



# LED macht Schule

Evaluierung der Umrüstung von Schulbeleuchtung  
auf LED im Rahmen der Leitmarktinitiative



Die LED-Schulstudie	2
Zusammenfassung	3
1. Ausgangslage & Zielsetzung	4
2. Beleuchtungstechnik in Schulen	5
Vorteile	5
Steuerungsmöglichkeiten von Beleuchtungssystemen	6
3. Sozialwissenschaftliche Begleitforschung	7
Methodik	8
Strukturdaten der Befragung	10
Hintergrundinformationen zu den Schulsanierungen (Bauträger-Befragung)	12
Wahrnehmung von LED vor der Sanierung	16
Beurteilung der LED-sanierten Klassenräume	17
Pädagogische Begleitkonzepte	24
Energiespar-Aktivitäten in der Schule & Zuhause	25
Vorbildfunktion der LED-Sanierung	27
4. Messung der Innenraumbeleuchtung	28
5. Fazit der Begleitforschung der LED-Sanierung	30
6. Literatur	32

---

## Die LED-Schulstudie

Die LED-Leitmarktinitiative der Bundesregierung hat sich seit 2008 zum Ziel gesetzt, die breite Markteinführung der LED-Technologie in Deutschland zu fördern und einen Leitmarkt für diese Technologie zu schaffen, der Standortvorteile nutzt und es den deutschen Unternehmen ermöglicht, ihre international führende Wettbewerbsposition in diesem Feld zu festigen und auszubauen. Ein breiter Einsatz hocheffizienter Leuchtdioden vereint zudem Umweltschutz, finanzielle Einsparmöglichkeiten und eine bessere Lichtqualität. Insbesondere in der Allgemeinbeleuchtung im öffentlichen Raum ergibt sich ein hoher Nutzen.

Wie bei jeder neuen Technologie gilt es auch für die LED eine Reihe von Barrieren und Unsicherheiten der Marktteilnehmer zu überwinden, um zur Akzeptanz und damit zum Markterfolg zu kommen. Die Gründe hierfür sind vielfältig: Bisherige Beleuchtungssysteme lassen sich nicht einfach durch die energieeffiziente LED-Technologie ersetzen. Technische Planung, Verarbeitung, Installation, Wartung und Nutzung verlangen ein grundsätzlich verändertes Herangehen an die neuen Beleuchtungssysteme. Dazu kommen fehlende Regeln und Richtlinien für die physiologischen Aspekte und – verglichen mit herkömmlichen Lampen – deutlich höhere Kosten für die Erstinstallation.

Diese Faktoren halten viele Privatkunden, aber gerade auch öffentliche Einrichtungen von einem Wechsel auf LED-Beleuchtungssysteme ab. Viel stärker noch als in der Entwicklung der Technologie erfordern diese Markthemmnisse ein abgestimmtes Handeln aller relevanten Partner aus Wirtschaft, Wissenschaft und Politik.

Das gemeinsame Vorgehen sicherzustellen war und ist die Aufgabe der LED-Leitmarktinitiative, die das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) im Jahr 2008 gestartet hat.

In diesem Rahmen werden alle politisch und gesellschaftlich relevanten Aspekte zur Einführung der neuen Technologie in Deutschland diskutiert. Das Handeln zielt darauf, der heimischen Industrie einen ersten Markt zu bieten, sich mit innovativen LED-Produkten zu positionieren und gleichzeitig den Energieverbrauch durch die Beleuchtung, der in Deutschland etwa 15 % des Gesamtverbrauchs an elektrischer Energie beträgt, deutlich zu senken. So leistet die LED auch einen wichtigen Beitrag zur Energiewende auf der Einsparseite.

Seitens der Bundesregierung verantworten neben dem Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB) und das Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI) die Leitmarktinitiative.

Ein zentrales Element der Initiative ist der Wettbewerb „Kommunen in neuem Licht“, mit dem das BMBF die Markteinführung der neuen LED-Technologie in der kommunalen Anwendung unterstützt. Die Ergebnisse und Erfahrungen aus den zehn Demonstrationsprojekten in den Bereichen Straßen-, Museums- und Schulbeleuchtung sollen weiteren Anwendern als Orientierungshilfe bei der Planung und Umsetzung zukünftiger LED-Projekte dienen.

Im Rahmen der Nationalen Klimaschutzinitiative forciert und fördert das BMUB innerhalb der Kommunalrichtlinie seit 2013 insbesondere die Umrüstung von Beleuchtung in Innenräumen mit LED. Hunderte Schulen haben die Umrüstung ihrer Räume auf LED-Beleuchtung bereits durchgeführt und profitieren dabei mehrfach: Die Gebäude werden kostengünstiger und umweltfreundlicher betrieben, dazu verbessert sich durch angepasstere und ggf. variable Ausleuchtung die Lernatmosphäre.

Um diese Effekte zu belegen und ggf. weiteren Handlungsbedarf in diesem Anwendungsfeld aufzudecken, fördert das BMBF die vorliegende Studie im Rahmen des Förderprogramms „Photonik Forschung Deutschland“. Die Autorinnen und Autoren nutzen dafür eine umfangreiche Stichprobe aus den im Zuge der Kommunalrichtlinie

umgerüsteten Schulen. Es werden dabei sowohl technologische als auch soziologische Aspekte berücksichtigt. Die Studie dient zudem als Erfahrungsbericht, um weitere Maßnahmen innerhalb der LED-Leitmarktinitiative ableiten zu können.

## Zusammenfassung

Die vorliegende Studie hat die Umrüstung der Beleuchtung in 33 Schulen auf LED wissenschaftlich begleitet. Dabei standen sowohl sozialwissenschaftliche als auch technische Aspekte im Vordergrund.

Das wichtigste Ergebnis der sozialwissenschaftlichen Erhebung ist, dass die LED-Beleuchtung um fast eine Schulnote besser bewertet wurde als die Beleuchtung vor der Sanierung („gut“ vs. „befriedigend“). Die neue Beleuchtung wird akzeptiert, als positiv wahrgenommen und kann zu einer Verbesserung des Lernklimas beitragen. Die gute Akzeptanz der neuen Technologie könnte weiter erhöht werden, wenn das Thema „LED“ im Rahmen der Sanierungsmaßnahmen im Unterricht aufgegriffen würde.

Die messtechnischen Untersuchungen können eine zufriedenstellende Beleuchtungsstärke, Farbtemperatur und Farbwiedergabe der Beleuchtung bei reduziertem Energieverbrauch nachweisen. Die neuen Beleuchtungsinstalltionen genügen dabei den aktuell gültigen Normen. Die Studie zeigt auch, dass die LED-Beleuchtung teilweise als zu hell wahrgenommen wird und legt nahe, dass die Beleuchtungsnormen beim Einsatz von LED ggf. überdacht werden müssen.

Die gleichmäßige Ausleuchtung der Klassenräume lässt in einigen Fällen zu wünschen übrig, was den Stellenwert einer sorgfältigen Lichtplanung beim Einsatz der LED-Technologie aufzeigt.



# 1. Ausgangslage & Zielsetzung

Im Rahmen der LED-Leitmarktinitiative wird konkret der Austausch von Innen- und Hallenbeleuchtung durch LED-Technik in Verbindung mit einer Steuer- und Regelungstechnik gefördert. Als Steuer- und Regelungstechnik kann eine tageslichtabhängige Leistungs- bzw. Präsenzsteuerung eingesetzt werden; auch eine zonenweise Zu- und Abschaltung von Leuchten bzw. Leuchtreihen ist möglich. Voraussetzung für die Förderung ist eine Verminderung der CO<sub>2</sub>-Emissionen von mindestens 50 % gegenüber dem Ist-Zustand. Dem Förderantrag sind daher ein detaillierter Projektablaufplan und ein Formular zur Berechnung der erwarteten CO<sub>2</sub>-Einsparung durch die Sanierung der Innenbeleuchtung beizufügen. Zusätzlich müssen die Anforderungen im Rahmen der EU-Ökodesign-Richtlinie (erste Stufe der Verordnung 245/2009 „Beleuchtung im tertiären Sektor“) als Orientierung Berücksichtigung finden.

Für die Förderung der LED-Technik war die hohe Effizienz dieser innovativen Technologie ausschlaggebend. Technische Machbarkeit und Wirtschaftlichkeit sind allerdings nicht alleinige Erfolgsfaktoren für eine neue Technologie.

Neben den nachgewiesenen technischen Vorteilen war die Wirkung auf den Menschen bisher wenig untersucht. Aus diesem Grund hat das BMBF eine Studie in Auftrag gegeben, um geförderte LED-Umrüstungen in Schulen im Rahmen der Kommunalrichtlinie im Hinblick auf Wahrnehmung und Akzeptanz der neuen Beleuchtung durch die Nutzergruppen zu evaluieren. Effizienz und Wirtschaftlichkeit technischer Maßnahmen zur Energieeinsparung hängen nicht nur von ihrer Funktionsfähigkeit, sondern auch vom Nutzerverhalten ab. Die Zufriedenheit mit dem Ergebnis lichttechnischer Aspekte der Modernisierung, z. B. mit der Behaglichkeit

und mit dem visuellen Komfort in den Räumen, kann darüber hinaus die Einstellung zu energiesparenden Maßnahmen beeinflussen. In Schulen oder anderen Bildungseinrichtungen hat die energetische Modernisierung der Gebäude zudem einen besonderen Stellenwert, da dort auch gesellschaftliche Werte nachhaltig geprägt werden. Es werden alle Gesellschaftsschichten und viele Altersgruppen erreicht.

Die Umsetzung von Energieeffizienz-Maßnahmen in Schulgebäuden kann pädagogisch genutzt werden, was ebenfalls ein Untersuchungsgegenstand der Studie war.

Für die vorliegende Studie wurden an 33 Schulen (regional über Deutschland verteilt) insgesamt ca. 4.300 Schülerinnen und Schüler sowie 165 Lehrkräfte befragt. Diese umfangreiche Stichprobe bietet die Möglichkeit, die subjektive Bewertung von konventioneller Beleuchtung und LED-Beleuchtung in Klassenräumen in einer herstellerunabhängigen Studie zu untersuchen und zu vergleichen.

Neben der subjektiven Qualität der Beleuchtung wurde auch die technische Qualität, vor allem die Einhaltung der DIN-Normen, geprüft. Dazu wurden an acht ausgewählten Schulen lichttechnische Messungen vor und nach den Umrüstungen durchgeführt.

Im Rahmen des Projektes war das Fachgebiet Lichttechnik der TU Darmstadt für die Expertise zum Stand der Technik zuständig, die messtechnische Begleitforschung erfolgte durch den Dienstleister Photometrik im Auftrag der TU Darmstadt und die sozialwissenschaftliche Begleitforschung wurde vom Institut für Ressourceneffizienz und Energiestrategien (IREES) durchgeführt.

## 2. Beleuchtungstechnik in Schulen

Im Rahmen der kürzlich herausgegebenen Studie zum Energieverbrauch im Sektor „Gewerbe, Handel, Dienstleistungen“ (Schlomann et al. 2015) konnte festgestellt werden, dass beim Stromeinsatz der Aufwand für die Beleuchtung den mit Abstand größten Posten darstellt (67 %). Überwiegend kommen Leuchtstoff- oder Energiesparlampen in den 87 Schulen, die dort befragt wurden, zum Einsatz. Bei 62 % der befragten Schulen der GHD-Studie ist die Beleuchtung mindestens 15 Jahre alt. (Mit 52 % ist mehr als die Hälfte älter als 15 Jahre.) Fehlende Funktionstüchtigkeit und verminderte Effektivität der Beleuchtung kann dazu führen, dass veraltete Beleuchtungssysteme nicht den geltenden Normen entsprechen. Die photometrische Messung von acht ausgewählten Schulen der Stichprobe zeigte, dass die unsanierten Leuchten in fünf Fällen leicht und in einem Fall stark verschmutzt waren.

Ein hohes Potenzial der Energieeinsparung bzw. Optimierung der Beleuchtung liegt also darin, ineffiziente Lampen auszutauschen, verschmutzte Leuchten zu säubern und defekte Vorschaltgeräte zu reparieren oder auszutauschen. Eine optimale Beleuchtungssituation hinsichtlich Nutzerkomfort und Nachhaltigkeit kann nur erreicht werden, wenn die Beleuchtung alle technischen Anforderungen erfüllt.

### Vorteile

Lichtemittierende Dioden (kurz LED) eignen sich optimal für die energetische Sanierung der Beleuchtung. Gegenüber konventionellen Lampen bietet die LED-Technologie eine Reihe von Vorteilen:

- Hohe Energieeffizienz
- Hohe Wirtschaftlichkeit
- Lange Lebensdauer der Diode von bis zu 50.000 h bei 70 % Lichtstromerhalt bei sorgsamer Dimensionierung
- Weniger Wartungskosten
- Weniger Müll, da LED seltener getauscht werden müssen als bisher verwendete Leuchtmittel
- Entsorgung: Im Vergleich zu Leuchtstofflampen enthalten sie kein Quecksilber
- LED sind äußerst robust: stoß-, vibrations- und schaltfest
- Besonders flexibel einsetzbar; mehr Flexibilität bei der Erzeugung eines gewünschten Spektrums
- Hohe Lichtqualität
- Keine UV- und Infrarotstrahlung im Spektrum
- Lichtausbeute von bis zu 150 lm/W für LED-Komponenten und bis 120 lm/W für gute LED-Leuchten (Stand Ende 2014)
- Unterschiedliche Lichtfarben
- Gute bis sehr gute Farbwiedergabe
- Kürzere Ansprechzeit: 100 % Licht – ohne Flackern – sofort beim Einschalten
- Eine Lichtstromnachregelung ist für eine Lichtstromkonstanz möglich
- Je nach System dimmbar



Für den Einsatz von LED gibt es viele Möglichkeiten sowohl im Hinblick auf die Lampen und Leuchten als auch auf die Steuerungs- und Regelungstechnik. Dabei ist jedoch einiges zu beachten. Da z.B. LED-Röhren einen Ausstrahlwinkel von 120 bis 180° haben (im Gegensatz zu 360° Lichtabstrahlung bei konventionellen T8-Lampen), sollte das Licht durch die

entsprechende Leuchte so gestreut werden, dass eine gleichmäßige Ausleuchtung möglich ist. Dies kann durch Lampen mit Reflektor- oder Linsenoptik erreicht werden oder auch durch drehbare Sockel für die unterschiedliche Ausrichtung der Lampen (Khanh et al. 2012). Lichtberechnungen gibt es von den Anbietern meist kostenlos.

### Steuerungsmöglichkeiten von Beleuchtungssystemen

Durch den Einsatz von sinnvoll abgestimmten Steuerungsmöglichkeiten kann die Handhabung der Beleuchtung erleichtert und der Energieverbrauch weiter gesenkt werden. Weit verbreitet ist das Steuerungsprotokoll DALI (Digital Addressable Lighting Interface). Es ermöglicht das digitale Schalten und Dimmen der Beleuchtung durch eine individuelle Kommunikation zwischen neuen Vorschaltgeräten und Steuereinheiten. Über ein zentrales Steuergerät lässt sich die Beleuchtung im gesamten Gebäude kontrollieren.

In Klassenräumen ist es vorgegeben, dass die fensternahen und fensterfernen Leuchten getrennt schaltbar sein müssen. Durch automatisches Abschalten von nicht genutzten Lampen können unnötig lange Brenndauern vermieden werden. Möglich sind folgende Steuerungssysteme, die auch in Kombination eingesetzt werden können:

- **Tageslichtabhängige Regelung:** Sie erfasst mittels Lichtsensoren die Menge an Tageslicht im Raum und schaltet entsprechend Lampen ab oder zu, sodass eine konstante Beleuchtungsstärke gegeben ist.
- **Bewegungsaktivierte Regelung:** Durch sogenannte Bewegungsmelder wird die Anwesenheit von Personen im Raum erfasst und das Licht entsprechend automatisch aus- und/oder angeschaltet.

- **Präsenzmelder:** Präsenzmelder erfassen im Gegensatz zu Bewegungsmeldern über einen thermischen Sensor auch Personen, die sich nicht bewegen.
- **Zeitschaltuhr:** Dies ist vor allem bei nur gelegentlicher Nutzung der Beleuchtung sinnvoll. Beispielsweise kann die Beleuchtung in Treppenhäusern häufig per Hand ein- und durch Zeitrelais ausgeschaltet werden.
- **Individuelle Steuerung:** Die Nutzerinnen und Nutzer können die Beleuchtung selbst regulieren. Im Idealfall haben sie die Möglichkeit, die Beleuchtungsstärke zu dimmen und der jeweiligen Nutzung anzupassen. Für eine optimale Funktionalität und das psychische Wohlbefinden der Nutzerinnen und Nutzer ist es wichtig, dass eine individuelle Steuerungsmöglichkeit vorhanden und intuitiv verständlich ist.

Bei automatisierter Schaltung sollte regelmäßig die Funktion und deren Handhabbarkeit im Alltag überprüft werden. Für die Inbetriebnahme von Lichtregelsystemen können mehrere Messungen, Abgleiche und Einregulierungen erforderlich werden. Der Eigenstromverbrauch der Beleuchtungsregelung kann außerdem den Wirkungsgrad des Beleuchtungssystems verschlechtern.

### 3. Sozialwissenschaftliche Begleitforschung

Gemäß der Kommunalrichtlinie sollen durch die Sanierung der Beleuchtung vor allem CO<sub>2</sub>-Einsparpotenziale genutzt werden. Jedoch sollte durch den Einbau einer hocheffizienten LED-Beleuchtungs-, Steuer- und Regelungstechnik auch der Schulalltag optimal unterstützt werden. Um dies zu erforschen, wurde eine Analyse zur Akzeptanz der LED-Technologie im schulischen Kontext auf der Basis einer Breitenbefragung durchgeführt.

Die Erkenntnisse über die Akzeptanzfaktoren können einen verbreiteten Einsatz der LED-Technologie unterstützen.

Neben der Akzeptanz-Analyse besteht die Möglichkeit, auf einer breiten Datenbasis zu erfassen, inwieweit im Unterricht auch pädagogische Konzepte eingesetzt werden, die zu einem größeren Energiebewusstsein der Schülerinnen und Schüler führen können.

Die sozialwissenschaftliche Begleitforschung hatte folgende Ziele:

- Untersuchung der Erwartungen der Lehrkräfte und Wissensstand der Schülerinnen und Schüler in Bezug auf LED im Alltag vor der Umrüstung,
- Erfassung, ob die neue Beleuchtung aus subjektiver Sicht die Lern- und Lehrbedingungen verbessert,
- Untersuchung der Handhabbarkeit von Steuerung und Regelung der LED-Beleuchtung im Hinblick auf individuelle Anpassung an den jeweils wechselnden Lichtbedarf,
- Erfassung pädagogischer Begleitkonzepte sowie
- Erfassung der persönlichen Einstellungen der Schülerinnen und Schüler zum Thema Beleuchtung und deren Energiesparverhalten.



## Methodik

Datenbasis für die Erhebung waren alle auf LED-Beleuchtung umgerüsteten Schulen in Deutschland, die im Rahmen der Kommunalrichtlinie vom 17.10.2012 gefördert wurden. Gefördert wurden alle Schultypen von der Grundschule bis zum Gymnasium und zur Berufsschule.

Berücksichtigt wurden für die vorliegende Studie alle Anträge, die bis zum 31.03.2013 eingegangen waren. Einige Schulen rüsteten nur einzelne Fachräume um, während in anderen Projekten große Teile der Beleuchtung im gesamten Gebäude saniert wurden.

Da der interessierende Untersuchungsgegenstand auf Klassenräume beschränkt war, fielen von den 418 Schulen im Gesamtdatensatz der Antragssteller einige weg, da:

- keine Klassenräume saniert wurden (sondern z. B. nur Flure oder Turnhallen), was ca. 300 Anträge betraf,
- die Umrüstung zum Zeitpunkt der Befragung mehr als sechs Monate zurück lag,
- die Sanierung nicht mehr im Jahr 2014 stattfand oder
- es sich um Grundschulen handelte, die aufgrund der Altersstruktur der Schülerinnen und Schüler für eine schriftliche Befragung nicht geeignet waren.

Somit blieb eine Grundgesamtheit von 56 Schulen, die für eine sozialwissenschaftliche und messtechnische Untersuchung in Frage kamen.

Für die sozialwissenschaftliche Begleitforschung wurde eine breit angelegte schriftliche Befragung von Schülerinnen und Schülern sowie Lehrkräften durchgeführt. Im ersten Schritt wurden dazu Schulen akquiriert, die sich für eine Teilnahme an der Studie bereit erklärten. Alle Bau-träger der teilnehmenden Schulen bekamen einen kurzen Fragebogen zur Schule und zur tatsächlich umgesetzten Sanierung.

Geplant war, die Befragung jeweils vor und nach der Sanierung (Vorher- / Nachherbefragung) durchzuführen. Während des Akquisitionsprozesses stellte sich jedoch heraus, dass einige Schulen zum Zeitpunkt der Befragung schon saniert waren.

Aus diesem Grund wurden ergänzend zu den Fragebögen der Vorher- / Nachherbefragung Vergleichsfragebögen entwickelt, die sich im Wesentlichen auf den sanierten Zustand bezogen, aber auch Retrospektivfragen zur alten Beleuchtungssituation enthielten (Vergleichsbefragung).

Befragt wurden Schülerinnen, Schüler und Lehrkräfte sowohl in nicht sanierten Räumen als auch in LED-sanierten Räumen (Abbildung 1). Zusätzlich wurden die Bau-träger der Schulen nach Hintergrundinformationen befragt.

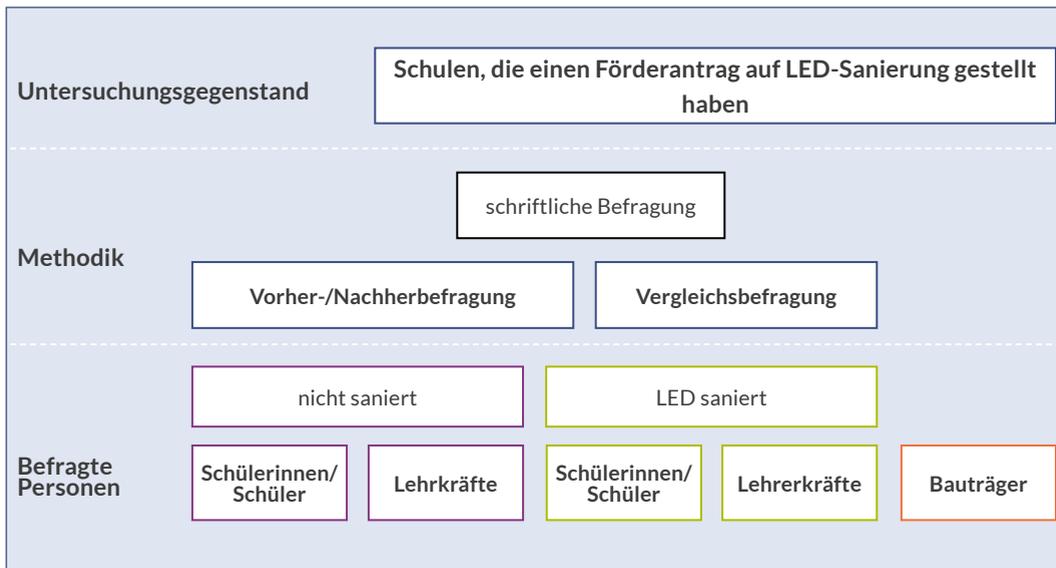


Abbildung 1 | Schematische Darstellung der sozialwissenschaftlichen Begleitforschung

Der Basis-Fragebogen, den die Schülerinnen und Schüler erhielten, beinhaltete folgende Frageblöcke:

- Beurteilung der Lichtverhältnisse im Raum und der Raumwirkung insgesamt (Abbildung 2)
- Handhabbarkeit der Bedienung der Beleuchtung
- Sonstige Störfaktoren im Raum und auftretende Beschwerden
- Hintergrundwissen zu LED
- Energie- und klimarelevante Unterrichtsinhalte
- Einstellungsfragen zur Beleuchtung und zum Energiesparen und zum Transfer in den privaten Bereich
- Demographische Angaben

Je nach Befragungszeitpunkt waren die Fragen entsprechend angepasst. Der Lehrkraftfragebogen wurde inhaltlich auf den Schülerfragebogen abgestimmt und um Fragen zu Lehrmaterial zum Thema LED erweitert. Außerdem wurden die Lehrkräfte um Angaben zu den strukturellen Rahmenbedingungen wie Wetterlage oder Beschattungsprobleme während der Befragung gebeten.

Wichtig für eine Befragung zum Thema Beleuchtung ist der geeignete Zeitpunkt: Es musste in der dunklen Jahreszeit und möglichst in der ersten Stunde befragt werden, in der das künstliche Licht üblicherweise eingeschaltet ist. Die erste Befragungsphase lief von Januar bis März 2014. Die zweite Befragungsphase fand im Spätjahr von September bis Dezember 2014 statt.

<b>Lichtsituation in diesem Raum</b>							
<b>7. Wie beurteilst Du die Lichtverhältnisse in diesem Raum? Bitte kreuze dafür jeweils Schulnoten an.</b>							
	1 = sehr gut			6 = ungenügend			
	1	2	3	4	5	6	
Die Beleuchtung des Raumes insgesamt	<input type="checkbox"/>						
Die Beleuchtung der Tischfläche	<input type="checkbox"/>						
Die Beleuchtung der Tafel	<input type="checkbox"/>						
Das Aussehen der Deckenlampen	<input type="checkbox"/>						
Die Menge von Tageslicht im Raum	<input type="checkbox"/>						
Schutz vor Blendung durch Sonnenlicht	<input type="checkbox"/>						
<b>8. Wie wirkt dieser Raum bei dieser Lichtsituation auf Dich?</b>							
heiter	<input type="checkbox"/>	düster					
gemütlich	<input type="checkbox"/>	ungemütlich					
warm	<input type="checkbox"/>	kalt					

 Abbildung 2 | **Ausschnitt aus dem Fragebogen**

### Strukturdaten der Befragung

Für die Befragung kamen insgesamt 56 Schulen in Frage, von denen 33 an der Befragung teilnahmen (Rücklaufquote 59 %). An diese 33 teilnehmenden Schulen wurden insgesamt 6.789 Schülerfragebögen versendet.

Davon kamen 4.430 Fragebögen ausgefüllt zurück (Rücklaufquote 65 %). Die Rücklaufquoten sind im Vergleich zu anderen Studien mit einer durchschnittlichen Rücklaufquote von 36 % sehr gut (Baruch und Holtom 2008). Dies ist sicherlich auch dem Anschreiben der Bauträger und Bitte um Mitwirkung durch das BMBF zu verdanken. Nach Plausibilitätskontrollen ergab sich daraus ein Datensatz von 4.354 auswertbaren Fragebögen.

Von den insgesamt 4.354 vorliegenden Fragebögen beziehen sich 2.812 Fragebögen auf umgerüstete Klassenräume, die übrigen 1.542 Fragebögen beziehen sich nur auf den un-saniierten Zustand.

Es haben zusätzlich insgesamt 165 Lehrkräfte an der Befragung teilgenommen.

Die befragten Schulen teilen sich auf neun Bundesländer auf (Abbildung 3). Diese Verteilung entspricht in etwa der Verteilung der Antragstellung; es gab kaum Förderanträge aus den neuen Bundesländern.

Von den 33 teilnehmenden Schulen nahmen 11 Schulen an der Vorher-/Nachherbefragung teil, die übrigen 22 Schulen wurden mittels Vergleichsbefragung erfasst (Tabelle 1), da die Sanierung beim Erstkontakt bereits abgeschlossen war.

Insgesamt 160 verschiedene Klassenräume sind im Datensatz enthalten, wovon 127 Räume LED-saniert wurden und 33 nicht saniert wurden.



Im Durchschnitt wurden pro Schule fünf Klassenräume, 132 Schülerinnen und Schüler, fünf Lehrkräfte und pro Klassenraum 27 Schülerinnen und Schüler und eine Lehrkraft befragt.

Die Verteilung der befragten Schülerinnen und Schüler über die Schulen und über die Klassen ergibt ein relativ homogenes Bild (Abbildung 4).

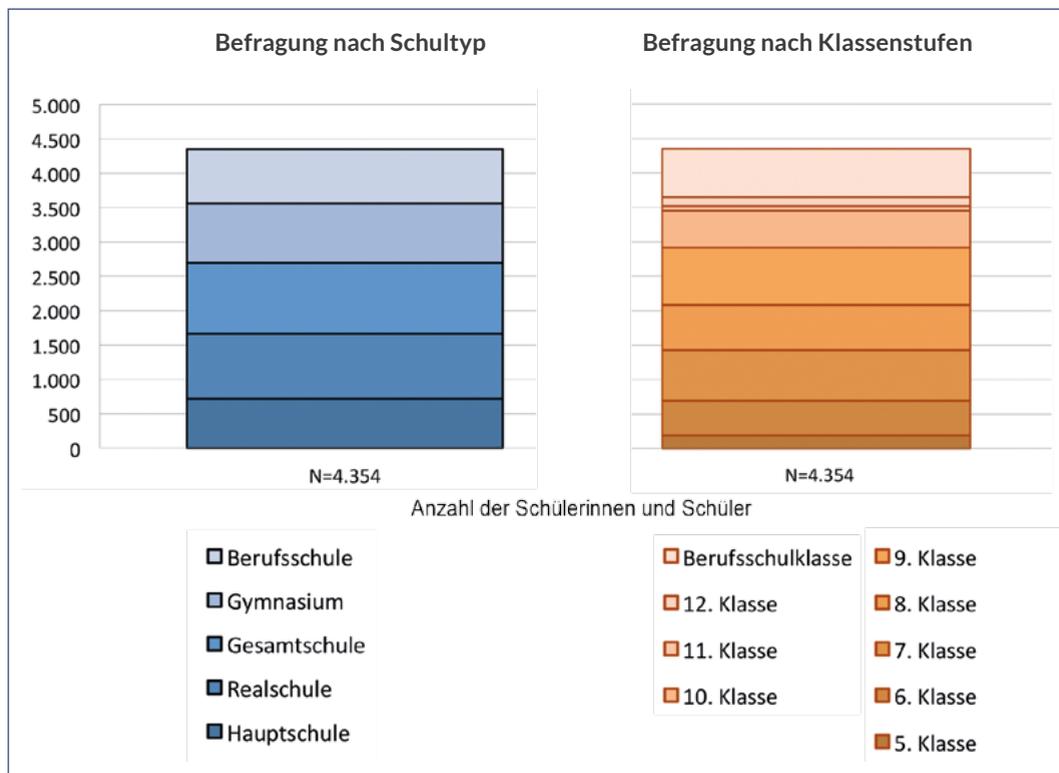


Abbildung 4 | Befragung nach Schultyp und Klassenstufen

### Hintergrundinformationen zu den Schulsanierungen (Bauträger-Befragung)

Die Bauträger wurden gebeten, ergänzende Angaben zur tatsächlich erfolgten Sanierung der Schulen zu machen. Es liegen daher detaillierte Angaben zu 23 Schulen vor.

Diese Schulen wurden zum Großteil zwischen 1950-1978 gebaut (16 Schulen), fünf weitere Schulen wurden vor 1950 gebaut, zwei Schulen wurden zwischen 1979 und 1994 errichtet.

Die Sanierungsmaßnahmen wurden hauptsächlich im 2. und 3. Quartal 2014 durchgeführt und beinhalteten neben der Sanierung der Beleuchtung Maßnahmen zur Verbesserung der Akustik, der Lüftung, der Außenwand, der Fenster, der Heizung, der Böden und des Daches (Abbildung 5).

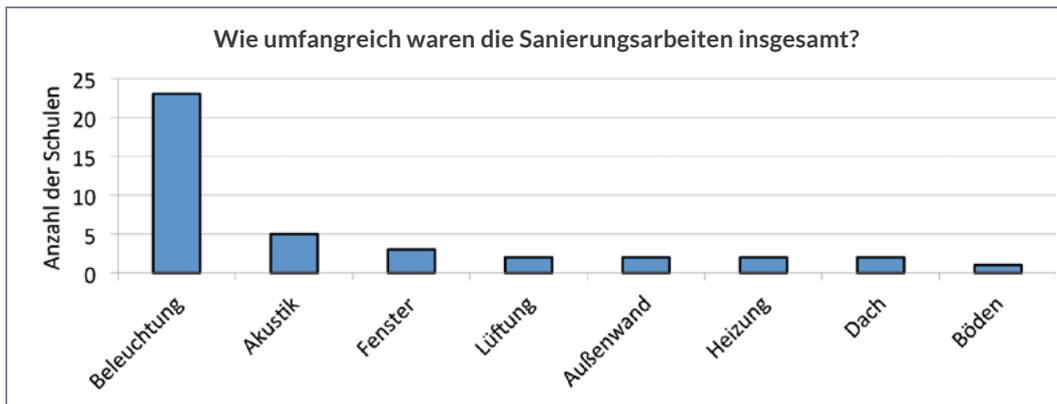


Abbildung 5 | Sanierungsmaßnahmen nach Angabe der Bauträger (N=23 Schulen)

In neun Schulen wurde die LED-Beleuchtung in allen Klassenräumen installiert, in 14 Schulen nur in einem Teil der Klassenräume. Außerdem wurden häufig Fachräume und Flure mit LED ausgestattet (Abbildung 6). Nur zu einem geringen Teil wurden die Turnhalle, der Außenbereich oder die Aula zusätzlich zu Klassenräumen mit LED saniert. Einige Bauträger berichteten im Frühjahr 2015, dass weitere Umrüstungsmaßnahmen der Beleuchtung auf LED geplant sind, nachdem sie sehr gute Erfahrungen mit der Sanierung gemacht hatten.

Da Gegenstand der Förderung nicht nur die LED-Beleuchtungstechnik, sondern auch eine Steuer- und Regelungstechnik war, sind diese ebenfalls in den Sanierungsmaßnahmen inbegriffen. Eine automatische Steuerung wurde in 18 der 23 Schulen installiert.

Im häufigsten Fall ist dies eine Kombination aus Tageslichtsteuerung und Präsenzsteuerung, teilweise auch ergänzt durch Bewegungsmelder. In zwei Schulen wurde lediglich eine Tageslichtsteuerung eingebaut.

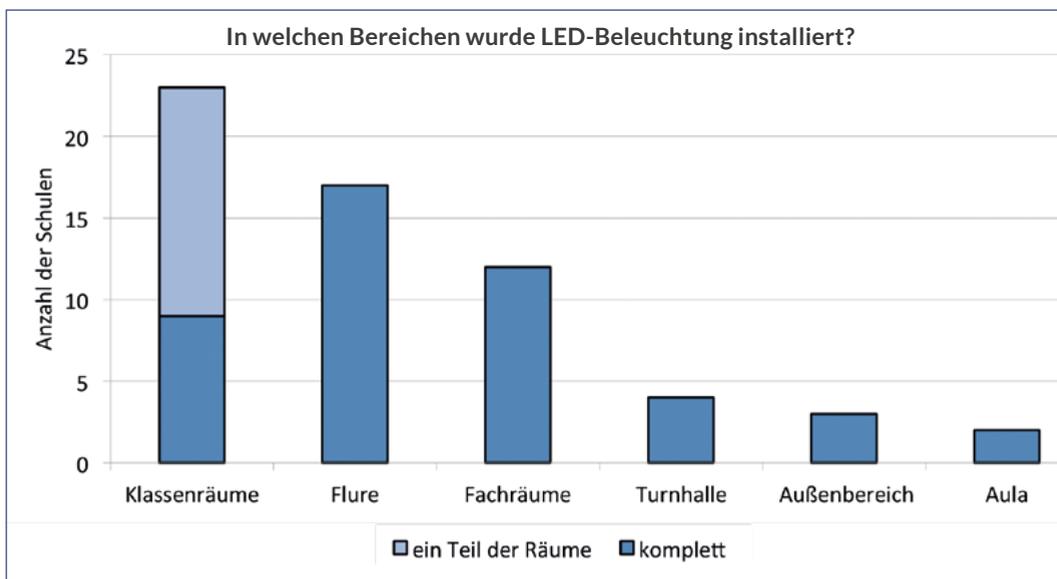


Abbildung 6 | Sanierte Bereiche und Sanierungszeitpunkt nach Angaben der Bauträger (N=23 Schulen)

## Erfahrungsbericht: Werkrealschule

### Sanierungsmaßnahmen LED:

9 Klassenzimmer, 2 Aufenthaltsräume, 7 Toiletten, 5 Flure, 2 Musikräume, 6 Fachräume, 2 Windfänge, 3 Lehrmittelräume, 1 Aula, 2 Putzräume, 2 Außenbereiche.  
Es wurde eine Tageslicht- und eine Präsenzsteuerung installiert.

Die bestehende Beleuchtung war ca. 20 Jahre alt. Im Rahmen der LED-Sanierung wurde zunächst ein Raum als Musterraum mit LED-Beleuchtung umgerüstet. Die positiven Erfahrungen damit konnten genutzt werden, um danach sukzessive die Beleuchtung der gesamten Schule zu erneuern.

Ausgenommen war das Lehrerzimmer, da hier keine Möglichkeit gesehen wurde, das spezielle Ambiente des Raumes durch den Einsatz von LED zu bewahren.

Die Beleuchtungssteuerung bereitete zunächst Probleme, da die Einstellungen bei Dunkelheit vorgenommen worden waren. Dies wurde bei Tageslicht korrigiert und ist nun zu aller Zufriedenheit eingestellt, wenn auch subjektive Wahrnehmungsunterschiede festgestellt werden konnten. Ein weiteres Problem entstand in Räumen mit nur 1-2 Präsenz-Sensoren bei Projektarbeiten

mit wenigen Schülerinnen und Schüler, die nicht unter den Sensoren saßen und daher nicht erfasst wurden. Von Anfang an wurden die Sanierungspläne mit der Schulleitung abgestimmt. Diese war froh über die neue Beleuchtung, da die alte brummende Störgeräusche verursachte. Der Hausmeister begleitete die Maßnahmen kontinuierlich. Die Schulleitung und das Kollegium bekamen außerdem eine Einweisung in die Technik.

### Gesamtfazit des Bauträgers:

„Die Technik wird sehr gut angenommen. Wir haben jetzt eine tolle Beleuchtung und ein tolles Licht. Außerdem kann das negative Nutzerverhalten, also wenn nicht benötigtes Licht nicht abgeschaltet wird, abgefangen werden. Für die Verwaltung sind natürlich auch die Einsparungen vorteilhaft, die sich langfristig sicherlich bemerkbar machen. Es bleibt allerdings abzuwarten, wie einfach die Wartung der Leuchten tatsächlich ist.“

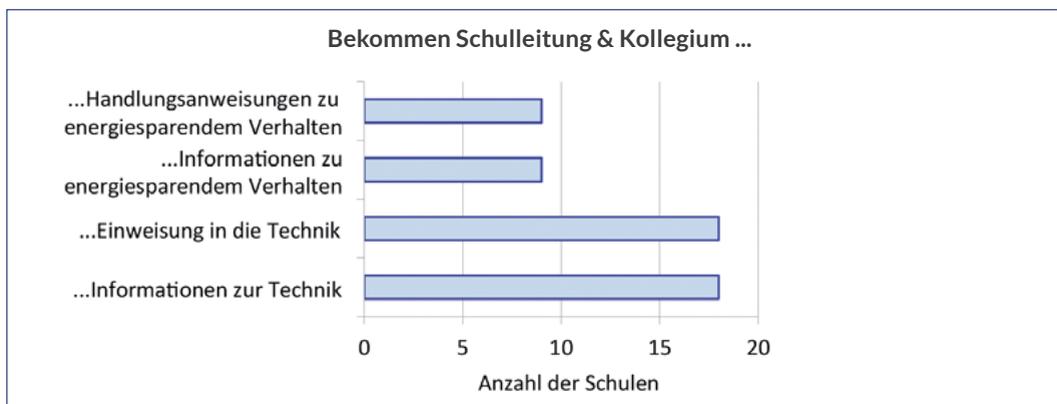
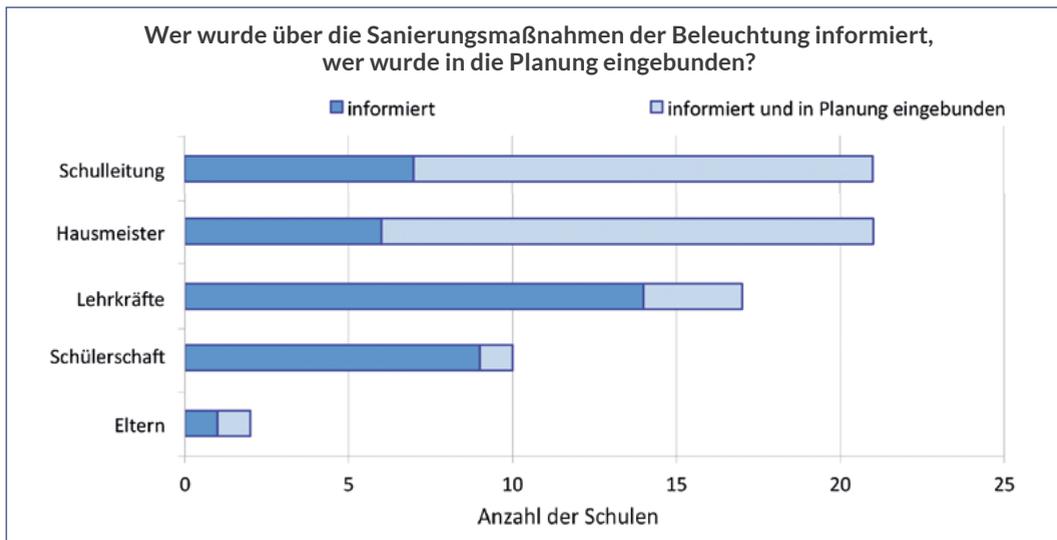


Abbildung 7 | Informationsmaßnahmen von den Baurägern (N=23 Schulen)

Für die Akzeptanz einer neuen Technologie kann auch die Information und Einbeziehung der Betroffenen von entscheidender Bedeutung sein (Abbildung 7). In den meisten Fällen (14 Schulen) wurden die Schulleitung und der Hausmeister in die Planung der Sanierung eingebunden, Lehrkräfte und Schülerschaft wurden informiert. In einem Fall wurden auch die Eltern informiert, in einer anderen Schule wurden Eltern in die Planung eingebunden.

18 von 23 Baurägern gaben an, Schulleitung und Kollegium informiert bzw. in die Technik eingewiesen zu haben.

Neun von 23 Baurägern gaben Informationen und Handlungsanweisungen zu energiesparendem Verhalten weiter.

Veranstaltungen im Rahmen der Sanierung (z. B. Tag der offenen Tür, Besichtigungen) waren zum Befragungszeitpunkt in fünf Schulen geplant, wurden jedoch noch nicht durchgeführt.

Eine Energieverbrauchskontrolle wird in allen befragten Schulen durchgeführt, in 11 Schulen etwa jährlich, in 12 Schulen etwa monatlich. Diese gab in 15 Schulen bereits Anlass zu energiesparenden Maßnahmen.

## Wahrnehmung von LED vor der Sanierung

Für die Wahrnehmung und Bewertung einer neuen Technologie spielen eventuelle Vorbehalte der Nutzerinnen und Nutzer (Schülerschaft und Lehrkräfte) eine wichtige Rolle.

Es zeigt sich, dass bereits vor der Sanierung die Handlungsroutine „Licht aus“ bei den Schülerinnen und Schülern relativ gut verankert war: Insgesamt 68 % der 1.188 Befragten gaben an, im Klassenzimmer unnötiges Licht auszuschalten, zu Hause tun dies sogar 91 % der Befragten. Auch konnten die Schülerinnen und Schüler einige Beispiele für den Einsatz von LED nennen, wie Abbildung 9 zeigt.

Unter „Sonstige“ wurden beispielsweise „Fahrradlicht“ oder „im Krankenhaus“ genannt. „In der Schule“ nannten spontan nur 10 Schülerinnen und Schüler.

Die Erwartungen der Lehrkräfte richteten sich vor allem auf eine Verbesserung des visuellen Komforts und eine flexiblere Beleuchtungsregelung, aber auch auf Energiekosteneinsparung und generell bessere Lernbedingungen. Diese Erwartungen wurden offenbar weitgehend erfüllt, insbesondere erleben die Lehrkräfte eine Erleichterung im Alltag durch eine automatisierte Beleuchtungsregelung.



Abbildung 8 | Auf LED umgerüstetes Klassenzimmer, Bildarchiv: Stadtverwaltung Trier, GWT

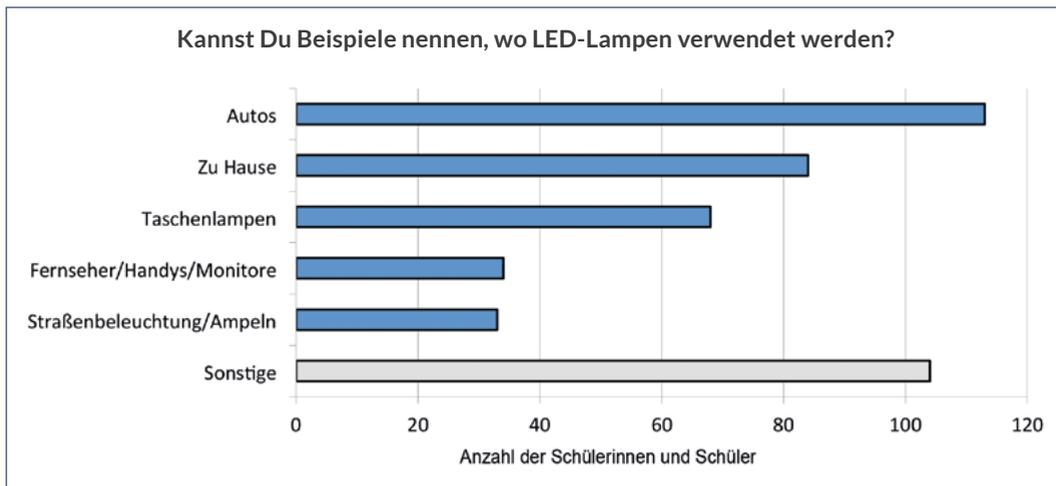


Abbildung 9 | Von den Schülerinnen und Schülern genannte Beispiele für den Einsatz von LED (N=729)

### Beurteilung der LED-sanierten Klassenräume

Im Zentrum der Auswertungen stand der Vorher-Nachher-Vergleich. Untersucht wurde die Bedeutung und Wirkung der Umrüstung aus Sicht der Nutzer, die Akzeptanz der LED-Technologie, Veränderungen im Nutzungsverhalten und Auswirkungen auf die Lern- und Lehrbedingungen der Schülerinnen, Schüler und Lehrkräfte sowie deren Einbeziehung in den Umrüstungsprozess und die Einbindung des Themas in den Unterricht.

Im Folgenden werden alle Bewertungen von unsanierten Klassenräumen mit konventionellen Lampen (in der Regel T8-Leuchtstoffröhren) im Vergleich zu sanierten Klassenräumen mit LED-Lampen betrachtet. Um einen möglichst realitätsnahen Vergleich ziehen zu können, wurden die Lampen im unsanierten Zustand nicht

eigens gewartet oder durch neue konventionelle Lampen ersetzt. Dies ist auch für die Interpretation der Meßergebnisse (Kapitel 4) zu berücksichtigen.

### Vergleich konventionelle und LED-Beleuchtung

Die Bewertung der Lichtverhältnisse im Raum bei konventioneller bzw. LED-Beleuchtung wurde zum einen durch Retrospektivfragen, zum anderen durch einen direkten Vergleich der Bewertung im unsanierten vs. im sanierten Zustand erfasst. Die Schülerinnen und Schüler bewerteten die LED-Beleuchtung auf einer Notenwert-Skala von 1 (sehr gut) bis 6 (ungenügend) durchgehend besser als die konventionelle Beleuchtung (Abbildung 10).

Im Mittel wird die LED-Beleuchtung fast eine Note besser bewertet, die Unterschiede sind signifikant. Die konventionelle Beleuchtung wird im Durchschnitt eher mit „befriedigend“ bewertet, die LED-Beleuchtung dagegen mit „gut“.

Nach der Beleuchtungssanierung werden die Ausleuchtung der Tischflächen und der Tafel besser wahrgenommen. Die Deckenlampe, die Menge an Tageslicht und der Schutz vor Blendung werden ebenfalls besser beurteilt. Die Einschätzung der Lehrkräfte ist dabei sehr ähnlich wie die der Schülerinnen und Schüler.

Insbesondere die Bewertung der Deckenleuchten schneidet im sanierten Zustand durchgehend deutlich besser ab als im unsanierten Zustand. Im Rahmen der Messung in ausgewählten Schulen konnte festgestellt werden, dass die ursprünglichen Leuchten häufig verschmutzt oder sogar defekt waren; dies wurde durch die Befragung bestätigt. Die Beleuchtung der Tafel wird im umgerüsteten Zustand ebenfalls fast eine Note besser beurteilt, unabhängig davon, ob es eine spezielle Tafelbeleuchtung gibt oder nicht.

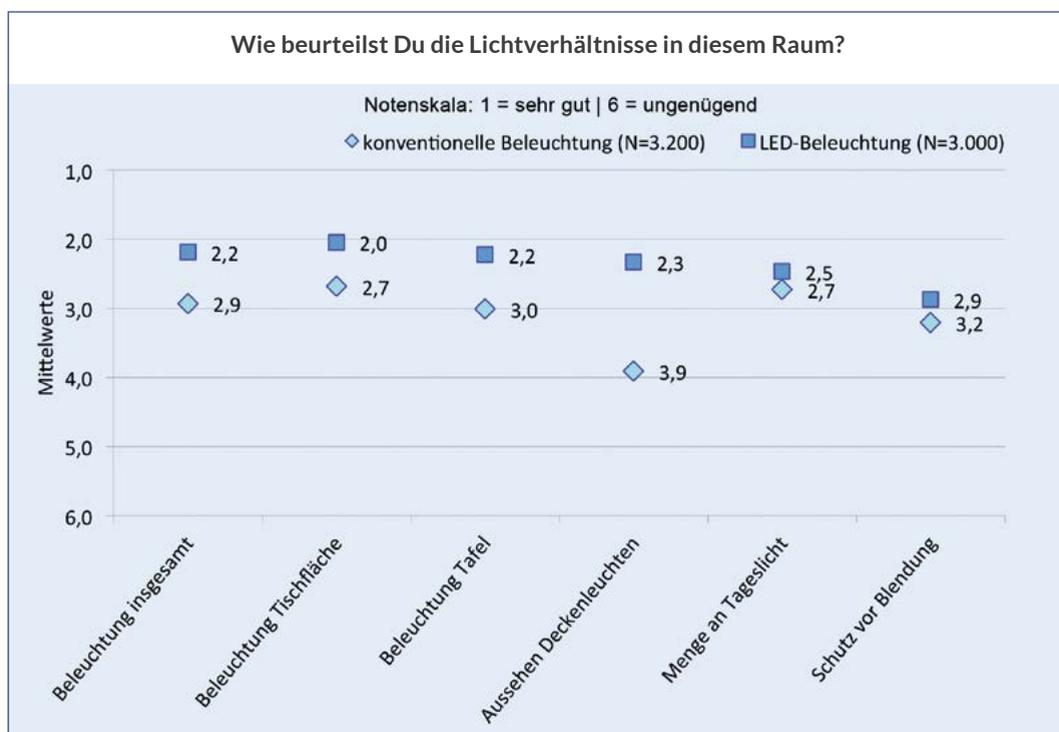


Abbildung 10 | Beurteilung der Lichtverhältnisse

## Erfahrungsbericht: Gymnasium

### Sanierungsmaßnahmen LED:

Alle 45 Klassenräume und alle Fachräume sowie die Flure.

Es wurden eine Tageslicht- und Präsenzsteuerung sowie Bewegungsmelder installiert.

Für das Schulzentrum wurde ein umfassendes Energiekonzept erarbeitet, das unter anderem den Austausch der Beleuchtung durch LED-Beleuchtung vorsah. Es wurden Klassenräume, Flure und Nebenräume mit LED-Anbauleuchten ausgestattet. Die Beleuchtungsstärke der alten Lampen lag weit unter der Norm, die Wannengehäuse waren sehr vergilbt. Neben einem energetischen Gewinn war auch die Verbesserung der Sehaufgaben ein Ziel der Sanierung.

Für eine optimale Beleuchtung war es notwendig, die Leuchten neu zu positionieren. Es wurden je Klasse im Mittel acht LED-Anbauleuchten mit einer Systemleistung von je 38 W verbaut. Zusätzlich wurden separate Tafelleuchten ergänzt. Die Lichtschalter wurden nachträglich so konzipiert, dass sie weiterhin manuell bedienbar sind. Die Präsenzmelder sind so fein eingestellt, dass selbst minimale Schreibebewegungen erkannt werden.

Trotz erhöhter Beleuchtungsstärken konnten ca. 164 MWh/a Strom bzw. 96,8 t/a CO<sub>2</sub> eingespart werden. Die Anschlussleistung der sanierten Beleuchtung verringerte sich insgesamt von ca. 84 kW auf 32 kW (Ergebnisse des Planungsbüros KaTplan, der Evangelischen Kirche von Westfalen, 24.08.2014).

Die Schulleitung wurde in die Planung eingebunden; Lehrkräfte, Schülerschaft und Hausmeister wurden informiert. Schulleitung und Kollegium bekamen eine Einweisung in die Technik und Handlungsanweisungen zu energiesparendem Verhalten. Es ist auch eine Veranstaltung im Rahmen der Sanierung geplant.

Gesamtfazit des planenden Ingenieurs:

„Die empfohlenen Werte werden durch die LED-Beleuchtung deutlich übererfüllt. Ein schöner Nebeneffekt ist natürlich die Energie- und Kosteneinsparung durch die Sanierungsmaßnahme.“

Neben der Beurteilung der Lichtverhältnisse wurde auch die Wirkung der Lichtsituation abgefragt (Abbildung 11). Diese Frage bezog sich jedoch nur auf die zum Zeitpunkt der Befragung aktuelle Lichtsituation (keine Retrospektivfrage in der Vergleichsbefragung). Zusätzlich ist zu berücksichtigen, dass sich die Aussagen womöglich nicht nur auf die Beleuchtung beziehen könnten,

sondern vielmehr auf die Gesamtwirkung des Raumes. Insgesamt schneidet die neue Beleuchtung auch hier besser ab als die alte. Der Raum wurde unter der neuen Beleuchtungstendenzuell als wärmer, gemütlicher und als wesentlich heiterer wahrgenommen. Die Einschätzung der Lehrkräfte ist vergleichbar.

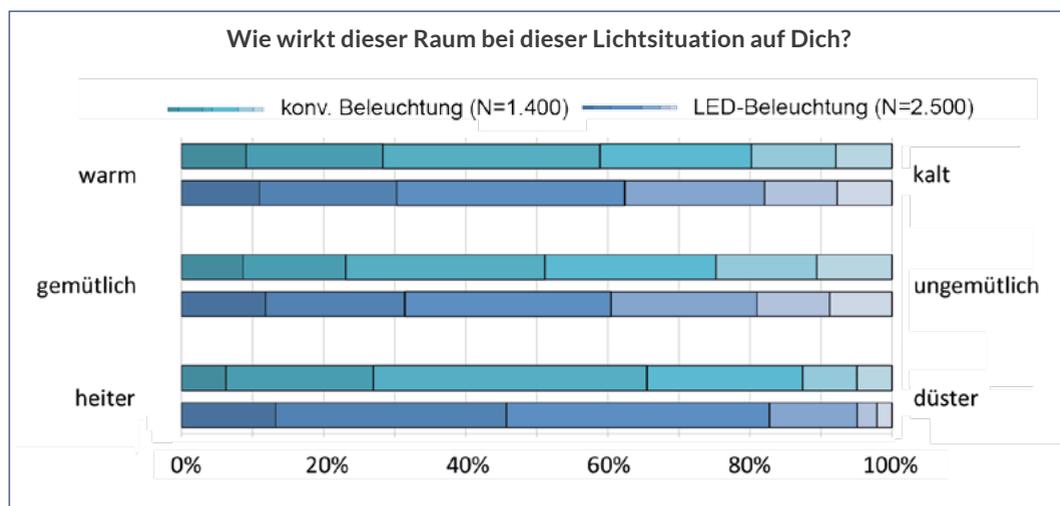
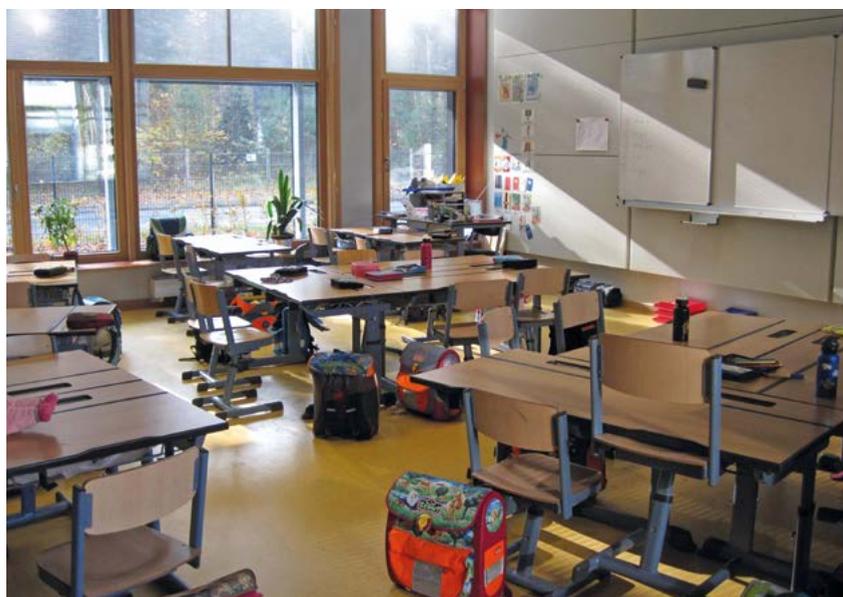


Abbildung 11 | Beurteilung der Lichtsituation (jeweils 6-stufige Skala)



Insgesamt fühlen sich die befragten Schülerinnen und Schüler in den sanierten Räumen eindeutig wohler als in den unsanierten Räumen (Abbildung 12): Der größte Anteil der Befragten gibt bei konventioneller Beleuchtung einen

Wohlfühlfaktor von 3, bei LED-Beleuchtung jedoch von 2 an. Die Lehrkräfte fühlen sich sowohl vor als auch nach der Sanierung wohl (Mittelwert=2,5 bzw. 2,3).

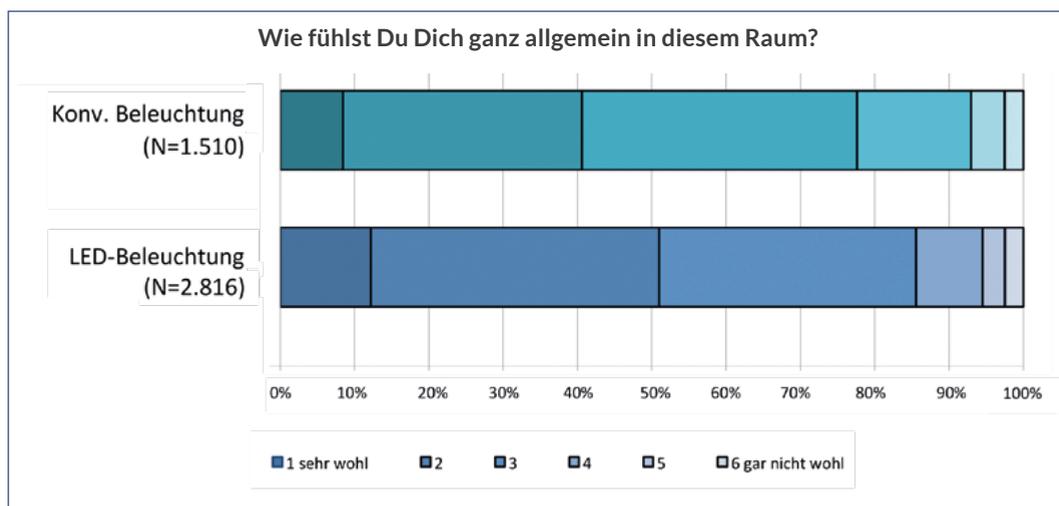


Abbildung 12 | Wohlfühlen im Raum (6-stufige Skala)

Auch wenn sich die Beleuchtungswahrnehmung und -wirkung nach der Sanierung wesentlich verbessert hat, gilt dies nicht unbedingt für die Handhabung der Beleuchtungsbedienung. Sowohl Lehrkräfte als auch Schülerinnen und Schüler gaben an, dass es ihnen wichtig sei, das Licht selbst ein- und ausschalten zu können.

Bei der neuen Beleuchtung scheint der Lichtschalter jedoch häufiger als zuvor nicht intuitiv verständlich zu sein. Außerdem gab es teilweise Probleme mit der automatischen Steuerung:

Das Licht schaltet sich zu ungeeigneten Zeitpunkten automatisch aus, z.B. wenn zu wenig Tageslicht in den Raum fällt, wenn sich eine dunkel gekleidete Person unter dem Sensor befindet oder auch, wenn sich alle ruhig verhalten. Eine Überprüfung der Einstellungsparameter der Beleuchtungssteuerung ist daher notwendig. Die Lehrkräfte äußerten Bedarf, das Licht besser an ihre Bedürfnisse und die jeweilige Situation anpassen zu können, dies sei auch nach der Sanierung oft nicht möglich.

## Störfaktoren im Raum

Für die subjektive Bewertung der Beleuchtung und der Lichtsituation können auch weitere Raumparameter eine Rolle spielen, vor allem wenn diese negativ auffallen. Die Schülerinnen und Schüler wurden gefragt, ob es etwas gäbe, das sie in diesem Raum störe (Abbildung 13).

Nur 17 % (alte Beleuchtung) bzw. 25 % (neue Beleuchtung) gaben keine Störfaktoren an. Mit Abstand am häufigsten wurde die schlechte Luft im Klassenzimmer bemängelt, sowohl im alten als auch im neuen Zustand (jeweils über 40 % der Befragten).

In zehn Schulen mit neuer Beleuchtung wurde von mehr als 25 % der befragten Schülerinnen und Schüler als Störfaktor „zu hell“ angegeben.

Auf Nachfrage teilten die Bauträger mit, dass die Beleuchtungsstärke der neuen Beleuchtung im Vergleich zu einer vorher relativ dunklen Beleuchtung wesentlich zugenommen habe, da die Leuchten vor der Sanierung oft verschmutzt und/oder die Lampen schon sehr alt gewesen wären.

Dies bestätigt auch die Befragung: Die Raumwirkung wurde in der konventionellen Beleuchtungssituation tendenziell als „zu dunkel“ bezeichnet, in der LED-Beleuchtungssituation tendenziell als „zu hell“ (Abbildung 14).

Dieser Störfaktor ist also nicht der LED-Beleuchtung an sich, sondern vielmehr dem Erneuerungs-Charakter der Beleuchtung zuzuschreiben. Die Beleuchtungsstärke liegt nach der Sanierung in allen Schulen im Normbereich.

Laut einer Studie von Walerczyk (2012) wird allerdings bei gleicher Lichtfarbe bei LED-Lampen ein höherer Blauanteil wahrgenommen als bei Halogenlampen, was ein Hinweis darauf sein könnte, dass die Norm-Werte angepasst werden müssten.

Auch könnte die unterschiedliche Lichtempfindlichkeit von Personen eine Rolle spielen (licht.wissen 19 // 2014).

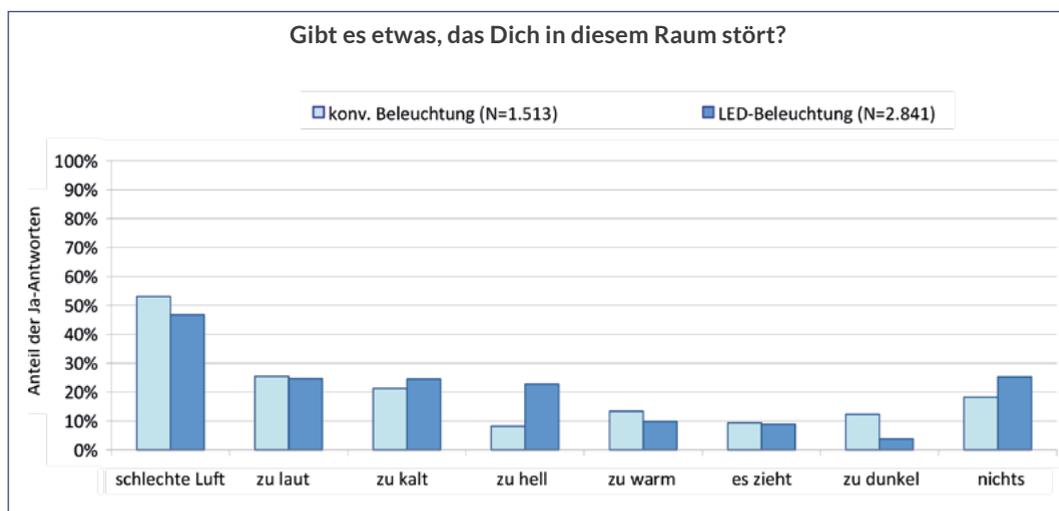


Abbildung 13 | Störfaktoren im Raum

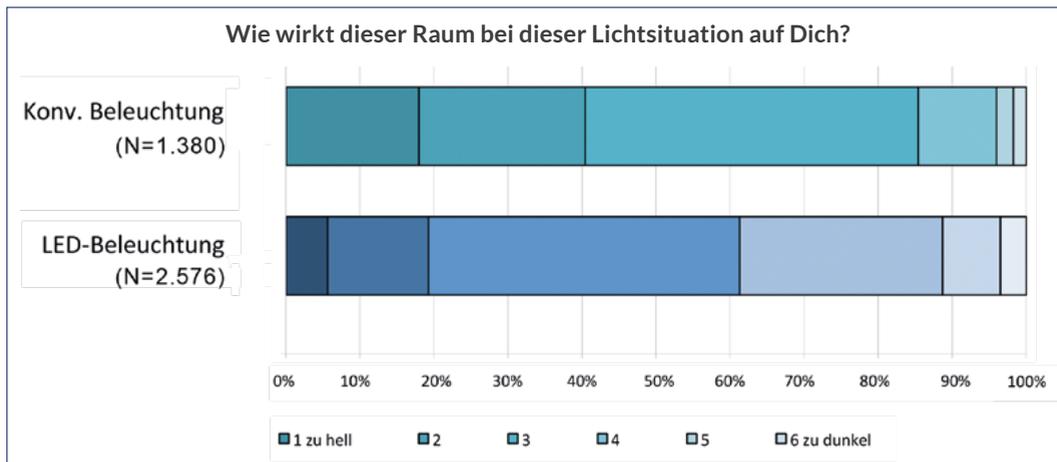


Abbildung 14 | Beurteilung der Lichtsituation zu hell/zu dunkel (jeweils 6-stufige Skala)

Fragt man die Schülerinnen und Schüler nach körperlichen Beschwerden (z. B. Müdigkeit, Kopf- oder Augenschmerzen), so unterscheiden sich die Angaben hierzu vor und nach der Sanierung nicht (Abbildung 15).

Signifikante Unterschiede (T-Test auf Mittelwertunterschiede, 95 % Signifikanzniveau) treten hinsichtlich der Konzentrationsfähigkeit auf: Schülerinnen und Schüler berichten in LED-sanierenen Klassenräumen seltener über auftretende Konzentrationsprobleme.

Dies zeigt, dass weniger das Licht, sondern viel mehr andere äußere Einflüsse die Ursache für diese Beschwerden zu sein scheinen. Der Stellenwert der Beleuchtung für die Lernatmosphäre ist nicht unbedeutend, auch wenn andere Faktoren ebenfalls eine Rolle spielen. Die größte Gruppe von Schülerinnen und Schülern (47 %) gab an, dass die Beleuchtung zwar wichtig sei, es aber wichtigere Dinge gäbe. 28 % der Befragten sahen die Beleuchtung als nebensächlich an, während 25 % sie mit als wichtigste Lernbedingung bewerteten.

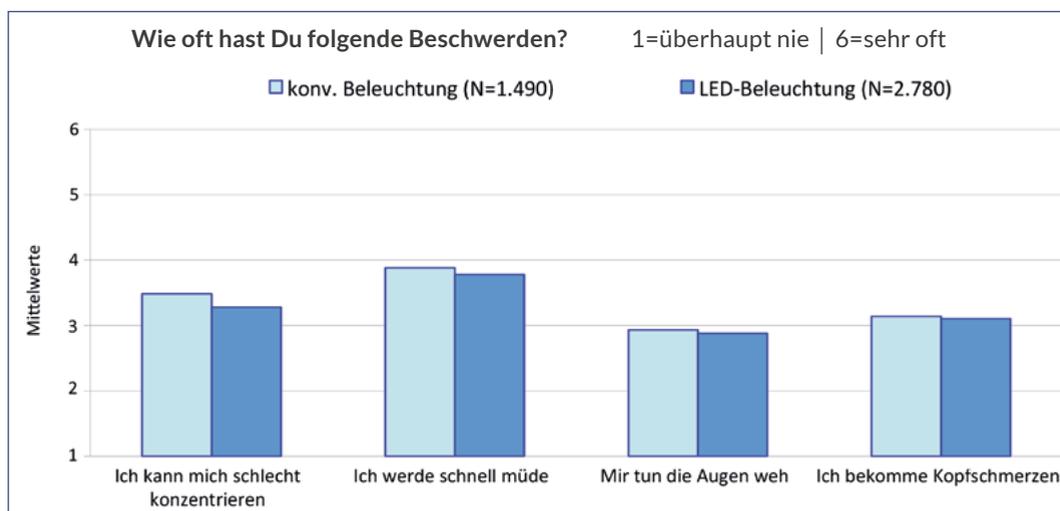


Abbildung 15 | Beschwerden im Raum

## Pädagogische Begleitkonzepte

Im Unterricht wurde nach der Sanierung in 65 % der Fälle über die LED-Beleuchtung gesprochen (Abbildung 16). Wenn darüber gesprochen wurde, wurde hauptsächlich die Energieeinsparung thematisiert, aber auch die Steuerung der Beleuchtung. Hier besteht eine Korrelation mit berichteten Problemen mit der Steuerung: Bei Tageslichtsteuerung wurde das Thema seltener thematisiert als bei Präsenzsteuerung bzw. Bewegungsmeldern. Es zeigt sich jedoch auch, dass die Thematisierung der LED-Technologie im Unterricht zu einer positiveren Gesamtbewertung der Lichtverhältnisse in der LED-Beleuchtungssituation führt (signifikante Korrelation auf dem 99 %-Signifikanzniveau, 2-seitig).

Die Einbindung des Themas LED in den Unterricht stellt die Lehrkräfte vor eine Herausforderung: ca. 90 % der Lehrkräfte gaben an, kein Lehrmaterial zum Thema LED zu kennen. Wenn sie die LED-Technologie im Unterricht besprochen haben, wurde das Lehrmaterial dazu selbst konzipiert, z. B. im Fach Physik. In seltenen Fällen waren den befragten Lehrkräften Internet-Plattformen, die das Thema LED behandeln und Material bereitstellen, bekannt (umwelt-im-unterricht.de, energie-macht-schule.de, bne-portal.de). 62 % von 115 befragten Lehrkräften äußerten Bedarf an Lehrmaterial zum Thema LED.

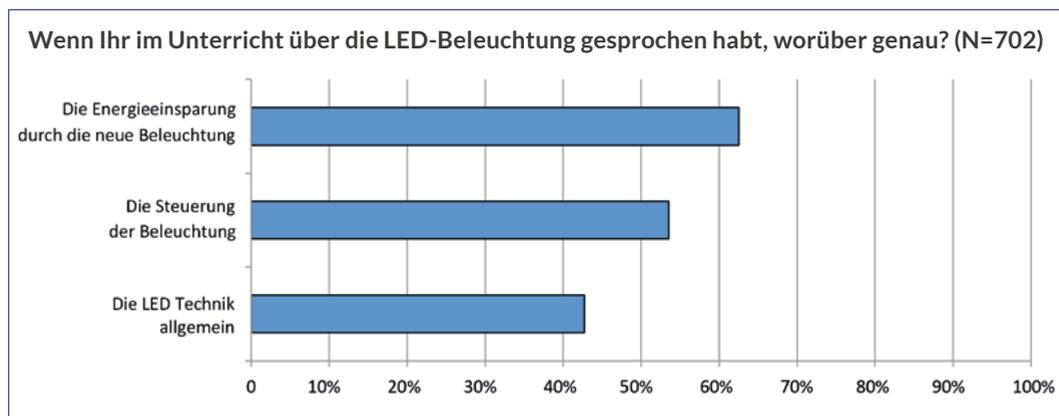
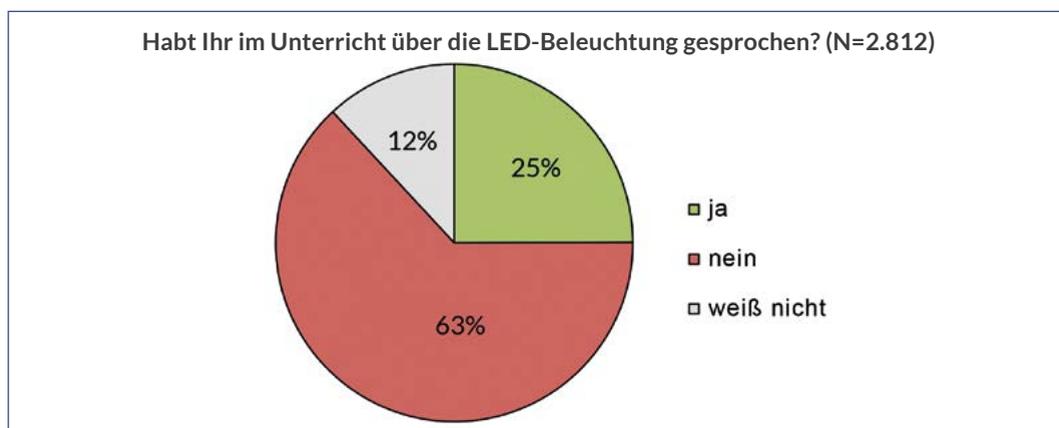


Abbildung 16 | Thema LED im Unterricht

## Energiespar-Aktivitäten in der Schule & Zuhause

Die Möglichkeiten, selbst zum Energiesparen in der Schule beitragen zu können, wurden von den meisten Schülerinnen und Schülern als sehr gering eingeschätzt. Nach der Sanierung gaben weniger Schülerinnen und Schüler als vorher an, viel zum Energiesparen beitragen zu können (25 % vs. 22 %).

In fünf Klassenräumen einer Schule konnte das Licht nach der Sanierung nicht manuell eingeschaltet werden. In diesen Klassenräumen schätzten die Schülerinnen und Schüler ihren möglichen Beitrag zum Energiesparen signifikant geringer ein als in anderen Klassenräumen (d.h. die Schülerinnen und Schüler haben einen geringeren wahrgenommenen Einfluss).

Um das Maß an Engagement der Schule in Bezug auf Energie einschätzen zu können, wurden die Lehrkräfte gefragt, welche Energiesparaktivitäten in der Schule mit Beteiligung von Schülerinnen und Schülern durchgeführt wurden oder geplant seien (Abbildung 17).

In fast allen Schulen gibt es Informationen über das Thema „Energiesparen“ und auch Energiesparmaßnahmen der Schülerinnen und Schüler werden gefördert. Seltener finden Projektstage oder Energie-Checks statt.

In ca. der Hälfte der Schulen gibt es Energiebeauftragte. In sieben Schulen fanden schon Ideenwettbewerbe statt. An fünf Schulen haben nach Angaben der Bauträger auch öffentlichkeitswirksame Aktionen zur LED-Sanierung stattgefunden.

Die Schülerinnen und Schüler wurden auch nach ihrem konkreten Energiesparverhalten in der Schule und zu Hause gefragt. Mehr als 60 % der Befragten in Räumen ohne automatische Regelung gaben an, unnötiges Licht im Klassenraum auszuschalten. Zu Hause schalten die Schülerinnen und Schüler noch häufiger unnötiges Licht aus als in der Schule. Ca. 70 % der Befragten gaben außerdem an, zu Hause gelegentlich oder oft über das Thema Energiesparen gesprochen zu haben.

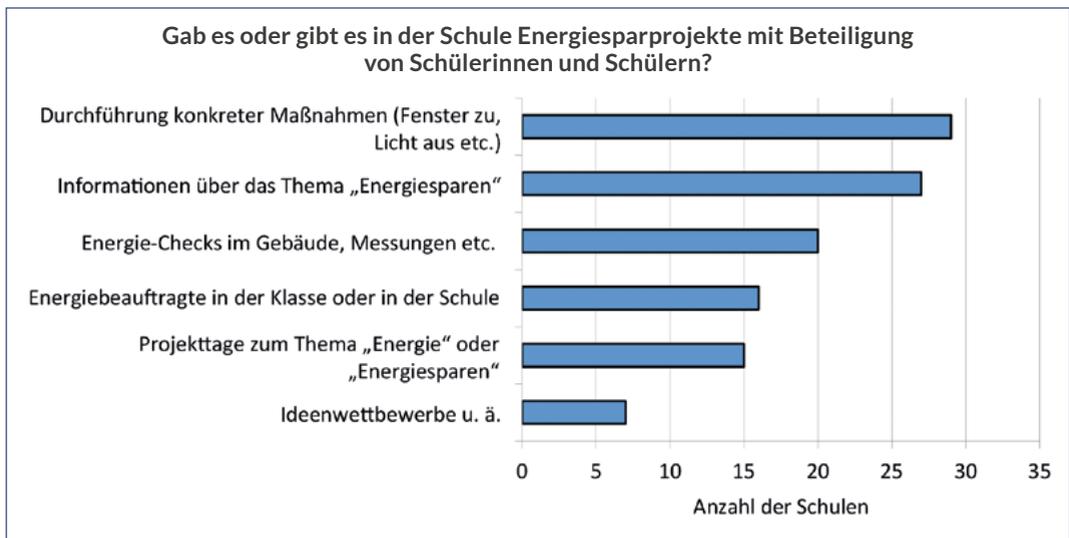


Abbildung 17 | **Energiesparprojekte in der Schule laut Angabe der Lehrkräfte (N=33)**

## Erfahrungsbericht: Berufsschule

### Sanierungsmaßnahmen LED:

13 Klassenräume, 2 Fachräume, Flure, die Aula und das Büro des Hausmeisters.  
Es wurde eine Tageslicht- und Präsenzsteuerung installiert.

Die Anzahl der Leuchten pro Raum wurde 1:1 ausgetauscht. Auf eine zusätzliche Tafelbeleuchtung, die ursprünglich vorhanden war, wurde verzichtet.

Die Schulleitung und der Hausmeister wurden in die Planung eingebunden, Lehrer- und Schülerschaft wurden informiert. Die Schulleitung und das Kollegium bekamen eine Einweisung in die Technik und Handlungsanweisungen zu energiesparendem Verhalten. Der Energieverbrauch an der Schule wird etwa monatlich kontrolliert und war schon oft Anlass für energiesparende Maßnahmen. Es ist von einer jährlichen Einsparung von ca. 35.000 kWh durch die Beleuchtungssanierung auszugehen, konkrete Ergebnisse liegen noch nicht vor.

An der Schule werden Projekte im Bereich Energiesparen und Umweltschutz durchgeführt wie z.B. Handlungsempfehlungen zum Energie-

sparen oder das handlungsorientierte Umweltprojekt ‚Internationaler Energiedetektiv‘. Auch wird die Schule an Energieeinsparungen finanziell beteiligt (Projekt „fifty-fifty“), sodass die Schülerinnen und Schüler einen Anreiz haben, sich energiesparend zu verhalten.

### Gesamtfazit des Bauträgers:

„Die Gründe für die Sanierung lagen darin, dass die veraltete Beleuchtung den Anforderungen nicht mehr genügte. Die sanierten Klassenräume waren vorher sehr düster und wirken jetzt sehr viel heller und freundlicher, obwohl nur die Beleuchtung ausgetauscht wurde. Nicht nur die Ausleuchtung der Klassenräume hat damit an Qualität gewonnen, sondern auch die Lernbedingungen insgesamt. Zusätzlich wurde die Außenwirkung der Schule verbessert. Aus Gebäudeverwaltungssicht ist die Umrüstung attraktiv, da sie sich auch aufgrund der Förderung sehr schnell amortisiert.“

### Vorbildfunktion der LED-Sanierung

Die Einführung von LED-Beleuchtung in Schulen hat Vorbildfunktion. Hier hat die Befragung gezeigt, dass die Beschäftigung mit Energiethemen im privaten Bereich durch das Projekt gefördert werden konnte, wie Abbildung 18 zeigt.

Nach der Sanierung haben 11 % der befragten Schülerinnen und Schüler offenbar schon einmal darüber nachgedacht, dass auch zu Hause LED-Lampen eingesetzt werden könnten.

61 % gaben an, dass bei der LED-Beleuchtung Energie gespart werden kann und man trotzdem

gute Lichtverhältnisse hat. Das bedeutet, dass die Kinder und Jugendlichen erfahren und erlebt haben, dass Energieeffizienz und Komfort keine Widersprüche darstellen.

Schülerinnen und Schüler in der 5. und in der 11. Klasse nehmen am ehesten die Idee mit, LED zu Hause einzusetzen. Fast 30 % von ihnen machen nach der Sanierung zu Hause öfter das Licht aus, um Energie zu sparen; diese Wirkung kann vor allem bei den Jüngeren festgestellt werden.

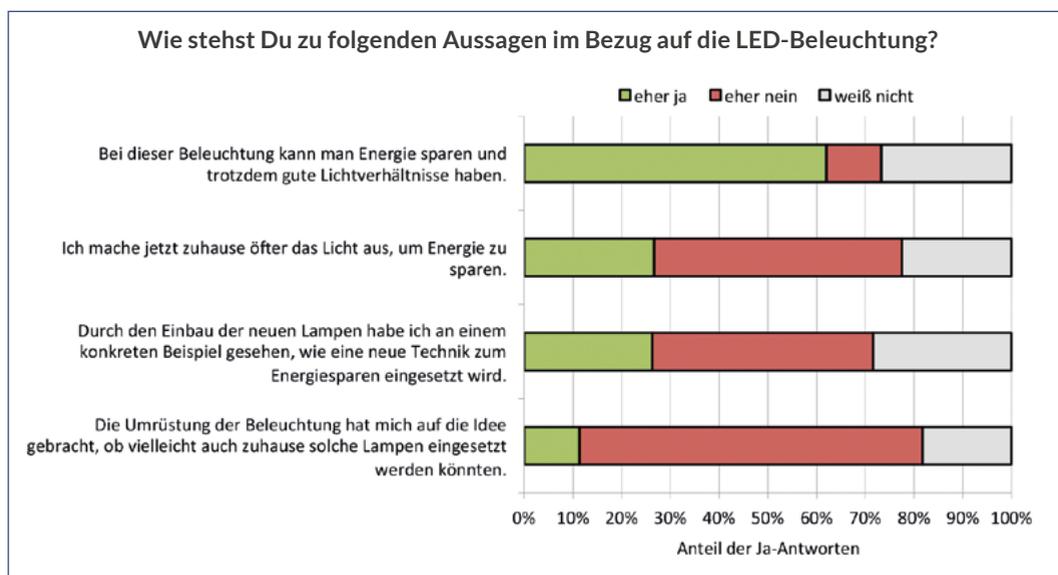


Abbildung 18 | Vorbildfunktion der LED-Sanierung (N=3.166)

## 4. Messung der Innenraumbeleuchtung

Zur Unterstützung der sozialwissenschaftlichen Begleitforschung wurden an acht ausgewählten Schulen lichttechnische Messungen vor und nach den Umrüstungen durchgeführt.

Hierfür wurde ein repräsentativer Raum pro Schule, wenn möglich, vor und nach der Umrüstung vermessen. In vier Schulen wurden Räume im Alt- und Neuzustand, welche von der Raumgeometrie und der Anordnung im Gebäude vergleichbar sind, gleichzeitig vermessen.

Die Messungen erfolgten aufgrund der besseren Vergleichbarkeit der Ergebnisse unter Ausschluss des Tageslichtes durch lichtdichtes Verdunkeln aller vorhandenen Fenster. Falls automatische Lichtsteuerungen, wie Präsenz- oder Tageslichtsteuerungen vorhanden waren, wurden diese bei den Messungen deaktiviert.

Die einzelnen Beleuchtungsanlagen wurden für die Vergleichbarkeit mit den sozialwissenschaftlichen Ergebnissen im ungewarteten Altzustand und im Neuzustand vermessen. Somit spiegeln die Messergebnisse den Zustand der Beleuchtung während der Befragungen wider.

Ein energetischer Vergleich ist dadurch nur begrenzt möglich, da in der Regel stark gealterte Leuchten und Leuchtmittel mit nahezu fabrikneuen verglichen werden würden.

Bei diesen Messungen wurden Beleuchtungsstärkemessungen nach DIN EN 12464-1:2011-08 durchgeführt. Zusätzlich zu den Beleuchtungsstärkemessungen wurden zwei ortsaufgelöste Leuchtdichtemessungen des gesamten Raumes sowie eine spektrale Messung des Lichtes zur Bestimmung der sogenannten ähnlichsten Farbtemperatur und der Farbwiedergabe in der Nutzebene durchgeführt.

Tabelle 2 gibt eine zusammenfassende Übersicht der Beleuchtungsstärkemessungen anhand der mittleren Beleuchtungsstärke  $\bar{E}$  (Norm: mindestens 300 lux) und der Gleichmäßigkeit  $g_1$  (Norm mindestens 0,6). Erkennbar ist, dass die mittlere Beleuchtungsstärke in den sanierten Räumen in der Regel deutlich höher ist als im Altzustand. Die Gleichmäßigkeit  $g_1$ , also das Verhältnis des kleinsten Wertes der Beleuchtungsstärke zum größten, ist bis auf eine Ausnahme im Neuzustand geringer als im Altzustand, teilweise liegt der Wert weit unter der Norm.

Tabelle 2 | **Ergebnisse der Beleuchtungsstärkemessungen im Alt- und Neuzustand anhand der mittleren Beleuchtungsstärke  $\bar{E}$  und der Gleichmäßigkeit  $g_1$**

Schule	Beleuchtungsstärke $\bar{E}$		Gleichmäßigkeit $g_1$	
	alt	neu	alt	neu
1	479	505	0,68	0,59
2	665	839	0,17	0,15
3	485	731	0,71	0,57
4	564	744	0,69	0,53
5	455	687	0,59	0,68
6	238	529	0,63	0,34
7	716	742	0,70	0,68
8	371	642	0,87	0,86

In allen vermessenen Räumen im Altzustand waren T8-Leuchtstoffröhren als Leuchtmittel im Einsatz. In der Regel waren immer Röhren verschiedenen Typs, unterschiedlicher Farbtemperatur und Farbwiedergabe verbaut.

Somit ergab die Beleuchtung im Altzustand selten ein homogenes Gesamtbild innerhalb der Räume. Die Vorteile eines Mehraufwands für eine individuelle anbieterneutrale Lichtberechnung und Lichtplanung für jeden Raum sollte daher bedacht werden.

Die in Tabelle 3 angegebenen Farbtemperaturen und Farbwiedergabewerte wurden jeweils in der Raummitte gemessen. Alle gemessenen Beleuchtungsanlagen lagen vor und nach der Sanierung bei der ähnlichsten Farbtemperatur im Bereich von 4000 K (Neutralweiß liegt im Bereich 3300-5300 K). Hervorzuheben ist hierbei, dass nur die Beleuchtungsanlagen von zwei Schulen im Altzustand eine Farbwiedergabe von 80 erreichten, wie es die Norm vorgibt. Die umgerüsteten Räume haben alle eine Farbwiedergabe größer 80.

Tabelle 3 | **Zusammenfassung der gemessenen ähnlichsten Farbtemperaturen und Farbwiedergabewerte im Alt- und Neuzustand**

Schule	Ähnlichste Farbtemperatur $T_{cp}$ in K		Allg. Farbwiedergabeindex CIE1974 $R_a$	
	alt	neu	alt	neu
1	4255	3962	71	85
2	3706	4085	80	86
3	3635	3851	63	83
4	3920	3888	72	83
5	4107	4035	55	84
6	3816	4127	80	83
7	3792	3958	74	81

Vor allem in Bezug auf die Gleichmäßigkeit schneiden zwei Schulen auch nach der Sanierung nicht besonders gut ab. Schaut man sich die subjektive Bewertung der Raumwirkung durch die Schülerinnen und Schüler in diesen beiden Schulen an, so zeigt sich allerdings kein Unterschied im Vergleich zu anderen Schulen. Es kann sein, dass dies je nach Sitzposition variiert, sich im Mittel jedoch ausgleicht. Die erkennbaren Verschlechterungen der Gleichmäßigkeit der LED-Beleuchtungsanlagen im Vergleich zu den ursprünglichen Beleuchtungsanlagen sind primär mit einem direkten Austausch der konventionellen Leuchten durch die neuen LED-Leuchten zu begründen. Hierbei fanden die in diesen Fällen meist unterschiedlichen Abstrahlcharakteristiken der neuen Leuchten eine zu geringe Beachtung.

Es zeigt sich, wie wichtig die Qualität der vom Hersteller zur Verfügung gestellten Planungsdaten (z. B. in Form von Lichtstärkeverteilungskurven LVKs) und eine individuell durchgeführte Lichtplanung sind. Die Planung muss an die Geometrie und die Eigenschaften der zu planenden Räume angepasst sein. Auch müssen die Zielvorgaben, wie beispielsweise die Einhaltung der Norm, im Vorfeld genau definiert werden. Die Veränderung z.B. der Positionen der Lichtauslässe in den zu sanierenden Räumen stellt sicherlich einen gewissen Mehraufwand dar, kann aber die Qualität der Beleuchtung maßgeblich beeinflussen. Eine enge Zusammenarbeit zwischen Endanwender, Planer und Hersteller ermöglicht es, problemlos auch eine höhere Beleuchtungs-Gleichmäßigkeit in Räumen mit LED-Beleuchtung zu realisieren.

## 5. Fazit der Begleitforschung der LED-Sanierung

Ein wesentliches Ergebnis der Begleitforschung ist, dass die LED-Beleuchtung im Schulalltag akzeptiert und positiv wahrgenommen wird. Schülerinnen und Schüler sowie Lehrkräfte bewerteten die Lichtverhältnisse und die Raumwirkung nach der Sanierung um fast eine Note besser als vor der Sanierung („gut“ vs. „befriedigend“). Es wurden keine Beschwerden geäußert, die auf die Beleuchtung zurückzuführen sind; vielmehr wurde bekräftigt, dass die LED-Beleuchtung die Lernatmosphäre und den Raumkomfort wesentlich verbessert. Fast die Hälfte der befragten Schülerinnen und Schüler bewertete die neue Beleuchtung allerdings tendenziell als „zu hell“. Diese Wahrnehmung kann zum einen damit erklärt werden, dass die Beleuchtungsstärke im Vergleich zur veralteten Beleuchtung zuvor tatsächlich zugenommen hat, jedoch im Normbereich liegt. Allerdings weisen Studien daraufhin, dass LED-Licht heller wahrgenommen wird als herkömmliches Licht und daher die vorgegebenen Norm-Werte eventuell überdacht werden müssen. Die Ergebnisse decken sich mit anderen Schulbefragungen, z. B. mit dem Pilotprojekt Schulzentrum Mäusheckerweg, Trier, im Rahmen des Wettbewerbs „Kommunen in neuem Licht“ (gefördert vom BMBF) und dem Projekt „EnEff:Schule“ (gefördert vom BMWi).

Fördermaßnahmen für Bildungsgebäude haben aufgrund ihrer pädagogischen Relevanz eine hohe Bedeutung für die Zukunft des Klimaschutzes. Es zeigt sich, dass die durchgeführten Sanierungsmaßnahmen in der Schule Vorbildcharakter haben und die Kinder und Jugendlichen lernen, dass man Strom sparen und trotzdem gute Lichtverhältnisse haben kann. Die Schülerinnen und Schüler haben erfahren und erlebt, dass Energieeffizienz und Komfort keinen Widerspruch darstellen. Der tägliche Umgang mit der neuen LED-Technologie verankert diese Erfahrung zusätzlich. Damit ergeben sich aus der Fördermaßnahme nicht nur praktische Energie- und CO<sub>2</sub>-Einsparungen, sondern auch eine theoretische Beschäftigung der Schülerinnen und Schüler mit dem Thema (LED-)Beleuchtung und energiespa-

rendem Verhalten. Die Kommunalrichtlinie ist somit nicht nur kurzfristig erfolgreich, sondern auch nachhaltig und in der Breite wirksam.

Die Thematisierung der LED-Beleuchtung im Schulunterricht wirkt sich positiv auf deren Akzeptanz aus. Doch trotz der unmittelbaren Alltagserfahrung mit LED durch die Sanierung wird das Thema im Unterricht nur selten aufgegriffen. Die Lehrkräfte äußern hier einen Bedarf an unterstützendem Lehrmaterial, um das Potenzial der Sanierung als Unterrichtsthema voll ausschöpfen zu können. Aus diesem Grund wurde in einem parallel laufenden Projekt gemeinsam mit dem Unabhängigen Institut für Umweltfragen (UfU e.V.) Lehrmaterial zu verschiedenen Aspekten der LED-Beleuchtung erarbeitet, das über die technischen Details hinausgeht und einen Alltagsbezug aufweist.

Wie die messtechnische Untersuchung zeigte, ist für eine gute Beleuchtungsqualität bei gleichzeitiger Energieeinsparung eine sehr sorgfältige Lichtplanung entscheidend. Diese Ziele sollten einen planerischen Mehraufwand, der durch die individuelle Lichtberechnung für jeden Raum entsteht, rechtfertigen. Die jeweiligen Bauträger äußerten sich zufrieden mit der Fördermaßnahme und nehmen diese als Anlass für weitere energieeffiziente Sanierungsmaßnahmen.

Die vorliegende Studie zeigt den Erfolg der Beleuchtungssanierung. Zunehmend wird der Raum als „dritter Pädagoge“ wahrgenommen, der das Unterrichtsgeschehen und die Aufenthaltsqualität unterstützen kann. Zu einer guten Lernumgebung tragen neben einer hohen Luftqualität, Einflussmöglichkeiten der Nutzerinnen und Nutzer auf das Raumklima und akustischem Komfort auch eine optimale Beleuchtung bei. In Zukunft sollten Sanierungsansätze integral gedacht werden mit umfassenden Maßnahmen, die in einem partizipativen Ansatz bereits in der Planung alle beteiligten Nutzergruppen einbinden.



## 6. Literatur

AMEV (2012).

**Beleuchtung 2011. Hinweise für die Innenraumbeleuchtung mit künstlichem Licht in öffentlichen Gebäuden.** Broschüre Nr. 114.

Baruch, Y. und Holtom, B. C. (2008).

**Survey response rate levels and trends in organizational research.**

In: Human Relations 61(8). S. 1139–1160.

DIN EN 12464-1:2011-08.

**Licht und Beleuchtung – Beleuchtung von Arbeitsstätten – Teil 1: Arbeitsstätten in Innenräumen.**

(Vorgaben für Unterrichtsräume ) Deutsche Fassung.

Khanh, T.; Böll, M.; Pepler, W. (2012).

**LED-Technologie - Stand der Technik, Lichtqualität und ihre Wirkung auf die Innenraumbeleuchtung.**

In: Licht und Raum (1|2012) S. 44-47.

licht.wissen 02 (2012).

**Besser Lernen mit gutem Licht.**

Freier Download auf [www.licht.de](http://www.licht.de)

licht.wissen 19 (2014).

**Wirkung des Lichts auf den Menschen.**

Freier Download auf [www.licht.de](http://www.licht.de)

Pepler, W; Schiller, C.; Khanh, T. (2013).

**Kommunen in neuem Licht. Praxiserfahrungen zur LED in der kommunalen Beleuchtung.** Endbericht.

Schlomann, B.; Wolfarth, K.; Kleeberger, H.; Hardi, L.; Geiger, B.; Pich, A.; Gruber, E.; Gerspacher, A.; Holländer, E.; Roser, A. (2015).

**Energieverbrauch des Sektors Gewerbe, Handel, Dienstleistungen (GHD) in Deutschland für die Jahre 2011 bis 2013.**

Endbericht.

Walerczyk, S. (2012).

**Human Centric Lighting.**

In: Architectural SSL 06.12. S. 20-26.



# Impressum

## Bearbeitung

M.A. Edith Holländer (IREES)  
B.A. Karin Schakib-Ekbatan (IREES)  
Dr. Annette Roser (IREES)  
Prof. Dr. Khanh (TU Darmstadt)  
Dipl.-Phys. Max Wagner (TU Darmstadt)  
Andreas Groh (Photometrik)

GEFÖRDERT VOM



## Kontakt

### Institut für Ressourceneffizienz und Energiestrategien (IREES)

Schönfeldstraße 8, 76131 Karlsruhe  
Tel.: 0721 / 915 26 36-33, Fax: 0721 / 915 26 36-11  
E-Mail: [info@irees.de](mailto:info@irees.de)  
[www.irees.de](http://www.irees.de)

### Technische Universität Darmstadt, Fachgebiet Lichttechnik

Hochschulstraße 4a, 64289 Darmstadt  
Tel.: 06151 / 16-6142, Fax: 06151 / 16-5468  
E-Mail: [office@lichttechnik.tu-darmstadt.de](mailto:office@lichttechnik.tu-darmstadt.de)  
[www.lichttechnik.tu-darmstadt.de](http://www.lichttechnik.tu-darmstadt.de)

## Grafikdesign

Sybille Schleicher KommunikationsDesign

## Titelbild

Stadtverwaltung Trier, GWT

## Bildarchiv

Fotolia.com

August 2015 Karlsruhe