

Nutzenpotenziale intelligenter Beleuchtungssysteme für Fabrikbetriebe

Marc Füchtenhans, Kevin Schmidt, Eric Grosse und Christoph Glock

In modernen Fabrikbetrieben wird nach Lösungen zur Reduktion von Energiekosten und Kohlenstoffdioxidemissionen gesucht, dabei jedoch häufig die Beleuchtung vernachlässigt. Durch die stetige Weiterentwicklung der LED existieren marktreife intelligente Beleuchtungssysteme, die äußerst energieeffizient und emissionsarm sind und darüber hinaus weitere Nutzenpotenziale zur Prozessverbesserung aufweisen.

Unternehmen stehen vor der Herausforderung, Kohlenstoffdioxidemissionen, welche als Hauptursache für den Treibhauseffekt und damit in Verbindung stehender Umweltschäden gelten, zu reduzieren. Gleichzeitig ist davon auszugehen, dass der Industriestrompreis in Deutschland weiter zunehmen wird, u. a. aufgrund des Erneuerbare-Energie-Gesetzes (EEG-Umlage). In Unternehmen zählen v. a. die Logistik und die Produktion zu den wichtigsten Energieverbrauchern. In Lagerhäusern oder Produktionseinrichtungen wird dabei ein großer Anteil der Treibhausgasemissionen auf die Nutzung von Klimaanlage zum Heizen oder Kühlen sowie (oftmals hauptsächlich) auf die Beleuchtung zurückgeführt. In nicht-automatisierten Lagerhäusern verursacht die Beleuchtung regelmäßig bis zu 65 Prozent des gesamten Energieverbrauchs [1], wodurch maßgeblich die Kohlenstoffbilanz und die Stromkosten für diese Einrichtungen beeinflusst werden. Studien zeigen dabei, dass die Umrüstung auf eine energieeffiziente Beleuchtung in Industriegebäuden zu erheblichen Einsparungen führen kann [2, 3, 4].

Lichtemittierende Diode

In den letzten Jahren ist die Leistungsfähigkeit von Halbleiterlichtquellen, darunter auch die der Leuchtdiode (lichtemittierende Diode; LED), sprunghaft angestiegen, wodurch neue Anwendungsfelder erschlossen werden konnten. So wächst im Markt für Allgemeinbeleuchtung der Anteil der Leuchtdiode deutlich. Das LED-Leuchtmittel ist nicht nur als ein Ersatz der herkömmlichen Lichtquellen anzusehen, sondern bietet auch Vorteile in der Licht- und Kosteneffizienz und vor allem in den vielfältigen Steuerungsmöglichkeiten, womit ein großer Beitrag zur Nachhaltigkeit geleistet wird. LED-Leuchten besitzen eine hohe Lichtausbeute von 80 bis 200 lm/Watt und eine Lebens-

dauer von bis zu 25.000 Stunden. Im Vergleich dazu besitzen Glühlampen ca. 12 lm/Watt und Fluoreszenzlampen ca. 80 lm/Watt [2]. Große Vorteile der LEDs sind ihre Robustheit, Schaltfestigkeit und somit lange Lebensdauer. Darüber hinaus haben betriebsbedingte Vibrationen und Erschütterungen keinen Einfluss auf die Funktionalität. Die elektrisch ansteuerbare LED erreicht eine hohe natürliche Farbwiedergabe bei flackerfreiem Licht und stufenloser Dimmbarkeit. Außerdem enthält das Licht von LEDs keine Wärmestrahlung, sodass sich Kühl- und Schmiermittel in Verbindung mit Staub nicht einbrennen können. Diese Eigenschaften ermöglichen längere Wartungsintervalle und reduzieren somit die Wartungskosten gegenüber herkömmlichen Leuchtmitteln [2]. LED-Leuchten sind an kundenspezifische Wünsche anpassbar und werden auch für konventionelle Leuchten, als sogenannte Retrofit-Leuchtmittel, hergestellt. Alleine ein Wechsel mit LED-Retrofits ermöglicht Energieeinsparungen von mindestens 50 Prozent einhergehend mit den Vorteilen der LED-Technologie.

Intelligente Beleuchtungssysteme

Durch das Internet der Dinge ergeben sich für die Beleuchtung neue Anwendungsmöglichkeiten [5]. Die elektrische Ansteuerung der LED und somit deren Möglichkeit zur Vernetzung macht die traditionelle Beleuchtung „intelligent“. Grundlegend basieren intelligente Beleuchtungssysteme auf dem intelligenten Zusammenspiel von Leuchtmitteln, Sensorik und äußeren Einflüssen (wie etwa dem Tageslicht und dem Verhalten der Nutzer), das durch eine Regelung zu einem geschlossenen System wird [6]. Diese Systeme arbeiten energieeffizient, indem die Beleuchtung bedarfsgerecht an komplexe und veränderliche Situation an-

In diesem Beitrag lesen Sie:

- ✓ wie Beleuchtung intelligent wird,
- ✓ wie Beleuchtungssysteme einen Beitrag zur nachhaltigen Produktions- und Lagerwirtschaft leisten können und
- ✓ wie die Beleuchtung die Produktivität und das Wohlbefinden von Mitarbeitern beeinflussen kann.

Marc Füchtenhans, M.Sc. ist Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fachgebiet Produktion und Supply Chain Management der Technischen Universität Darmstadt. Herr Füchtenhans untersucht unter anderem Anwendungspotenziale für intelligente Beleuchtungssysteme in der Produktions- und Lagerwirtschaft und entwickelt Verfahren zur effizienten Steuerung moderner Beleuchtungssysteme.

Kevin Schmidt ist Mitarbeiter am Fachgebiet Produktion und Supply Chain Management der Technischen Universität Darmstadt. Herr Schmidt beschäftigt sich seit mehreren Jahren mit den unterschiedlichen Systemen und Anwendungen der intelligenten Beleuchtung.

Dr. Eric Grosse habilitiert am Fachgebiet Produktion und Supply Chain Management der Technischen Universität Darmstadt. Dr. Grosse Forschungsschwerpunkte liegen unter anderem in der Berücksichtigung von Nachhaltigkeitsaspekten in der Kommissionierung und Lageroptimierung sowie der digitalen Transformation in der Logistik.

Prof. Dr. Christoph Glock leitet das Fachgebiet Produktion und Supply Chain Management der Technischen Universität Darmstadt. Prof. Glocks Forschungsinteressen, die zu Veröffentlichungen in renommierten internationalen Zeitschriften geführt haben, erstrecken sich u.a. auf die Bereiche Produktionsplanung und -steuerung, Lageroptimierung und umweltorientierte Produktionswirtschaft.

www.pscm-tu-darmstadt.de



Bild 1: LED-Tiefstrahler zur flächigen Grundausleuchtung von Gebäuden mit hoher Raumhöhe. Copyright: Herbert Waldmann GmbH & Co. KG

Literatur

- [1] Richards, G. Warehouse Management: A complete guide to improving efficiency and minimizing costs in the modern warehouse. Kogan Page Publishers, London 2014
- [2] Chang, M.-H.; Sandborn, P.; Pecht, M.; Yung, W. K. C.; Wang, W.: A return on investment analysis of applying health monitoring to LED lighting systems. *Microelectronics Reliability* 55 (2015) 3-4, S. 527–537
- [3] Lim, G.-H.; Keumala, N.; Ghafar, N. A.: Energy saving potential and visual comfort of task light usage for offices in Malaysia. *Energy and Buildings* 147 (2017), S. 166–175
- [4] Pandharipande, A.; Caicedo, D.: Smart indoor lighting systems with luminaire-based sensing: A review of lighting control approaches. *Energy and Buildings* 104 (2015), S. 369–377
- [5] Afshari, S.; Mishra, S.; Julius, A.; Lizarralde, F.; Wason, J. D.; Wen, J. T.: Modeling and control of color tunable lighting systems. *Energy and Buildings* 68 (2014), S. 242–253

gepasst werden kann. Hierbei kann abhängig vom Tageslicht künstliches Licht entsprechend zugeschaltet und gesteuert werden, um ausreichend Licht bereitzustellen. Sollten keine Nutzer anwesend sein, kann das Licht automatisch reduziert oder ganz ausgeschaltet werden. Sensorgesteuertes Licht ermöglicht es, den Energieverbrauch zu senken, ohne die Sicherheit und Funktionalität zu beeinträchtigen [4]. Im Bürobereich können Präsenzmelder Bewegungen der Mitarbeiter registrieren und ebenfalls mit Hilfe von Tageslichtsensoren das einfallende Tageslicht messen, sodass das Beleuchtungssystem die Beleuchtungsstärke des künstlichen Lichts nach den vorher definierten Werten regelt. Ist genügend Tageslicht vorhanden, wird kein künstliches Licht zugeschaltet. Verlässt ein Mitarbeiter den Arbeitsplatz, registriert dies der

Präsenzmelder und das Licht wird ausgeschaltet. Dadurch eignet sich diese Art der Sensorik insbesondere auch für wenig frequentierte Orte [7]. Durch die kombinierte Anwendung von Tageslichtsensoren und Anwesenheitssensoren können höhere durchschnittliche Einsparpotenziale im Bereich von 13 Prozent bis 73,2 Prozent erreicht werden [6]. Gerade im Bereich des Mitarbeiter- und Arbeitsschutzes zeigt der betriebliche Alltag, dass die Vorgaben durch die Gesetzgeber zunehmend strenger werden, aber auch viele Unternehmen Verantwortung übernehmen. Dabei trägt gutes Licht auch zum Wohlbefinden der Mitarbeiter und vorbeugend zur Verhinderung von Unfällen am Arbeitsplatz bei [8]. Die Vernetzbarkeit ermöglicht die Integration intelligenter Beleuchtungssysteme in die vorhandene Gebäudetechnik, die somit zentral überwacht und gesteuert werden [9].

Besonders in der Logistik und Produktion bestehen große Anwendungspotenziale für intelligente Beleuchtungssysteme. In der Montage, Qualitätskontrolle und im Kommissionierlager werden hohe Beleuchtungsstärken zur Durchführung der Seharbeiten benötigt, die in vielen Fällen deutlich über den gesetzlich festgelegten Mindestwerten liegen sollten. Oftmals ist nur auf reinen Durchgangs- und Transportwegen die gesetzliche Minimalbeleuchtung ausreichend, die durch die technischen Regeln

für Arbeitsstätten, die die Anforderungen der Arbeitsstättenverordnung präzisieren, festgelegt sind. Intelligente Beleuchtungssysteme ermöglichen es, individuelle Beleuchtungszonen und Profile einzurichten, die darüber hinaus bei einer Layoutänderung ohne Komponententausch leicht angepasst werden können. Der dauerhafte Lichtbetrieb über sehr große Produktions- und Lagerbereiche geht einher mit hohen Energiekosten. Dazu ist die „richtige“ Menge an Licht, zur „richtigen“ Zeit am „richtigen“ Ort notwendig. Allgemein sind Einsparpotenziale von intelligenten Beleuchtungssystemen, die nur mit Tageslichtsensoren arbeiten, an die örtlichen Gegebenheiten gekoppelt und betragen dabei zwischen 20 Prozent bis 92 Prozent im Vergleich zu herkömmlichen Systemen [6]. Maßgebliche Einflussgrößen sind dabei die Größe und Ausrichtung der Fenster, sowie die anfallenden Sonnenstunden [10].

Weitere Einsparpotenziale, bspw. im Kommissionierlager, können über Anwesenheitssensoren generiert werden. Diese erfassen minimale Bewegungen innerhalb eines eingestellten Blickwinkels und melden dies an die Steuerung des Beleuchtungssystems. Sobald keine Bewegungen mehr festgestellt werden, schaltet sich das Licht nach einer vorher eingestellten Einschaltdauer wieder ab. So können abhängig von der Benutzungsart der Gänge, Einsparungen von 3 Prozent bis 50 Prozent, bzw. bei irregulärer Nutzung 17 Prozent bis 86 Prozent erreicht werden [11]. Dabei können die Gänge auch mit Tageslichtsensoren ausgestattet werden.

Wartung

Ein weiterer Vorteil der Vernetzung von einzelnen Komponenten innerhalb eines Beleuchtungssystems ist die zentrale Überwachung der Komponenten in Echtzeit. Dies erlaubt die Erfassung der zeitlichen Leistungsabnahme der LED durch Verschmutzung oder Alterung über Sensoren. Dies ermöglicht es, Wartungsintervalle basierend auf eigenen betrieblichen Erfahrungen genauer zu definieren und außerplanmäßige Wartungen, unerwartete Kosten und somit Störungen und Ausfallzeiten zu minimieren. Die eigenen betrieblich gesammelten Daten können für Prognosemodelle zu Ausfällen herangezogen werden. Zudem werden die Einhaltung von Sicherheitsstandards und der betrieblichen Anforderungen an die Beleuchtungsstärke gewährleistet [12]. Aufgrund unterschiedlicher – zum Teil neuer – Produkte von Herstellern wird es für den Endnutzer immer schwieriger, die eigenen Systeme zu warten und ohne größeren Aufwand

im Fall eines Defektes zu ersetzen. Somit ist es nicht nur wichtig, dass Komponenten der Beleuchtungssysteme schnell und einfach ersetzt werden können, indem z. B. mittels Barcode am jeweiligen Bauteil geprüft werden kann, ob die Kompatibilität mit dem restlichen System gewährleistet ist, sondern, dass diese auch in der Lage sind, die gewünschte Konfiguration leicht von der zu ersetzenden Komponente zu übernehmen, ohne die gesamte Anlage neu programmieren zu müssen.

Außenbeleuchtung

Die Beleuchtung im Außenbereich, bspw. für Außenlagerflächen oder für Transportwege zwischen Lagerhallen, kann durch Sensorik und LED-Technik energieeffizient erweitert werden. Häufig erfordert die Umrüstung der Außenbeleuchtung auf LED keine zusätzlichen Investitionen im Bereich der Infrastruktur. So kann bereits eine hohe Energieeinsparung bei normgerechter Beleuchtung realisiert werden. Zusätzlich können durch die Integration von Tageslicht- und Anwesenheitssensoren einerseits die Energieeinsparung erhöht [13] und andererseits die Umweltbelastung durch Lichtverschmutzung im Außenbereich minimiert werden [14]. Dabei bietet bewegungssensitive Lichtsteuerung gleichzeitig die Möglichkeit der Kriminalprävention, da somit auch Bereiche auf dem Werksgelände umweltbewusst ausgeleuchtet werden können, die nur gering frequentiert werden. Außerdem können die vorhandenen Leuchtmasten als „Datensammelnde“ benutzt sowie um Solarzellen zur Energiegewinnung und Batterien zur Energiezwischenspeicherung erweitert werden, um die operativen Kosten zu senken [15]. Die gesammelten Daten bieten eine Basis zur Erstellung von Heatmaps, die als Grundlage für die weitere Infrastrukturplanung genutzt werden können [16].

Visible Light Communication

Beinahe unabhängig vom Einsatzort ist die Visible Light Communication (VLC) Technologie für den drahtlosen Netzzugang, was eine Alternative zu herkömmlichen Funktechnologien darstellt. VLC besteht aus einem Sender, einem Ausbreitungskanal und einem Empfänger. Der Sender besteht aus einer RGB-LED oder einer einzelnen weißen LED. Die LED wird dabei mit Hilfe eines Modulators schnell ein- und ausgeschaltet und sendet so Lichtimpulse. Da die Kommunikation zwischen Sender und Empfänger nur in der Sichtlinie stattfinden kann, müssen die LED entsprechend angeordnet werden [17]. Eine allgemeine Beleuchtung,

die zum Beispiel zum Lesen ausreichend ist, ist bereits stark genug, um eine gute Verbindung mit hohem Signal-Rausch-Verhältnis zu erhalten. Der Empfänger besteht aus einer Fotodiode, welche die Lichtimpulse auffängt und in elektrische Signale umwandelt. Durch die hohe Hertzrate ist für das menschliche Auge kein Flimmern zu erkennen [18]. Die Vorteile der VLC sind die Energieeffizienz und die stabile Übertragungsgeschwindigkeit aufgrund der Möglichkeit, diese in die vorhandene LED-Beleuchtung zu integrieren, bspw. in Großraumbüros und Lagerhallen. Die Technologie ermöglicht einen hohen Datenschutz, da nur Empfänger in der Sichtlinie diese Daten empfangen können. Ein möglicher Anwendungsfall ergibt sich in Kommissionierlagern, wenn etwa Handhelds Daten über die VLC-Technologie empfangen können. VLC kann zudem an Orten eingesetzt werden, an denen WLAN aufgrund von Interferenzen gestört wird. Dabei emittiert VLC im Gegensatz zu vergleichbaren Funktechnologien keine Strahlung [18].

Eine direkte Anwendungsmöglichkeit von VLC ist das Indoor Positioning System (IPS). Indoor Positioning bezeichnet die Lokalisierung von Objekten oder Menschen in Gebäuden vergleichbar mit GPS im Außenbereich. Da GPS aufgrund der vielen Störfaktoren in Innenräumen nicht die gewünschte Genauigkeit erreicht bzw. zum Teil überhaupt keine Positionierung ermöglicht, stellt VLC eine interessante Alternative für Innenräume dar. Mittels Triangulation kann die Position des Empfängers im Gebäude sehr genau bestimmt werden. Dabei muss der Empfänger in der Reichweite von mindestens zwei, besser drei unterschied-

- [6] Chew, I.; Karunatilaka, D.; Tan, C. P.; Kalavally, V.: Smart lighting: The way forward? Reviewing the past to shape the future. *Energy and Buildings* 149 (2017), S. 180–191
- [7] Liu, J.; Zhang, W.; Chu, X.; Liu, Y.: Fuzzy logic controller for energy savings in a smart LED lighting system considering lighting comfort and daylight. *Energy and Buildings* 127 (2016), S. 95–104
- [8] Veitch, J. A.; Stokkermans, M. G. M.; Newsham, G. R.: Linking Lighting Appraisals to Work Behaviors. *Environment and Behavior* 45 (2013) 2, S. 198–214
- [9] Vanus, J.; Stratil T.; Martinek, R.; Bilik, P.; Zidek, J. (2016): The Possibility of Using VLC Data Transfer in the Smart Home.
- [10] Chew, I.; Kalavally, V.; Oo, N. W.; Parkkinen, J.: Design of an energy-saving controller for an intelligent LED lighting system. *Energy and Buildings* 120 (2016), S. 1–9
- [11] Richman, E.E.; Dittmer, A.L.; Keller, J.M.: Field analysis of occupancy sensor operation: parameters affecting lighting energy savings. *Journal of the Illuminating Engineering Society* 25 (1996) 1, S. 83–92.
- [12] Sahin, M.; Oğuz, Y.; Büyüktürk, F.: ANN-based estimation of time-dependent energy loss in lighting systems. In: *Energy and Buildings* 116 (2016), S. 455–467
- [13] Wojnicki, I.; Ernst, S.; Kotulski, L.; Se, dziwy, A.: Advanced street lighting control. *Expert Systems with Applications* 41 (2014) 4, S. 999–1005

Bild 2: Gute Lichtqualität und gleichmäßige Beleuchtung mit energieeffizienten LED-Strahlern. Copyright: Herbert Waldmann GmbH & Co. KG



- [14] Borchers, K. C.; Schomerus, T.: Umweltverschmutzung durch Licht – die Ausweisung von Lichtschutzgebieten als Instrument zur Reduktion von Lichtimmissionen. NuR 37 (2015) 9, S. 614–621
- [15] Kovács, A.; Bártai, R.; Csáji, B. C.; Dudás, P.; Háy, B.; Pedone, G.: Intelligent control for energy-positive street lighting. Energy 114 (2016), S. 40–51
- [16] Silva, B. N.; Khan, M.; Han, K.: Towards sustainable smart cities: A review of trends, architectures, components, and open challenges in smart cities. Sustainable Cities and Society 38 (2018), S. 697–713
- [17] Sharma, R.; Charan Kumari, A.; Aggarwal, M.; Ahuja, S.: Optimal LED deployment for mobile indoor visible light communication system: Performance analysis. AEU - International Journal of Electronics and Communications 83 (2018), S. 427–432
- [18] O'Brien, D.; Le Minh, H.; Zeng, L.; Faulkner, G.; Lee, K.; Jung, D.: Indoor visible light communications: challenges and prospects. In: Majumdar, A. K.; Davis C. C. (Hrsg.): Optical Engineering + Applications. SPIE Proceedings, San Diego, California 2018, S. 709106
- [19] Chizari, A.; Jamali, M. V.; Abdollahramezani, S.; Salehi, J. A.; Dargahi, A.: Visible light for communication, indoor positioning, and dimmable illumination: A system design based on overlapping pulse position modulation. Optik 151 (2017), S. 110–122
- [20] Brainard, G. C.; Hanifin, J. P.; Greeson, J. M.; Byrne, B.; Glickman, G.; Gerner, E.; Rollag, M. D.: Action Spectrum for Melatonin Regulation in Humans: Evidence for a Novel Circadian Photoreceptor. The Journal of Neuroscience 21 (2001) 16, S. 6405
- [21] Scheiermann, C.; Kunisaki, Y.; Frenette, P.S.: Circadian control of the immune system. Nature Reviews Immunology 13 (2013), S. 190



Bild 3: LED-Lichtbandsystem für individuelle und anpassungsfähige Lichtlösungen in der Industrie.
Copyright: Herbert Waldmann GmbH & Co. KG

lichen Sendern bzw. Leuchten sein [19]. So kann VLC bspw. zur Routenführung in Kommissionierlagern genutzt werden. Die gesammelten Daten können zudem zum Erstellen von Lagerheatmaps genutzt werden. Damit kann das Lagerlayout oder die Lagerplatzvergabe regelmäßig überprüft und bei Bedarf effizienter gestaltet werden.

Human Centric Lighting

Human Centric Lighting (HCL) ist als ein neues Konzept der ganzheitlichen Lichtplanung anzusehen, das sich mit der visuellen, biologischen und emotionalen Wirkung des Lichts auf den Menschen auseinandersetzt und sich dadurch von der rein technischen Beleuchtung abgrenzt. Die visuelle Wirkung von Licht verfolgt das Ziel, eine an die Tätigkeit angepasste optimale Beleuchtung der Umgebung zu verwirklichen, und stellt damit die „Grundanforderung“ der Beleuchtung dar. Die biologische Wirkung des Lichtes auf den Menschen wurde mit der Entdeckung eines

dritten Fotorezeptors im menschlichen Auge, der auf blaues Licht reagiert, nachgewiesen [20]. Dieser nicht-visuelle Effekt des Lichts wirkt sich auf den circadianen Rhythmus des Menschen aus, u.a. auf den Schlaf-Wach-Rhythmus, die Leistungsfähigkeit und die Konzentration [21]. Auf Basis dieser

Erkenntnis wird über HCL die Beleuchtung an den natürlichen biologischen Tagesrhythmus des Menschen angepasst, um negative Effekte durch künstliche Beleuchtung abzumildern. In der Lichtplanung sollten zudem die Lichtwahrnehmung und die Ästhetik des Lichtes beachtet werden [8]. Neben der reinen Wahrnehmung der Beleuchtung kann etwa der Kontrollverlust über das Steuern der Beleuchtung psychologische Folgen für Mitarbeiter haben [3].

Die ganzheitliche Lichtplanung mit einem intelligenten Beleuchtungssystem bietet für Produktion und Logistik einen aktiven Beitrag zum Mitarbeiter- und Gesundheitsschutz und erschließt Anwendungspotenziale, die weit über das reine Beleuchten hinausgehen. In Situationen, in denen Energieverbräuche etwa in der Lagerhaltung reduziert werden sollen, bietet sich der Einsatz intelligenter Beleuchtungssysteme, die Lagerbereiche in Abhängigkeit der tatsächlichen Nutzung ausleuchten, an. Darüber hinaus schaffen neuere Technologien intelligenter Beleuchtungssysteme Möglichkeiten zur Datenübertragung sowie Positionsbestimmung, die aufgrund von Infrastrukturen innerhalb von Produktions- und Logistikrichtungen ansonsten nicht möglich wären.

Gefördert durch Bundesministerium für Wirtschaft und Energie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages.

Schlüsselwörter:

Intelligente Beleuchtung, energiesparende Beleuchtung, Beleuchtungssteuerung

Smart Lighting – Potentials for Factories

Companies are forced to continuously improve both their operations and their environmental footprint. One issue that has largely been overlooked by operations managers is lighting. Smart lighting systems can save energy, reduce the environmental footprint and offer various potentials for process improvements in factories.

Keywords:

Smart Lighting, LED, Energy Saving Lighting, Visible Light Communication, Human Centric Lighting