

Potential für energieeffiziente Beleuchtungssysteme in Unternehmen und Hemmnisse bei der Umsetzung

Dr. Jan Steinbach
Andreas Gerspacher
Dr. Barbara Schlomann
Edith Chassein
Florian Emsmann
Natalja Ashley-Belbin

Karlsruhe, März 2019

Die Durchführung dieser Studie wurde durch die Melete Stiftung zur anwendungsorientierten Forschung und Wissenschaft unterstützt



Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Energieeffiziente Beleuchtungssysteme.....	3
2.1	Stand der Technik	3
2.2	Status und Potential effizienter Beleuchtungssysteme im Bestand	7
2.3	Smart Lighting - Intelligente Beleuchtung und Lichtmanagementsysteme.....	11
3	Einsparung und Wirtschaftlichkeit effizienter Beleuchtungssysteme in Unternehmen	16
3.1	Datengrundlage.....	16
3.2	Energieeinsparpotential in den untersuchten Unternehmen.....	17
3.3	Wirtschaftlichkeit.....	19
4	Aktuelle Unternehmensbefragung zu Umsetzung und Hemmnissen	23
4.1	Beschreibung der Stichprobe und Methodik	23
4.2	Beleuchtungsmaßnahmen in den Unternehmen.....	24
4.3	Lichtmanagement und fortschrittliche Beleuchtungstechnik.....	26
4.4	Hemmnisse bei der Umstellung auf effiziente Beleuchtungssysteme	27
5	Aktueller Rechts- und Förderrahmen für effiziente Beleuchtungssysteme in Unternehmen.....	29
6	Zusammenfassung und Handlungsempfehlungen	32
	Literatur.....	36

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Vergleich der Effizienz unterschiedliche Lichtquellen	3
Abbildung 2:	Entwicklung der Lichtausbeute verschiedener Beleuchtungstechnologien	4
Abbildung 3:	Entwicklung der Lichtausbeute und Großhandelspreise für LED Beleuchtungssysteme, Ausbeute und Preis beziehen sich auf 1 W/mm ² und 25 °C.....	6
Abbildung 4:	Entwicklung des Endenergiebedarfs für Beleuchtung in Unternehmen in Deutschland.....	8
Abbildung 5:	Austausch durch LED-Technik im Bestand, global 2013-2022	9
Abbildung 6:	Anteil der Beleuchtungstechnologien im Bestand in verschiedenen Leitmärkten und Entwicklungsprognose bis 2022..	10
Abbildung 7:	Beispiel für die Reduktion des Energieverbrauchs bei Nutzung von Anwesenheits- und Tageslichtsteuerung	12
Abbildung 8:	Schematische Darstellung der optischen Datenübertragung durch sichtbares Licht (Visible Light Communication)	14
Abbildung 9:	Maßnahmenoptionen bei der Beleuchtung, die in der IREES Energieeffizienzdatenbank vorkommen.....	17
Abbildung 10:	Jährliche Stromeinsparung pro Mitarbeiter durch effiziente Beleuchtungssysteme	18
Abbildung 11:	Mittlere jährliche Stromeinsparung durch effiziente Beleuchtungssysteme der TOP 10 Branchen aus den Energieaudits im Rahmen der Energieeffizienznetzwerke.....	19
Abbildung 12:	Verpasste rentable Effizienzinvestitionen durch Bewertung mit maximaler Amortisationszeit	21
Abbildung 13:	Wirtschaftlichkeit der umgesetzten Beleuchtungsmaßnahmen aus den Energieeffizienznetzwerken	22
Abbildung 14:	Größe der teilnehmenden Unternehmen nach Mitarbeiterzahl, n=54.....	23
Abbildung 15:	Investive Energieeffizienzmaßnahmen, n=54 (Mehrfachangabe möglich)	24
Abbildung 16:	Umsetzungsanteil der Effizienzmaßnahme „Beleuchtung“ je Mitarbeitergröße; n=54 (insgesamt)	25
Abbildung 17:	LED-Anteil an der Gesamtbeleuchtung am Produktionsstandort, n=53.....	26

Abbildung 18:	Installierte fortgeschrittene Beleuchtungssteuerung, n=53 (Mehrfachangabe möglich)	27
Abbildung 19:	Hemmnisse gegen eine vollständige Ausstattung mit LED-Technik, n=45 (Mehrfachangabe möglich).....	28
Abbildung 20:	Überblick zu den Politikinstrumenten zur Förderung effizienter Beleuchtung	29

1 Einleitung

In Deutschland beträgt der Stromverbrauch für Beleuchtung 206 TWh, was einem Anteil von 7 % des gesamten Energieverbrauchs entspricht. Rund 63 % davon entfallen auf Beleuchtungssysteme in den Sektoren Industrie und Gewerbe, Handel, Dienstleistungen (GHD). Durch die Umstellung auf effiziente Systeme mittels LED-Technologie (englisch light-emitting diode) lassen sich in Unternehmen hohe Einsparpotentiale realisieren. Gleichzeitig bieten Lichtmanagement und innovative Beleuchtungstechnik neben der Energieeffizienz verschiedene Zusatznutzen, die beispielsweise den Komfort der Mitarbeiter erhöhen, die Produktivität steigern oder Kundenverkehr optimieren.

Ziel dieser Studie ist es, das Einsparpotential durch effiziente Beleuchtungsmaßnahmen und deren Umsetzung in Unternehmen zu analysieren und Hemmnisse zu identifizieren. Dazu werden für diese Studie Energieauditdaten und Daten aus dem Monitoring umgesetzter Beleuchtungsmaßnahmen in Unternehmen analysiert. Das *Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI* und das *Institut für Ressourceneffizienz und Energiestrategie IREES* haben in verschiedenen Initiierungs- und Forschungsvorhaben zu Energieeffizienznetzwerken im Zeitraum 2009 bis Ende 2018 Netzwerkträger und Unternehmen bei der Energieeffizienzstrategie und der Umsetzung von Maßnahmen begleitet. Die daraus gewonnene Datengrundlage aus individuellen Energieaudit- und Monitoringberichten ist nun in der *IREES Energieeffizienzdatenbank* zusammengeführt worden. Die Datenbank enthält über 9000 auditierte und umgesetzte Maßnahmen mit Maßnahmenbeschreibung, Investitionen, berechneten und realisierten Energie- und Energiekosteneinsparungen. Zusätzlich sind unternehmensspezifische Informationen wie zugehörige Branche oder die Beschäftigtengrößenklasse vorhanden. Die Analyse wird für diese Studie zunächst auf Energieeffizienzmaßnahmen im Bereich der Beleuchtung beschränkt, welche die am häufigsten durchgeführte Maßnahme in den Unternehmen darstellt. Weitere Analysen zu anderen Querschnittstechnologien unter Verwendung der Datengrundlage sind anvisiert.

Neben der Auswertung und Analyse der Energieeffizienznetzwerkdaten wird für diese Studie eine aktuelle Unternehmensbefragung zu Umsetzung und möglichen Hemmnissen durchgeführt. Des Weiteren werden aktuelle Kosten- und Effizienzentwicklung in der Beleuchtungstechnik und innovative Lösungen über eine Markt- und Literaturrecherche zusammengetragen.

Kapitel 2 gibt einen Überblick zum Stand der Technik von effizienten Beleuchtungssystemen und Trends zu innovativen Lösungen im Bereich *Smart Lighting*. Das Einsparungspotential und die Wirtschaftlichkeit werden in Kapitel 3 analysiert und die Ergebnisse der Unternehmensbefragung in Kapitel 4 zusammengefasst. Kapitel 5 gibt eine

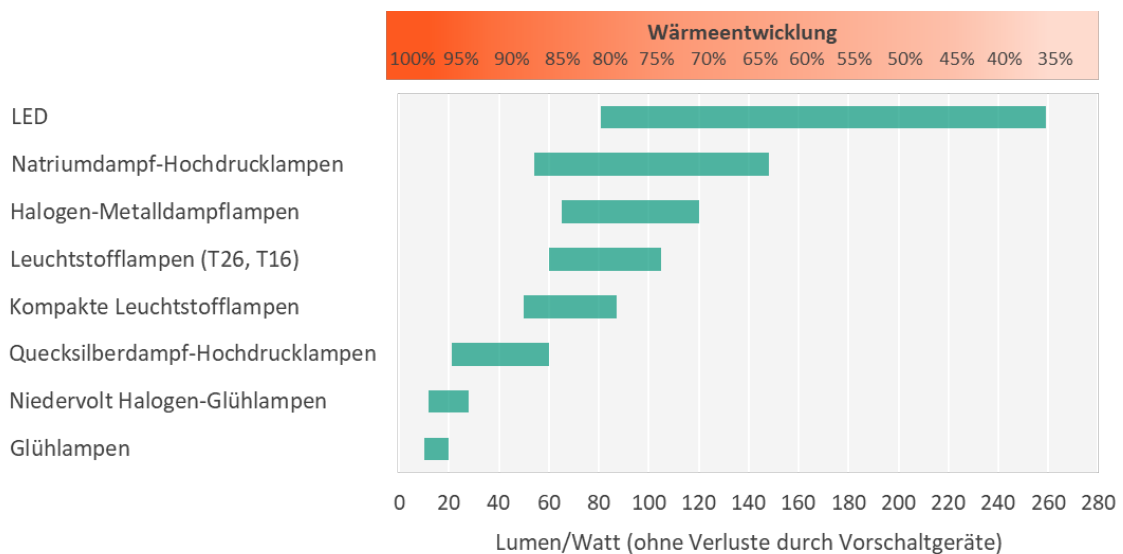
Übersicht zum derzeitigen Rechts- und Förderrahmen für Beleuchtungstechnik. Kapitel 6 schließt mit einer zusammenfassenden Schlussfolgerung sowie Handlungsempfehlungen.

2 Energieeffiziente Beleuchtungssysteme

Das folgende Kapitel gibt eine kurze Einführung zur Entwicklung und zum Stand der Technik bei effizienten Beleuchtungssystemen und stellt Energieeinsparpotentiale in Deutschland und den zentralen internationalen Märkten dar.

2.1 Stand der Technik

Abbildung 1 vergleicht unterschiedliche Lichtquellen in Industrie und Gewerbe hinsichtlich ihrer Lichtausbeute, die als Maß zur Bewertung der Effizienz von Lampentechnologien herangezogen wird¹. In der Abbildung wird die Lichtausbeute, ohne Verluste durch Vorschaltgeräte, der unterschiedlichen Lichtquellen abgebildet. Die dargestellten Lichtquellen reichen von der in der EU verbotenen Glühlampe mit bis zu 20 lm/W, bei der nur ca. 5 % des eingesetzten Stroms in Licht gewandelt werden, über die Leuchtstofflampe mit bis zu 105 lm/W bis hin zur LED als beste verfügbare Technologie, die mit Zielwerten bis zu 260 lm/W angegeben wird. Kommerziell verfügbare LED-Produkte erreichen derzeit bis ungefähr 160 lm/W (cool white) bzw. 140 lm/W (warm white) (DOE 2017).



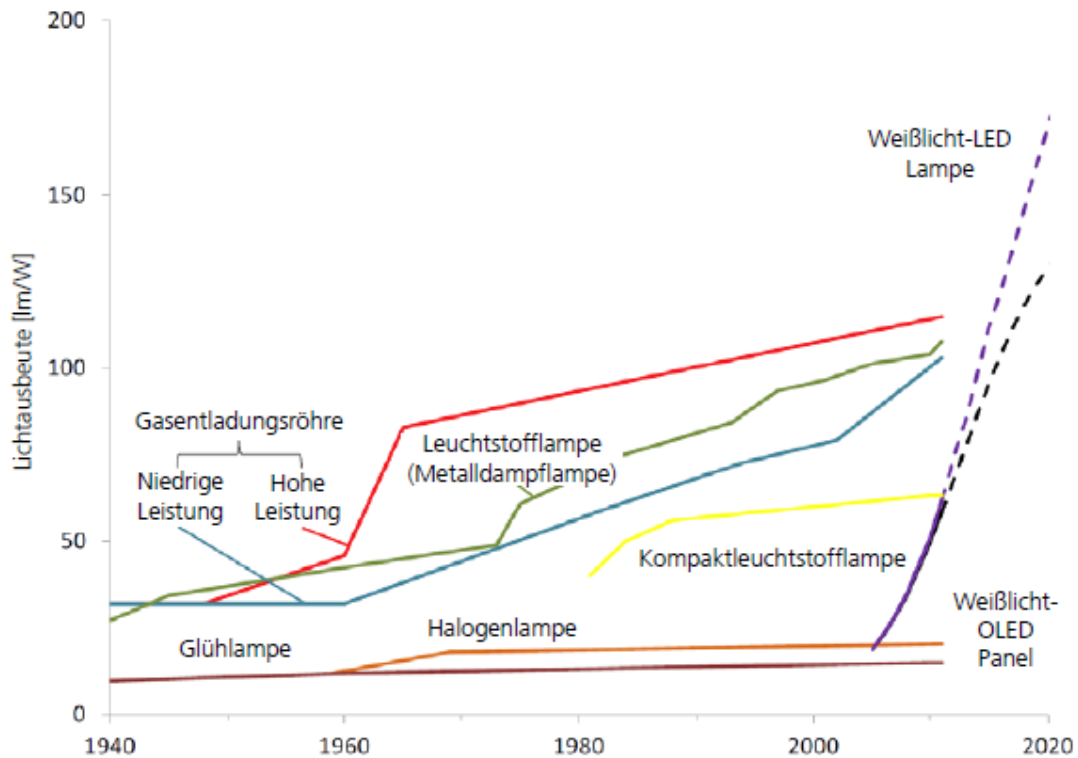
Quelle: Eigene Abbildung nach (ZVEI 2019)

Abbildung 1: Vergleich der Effizienz unterschiedliche Lichtquellen

Die Entwicklung der am Markt verfügbaren Beleuchtungstechnologien zeigt den Fortschritt der LED-/OLED-Technologie (englisch organic light-emitting diode) im Hinblick auf ihre Lichtausbeute (Abbildung 2). Vergleichbar mit der Effizienz einer Halogenlampe,

¹ Die Lichtausbeute entspricht dem Lichtstrom in Lumen in Relation zur elektrischen Anschlussleistung in Watt [lm/W].

hat die LED-/OLED-Technologie alle anderen konventionellen Beleuchtungsquellen hinsichtlich ihrer Energieeffizienz innerhalb von 10 Jahren überholt.



Quelle: (Rohde 2014) (Bei Gasentladungsröhren, Leuchtstofflampen und LEDs sind Verluste durch Vorschaltgeräte berücksichtigt)

Abbildung 2: Entwicklung der Lichtausbeute verschiedener Beleuchtungstechnologien

Beim Einsatz von LED-Leuchten im industriellen Produktionsbereich spielt die Temperaturbeständigkeit eine wichtige Rolle. Für hochwertige LED-Leuchten sind Umgebungstemperaturen bis 60 °C unproblematisch. Bei höheren Umgebungstemperaturen sinkt die Lebensdauer signifikant ab. So halbiert sich die Lebensdauer bereits bei etwa 10 Kelvin höheren Umgebungstemperaturen, wobei jedoch eine optimierte Steuerungselektronik Abhilfe schaffen kann. Auch Kühlrippen an der Außenfläche sowie aktive Kühlung mittels Ventilatoren können eingesetzt werden. Dafür sind allerdings nicht alle Einsatzumgebungen vorteilhaft, wie Umgebungen mit hohem Staub- und Schmutzaufkommen oder explosionsgeschützte Bereiche (Schulz 2016).

Weitere technische Eigenschaften bzw. Besonderheiten von LED-Leuchten sind in Tabelle 1 aufgelistet.

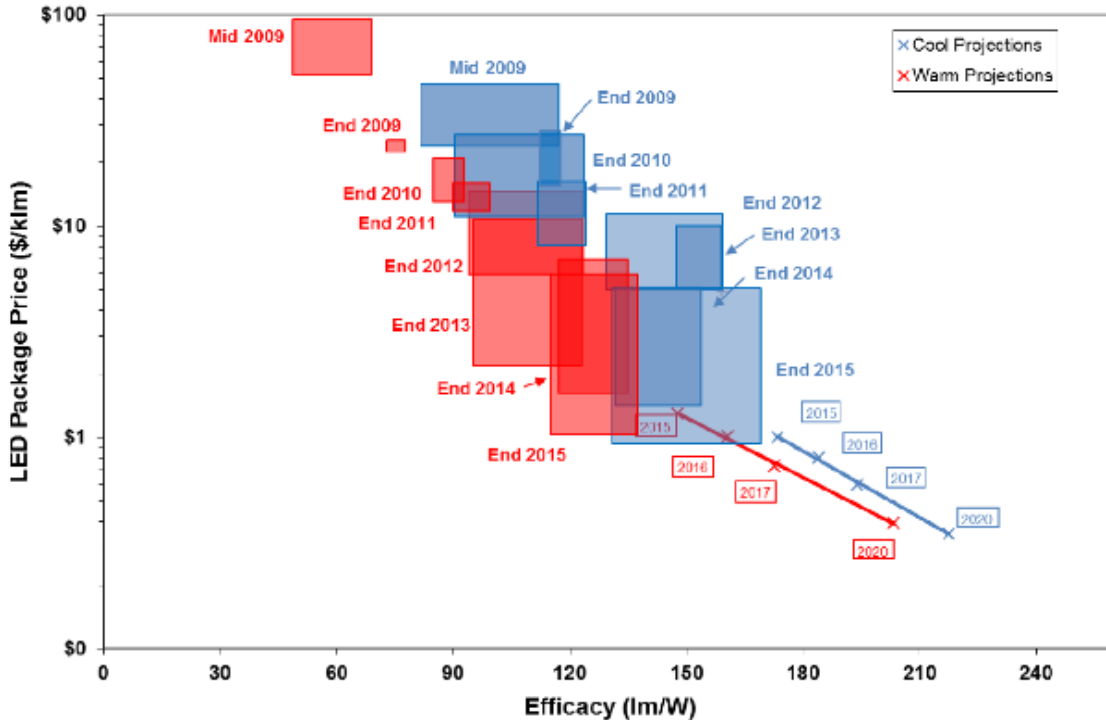
Tabelle 1: Technische Eigenschaften bzw. Besonderheiten von LED-Leuchten

Technische Eigenschaft/ Besonderheit	Beschreibung
Taktung	Zur Optimierung der Lichtleistung wird der LED-Treiber getaktet, d. h. in Sekundenbruchteilen ein- und ausgeschaltet. Das Pulsieren von LED-Leuchten kann bei empfindlichen Menschen zu gesundheitlichen Beschwerden führen. Mit dem Einsatz von speziellen Industrietreibern, die in sehr hochwertigen LED-Lampen Einsatz finden, wird das Takten umgangen, ohne dabei an Lichtqualität und Effizienz einzubüßen.
Schutz vor Umwelteinflüssen	Je nach Einsatzort, werden unterschiedliche Ansprüche an die LED-Leuchten gestellt. Werden die Lampen in einer Umgebung eingesetzt, wo Wasser, Dampf bzw. Staub aufkommen (ist oftmals in einer Industrieumgebung der Fall), sind Leuchten mit einer hohen Schutzart notwendig.
Qualität/Lebensdauer durch geplante Obsoleszenz	Die Lebensdauer von LED-Lampen kann gezielt durch die Hersteller reduziert werden. Erreicht wird das unter anderem durch die Bestromung des LED-Chips, der Beschaffung des LED-Chips, des Netzteils und der dafür verwendeten Komponenten sowie der Auswahl der Gehäusematerialien.
Nachhaltigkeit und Umweltschutz	Durch die hohe Energieeffizienz gelten LED-Lampen als sehr umweltfreundlich. Für die Bewertung ist aber die Gesamtbilanz, vom Abbau der Rohmaterialien bis hin zur Entsorgung der LED-Lampen, zu betrachten. Bei der Herstellung werden Aluminium und Seltene Erden verwendet, sodass eine sachgerechte Entsorgung für die ökologische Wirksamkeit gegenüber herkömmlichen Leuchtmitteln entscheidend ist. Bei sehr kostengünstigen LED-Leuchten sind die LED-Lampen fest in die Leuchte verbaut, wodurch der Austausch einzelner Komponenten nicht möglich ist und die ganze Leuchte entsorgt werden muss. Die Leuchten, bei denen die LED-Lampen nicht fest verbaut sind, kosten durch den deutlichen Mehraufwand bei der Produktion mehr, verursachen aber deutlich weniger Abfall.

Für LED-Beleuchtungssysteme werden bis zum Jahr 2025 Werte für die Lichtausbeute von 240 lm/W² erwartet (DOE 2017). Gleichzeitig sinkt der spezifische Preis, bezogen auf die Lichtausbeute, signifikant ab. Für den *Solid-State Lighting R&D Plan* werden Lichtausbeute und Großhandelspreise von LED-Technologien durch das Energieministerium der USA (DOE) seit 2009 analysiert (DOE 2016). Für die Preisabschätzung wurden LED-Leuchten betrachtet, die in großen Mengen bei großen kommerziellen Händlern verkauft werden. Seit dem Jahr 2011 ist der Preis für warme LED-Beleuchtung von

² Bei phosphor-konvertierten LEDs (cool white)

rund 10 US Dollar pro Kilolumen (klm) auf unter 1 US Dollar pro klm gesunken (Abbildung 3).



Quelle: (DOE 2016:77)

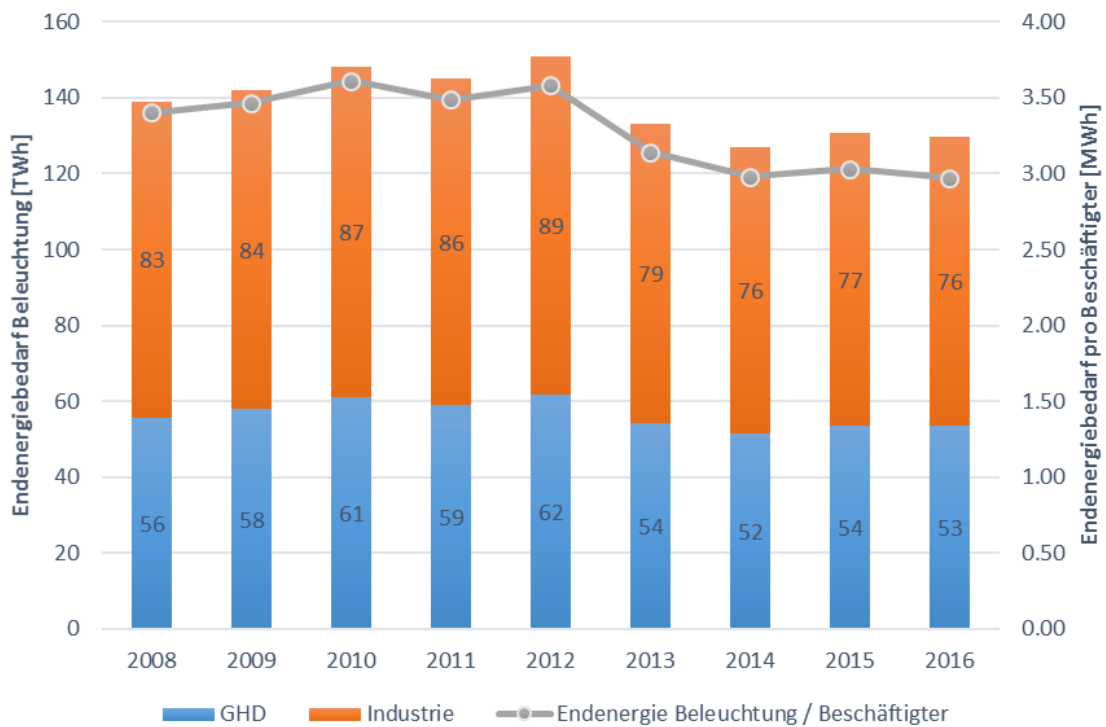
Abbildung 3: Entwicklung der Lichtausbeute und der Großhandelspreise für LED-Beleuchtungssysteme (Ausbeute und Preis beziehen sich auf 1 W/mm² und 25 °C)

Die Analyse zeigt, dass die LED-Technologie als hocheffiziente Standardtechnologie am Markt zur Verfügung steht, gleichzeitig aber noch weitere Effizienzsteigerungen und Preisreduktionen zu erwarten sind. Auch ist das Vertrauen in die Technologie bei industriellen und gewerblichen Nutzern hoch. In der von IREES durchgeführten Unternehmensumfrage, Ende 2018, ist eine mögliche Nicht-Erfüllung der Erwartungen an die LED-Technik bei keinem der Befragten als Hinderungsgrund für die vollständige Umstellung auf LED am Unternehmensstandort angegeben worden. Das Abwarten der weiteren technischen Entwicklung (4 %) und die Nicht-Verfügbarkeit von LED-Technik für spezielle Anwendungsbereiche (7 %) spielen nur für wenige Unternehmen eine Rolle (vgl. Kapitel 4).

2.2 Status und Potential effizienter Beleuchtungssysteme im Bestand

Der Austausch veralteter Beleuchtungssysteme sowie die Optimierung der Beleuchtung durch bedarfsgesteuertes Lichtmanagement hat ein hohes wirtschaftliches Einsparpotential (vgl. Kapitel 3). Wie hoch das zu hebende Potential in Deutschland und anderen Leitmärkten in den nächsten Jahren ist, hängt nicht nur von der bereits dargestellten spezifischen Steigerung der Stromeffizienz ab. Auch die Austauschrate sowie das bereits gehobene Potential durch schon erfolgte Umstellung der Beleuchtungssysteme in den Unternehmen haben einen Einfluss.

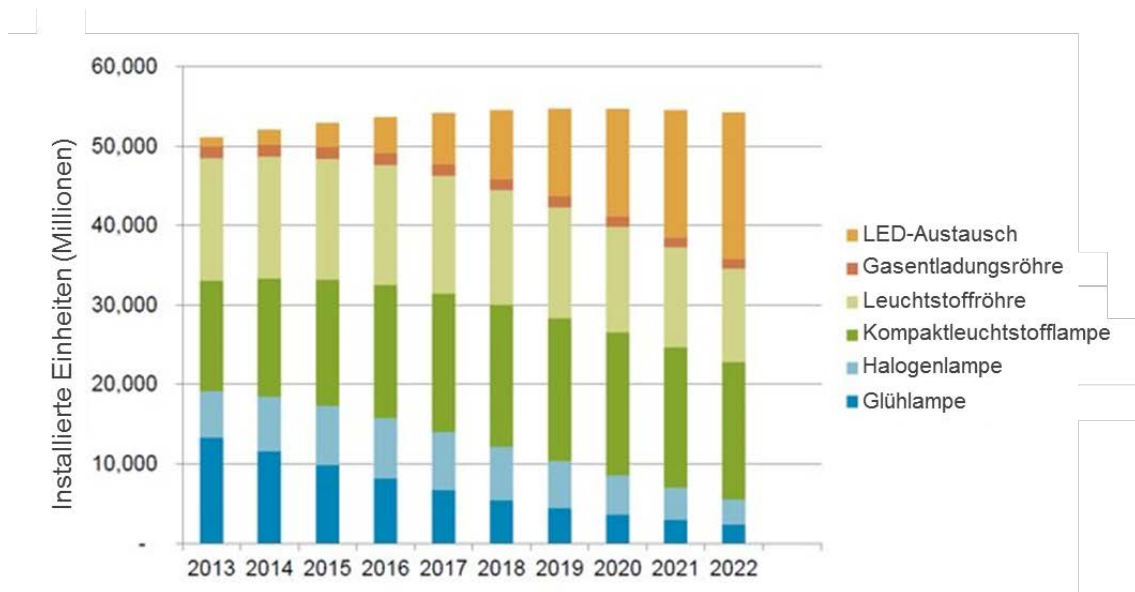
In Deutschland betrug der Energiebedarf für Beleuchtung im Jahr 2016 in den Sektoren Industrie und GHD 130 TWh, was gegenüber dem Jahr 2008 einem Rückgang von 6,8 % entspricht (Abbildung 4). Zur Beurteilung des Effizienzfortschritts bei den Beleuchtungssystemen ist jedoch der spezifische Endenergiebedarf pro Beschäftigten als Treibergröße entscheidend. Hier wurde seit 2008 ein Rückgang von 12,8 % erzielt, was einer jährlichen spezifischen Stromeffizienzsteigerung, durch neue und optimierte Beleuchtungssysteme, von 1,6 % entspricht.



Quelle: Eigene Abbildung IREES, (BMWi 2018; StaBuA 2019)

Abbildung 4: Entwicklung des Endenergiebedarfs für Beleuchtung in Unternehmen in Deutschland

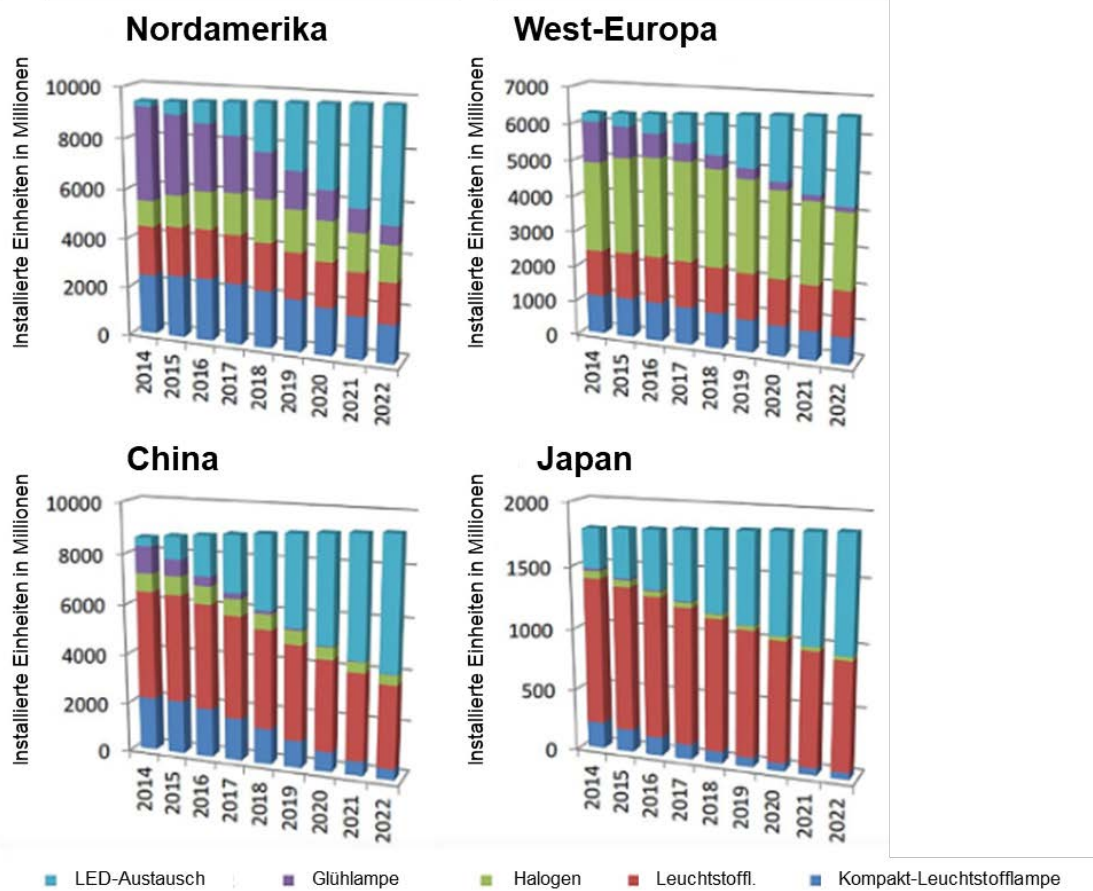
Der globale Anteil installierter LED-Technologie am Beleuchtungsbestand wird von Rhodes (2015) für das Jahr 2015 mit 6 % angegeben (Abbildung 5). Bis zum Jahr 2022 wird ein Wachstum des LED-Anteils auf 34 % prognostiziert.



Quelle: (Rhodes 2015)

Abbildung 5: Globale Entwicklung des LED-Austauschs im Bestand, zwischen 2013 und 2022

Neben dieser globalen Einschätzung zum Austausch bestehender Beleuchtungsanlagen werden vom *DOE* Prognosen, bis 2022, für verschiedene Märkte veröffentlicht (*DOE* 2016). Während die Glüh- und Halogenlampen auf dem asiatischen Kontinent eine untergeordnete Rolle spielen, ist der Anteil dieser energieintensiven Beleuchtungstechnologien in Nordamerika und Westeuropa im Bestand immer noch hoch, mit rund 50 % im Jahr 2014 (Abbildung 6). Insbesondere die Halogenbeleuchtung ist in Westeuropa stark vertreten. Die regulatorischen Einschränkungen hinsichtlich der Glühlampe in Europa und den USA führen zu einem deutlichen Rückgang des Anteils am Beleuchtungsbestand, zum Teil zugunsten von LED-Beleuchtung, zum Teil zugunsten der Halogenbeleuchtung. Mit der Verschärfung der Produkthanforderungen durch die 6. Stufe Ökodesign-Richtlinie ist das Inverkehrbringen ineffizienter Halogenlampen seit dem 1.9.2018 verboten, sodass eine weitere Verschiebung der Anteile zur LED-Technologie zu erwarten ist.



Quelle: (Pruitt 2015) entnommen aus (DOE 2016:25)

Abbildung 6: Anteil der unterschiedlichen Beleuchtungstechnologien im Bestand in verschiedenen Leitmärkten und Entwicklungsprognose bis 2022

Bei der IREES-Befragung von Unternehmen, die durch ihre Teilnahme an einem Energieeffizienznetzwerk tendenziell ein höheres Interesse an Energieeffizienzmaßnahmen haben als andere Unternehmen, zeigt sich bezüglich der Diffusion von LED-Technologie folgendes Bild (vgl. Kapitel 4):

- Bei knapp zwei Dritteln der Unternehmen besteht die Beleuchtungsanlage am Unternehmensstandort bis zur Hälfte aus LED-Technik
- Bei 15 % sind am Unternehmensstandort mehr als drei Viertel der Beleuchtung mit LEDs ausgestattet

Bezüglich der Gründe³, die gegen einen vollständigen LED-Austausch sprechen, sind folgende Angaben gemacht worden:

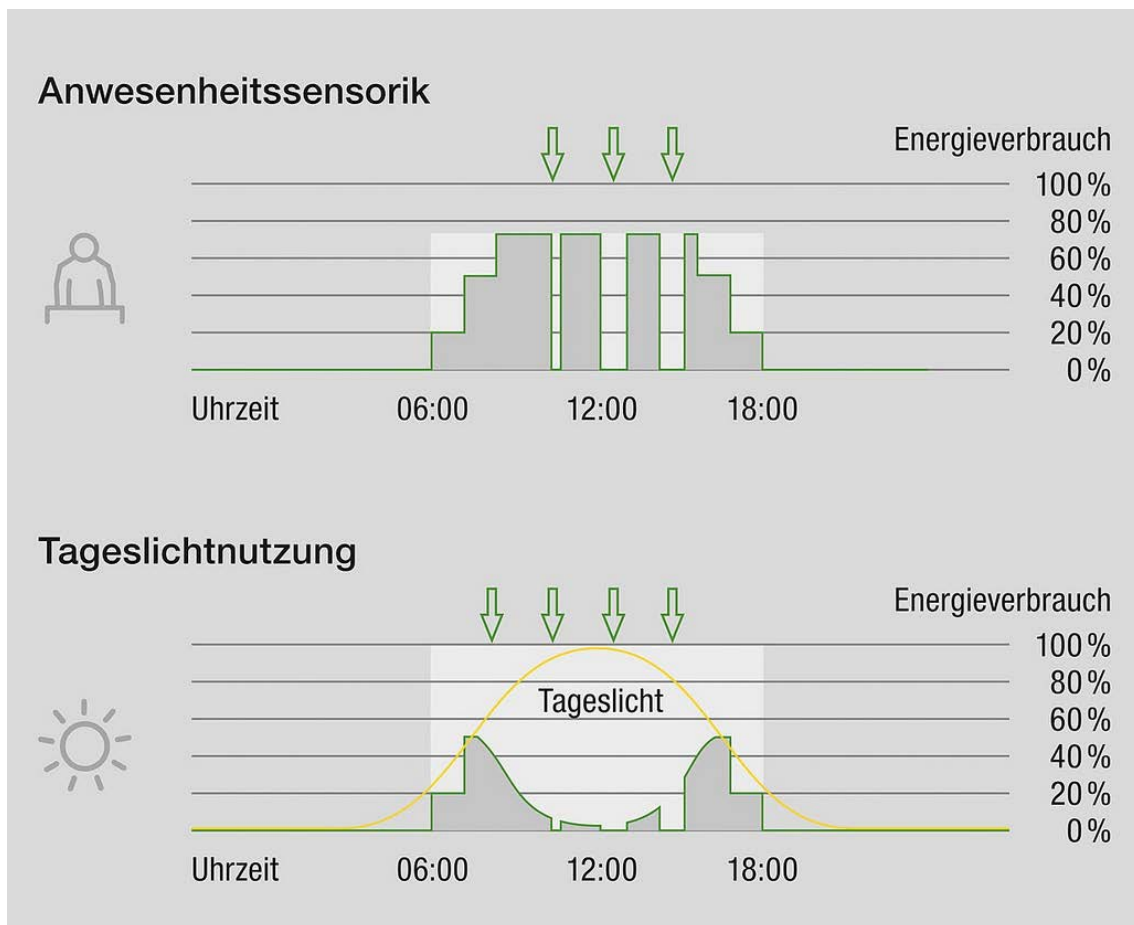
- Zwei Drittel der Unternehmen gaben an, dass der alte Bestand schrittweise umgerüstet wird.
- Für knapp 40 % ist die vollständige Umstellung auf LED-Technik wirtschaftlich nicht darstellbar.
- Jeweils zwischen rund 10 und 15 % haben entweder keine Zeit oder kein Budget oder sehen den Installationsaufwand als zu hoch an.

2.3 Smart Lighting – Intelligente Beleuchtung und Lichtmanagementsysteme

Mit intelligenten Beleuchtungs- und Lichtmanagementsystemen kann neben Einsparungen auch der Komfort für die Mitarbeiter gesteigert werden. Einerseits durch das Reagieren der Beleuchtung auf Nicht-Anwesenheitszeiten andererseits durch die Nachregelung der künstlichen Beleuchtung bei nicht ausreichend einfallendem Tageslicht, bis eine gewünschte Beleuchtungsstärke erreicht wird.

Abbildung 7 zeigt ein Beispiel, bei dem das installierte Beleuchtungssystem zunächst mit einer Anwesenheitsregelung (oberer Teil) ausgestattet wird. Das hellgraue Rechteck stellt den Energieverbrauch dar, der anfällt, wenn alle verfügbaren Leuchten von 06:00 bis 18:00 Uhr brennen. Die dunkelgrauen, mit grünen Linien umschlossenen Teilflächen stellen den Energieverbrauch dar, der sich bei Teilabschaltung (Bereich links und rechts) und Komplettabschaltung in Pausen (mittags/nachmittags) ergibt.

³ Mehrfachnennung möglich



Quelle: (ZVEI 2016:45)

Abbildung 7: Beispiel für die Reduktion des Energieverbrauchs bei Nutzung von Anwesenheits- und Tageslichtsteuerung

Wird die Abschaltung in Abhängigkeit von Abwesenheit mit der Tageslichtschaltung kombiniert, kann im gezeigten Beispiel eine weitere signifikante Reduzierung des Energieverbrauchs realisiert werden (vgl. unterer Teil von Abbildung 7). Die Kombination aus beiden Anwendungsmöglichkeiten führt zu einer höheren Einsparung im Vergleich zur isolierten Umsetzung nur einer der beiden Regelungssysteme.

Aus den Ergebnissen der von IREES durchgeführten Unternehmensbefragung zeigte sich, dass mehr als 80 % der befragten Unternehmen in irgendeiner Form bereits Lichtmanagementsysteme nutzen. Es wurde nicht gefragt, in welchem Umfang oder in welchen Bereichen des Unternehmens Lichtsteuerung und -regelung eingesetzt wird. So ist nicht auszuschließen, dass die Umsetzung in einzelnen Unternehmen auf kleinteilige Maßnahmen beschränkt ist, z. B. durch Präsenzmelder im Sanitärbereich.

In den Sektoren Industrie und Gewerbe spielen präsenzabhängige Steuerungs- und Regelungssysteme für die Steigerung der Energieeinsparung eine signifikante Rolle. In vielen Fällen ist an Anlagen keine Beleuchtung erforderlich, während der Arbeitsplatz nicht besetzt ist. Eine intelligente Vernetzung mit Sensorik zur Lichtmessung sowie eine präsenzabhängige Schaltung der Beleuchtung ermöglicht die Regelung des individuell notwendigen Beleuchtungsniveaus bzw. der Abschaltung bei Abwesenheit.

Die Auswertung der umgesetzten Maßnahmen aus den Energieeffizienznetzwerk, die in der *IREES Energieeffizienzdatenbank* hinterlegt sind, zeigen, dass neben komplexeren Systemen mit entsprechend hohen Investitionen auch ein hohes Potential für gering investive Maßnahmen im Bereich der Lichtsteuerung vorhanden ist. Allerdings steigen mit komplexeren Systemen auch der Planungsaufwand und die Notwendigkeit für Expertise. Lichtmanagement und intelligente Beleuchtung werden daher auch von den Anbietern als Sanierungsoption der vierten Stufe gesehen. Während einfache Maßnahmen, wie Lampen- und Leuchtentausch, bei verhältnismäßig niedrigem Planungsaufwand zu einer Reduktion von Energie- und Betriebskosten führen, erhöht sich mit jeder Stufe der Planungsaufwand, aber auch das Einsparpotential und in der Regel auch der Zusatznutzen, z. B. erhöhter Komfort.

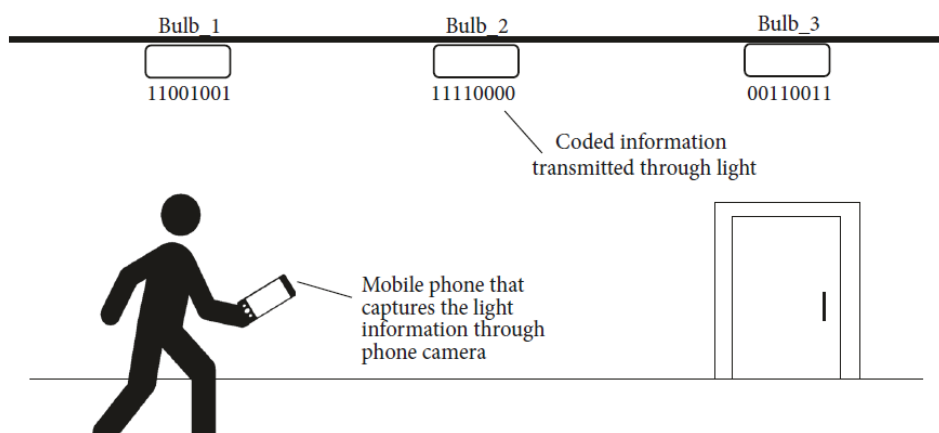
Trendthemen der Beleuchtungsbranche

Systeme mit dynamischem Licht, die den täglichen Biorhythmus der Menschen unterstützen (*Human Centric Lighting*) oder automatisch auf Veränderung der Positionierung reagieren (*indoor positioning capabilities*), werden von den Herstellern als Megatrend eingeschätzt. In Industriebetrieben, in denen Mitarbeiter unregelmäßigen Arbeitszeiten und Schichtbetrieb ausgesetzt sind, soll mit biodynamischen Lichtsystemen erreicht werden, dass die Betroffenen besser schlafen und tagsüber konzentrierter arbeiten (ZVEI 2018). Dazu zählen LED-Produkte, die sich an die Sehgewohnheiten der Menschen anpassen und damit die melanopische Lichtwirkung nutzbar machen.

Neben der möglichen Steigerung der Leistungsfähigkeit und des Wohlbefindens der Beschäftigten ergeben sich im Einzelhandelsbereich und anderen Gebäuden mit hohem Publikumsverkehr neue Steuerungs- und Optimierungsmöglichkeiten (DOE 2016). Dabei kann die so genannte *Visible Light Communication* zum Einsatz kommen, welche eine optische Datenübertragung über kurze Distanzen ermöglicht (Abbildung 8). Die Kommunikation erfolgt dabei zwischen Smartphone oder einem anderen Empfänger und dem LED-Panel. Beleuchtungssysteme werden damit zu einer Kommunikationsinfrastruktur, mit der positionsgenau Daten erfasst und gesendet werden können. Die gewonnenen Daten können beispielsweise zur optimalen Ausleuchtung, zur Steuerung von Kundenströmen oder zur Optimierung von Laden- oder Produktionsflächen verwendet

werden. Auch können die gesammelten Daten von den Mitarbeitern dafür genutzt werden, um in Echtzeit zu wissen, wann Konferenz- und Besprechungsräume frei sind (Härter 2018). Der Nachteil gegenüber anderen Datenübertragungstechnologien ist, dass eine optische Verbindung zwischen Empfänger und Sender bestehen muss. So gehen manche Hersteller den Weg, Übertragungstechnologie wie Bluetooth und andere Sensorik in Beleuchtungssysteme zu verbauen.

Bei der durch IREES durchgeführten Befragung gaben rund 6 % der Unternehmen an, dass dynamisches Licht an ihrem Unternehmensstandort schon genutzt wird.



Quelle: (Brena et al. 2017)

Abbildung 8: Schematische Darstellung der optischen Datenübertragung durch sichtbares Licht (Visible Light Communication)

Sind die Leuchten mit Light Fidelity (LiFi) ausgestattet, können diese zusätzlich als High-Speed-Internet eingesetzt werden. Die Datenübertragung erfolgt im Gegensatz zur WiFi-Übertragung nicht über Funkwellen, sondern über das Licht. Vorteile dieser LiFi-fähigen Leuchten sind insbesondere die hohe Sicherheit bei Übermittlung sensibler Daten, da eine Sichtverbindung notwendig ist und Lichtwellen die Räume nicht passieren können, sowie die hohe Übertragungsrates mit echtzeitfähiger Datenkommunikation (Härter 2018). Die Technologie eignet sich daher insbesondere für den Einsatz der Regelungs- und Steuerungstechnik in zukünftig vollautomatisierten Prozessen und Fabriken (Industrie 4.0), bei denen eine sehr hohe Taktsynchronität der eingesetzten Kommunikationssysteme erforderlich ist. Insbesondere für bewegliche Anlagen- und Prozesstechnologien, wie beispielsweise Greifarme, bei denen leitungs-basierte Ethernet-Kommunikation schwierig ist, stellt die LiFi-Technologie eine Lösung für die zukünftigen Kommunikationsanforderungen dar (IoTDesign 2016). Das *Fraunhofer-Institut für Photonische Mikro-*

systeme (IPMS) hat für diesen Einsatzzweck das Produkt GIGADOCK entwickelt, welches nach Angaben des IPMS auf kurze Distanz von bis zu 10 cm eine Übertragung von bis zu 12,5 Gigabit pro Sekunde ermöglicht (Fraunhofer IPMS 2016).

Auch in der Agrarwirtschaft kann LED-Beleuchtung neben der Stromkosteneinsparung weitere Vorteile bringen, da die Beleuchtung passgenau auf das jeweilige landwirtschaftliche Produkt angepasst werden kann. So können Bestrahlungsstärke, Wellenlängen, Abstrahlwinkel bzw. Steuerungsmöglichkeiten auf die jeweilige Pflanze im Gewächshaus abgestimmt sein. Dadurch können die Haltbarkeit und Ausbeute gesteigert und die Betriebskosten reduziert werden (Härter 2018).

3 Einsparung und Wirtschaftlichkeit effizienter Beleuchtungssysteme in Unternehmen

3.1 Datengrundlage

Zur Analyse der Energieeinsparung und der Wirtschaftlichkeit effizienter Beleuchtungssysteme wird die *IREES Energieeffizienzdatenbank* ausgewertet. Diese enthält Daten aus Energieaudits der Unternehmen sowie dem Monitoring umgesetzter Maßnahmen aus rund 1.000 Unternehmen mit über 9.000 vorgeschlagenen Energieeffizienzmaßnahmen. Die Daten sind im Rahmen der Begleitforschungsforschungsprojekte zu den Energieeffizienznetzwerken⁴ gewonnen worden. In der Datenbank sind u. a. das Energieeinsparpotential und die Investitionen der Maßnahmen, die den Unternehmen im Rahmen der Energieaudits nach Vor-Ort Begehung und Analyse vorgeschlagen werden, sowie die realen Einsparungen und Investitionen der daraufhin umgesetzten Maßnahmen dokumentiert. Darüber hinaus sind unternehmensspezifische Angaben enthalten, die eine Zuordnung zu Branchen und Größe der Unternehmen ermöglichen.

Mit dieser umfangreichen Datenbasis aus Vor-Ort Audits und Monitoring der umgesetzten Projekte können detaillierte Analysen zu verschiedenen Effizienzmaßnahmen in unterschiedlichen Branchen durchgeführt werden.

Zur Beleuchtung enthält die Datenbank 819 in den Energieaudits vorgeschlagene Maßnahmen und 290 umgesetzte Maßnahmen, die im Rahmen des Monitorings berichtet wurden. Rund zwei Drittel der vorgeschlagenen und umgesetzten Beleuchtungsmaßnahmen entfallen dabei auf Austausch der Beleuchtungsanlagen. Die übrigen Maßnahmen können unter der Kategorie Optimierung der Beleuchtungskomponenten und Lichtmanagement zusammengefasst werden. Darunter zählen u. a. Maßnahmen wie automatische Lichtsteuerung im Produktionsbereich, Präsenz- und Bewegungsmelder in Büros, Lichtstärkeregelung sowie tageslichtabhängige Steuerung der Beleuchtung, teilweise aber auch in Kombination mit dem Austausch der Leuchtmittel.

⁴ Im Rahmen der Projekte 30-Pilot-Netzwerke (<http://www.30pilot-netzwerke.de>), Marie (<http://www.marie.streks.org/willkommen.html>) und LEEN 100 plus (<http://www.energie-effizienz-netzwerke.de>)

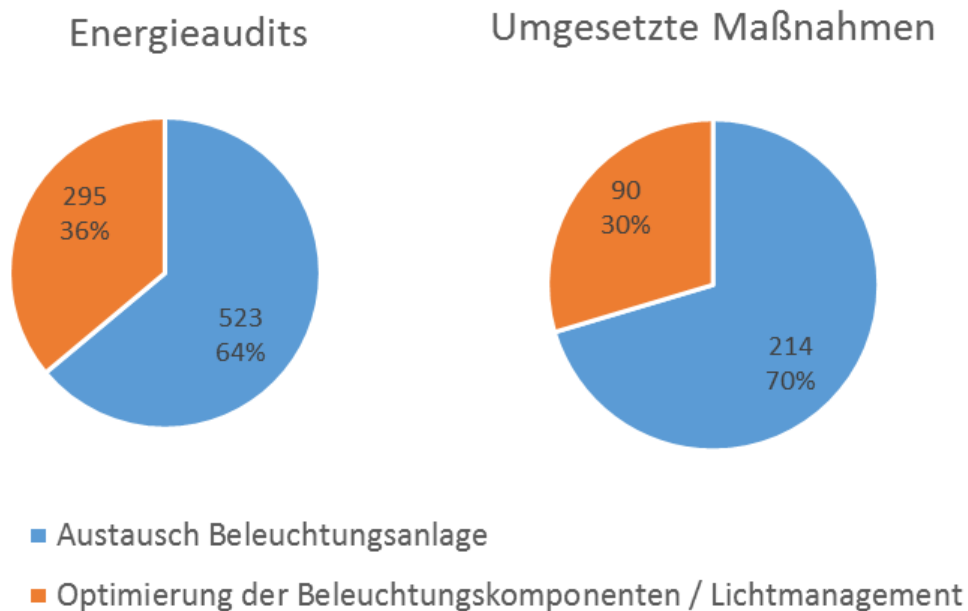
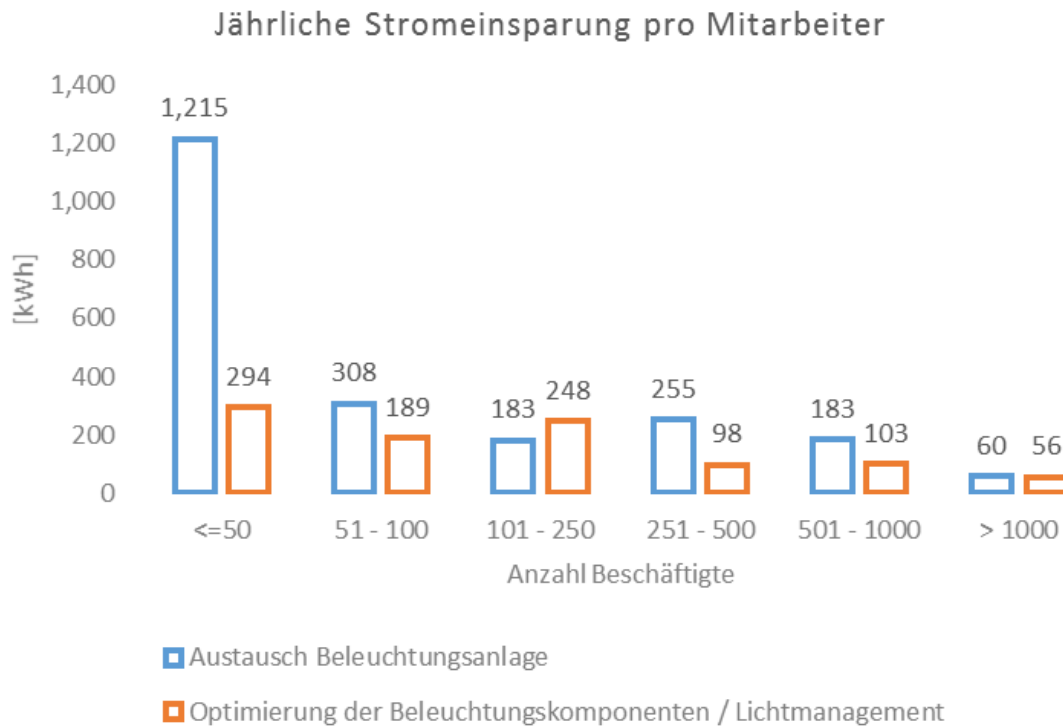


Abbildung 9: Maßnahmenoptionen bei der Beleuchtung, die in der IREES Energieeffizienzdatenbank vorkommen

3.2 Energieeinsparpotential in den untersuchten Unternehmen

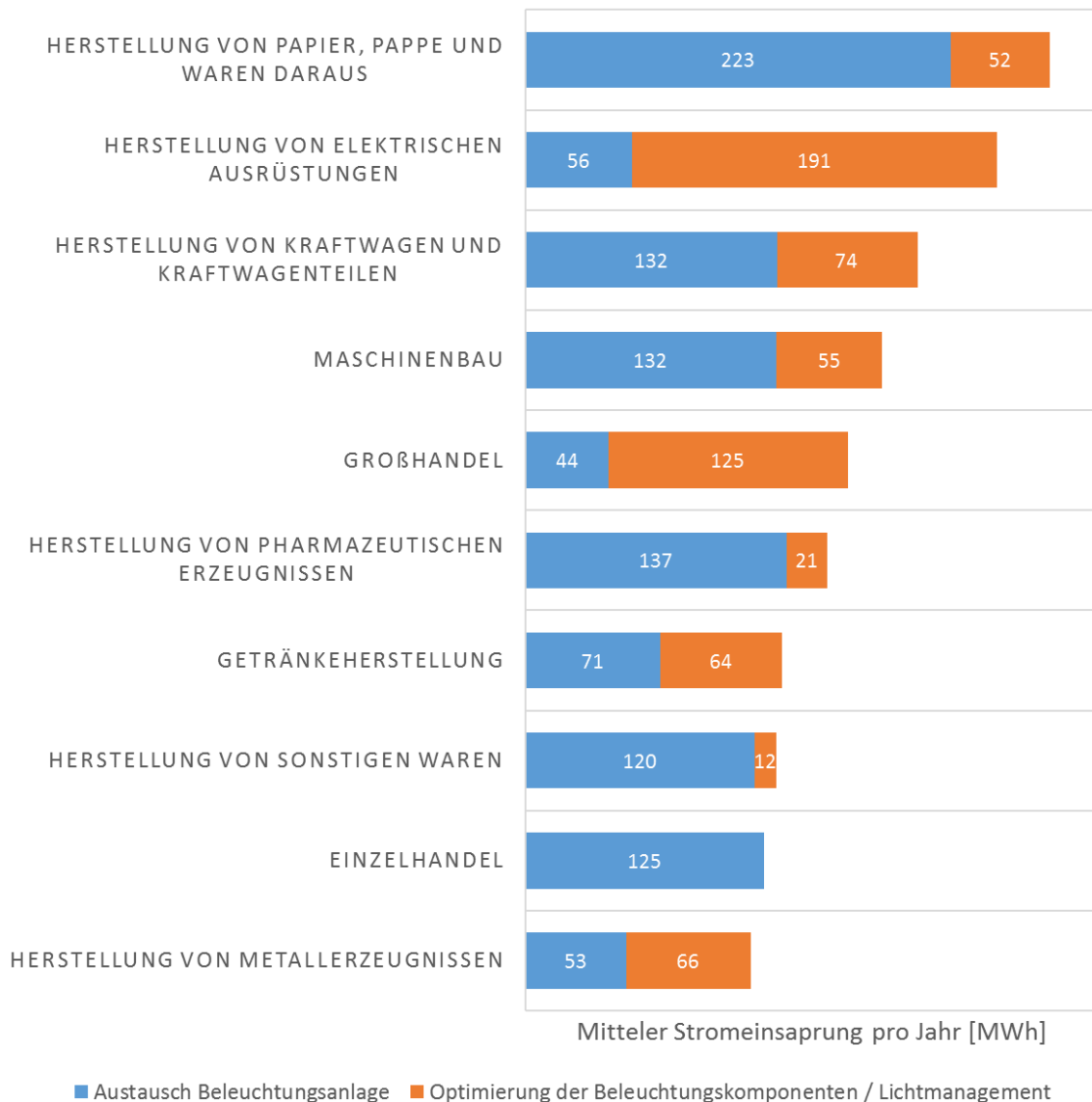
Die in den Unternehmen identifizierten Beleuchtungsmaßnahmen aus den erfassten Energieaudits haben ein Einsparpotential von insgesamt 52 GWh pro Jahr, wobei 37 GWh auf Maßnahmen durch den Austausch der Beleuchtungssysteme entfallen und 16 GWh auf die Optimierung der Beleuchtungssysteme und Lichtmanagement. Abbildung 10 zeigt die durchschnittliche jährliche Einsparung pro Mitarbeiter nach Unternehmensgröße. Der Kennwert verdeutlicht, dass relevante Einsparpotentiale auch schon in kleinen Unternehmen unter 50 Beschäftigten vorhanden sind, da die spezifischen Einsparungen pro Mitarbeiter mit Abstand am höchsten sind. Damit sind in diesen Unternehmen auch Effizienzprojekte möglich, die nicht zu kleinteilig sind, da der Austausch der Beleuchtung z. B. mit LEDs im Vergleich zu anderen Effizienzmaßnahmen, wie Wärmedämmung, geringe Planungs- und Umsetzungszeiten benötigen. Maßnahmen durch Optimierung und Lichtmanagement mit Steuerungstechnik werden umso relevanter, desto größer das Unternehmen ist. In großen Unternehmen zeigt sich hier ein spezifisches Einsparpotential pro Mitarbeiter in ähnlicher Größenordnung wie bei dem Austausch der Beleuchtungssysteme.



Quelle: IREES Energieeffizienzdatenbank – Energieaudits

Abbildung 10: Jährliche Stromeinsparung pro Mitarbeiter durch effiziente Beleuchtungssysteme

Abbildung 11 analysiert die mittleren jährlichen Einsparpotentiale nach Branchen. Dabei werden in der dargestellten Auswertung nur Branchen berücksichtigt, für die Daten aus mehr als fünf Unternehmen vorliegen. Die Abbildung zeigt die mittleren Stromeinsparungen durch effiziente Beleuchtungsmaßnahmen der Industriebranchen, die die höchsten mittleren Einsparungen aufweisen. Der Branchenvergleich gibt nicht nur eine Indikation für das jeweilige Einsparpotential, sondern zeigt auch interessante Zusammenhänge zu der Relevanz der verschiedenen Beleuchtungsmaßnahmen. Während in den meisten Herstellungsbetrieben und im Maschinenbau das Einsparpotential durch Austausch der Beleuchtungssysteme eine hohe Relevanz hat, zeigt sich im Großhandel ein höheres Einsparpotential durch Optimierung der Beleuchtungskomponenten. Für die Unternehmen im Einzelhandel liegt das identifizierte Einsparpotential hingegen im Austausch der Beleuchtungssysteme.



Quelle: IREES Energieeffizienzdatenbank – Energieaudits (nur Branchen berücksichtigt mit Daten aus mehr als fünf Unternehmen)

Abbildung 11: Mittlere jährliche Stromeinsparung durch effiziente Beleuchtungssysteme der TOP 10 Branchen aus den Energieaudits im Rahmen der Energieeffizienznetzwerke

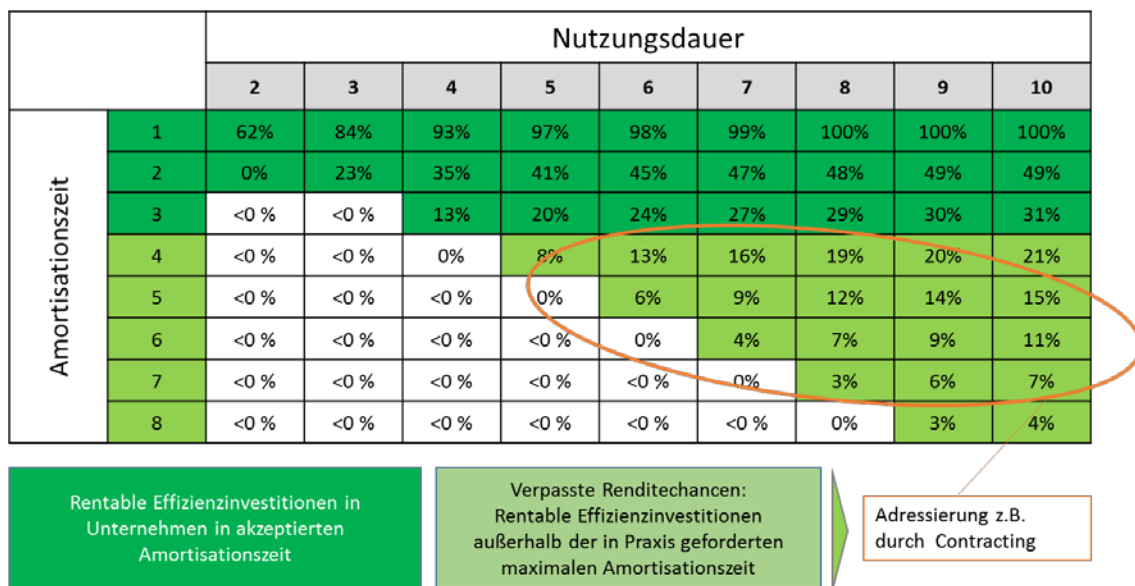
3.3 Wirtschaftlichkeit

Für die Bewertung der Wirtschaftlichkeit von Energieeffizienzinvestitionen wird von den Akteuren in den Unternehmen in der Regel die statische Amortisationszeit berücksichtigt. Diese setzt die Investitionsauszahlung in das Verhältnis zum Kapitalrückfluss, der sich aus den realisierten Energieeinsparungen ergibt. Die Erfahrungen aus der Begleitung der Energieeffizienznetzwerke durch Fraunhofer ISI und IREES zeigen, dass für

Energieeffizienzinvestitionen in der Regel eine maximale Amortisationsdauer zwischen 1 - 3 Jahren von den Budgetverantwortlichen in den Unternehmen gefordert wird. Die Anwendung der Methode ist zum einen auf die einfache Berechnungsweise zurückzuführen, zum anderen auf die Interpretation als Risikomaß (Pape 2011). Diese Interpretation ist jedoch problematisch, da das Risiko der Rückflüsse selber nicht bewertet wird. Bei Energieeffizienzinvestition unterliegen die Rückflüsse nur den Energiepreisschwankungen. Diese sind in der Regel weniger volatil als die Risiken, die mit Investition aus der normalen Geschäftstätigkeit verbunden sind, beispielsweise durch eine Produktionsenerweiterung, die auf der Prognose einer Absatzsteigerung getätigt wird. Zudem bleiben Rückflüsse, welche außerhalb des gesetzten Amortisationszeitraums liegen, unberücksichtigt.

Mit der Amortisationsrechnung lässt sich somit keine Aussage zur Rentabilität der Investition tätigen, weswegen in der betriebswirtschaftlichen Theorie auch von der Verwendung dieser Methode abgeraten wird (Götze 2008). In der unternehmerischen Praxis stellt die weit verbreitete Etablierung maximaler Amortisationszeit als Abbruchkriterium ein entscheidendes Hemmnis für die Umsetzung rentabler Energieeffizienzinvestitionen dar (Rohde 2014). Zur Bewertung der Rentabilität der Investitionen ist hingegen die Kapitalwert- oder interne Zinsfußmethode zu verwenden. Letztere gibt die Verzinsung der Investition über den Abschreibungszeitraum an bzw. den Grenzfinanzierungszinssatz, mit dem sich die Investition noch lohnt.

Abbildung 12 stellt den Zusammenhang zwischen statischer Amortisationszeit und einer Rentabilitätsbewertung durch die interne Verzinsung dar. Das Berechnungsbeispiel zeigt, dass hochrentable Effizienzprojekte durch die in der Praxis vorherrschende Bewertungsmethode unberücksichtigt bleiben. Dargestellt wird die Nutzungsdauer bis zu zehn Jahre, die für Beleuchtungsmaßnahmen relevant ist. Hochrentable Effizienzpotentiale, die außerhalb der geforderten Amortisationszeit liegen, können beispielsweise durch Contracting oder Mietmodelle gehoben werden.



Quelle: IREES, 30-Pilot-Netzwerke

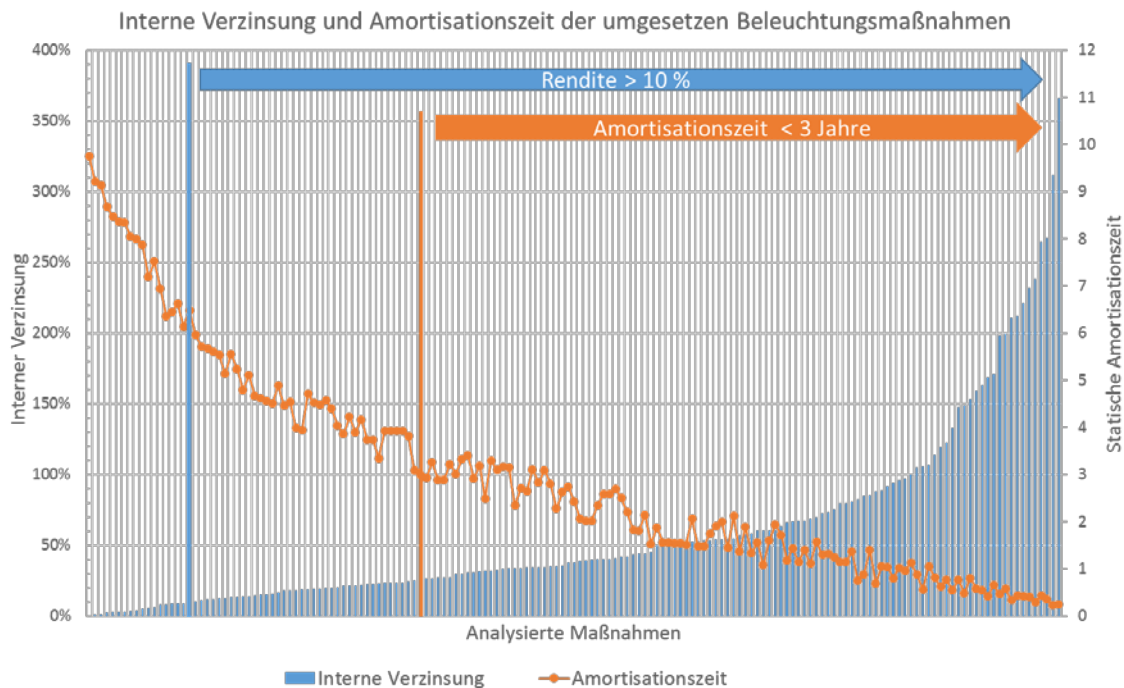
Abbildung 12: Verpasste rentable Effizienzinvestitionen durch Bewertung mit maximaler Amortisationszeit

Maßnahmen im Bereich der effizienten Beleuchtung sind zu einem großen Teil auch mit sehr kurzen Amortisationszeiten verbunden, sodass eine sehr hohe Verzinsung über die tatsächliche Nutzungsdauer erreicht werden kann. Für die Bewertung der Wirtschaftlichkeit werden die Daten der *IREES Effizienzdatenbank* aus dem Monitoring der umgesetzten Maßnahmen in den Unternehmen analysiert. Die analysierten Maßnahmen wurden zwischen 2009 und 2017 umgesetzt. Aufgrund der rasanten Technologieentwicklung bei der LED-Technologie in den vergangenen zehn Jahren, die sowohl zu einer Verbesserung der Lichtausbeute als auch zu einer signifikanten Kostensenkung geführt hat (vgl. Kapitel 2.1), sind heutige Projekte im Vergleich zu den dargestellten Analysen mit einer noch höheren Wirtschaftlichkeit realisierbar.

Investitionen sowie die Energie- und Kosteneinsparung über die Folgejahre sind bei den Unternehmen erhoben worden. Die Energiepreise sind ebenfalls unternehmensspezifisch erfasst, sodass die Analyse die Wirtschaftlichkeit der Beleuchtungsmaßnahmen individuell bewertet. Aufgrund der niedrigeren Strompreise bei energieintensiven Unternehmen werden dort auch geringere Kosteneinsparungen pro eingesparter Megawattstunde realisiert. Die Strompreissteigerung über die angesetzte Nutzungsdauer von 10 Jahren wird entsprechend der realen Preissteigerung ab dem Implementierungsjahr berücksichtigt. Die zukünftige Strompreissteigerung wird mit 3 % pro Jahr angesetzt.

Abbildung 13 zeigt die aus der Analyse ermittelten Rendite und Amortisationszeit der umgesetzten Maßnahmen. Die Analyse hat Folgendes ergeben:

- 89 % der umgesetzten Effizienzmaßnahmen im Beleuchtungsbereich führen zu einer Rendite von über 10 %
- 67 % der Maßnahmen führen zu einer Rendite von über 25 %
- 62 % der Maßnahmen haben eine Amortisationszeit von 3 Jahren oder weniger



Quelle: Eigene Abbildung, IREES Energieeffizienzdatenbank

Abbildung 13: Wirtschaftlichkeit der umgesetzten Beleuchtungsmaßnahmen aus den Energieeffizienznetzwerken

Die Analyse zeigt, dass im Beleuchtungsbereich Maßnahmen mit sehr hoher Wirtschaftlichkeit vorhanden sind. Die hier betrachteten Maßnahmen umfassen die Optimierung der Beleuchtungssysteme durch Austausch mit LED-Leuchtmitteln, Maßnahmen im Bereich des Lichtmanagements sowie umfangreiche Maßnahmen wie den Austausch gesamter Beleuchtungssysteme in Produktionsbereichen. Die Wirtschaftlichkeitsanalyse zeigt auch, dass ein relevanter Anteil von Maßnahmen mit Amortisationszeiten über drei Jahre umgesetzt worden ist. Dies kann einerseits auf die spezifische Situation in den Unternehmen zurückgeführt werden, andererseits auch auf die Schulungen und Bewertungstools für Wirtschaftlichkeitsanalysen, die den Unternehmen im Rahmen der Energieeffizienznetzwerke zu Verfügung gestellt worden sind. Inwieweit die Umsetzung dieser Maßnahmen durch andere Finanzierungsmodelle erfolgte, ist aus dem vorhanden Datensatz nicht bekannt.

4 Aktuelle Unternehmensbefragung zur Umsetzung und Hemmnissen

4.1 Beschreibung der Stichprobe und Methodik

Neben der dargestellten Analyse der Wirtschaftlichkeit und Energieeinsparungen aus den in der *IREES Energieeffizienzdatenbank* hinterlegten Projekten wird eine aktuelle Befragung von Unternehmen durchgeführt, um den Stand der Umsetzung von Beleuchtungsmaßnahmen und mögliche Hemmnisse zu eruieren.

Zur Befragung eingeladen wurden 270 Unternehmen, die zum Zeitpunkt der Befragung Teil eines Energieeffizienznetzwerkes waren. Davon haben insgesamt 54 Unternehmen an der Befragung teilgenommen. Die Befragung fand in Form einer Online-Befragung im Zeitraum Oktober bis Dezember 2018 statt.

Die 54 befragten Unternehmen, aus insgesamt 14 Netzwerke, verteilen sind in etwa gleich auf die unterschiedlichen Unternehmensgrößen (Abbildung 14). Mittelgroße Unternehmen, zwischen 100 und 500 Mitarbeiter, sind am häufigsten vertreten (43 %).

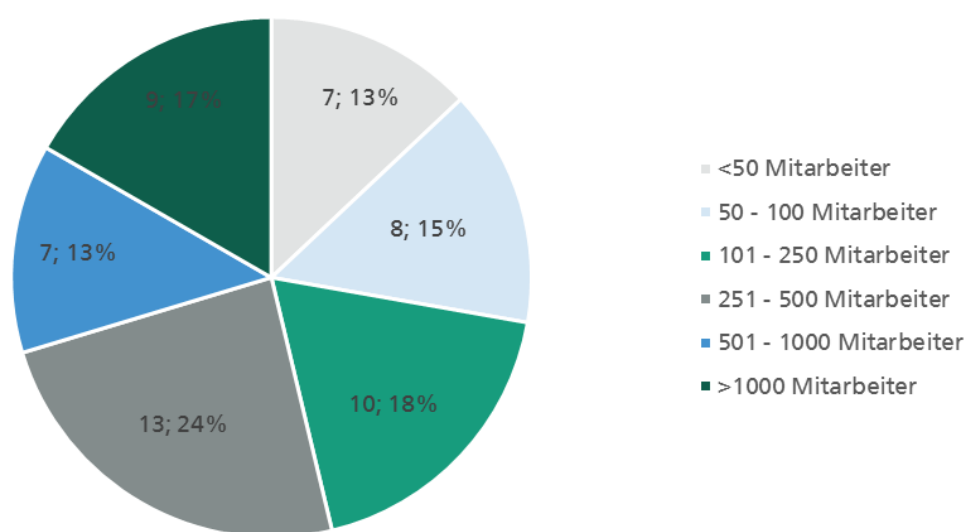


Abbildung 14: Größe der teilnehmenden Unternehmen nach Mitarbeiterzahl, n=54

Neben Fragen zu der Teilnahme und den Erfahrungen mit den Energieeffizienznetzwerken sind detailliertere Fragen zur Umsetzung von Beleuchtungsmaßnahmen gestellt worden. Die Ergebnisse werden im Folgenden dargestellt.

4.2 Beleuchtungsmaßnahmen in den Unternehmen

Seit der Netzwerkteilnahme haben die Unternehmen verschiedene Energieeffizienzmaßnahmen umgesetzt. Der Austausch der Beleuchtung ist dabei die am häufigsten durchgeführte investive Energieeffizienzmaßnahme; 45 von 54 Unternehmen waren in diesem Bereich tätig (Abbildung 15). Nur drei von 54 Unternehmen gaben an, bereits Contracting-Angebote genutzt zu haben.

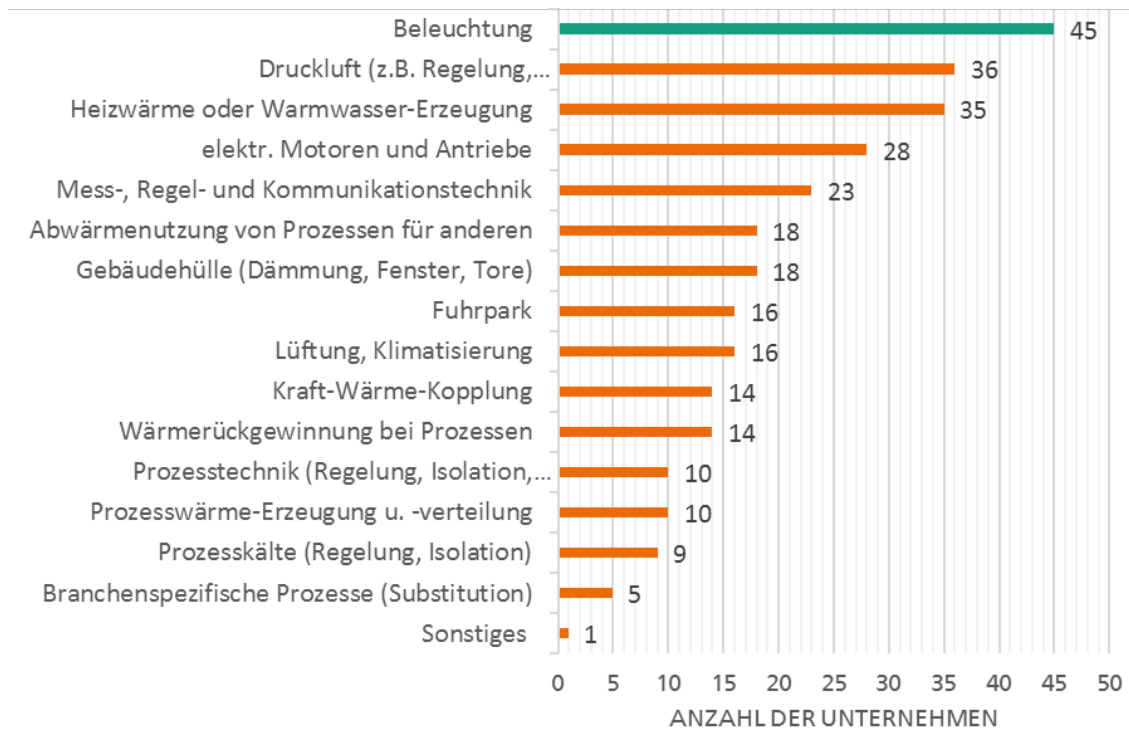


Abbildung 15: Investive Energieeffizienzmaßnahmen, n=54 (Mehrfachangabe möglich)

Wird die Beleuchtung als Umsetzungsmaßnahme in Abhängigkeit zur Unternehmensgröße betrachtet, so haben alle befragten Unternehmen mit einer Mitarbeitergröße über 1.000 diese Effizienzmaßnahme an ihrem Produktionsstandort umgesetzt. Von den Unternehmen mit einer Größe zwischen 101 bis 250 Mitarbeiter haben dagegen nur 70 % Beleuchtungsmaßnahmen realisiert und landen damit im Vergleich auf dem letzten Platz (Abbildung 16).

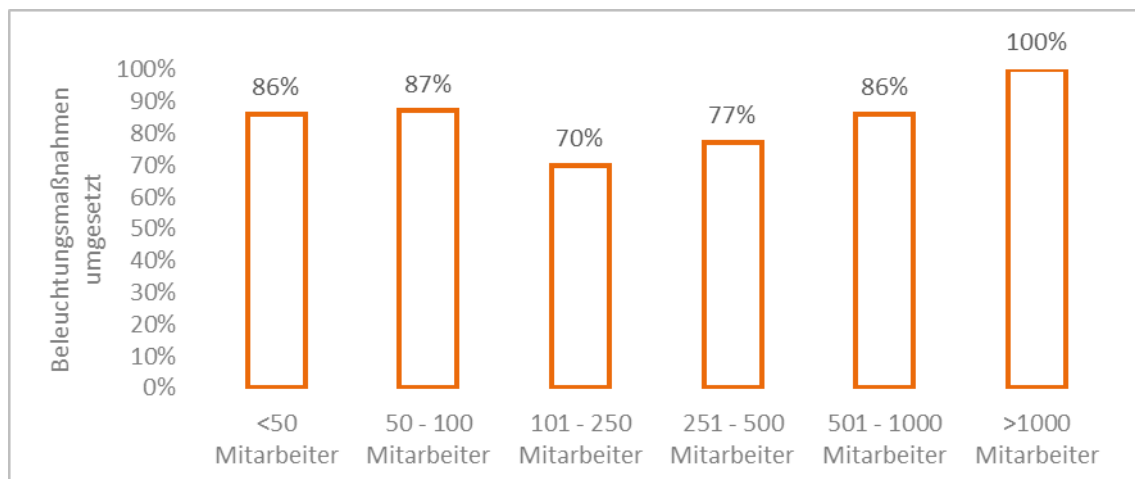


Abbildung 16: Umsetzungsanteil der Effizienzmaßnahme „Beleuchtung“ je Mitarbeitergröße; n=54 (insgesamt)

Unabhängig von der Netzwerkteilnahme haben alle befragten Unternehmen bis auf eines bereits ihre Beleuchtung auf LED umgestellt. Der Umfang des Beleuchtungsaustausches variiert jedoch zwischen den Unternehmen. So haben nur 12 % der Unternehmen mehr als 75 % ihrer Beleuchtung ausgetauscht. Wie in Abbildung 17 zu erkennen ist, haben 19 Unternehmen (36 %) bereits zwischen 26 und 50 % ihrer Gesamtbeleuchtung am Produktionsstandort auf LED umgestellt. Bei acht Unternehmen (15 %) sind bisher mehr als 75 % LEDs im Einsatz.⁵

⁵ Die hier höhere Fallzahl von n=53 im Vergleich zu den Unternehmen, die seit Beginn ihrer Netzwerkteilnahme die Beleuchtung als Effizienzmaßnahme umgesetzt haben (n=45, siehe Abb. 2), kann darauf zurückzuführen sein, dass einige Unternehmen bereits vor ihrer Netzwerkteilnahme die Beleuchtung als Effizienzmaßnahme umgesetzt hatten.

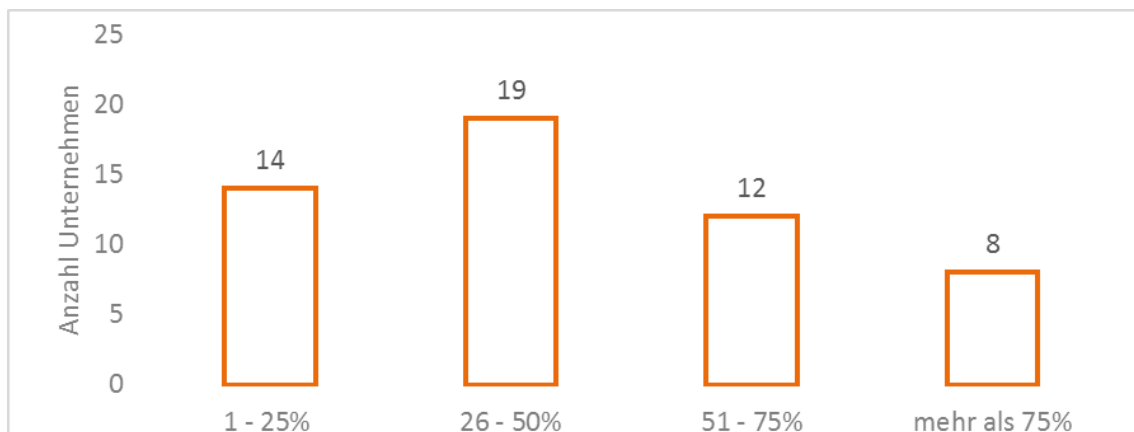


Abbildung 17: LED-Anteil an der Gesamtbeleuchtung am Produktionsstandort, n=53

4.3 Lichtmanagement und fortschrittliche Beleuchtungstechnik

Ergänzend zum LED-Anteil an der Gesamtbeleuchtung wurden die Unternehmen gefragt, ob zusätzlich eine fortgeschrittene Beleuchtungsteuerung eingerichtet ist. Die meisten Unternehmen haben eine oder mehrere automatisierte Steuerungstechniken der Beleuchtung installiert (Abbildung 18).

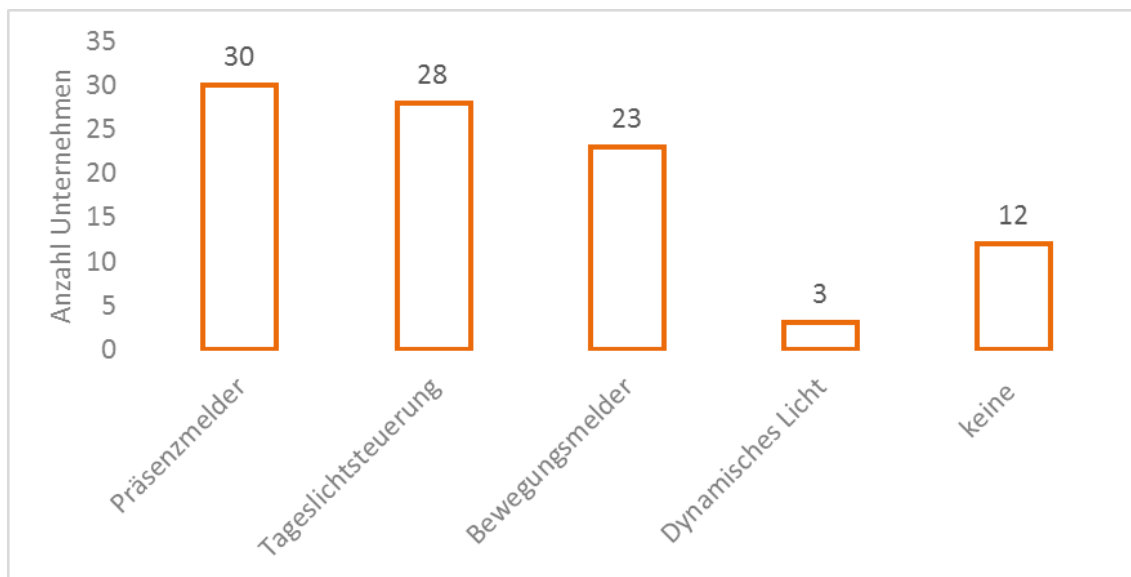


Abbildung 18: Installierte fortgeschrittene Beleuchtungssteuerung, n=53 (Mehrfachangabe möglich)

56 % der Unternehmen haben jeweils Präsenzmelder und/oder eine Tageslichtsteuerung eingerichtet. Bewegungsmelder sind bei 24 % der Unternehmen installiert und dynamisches Licht ist bei 3 Unternehmen zu finden. 13 % der Unternehmen haben keine fortgeschrittene Beleuchtungssteuerung installiert.

Die Verwendung der LED-Beleuchtung hat die Arbeitsbedingungen für die Mehrheit der Unternehmen verbessert (61 %). 39 % der Unternehmen gaben hingegen an, dass sie keine Veränderungen der Arbeitsbedingungen durch die LED-Beleuchtung wahrnehmen. Für keines der Unternehmen führte die Installation der LED zu einer Verschlechterung der Arbeitsbedingungen.

4.4 Hemmnisse bei der Umstellung auf effiziente Beleuchtungssysteme

Unternehmen, die weniger als 75 % ihrer Beleuchtung am Produktionsstandort mit LED umgerüstet hatten, wurde zusätzlich gefragt, welche Hemmnisse gegen eine vollständige Ausstattung mit LED-Technik sprechen. Diese Gründe dafür sind in Abbildung 19 dargestellt. Die meisten Unternehmen (54 %) gaben an, dass eine schrittweise Umsetzung geplant ist. Weiterhin sagen 17 Unternehmen, dass sich eine vollständige Umstellung der Beleuchtung auf LED-Technik wirtschaftlich nicht rentiert. Ein Unternehmen gibt zum Beispiel an, dass hohe Umgebungstemperatur ungünstig für eine LED-Beleuchtung ungünstig ist. Wie in Kapitel 2.1 aufgezeigt, gibt es hier technische Entwicklungen, die

den Einsatz von LED-Technologie auch bei hohen Umgebungstemperaturen ermöglichen. Ebenso hindern in 12 Unternehmen noch einwandfrei funktionierende alte Lampen eine vollständige Ausstattung des Standortes mit der LED-Technik. Überhaupt keine Barrieren spielen dagegen, dass die Erwartungen an die LED-Technik bisher nicht erfüllt werden als auch die bisherige fehlende Auseinandersetzung mit einer vollständigen LED-Ausstattung des Produktionsstandortes.

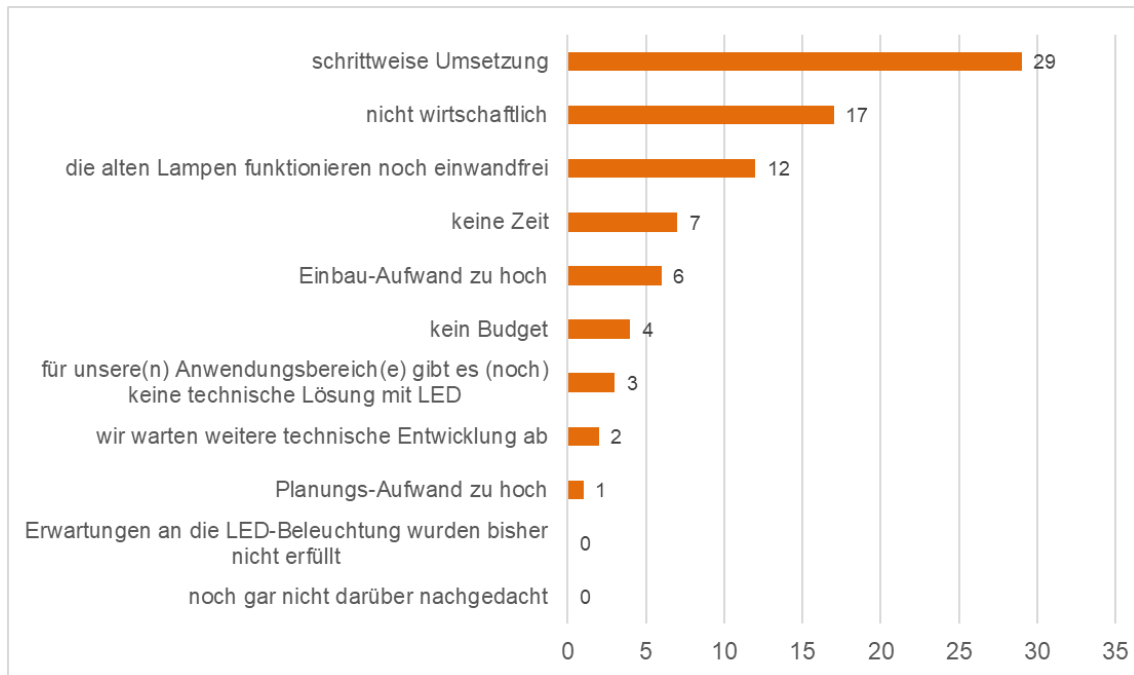


Abbildung 19: Hemmnisse gegen eine vollständige Ausstattung mit LED-Technik, n=45 (Mehrfachangabe möglich)

5 Aktueller Rechts- und Förderrahmen für effiziente Beleuchtungssysteme in Unternehmen

Die Diffusion effizienter Beleuchtungssysteme in Unternehmen, öffentlichen Institutionen und privaten Haushalten wird sowohl durch ordnungsrechtliche als auch finanzielle Förderinstrumente sowie Informations- und Beratungsangebote adressiert. Die relevanten Politikinstrumente sind überwiegend nicht speziell auf Beleuchtungsmaßnahmen ausgelegt, sondern zielen generell auf die Steigerung von Energieeffizienz ab.

Abbildung 20 zeigt die Policy-Landkarte der zentralen Instrumente auf nationaler Ebene für Beleuchtungsmaßnahmen in Unternehmen und öffentlichen Einrichtung. Darüber hinaus gibt es noch eine Vielzahl von Fördermaßnahmen für Energieeffizienz auf Länderebene. Durch die im Jahr 2017 vorgelegte neue „Förderstrategie Energieeffizienz und Wärme aus erneuerbaren Energien“ sind die Förderprogramme neu gestaltet worden, wobei die Umsetzung bis einschließlich zum Jahr 2019 erfolgt (BMWi 2017). Die dargestellten Instrumente zeigen den Stand zum 1. Januar 2019 mit den bereits beschlossenen Maßnahmen.

€	§	i
KfW-Energieeffizient Bauen/Sanieren Nichtwohngebäude <i>Förderung Einzelmaßnahmen Beleuchtung bei Sanierung und Neubau</i>	Energieeinsparverordnung (EnEV) <i>Maximaler Primärenergiebedarf für Neubauten/Sanierung inklusive Beleuchtung bei Nichtwohngebäuden</i>	Energieberatung im Mittelstand <i>Energieaudits für KMUs Beratungsbestandteil Contracting-Checks</i>
IKU – Energieeffizient Bauen und Sanieren <i>Förderung Einzelmaßnahmen Beleuchtung Sanierung Neubau</i>	Öko-Design Richtlinie <i>Anforderungen an Beleuchtungsprodukte Los 8 Bürobeleuchtung, Los 9 Straßenbeleuchtung</i>	Energieberatung für NWG von Kommunen und gemeinnützigen Organisationen <i>Sanierungsfahrplan, Effizienzhaus Sanierung, Contracting-Checks</i>
LED-Förderung Kommunen <i>LED-Leuchten für die Außen- und Straßenbeleuchtung, Lichtsignalanlagen sowie für Innen- und Hallenbeleuchtung</i>	Energiedienstleistungsgesetz <i>Verpflichtende Energieaudits für Nicht KMU</i>	Energieeffizienznetzwerke <i>Erfahrungs- und Ideenaustausch</i>
BMWi-Wettbewerb Energieeffizienz (Nachfolge STEP-UP) <i>Wettbewerbliche Ausschreibung von Effizienzmaßnahmen</i>		

Abbildung 20: Überblick zu den Politikinstrumenten zur Förderung effizienter Beleuchtung

Finanzielle Förderung für Unternehmen

Mit dem KfW-Programm *Energieeffizientes Bauen und Sanieren – Energiekosten im Gewerbegebäude senken* wird der Austausch und die Optimierung der Beleuchtung als Einzelmaßnahmen mit Krediten inklusive Tilgungszuschüssen gefördert (KfW 2019b). Förderberechtigt sind Unternehmen sowie Contracting-Geber. Der Tilgungszuschuss beträgt dabei 5 %.

Das Pendant für kommunale und öffentliche Einrichtungen ist das Programm *IKK- Energieeffizient Bauen und Sanieren* mit den gleichen Konditionen (KfW 2019a). Für Kommunen steht im Rahmen der Kommunalrichtlinie zudem das Programm *LED-Förderung Kommunen* zur Verfügung, in dem Außen- und Straßenbeleuchtung sowie Innen- und Hallenbeleuchtung gefördert werden (BMU 2018). Der Investitionszuschuss beträgt 20 bis 30 %. Bei beiden Programmen sind Kommunen, öffentliche und gemeinnützige Einrichtungen förderfähig.

Mit dem *Förderprogramm STEP-UP* wurden in der Pilotphase bis Ende 2018 Stromeffizienzmaßnahmen in Unternehmen durch wettbewerbliche Ausschreibung technologieoffen gefördert (BMWi 2019b). Dabei erhielten die Projekte mit den höchsten Einsparungen pro Förderbetrag die Zuschläge. Förderfähig waren sowohl Projekte von Unternehmen als auch Contractingprojekte. Das Nachfolgeprogramm *BMWi-Wettbewerb Energieeffizienz* soll ab Frühjahr 2019 eröffnet werden und ebenfalls Zuschüsse über Ausschreibungen für verschiedene Effizienztechnologien fördern (BMWi 2019a).

Ordnungsrechtliche Instrumente

Durch die *Energieeinsparverordnung (EnEV)* werden effiziente Beleuchtungssysteme angereizt, da der Energiebedarf für Beleuchtung in der Energiebilanz für Nichtwohngebäude enthalten ist. Um den maximal zulässigen Primärenergiebedarf im Neubau und im Bestand, nach umfangreicher Sanierung, nicht zu überschreiten, sind effiziente Beleuchtungssysteme neben Maßnahmen an der Gebäudehülle und der Wärme- und Kälteversorgung eine wichtige Maßnahme.

Die *Öko-Design Richtlinie* führt mit sukzessiv steigenden Effizienzanforderungen an Beleuchtungsprodukten dazu, dass ineffiziente Leuchtmittel nicht mehr auf dem Markt zur Verfügung stehen.

Informationen und Beratung

Im Bereich der Beratungs- und Informationsmaßnahmen sind Großunternehmen (Nicht-KMUs) über das Energiedienstleistungsgesetz verpflichtet, Energieaudits und Folgeaudits durchzuführen. Wie die Auswertung der Energieaudits aus der *IREES Energieeffizienzdatenbank* zeigt, sind Beleuchtungsmaßnahmen im Rahmen der Audits die am häufigsten vorgeschlagenen Maßnahmen. Energieberatungen in KMUs sowie für Kommunen und öffentliche Institutionen werden über das Programm **Energieberatung im Mittelstand** (Bafa 2019b) und **Energieberatung für Nichtwohngebäude von Kommunen und gemeinnützigen Organisation** (Bafa 2019a) gefördert. In beiden Programmen wird seit 1.1.2019 eine Contracting-Orientierungsberatung als Bestandteil des Energieaudits gefördert

Als weiterer Baustein sind die **Energieeffizienznetzwerke** zu nennen, deren Aufbau bis Ende 2018 über das Forschungsprojekt LEEN 100plus sowie zuvor über die Projekte 30-Pilot-Netzwerke und Mari:e initiiert wurde. Die Netzwerkkategorie ist in die Initiative Energieeffizienznetzwerke übergegangen, die von 22 Verbänden und Organisationen sowie dem BMWi und dem BMU getragen werden (dena 2019).

6 Zusammenfassung und Handlungsempfehlungen

Effiziente Beleuchtungssysteme sind die zentrale Querschnittstechnologie bei der Umsetzung von Energieeffizienz in Unternehmen. Die Ergebnisse aus den erhobenen Daten im Rahmen der Energieeffizienznetzwerke und der Unternehmensbefragung zeigen, dass hochrentable Energieeinsparpotentiale in Unternehmen bestehen. Im Vergleich zu anderen Effizienzmaßnahmen ist die Umstellung auf effiziente Beleuchtungssysteme als standardisierte Maßnahme mit vergleichsweise geringer Komplexität verbunden. Aufgrund der Anforderungen an die Stromeffizienz von Beleuchtungsprodukten führen Ersatzinvestitionen nach Ausfall alter Systeme zu einer Verbesserung der Effizienz, da ineffiziente Leuchtmittel am Markt nicht mehr oder nur noch eingeschränkt zur Verfügung stehen. Die Entwicklung der LED-Technologie hat in den letzten zehn Jahren zudem einen rasanten Fortschritt hinsichtlich der Kostenreduktion und der Steigerung der Lichtausbeute erfahren und bietet in Verbindung mit Steuerungselektronik neue Einsatzmöglichkeiten.

Allerdings sind die in dieser Studie untersuchten Unternehmen durch die Teilnahme an einem Energieeffizienznetzwerk tendenziell sehr viel stärker an Energieeffizienz interessiert als andere Unternehmen. Durch Workshops, Schulungen und den Austausch untereinander werden diese für die Umsetzung von Maßnahmen motiviert. Es stellt sich daher die Frage, wie bestehende Potentiale in Unternehmen gehoben werden können, für die Energieeffizienz weniger relevant ist. Die Unternehmensumfrage zeigt, dass auch bei Netzwerkunternehmen Hemmnisse zur weiteren Umstellung auf LED-Technologie bestehen. 38 % der Unternehmen geben die fehlende Wirtschaftlichkeit an und rund 27 % der Unternehmen führen auf, dass die alte Beleuchtung noch funktioniert.

Für eine schnellere Diffusion muss der Rechts- und Förderrahmen die Hemmnisse sowohl bei den „informierten und motivierten“ Unternehmen adressieren als auch mehr Unternehmen dazu bringen, sich mit Energieeffizienz auseinanderzusetzen.

Adressierung der wahrgenommenen Wirtschaftlichkeit

Die fehlende Wirtschaftlichkeit aus Sicht der Unternehmen ist der verbreiteten Vorgabe einer maximalen Amortisationszeit von unter drei Jahren geschuldet (vgl. Kapitel 3.3). Beleuchtungsmaßnahmen haben hier zwar gegenüber anderen Effizienzmaßnahmen Vorteile, allerdings werden auch im Beleuchtungsbereich hochrentable Maßnahmen nicht durchgeführt. In der Vergangenheit wurde insbesondere versucht, durch Zuschüsse die Wirtschaftlichkeit zu verbessern. Für den Bereich der Beleuchtung sollte dies pauschal jedoch nicht der zentrale Ansatz sein, da damit für rentables Einsparpo-

tential hohe Subventionen ausgezahlt werden. Um beispielsweise eine rentable Maßnahme, die über die Nutzungsdauer von zehn Jahren eine Rendite von 15 % erwirtschaftet und sich nach fünf Jahren amortisiert hat, in den für Unternehmen akzeptierten Bereich von unter drei Jahren zu bringen, wäre ein Investitionszuschuss von 50 % notwendig. Informationen zu Bewertungsansätzen von Effizienzprojekten bei den Akteuren in den Unternehmen sowie der Zugang zu Contractingangeboten sind wirkungsvollere und volkswirtschaftlich effizientere Mittel. Die verpflichtenden Energieaudits für Nicht-KMU und die Förderung von Energieaudits in KMU sind ebenfalls wichtige Instrumente, da diese Unternehmen grundsätzlich dazu anregen, sich mit Energieeffizienzmaßnahmen auseinanderzusetzen und Einsparpotentiale aufgedeckt werden. Die Integration des „Contracting-Checks“ als optimaler Bestandteil bei den geförderten Energieaudits ab 2019 ist ebenfalls ein richtiger Ansatz. Investitionszuschüsse sollten hingegen auf besonders innovative und komplexere Maßnahmen abzielen, die beispielsweise eine umfangreiche Lichtplanung in Kombination mit dem Austausch des Beleuchtungssystems beinhalten.

Erhöhung der Austauschrate ineffizienter Beleuchtungssysteme

Auch sind Investitionszuschüsse nicht das richtige Instrument, um die Austauschrate zu erhöhen, da die Umstellung der Beleuchtungssysteme in der Regel dem Reinvestitionszyklus im Unternehmen unterliegt bzw. nach Ausfall oder Fehlfunktion angegangen wird. Um die vorzeitige Austauschrate ineffizienter und veralteter Systeme zu erhöhen, sind neben den bestehenden informatorischen Maßnahmen auch verpflichtende Austauschmaßnahmen denkbar, wie sie auch für Heizkessel im Rahmen der EnEV bestehen. Unternehmen sollten hierbei jedoch nicht pauschal verpflichtet werden zu investieren, sondern könnten zur Durchführung einer Wirtschaftlichkeitsprüfung verpflichtet werden, wenn die Systeme ein bestimmtes Alter erreicht haben.

Wie im Wohngebäudebereich, besteht bei vermieteten Gewerbeimmobilien mit Investor-Nutzer-Dilemma ein großes Hemmnis zur Durchführung von Energieeffizienzoptionen. Hier wäre neben der Nachrüstverpflichtung für effiziente Beleuchtungssysteme insbesondere eine Förderung von marktbasierenden Finanzierungsmodellen sinnvoll, die es ermöglichen, Kosteneinsparungen zwischen Vermieter und Mieter zu teilen.

Das bekannteste Finanzierungsmodell ist das Energieeinspar- oder Anlagen-Contracting. Nach einer Umfrage der *Klima- und Energieagentur Baden-Württemberg* unter Unternehmen, Projektentwicklern, Contractoren und Banken⁶ liegt der Hauptnutzen in den

⁶ Die Umfrage wurde im Rahmen des EU-Projektes ENPC INTRANS durchgeführt. In Deutschland haben 60 Fachleute an der Befragung teilgenommen.

garantierten Einsparungen, der Investitionen ohne Eigenmittel sowie dem Einkauf von Fachwissen und der Übertragung des Risikos neuer Technologien auf den Contractor (KEA 2015). Die größten Nachteile werden in der „hohen Komplexität beim Vergabeverfahren und der Vertragsgestaltung“ sowie dem Monitoring der Einsparungen gesehen. Des Weiteren werden die Abgabe der Zuständigkeiten und das geringe Vertrauen zum Contractor genannt sowie das Risiko der Nutzungsänderungen bei gleichzeitig langen Vertragslaufzeiten. Die Vorteile des Contractings, ohne der oben genannten Nachteile, werden durch das Mietmodell vereint, welches sich als Finanzierungsmöglichkeit insbesondere für den Beleuchtungsbereich mit der vergleichsweise hohen Standardisierung gegenüber anderen Effizienzmaßnahmen eignet. Dabei müssen die Unternehmen wie beim Contracting keine eigenen Investitionen tragen, sodass die Maßnahmen keine Auswirkung auf die Bilanz haben. Die Unternehmen zahlen für die gemietete LED-Beleuchtung eine festgelegte, gleichbleibende monatliche Miete. Im Mietpreis enthalten sind Planung, Wartung und Reparatur. Das Unternehmen spart von Anfang an, da die Einsparungen höher ausfallen als die Mietgebühren⁷. Im Gegensatz zum Contracting ist keine komplexe Vertragsgestaltung notwendig und die Kosten sind von vorneherein transparent. Auch besteht das Risiko einer Nutzungsänderung aufgrund langfristiger Verträge nicht, da die Laufzeit der Verträge flexibel ist und bei vorzeitiger Kündigung die eingebauten Beleuchtungssysteme wieder zurück an den Vermieter gehen. Der Anbieter der Mietmodelle hat demnach auch ein hohes Eigeninteresse daran, dass langlebige Technologie mit hoher Qualität eingebaut wird, da sonst höhere Kosten für Ersatz und Wartung anfallen. Die in der Vergangenheit vorherrschende direkte Investitionszuschussförderung schließt diese Mietmodelle aus, da keine Investition von den Unternehmen getätigt wird. Miet- und Contractingmodelle stellen somit eine gute Möglichkeit dar, wirtschaftliche Potentiale mit Amortisationszeiten über drei Jahre zu heben. Insbesondere Mietmodelle eignen sich zudem dazu, dass qualitativ hochwertige Produkte zum Einsatz kommen, die auch nach vorzeitiger Rücknahme Weiterverwendung finden. Um die Austauschraten durch Politikinstrumente marktbasierend zu erhöhen, wäre zudem die Einführung eines Einsparverpflichtungssystems (Einsparquote) sehr wirkungsvoll. Dieses wird durch Artikel 7 der Energieeffizienzrichtlinie als Kernelement für die Erreichung der Einsparziele gefordert und ist in anderen EU-Ländern bereits seit mehreren Jahren eingeführt. Auch ist die Ausgestaltung und Umsetzung der Einführung einer Einsparquote von Energieversorgungsunternehmen bereits wissenschaftlich untersucht worden (Bürger et al. 2012; Schломann et al. 2012). Gerade im Bereich der Beleuchtungssysteme wäre dabei jedoch eine Ausgestaltung wichtig, die eine Differenzierung zwischen einfachen

⁷ Die Deutsche Lichtmiete gibt an, dass nach Abzug der monatlichen Mietgebühren zwischen 15 und 35 % der Gesamtbetriebskosten eingespart wird (www.lichtmiete.de).

Maßnahmen und innovativen, qualitativen Systemen mit längerer Nutzungsdauer erlaubt, damit durch das Instrument überhaupt eine Zusatzwirkung erzielt wird. Durch zielgerichtete Ausgestaltung bietet die Energieeinsparverpflichtung die Möglichkeit, den Markt für Energiedienstleistungsunternehmen und Contractingmodelle zu beleben.

Zusatznutzen durch Effizienzmaßnahmen im unternehmerischen Entscheidungsprozess

Des Weiteren ist das Thema der Zusatznutzen von Effizienzmaßnahmen ein wichtiger Ansatzpunkt, um unternehmerische Entscheidungen für Effizienzprojekte nicht nur aufgrund direkter Kosteneinsparungen herbeizuführen. Insbesondere die Beleuchtung bietet hierbei, mit dynamischem Licht und mit innovativen Möglichkeiten der Steuerung und Datenübertragung, Ansatzpunkte für messbaren Zusatznutzen durch Steigerung von Produktivität und Optimierung der Prozesse. Wie der Zusatznutzen von Effizienzmaßnahmen in strategischen Unternehmensentscheidungen berücksichtigt werden kann, wird im Rahmen des laufenden EU-Forschungsvorhabens *Multiple Benefits* (<https://www.mbenefits.eu/>) unter Koordination vom Fraunhofer ISI derzeit erforscht und in Deutschland durch IREES in Fallstudien erprobt.

Literatur

- Bafa. 2019a. "Energieberatung für Nichtwohngebäude von Kommunen." *Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle*. Retrieved January 31, 2019 (http://www.bafa.de/DE/Energie/Energieberatung/Energieberatung_Nichtwohngebäude_Kommunen/sanierungskonzept_neubauberatung_node.html).
- Bafa. 2019b. "Energieberatung Mittelstand." *Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle*. Retrieved January 31, 2019 (http://www.bafa.de/DE/Energie/Energieberatung/Energieberatung_Mittelstand/energieberatung_mittelstand_node.html).
- BMU. 2018. "Richtlinie zur Förderung von Klimaschutzprojekten im kommunalen Umfeld „Kommunalrichtlinie“ vom 1. Oktober 2018." *Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit*. Retrieved (<https://www.bmu.de/>).
- BMWi. 2017. *Förderstrategie Energieeffizienz und Wärme aus erneuerbaren Energien*. Berlin.
- BMWi. 2018. *Zahlen und Fakten Energiedaten - nationale und internationale Entwicklung*.
- BMWi. 2019a. "BMWi-Energieeffizienz - Energieeffizienz-Förderprogramme des BMWi für Unternehmen: BMWi-Wettbewerb Energieeffizienz (Nachfolgeprogramm zu „STEP up!“) – Zuschuss über Ausschreibungen." *Bundesministerium für Wirtschaft und Energie*. Retrieved January 31, 2019 (<https://www.deutschland-machts-effizient.de/KAENEF/Redaktion/DE/Standardartikel/foerderprogramme-unternehmen.html>).
- BMWi. 2019b. "Geförderte Projekte – STEP up!" *Bundesministerium für Wirtschaft und Energie*. Retrieved January 31, 2019 (<https://stepup-energieeffizienz.de/teilnehmen/geoerderte-projekte>).
- Brena, Ramon F., Juan Pablo García-Vázquez, Carlos E. Galván-Tejada, David Muñoz-Rodríguez, Cesar Vargas-Rosales, and James Fangmeyer. 2017. "Evolution of Indoor Positioning Technologies: A Survey." *Journal of Sensors* 2017:21. Retrieved (<https://doi.org/10.1155/2017/2630413>).
- Bürger, Veit, Clemens Rohde, Wolfgang Eichhammer, and Barbara Schломann. 2012. *Energieeinsparquote für Deutschland? Bewertung des Instruments der Energieeinsparquote (Weiße Zertifikate) auf seine Eignung als Klimaschutz- instrument für Deutschland Inhalt*. Freiburg, Karlsruhe: Öko-Institut, Fraunhofer ISI im Auftrag der KfW Bankengruppe und des WWF Deutschland.
- dena. 2019. "Initiative Energieeffizienz-Netzwerke." *Deutsche Energieagentur (dena)*. Retrieved January 31, 2019 (<http://www.effizienznetzwerke.org/>).
- DOE. 2016. "Solid-State Lighting R&D Plan." *U.S. Department of Energy - Office of Energy Efficiency and Renewable Energies prepared for Solid-State Lighting Program Building Technologies Office* (June).
- DOE. 2017. "Solid-State Lighting 2017 Suggested Research Topics." *U.S. Department of Energy - Office of Energy Efficiency and Renewable Energies* (September):22.

- Fraunhofer IPMS. 2016. "Li-Fi Development Journey." *Fraunhofer-Institut für Photonische Mikrosysteme*. Retrieved (http://www.ipms.fraunhofer.de/content/dam/ipms/common/products/WMS/WMS_OWC_2016_web.pdf).
- Götze, Uwe. 2008. *Investitionsrechnung: Modelle und Analysen zur Beurteilung von Investitionsvorhaben*. Springer-Verlag Retrieved (<http://books.google.de/books?id=3MwfBAAAQBAJ>).
- Härter, Hendrik. 2018. "Die Trends in der Beleuchtung 2019." *Elektronik Praxis*. Retrieved March 11, 2019 (<https://www.elektronikpraxis.vogel.de/die-trends-in-der-beleuchtung-2019-a-786037/>).
- IoTDesign. 2016. "Echtzeit-Li-Fi für Industrie 4.0." *TeDo Verlag GmbH*. Retrieved March 21, 2019 (<https://www.iot-design.de/allgemein/echtzeit-li-fi-fuer-industrie-4-0-3/>).
- KEA. 2015. *Auswertung Stakeholder Befragung im Projekt EnPC INTRANS (capacity building on energy performance contracting in the European markets in transition)*. Karlsruhe Retrieved March 11, 2019 (<https://www.kea-bw.de/aktuell/aktuelle-meldungen/einzelansicht/artikel/energiespar-contracting-bekannt-aber-noch-wenig-genutzt/>).
- KfW. 2019a. "IKK – Energieeffizient Bauen und Sanieren Investieren Sie in energiesparende Nichtwohngebäude." *Kreditanstalt für Wiederaufbau (KfW)*. Retrieved January 31, 2019 ([https://www.kfw.de/inlandsfoerderung/Öffentliche-Einrichtungen/Energetische-Stadtsanierung/Finanzierungsangebote/Energieeffizient-Sanieren-Kommunen-\(218\)/](https://www.kfw.de/inlandsfoerderung/Öffentliche-Einrichtungen/Energetische-Stadtsanierung/Finanzierungsangebote/Energieeffizient-Sanieren-Kommunen-(218)/)).
- KfW. 2019b. "KfW-Energieeffizienzprogramm – Energieeffizient Bauen und Sanieren (276, 277, 278)." *Kreditanstalt für Wiederaufbau (KfW)*. Retrieved January 31, 2019 (<https://www.kfw.de/inlandsfoerderung/Unternehmen/Energie-Umwelt/Förderprodukte/EE-Bauen-und-Sanieren-Unternehmen-276-277-278/>).
- Pape, Ulrich. 2011. *Grundlagen der Finanzierung und Investition: Mit Fallbeispielen und Übungen*. Oldenbourg Verlag Retrieved (http://books.google.de/books?id=o_1NE-EXb3cC).
- Pruitt, Stephanie. 2015. "Testimony to National Academy of Science Committee on Solid State Lighting." *Washington, DC*.
- Rhodes, Will. 2015. "Illuminating Your IQ, Smart Lighting Market Market Today and Future." in *Smart Lighting Conference*. Berlin, Germany.
- Rohde, Clemens. 2014. "Kurzstudie zur Prüfung der weiterführenden Förderung von Beleuchtungssystemen, die auf LED-Technik basieren – im Rahmen des Förderprogrammes „Investitionszuschüsse zum Einsatz hocheffizienter Querschnittstechnologien im Mittelstand“ im Auftrag des Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle (BAFA) (November 2014).
- Schlomann, Barbara, Wolfgang Eichhammer, Clemens Rohde, Judit Kockat, Daniel Becker, and Veit Bürger. 2012. *Kosten-/Nutzen-Analyse der Einführung marktorientierter Instrumente zur Realisierung von Endenergieeinsparungen in Deutschland*. Karlsruhe, Freiburg, Berlin.

- Schulz, Rico. 2016. "Temperaturbeständigkeit von LED-Leuchten" *Chemietechnik* 12. Retrieved April 1, 2019 (<https://www.chemietechnik.de/temperaturbestaendigkeit-von-led-leuchten-im-ex-bereich/#>).
- StaBuA. 2019. "VGR des Bundes – Erwerbstätige: Deutschland, Jahre, Wirtschaftsbereiche." *Statistisches Bundesamt (Destatis)*. Retrieved February 1, 2019 (https://www-genesis.destatis.de/genesis/online/data;sid=9E3F95F6D4A51F665080890FD56FABD4.GO_1_2?operation=abruftabelleBearbeiten&levelindex=1&levelid=1548969563565&auswahloperation=abruftabelleAuspraegungAuswaehlen&auswahlverzeichnis=ordnungsstruktur&ausw).
- ZVEI. 2016. "Lichtmanagement." *Förderungsgemeinschaft Gutes Licht – eine Brancheninitiative Zentralverband Elektrotechnik- und Elektronikindustrie e.V. (ZVEI)*. Retrieved (https://www.licht.de/fileadmin/Publikationen_Downloads/1607_lw12_Lichtmanagement_web.pdf).
- ZVEI. 2018. "Leitfaden Human Centric Lighting (HCL) ©." *Förderungsgemeinschaft Gutes Licht – eine Brancheninitiative Zentralverband Elektrotechnik- und Elektronikindustrie e.V. (ZVEI)*. Retrieved (https://www.licht.de/fileadmin/Publikationen_Downloads/1806_lw21_HCL_web.pdf).
- ZVEI. 2019. "Lichtausbeute." *Zentralverband Elektrotechnik- und Elektronikindustrie e.V.* Retrieved January 31, 2019 (<https://www.licht.de/de/grundlagen/beleuchtungstechnik/traditionelle-lichtquellen/lichtausbeute/>).