



High Brightness vs. High Power

Was unterscheidet die **technischen
Lichtquellen** von lightsource.tech
von **anderen Lichtquellen**?

High Brightness vs. High Power

Was unterscheidet die technischen Lichtquellen von lightsource.tech von anderen Lichtquellen?

Die moderne LED-Technologie liefert für das tägliche Leben bereits sehr leistungsstarke Lichtquellen. Die Vorteile gegenüber thermischen Lichtquellen, wie z.B. Halogenlampen, liegen auf der Hand: kompakte Bauform, hohe Energieeffizienz, variables Farbspektrum, hohe optische Ausgangsleistung und lange Lebensdauer.

In vielen **technischen Anwendungen** kommt es jedoch zusätzlich noch auf eine hohe Leuchtdichte bzw. eine möglichst punktförmige Quelle an. Für solche Zwecke wurden bisher häufig Hochdrucklampen verwendet, bei denen eine elektrische Gasentladung einen Lichtbogen erzeugt. Der Betrieb von Hochdrucklampen ist technisch sehr anspruchsvoll und verursacht hohe Betriebskosten. Auch hier liefert die Photonik zunehmend Alternativen, die auf LED- oder Laser-Technologie basieren, und übertrifft dabei bisherige Lösungen in Hinblick auf Lebensdauer und Energieeffizienz deutlich.



Wir werden in diesem Whitepaper untersuchen, was es mit der Leuchtdichte auf sich hat und worin sich hohe Leuchtdichte (High Brightness) und hohe Leistung (High Power) unterscheiden.¹

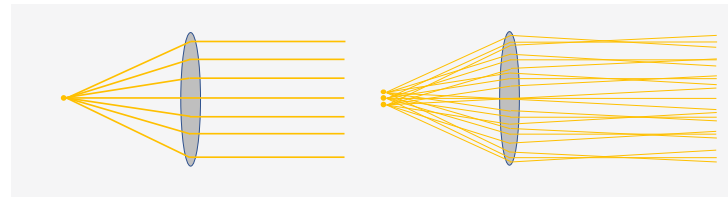
1. Grundproblem: ausgedehnte Lichtquellen

Eine reale Lichtquelle wie eine LED, aber auch ein einzelnes fluoreszierendes Molekül, ist niemals wirklich punktförmig, sondern hat eine gewisse Ausdehnung. Der gesamte optische Lichtstrom (engl. „luminous flux“) entsteht also auf der ausgedehnten Fläche der Lichtquelle. Wird der gleiche Lichtstrom auf einer kleineren Fläche erzeugt, steigt die spezifische Lichtausstrahlung (engl. „luminous exitance“: Lichtstrom pro Emitterfläche).

Das abgestrahlte Licht verteilt sich, je nach Art der Quelle, in einem bestimmten Raumwinkel und erzeugt dadurch die **Lichtstärke** (engl. „luminous intensity“: Lichtstrom pro Raumwinkel). Je gerichteter die Abstrahlung, desto mehr Licht fällt in einen kleineren Raumwinkel und desto größer die Lichtstärke.

Die **Leuchtdichte** (engl. „luminance“: Lumen pro Emitterfläche und Raumwinkel) kombiniert die spezifische Lichtausstrahlung mit der Richtcharakteristik der Quelle.

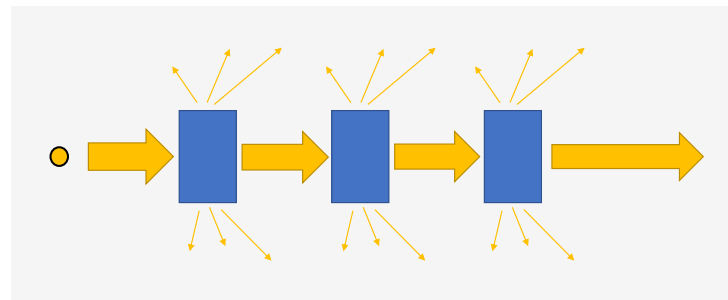
Wir wollen nun das Licht von zwei Lichtquellen mit gleichem Lichtstrom, aber unterschiedlicher Leuchtdichte mithilfe einer Linse bündeln (kollimieren).



Links ist schematisch eine Quelle mit hoher Leuchtdichte dargestellt, das Licht stammt aus einer kleinen Fläche. Das Licht lässt sich gut bündeln, die Lichtstrahlen verlassen die Linse parallel und mit geringer Divergenz. **Rechts** hingegen entsteht das Licht auf einer größeren Fläche (dargestellt durch 3 leuchtende Punkte), die Lichtstrahlen verlassen die Linse unter verschiedenen Winkeln (hohe Divergenz) und laufen mit zunehmendem Abstand immer weiter auseinander.

Die Divergenz des Lichts, die so bei ausgedehnten Quellen entsteht, kann zwar prinzipiell durch eine größere Linse mit entsprechend vergrößerter Brennweite kompensiert werden. Allerdings wächst dabei – neben Gewicht und Preis der Optik – auch der Durchmesser des kollimierten Lichtstrahls.

In realen optischen Systemen kann daher jeder Verarbeitungsschritt (in unserem Schema als blaue Kästen dargestellt) normalerweise nur einen bestimmten Anteil des Lichts nutzen. Der Rest wird gestreut, geblockt oder absorbiert.



✓ Optische Verarbeitungsschritte können sein:

- Einsammeln und Bündeln des Lichts durch Linsen
- Lichtstrahlführung über Spiegel oder Glasfasern
- Untersuchung der optischen Transmission einer Flüssigkeit in einer Küvette
- spektrale Zerlegung in einem Spektrometer
- Fokussierung des Lichts auf einen Sensor

¹ In diesem Whitepaper behandeln wir nur inkohärente Lichtquellen, die je nach Technologie durchaus lasergepumpt sein können. Die sehr speziellen Eigenschaften von Lasern als solche würden den Umfang des Whitepapers übersteigen.

Vom anfänglich abgestrahlten Licht kommt daher am Ende der Kette nur ein Bruchteil als Nutzlicht an. Wieviel das theoretisch sein kann, beschreibt die Größe **Étendue** (Fläche*Raumwinkel; dt. „Lichtleitwert“, engl. „throughput“). Je ausgebreiteter die Lichtverteilung in Fläche und Richtung, desto größer die Étendue.

Die Étendue entspricht dem Nenner in der Definition der Leuchtdichte. Es ist oft gar nicht nötig, den Zahlenwert der Étendue auszurechnen: Insbesondere als Konzept, das man während der Auslegung einer Optik im Auge behält, erweist sich die Étendue als nützlich.

→ **Grundsatz: Die Étendue lässt sich ohne Verlust nicht verkleinern.** Grob gesagt: Einmal „verschmiertes“ Licht kann nicht wieder eingesammelt werden.

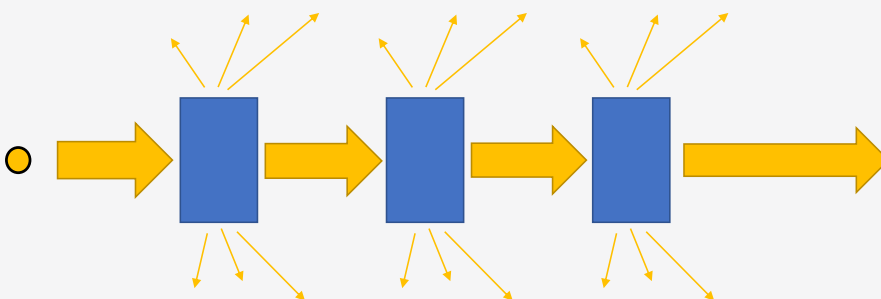
→ Das bedeutet: Die kleinste Étendue im Gesamtsystem begrenzt den maximal möglichen Lichtdurchsatz.

→ Daraus folgt: Eine stärkere, aber dafür größere Lampe ist oft keine Lösung für ein Beleuchtungsproblem.

✓ Lösung: eine höhere Leuchtdichte

Abhilfe schafft in so einem Fall die Vergrößerung der Leuchtdichte. Denn bei einer kleineren Lichtquelle, die aber über dieselbe optische Abstrahlungsleistung in der gewünschten Richtung verfügt, sind die Verluste während der Verarbeitungsschritte kleiner.

Damit ist der Anteil an letztendlichem Nutzlicht deutlich höher:



✓ viel Licht bei kleiner Étendue, also eine hohe Leuchtdichte, ist ein Qualitätsmerkmal einer Lichtquelle. Eine Lichtquelle mit kleiner Étendue erlaubt kompaktere und bessere Lösungen.

David gegen Goliath: ein Vergleich

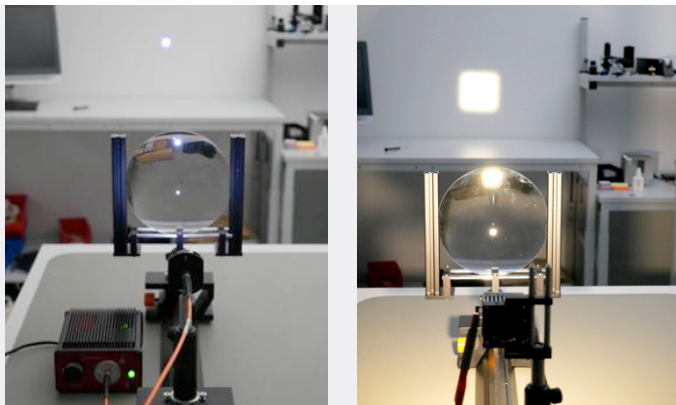
Vergleichen wir nun eine große High-Power-Weißlicht-LED mit dem emittierenden Faserende der **lightsource.tech LS-WL1**. Beide Lichtquellen basieren auf demselben physikalischen Konzept: Blaues Primärlicht wird mittels Konverter-Material (aus historischen Gründen als „Phosphor“ bezeichnet) teilweise in „weißes“ Fluoreszenzlicht umgewandelt. Der Unterschied liegt in der Anregungsquelle: bei der LED sind es blaue LEDs, bei der LS-WL1 zwei blaue Laser, deren Licht auf den Konverter fokussiert wird.



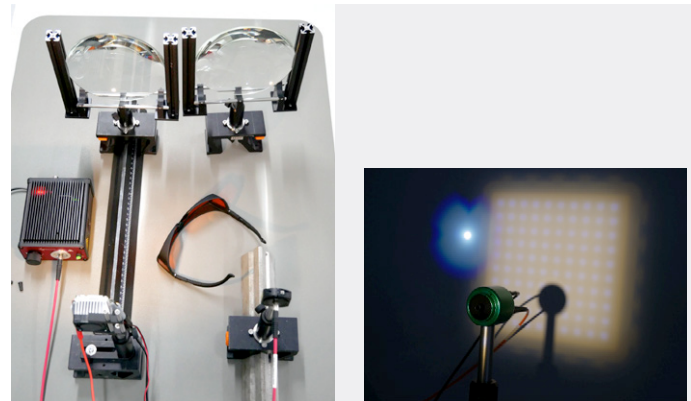
Links 100W LED, rechts LS-WL1 mit Lichtleiter

	High Power: 100-Watt-LED	High Brightness: LS-WL1 (1000-μm-Faser, NA 0.39)
Technologie	Blau emittierendes LED-Array mit Konverter-Phosphor	Blaue Anregungslaser mit Konverter-Phosphor, fasergekoppelt
Optische Abstrahlleistung	25 W	0.27 W
Lichtstrom gesamt	8400 lm	100 lm
Aktive Fläche	25 mm * 25 mm = 625 mm ²	ca. 0.79 mm ²
Abstrahlcharakteristik	Lambertscher Strahler	gerichtet, NA 0.39
Spezifische Abstrahlung	13.44 lm/mm ²	126.6 lm/mm ²
Lichtstärke (senkrecht)	2674 lm/sr	200 lm/sr geschätzt ²
Leuchtdichte	4.3 lm/(sr*mm ²)	253 lm/(sr*mm ²)

Wie in der Tabelle ersichtlich wird, erzeugt die 100-Watt-LED ein Vielfaches an Lichtstrom. Geht es nur darum, eine Wand zu beleuchten, ist diese High-Power-LED also die richtige Wahl. Andererseits ist die Leuchtdichte der LS-WL1 um mehr als den Faktor 50 höher. Soll das Licht beispielsweise auf ein Objekt in größerer Entfernung konzentriert werden, sollte dies von Vorteil sein:



Licht aus einer High-Brightness-LS-WL1 (links) und einer High-Power-LED (rechts) wird mittels einer plankonvexen Linse ($f=330$ mm, $D=150$ mm) bestmöglich auf eine Wand in ca. 3 m Entfernung konzentriert. Die optische Abbildung führt zwangsläufig zu einer Vergrößerung des Lichtflecks. Dadurch wird das von der Linse gesammelte Licht der High-Power-LED auf eine große Fläche verteilt. Die High-Brightness-Quelle mit ihrer sehr kleinen Ausdehnung (Faserende) erlaubt es demgegenüber, das Licht auf einen zwar ebenso vergrößerten, aber immer noch sehr kleinen Fleck zu konzentrieren.



Links: Beide Quellen leuchten in diesem Experiment gleichzeitig. Rechts: an der Wand in 3 m Entfernung erkennt man das extrem helle Bild des Lichtleiters der High-Brightness-Quelle sowie einen Schattenwurf der Linshalterung. Die Lichtverteilung der High-Power-LED zeigt das Array der primären blauen Anregungs-LEDs, eingebettet in ein Konverter-Material (dessen „warm white“-Farbtemperatur anwendungsbedingt deutlich niedriger ist als beim Konverter-Material der High-Brightness-Quelle). Auf dem Bild ist auch die kleine Ulbricht-Kugel (Artifex, spektral leistungskalibriert) zu erkennen, mit der die Messungen durchgeführt wurden. Die Öffnung der Kugel hat einen Durchmesser von 3.5 mm.

Die Sammellinse in unserem Aufbau (Raumwinkel ca. 0.13 sr) kann aufgrund der Lambertschen Abstrahlcharakteristik der LED nur ca. 4 % des gesamten Lichtstroms, also ca. 330 lm nutzen. Demgegenüber sammelt die Linse ca. 25 % des Lichtstroms der LS-WL1 ein, also ca. 25 lm.

² Die Lichtverteilung über den Aperturwinkel wird hier als konstant angenommen.

In unserem einfachen Versuchsaufbau messen wir an der Wand (bzw. auf dem „Objekt“) in 3 m Abstand eine **20-fach höhere Leuchtdichte für die LS-WL1**.

Fazit: Trotz eines wesentlich geringeren Lichtstroms erzeugt die hohe Leuchtdichte der LS-WL1 einen vielfach helleren Lichtfleck am Objekt. Das Licht lässt sich aufgrund der nahezu punktförmigen Quelle optimal bündeln und konzentrieren.

3. In diesen Fällen sind High-Brightness-Lichtquellen von Vorteil

- **Machine Vision mit hohen Frameraten**

Industrielle Qualitätskontrolle arbeitet heute vielfach mit automatisierten Bildverarbeitungssystemen. Sehr hohe Bildraten und damit einhergehende sehr kurze Belichtungszeiten erfordern starke punktuelle Beleuchtung, u.U. in Kombination mit Pulsbetrieb.

- **Bio-, Mikro-, Nano-, Halbleitertechnologie**

Mikroskopische Beobachtung benötigt viel Licht auf kleinen Objekten. Hierfür muss das Licht von der Quelle zugeführt, häufig spektral gefiltert und unter Beachtung der optimalen Beleuchtungsbedingungen, z.B. mittels Köhler-Kondensor, auf das Objekt gebracht werden. Neben der verlustarmen Strahlführung erfordert allein schon die geringe Ausdehnung des Objekts – bei einem typischen 100x-Objektiv ist das Beobachtungsfeld nur 1/10 mm groß – eine hohe Leuchtdichte der Quelle.



Abb. 1³

- **Gezielte Beleuchtung auf große Entfernungen**

Bei einem Suchscheinwerfer muss das Licht möglichst konzentriert auf ein weit entferntes Objekt geworfen werden. Je größer die Quelle, desto größer muss auch die Optik ausfallen, um das Licht gut kollimieren zu können. Eine kleinere Lichtquelle mit hoher Leuchtdichte erlaubt es daher, dieselbe Objektbeleuchtung mit einer kleineren (und damit auch günstigeren) Optik zu realisieren.



Abb. 2 Suchscheinwerfer auf einem historischen Kriegsschiff⁴

→ Im technischen Kontext besteht eine vergleichbare Aufgabe in der optischen Prüfung von weit entfernt liegenden Objekten auf einem Förderband innerhalb eines Produktionsprozesses.

- **Homogene Beleuchtung**

Manchmal muss eine Fläche nicht nur überall möglichst homogen, sondern auch mit der gleichen Winkelverteilung beleuchtet werden. So weisen beispielsweise viele optische Sensoren eine Richtcharakteristik auf. Bei einem Array solcher Sensoren (z.B. ein Kamerasensor) muss in der Qualitätskontrolle jedes einzelne Element das gleiche Licht sehen. Bei der hochgenauen Vermessung dichroitischer Farbfilter würden Abweichungen in den Strahlwinkeln ebenfalls zu Messfehlern führen.

→ Punktförmige Lichtquellen erlauben es zusammen mit speziellen optischen Elementen wie dem **Homogenisierer** von lightsource.tech, die erforderlichen, sehr gleichmäßig ausgeleuchteten und trotzdem hellen Lichtfelder zu erzeugen.

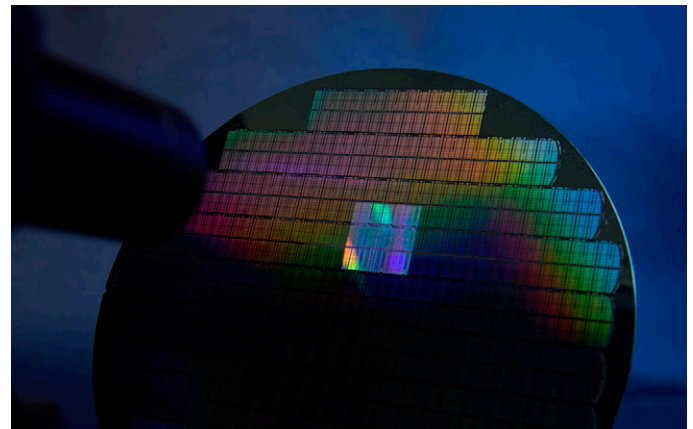


Bild: in vielen messtechnischen Anwendungen ist eine sehr gleichmäßige Ausleuchtung des Messfeldes erforderlich.

- **Spektroskopie**

Die Auflösung der meisten Spektrometer-Systeme hängt von der Breite des Eingangsspalt ab: Je schmaler der Spalt, desto besser können nah beieinanderliegende spektrale Banden getrennt werden. Mit einer leuchtstarken Lichtquelle wie der LS-WL1 kann möglichst viel Licht des analysierten Objekts eingefangen und ohne Verlust in den Eingangsspalt transportiert werden. Dadurch werden schnellere und bessere Messungen in vielen Anwendungen realisiert.

³ Quelle: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Patch-clamp_forge_Close-up.jpg

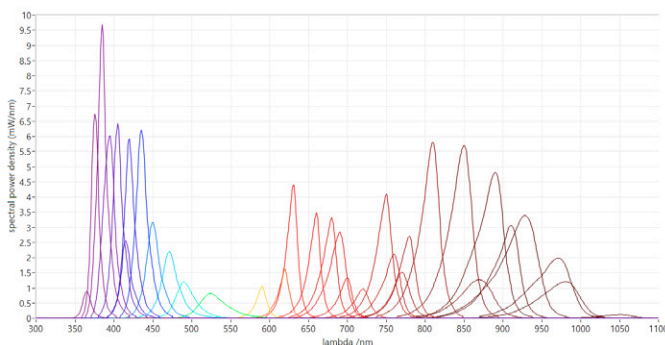
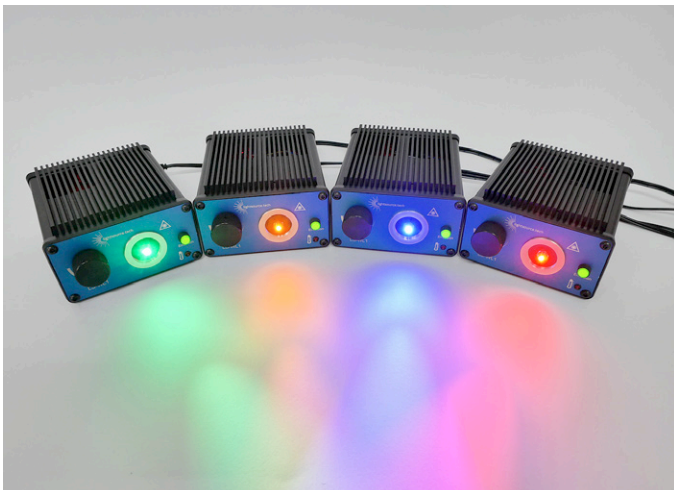
⁴ Quelle: [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Searchlight_ aboard_USS_Missouri_\(BB-63\)_02_in_1944.jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Searchlight_ aboard_USS_Missouri_(BB-63)_02_in_1944.jpg)

4. Beispiele für moderne High-Brightness-Lichtquellen

- **Einzelwellenlängen-LEDs als High-Brightness-Lichtquellen**

Als erstes Beispiel für moderne High-Brightness-Lichtquellen ist die primäre LED-Technologie selbst zu nennen. Deren Effizienz konnte in den letzten Jahren derart gesteigert werden, dass sie für viele Zwecke schon für sich genommen als High-Brightness-Lichtquelle eingesetzt werden kann. Insbesondere monochrome LEDs erreichen für bestimmte Wellenlängen sehr hohe Leuchtdichten.

→ **Die LS-MC1 von lightsource.tech** ist eine monochrome, fasergekoppelte LED und bietet eine große Auswahl von Wellenlängen vom nahen UV bis ins NIR. Durch geeignete Y-Fasern können mehrere Wellenlängen kombiniert werden.



Bildunterschrift: Verfügbare Wellenlängen der LS-MC1

Mehrere solcher LEDs können auch mittels dichroitischer Filter miteinander kombiniert werden und somit üblicherweise drei bis sechs schmalbandige Bereiche zu einer Lichtquelle zusammengefasst werden. Diese Quellen finden beispielsweise in der Fluoreszenz-Mikroskopie häufig Anwendung.

- **Breitbandige High-Brightness-LED**

Auch die breitbandige Konversion mit Konverter-Phosphoren in Kombination mit extrem hellen, blauen Anregungs-LEDs ist mittlerweile so effizient, dass High-Brightness-LEDs realisiert werden können. Weißlicht-LEDs basierend auf diesem Konzept sind zur allgemeinen Beleuchtung allgegenwärtig. Naturgemäß liegt hier der Schwerpunkt auf dem sichtbaren Spektralbereich.

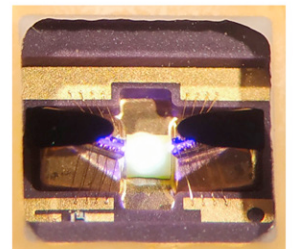
→ lightsource.tech bietet mit der LS-BB1 eine Lichtquelle an, die mit dieser Technologie ein VIS-NIR Spektrum bis zu 900 nm erzeugt. Die Leuchtdichte liegt dabei weit über der von Wolfram- bzw. Halogenlampen. Die LS-BB1 ist damit eine flexible, leuchtstarke Lichtquelle für viele spektroskopische Anwendungen.

- **Lasergepumpte Konversion**

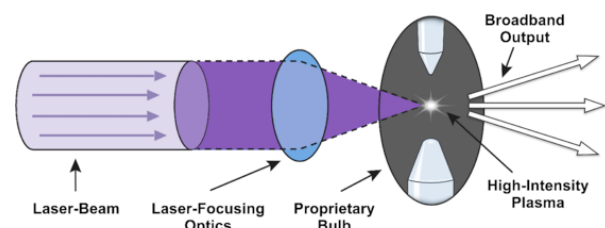
Eng verwandt mit der Weißlicht- und Breitband-LED-Technologie ist die Erzeugung von Weißlicht über die lasergepumpte Konversion. Der wesentliche Unterschied besteht in der besseren Fokussierung des blauen Anregungslichts und damit in einer weiteren drastischen Erhöhung der Leuchtdichte. Diese Technologie steht seit Kurzem auch als hochintegrierte System-on-Chip-Lösung zur Verfügung, sodass kompakte Lichtquellen konstruiert werden können.

Die oben vorgestellte fasergekoppelte **LS-WL1** basiert auf dieser Technologie und liefert eine extreme Leuchtdichte bei kleinen Lichtleiter-Kerndurchmessern.

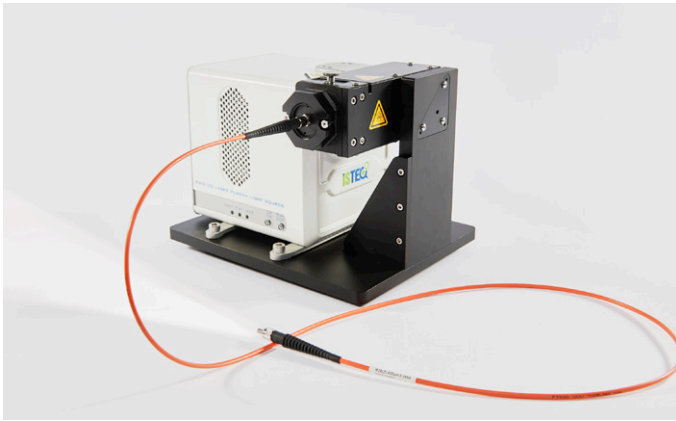
Ein besonders breitbandiges Spektrum kann mit lasergepumpten Xenon-Lampen erzeugt werden. Hierbei erzeugt ein infraroter, fokussierter Laserstrahl eine sehr heiße Plasmakugel. Das so entstandene Licht reicht vom tiefen UV (< 200 nm) bis ins NIR (> 2000 nm), sodass diese Lichtquellen besonders für die Spektroskopie geeignet sind.



Lasergepumpte Konversion als System-on-Chip (Kyocera SLD Laser, Inc.): rechts & links Laser (450nm), in der Mitte der Konverter-Phosphor, Größe ca. 1x1mm²



© Energetiq Technology, Inc



→ lightsource.tech hat für die auf dieser Technologie basierenden Lichtquellen EQ99-X von Energetiq und XWS-30 von ISTEQ einen speziellen achromatischen **Faserkoppler** entwickelt, der dieses **Licht bequem und effizient in die Anwendung bringt**.

- **Supercontinuum-Lichtquellen**

Zuletzt sind noch Supercontinuum-Lichtquellen zu benennen. Hierbei handelt es sich um faserbasierte Lasersysteme, bei denen durch nichtlineare Effekte ein sehr breites Spektrum erzeugt wird. Das Spektrum ist weitgehend kontinuierlich und reicht bis ins IR, die Leuchtdichte und die spektrale Leistungsdicht können dabei sehr hoch sein. Nachteilig ist für einige Anwendungen der gepulste Betrieb (einige 10 MHz) und der starke Leistungsabfall in Richtung blau und UV.

5. Messgrößen und Einheiten

Lichttechnische Messgrößen sorgen häufig für Verwirrung. Das liegt zum einen an ihrer Anzahl (für viele Situationen gibt es eine eigene Messgröße), an ihrer sprachlichen Mehrdeutigkeit und an der Anwendung zweier paralleler Messsysteme, den photometrischen und radiometrischen Messgrößen.

- **Photometrische Messgrößen**

In der praktischen Anwendung sichtbaren Lichts werden **photometrische** Messgrößen verwendet. Diese basieren auf der spektralen Empfindlichkeitskurve des menschlichen Auges (Hellempfindlichkeitskurve). Den Symbolen für die Messgrößen wird daher gerne ein „v“ (für visuell) angefügt.

→ Die Basiseinheit ist das **Lumen (lm)** als Maß des (sichtbaren) **Lichtstroms** (engl. „luminous flux“), also der Lichtmenge, die von einer Quelle insgesamt abgegeben wird. Diese Angabe kennt man auch von Leuchtmitteln aus dem Alltagsgebrauch.

→ Daraus abgeleitet wird die **Lichtstärke** (engl. „luminous intensity“) als Maß für den Lichtstrom in einen gewissen Raumwinkel. Die Lichtstärke beinhaltet also auch die Richtcharakteristik einer Quelle, die Einheit ist die Candela ($\text{cd} = \text{lm}/\text{sr}$).

→ **Die Leuchtdichte** (engl. „luminance“) schließlich berücksichtigt auch die Fläche der Lichtquelle, daher ist die Einheit cd/m^2 .

Eine Lichtquelle erzeugt einen Lichtstrom in die Pupille des Auges (die Pupille definiert also einen gewissen Raumwinkel). Das Auge entwirft auf der Netzhaut ein Bild der Quelle. Dieses Bild ist klein und hell für eine kleine Quelle mit hoher Leuchtdichte, größer und dunkler für eine große Quelle mit geringerer Leuchtdichte. **Die Leuchtdichte entspricht also unmittelbar der wahrnehmbaren Helligkeit, bzw. Brightness.**

- **Radiometrische Messgrößen**

Für die Beschreibung jeglicher Strahlung, also auch für sichtbares und unsichtbares Licht im UV- oder IR-Bereich, werden radiometrische Messgrößen verwendet. Diese basieren auf rein physikalischen Grundeinheiten, also letztlich auf der Energie der Photonen.

Jeder radiometrischen Größe kann man eine – für den Menschen gewichtete – photometrische Größe gegenüberstellen. Das photometrische System weist daher die Kuriosität auf, dass der Lichtstrom einer starken, unsichtbaren UV-LED null Lumen beträgt. Andererseits erlaubt das photometrische System eine Vergleichbarkeit in der Helligkeitswahrnehmung verschiedenfarbiger Quellen. Für technische Zwecke, z.B. bei der Verwendung von Kameras, hat das radiometrische System Vorteile.

Wichtige lichttechnische Einheiten: ⁵

Photometrie		Symbol	Radiometrie	
Lichtstrom <i>luminous flux</i>	lm Lumen	Φ_v / Φ	Strahlungsleistung <i>radiant flux/power</i>	W Watt
Lichtstärke <i>luminous intensity</i>	cd=lm/sr Candela	I_v / I	Strahlstärke <i>radiant intensity</i>	W/sr
Leuchtdichte <i>luminance</i>	cd/m ²	L_v / L	Strahldichte <i>Radianz, radiance</i>	W/(m ² sr)

Ihr Kontakt zu Lightsource:

+49 (0) 551/270765-0
info@lightsource.tech



Dr. Dirk Hönig (links) – Fachbereiche: Optische Technologien, Software, Elektronik

Dr. Jan Thirase (rechts) – Fachbereich: Optikdesign

⁵Quelle: <https://de.wikipedia.org/wiki/Photometrie> mit weiteren Größen