

# Automatisierte Selektion von LEDs nach Farbort und Intensität

Ulrich H.P. Fischer      Jens-Uwe Just      Christian Reinboth

30. Juni 2009

## 1 Abstract

Der zunehmende Einsatz von LEDs in der Beleuchtungstechnik hat zur Entwicklung etlicher Applikationen geführt, die eine Prä-Selektion der LEDs nach Farbort und Intensität voraussetzen. Wie dieses Paper zeigt, lässt sich eine manuelle Messung mit Hilfe eines einfachen Aufbaus vergleichsweise unkompliziert realisieren. Da eine manuelle Messung nur für eine begrenzte Anzahl von LEDs ökonomisch sinnvoll ist, liegt es nahe, den Messprozess zu automatisieren. Eine solche Automatisierungslösung wurde von der HarzOptics GmbH in Kooperation mit der RG Elektrotechnologie GmbH zwischen 2007 und 2008 entworfen und realisiert und wird ebenfalls in diesem Paper vorgestellt. Abschließend soll gezeigt werden, welche Herausforderungen bei der automatisierten LED-Vermessung in den kommenden Jahren noch zu überwinden sind und mit welcher Marktentwicklung gerechnet wird.

## 2 Motivation

Aufgrund ihrer vielfältigen Vorteile (Energieeffizienz, Handling, Lebensdauer, Insektenfreundlichkeit etc.) gelten LEDs mittlerweile als das Leuchtmittel der Zukunft – allein schon aufgrund der enormen energetischen Einsparungen lohnt sich ihr Einsatz. Wie aktuelle Forschungen zeigen, könnte man bei einem schrittweise erfolgenden, weltweiten Austausch herkömmlicher Lichtquellen durch LEDs im Verlauf der kommenden zehn Jahre mit einer Verringerung der globalen CO<sub>2</sub>-Emissionen um knapp 10,68 Gigatonnen sowie finanziellen Einsparungen jenseits einer Trillion US-Dollar rechnen<sup>1</sup>.

In der Beleuchtungstechnik hat sich die LED mittlerweile als alternatives Leuchtmittel etabliert. Dabei ist hinsichtlich der qualitativen Anforderungen an die LED zwischen der direkten Beleuchtung (Raumbeleuchtung,

---

<sup>1</sup>Kim, J.K. & Schubert, E.F.: Transcending the replacement paradigm of solid-state lighting, in: Optics Express Vol. 16, No. 26., New York, 2008.

Straßenbeleuchtung) und der indirekten Beleuchtung (sog. atmosphärische Beleuchtung) zu unterscheiden.

Werden LEDs für die direkte Beleuchtung, z.B. in Straßenlampen eingesetzt, ist die Lampe als ein Punktstrahler zu betrachten, bei dem eine Durchmischung des von den einzelnen LEDs abgestrahlten Lichts auftritt<sup>2</sup>. Dadurch kommt es zu einer Mittelung der abgestrahlten Farbspektren und Intensitäten, so dass minimale Unterschiede zwischen den einzelnen LEDs visuell unauffällig sind. Dazu kommt, dass das zur direkten Beleuchtung benötigte Licht von einer solchen Intensität ist, dass ein Hineinschauen in die Lichtquelle kaum möglich ist, und eventuelle Abweichungen in Intensität und Farbort einzelner LEDs auch deshalb unentdeckt bleiben.

Im Bereich der indirekten Beleuchtung stellen Unterschiede in Farbort oder Intensität dagegen ein Problem dar. Werden LEDs beispielsweise in Leuchtstreifen (zu finden unter anderem in Handrails in Zügen und Flugzeugen oder zur Konturausleuchtung von Treppenstufen) eingesetzt, ist die Beleuchtungskonstruktion nicht mehr als Punkt- sondern als Flächenstrahler einzuordnen. Feine Unterschiede zwischen einzelnen LEDs werden nun sichtbar und können das visuelle Erscheinungsbild erheblich stören.

Dies ist insbesondere dann der Fall, wenn die Beleuchtung nicht nur der Orientierung, sondern auch der Werbung dient, beispielsweise bei Flugzeug-Innenraumbeleuchtung im Werbe-Farbton der Airline. Für den Hersteller indirekter Beleuchtungssysteme ergibt sich aus diesem Umstand die Notwendigkeit, nur solche LEDs in Flächenstrahlern einzusetzen, deren Unterschiede so gering ausfallen, dass sie vom Menschen nicht mehr wahrgenommen werden können. Und auch abseits der Beleuchtungstechnik existieren LED-Applikationen, für deren einwandfreie Funktion der genaue Farbort eine wichtige Rolle spielt und teilweise sogar vorgegeben wird – beispielsweise in der Signal- oder Medizintechnik.

In der Praxis ist eine solche Auswahl visuell ähnlicher LEDs jedoch mit großen Problemen verbunden. Zwar bieten die meisten LED-Hersteller ein so genanntes Binning - eine Unterteilung in bestimmte Farbbereiche und Helligkeitsklassen – an, jedoch ist diese Einteilung für viele Applikationen deutlich zu grob, so dass eine entsprechend feinere Nachselektion erforderlich wird, will man die teure Ausschussproduktion uneinheitlich leuchtender Elemente vermeiden.

---

<sup>2</sup>U.H.P. Fischer-Hirchert, C. Reinboth & T. David: Neues Licht für Städte und Kommunen - Wie LED-Technologie die Straßenbeleuchtung reformieren könnte, in: Optik & Photonik, Ausgabe 1/2009, Seite 36-39, Wiley-Verlag, Berlin, 2009.

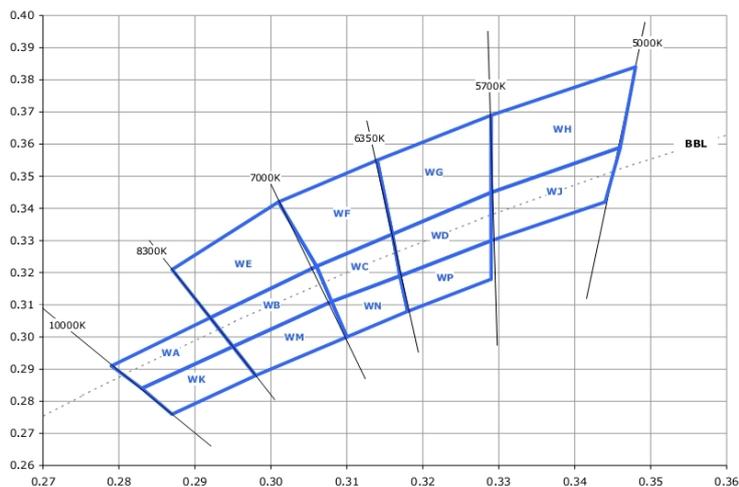


Abbildung 1: Farbort-Binning weißer LEDs (Datenblatt Cree XLamp XP-E)

Bei einem Binning wie in Abbildung 1 dargestellt, ist es für das menschliche Auge noch möglich, Farb- und Intensitätsunterschiede auszumachen. Um wahrnehmbare Farbunterschiede beispielsweise innerhalb des Binnings WF auszuschließen, wird eine Feinunterteilung benötigt, wie sie in Abbildung 2 dargestellt ist.

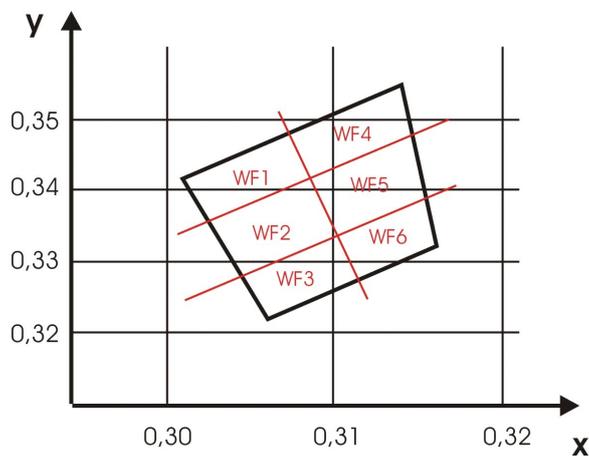


Abbildung 2: Mögliche Unterteilung des Binnings WF (Beispiel)

### 3 CIE-Normenvalenzsystem

Während sich die Bedeutung der Intensität für ein einheitliches Erscheinungsbild auch dem Laien erschließt, ist der Begriff des Farborts erklärungsbedürftig. Beim Farbort handelt es sich um eine Koordinate im von der CIE – der Internationalen Beleuchtungskommission (Commission Internationale de l’Eclairage<sup>3</sup>) – verabschiedeten Normenvalenzsystem. Bei der CIE handelt es sich um eine Standardisierungskörperschaft, deren Aufgabe die Aufstellung international gültiger Normen in der Beleuchtungstechnik ist.

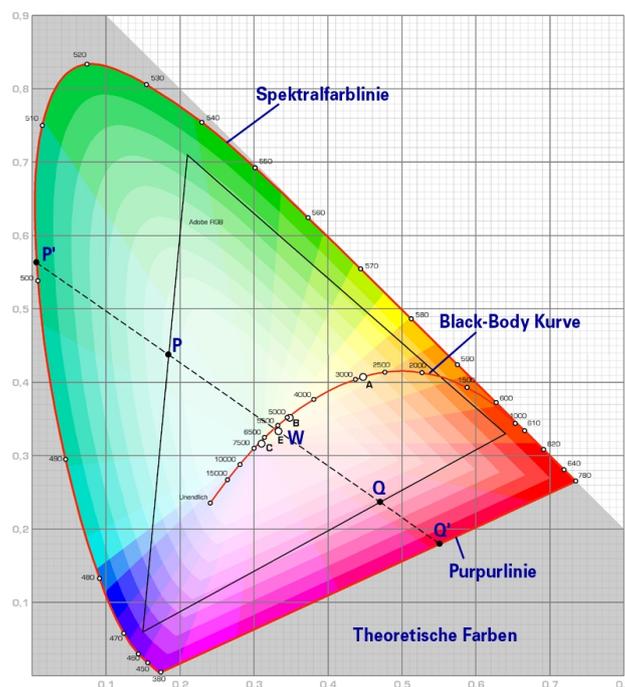


Abbildung 3: CIE-Normenvalenzsystem von 1931 (Grafik von Torge Anders)

Das auch als Farbdreieck bezeichnete Normenvalenzsystem in Abbildung 3 bildet die Gesamtheit aller wahrnehmbaren Farben ab, d.h. den sichtbaren Teil des elektromagnetischen Spektrums. Innerhalb dieses Systems ist jede beliebige Farbe mittels drei Koordinaten  $(x,y,z)$  definiert, wobei zwei Koordinaten zur Farbbestimmung ausreichen, da die Summe aller drei Koordinaten stets 1 ergeben muss und  $z$  daher leicht aus  $x$  und  $y$  errechnet werden kann (aus diesem Grund reicht auch eine zweidimensionale Darstellungsweise wie in Abbildung 3 üblicherweise aus). Eine solche „Farb-Koordinate“ wird als Farbort bezeichnet.

<sup>3</sup><http://www.cie.co.at>

Das in Abbildung 3 gezeigte Farbdreieck entstand 1931 auf der Basis eines  $2^\circ$ -Sichtfelds des sogenannten „Normalbeobachters“. Seit 1964 existiert noch ein zweites CIE-Normensvalenzsystem, welches auf einem breiteren  $10^\circ$ -Sichtfeld basiert, jedoch in der Praxis weniger häufig verwendet wird. Die drei Koordinaten  $x$ ,  $y$  und  $z$  werden in beiden Systemen häufig auch als „Tristimulus“ bezeichnet und können als Anteile der normierten Grundfarben verstanden werden.

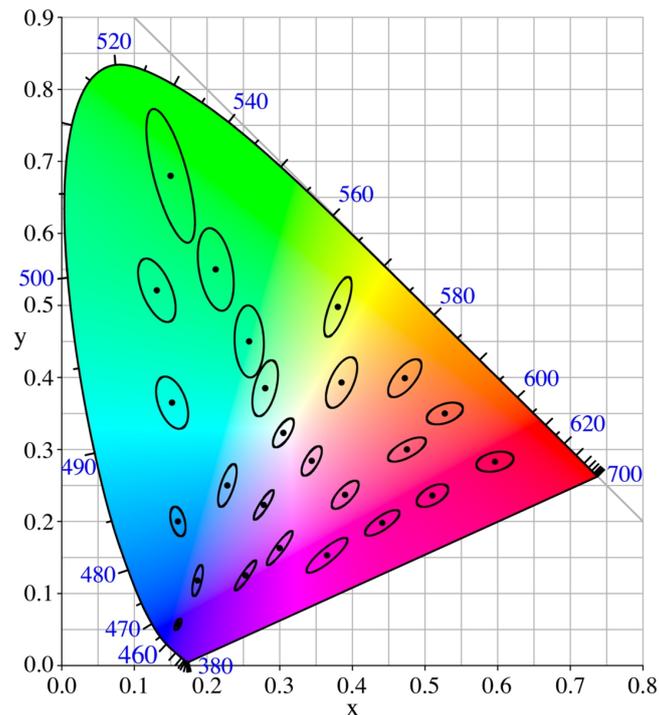


Abbildung 4: MacAdams-Ellipsen (Grafik von Torge Anders)

Betrachtet man den Aufbau des in Abbildung 3 gezeigten Farbdreiecks genauer, so fällt auf, dass sich in der linken Ecke der äußere Bereich des sichtbaren Lichts (bei 380nm) wiederfindet, während die rechte Ecke rot (bei 780nm) und der Scheitelpunkt grün (bei 520nm) ist. Die direkte Linie zwischen 380 und 780nm wird als Purpurlinie bezeichnet und ist in der Abbildung vermerkt. Sämtliche Mischfarben aus Blau und Rot lassen sich auf dieser Purpurlinie finden. Die Purpurlinie sowie die ebenfalls eingezeichnete Spektralfarblinie (der die Spektralfarben enthaltene Randbereich) begrenzen das sichtbare Farbspektrum. Weitere wichtige Bereiche sind der zentrale Weißpunkt sowie die Black-Body-Kurve, welche die Farbtemperatur eines idealen Strahlers wiedergibt.

Das Tristimulus-System orientiert sich generell an der Farbwahrnehmung des menschlichen Auges, welches mit den sogenannten „Zapfen“ über drei Typen von Farbrezeptoren verfügt. Diese Zapfen werden durch Farbreize angesprochen und lösen die eigentliche Farbwahrnehmung im Gehirn aus.

Der entscheidende Nachteil des Tristimulus-Systems ist die Tatsache, dass sich einzelne Farben zwar hochexakt mathematisch bestimmen lassen, die farbliche Wahrnehmung des menschlichen Auges jedoch nicht immer gut getroffen wird. Insbesondere werden gleich große Bereiche an unterschiedlichen Stellen des Farbraums vom Menschen verschieden wahrgenommen, wie MacAdam<sup>4</sup> bereits 1940 nachweisen konnte. Die in Abbildung 4 zu sehenden ellipsoiden Bereiche im CIE-Farbraum, in denen der Mensch keine Farbunterschiede mehr wahrnehmen kann, werden daher als MacAdams-Ellipsen bezeichnet.

Wie leicht zu erkennen ist, sind die MacAdams-Ellipsen im grünen und gelben Bereich des CIE-Farbraums deutlich größer als im blauen oder im violetten Bereich. Hieraus ergibt sich, dass bei grünen LEDs deutlich größere Farbort-Differenzen vom Menschen unbemerkt bleiben als beispielsweise bei blauen LEDs. Eine Prä-Selektion von LEDs nach dem Farbort, wie sie durch HarzOptics angeboten wird, ist aufgrund dieser Wahrnehmungsunterschiede primär bei weißen, blauen und violetten LEDs erforderlich, bei grünen oder gelben LEDs dagegen kaum notwendig, wobei keinesfalls vergessen werden sollte, dass der Farbraum insgesamt nicht als absolut zu verstehen ist, die Wirkung von Farbe auf den Menschen also stets auch von subjektiven Einflüssen begleitet wird.

## 4 Manuelle Selektion

Bereits kurz nach der Gründung der HarzOptics GmbH im Jahr 2006 begann das Unternehmen, LED-Selektionen nach Farbort und Intensität als Dienstleistung anzubieten. Während der ersten zwei Jahre kam dabei ein relativ simpler Handmessplatz zum Einsatz, dessen schematischer Aufbau sich Abbildung 5 entnehmen lässt. Die zu vermessende LED wird dabei manuell unter Verwendung einer Vakuumpinzette in die Messhalterung eingebracht. Diese wird anschließend unter der Messvorrichtung plaziert und lichtundurchlässig abgedeckt, so dass kein einfallendes Tageslicht oder Licht der Raumbeleuchtung die Messung beeinträchtigen kann. Ist die Abdeckung geschlossen, wird die Diode bestromt und der Messvorgang gestartet. Die vom Spektrometer – einem Ando AQ 8315 mit einer Messgenauigkeit von  $\pm 0,5nm$  – gelieferten Daten werden im angeschlossenen PC von einer

---

<sup>4</sup>MacAdam, David Lewis (May 1942): Visual sensitivities to color differences in daylight; JOSA 32 (5): 247 – 274.

selbstgeschriebenen LabVIEW-Software ausgewertet. Die Software berechnet das Selektionsfenster, d.h. die Subfläche des Bins, in welche die LED mittels Vakuumpinzette einsortiert werden kann.

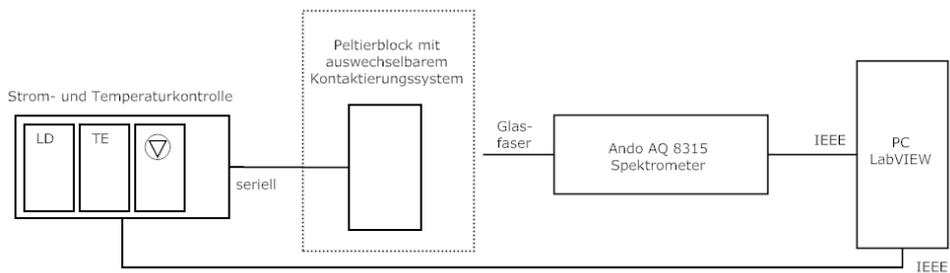


Abbildung 5: Schematischer Aufbau des manuellen Messplatzes



Abbildung 6: Manueller Messplatz

Eine geübte Fachkraft kann an diesem manuellen Messplatz zwischen 100 und 120 LEDs pro Stunde vermessen. Eine solche Messeinrichtung eignet sich aufgrund der begrenzten Kapazität nur für Aufträge bis zu einer gewissen Größenordnung – etwa 100.000 bis 150.000 LEDs lassen sich auf diese

Weise pro Jahr vermessen. Da die Nachfrage an solchen Messdienstleistungen in den vergangenen Jahren erheblich gestiegen ist, begann HarzOptics Anfang 2008 mit der Planung eines automatisierten LED-Messsystems, das in Zusammenarbeit mit der RG Elektrotechnik GmbH<sup>5</sup> in Gernrode entwickelt und gebaut wurde. Eine automatisierte Lösung ermöglicht nicht nur die Vermessung größerer Stückzahlen, sondern ist auch mit einem Zugewinn an Präzision verbunden, da auch einer geübte Fachkraft bei der manuellen Messung gelegentliche Sortierfehler unterlaufen können.

## 5 Automatisierte Selektion

Die Vorgehensweise bei der automatisierten Selektion entspricht im wesentlichen der Vorgehensweise bei der manuellen Selektion, der Vorgang wird jedoch mit vierfacher Geschwindigkeit sowie erhöhter Präzision durchgeführt. Zunächst wird der Gurt mit den zu selektierenden LEDs in eine Halterung an der Seite der Maschine eingebracht. Über einen Feeder kann der Gurt im Inneren der Maschine abgerollt werden, wobei ein mechanischer Greifer mit Vakuumpitze die LEDs einzeln entnimmt. Der Greifer setzt die LED anschließend in die Messvorrichtung und sendet ein Signal an den angeschlossenen LabVIEW-PC. Dieser startet den Messvorgang, der mittels eines CAS 140 Array-Spektrometers erfolgt. Die Software berechnet anschließend aus den Messdaten, welchem Selektionsfenster die LED zuzuordnen ist, und sendet diese Information an den Automaten. Dort befindet sich ein softwaregesteuertes Sortierkarussell mit 60 Ablagefeldern, welches über einen Trichter mit der Messstrecke verbunden ist. Ist das Karussell in die korrekte Position gedreht worden, entnimmt der Greifer die LED der Messvorrichtung und wirft sie über dem Trichter ab.

Der gesamte Vorgang dauert etwa 9 Sekunden, so dass pro Stunde bis zu 400 LEDs bei höchster Farbort-Genauigkeit ( $\pm 0,002$ ) selektiert werden können. Der Zeitgewinn ist dabei vor allem auf das schnellere und präzisere Handling der LEDs durch den Greifer (verglichen mit der Vakuumpinzette beim Handmessplatz) sowie die höhere Messgeschwindigkeit des verwendeten Spektrometers (50ms) zurückzuführen. Das System ermöglicht damit die Vermessung großer Mengen an LEDs (bis zu 3 Millionen pro Jahr) bei hoher Präzision und vergleichsweise geringen Kosten, die mit der Zahl der vermessenen LEDs abnehmen. Es besteht zudem die Möglichkeit, bis zu sechs Gurtautomaten mit der Messstrecke zu verbinden.

---

<sup>5</sup><http://www.rundfunk-gernrode.de>

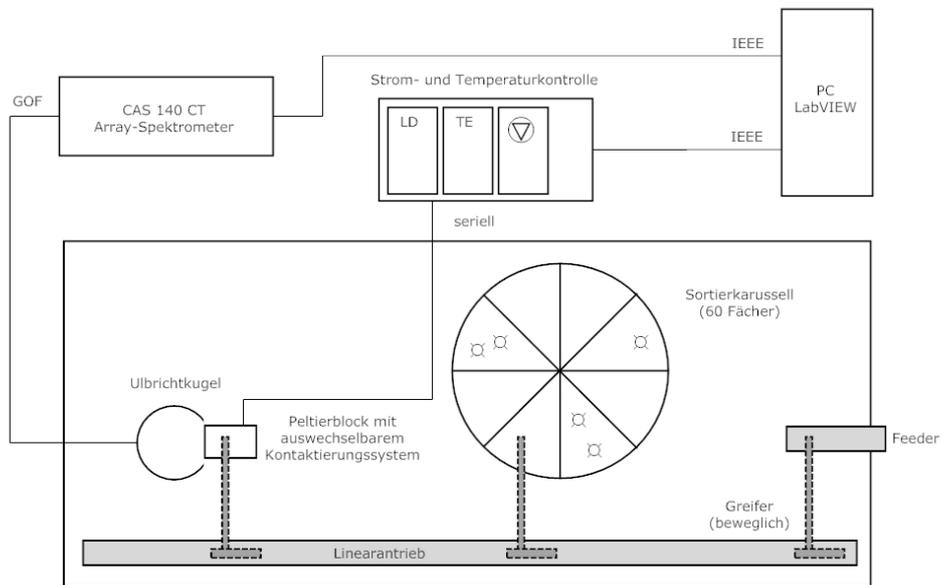


Abbildung 7: Schematischer Aufbau der Selektionsmaschine



Abbildung 8: Automatisierte LED-Messvorrichtung

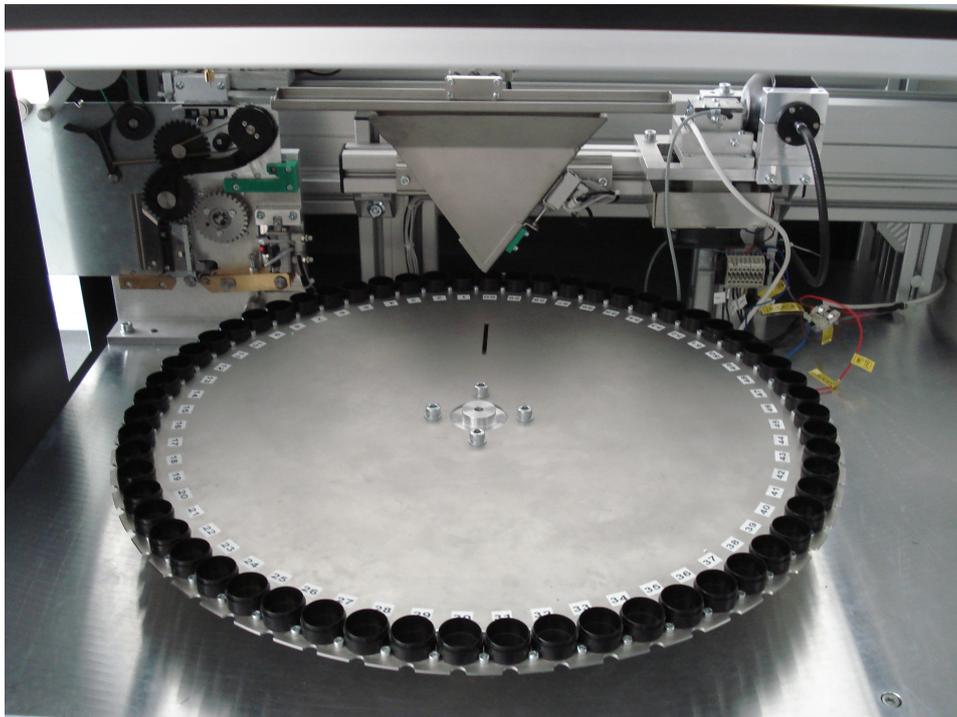


Abbildung 9: Selektionskarussell des LED-Messplatzes

## 6 LabVIEW-Ansteuerung

Die Ansteuerung des Spektrometers erfolgt sowohl beim Handmessplatz als auch bei der automatisierten Vermessung mittels des Software-Werkzeugs LabVIEW (Laboratory Virtual Instrument Workbench<sup>6</sup>). Dabei handelt es sich um eine im Messtechnik-Bereich als Standard geltende Software, die Messdaten aus einer Vielzahl typischer Laborsysteme abfragen kann.

Die Messung selbst läuft je nach Aufbau des Messplatzes unterschiedlich ab. Bei der Handmessung wird das Spektrum der LED über das Ando-Spektrometer abgefragt, die Berechnung des Farborts erfolgt mittels LabVIEW. Dieser Berechnungsschritt entfällt bei der automatisierten Vermessung mit dem beim automatisierten Messsystem verwendeten CAS 140, da dieses Spektrometer in der Lage ist, den Farbort direkt zu bestimmen und den berechneten Wert an LabVIEW zu übergeben. Die Kommunikation zwischen Mess-PC und Selektionsmaschine erfolgt über eine DIO-Karte, die vom Mess-PC gesteuert wird. Der PC dient bei diesem Aufbau nicht nur der Kommunikation mit der S7-Steuerung, sondern auch der Ansteuerung der verwendeten Messtechnik, d.h. Spektrometer, Stromquelle und Tempe-

<sup>6</sup><http://www.ni.com/labview/>

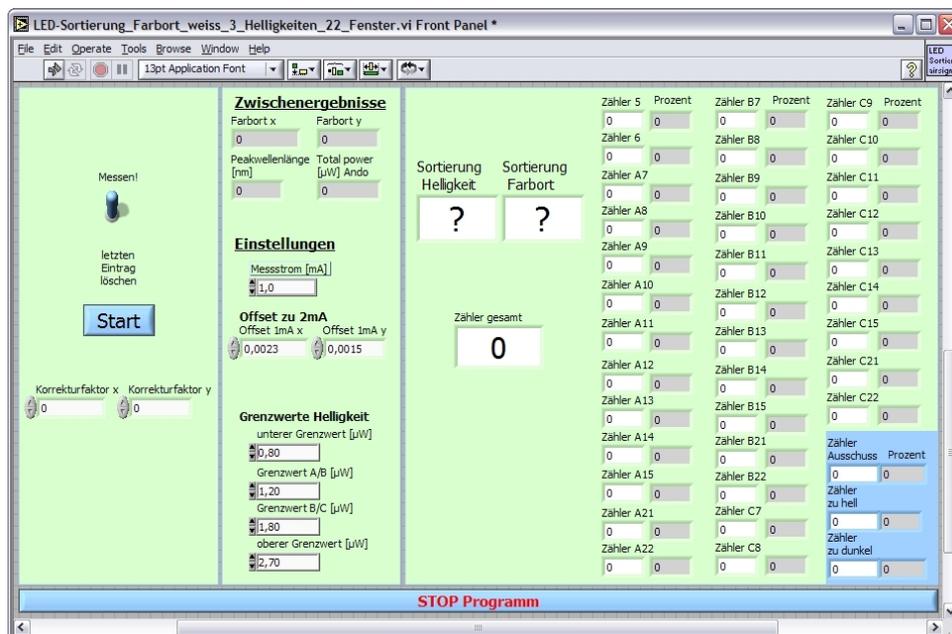


Abbildung 10: Frontpanel der manuellen Selektion

raturregelung. Die S7-Steuerung des Automaten übernimmt dagegen das LED-Handling von der Entnahme aus dem Gurt über das Einsetzen in den Messplatz bis hin zur Einsortierung in das Sortierkarussell.

## 7 Zusammenfassung und Ausblick

Wie in diesem Paper gezeigt wurde, besteht ein steigender Bedarf an der Vermessung und Selektion von LEDs nach Farbort und Intensität, der in den kommenden Jahren mit dem zunehmenden Einsatz von LEDs weiter zunehmen dürfte. Eine solche Selektion lässt sich prinzipiell mittels eines Handmessplatzes realisieren, der jedoch aus ökonomischen Gründen für eine Vermessung von größeren Stückzahlen ungeeignet ist. Um dieses Problem zu umgehen, wurde eine automatisierte Messstrecke entwickelt, deren Kapazität theoretisch für die Selektion von bis zu 3 Millionen LEDs pro Jahr ausreicht. Mit Hilfe dieser automatisierten Lösung ist es möglich, die Vermessung und Selektion von LEDs nach Farbort und Intensität mit hoher Präzision und Geschwindigkeit zu geringen Stückkosten anzubieten.

Als vergleichsweise zeitaufwändig muss allerdings noch die Umrüstung der Selektionsmaschine auf neue LED-Typen bewertet werden – hier sind in den kommenden Monaten noch Möglichkeiten zu erarbeiten, wie eine Umrüstung zeitnäher durchgeführt werden kann. Darüber hinaus soll an

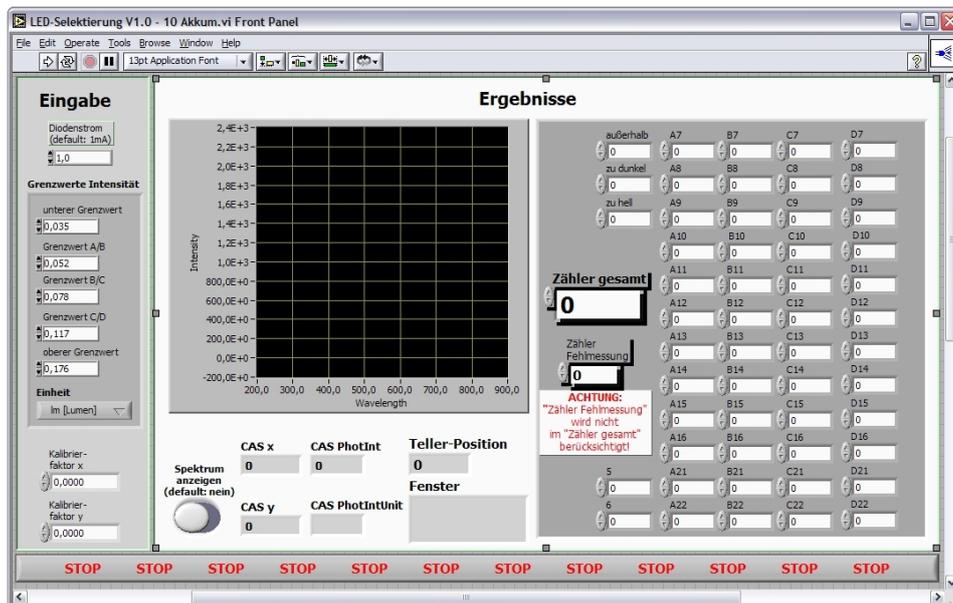


Abbildung 11: Frontpanel der automatisierten Selektion

der Möglichkeit geforscht werden, LEDs mit speziellen Bauformen, wie beispielsweise fest aufgesetzten Linsen, zukünftig nicht nur manuell sondern auch automatisiert vermessen zu können.

## 8 Kontaktinformationen

HarzOptics GmbH  
 Dornbergsweg 2  
 38855 Wernigerode  
<http://messtechnik.harzoptics.de>