen ausgeschieden.

Natriumdampfleuchte

Die Natriumdampfleuchte hat eine ungenügende Farbwiedergabe und wird daher für Neuanlagen nicht mehr eingesetzt. Ab dem 13.04.2017 tritt die Stufe 3 der EU Richtlinie 2000/55/EG "Energieeffizienzanforderungen an Vorschaltgeräte für Leuchtstofflampen" in Kraft. Diese fordert von der Leuchte als System einen bestimmten Systemwirkungsgrad. Mit elektromagnetischen Vorschaltgeräten kann dieser Systemwirkungsgrad bis zu einer Leistung von 250 W kaum mehr erreicht werden. Daher sind bei neuen Leuchten ≤ 250 W nur noch elektronische Vorschaltgeräte einzusetzen resp. bestehende Leuchten ≤ 250 W mit elektromagnetischen Vorschaltgeräten sind umzubauen.

LWL-Feld-Verkabelung

Die LWL-Feldverkabelung ist vom Aufbau gleich wie die CU-Feldverkabelung. Die Technologie ist bewährt und störungsunempfindlich auf elektromagnetische Einflüsse. Aufgrund der verhältnismässig hohen Kosten bei den LWL-Verbindungsstellen und der theoretischen Lebensdauer von 25 Jahren der LWL Kabel gemäss SIA 197/2, wird aufgrund der anfallenden Investitionskosten die Variante nicht mehr weiter verfolgt (gleiche Bauteile wie F3).

Lasersensor

Der Lasersensor ist ein Liniensensor der vorwiegend für den Perimeterschutz eingesetzt wird. Eine ganzflächige Überwachung mit Lasersensoren ist aufgrund des Erfassungskegels kaum realisierbar. Werden Lasersensoren ohnehin z.B. als Perimeterschutz verwendet, ist eine Anbindung an die Beleuchtungssteuerung möglich.

Radarerfassung

Eine vollflächige Überwachung mittels Radarsensoren ist technisch realisierbar und von hoher Qualität da sie witterungsunabhängig ist. Jedoch können die anfallenden Kosten für die Sensorik nicht mit der realisierbaren Energieeinsparung gerechtfertigt werden. Werden Radarsensoren ohnehin genutzt z.B. zur Erfassung der Gleisbelegung ist eine Anbindung der aufbereiteten Daten an die Beleuchtungssteuerung sinnvoll.

Kameraüberwachung

Kameras benötigen ein minimales Restlicht von 0.5 Lux und sind witterungsabhängig (z.B. Nebel). Im Weiteren ist eine Bildauswertung erforderlich. Die anfallenden Kosten für die Kameras können nicht mit der realisierbaren Energieeinsparung gerechtfertigt werden. Werden Kameras ohnehin z.B. als Objektschutz verwendet, ist eine Anbindung an die Beleuchtungssteuerung mit der erforderlichen Bildauswertung realisierbar.

2.3.3 Ermittlung der Lebenszykluskosten pro Variante

Für die evaluierten Technologievarianten wurden die Lebenszykluskosten auf 25 Jahre ermittelt. Im Rahmen der Nutzwertanalyse wurden nur die Investitionskosten und Prozentual davon die jährlich zu erwartenden Betriebskosten ermittelt. Die nachfolgend ermittelten Lebenszykluskosten berücksichtigen zudem die Wartungskosten aufgrund der erwarteten Lebensdauer der Bauteile. Zudem sind die Unterhaltskosten gemäss Herstellerangaben und Erfahrungswerten der SBB sowie die effektiven Energiekosten berücksichtigt. Im Weiteren sind die Kosten für den Sicherheitsdienst und die Ausserbetriebsetzung enthalten. Nicht enthalten sind Kosten für die Erstellung der Kabelrohr- und Kabelkanalanlagen sowie Kabelschächte und Verteilkabinen. Die Lebenszykluskosten wurden unter den folgenden Rahmenbedingungen der Teilsysteme bestimmt.

Leuchte	Kommunikation Feldebene	Sensorik
<ul style="list-style-type: none"> • Lieferung und Montage der Leuchte • Vorschaltgerät mit DALI-Schnittstelle • Leuchtmittel • Gleichsetzung der Kosten auf E_M 20 lx gemäss Tabelle 6 	<ul style="list-style-type: none"> • Ein bestehender Elektroverteerraum • Verkabelungsabstand Elektroverteerraum Lichtpunkt 250 m • Zwei Lichtpunkte pro Knoten die einzeln angesteuert werden können • Sicherheitsdienst 	<ul style="list-style-type: none"> • Fläche Rangierbahnhof 1 km² • Vollständige Abdeckung der Fläche • Kommunikation mit der Beleuchtungssteuerung

Tabelle 7: Rahmenbedingungen zur Ermittlung der Lebenszykluskosten

Folgende Lebenszykluskosten pro Variante wurden für die Neuerstellung der Beleuchtungsanlage und den Ersatz der Lichtpunkte unter Weiterverwendung der bestehenden Kabelanlage ermittelt.

Variante	Neuerstellung	Ersatz
L1 - Halogen-Metaldampf	CHF 9'671.-	CHF 8'899.-
L2 - LED	CHF 6'134.-	CHF 5'825.-
F1 - Schalten der Energieversorgung	CHF 8'710.-	CHF 2'681.-
F2 - Kommunikation über Versorgungskabel	CHF 8'400.-	CHF 3'052.-
F3 - CU-Feld-Verkabelung	CHF 10'057.-	CHF 3'810.-
F4 - RF 868 MHz - 2.4 GHz (nicht IPv6)	CHF 8'679.-	CHF 3'318.-
F5 - GSM	CHF 8'865.-	CHF 3'558.-
F6 - WLAN	CHF 9'238.-	CHF 3'877.-
S1 - Dämmerungsschalter	CHF 2'312.-	CHF 1'827.-
S2 - GPS Ortung	CHF 59'525.-	CHF 54'013.-
S3 - Anbindung Rangierleitsystem	CHF 30'706.-	CHF 3'085.-
S4 - Bewegungsmelder	CHF 346'132.-	CHF 245'132.-

Tabelle 8: Lebenszykluskosten nach Varianten der Teilsysteme

Im Anhang 4 ist die Kostentabelle mit den Lebenszykluskosten nach Varianten der Teilsysteme enthalten. Es wurde eine Berechnung für den Neubau (4a) und eine Berechnung für den Ersatz (4b) erstellt. Darin ist die exakte Herleitung der Zahlen gemäss Tabelle 8 ersichtlich. Die ermittelten Kosten in der Tabelle 8 basieren auf der Annahme, dass pro Feldbusknoten zwei Leuchten angeschlossen werden.

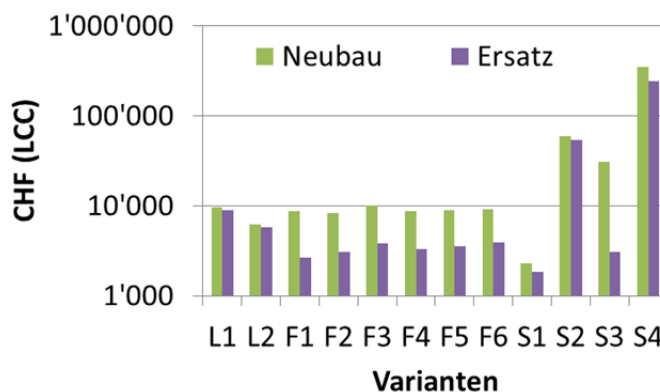


Abbildung 5: LCC Neubau - Ersatz

Energieoptimierung Gleisfeldbeleuchtung

Die Anzahl Lichtpunkte, welche hinter einem Feldbusknoten angeschlossen werden können, hat einen wesentlichen Einfluss auf die Kosten der Feldkommunikation. In Abbildung 6 sind die Auswirkungen pro Variante ersichtlich.

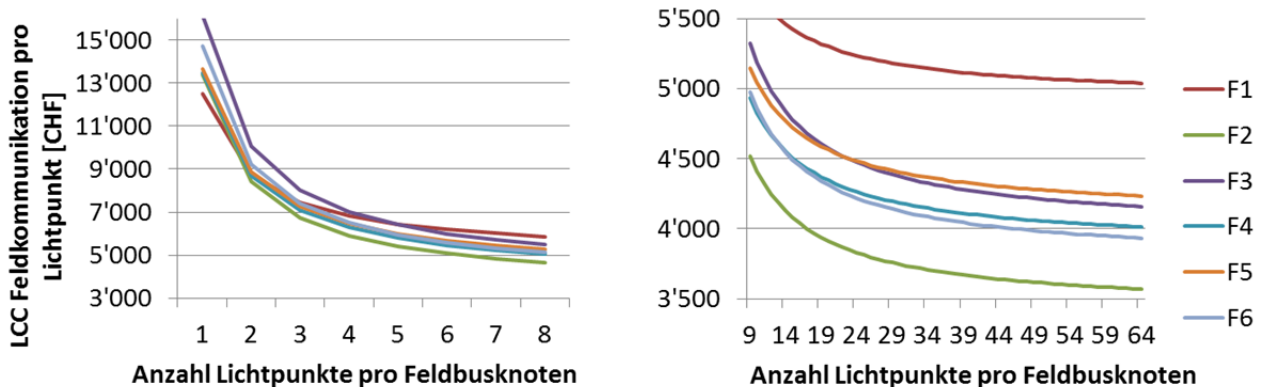


Abbildung 6: LCC pro LP in Abhängigkeit der LP pro Feldbusknoten (Neubau)

Aufgrund der geografischen Anordnung der Leuchten im Gleisfeld, kann im Normalfall mit zwei Leuchten pro Feldbusknoten gerechnet werden. Eine Untersuchung der Lichtpunkte pro Standort ist im Kapitel 2.4.2 enthalten. Für die Definition der Technischen Lösung wurde mit zwei Leuchten pro Feldbusknoten weiter gerechnet.

In der nachfolgenden Abbildung ist die Entwicklung der Kapitalkosten für die drei Teilsysteme ersichtlich. Die Linien zeigen die Kostenentwicklung pro Variante während dem Lebenszyklus.

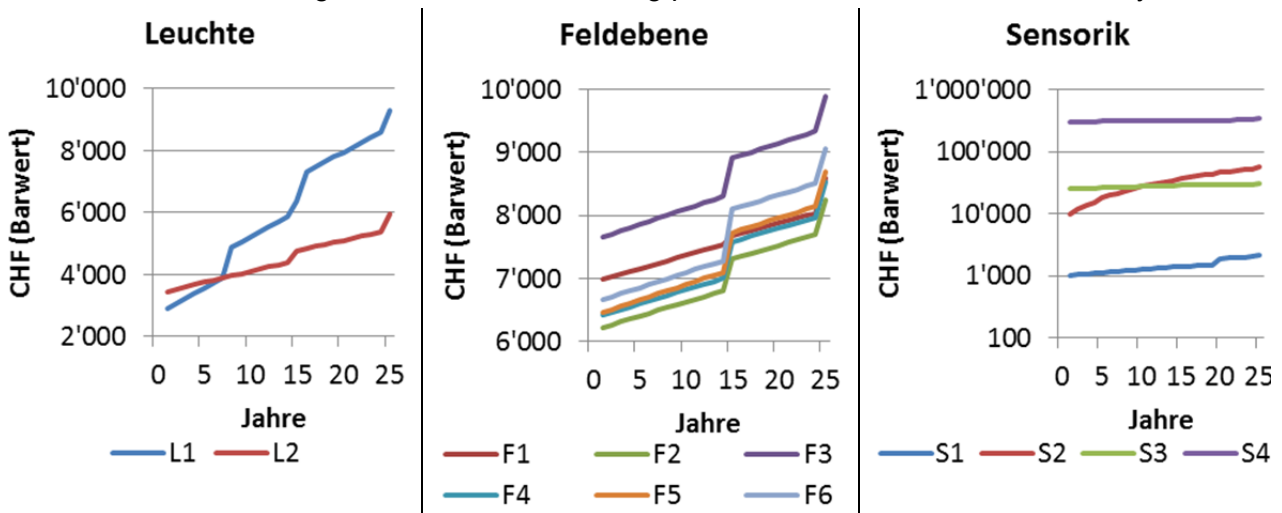


Abbildung 7: Kapitalwertentwicklung der Technologien der Teilsysteme (Neubau)

Die Entwicklung des Kapitalwerts während dem Lebenszyklus, wurde mit dem Kapitalzinssatz von 1.75 % und einer Teuerung von 1.3 % berechnet. Die Zinssätze wurden seitens der SBB vorgegeben.

2.4 Analyse der Sparpotentiale

In den folgenden Kapiteln werden drei Sparpotentiale der Gleisfeldbeleuchtung untersucht, welche einen wesentlichen Einfluss bei der Wahl der Technologievariante haben.

- Energieeinsparung im Gleisfeld
- Anordnung der Lichtpunkte
- Montageort LED-Treiber und Kommunikationseinheit

2.4.1 Energieeinsparung im Gleisfeld

Wesentlich für die Ermittlung der wirtschaftlichsten technischen Lösung ist die erwartete Energieeinsparung. Aufgrund der evaluierten Gleisbereiche bei der Aufnahme des Ist-Zustands (Anhang 1), wurde das mögliche Reduktionspotential der Beleuchtung in Abhängigkeit der Gleisbelegung und Tätigkeiten im Gleisfeld gemäss nachfolgender Tabelle ermittelt.

Energieoptimierung Gleisfeldbeleuchtung

GB	Gleisbereich	pro Gleis	Periodizität	Relevant	Ø red / h
11	Bereitstellungsfläche vor Rangierung	12 Züge pro Tag	2 h pro Zug	1 h / 2h	50 %
5	Abkoppelung	18 h Betrieb pro Tag	6 h Unterbruch tagsüber / 0.5 h Pause nachts	0.5 h / 12h Nacht	4 %
6	Ablaufberg	18 h Betrieb pro Tag	6 h Unterbruch tagsüber / 0.5 h Pause nachts	0.5 h / 12h Nacht	4 %
7	Gleisbremsbereich	18 h Betrieb pro Tag	6 h Unterbruch tagsüber / 0.5 h Pause nachts	0.5 h / 12h Nacht	4 %
1	Gütergleisanlage	3 Züge pro Tag	6 h pro Zugskomposition	3 h / 6h	50 %
2	Auszugsgleis	6 h Belegung / Tag	18 h nicht belegt / Tag	6 h / 12h Nacht	50 %
11	Bereitstellungsfläche vor Ausfahrt RB	12 Züge pro Tag	2 h pro Zug	1 h / 2h	50 %

Tabelle 9: Reduktionspotential der Beleuchtung pro Gleisbereich

Das in Tabelle 9 ermittelte Reduktionspotential pro Gleisbereich, bedarf für eine reale Aussage der tatsächlichen Energieeinsparung einer Bereinigung gemäss nachfolgenden Parametern.

Parameter	Wert
Minderung der Steuerbarkeit aufgrund von drei parallelen Gleisen pro Lichtpunkt.	1/3
Durchschnittliche Auslastung des RB während einem Jahr.	85 %
Durchschnittliche Brenndauer der Beleuchtung pro Tag.	8.2 h
Installierte Leistung pro Gleisbereich.	P_{Inst} kW

Tabelle 10: Relevante Parameter für die Berechnung des Energiesparpotentials

Im Anhang 5 ist die evaluierte Energieeinsparung im Gleisfeld detailliert beschrieben. Aufgrund der Berechnung kann eine mittlere Einsparung von 20 % erreicht werden (nicht Leistungsbereinigt). Unter Berücksichtigung der installierten Leistung pro Gleisbereich (Ist-Zustand) ergeben sich folgende reale Energiesparpotentiale für den Ist-Zustand.

RB - Zone	Installierte Leistung	Energiesparpotential
Wartungs-Transitbereich	51.6 kW	29.2 %
RB I Nord - Süd	157.9 kW	22.5 %
RBII Süd - Nord	109.8 kW	21.1 %
Total RBBS	319.3 kW	23.1 %

Tabelle 11: Energiesparpotential Rangierbahnhof Basel

Basierend auf der Tabelle 11 wurde pro Sensorik-Variante das Energiesparpotential definiert.

Sensorik	Potential	Begründung
S1 - Dämmerungsschalter	0 %	Keine bedarfsgerechte Steuerung möglich
S2 - GPS-Ortung	15 %	Keine Erfassung von nicht registrierten Endgeräten
S3 - Rangierdatenbank	10 %	Nur Güterwagen, keine Personen
S4 - Bewegungsmelder	8 %	Verschattung durch Objekte / nur Bewegungen

Tabelle 12: Energiesparpotential pro Sensorik-Variante

2.4.2 Anordnung der Lichtpunkte

Aus den vorgängig analysierten Daten wurde festgestellt, dass eine bedarfsgerechte Steuerung der Beleuchtung wirtschaftlich ist, wenn die Felderschliessung von Energieversorgung und Feldkommunikation nicht pro Leuchte erfolgt, sondern viele Teilnehmer an einem Feldbusknoten angeschlossen werden können.

Energieoptimierung Gleisfeldbeleuchtung

Nachfolgend wird anhand von zwei Varianten überprüft, ob die Ausleuchtung der Fläche mit vier Leuchten pro Standort realisierbar ist.

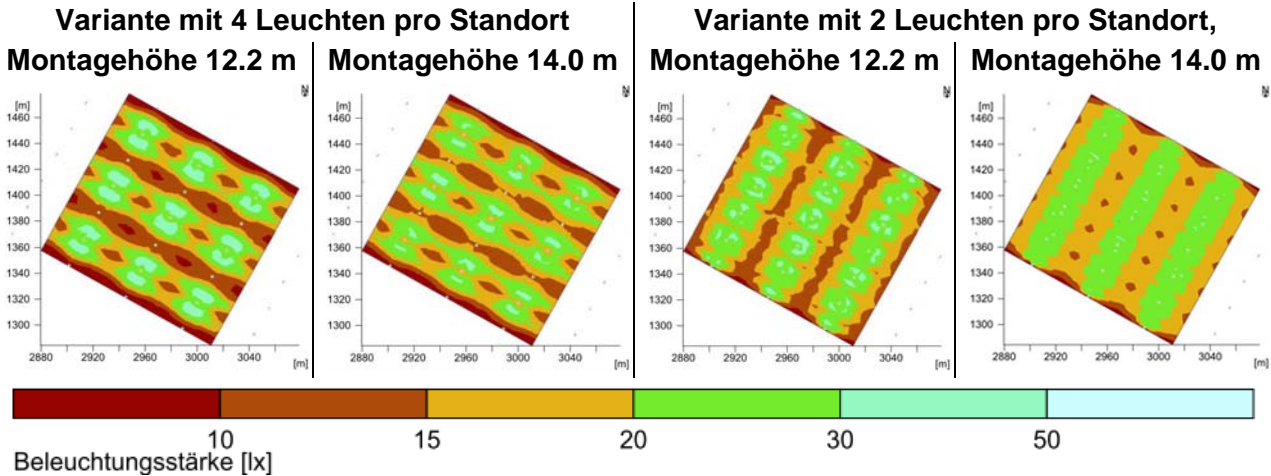


Abbildung 8: Beleuchtung mit 2 und 4 Lichtpunkten pro Standort

Die Beleuchtungsberechnungen wurden in Relux erstellt und sind im Anhang 9, Kapitel 2 enthalten. Der Standortvergleich wurde mit der LED Leuchte GL20 (L2) durchgeführt.

Variante	E_M [lx]	P_{Gesamt} [W]	E_{10} [lx]	P_{10} [W]	$[m^2]$	$[W/m^2]$
4L - 12.2 m	18.9	5'220	10	2'762	20'796	0.133
4L - 14.0 m	18.7	5'220	10	2'791	20'796	0.134
2L - 12.2 m	20.0	5'220	10	2'610	20'796	0.126
2L - 14.0 m	20.1	5'220	10	2'597	20'796	0.125

Tabelle 13: Vergleich der Anordnung der Lichtpunkte

Aufgrund des Standortvergleiches ist ersichtlich, dass es möglich ist das Gleisfeld auch mit einer Anordnung von vier Leuchten pro Standort auszuleuchten. Es ist jedoch zu beachten, dass bei Vergrößerung der Leuchtenabstände die Gleichmässigkeit reduziert wird. Im Weiteren sind die Bereiche in Mastnähe kaum abgrenzbar, wenn vom Mast entfernte Bereiche beleuchtet werden. Die Steuerbarkeit der Beleuchtung in Mastnähe kann dadurch nicht optimal erfolgen. Im Weiteren wird durch die Beleuchtung mit 4 Leuchten pro Standort mehr Energie benötigt als mit zwei. Die Lichtpunkthöhe hat mehr Einfluss auf die Gleichmässigkeit als auf den Energieverbrauch.

2.4.3 Montageort LED-Treiber und Kommunikationseinheit

Bei der Montage von Treiber und Kommunikationseinheit in der Leuchte oder am Mastfuss fallen unterschiedliche Kosten an. Abhängig von der gewählten Feldbusvariante ergeben sich folgende Unterschiede der Lebenszykluskosten.

Montage	EV schalten	PLC/DALI	Feld-Verk.	Funk	GSM	WLAN
Montage von zwei Leuchten pro Standort (Kosten Neubau in CHF)						
Mast Fuss	8'710.-	8'400.-	10'057.-	8'679.-	8'865.-	9'238.-
Leuchte	8'509.-	8'320.-	10'049.-	8'607.-	8'794.-	9'165.-
Differenz	201.-	80.-	7.-	72.-	70.-	72.-
Montage von einer Leuchte pro Standort (Kosten Neubau in CHF)						
Mast Fuss	12'499.-	13'385.-	16'144.-	13'495.-	13'645.-	14'713.-
Leuchte	12'097.-	13'198.-	16'089.-	13'308.-	13'460.-	14'526.-
Differenz	402.-	187.-	55.-	187.-	184.-	187.-

Tabelle 14: Kostendifferenz Montageort Treiber und Kommunikation

In der Berechnung wird angenommen, dass pro Kommunikationsstandort zwei Leuchten angeschlossen werden und der Standort neu erstellt wird. In den Kosten berücksichtigt sind der Verkabelungsaufwand und ein Ersatz des Vorschaltgeräts während 25 Jahren.

Energieoptimierung Gleisfeldbeleuchtung

Wenn der zusätzlich erforderliche Schrank auf zwei Lichtpunkte aufgeteilt werden kann, können die Kosten auf zwei Lichtpunkte verteilt werden. In den Kosten nicht berücksichtigt sind:

- Aufwand für unplanmässigen Wartungseinsatz im Gleisbereich CHF 10'000.-
- Aufwand für allfällige Überspannungseinrichtung pro Lichtpunkt Brutto CHF 1'000.-

Werden diese zwei Argumente berücksichtigt, resultiert eine Kostenersparnis bei einem unplanmässigen Einsatz pro Standort von rund CHF 8'000.- pro Lebenszyklus zugunsten einer Mastfussmontage. Angenommen, dass auf 10 Mastaufstiege (20 Leuchten) pro Lebenszyklus (25 Jahre) ein Betriebsgerät unplanmässig ausfällt, ist die Mastfussmontage wirtschaftlich.

2.5 Definition der Technischen Lösungen

Aufgrund der Nutzwertanalyse der technischen Varianten und der Ermittlung der Lebenszykluskosten wurden, in Form einer Würfelmatrix aus den 48 möglichen Kombinationen, die drei Bestvarianten für die Erneuerung der Gleisfeldbeleuchtung gewählt. Dabei wurden die Rangpunkte von LCC und NWA gewichtet und miteinander addiert. Die Lösung mit den wenigsten Rangpunkten entspricht der Bestvariante. Für die Bewertung der Kosten der Sensorik wurde aufgrund der Ist-Analyse angenommen, dass sich diese Kosten auf 1'000 Lichtpunkte verteilen. Daher wurde das berechnete Total der LCC der Sensorik-Varianten durch 1'000 Lichtpunkte dividiert. Zudem basiert die Berechnung auf der Voraussetzung, dass die Vorschaltgeräte und Kommunikationseinheit in einem Stahlschrank an den Fahrleitungsmasten ausserhalb des Gefahrenbereichs montiert sind und ohne Logistikfahrzeug und Gleissperre erreicht werden können. Aufgrund der Analyse der Sparpotentiale gemäss Anhang 5, wurden mögliche Energiesparpotentiale definiert. Basierend auf der Tatsache, dass eine durchschnittliche Reduktion der Beleuchtung von rund 20 % realisiert werden kann und keine Sensorik-Variante alle Kriterien der Detektion vollständig erfüllt, wurden folgende Energiesparpotentiale für die Sensorik gemäss Tabelle 12 für die Berechnung angenommen.

2.5.1 Rangliste der Technologievarianten

Zwecks Beurteilung der Einflussgrössen und Sensitivität wurde die Rangierung der 48 möglichen Varianten unter folgenden fünf Gesichtspunkten erstellt.

Gesichtspunkt	Erläuterung
LCC 100 %	Lebenszykluskosten 100 % gewichtet
LCC 100 % diskontiert	Lebenszykluskosten 100 % (Kapitalzins 1.75 % Teuerung 1.3 %)
NWA o. Kosten 100 %	Nutzwertanalyse ohne Kosten (Systembewertung) 100 % gewichtet
LCC 50 % / NWA 50 %	Lebenszykluskosten / Nutzwertanalyse je zu 50 % gewichtet
LCC 66 % / NWA 33 %	Lebenszykluskosten 66 % / Nutzwertanalyse 33 % gewichtet

Tabelle 15: Gesichtspunkte der Rangierung

Durch die Betrachtung der Varianten unter unterschiedlichen Gesichtspunkten, kann die Rangierung der Varianten mit einer verlässlichen Aussagekraft gemacht werden. Es wird zwischen Neubau und Ersatz der Beleuchtungsanlage unterschieden. Daher werden zwei Ranglisten erstellt.

Gesichtspunkt	N-1.Rang	N-2.Rang	N-3.Rang	E-1.Rang	E-2.Rang	E-3.Rang
LCC 100 %	L2-F2-S2	L2-F2-S3	L2-F2-S1	L2-F1-S2	L2-F1-S3	L2-F1-S1
LCC 100 % diskontiert	L2-F2-S2	L2-F2-S3	L2-F2-S1	L2-F1-S2	L2-F1-S3	L2-F1-S1
NWA o. Kosten 100 %	L2-F2-S4	L2-F2-S3	L2-F2-S2	L2-F2-S4	L2-F2-S3	L2-F2-S2
LCC 50 % NWA 50 %	L2-F2-S2	L2-F2-S3	L2-F2-S4	L2-F2-S2	L2-F2-S3	L2-F2-S4
LCC 66 % NWA 33 %	L2-F2-S2	L2-F2-S3	L2-F2-S1	L2-F2-S2	L2-F2-S3	L2-F2-S1

Tabelle 16: Resultate Technologievergleich für Neubau und Ersatz

Aufgrund der Tabelle 16 ist ersichtlich, dass sich die Rangierung der Varianten erst bei einer gleichen Gewichtung von monetären und nicht monetären Kriterien leicht verändert. Die vollständige Rangliste und Vergleiche der Technologievarianten ist im Anhang 6 ersichtlich.

2.5.2 Kosten und Nutzen

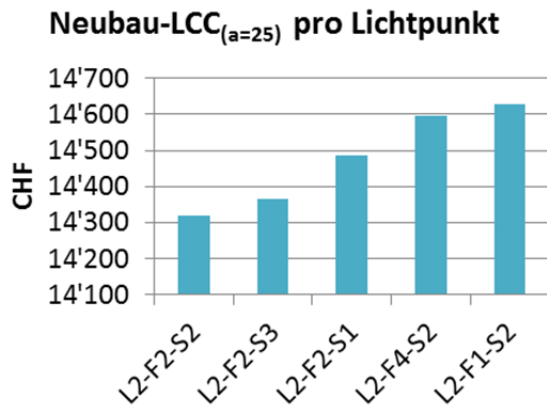


Abbildung 9: Rangliste 1-5 LCC - Neubau

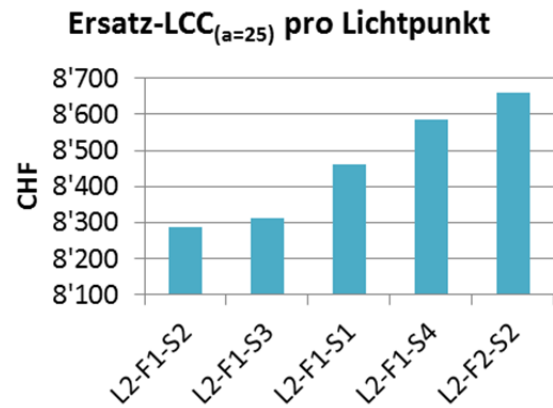


Abbildung 10: Rangliste 1-5 LCC - Ersatz

Aufgrund der Abbildungen 9 und 10 ist ersichtlich, dass sich die Varianten im Wesentlichen in der Wahl der Technologie auf der Feldebene unterscheiden. Für die Ermittlung der technischen Lösung ist eine Variantenkombination zu wählen, welche sowohl für den Neubau wie Ersatz der Lichtpunkte realisiert werden kann. In den folgenden Überlegungen wird daher nicht mehr zwischen Ersatz und Neubau verglichen. Die Ranglisten werden wie folgt interpretiert.

Leuchte	Kommunikation Feldebene	Sensorik
Für die Leuchte ist in jeder Variante eine LED Leuchte (L2) einzusetzen.	Für die Kommunikation auf Feldebene ergeben sich folgende drei Varianten: F1 - Schalten der Energievers. F2 - Kom. via Energievers. F4 - RF (868 MHz - 2.4 GHz)	Bei der Sensorik erscheinen alle vier Varianten in der Rangliste unter den fünf Bestplatzierten. Der Einsatz von allen Sensorik Varianten ist möglich.

Tabelle 17: Interpretation der Ergebnisse

Für den Kosten- Nutzenvergleich werden daher drei Varianten, welche sich in der Kommunikation auf der Feldebene unterscheiden, gewählt. Für Leuchte und Sensorik wird für den nachfolgenden Vergleich die gleiche Technologie verwendet. Der Vergleich erfolgt für einen Neubau.

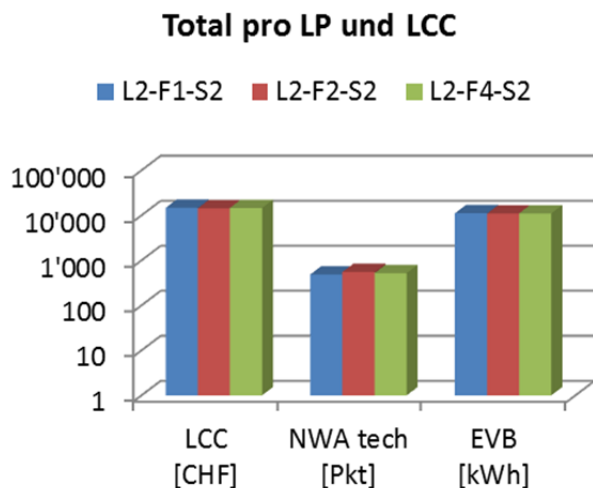


Abbildung 11: Resultierende Varianten

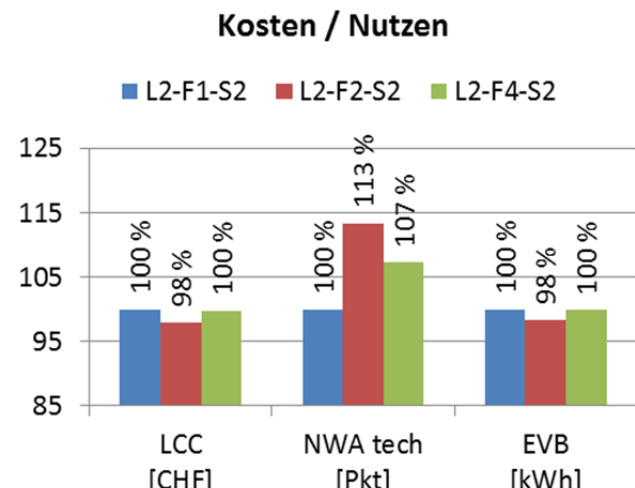


Abbildung 12: Kosten / Nutzen

Aufgrund der Abbildungen 11 und 12 ist ersichtlich, dass die nicht monetären Kriterien aus der Nutzwertanalyse die Wahl der Kommunikation auf der Feldebene entscheidend beeinflussen.

Die Variante F1 steht für eine bedarfsgerechte Steuerung der Lichtpunkte kaum zur Verfügung. Es ist zu beachten, dass eine Kombination der Variante F1 mit der Sensorik S2-S4 nur beschränkt sinnvoll ist, da jeder Beleuchtungssektor ein eigenes Energieversorgungskabel ab der Zentrale benötigen würde. Die Variante F2 kann realisiert werden. Dabei ist zu beachten, dass mit DALI

Energieoptimierung Gleisfeldbeleuchtung

eine Längenbegrenzung von 300 m vorliegt. Kann diese Längenbegrenzung nicht eingehalten werden, ist das DALI Signal mittels DALI Repeater um weitere 300 m zu verlängern oder das Signal mittels Powerline Gateway und Powerline/DALI Knoten zur entsprechenden Leuchte zu übertragen. Die Variante F4 ist geeignet, wenn die bestehende Kabelanlage weiterverwendet werden kann aber die DALI-Kommunikation über das Energieversorgungskabel nicht möglich ist.

Bei einem Neubau ist in der Regel der Freiheitsgrad für die Bestimmung einer Feldkommunikationslösung nur marginal eingeschränkt. Im Vergleich zu einem Ersatz der Lichtpunkte, wird die Wahl der Feldkommunikation wesentlich von der bestehenden Kabelanlage beeinflusst.

2.5.3 Technische Lösung

Für die Technische Lösung des RBII werden gemäss Technologieanalyse folgende drei Lösungsvorschläge definiert.

Variante	Leuchte	Feldebene	Sensorik
RBII-V1	L2-LED	F1-Energie schalten	S1-Dämmerungsschalter
RBII-V2	L2-LED	F2-DALI	S1-Däm.-sch. + S2-GPS + S3-Rangierleitsystem
RBII-V3	L2-LED	F4-Funk	S1-Däm.-sch. + S2-GPS + S3-Rangierleitsystem

Tabelle 18: Lösungsvorschläge Erneuerung Gleisfeldbeleuchtung

Aufgrund der verhältnismässigen Kosten bei der Sensorik kann eine Kombination von mehreren Varianten stattfinden. Die grösstmögliche Energieeinsparung kann nur mit einer der Anwendung angepassten Sensorik erzielt werden. Aufgrund des Kosten Nutzenvergleichs gemäss Abbildung 12 weisst die Variante mit der DALI-Kommunikation über das Energiekabel (F2) das beste Verhältnis auf und ist wenn möglich umzusetzen. Die Sensorvariante S4 mit Bewegungsmeldern ist aufgrund der Anzahl Melder und dem Energieverbrauch nicht zu empfehlen.

2.6 Ermittlung der Lebenszykluskosten für den RB II

Zur Ermittlung der LCC für den RBII wurde eine Vorstudie erstellt. Die Definition der Beleuchtungsanlage ist im Anhang 7 ersichtlich. Dabei wurden eine Lichtpunkthöhe von 12.2 m und die Montage der Betriebsgeräte am Mastfuss definiert. Jeder Lichtpunkt ist über die Querschnittsverkabelung am Stammkabel angeschlossen. Die Stammkabel werden ab dem Elektroraum mit Energie versorgt. Folgendes Mengengerüst wurde dabei ermittelt.

Artikel	Menge
Master Beleuchtungssteuerung	1 Stk
Elektroräume	5 Stk
Stammkabel / Abgänge	18 Stk
Knoten	76 Stk
Mastaufstiege	357 Stk
Lichtpunkte	560 Stk
Stammkabel 16 mm ²	5'500 m
Stammkabel 25 mm ²	1'100 m
Stammkabel 35 mm ²	1'000 m
Knoten - Mast 4 mm ²	22'060 m
Mast - Leuchte 2.5 mm ²	6'832 m
Anschluss Stammkabel 16 mm ²	110 Stk
Anschluss Stammkabel 25 mm ²	22 Stk
Anschluss Stammkabel 35 mm ²	20 Stk
Anschluss Knoten-Mast 4 mm ²	714 Stk
Anschluss Mast-Leuchte 2.5 mm ²	1'120 Stk
Anzahl DALI Masterklemmen	11 Stk

Tabelle 19: Mengengerüst Beleuchtungsanlage RBII

Basierend auf dem Mengengerüst wurde für die drei technischen Lösungen für den RBII die LCC ermittelt. Bei der Variante 1 (RBII-V1) wurde die Annahme getroffen, dass die Energie für die 18 definierten Stammkabel ein und ausgeschaltet werden kann (ähnlich Ist-Zustand). Bei der Variante 2 (RBII-V2) werden alle LED-Treiber der Lichtpunkte mit DALI-Bus ab einer Elektrozentrale erschlossen. Zwecks Verlängerung des drahtgebundenen DALI-Bus Signal auf 600 m sind 10 Stk DALI-Repeater⁵ erforderlich. Bei der Variante 3 (RBII-V3) wurde anstelle einer DALI-Bus-Verkabelung die Funkübertragung D2D⁶ des DALI-Signals bis zum Betriebsgerät im Schrank am Mastaufstieg gewählt. Die Berechnung der LCC erfolgt unter der Annahme, dass mit der RBII-V1 0 % Energieeinsparung erfolgen kann.

Energieoptimierung Gleisfeldbeleuchtung

Mit der RBII-V2 und V3 werden 20 % Energieeinsparung erzielt, weil eine Steuerung der einzelnen Lichtpunkte möglich ist. Durch die Kombination von mehreren Sensorvarianten ist eine optimale Detektion für die Beleuchtungssteuerung möglich. Folgende LCC wurden für den RBII bei Ersatz der Beleuchtungsanlage ermittelt. Es wird davon ausgegangen, dass für alle Varianten die bestehende Kabelanlage weiter verwendet werden kann.

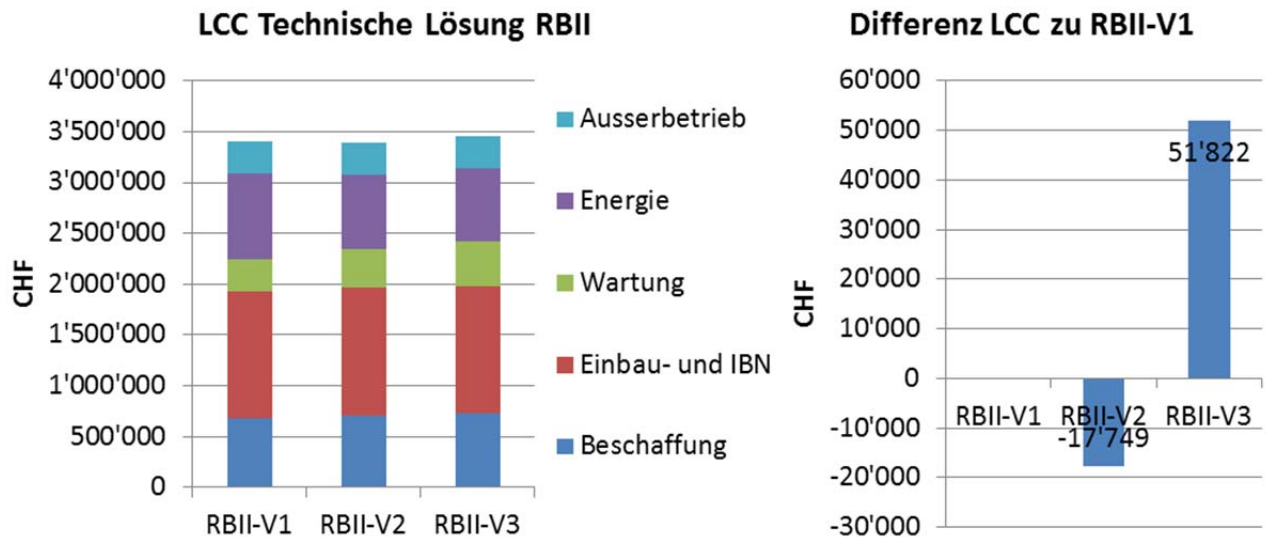


Abbildung 13: LCC Beleuchtungsanlage Ersatz RBII

Die LCC Kosten unterscheiden sich bei Ersatz der Anlage zwischen den drei Varianten unter 2 %. Dies liegt weit unter der Genauigkeit der Kostenschätzung von 30 %.

Im Vergleich dazu wurden die Kosten der Beleuchtungsanlage für einen Neubau ermittelt.

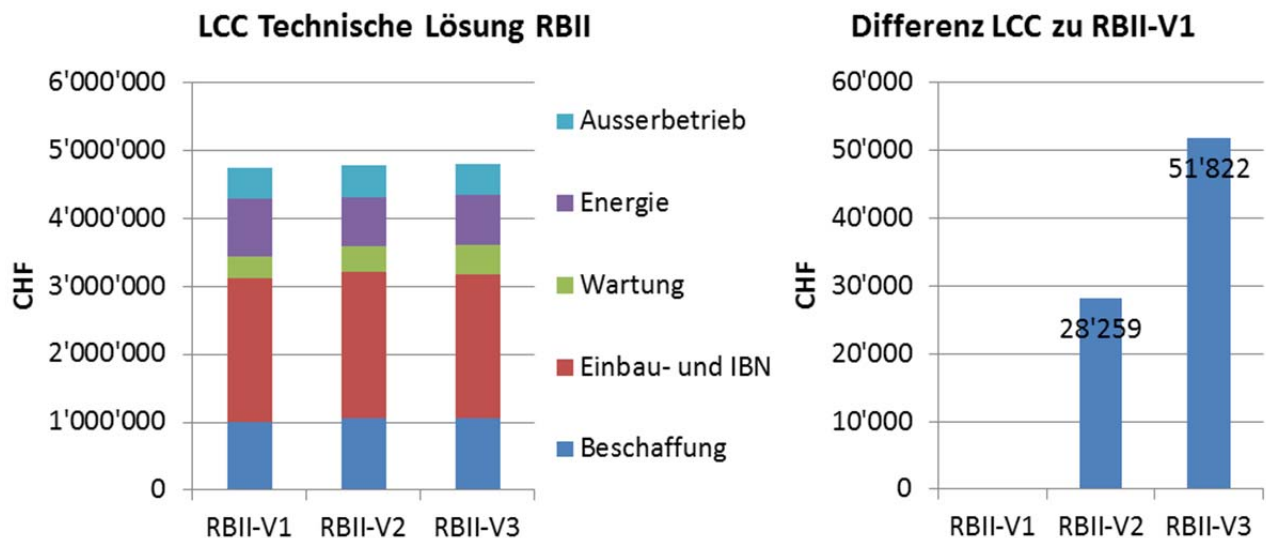


Abbildung 14: LCC Beleuchtungsanlage Neubau RBII

Der Kostenunterschied zwischen den drei Varianten beträgt bei einem Neubau rund 1 %. Dies liegt weit unter der Genauigkeit der Kostenschätzung von 30 %. Die LCC für Ersatz und Neubau wurden mit einem Energiepreis von 0.13 CHF/kWh für den Nachtstrom und 0.22 CHF/kWh für den Tagesstrom ermittelt. Die unterschiedliche Preisdifferenz zwischen Ersatz und Neubau der Anlage liegt im Anteil der Energiekosten in Bezug auf die Erstellungskosten.

In den Abbildungen 15 und 16 ist ersichtlich, ab welchem Anteil der Energieeinsparung die Kosten für eine nicht gesteuerte Anlage über denjenigen einer gesteuerten Beleuchtungsanlage liegen. Bei der Variante RBII-V2 zwei kann im Fall eines Ersatzes der Beleuchtungsanlage eine Wirtschaftlichkeit ab 18 % Energieeinsparung erreicht werden. Bei einem Neubau ab 24 % Energieeinsparung.

Energieoptimierung Gleisfeldbeleuchtung

Die Zahlen wurden unter der Voraussetzung eines konstanten Energiepreises ermittelt. Mit einer Erhöhung des Energiepreises wird die Wirtschaftlichkeit bereits bei einer kleineren Energieeinsparung erreicht.

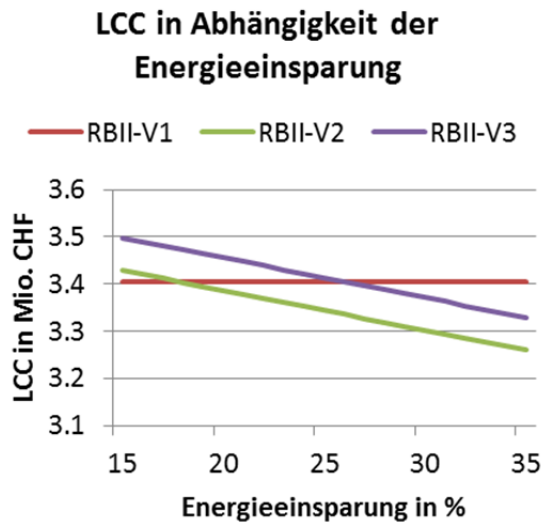


Abbildung 15: LCC-Energieeinsparung - Ersatz

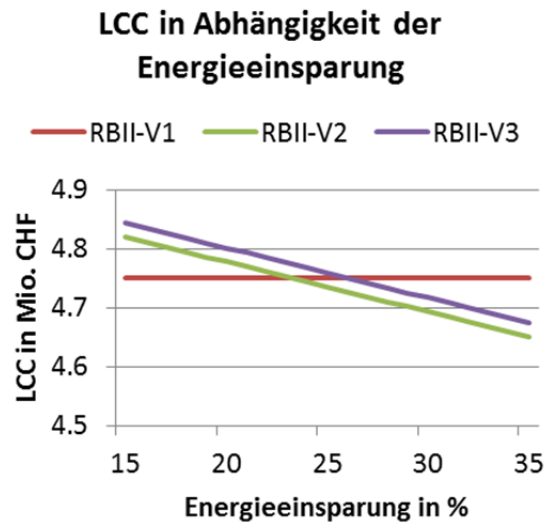


Abbildung 16: LCC-Energieeinsparung - Neubau

Im Weiteren wurde die Entwicklung des Kapitalwerts, während des Lebenszyklus ermittelt. Die Berechnung erfolgte mit einem Kapitalzinssatz von 1.75 % und mit einer Teuerung von 1.3 %. Aufgrund der höheren Energiekosten steigt der Kapitalwert der Variante RBII-V1 im Laufe der Jahre stärker an, als der übrigen Varianten. Jedoch wird dieser Kostenvorteil bei der Variante RBII-V3 infolge Ersatzes der Feldgeräte wieder eingebüsst.

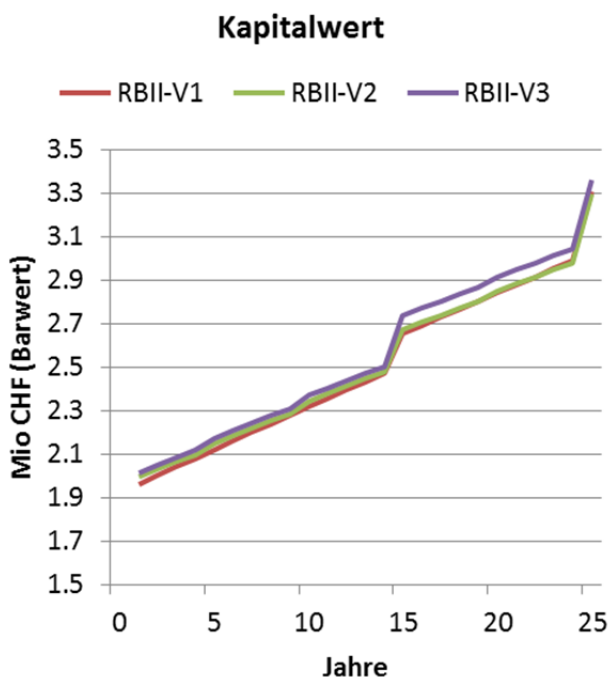


Abbildung 17: Kapitalwert - Ersatz RBII

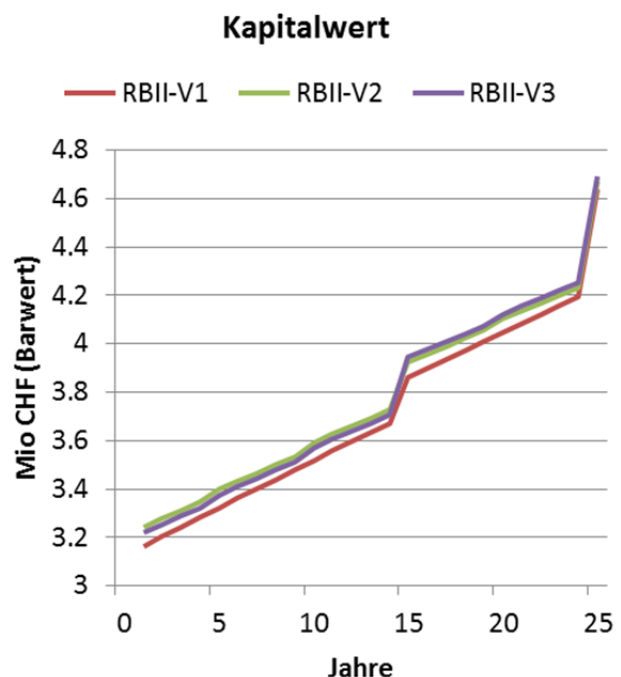


Abbildung 18: Kapitalwert - Neubau RBII

Aufgrund der sehr geringen Kostendifferenzen der drei Varianten erhalten die nicht monetären Kriterien eine entscheidende Einflussgrösse. Im Kapitel 2.5.2 wurde das Kosten-Nutzenverhältnis der drei resultierenden Varianten aus dem Technologievergleich untersucht. Daraus ist ersichtlich, dass die Variante mit einer drahtgebundenen DALI-Kommunikation auf zwei bestehenden Polleitern des Energieversorgungskabels, als Bestvariante ermittelt wurde. Aus den ermittelten Lebenszykluskosten für den RBII und den daraus folgenden Vergleichen gemäss Abbildungen 15 - 18 wird die Wahl einer drahtgebundenen DALI-Kommunikation bestätigt.

3 Resultate

3.1 Tätigkeiten im Gleisfeld

Den Gleisbereichen wird aufgrund ihrer Funktion eine Grundbeleuchtung zugeteilt. Dagegen soll sich die Beleuchtung aufgrund der Tätigkeiten des Personals dynamisch anpassen. Als dritte Einflussgrösse ist die Zugkomposition resp. die Belegung des Gleises (Rangiergleis) zu berücksichtigen. Da sich die Tätigkeiten im Gleisfeld sowie die Belegungen der Gleise dynamisch ändern, sind diese die relevanten Steuergrössen für eine bedarfsgerechte Gleisfeldbeleuchtung. Die definierten Tätigkeiten, Bereiche und Belegungen inkl. der definierten Beleuchtungsstärken sind im Anhang 8 Tätigkeiten und Anforderungen ersichtlich.

3.2 Beleuchtungsstärke in Abhängigkeit der Tätigkeiten

Aufgrund der drei Kriterien Tätigkeit, Gleisbereich und Belegung, wurde anhand der Norm EN 12464-2 die Beleuchtungsstärke definiert. Zwecks Reduktion von Beleuchtungsvorgaben, wurden die Anforderungen an die Beleuchtungsstärke in folgende Beleuchtungsprofile eingeteilt.

Beleuchtungsprofile		E_M
I	Nicht belegte Gleise und keine Arbeiten auf benachbarten Gleisen	-
II	Minimalbeleuchtung für jede Art von Arbeiten und gefährliche Güter	10 Lux
III	Grundbeleuchtung für alle abgestellten Güterwagons auf dem RB	2 Lux
IV	Kontrollarbeiten auf dem RB	10 Lux
V	Beleuchtung für ununterbrochene Arbeiten	20 Lux
VI	Beleuchtung für Arbeiten im Gefahrenbereich von Zugkompositionen	30 Lux

Tabelle 20: Beleuchtungsprofile

Im Anhang 8 wurden für die folgenden Parameter Vorgaben definiert:

Parameter	Kurzbeschreibung	Einheit
1. Beleuchtungsstärke	Wartungswert der mittleren Beleuchtungsstärke.	E_M [lx]
2. Gleichmässigkeit	Gleichmässigkeit der Beleuchtung.	U_0 [-]
3. Blendungsbegrenzung	Blendung durch Leuchten einer Beleuchtungsanlage im Freien.	GR_L [-]
4. Farbwirkung	Farbwiedergabe der Lichtquelle (max. 100).	R_a [-]
5. Schwellwerterhöhung	Mass für die physiologische Blendung. Hohe T_I -Werte bedeuten eine grössere Schwellwerterhöhung und sind ein Hinweis auf mögliche Blendgefahr.	T_I [%]
6. Wartungsfaktor	Die Beleuchtungsstärken sind als Wartungswert angegeben. Die Wartung muss definiert sein.	WF [-]
7. Ungleichmässigkeit	Ungleichmässigkeit der Beleuchtung.	U_d [-]

Tabelle 21: Parameter für die definierten Beleuchtungsprofile

Die Parameter wurden basierend auf den Normen SN EN 12464-2 [1] und SN EN 13201-2 [4] definiert. Im heutigen Regelwerk der SBB I-50103 [2] sind keine Werte zur Schwellwerterhöhung festgelegt. Da der Blendung von LED-Leuchten besondere Aufmerksamkeit zu schenken ist, werden nebst den Vorgaben zur Blendungsbegrenzung auch Vorgaben zur Schwellwerterhöhung definiert. Die Schwellwerterhöhung kann ausgehend von einem definierten Standort und Blickrichtung einer Person bestimmt werden.

3.3 Beleuchtungsleistung pro Gleismeter

In Abhängigkeit der ermittelten Gleisbereiche, den definierten Beleuchtungsstärken und der Definition des Gleismeters als Flächenmass sind aufgrund der Vorstudie (Anhang 7 Seiten 5-7) die folgenden maximalen Leistungen (P_{max}) pro Gleisbereich nicht zu überschreiten. In der Leistungsangabe berücksichtigt sind die Leistung der Leuchte, die Kommunikation auf der

Energieoptimierung Gleisfeldbeleuchtung

Feldebene, die Sensorik und die Beleuchtungssteuerung. Mittels Relux Simulationen (Anhang 9) wurden die definierten Leistungen in Abhängigkeit der Beleuchtungsstärke und erforderlichen Lichtpunktabständen überprüft und entsprechend die Zielwerte (P_{Ziel}) definiert.

Beleuchtungsprofil Gleisbereich		E_M	P_{Ziel}	P_{max}
I + II	Gleisanlagen mit zeitweiligen Arbeitsvorgängen	10 lx	0.7	1.4
	Ablaufbereiche, Bremsbereiche, Bereitstellungsflächen		W/GLM	W/GLM
III + IV	Gleisanlagen mit ununterbrochenen Arbeitsvorgängen	20 lx	1.4	2.8
	Wartungsbereiche		W/GLM	W/GLM
V	Abkopplungs- und Umschlagsbereiche	30 lx	2.1	4.2
			W/GLM	W/GLM

Tabelle 22: Beleuchtungsleistung pro Gleismeter

Aus der Vorstudie Gleisfeldbeleuchtung für den RBII (Anhang 7) ist ersichtlich, dass bei einem Ersatz der bestehenden Lichtpunkte durch LED Leuchten der Energiebedarf wesentlich reduziert werden kann, jedoch die definierten Werte gemäss Tabelle 22 nicht überall erreicht werden. Dies hat einen direkten Zusammenhang mit der Anordnung der bestehenden Lichtpunkte. Bei einem ausschliesslichen Ersatz der Lichtpunkte und der Weiterverwendung der bestehenden Kabelanlage ist es daher wirtschaftlich mehr Leistung als erforderlich zu installieren und mittels Steuerung der Beleuchtung den Energieverbrauch zu senken. Bei einem Neubau der Beleuchtungsanlage können die Lichtpunkte optimal angeordnet werden, sodass nicht mehr Lichtpunkte als für die erforderliche Beleuchtungsstärke notwendig sind (ideal für BP I+II, GL20 3 Gleise x 60 m = 180 GLM pro LP 145 W bereinigt auf E_M 10 lx = 0.67 W/GLM, Anhang 5).

Die Beleuchtungsleistung pro Gleismeter ist unter Berücksichtigung der Anzahl parallel verlaufender Geleise festzulegen. Bei weniger als drei parallelen Gleisen kann der Beleuchtungssektor nicht wesentlich reduziert werden, weil die Lichtverteilung der Leuchte statisch ist. Unter der Voraussetzung, dass schweizweit die gleiche Gleisfeldleuchte verbaut werden soll, erhöht sich daher die Leistung pro Gleismeter. Der Beleuchtungskegel einer Leuchte GL20 wird bei einer Montagehöhe von 12.2 m gemäss Anhang 9 mit 12 m x 60 m für die Beleuchtungsprofile I-III festgelegt. Für die Beleuchtungsprofile IV-VI sind erhöhte Anforderungen notwendig. Daher ist der Leuchten Abstand entsprechend zu verkleinern. Die in Tabelle 22 definierten Werte wurden

Korrekturfaktor aufgrund der Gleisanordnung	
x 1	bei drei oder mehr parallel verlaufenden Gleisen
x 1.5	bei zwei parallel verlaufenden Gleisen
x 3	bei einem beleuchteten Gleis

Tabelle 23: Korrekturfaktoren Beleuchtungsleistung

anhand der Vorstudie im RB Basel ermittelt und gelten für ≥ 3 parallel verlaufende Gleise. Für abweichende Situationen unter drei Gleisen sind die Vorgabewerte gemäss Tabelle 23 anzupassen.

3.4 Energieverbrauch pro Gleismeter und Jahr

Der Energieverbrauch steht in direktem Zusammenhang mit der erforderlichen Beleuchtungsstärke. Die Beleuchtung ist bedarfsgerecht zu steuern, damit der jährliche Energieverbrauch so tief wie möglich ausfällt. Nebst den Tätigkeiten sind die Tageslängen relevant für den Energieverbrauch. Der berechnete Energiebedarf ist in Anhang 5 ersichtlich.

Beleuchtungsprofil Gleisbereich		E_M	W_{Ziel}	W_{max}
I + II	Gleisanlagen mit zeitweiligen Arbeitsvorgängen	10 lx	1.5	4
	Ablaufbereiche, Bremsbereiche, Bereitstellungsflächen		kWh/GLM a	kWh/GLM a
III + IV	Gleisanlagen mit ununterbrochenen Arbeitsvorgängen	20 lx	3.25	8
	Wartungsbereiche		kWh/GLM a	kWh/GLM a
V	Abkopplungs- und Umschlagsbereiche	30 lx	5	12
			kWh/GLM a	kWh/GLM a

Tabelle 24: Energieverbrauch pro Gleismeter und Jahr

Energieoptimierung Gleisfeldbeleuchtung

Gemäss den Vorgaben der SBB wird mit einer mittleren Leuchten-Brenndauer von 8.2 h pro Tag gerechnet. Aufgrund der ermittelten Energiesparpotentiale und der Vorstudie für den RBII können die Energieverbrauchszahlen gemäss Tabelle 24 pro Gleismeter und Jahr definiert werden. Die Zielwerte können mit einer durchschnittlichen Energieeinsparung von 20 % erreicht werden. Die Maximalwerte werden ohne Steuerung der Beleuchtung erreicht.

3.5 Steuerungstechnische Anforderungen

Aufgrund der durchgeführten Technologievergleiche und der Vorstudie für den Rangierbahnhof können folgende steuerungstechnische Anforderungen definiert werden.

3.5.1 Leuchte

Neu verbaute Leuchten sind so zu erstellen, dass mittels Kommunikationsanschluss (DALI Schnittstelle) die Leistung der Leuchte mehrstufig (max, norm, red, aus) oder stufenlos gesteuert werden kann. Es ist darauf zu achten, dass der LED-Treiber über eine DALI-Schnittstelle verfügt und der Treiber nicht als eine Einheit mit einer proprietären Kommunikationseinheit zusammengebaut ist. Mit einer höheren Anzahl an Lichtpunkten und einer kleineren Leistung pro Lichtpunkt kann die Steuerbarkeit der Beleuchtung erhöht werden. Am Beispiel vom RBII ist ersichtlich, dass eine Reduktion der Lichtpunkte auf ein Minimum, mit der Weiternutzung der bestehenden Kabelanlagen, abzuwägen ist. Ausreichend Lichtpunkte wirken sich positiv auf die Gleichmässigkeit der Beleuchtung aus.

3.5.2 Kommunikation Feldebene

Für die Kommunikation auf der Feldebene ist auf eine zusätzliche Kabelnetzinfrastruktur zu verzichten. Die Kommunikationseinheit ist so zu wählen, dass die Schnittstellen zur Beleuchtungssteuerung und zum LED Treiber der Leuchte möglichst einfach sind. Daher bietet sich eine direkte Verkabelung der LED-Treiber mittels DALI-Bus ab dem Elektroraum an. Wo die bestehende Verkabelung eine Umnutzung von zwei Leitern auf den DALI-Bus nicht erlaubt, ist eine andere Lösung umzusetzen. Anstelle keiner Steuerung der Beleuchtung, kann das DALI-Signal mittels Funk übertragen werden. Auf dem Markt sind Produkte verfügbar, welche eine direkte DALI-Signalübertragung (D2D⁶) erlauben. Bei der Kommunikation auf der Feldebene ist ein System zu wählen, welches eine bidirektionale Kommunikation Steuerung - Leuchte erlaubt. Damit können Zustandsdaten der Leuchten für die Erhaltungsplanung zur Verfügung gestellt werden.

Falls die Kommunikation auf der Feldebene von weiteren Anlagen benutzt werden kann (z.B. WLAN Kamera) oder die Distanz zur nächsten Beleuchtungssteuerung >3 km ist, kommen andere Technologien für die Kommunikation auf der Feldebene in Frage. Seitens der Wireless-Technologien sind unzählige Produkte mit unterschiedlichen Leistungsmerkmalen auf dem Markt erhältlich (Tendenz steigend). Beim Einsatz einer Wireless-Technologie ist darauf zu achten, dass die Kommunikationsschnittstelle unabhängig der LED-Treiber und Schnittstelle zur Beleuchtungssteuerung ersetzt werden kann.

3.5.3 Sensorik

Eine bedarfsgerechte Steuerung pro Leuchte auf Feldebene setzt den Einsatz einer optimalen Sensorik voraus. Nur wenn alle Teilsysteme inkl. Sensorik optimal aufeinander abgestimmt sind, kann eine bedarfsgerechte Lichtsteuerung, welche nicht nur Energie sondern auch Kosten spart realisiert werden. Leider stehen aufgrund der aktuell tiefen Energiepreise und hohen Lichtausbeute der LED-Leuchten kaum mehr finanzielle Mittel für eine Beleuchtungs-Sensorik zur Verfügung.

Daher ist es unumgänglich, bereits bestehende Infrastrukturen für die gewünschte Detektion mitnutzen zu können. Im Fall des RBII sind dies das bestehende Rangierleitsystem sowie die GPS-Daten der registrierten Mobilfunkträger. Beide Systeme setzen auf bestehender Infrastruktur auf und ergänzen sich gegenseitig. Aufgrund der geringen Kosten ist ein Dämmerungsschalter, wenn immer möglich mit in die Steuerung einzubauen. Damit wird sichergestellt, dass die Beleuchtung nur bei ungenügendem Tageslicht (<100 lx) einschaltet.

4 Diskussion

4.1 Entwicklung

Das Thema Lichtsteuerung und Lichtmanagement ist aktuell in einem technologischen Umbruch. Die Ziele der Lichtsteuerung (Kosteneinsparung und Komforterhöhung) sind in Zukunft mit weniger Investitionskapital zu erreichen als bisher. Aufgrund der immer noch steigenden Lichtausbeute, bei LED-Leuchten wird die effektive Energieeinsparung durch Lichtsteuerung zukünftig noch geringer ausfallen. Die Folgen davon erfordern eine grundlegende Veränderung der Feldkommunikation, der Sensorik und der Beleuchtungssteuerung. Der Kostendruck auf diese Teilsysteme der Beleuchtungssteuerung⁷ wird sich noch weiter erhöhen. Aufgrund von erweiterten Zielen des Lichtmanagements wie die Reduktion von Arbeitsunfällen, die Vermeidung von Lichtemissionen im Aussenraum, das Erstellen von bedarfsorientierten Wartungsplänen und das Betriebskostenmanagement, wird die Beleuchtungssteuerung in Zukunft an Bedeutung gewinnen. Die nicht monetär messbaren Ziele erfordern bei allfälligen Mehrkosten der Beleuchtungsanlage durch das Lichtmanagement eine Gegenüberstellung der Mehrkosten und Bewertung der Aspekte Sicherheit, Ökologie und Management in Bezug auf die objektbezogene Beleuchtungsanlage.

4.1.1 Lichtmanagement

Im Rahmen der Arbeit wurde das Teilsystem Beleuchtungssteuerung und Lichtmanagement nur als Blackbox mit anfallenden Investitionskosten berücksichtigt. Wenn die Voraussetzungen für eine bedarfsgerechte Lichtsteuerung geschaffen sind, wird das Managementsystem für Steuerung und Verwaltung zum zentralen Teilsystem. Das Managementsystem muss die vorhandene Infrastruktur unter Berücksichtigung aller Aspekte zuverlässig und wirtschaftlich nutzen.

Auf dem Markt sind heute zahlreiche Lichtmanagementsysteme (z.B. Paradox⁸) verfügbar, welche solche Funktionen erfüllen. Dies beginnt bei der Inbetriebnahme der Leuchte, dass sich der Lichtpunkt mittels GPS-Koordinaten automatisch im Lichtmanagementsystem anmeldet. Im Weiteren sind automatisch die Hersteller spezifischen technischen Daten und die Daten der Betriebsstunden, Lichtstrom und Energieverbrauch pro Lichtpunkt im System verfügbar. Die Teilsysteme Leuchte, Kommunikation Feldebene, Sensorik und Lichtmanagement sollten aufgrund der Unabhängigkeit von Unternehmen auch in Zukunft einzeln ersetzt werden können. Diese Anforderung kann Mehrkosten der Beleuchtungsanlage zur Folge haben, welche der Unabhängigkeit der Teilsysteme gegenüber zu stellen sind. Die Softwarekosten für ein Managementsystem betragen einmalig CHF 15'000.- und jährlich wiederkehrend CHF 1'500 (Paradox⁸). Andere Preismodelle rechnen mit Kosten von CHF 3.- pro Lichtpunkt und Jahr (Cytitouche⁹). Aufgrund der Anlagegrösse der SBB ist sicher eine bedarfsorientierte Eigenentwicklung eines Lichtmanagementsystems, einem auf dem Markt verfügbaren System gegenüber zu stellen.

4.1.2 Leuchte

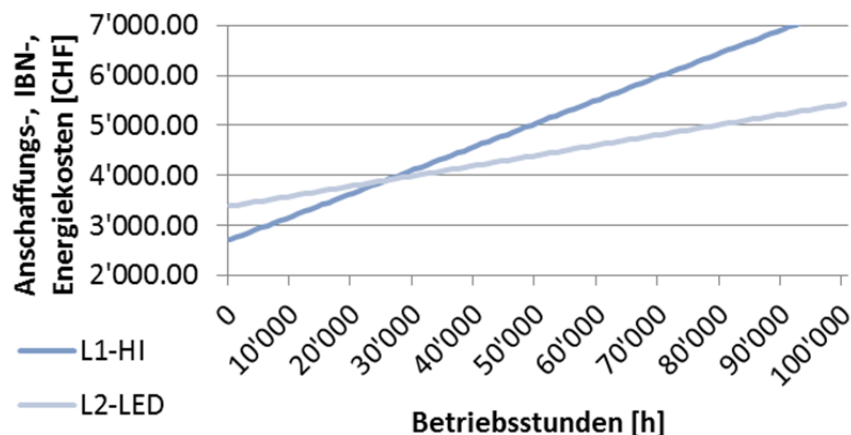


Abbildung 19: Vergleich Wirtschaftlichkeit LED - HI

Die grösste Energieeinsparung im System Beleuchtungssteuerung wird erreicht, wenn anstelle von HI- oder NA-Leuchten, LED-Leuchten mit einer Lichtausbeute ≥ 100 lm/W eingesetzt werden. Die System-Lichtausbeute von LED Leuchten ist fast doppelt so gross wie diejenigen

Energieoptimierung Gleisfeldbeleuchtung

der HI-Leuchten. LED Leuchten sind jedoch nicht unter allen Bedingungen wirtschaftlicher als HI-Leuchten. Ohne Berücksichtigung der Wartungskosten, sind LED Leuchten im Vergleich zu Halogenmetaldampfleuchten ab 26'000 h Betriebsstunden wirtschaftlicher.

Die Abbildung 19 wurde unter der Annahme von 20 lx und einem Energiepreis von 0.14 CHF/kWh erstellt. Bezogen auf 25 Jahre Lebenszyklus resultiert daraus die Schlussfolgerung, dass für Leuchten mit einer jährlichen Betriebsdauer von >1'000 h nur noch LED Leuchten einzusetzen sind. Aufgrund der Steigerung der Lichtausbeute von 100 lm/W bis auf 150 lm/W, wird sich der Schnittpunkt der Abbildung 19 in Zukunft bei <20'000 h bei gleichbleibenden Energiekosten ergeben. Daher ist der Einsatz der Metaldampfleuchten nur noch bei Anlagen wie z.B. Nothaltestellen mit einer jährlichen Betriebsdauer <800 h vorzusehen. Ungeachtet der Wirtschaftlichkeit haben LED-Leuchten eine um Faktor 2 bessere Lichtausbeute als HI-Lampen und benötigen weniger Energie. In Zukunft ist damit zu rechnen, dass LED Leuchten eine elektronisch steuerbare Lichtstärkenverteilung¹⁰ haben. Dies bringt neue Möglichkeiten für eine bedarfsgerechte Beleuchtungssteuerung.

4.1.3 Kommunikation Feldebene

Die Kommunikation auf der Feldebene durchläuft zurzeit eine experimentelle Phase. Neben den bewährten drahtgebundenen Systemen, sind die drahtlosen Technologien auf dem Vormarsch. Ein grundsätzlicher Unterschied der Drahtlostechnologie liegt in Meshnet Netzstrukturen im Vergleich zur Punkt-Punkt Verbindung. Bei der Meshnet Topologie funktioniert jeder Knotenpunkt als Repeater oder Gateway (Abstand¹¹ 250 m). Dadurch können problemlos Netze über mehrere Kilometer erstellt werden. Ein weiterer Vorteil von Meshnet ist die Ausfallsicherheit. Wenn ein Knotenpunkt in einem Netzwerk nicht verfügbar ist, wird der Verbindungsweg über die verfügbaren Knoten sichergestellt. Dadurch erhöht sich die Verfügbarkeit des Netzwerks. Die Meshnet-Technologie erfordert jedoch ein zuverlässiges Netzwerkmanagement und einen ausreichenden Sicherheitsstandard (AES oder SSID). Aufgrund des IPV6 Standards stehen nun ausreichend IP-Adressen (Total 2^{128} oder über 2^{64} IP-Adressen pro m^2 Land-Erdoberfläche) zur Verfügung (Nachteil IPV4 mit 2^{32} Adressen). Damit wurde die Voraussetzung geschaffen, dass jeder

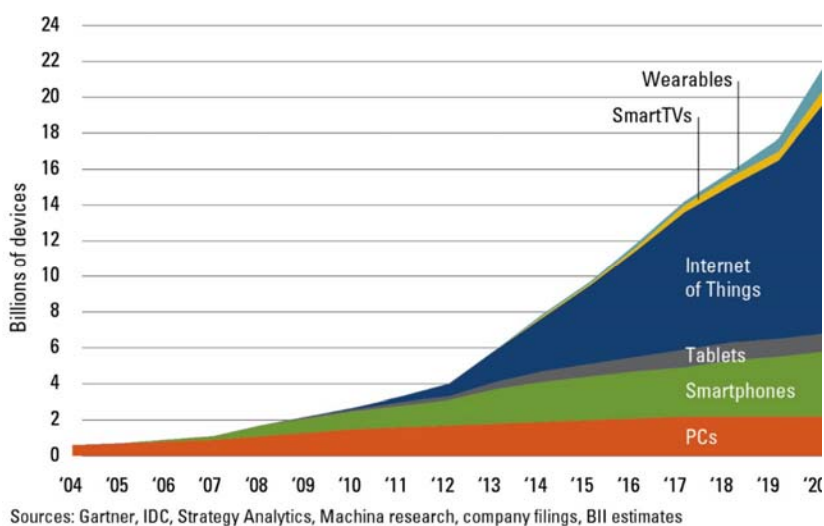


Abbildung 20: Entwicklung Internetteilnehmer¹²

Lichtpunkt als Internetteilnehmer auftreten kann. Es wird angenommen, dass sich die Anzahl Internetteilnehmer in den kommenden fünf Jahren nahezu verdoppeln wird. Der Name IoT (Das Internet der Dinge) steht für die Verknüpfung von intelligenten Gegenständen. Aufgrund der zahlreich verknüpften Gegenstände, können diese den Menschen bei seinen Tätigkeiten, so auch der Beleuchtungssteuerung, unterstützen.

Aufgrund der rasant ansteigenden Teilnehmerzahl von IoT, ist bedingt durch den Skaleneffekt mit einem leicht sinkenden Preis für die Kommunikation der Endgeräte zu rechnen.

Diese Entwicklung ist in den kommenden Jahren weiter zu verfolgen. Mit Sicherheit werden kurzfristig neue Kommunikationsprodukte auf den Markt kommen, welche im Vergleich zu den heutigen Produkten zu tieferen Kosten erhältlich sind. Dadurch wird die Wirtschaftlichkeit der Kommunikation auf der Feldebene verbessert. Aufgrund dieser Entwicklung werden auch neue drahtlose Kommunikationstechnologien eingesetzt werden. In der LPN-Technologie arbeiten die

Netzwerke und Teilnehmer sehr energieeffizient. Die Technologie wurde für die Kommunikation von Endgeräten mit kleinen Datenmengen und geringem Energieverbrauch entwickelt. Unter dem Namen LoRa wurde ein offener Industriestandard entwickelt, welcher von der LoRa-Alliance¹³ spezifiziert wird. Die Swisscom¹⁴ baut aus diesem Grund im Jahr 2016 in der Schweiz ein neues LoRaWAN. Mit diesem Parallelnetz zum GSM-Netz werden die zukünftigen IoT Endgeräte miteinander kommunizieren. Die im Variantenvergleich berücksichtigte GSM-Technologie wird in Zukunft für Anwendungen wie die Beleuchtungssteuerung durch die LoRa Technologie abgelöst werden. Eine neue Kommunikationstechnologie, welche für objektbezogene Anwendungen eingesetzt werden kann, ist die Visible Light Communication⁷. Inwiefern diese Technologie auch für den Einsatz zur Steuerung der Gleisfeldbeleuchtung verwendet werden kann, müsste genauer überprüft werden. Denkbar wäre eine Erfassung von Sensoren an Güterwagen oder Personen. Die aktuell anstehende Herausforderung liegt in der Standardisierung der Technologien. Das bedeutet, dass Geräte unterschiedlicher Hersteller, welche die gleiche Technologie benutzen auch kompatibel sind (auch nach Software-Update). Bei DALI ist die Kompatibilität sehr weit fortgeschritten, im Gegensatz zum ZigBee Standard wo noch grosser Nachholbedarf vorhanden ist. Daher ist in Zukunft ein Kommunikations-Standard zu verwenden, welcher hinsichtlich der Standardisierung weit fortgeschritten ist. Damit kann eine Kostensicherheit der Investition in die Kommunikation der Feldebene erreicht werden.

4.1.4 Sensorik

Aufgrund der limitierten Kosten der Energieeinsparung ist es nicht möglich, ein eigens für die Beleuchtungssteuerung erforderliches flächiges Detektionssystem zu realisieren. Nebst der bewährten Technologie des Dämmerungsschalters ist daher ein ohnehin bestehendes System für die Erfassung von Personen und Güterwagen im Gleisfeld erforderlich. Daher wurde die Nutzung der Positionsdaten der GSM-Teilnehmer sowie die Anbindung des Rangierleitsystems geprüft. Die IoT Entwicklung wird sich auch auf die Sensorik auswirken. Aufgrund der vielfältigen Teilnehmer wird ein neues Detektionssystem entstehen. Was heute in einem Pilotversuch der SBB Cargo unter dem Namen "intelligenter Güterwagen"¹⁵ erprobt wird, bekommt mit IoT und LoRaWAN eine flächendeckende Infrastruktur für die schweizweite Realisierung.

Die Auswertung von GPS-Daten hat den grossen Vorteil, dass schweizweit nur eine Applikationssoftware für die Beleuchtungssteuerung erforderlich ist. Ein GPS-Dienstserver wäre ausreichend für die Beleuchtungssteuerung sämtlicher Lichtpunkte in der Schweiz, sofern diese auch mit GPS Koordinaten referenziert sind. Der Nachteil der GPS-Sensorik liegt in der Positionsdatenerfassung des Personals sowie der Reaktionszeit der Sensorik.

Die Reaktionszeit ist mittels Feldversuch eingehender zu untersuchen. Die GPS Genauigkeit von <5 m x 5 m ist für die Steuerung der Gleisfeldbeleuchtung ausreichend. Mit IoT werden sicherlich noch weitere Sensoren hinzukommen, welche neue Detektionsmöglichkeiten ermöglichen. Es ist seitens der SBB abzuklären, in wieweit die Datenschutzrichtlinien die Nutzung der Positionsdaten des Personals für die Beleuchtungssteuerung erlauben.

4.1.5 Zukunft

Die steuerungstechnischen Anforderungen an die Beleuchtungssteuerung sind wesentlich von der Wirtschaftlichkeit der Anlage geprägt. Die anfallenden Kosten für Feldkommunikation und Sensorik müssen mit den Energieeinsparungen refinanziert werden können. Allfällige Mehrkosten für die Beleuchtungssteuerung können nur mit der erweiterten Zieldefinition eines Lichtmanagements gemäss Kapitel 4.1.1 akzeptiert werden. In der Abbildung 21 sind die Lebenszykluskosten pro Lichtpunkt (LED GL20 145 W) für die Beleuchtungssteuerung bei einer prognostizierten Energieeinsparung von 20 % dargestellt. Es wird eine lineare Steigerung der Lichtausbeute bis auf 150 lm/W in den kommenden 25 Jahren erwartet. Bei der blauen Kurve wird mit einer Energiepreiserhöhung von Faktor 1.1 bei der roten Kurve mit Faktor 1.5 in den nächsten 25 Jahren gerechnet. Die Erhöhung des Energiepreises erfolgt nicht linear, sondern als Parabel mit der

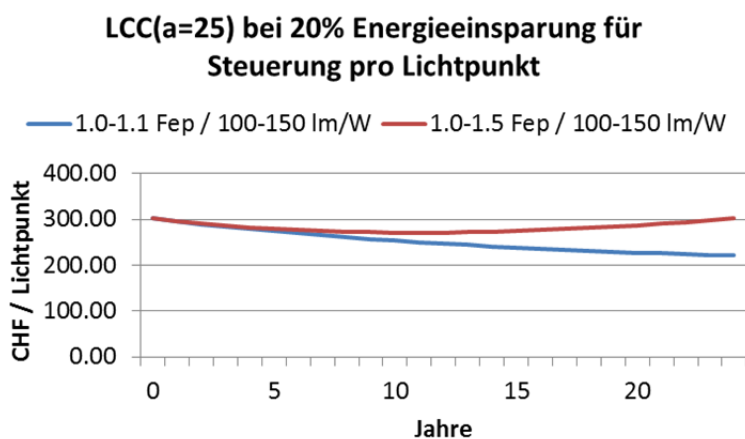


Abbildung 21: Investitionskosten für Steuerung pro Lichtpunkt

die Realisierung einer wirtschaftlichen Beleuchtungssteuerung mit Kosten von 200.- pro Lichtpunkt für Kommunikation, Sensorik und Steuerung während 25 Jahren gerechnet werden.

Potenzfunktion 2. Grades. Aufgrund der analysierten Daten aus dem Technologievergleich, wird heute eine monetäre Einsparung von CHF 300.- pro Lichtpunkt bei 20 % Energieeinsparung in einem Zeitraum von 25 Jahren als realistisch erachtet. Aufgrund des niedrigen Energiepreises und der Steigerung der Lichtausbeute bei den LED-Leuchten muss mittelfristig für

4.2 Vorgaben der Gleisfeldbeleuchtung

4.2.1 Planung

In der Planungsphase der Beleuchtungsanlage sind die grundlegenden Rahmenbedingungen wie Energiekosten, Lichtausbeute der Leuchte und erwartete Energieeinsparung der Beleuchtungsanlage zu definieren. Abhängig davon, ob es sich um ein Neubau oder Sanierungsprojekt handelt sind die Voraussetzungen unterschiedlich und projektbezogen zu berücksichtigen. Daher sind vor Projektbeginn eine detaillierte Analyse der Voraussetzungen sowie eine klare Bedürfnisformulierung an die Beleuchtungssteuerung zu erstellen. Es ist entscheidend, ob die Finanzierung der Beleuchtungssteuerung ausschliesslich aus den eingesparten Energiekosten erfolgt oder ob weitere Investitionskosten für die Realisierung der Beleuchtungssteuerung zur Verfügung stehen.

4.2.2 Leuchte

Abhängig von den jährlich erwarteten Betriebsstunden der Leuchte erfolgt aus wirtschaftlicher Sicht die Wahl der Leuchte LED oder HI. Das Vorschaltgerät der Leuchte ist unten am Mastfuss in einem geeigneten Metallschrank zu installieren. Damit ist die Zugänglichkeit ausserhalb des Gefahrenbereichs der Geleise für einen allfälligen Wechsel des Betriebsgeräts gewährleistet. Die Anordnung des Betriebsgeräts in der Leuchte ist nur dann eine Option, wenn der Gleisbereich problemlos gesperrt werden kann, eine allfällige Freischaltung der Fahrleitungen nicht erforderlich und ein Logistikfahrzeug in unmittelbarer Nähe verfügbar ist. Falls für die Leuchte weniger als 800 h Betriebsstunden pro Jahr erwartet werden und der Ausfall der Leuchte über mehrere Monate akzeptiert werden kann, kann auch eine Montage des Betriebsgeräts in der Leuchte erfolgen.

Mit einer nach unten gerichteten Lichtverteilung und einer bedarfsgerechten Steuerung kann nebst der Energieeinsparung auch die Störwirkung der Beleuchtungsanlage reduziert werden. In den Normen [1] und [5] wird auf die Optimierung der Beleuchtungsbedürfnisse mehrfach hingewiesen und erwähnt, dass die Beleuchtung eine Nachtabschaltung ermöglichen soll.

Die Blendung der Leuchten ist in der Planung und Ausführung besonders zu beachten. Falsch geplante oder montierte Leuchten verursachen eine unzulässige Blendung was insbesondere im Bahnverkehr negative Auswirkungen für den Lokführer zur Folge hat. Die SN EN 12464-2 [2] geht in Ihren Vorgaben von einer um 2° aus der Horizontalen geneigten Blickrichtung des Beobachters aus. Im Fall von Bahnanlagen, insbesondere von Lokführern, ist der geneigte Blick für die Beurteilung der Blendung nicht sinnvoll. Die Blickrichtung des Lockführers kann als horizontal angenommen werden. Der in den Vorgaben Anhang 8 definierte Wert GR_L ist unter Berücksichtigung der horizontalen Blickrichtung anzuwenden.

4.2.3 Kommunikation Feldebene

Bei der Wahl des Kommunikationssystems sind der Fortschritt der Standardisierung sowie die Interoperabilität zu bewerten und entsprechend zu berücksichtigen. Damit kann eine Kostensicherheit der Investition in die Kommunikation der Feldebene erreicht werden. Im Weiteren ist zu prüfen, ob bereits bestehende Kommunikationsnetze verfügbar sind oder ob weitere Stakeholder ein neu zu erstellendes Kommunikationsnetzwerk nutzen können. Aufgrund dieser Kriterien können Kostenumwälzungen bei der einen oder anderen Technologie entstehen und somit die Kosten der Kommunikation zulasten der Beleuchtungsanlage verringern. Weiter ist die Lebensdauer der elektronischen Bauteile der Kommunikationseinrichtung zu berücksichtigen. Es ist damit zu rechnen, dass innerhalb eines Lebenszyklus von 25 Jahren die Kommunikationseinrichtung einmal ersetzt werden muss. Bei einer drahtlosen Technologie könnte damit ein Technologie-Wechsel (nicht IP auf IPV6) innerhalb des Lebenszyklus ohne Einfluss auf Leuchte oder Steuerung erfolgen.

4.2.4 Sensorik

Bei der Planung der Sensorik für die Beleuchtungssteuerung sind, wenn immer möglich bereits vorhandene Systeme zu nutzen. Mit der Weiterentwicklung von IoT werden in Zukunft neue Möglichkeiten eröffnet. Nebst den technischen und wirtschaftlichen Anforderungen an die Sensorik sind auch die rechtlichen Grundlagen zur Nutzung von Daten zu prüfen. Falls die Sensorik für weitere Aufgaben (z.B. Objektschutz) verwendet wird, kann bei einer Neuerstellung der Anlage eine entsprechende Kostenverteilung erfolgen. Generell ist zu beachten, dass optische Systeme eine höhere Wartung erfordern als nicht optische Systeme und daher für eine ausschliessliche Beleuchtungssteuerung nicht zu favorisieren sind.

4.2.5 Beleuchtungssteuerung

Der Objektmaster der Beleuchtungssteuerung ist an das LSS der SBB anzuschliessen. Die Beleuchtungssteuerung muss die Auflösung der Sensorik auf die Beleuchtungssektoren der Lichtpunkte umrechnen können. Abhängig vom gewählten System der Sensorik sind unterschiedliche Algorithmen erforderlich. Bei einem Einsatz von GPS basierender Sensorik und Aktoren kann die Software für die Beleuchtungssteuerung unabhängig vom Standort gleich erstellt werden. Mit einem GPS basierendem Aufbau der Steuerung ist nur noch eine Parametrierung von Sensoren und Aktoren erforderlich. Daher ist eine Beleuchtungssteuerung basierend auf einem Globalen Koordinatensystem zu erstellen. Allfällige Mehrinvestitionen bei einer Pilotsteuerung zahlen sich aufgrund der Reproduzierbarkeit und wegfallenden Softwareentwicklungskosten bei Folgeprojekten aus. Demgegenüber steht der Einkauf eines standardisierten Lichtmanagementsystems inkl. Master Beleuchtungssteuerung pro Objekt.

4.2.6 Nutzung und Wartung

Nur eine genaue Beschreibung der auszuführenden Wartungsarbeiten stellt sicher, dass die prognostizierten Lebenszykluskosten und die berechnete Beleuchtungsstärke auch erreicht werden können. Auch mit aller verfügbaren Technik bleibt der Faktor Mensch, welcher die Anlage nutzt und wartet für den erfolgreichen und wirtschaftlichen Betrieb der Beleuchtungsanlage der Schlüsselfaktor. Dementsprechend sind nebst den Wartungsanweisungen auch Hilfsmittel für die Detektion von Störungen innerhalb der Beleuchtungsanlage zu erstellen und für den Betrieb zugänglich zu machen. Mittels rechtzeitiger Störungsmeldung können unerwartete Ausfälle reduziert und Folgekosten aufgrund von Fehlfunktionen minimiert werden.

4.3 Fazit

Gemäss Kapitel 2.6 ist bei einem Ersatz der Beleuchtungsanlage unter den evaluierten Rahmenbedingungen eine bedarfsgesteuerte Beleuchtungsanlage ab 18 % Energieeinsparung wirtschaftlich. Gemäss Kapitel 2.4.1 ist real eine Energieeinsparung von 20 % möglich.

Energieoptimierung Gleisfeldbeleuchtung

Gemäss der Berechnung der Lebenszykluskosten für den RBII, liegen alle drei untersuchten Varianten innerhalb des Toleranzbereichs der Kostenschätzung von 30 %. Bei einer Energiepreiserhöhung, welche nicht prognostiziert werden kann, ist die Wirtschaftlichkeit der Anlage bereits ab einer geringeren Energieeinsparung gegeben. Im Weiteren empfiehlt die SIA 491[4] eine Steuerbarkeit der Beleuchtungsanlage zwecks Reduktion der Lichtverschmutzung.

Basierend auf diesen Überlegungen ist die Steuerbarkeit der Beleuchtung auf dem Rangierbahnhof zu realisieren. Ein System, welches zudem eine bidirektionale Kommunikation zwischen Betriebsgerät und Steuerung erlaubt, ermöglicht die Integration der Anlage in ein Lichtmanagementsystem mit den entsprechenden Verwaltungsfunktionen. Damit kann auf Veränderungen des Betriebs sowie allfälliger Energiepreisentwicklungen reagiert werden.

4.4 Realisierungsvorschlag Rangierbahnhof Basel

Im Rahmen dieser Arbeit wurden zahlreiche Überlegungen und Analysen betreffend der Steuerbarkeit der Gleisfeldbeleuchtung durchgeführt.

Aufgrund der erläuterten Überlegungen wird folgende Variante zur Umsetzung empfohlen.

Variante RBII-V2
<p>Drahtgebundenes DALI-Bussystem unter Weiterverwendung der bestehenden Kabelanlage mit DALI-Repeatern zur DALI Bus Verlängerung bis 600 m.</p> <p>Folgende Leistungen sind in den Kosten enthalten:</p> <ul style="list-style-type: none">• Ersatz der Leuchten durch LED-Leuchten (z.B. GL20 145W)• Erstellen einer Kommunikationseinrichtung auf Feldebene mittels drahtgebundenem DALI-Bus System mit DALI-Repeatern• Erstellen der Sensorik bestehend aus:<ul style="list-style-type: none">○ Dämmerungsschalter○ Anbindung des Rangierleitsystems zwecks Erfassung der Wagenpositionen○ Erfassung der GPS-Positionen der GSM Endgeräte der Rangierbahnhof Mitarbeiter• Erstellen einer Beleuchtungssteuerung (Master)• Einrichten eines GSM-GPS Dienst zur Ortung der GSM Endgeräte auf einem bestehenden Server mit Verbindung zur Beleuchtungssteuerung.

Tabelle 25: Realisierungsvorschlag Beleuchtungssteuerung RBII

Falls die bestehende Kabelanlage nicht für die Übertragung des DALI-Signals verwendet werden kann, besteht die Möglichkeit der D2D Funkübertragung des DALI Bussignals. Als zweite Option bei Nichtverwendung der bestehenden Kabelanlage für die Kommunikation besteht die Möglichkeit eines zusätzlich verlegten Kabels eigens für die DALI-Kommunikation. Insbesondere bei grösseren Querschnitten der Energieversorgungskabel kann es wirtschaftlicher sein, ein paralleles zweiadriges Kabel mit geringeren Querschnitten zu verlegen. Aufgrund der Wartbarkeit der Anlage ist der Einsatz von Standardkabel einem Spezialekabel vorzuziehen.

Die Detektion von einfahrenden Zugkompositionen mit Zugführern ohne GSM-Endgerät kann mittels Rangierleitsystem gelöst werden. Zur Optimierung der Sensorik kann im Dispositionsgebäude der Lokführer ein einfaches Bedienterminal erstellt werden, welches dem aus dem Grenzbahnhof ausfahrenden ausländischen Lokführer erlaubt die Gleisfeldbeleuchtung im betroffenen Bereich beim Verlassen des Dispositionsgebäudes manuell einzuschalten. Aufgrund des Realisierungsvorschlags wurden die Einsparungen gemäss Abbildung 22 erzielt. In den berechneten LCC des Ist-Zustands wird angenommen, dass die Verkabelung nicht enthalten ist. Daher ist in Abbildung 22 ein Vergleich der Leuchten Ist / Soll ersichtlich. Im Weiteren erfolgt die Gegenüberstellung der Varianten Neubau und Ersatz gemäss Anhang 7. Es ist zu berücksichtigen, dass in Absprache mit der SBB keine Flächenbereinigung der Lichtpunkte berücksichtigt ist. Über den Einsatz eines Lichtmanagementsystems inkl. Wartungsplanung ist eine entsprechende Untersuchung durchzuführen und Vorgaben seitens der SBB zu erstellen.

Energieoptimierung Gleisfeldbeleuchtung

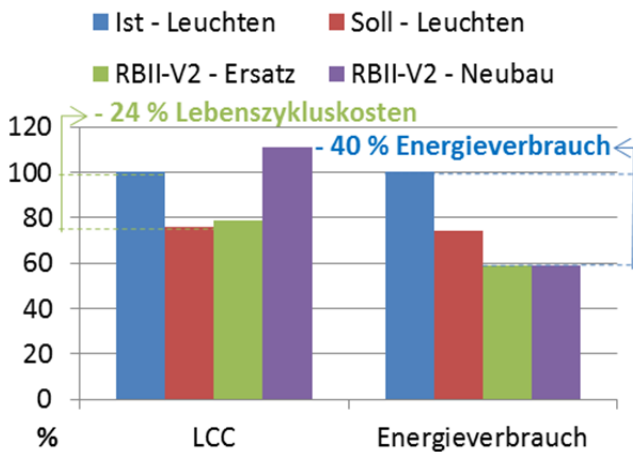


Abbildung 22: RBII-V2 - LCC / Energieverbrauch

ist der Technologievergleich mit den neuen Technologien zu aktualisieren. Da zum heutigen Zeitpunkt keine zuverlässigen Zahlen vorliegen, wurde diese Technologie im Variantenvergleich nicht berücksichtigt. Im Weiteren ist zu prüfen, in wieweit eine Anpassung der Teilsysteme Kommunikation Feldebene, Sensorik und Beleuchtungssteuerung inkl. Management zu einem System sinnvoll ist. Aufgrund der Verbindung von Teilsystemen kann möglicherweise eine Kostenoptimierung der Beleuchtungsanlage erfolgen.

4.5 Potentialabschätzung Gleisfeldbeleuchtung

Aufgrund der ermittelten LCC, der Energiesparpotentiale und der Vorstudie vom RBII kann unter Annahme von einem Energiepreis von 0.14 CHF/kWh und einer LED Lichtausbeute von 100 lm/W eine Hochrechnung auf alle Lichtpunkte der SBB im Gleisfeld gemacht werden (Anhang 5).

Daraus ergibt sich eine Reduktion des Energieverbrauchs bis zu -58 % und eine Reduktion der Lebenszykluskosten von bis zu -36 %, wenn die bestehenden Lichtpunkte durch LED Leuchten ersetzt werden und die Beleuchtung bedarfsgerecht gesteuert wird. In der Potentialabschätzung berücksichtigt ist zudem die Flächenbereinigung HI zu LED mit dem Faktor 1.21. In der Vorstudie zum RBII wurde die Flächenbereinigung in Absprache mit der SBB nicht berücksichtigt. Daher resultiert die Differenz des Reduktionspotentials zwischen der Abbildung 22 und der Abbildung 23. Im Weiteren ist das Reduktionspotential von der Ist-Situation, den zu beleuchtenden Gleisbereichen und dem ermittelten Energiesparpotential aufgrund der Nutzung abhängig.

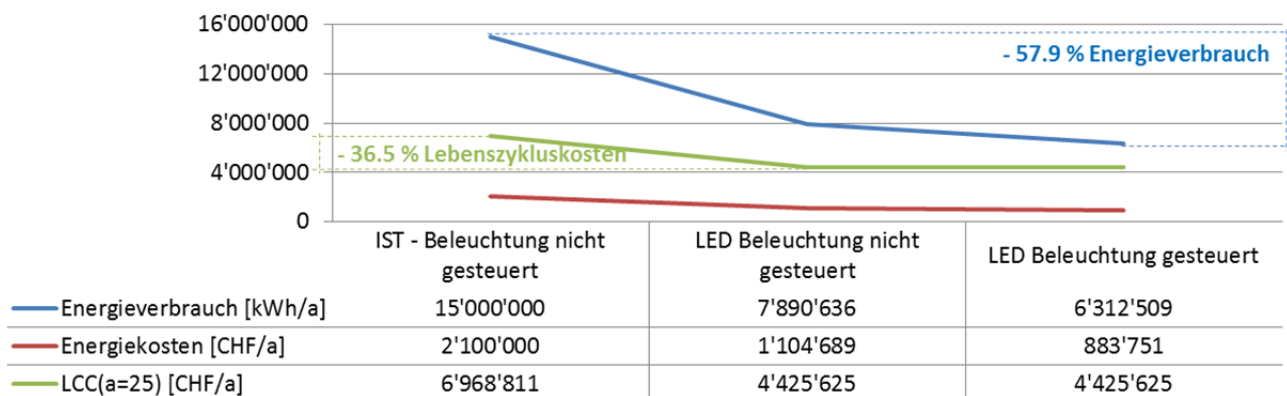


Abbildung 23: Potentialabschätzung der Geleisfeldbeleuchtung SBB

Aufgrund der realisierbaren Energieeinsparung bei gleichbleibenden LCC sollte eine bedarfsgerechte Steuerung der Beleuchtung bei einer Brenndauer von >2000 h pro Lichtpunkt und Jahr realisiert werden. Dies entspricht rund CHF 200.- Energieeinsparung pro Lebenszyklus und Lichtpunkt. Damit kann in Zukunft eine bedarfsgerechte Steuerung der Beleuchtung realisiert werden, ohne Mehrkosten für die Beleuchtungsanlage infolge Steuerung zu verursachen.

Zum heutigen Zeitpunkt ist die Wahl eines Kommunikationssystems für die nächsten 25 Jahre eine Herausforderung. Da der Markt im Bereich der Kommunikationstechnologie zurzeit stark im Umbruch ist, können voreilige Rückschlüsse auf eine nicht ausgereifte Technologie zu Fehlinvestitionen führen.

Mit Sicherheit wird die Entwicklung von IoT auch Einfluss auf die zukünftige Wahl der Kommunikation der Beleuchtungssteuerung haben. Sobald sich ausgereifte Systeme auf der Basis von LoRa bewährt haben,

5 Dank

Für die interessante Aufgabenstellung bedanke ich mich herzlich bei der SBB AG. Im speziellen bei Daniel Peter, welcher mir während der Arbeit den Zugang zu den erforderlichen Unterlagen seitens der SBB ermöglicht hat und fachlich die Erstellung der Arbeit begleitet hat. Im Weiteren hat Stefan Gerber die Erstellung der Arbeit hinsichtlich der administrativen Belange koordiniert.

Seitens der Schule hat mich der Betreuer Volker Wouters mit dienlichen Rückmeldungen während der Erstellung der Arbeit unterstützt und zum Gelingen der Arbeit beigetragen.

Für das Lektorat der Arbeit bedanke ich mich bei meinem Vorgesetzten Rolf Blaser.

Die Erstellung der Vorstudie Gleisfeldbeleuchtung hat mein Fachwissen im Bereich Beleuchtung, Kommunikationssysteme, Sensorik und Lichtmanagement erweitert. Die Herausforderung bei der Erarbeitung von Vorgaben und die nachvollziehbare Entscheidungsfindung einer Systemlösung habe ich aufgrund dieser Arbeit praxisbezogen erlebt. Die in die Arbeit investierte Zeit wurde mit wertvollen Erfahrungen, aktueller Thematik im Bereich der Kommunikation sowie interessanten Diskussionen und Überlegungen belohnt.

Ein Dank geht auch an meinen Arbeitgeber, welcher mir die Voraussetzungen für die Absolvierung dieser Weiterbildung ermöglicht hat.

Speziell zu erwähnen ist auch meine Familie, welche mich in den vergangenen Wochen und Monaten für die Schule, insbesondere für die Erstellung der Abschlussarbeit, entsprechend unterstützt und entbehrt hat.

6 Lebenslauf



Matthias Zurflüh, Projektleiter
Dipl. Elektromonteur
Dipl. Elektrotechniker HF
Dipl. NDS HF Betriebswirtschaft
Energieingenieur Gebäude i.A.

Geburtsdatum

14. Juni 1981

Sprachen

Deutsch, Englisch

Zivilstand

verheiratet seit 31. August 2002
Vier Kinder - Joel(2004), Dario(2006),
Ruben(2008) und Timon(2009)

Schulbildung

4 Jahre Primarschule Koppigen
5 Jahre Sekundarschule Koppigen

Berufsausbildung

Elektro Spielmann AG, Hindelbank

- Ausbildung zum Elektromonteur, 1997–2001
- Diplom als eidg. dipl. Elektromonteur, 2001
BBZ Biel
- Ausbildung zum Elektrotechniker HF 2002–2005
- Diplom als eidg. dipl. Elektrotechniker HF, 2005
sfb Bildungszentrum Höhere Fachschule, Ittigen
- Nachdiplomstudium Betriebswirtschaft 2010–2011
- Diplom als eidg. dipl. NDS HF Betriebswirtschaft, 2011
HSLU Hochschule Luzern
- MAS Energieingenieur Gebäude 2014 - 2016

Berufliche Erfahrungen

2003-2008 und seit 2011

- IUB Engineering AG
- Projektleiter
2009–2011
- ASIC Robotics AG, Burgdorf
- Softwareingenieur
2001–2003
- Elektro Spielmann AG, Hindelbank
- Bauleitender Elektromonteur

Militärische Ausbildung

Durchdienerschule 210/01 in St. Maurice VS (10 Monate)
Militärischer Grad: Korporal

Ausgeführte Projekte

2013– heute	Bundesamt für Strassen ASTRA F3 Zofingen N02 Sanierungstunnel Belchen (STB) <ul style="list-style-type: none">• Gesamtprojektleiter BSA Stv., Chefbauleiter BSA	Projektleiter
2011– heute	Tiefbauamt des Kt. Bern, N05 Biel Ostast <ul style="list-style-type: none">• Bauherrenunterstützung• Koordination der BSA Ausrüstung zum Rohbau	Projektleiter
2011– heute	Bundesamt für Strassen ASTRA F4 Winterthur <ul style="list-style-type: none">• Bauherrenunterstützung BSA, N03 Wollishofen - Wädenswil - Wollerau	Projektleiter
2011–2012	AlpTransit Gotthard AG, Luzern <ul style="list-style-type: none">• Koordination Projektierung der Rohbau-Ausrüstung GBT und CBT• Planung und Durchführung der Versuche:<ul style="list-style-type: none">◦ Nachweis der Funktionsfähigkeit des Entwässerungssystems im GBT◦ Retentionsschwellen	Projektleiter
2009–2011	ASIC Robotics AG, Burgdorf <ul style="list-style-type: none">• Software-Entwicklung für High-Tech Montageautomaten<ul style="list-style-type: none">◦ SPS – Steuerungen (AWL/SCL)◦ Robotersteuerungen (V+)◦ Visualisierungen (.net)	Software- ingenieur
2005–2008	BLS AG <ul style="list-style-type: none">• Auswirkungs- und Massnahmenliste für das Handbuch Tunneloperator LBT	Projektleiter
2003–2008	BLS AlpTransit AG <ul style="list-style-type: none">• Koordination der baulichen Ausführungsplanung• Koordination der Elektromechanischen Ausrüstung der Zentralen• Vorbereiten und durchführen von Tests und Teilprüfungen	Teilprojekt- leiter

7 Anhang

Die Anhänge beinhalten wesentliche ergänzende Angaben zur Diplomarbeit.

Anhang 1	Interview Betriebspersonal	16 Seiten
Anhang 2	Technologie der Teilsysteme	65 Seiten
Anhang 3	Nutzwertanalyse Technologie der Teilsysteme	15 Seiten
Anhang 4a	Lebenszykluskosten der Varianten - Neubau	34 Seiten
Anhang 4b	Lebenszykluskosten der Varianten - Ersatz	34 Seiten
Anhang 5	Energieeinsparung im Gleisfeld	12 Seiten
Anhang 6	Rangliste und Vergleiche der Technologievarianten	14 Seiten
Anhang 7	Vorstudie Gleisfeldbeleuchtung Rangierbahnhof II	38 Seiten
Anhang 8	Tätigkeiten und Anforderungen im Gleisfeld	07 Seiten
Anhang 9	Berechnungen Relux	62 Seiten
Anhang 10	SBB Infrastrukturplan, Rangierbahnhof Basel	02 Seiten

8 Abkürzungsverzeichnis

AES	Advanced Encryption Standard
App	Application software
BC	Bus-Controller
BK	Bus-Koppler
BP	Beleuchtungspunkt
CIS	Cargo-Informationssystem
CU	Kupfer
DALI	Digital Addressable Lighting Interface
EBM	Genossenschaft Elektra Birseck
EKAS	Eidgenössische Koordinationskommission für Arbeitssicherheit
Ene	Energieversorgung
EVB	Energieverbrauch
Fep	Faktor Energiepreis
GB	Gleisbereich
GLM	Gleismeter (4 m x 1 m = 4 m ²)
GPS	Global Positioning System
GSM	Global System for Mobile Communications
HI	Halogen-Metaldampf
IoT	Internet of Things (Internet der Dinge)
Kom	Kommunikation
LCC	Life-Cycle-Costing
LED	Light-Emitting-Diode
LoRaWAN	Long Range Wide Area Network
LP	Lichtpunkt
LPN	Low Power Network
LSS	Leit- und Störmeldesystem der SBB
LWL	Lichtwellenleiter
MS	Mittelspannung
MSR32	Steuerung Ablaufstellwerk
NA	Natriumdampf
PLC	Powerline Communication
RB	Rangierbahnhof
RBI	Rangierbahnhof I Nord - Süd (Basel)
RBII	Rangierbahnhof II Süd - Nord (Basel)
RF	Radio frequency (deutsch - Hochfrequenz)
SBB	Schweizerische Bundesbahnen
SIA	Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein
SIBACH	Lagerverwaltungs- und Planungstool des Rangierbahnhofs Basel
SOK	Schienenoberkante
SPD	Surge Protection Device
SPS	Speicherprogrammierbare Steuerung
SSID	Service Set Identifier
SUVA	Schweizerische Unfallversicherungsanstalt
UGR	Unified Glare Rating (vereinheitlichte Blendungsbewertung)
VUV	Verordnung über die Unfallverhütung
W&T	Wartungs- und Transitbereich Rangierbahnhof Basel
WLAN	Wireless Local Area Network

9 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Rangierbahnhof Basel.....	9
Abbildung 2:	Teilsysteme der Gleisfeldbeleuchtung	10
Abbildung 3:	Eigenschaften der Teilsysteme	10
Abbildung 4:	Evaluierte Technologien pro Teilsysteme	12
Abbildung 5:	LCC Neubau - Ersatz	13
Abbildung 6:	LCC pro LP in Abhängigkeit der LP pro Feldbusknoten (Neubau)	14
Abbildung 7:	Kapitalwertentwicklung der Technologien der Teilsysteme (Neubau)	14
Abbildung 8:	Beleuchtung mit 2 und 4 Lichtpunkten pro Standort	16
Abbildung 9:	Rangliste 1-5 LCC - Neubau	18
Abbildung 10:	Rangliste 1-5 LCC - Ersatz	18
Abbildung 11:	Resultierende Varianten.....	18
Abbildung 12:	Kosten / Nutzen.....	18
Abbildung 13:	LCC Beleuchtungsanlage Ersatz RBII	20
Abbildung 14:	LCC Beleuchtungsanlage Neubau RBII	20
Abbildung 15:	LCC-Energieeinsparung - Ersatz	21
Abbildung 16:	LCC-Energieeinsparung - Neubau	21
Abbildung 17:	Kapitalwert - Ersatz RBII	21
Abbildung 18:	Kapitalwert - Neubau RBII.....	21
Abbildung 19:	Vergleich Wirtschaftlichkeit LED - HI	25
Abbildung 20:	Entwicklung Internetteilnehmer	26
Abbildung 21:	Investitionskosten für Steuerung pro Lichtpunkt	28
Abbildung 22:	RBII-V2 - LCC / Energieverbrauch.....	31
Abbildung 23:	Potentialabschätzung der Geleisfeldbeleuchtung SBB	31

10 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Infrastruktur Beleuchtungsanlage Rangierbahnhof Basel - Ist-Situation.....	9
Tabelle 2:	Berücksichtigte Technologievarianten	10
Tabelle 3:	Nicht monetäre Kriterien	11
Tabelle 4:	monetäre Kriterien.....	11
Tabelle 5:	Rangreihverfahren	11
Tabelle 6:	Flächenbereinigungsfaktor der Leuchten.....	11
Tabelle 7:	Rahmenbedingungen zur Ermittlung der Lebenszykluskosten	13
Tabelle 8:	Lebenszykluskosten nach Varianten der Teilsysteme	13
Tabelle 9:	Reduktionspotential der Beleuchtung pro Gleisbereich	15
Tabelle 10:	Relevante Parameter für die Berechnung des Energiesparpotentials	15
Tabelle 11:	Energiesparpotential Rangierbahnhof Basel.....	15
Tabelle 12:	Energiesparpotential pro Sensorik-Variante	15
Tabelle 13:	Vergleich der Anordnung der Lichtpunkte	16
Tabelle 14:	Kostendifferenz Montageort Treiber und Kommunikation	16
Tabelle 15:	Gesichtspunkte der Rangierung.....	17
Tabelle 16:	Resultate Technologievergleich für Neubau und Ersatz	17
Tabelle 17:	Interpretation der Ergebnisse	18
Tabelle 18:	Lösungsvorschläge Erneuerung Gleisfeldbeleuchtung.....	19
Tabelle 19:	Mengengerüst Beleuchtungsanlage RBII.....	19
Tabelle 20:	Beleuchtungsprofile.....	22
Tabelle 21:	Parameter für die definierten Beleuchtungsprofile	22
Tabelle 22:	Beleuchtungsleistung pro Gleismeter	23
Tabelle 23:	Korrekturfaktoren Beleuchtungsleistung	23
Tabelle 24:	Energieverbrauch pro Gleismeter und Jahr	23
Tabelle 25:	Realisierungsvorschlag Beleuchtungssteuerung RBII	30

11 Literaturverzeichnis

Folgende Literatur wurde für die Erstellung der Arbeit verwendet.

[1] **EN 12464 Licht und Beleuchtung**

Quelle: Beleuchtung von Arbeitsstätten - Teil 2: Arbeitsplätze im Freien
SN EN: 12464-2:2014 de
Verlag: SNV Schweizerische Normen-Vereinigung, CH-8400 Winterthur
Ausgabe: 2014-04-01

[2] **Beleuchtung der Bahnhöfe, Gleisfelder und Tunnel**

Quelle: Regelwerk SBB I-50103
ISBN: -
Verlag: SBB AG
Ausgabe: Version 2.0, 01.06.2015

[3] **CEN/TR 13201-1 Strassenbeleuchtung**

Quelle: Strassenbeleuchtung - Teil 1: Auswahl der Beleuchtungsklassen
CEN/TR: 13201-1:2004 D
Verlag: Europäisches Komitee für Normung, Management-Zentrum B-1050 Brüssel
Ausgabe: 2004

[4] **SN EN 13201-2 Strassenbeleuchtung**

Quelle: Strassenbeleuchtung - Teil 2: Gütemerkmale
SN EN: 13201-2:2004 de
Verlag: SNV Schweizerische Normen-Vereinigung, CH-8400 Winterthur
Ausgabe: 2004-03

[5] **SIA 491 Vermeidung unnötiger Lichtemissionen im Aussenraum**

Quelle: SIA 491 Vermeidung unnötiger Lichtemissionen im Aussenraum
SN EN: SN 586 491:2013 de
Verlag: Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein
Ausgabe: 2013

12 Quellenverzeichnis

Zusätzlich zur erwähnten Literatur wurde von den nachfolgenden Quellen Informationen für die Arbeit eingeholt.

- 1 Faktenblatt: SBB Energiestrategie, Februar 2015
Datum: 28.01.2016 (Download)
URL: www.sbb.ch/energie
- 2 Plan: SBB Infrastruktur, Katalog der Plattformenbeleuchtung
Datum: 04.02.2013
Herkunft: Zustellung per E-Mail D. Peter SBB AG am 17.02.2016
- 3 Dokument: Halogen - Metaldampflampen
Datum: April 2012
Herkunft: OSRAM AG, München
URL: <http://www.osram.ch/media/resource/HIRES/339013/3850307/halogen-metaldampflampen-d.pdf>
- 4 Dokument: Rangreihverfahren
Datum: 25.03.2016 (Download)
URL: http://www.orghandbuch.de/OHB/DE/Organisationshandbuch/6_MethodenTechniken/65_Wirtschaftlichkeitsuntersuchung/652_Qualitative/qualitative_inhalt.html
- 5 Dokument: Tridonic - DALI Repeater
Datum: 11.04.2016 (Download)
URL: <http://www.tridonic.ch/ch/products/2629.asp>
- 6 Dokument: D2D
Datum: 11.04.2016
Herkunft: Zustellung per E-Mail Y. Barnea, Virtual-Extension, Israel
URL: <http://www.virtual-extension.com/solutions/d2d/>
- 7 Dokument: Lichtsteuerung und Gebäudeautomation
Herkunft: Bulletin 47, Electrosuisse
Datum: August 2015
URL: http://www.bulletin-online.ch/uploads/media/46-50_1508_moellers.pdf
<http://visiblelightcomm.com/what-is-visible-light-communication-vlc/>
- 8 Dokument: Lichtmanagement - Paradox
Datum: 11.04.2016
Herkunft: Zustellung per E-Mail F. Koster, Elektron
URL: <http://www.pdxeng.ch/products/pe-ami-lighting-management-solution>
- 9 Dokument: Lichtmanagement - CityTouch
Datum: 11.04.2016
Herkunft: Zustellung per E-Mail F. Koster, Elektron
URL: <http://www.elektron.ch/de/produkte-loesungen/lichtstrassenbeleuchtung/lichtsteuerung>

- 10 Herkunft: LED Forum, Januar 2016
Präsentation: 04_Martin Kirsten, Folie 25
Datum: 15.01.2016
URL: www.electrosuisse.ch/itg-rueckblicke
- 11 Dokument: Phoenix - Industrial Ethernet
Datum: 2013
URL: https://www.phoenixcontact.com/assets/downloads_ed/global/web_dwl_promotion/52002634_DE_DE_Ethernet_Infrastruktur_LoRes.pdf
- 12 Herkunft: LED Forum, Januar 2016
Präsentation: 02_Carsten Moellers_Nogs, Folie 14
Datum: 15.01.2016
URL: www.electrosuisse.ch/itg-rueckblicke
- 13 Herkunft: Lora Alliance
Datum: 15.03.2016
URL: <https://www.lora-alliance.org/What-Is-LoRa/Technology>
- 14 Artikel: Swisscom setzt aufs Internet der Dinge
Datum: 15.03.2016
Herkunft: Berner Zeitung
URL: <http://www.bernerzeitung.ch/wirtschaft/unternehmen-und-konjunktur/Swisscom-setzt-aufs-Internet-der-Dinge/story/31969323>
- 15 Faktenblatt: SBB Cargo - Logistikmagazin 03/2015
Datum: November 2015
URL: <http://www.sbbcargo.com/de/medien/publikationen/cargomagazin/cargomagazin-315.html>