Abschlussbericht zum Projekt

Entwicklung von Basistechnologien für LED - Kalibriernormale

Im Rahmen des Kooperationsprojektes

LED - Kalibriernormale

Kurzbezeichnung:	**Entwicklung von Basistechnologien für LED - Kalibriernormale**
Laufzeit des Projektes:	01.07.2008 – 30.06.2010
Förderkennzeichen:	KF 0005912WM8
Berichtspflichtiger:	OUT e.V.
Berichtszeitraum:	01.07.2008 – 30.06.2010

Berlin, den 19.08.2010

Dr. Adrian Mahlkow
Vorstandsvorsitzender

Sachbericht zum Projekt „LED – Kalibriernormale” und dem Teilprojekt des OUT e.V. mit der Kurzbezeichnung „Entwicklung von Basistechnologien für LED – Kalibriernormale”

1. Aufgabenstellung

Die Aufgabenstellung des Projektes bestand in der Entwicklung von Grundlagen für Kalibriernormale für photo- und radiometrische Messungen im sichtbaren Spektralbereich in der Größenordnung 1000 Lumen auf der Basis von LED. Die Leistungskonstanz soll besser als 0,1 % über einen Rekalibrierzyklus von einem Jahr sein. Die Technologie soll für LED eines weiten Spektralbereich von 250 bis 1400 nm anwendbar sein. Die Strahlungsleistungen einzelner Labormuster sollen wellenlängenabhängig zwischen 10 bis zu 1000 mW bei Wirkungsgraden zwischen 1 und 30 % liegen.

Die Realisierung aller Randbedingungen für den optimalen Betrieb der LEDs erfordern ein tieferes Verständnis der Degradation von LEDs mit physikalischer Modellbildung und komplexer Regeltechnik für die Parameter „Temperatur“ und „Strom“ im Bereich von ppm. Die Realisierung der Zielstellungen erfolgte im Rahmen von zwei Teilprojekten:

- Teilprojekt 1: Entwicklung von Basistechnologien für LED-Kalibriernormale.
- Teilprojekt 2: Entwicklung von Labormustern des LED-Kalibriernormals.

Das erstgenannte Teilprojekt wurde vom Kooperationspartner Instrument Systems, das zweite vom hier berichtenden OUT e.V. bearbeitet.

2. Abrechnung der einzelnen Arbeitspakete

Auf den folgenden Seiten sind die einzelnen Arbeitspakete und die wesentlichen, erzielten Ergebnisse dargestellt. Ein Vergleich der im Antrag formulierten und angestrebten Ergebnisse mit den tatsächlich erreichten erfolgt im Anschluss ab Seite 23.

AP 1: Definition der Spektralbereiche
(07/08 – 10/08)

Die Analyse der am Markt verfügbaren Bauelemente nebst spezielle Anfragen bei großen und kleinen Herstellern weltweit brachten klar am Preis erkennbare, unterschiedlich zu bewertende Bereiche hervor:

1. Bereich: Wissenschaftlich möglich: In Veröffentlichungen werden von elektrisch angeregten LED-Strukturen im Wellenlängenbereich zwischen 224 und 2400 nm berichtet. In diesem Bereich ist frühestens in den nächsten fünf Jahren mit kommerziell verfügbaren Bauelementen zu rechnen.
2. Bereich: Technisch möglich: Weltweit verfügbar sind LED im Wellenlängenbereich zwischen 255 und 1600 nm. Kommerziell wirksam ist dieser Bereich allerdings noch nicht. Erkennbar ist dies am Preisgefüge für konkrete Bauelemente. Ein Einsatz in Produkten außerhalb des Labors ist frühestens in drei Jahren zu erwarten.
3. Bereich: Kommerziell möglich: Am Markt klar positioniert sind LED im Wellenlängenbereich zwischen 365 und 1000 nm. Hier sind Bauelemente in Millionen-Stückzahlen zu Preisen von wenigen € für 1-Watt-Typen verfügbar.

Die nachfolgende Grafik zeigt den Preis in € pro 1 Watt Strahlungsleistung. Berücksichtigt wurden hier bei mehr als einem Hersteller Durchschnittswerte aus diesem Quotienten. Es fließt der Grundpreis des Bauelements ebenso wie der Wirkunsgrad ein. Klar sind die drei Bereiche zu erkennen (Grenzlinien in rot, logarithmischer Maßstab des Preises).

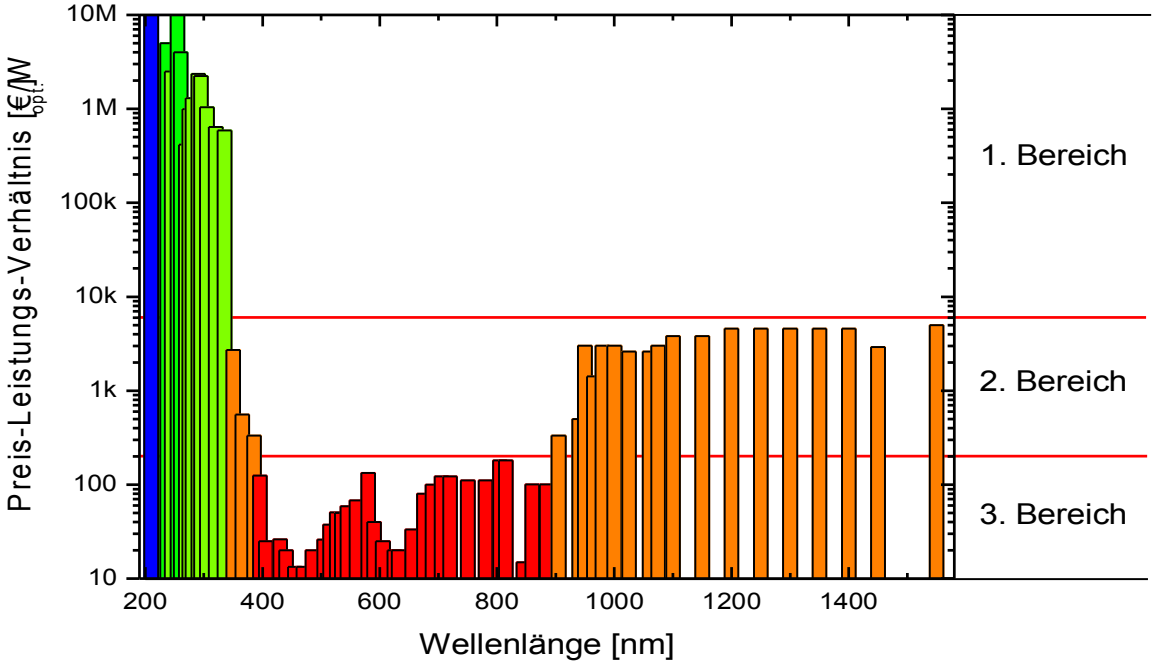


Abb. 1: Preis-Leistungsverhältnis für Strahlung aus UVED, LED und IRED

Im Projekt konzentrieren wir uns auf den 3. Bereich der Bauelemente. Im Bereich 2 sind keine langfristigen Verfügbarkeiten gegeben. Die zur Verfügung stehenden Muster aus dem Bereich 1 waren zumeist persönliche Leihgaben oder Labormuster, in der Regel als Chips.
Für kommerziell verfügbare Chips aus dem 3. Bereich wurden eine Vielzahl von möglichen Lieferanten berücksichtigt. Aus allen weltweit verfügbaren Hochleistungs-LED sind von allen namhaften und in Ausführung und Materialwahl für hochwertig eingeschätzten LED jeweils 4-5 Mustertypen angefordert und auf dem neu konzipierten Langzeitmessplatz über 1000 Stunden in Betrieb genommen und untersucht worden. Eine Liste der für diese Forschungsaufgabe gewählten und bearbeiteten LED zeigt die folgende Tabelle in einem Ausschnitt. Insgesamt erreichen wir ein Kontingent von rund 260 unterschiedlichen Hochleistungs-LED-Typen im sichtbaren Spektralbereich. Die Recherche im Ultravioletten und auch Infraroten konnte mittlerweile abgeschlossen werden. Besonders im Wellenlängenbereich des hohen Infrarotbereich reduziert sich das Angebot an Hochleistungsbauteilen auf einige wenige Typen auf dem verfügbaren Markt, so dass in diesen Bereichen noch weiterführend im Forschungsbereich recherchiert werden muss.

Abb. 2: Tabelle der Forschungsaufgaben in Bezug auf Wellenlänge, Hersteller, Bauform und Type (z. B. Farbsortierungen)

AP 2: Charakterisierung und Degradation der ausgewählten Bauelemente
(10/08 – 05/09)

Vor Beginn der Degradation ist jedes Bauelement individuell auf einem neu entstandenen und ständig erweiterten Messkopf an den kalibrierten Radiospektrometern des Optischen Labores vermessen worden. Die nachfolgende Graphik zeigt eine Ergebnis-Zusammenfassung für eine LED.

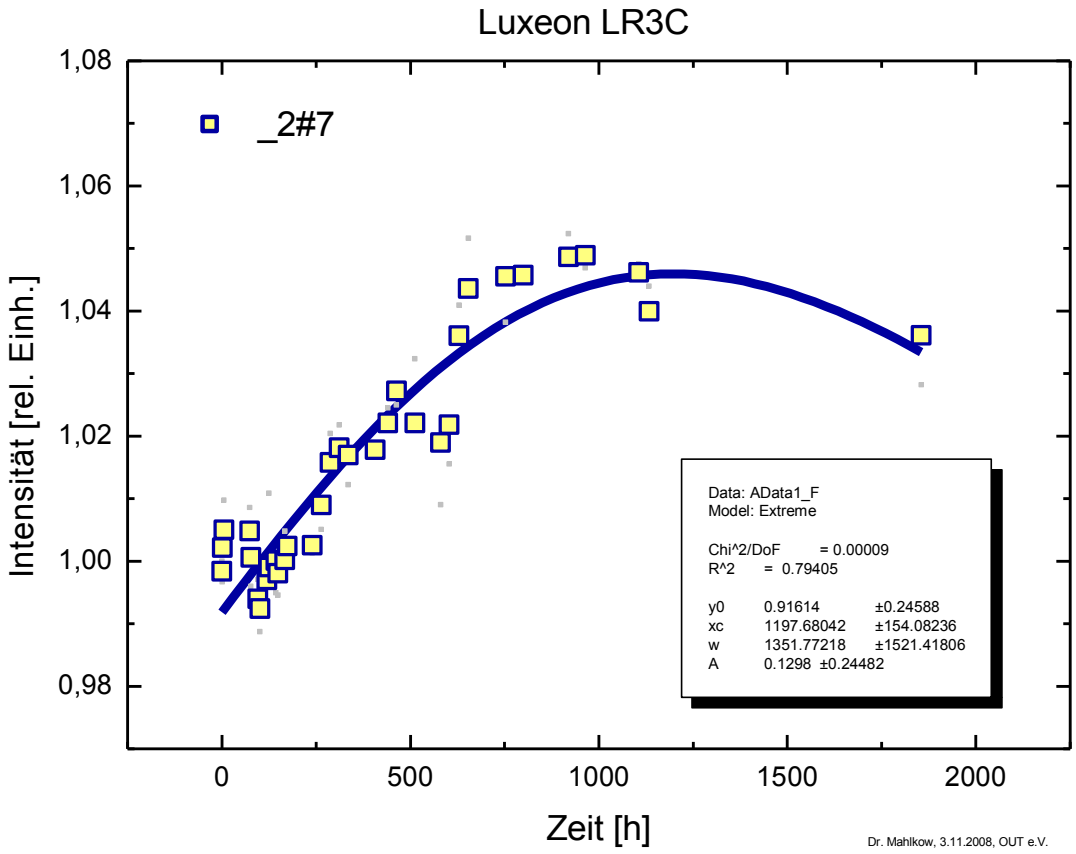


Abb. 3: Degradationskurve einer Hochleistungs-LED

Da direkt nach Inbetriebnahme einer jeden LED die Degradation der Lichtintensität am stärksten ist und diese sich zeitabhängig (Betriebsstunden) nicht linear reduziert, wurden verschiedene Messzeitzyklen, basierend auf Erfahrungswerten der letzten 10 Jahre, innerhalb der ersten 1000 Stunden festgelegt:

Messzeitzyklen:

Tag 1	6 Messungen alle 2 Stunden
Tag 2	3 Messungen täglich
Tag 3-10	2 Messungen täglich
Tag 11-17	1 Messung täglich
Tag 18- …	1 Messung alle 2 Tage

Vielfach zeigte sich eine anfängliche Zunahme der Intensität in den ersten 300 – 1000 Stunden, je nach Technologie der Chips und insbesondere der Bauform. Hier fallen besonders die mit einem Silikon verkappten Bauelement-Technologien auf. Daher muss in solchen Fällen die Einbrennzeit auf über 3000 Stunden ausgedehnt werden.

Name		Device	Part#	Strom	Start		Los	Bemerkung				R0 = 1,0055555555		
ACL01- NTC				350 mA	04.09.2008 10:00		1	LED mit Temperaturfühler				Temperatur [kΩ]	Temp. Msk. [°C]	Temp. Kk. [°C]
Datum	Zeit [h]	BT 4			BT 3			BT 2						
		rot	blau	grün	rot	blau	grün	rot	blau	grün				
04.09.2008 10:00	0,0	66,5059	26,7571	21,3783	97,7273	37,1365	30,0854	113,1650	38,9655	36,0943		1,0930	22,50	28,7
04.09.2008 12:00	2,0	66,9385	27,0780	21,5522	97,8809	37,4490	30,1321	111,7910	40,1410	35,1247		1,1070	26,20	30,4
04.09.2008 14:00	4,0	67,0421	27,2531	21,6403	97,8407	37,6231	30,2078	111,5170	40,1934	35,1289		1,1200	29,56	30,8
04.09.2008 16:00	6,0	67,6632	27,5907	21,8432	98,8266	38,1629	30,5503	111,9590	40,4292	35,4263		1,1030	25,17	30,7
05.09.2008 09:15	23,3	68,6194	27,3138	21,2613	100,4863	37,8050	29,4897	112,8660	40,0629	34,2379		1,0780	18,71	28,6
05.09.2008 15:00	29,0	68,2354	27,8250	21,9380	99,8530	38,4894	30,6616	112,8550	40,6515	35,2562		1,1150	28,27	31,4
08.09.2008 07:00	93,0	67,4710	27,5960	21,7320	98,0690	37,8440	30,1660	111,4600	40,4190	34,9040		1,1200	29,56	31,1
09.09.2008 07:00	117,0	68,1960	27,7660	22,0080	98,8840	38,0760	30,5610	112,3200	40,4430	35,1750		1,1250	30,85	30,6
10.09.2008 07:00	141,0	67,8110	27,6840	21,8970	98,2290	37,9130	30,3540	111,5600	40,3690	34,9930		1,1270	31,37	31,0
11.09.2008 07:00	165,0	67,1780	27,6210	21,7410	97,4160	37,8510	30,1320	110,8800	40,5940	34,9340		1,1260	31,11	31,0
12.09.2008 08:41	190,7	68,7388	28,0923	22,2189	99,7984	38,5889	30,9023	112,7660	40,4955	35,1190		1,1300	32,14	31,6
16.09.2008 07:15	285,3	69,3690	28,3360	22,4140	100,3260	38,8420	31,0580	113,0600	40,6980	35,3900		1,1140	28,01	29,8
17.09.2008 07:30	309,5	69,5510	28,3980	22,5940	100,4590	38,8890	31,3390	112,9800	40,4860	35,5560		1,1150	28,27	29,6
18.09.2008 07:00	333,0	69,6290	28,4870	22,5720	100,6980	39,1200	31,3750	113,0500	40,6750	35,5070		1,1170	28,79	31,0
19.09.2008 07:00	357,0	69,5700	28,4870	22,4630	100,6960	39,1690	31,2210	113,2900	40,9700	35,4570		1,1210	29,82	31,2
22.09.2008 07:00	429,0	68,2640	28,0430	22,1190	98,6300	38,3480	30,6110	111,7500	40,4070	35,0160		1,1280	31,63	32,3
25.09.2008 10:20	504,3	68,8961	28,1893	22,0146	100,2099	38,8325	30,5288	113,2160	40,8130	34,6762		1,1360	33,69	32,6
17.11.2008 09:30	1775,5	68,5210	27,9060	22,2430	99,1120	38,3970	30,6120	112,3100	39,9610	35,0430		1,1120	27,50	29,8
08.01.2009 15:00	3029,0	67,0432	26,9500	21,5277	98,1395	37,5629	29,7273	112,2090	39,4578	34,6265		1,1100	26,98	30,1

Abb. 4: Messprotokoll der Degradationsmessungen mit Intensitätswerten (hellgrün), Temperaur (orange) und Zeit (weiß).

Um die große Zahl an Hochleistungsbauelementen in adäquater Form unter konstanten Bedingungen altern zu lassen, ist der vorhandene Messplatz an seine Kapazitätsgrenzen gestoßen. Zur Sicherstellung der Überprüfbarkeit und Vergleichbarkeit der Messergebnisse der gewählten Bauteile mussten zunächst einige Randbedingungen für einen neuen Langzeitmessplatz geschaffen werden. Alle miteinander zu vergleichenden Hochleistungs-LEDs müssen mit exakt der gleichen Temperatur in Betrieb genommen und auf dieser konstant gehalten werden. Ein Kühlsystem muss alle LED-Typen unabhängig vom Stromverbrauch und im Betrieb befindlichen Stückzahlen auf exakt 20°C konstant temperieren. Ein Kühlkörper mit Platz für bis zu 1500 Bauelementen ist aufgebaut worden. Der Einbrennplatz kann durch eine integrierten Wasserkühlung über einen extern am Haus angebrachten Chiller eine Gesamtverlustleistung von bis zu 2500 W verkraften, ohne dass die Umgebungstemperatur für die Bauelemente um mehr als 1 Grad schwankt.

Aufbau des Langzeitmessplatzes:

- 4 Aluminium-Kühlscheiben zur Aufnahme der eigens entwickelten 10-fach Dioden-Leisten.
- Abmessungen der Gesamtfläche: 2 × 60 × 100 cm Scheiben mit 8 mm Materialstärke, integrierte Gewindebohrungen zur Aufnahme der Messstreifen (je 3 Stück pro Streifen): maximale Auslastung je Tafel: 4 × 27 Messstreifen mit insgesamt Platz für 218 Streifen.
- Die maximale Aufnahmekapazität des neu aufgebauten Messplatzes für Langzeitmessungen beträgt 2160 LED.
- Die Aluminiumplatten wurden mit Hilfe eines 2-Komponenten Spezial-Keramik/Epoxy-Wärmeleitklebers mit einer flächigen Klebschichtdicke von < 0,5 mm unter hohem Anpressdruck an zwei Heizkörper geklebt (SCCE-80G slow cure ceramic epoxy).
- Die Heizkörper selbst sind an einen Chiller angeschlossen. Dieses Kältesystem mit geschlossenem Wasserkreislauf ist so ausgelegt, dass die Aluminiumoberfläche unabhängig von der Verlustleistung der betriebenen LED konstant auf 20°C gehalten wird.

- Zur Inbetriebnahme des Langzeitmessplatzes wurde ein spezieller Platinen-Layout-Musterstreifen entwickelt. Dieser gewährleistet, dass bei späterem LED-Layout-Design die Bestückung der unterschiedlichsten Bauteilabmessungen auf immer dem gleichen Grundmaß möglich ist. Die maximale LED-Bestückungszahl je Streifen liegt bei 10 Bauteilen.
- Die auf dem Markt verfügbaren Hochleistungs-LED unterscheiden sich in Größe, Form und Material immer deutlicher. Eine Normierung in diesem Bereich ist in naher Zukunft nicht abzusehen. Selbst innerhalb der Produktpalette eines einzelnen Herstellers variieren die Bauformgrößen und -höhen innerhalb des gleichen Leistungsbereiches deutlich. Dies hat zur Konsequenz, dass für nahezu jede einzelne Bauteiltype ein gesondertes Layout entwickelt werden muss, um den Datenblatteigenschaften Genüge zu tragen und diese letztendlich überprüfbar zu machen. Manche LED werden elektrisch über den Kathoden oder Anodenanschluss thermisch entwärmt, das Gros der Hochleistungs-LED benötigt drei Anschlusspads, so dass die Entwärmung separat und elektrisch neutral realisiert ist.
- Besonderes Augenmerk wurde auch auf die Netzspeisung des Messplatzes gelegt. Auch hier variiert die Strom- und Spannungsversorgung der einzelnen LED-Typen laut Datenblättern. Der Langzeitmessplatz ist so konzipiert, dass jeder einzelne der 218 zur Verfügung stehenden Streifen individuell in seinem benötigten Konstantstrom justierbar ist.
- Die letztendliche Justierung der Messstreifen auf der Kühlfläche erfolgt durch ein neu konzipiertes abstandsgeregeltes Schraubsystem, so dass der Anpressdruck der Platinen auf der Kühlfläche immer der gleiche ist.
- In gleicher Weise wird der 10-fach Messkopf zur Messung auf dem Messstreifen justiert.

Besondere Herausforderungen ergaben sich z.B. aus der Verklebung der Montageplatten aus Aluminium (8 mm) mit den Gegenkühler (Rippenheizkörper für 1,9 kW). Die Temperaturdifferenz sollte nicht größer als 1 K (= ±0,5 K) sein. Damit ergibt sich für den Wärmewiderstand ein Wert von

$$R_{th} = \frac{\Delta T}{P_{ges.}} = \frac{0{,}5\ K}{2500\ W} = 0{,}0004\ \ K/W \quad .$$

Bei der Wahl des Klebers für diese Grenzfläche standen verschiedene Hersteller und Materialien zur Auswahl. Möglichst hohe Wärmeleitfähigkeit steht in der Regel im Widerspruch zum Preis. Durch eine kleine Tabelle ließ sich mit den Herstellerangaben schnell ein annehmbarer Kompromis finden:

Material	Dicke [mm]	Preis [$]	Menge [g]	Dichte [g/cm³]	Leitwert [W/m²K@0,001in]	Lambda [W/mK]	Preis [$/g]	**Preis [€]**	ΔTemp [K]	Rth [K/W]
Ceramique	1,0	243,36	1872	2,60	200000	5,08	0,13	**175,81**	0,68	0,0002734
Ceramique	0,5	121,68	936	2,60	200000	5,08	0,13	**87,91**	0,34	0,0001367
ArticSilver	1,0	2131,20	2880	4,00	350000	8,89	0,74	**1539,66**	0,39	0,0001562
ArticSilver	0,3	673,92	864	4,00	350000	8,89	0,78	**486,87**	0,12	0,0000469
Alumina	1,0	205,92	1584	2,20	157500	4,00	0,13	**148,76**	0,87	0,0003472
Alumina	0,5	102,96	792	2,20	157500	4,00	0,13	**74,38**	0,43	0,0001736
EpoxySilver	1,0	2448,00	2880	4,00	175000	4,45	0,85	**1768,53**	0,78	0,0003125
EpoxySilver	0,5	1224,00	1440	4,00	175000	4,45	0,85	**884,27**	0,39	0,0001562
EpoxyAlumina	1,0	792,00	1584	2,20	60000	1,52	0,50	**572,17**	2,28	0,0009113
EpoxyAlumina	0,5	396,00	792	2,20	60000	1,52	0,50	**286,09**	1,14	0,0004557
EpoxyAlumina	0,3	249,88	500	2,20	60000	1,52	0,50	**180,52**	0,72	0,0002875

600 mm	0,60 m	Höhe
1200 mm	1,20 m	Breite
720000 mm²	0,72 m²	Fläche
2,5 kW	2500,00 W	Verlustleistung

Das direkte Aufspachteln des verwendeten Ceramique ermöglichte eine Schichtdicke von weniger als 0,5 mm.

Die nachfolgenden Bilder zeigen Teilschritte des Aufbaus der mechanischen Teile:

Wasserkühlung mit Ausgleichsbehälter und Wärmetauscher

Anschlussstelle zwischen Gegenkühler (Rippenheizkörper) und Montageplatten aus Alu.

Komplett gefügter Kühlkörper (von hinten) zur Montage an die Wand.

Einfüllstutzen für Kühlflüssigkeit

Gesamtaufbau im Überblick mit Manometer und Einfüllung.

Abb. 5: Mechanischer Aufbau der Testwand im Detail und im unbestückten Zustand.

Langzeitmessung in Betrieb mit diversen Bauelementen fast aller großen Hersteller:

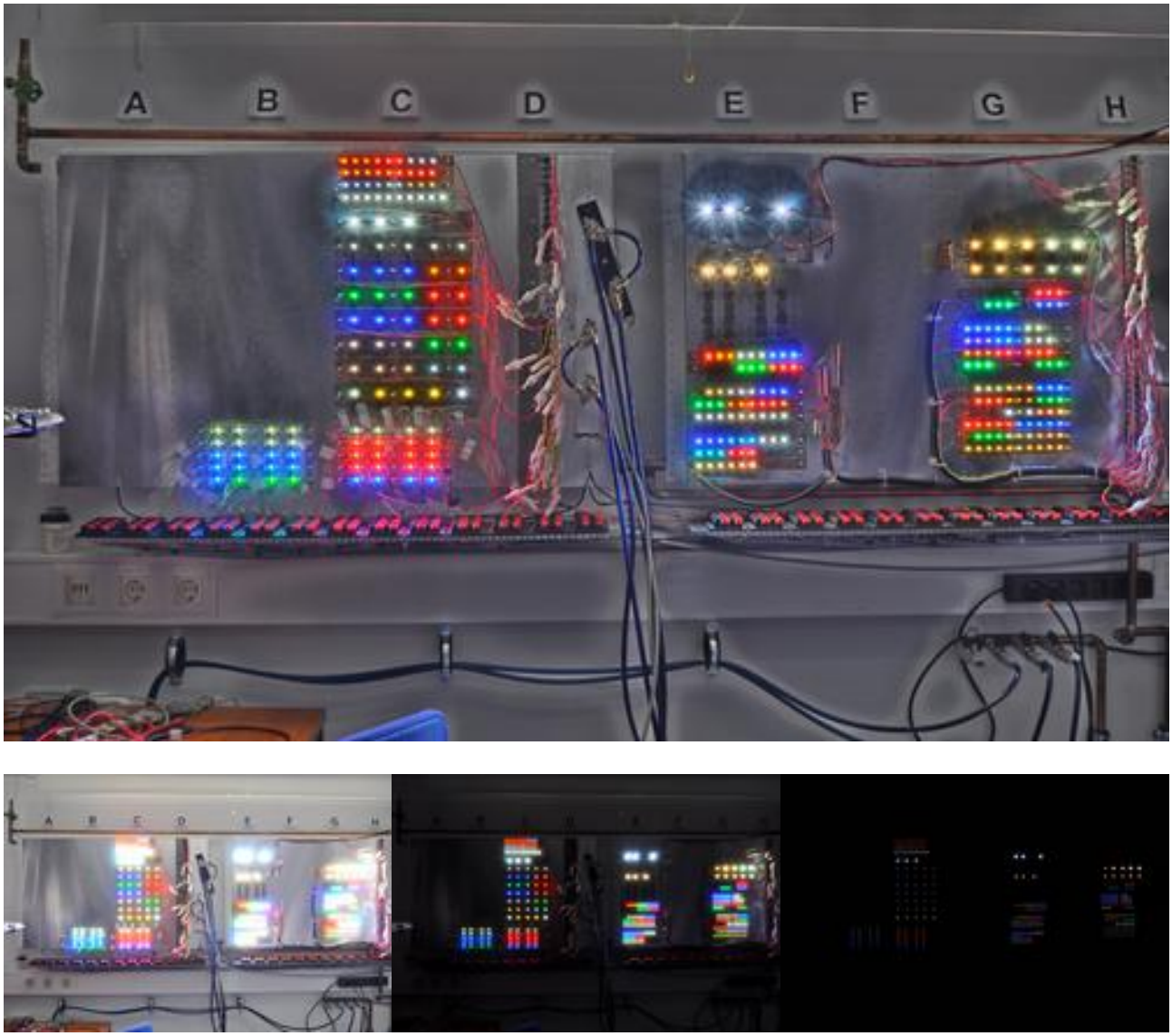
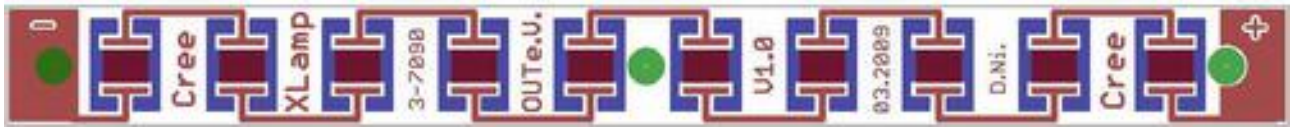


Abb. 6: Hyperdynamikaufnahme der bestückten Testwand mit insgesamt 271 Hochleistungs-LED mit Verlustleistungen zwischen 1,1 und 35 Watt.

Für die Darstellung in Abbildung 6 wurden insgesamt siebzehn Einzelfotos mit stark unterschiedlichen Belichtungs- und Blendeneinstellungen mit einer Spezialsoftware (Helicon Focus) kombiniert. Dadurch wurden sowohl Details der Umgebung als auch die LED mit den leuchtenden Chips selbst sichtbar. Die drei kleinen Aufnahmen darunter zeigen jeweils die am stärksten, mittel und am wenigsten belichtete Aufnahme. Mit der Software wurden die jeweils korrekt belichteten Pixel zu der Gesamtansicht zusammengesetzt. Nur so lassen sich Details und auch noch die Farbe der einzelnen LED erkennen. Der gesamte Dynamikbereich der Aufnahme liegt bei 1:4,2 Mio. Normale Fotos haben eine Dynamik von maximal 1:1000.

LED Messstreifenentwicklung:

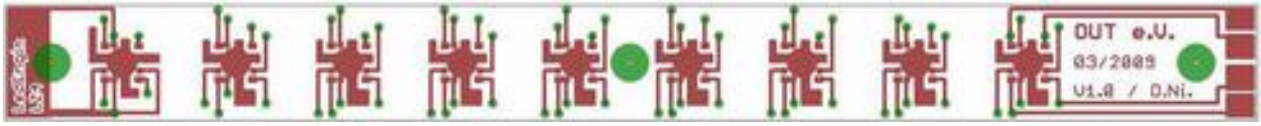
Für nahezu jeden LED-Typ muss ein eigenes Layout entworfen werden. Nur so ist ein optimales thermisches Management gewährleistet. Verwendet werden Metallkern-Leiterplatten mit 1,5 mm Kupferbasis, 50 µm Keramikisolierschicht und 75 µm Kupferbeschichtung. Alle Arbeiten (Layout, Entwicklung und Herstellung der Messstreifen mit Belichtung, Entwicklung und Ätzverfahren) konnten im eigenen Haus durchgeführt werden. So kann zeitnah auf mögliche Fehler oder technische Änderungen reagieren werden. Abb. 7 zeigt einige Beispiele der Teststreifen.



Testleiterstreifen für 10 Xlamp-Bauelemente der Firma Cree inc.

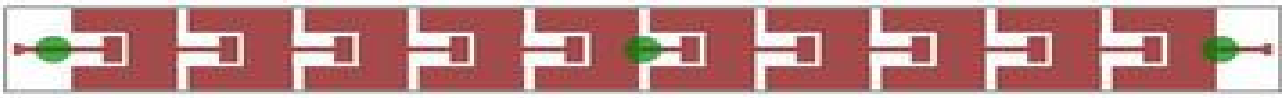
Testleiterstreifen für 10 Riegel-Bauelemente der Firma Nichia

Testleiterstreifen für 10 LZ1-Bauelemente der Firma LedEngin



Testleiterstreifen für 10 LZ4-Bauelemente der Firma LedEngin

Testleiterstreifen für 9 ASMT-Bauelemente der Firma Avago



Testleiterstreifen für 10 VLMx71xxx-Bauelemente der Firma Vishay

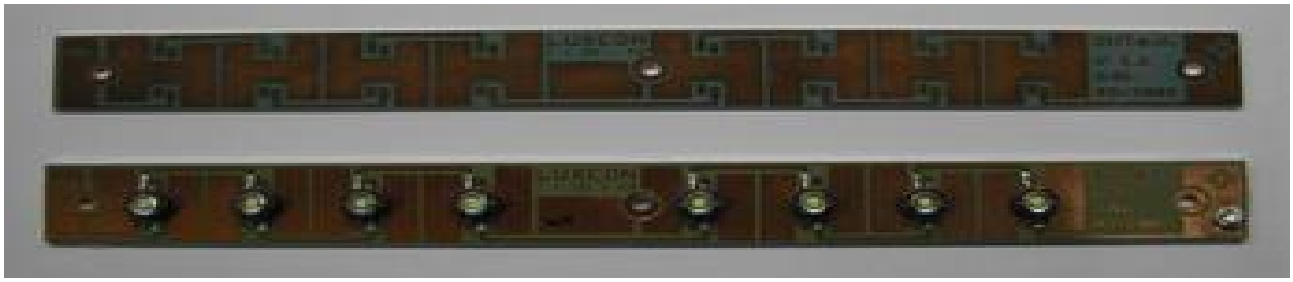


Abb. 7: Layout der verschiedenen Testleiterstreifen (oben) und Fotografie einer fertig bestückten Leiterplatte (für Luxeon III Emitter unbestückt (oben) und bestückt (unten).

Für die Degradationsuntersuchungen wurde die Konstantstromquelle aus Platzgründen teilweise direkt am Messstreifen integriert (Foto, mittlerer Streifen).

Für besonders große LED, die in der Allgemeinbeleuchtung häufiger Einsatz finden werden, war der bestehende Messkopf zu klein. Desweiteren ist für den neuen Lebensdauermessplatz noch ein Zwillingsmesskopf aufgebaut worden, damit schneller die Daten aufgenommen werden können und an beiden Messplätzen parallel gemessen werden kann.

Abb. 8: Leiterstreifen mit integrierter Konstantstromquelle

5-fach Messkopf für große LED-Typen:

- Öffnungsmaß der Ulbrichtkugeln: 10 mm
- Durchmesser der kleinen Ulbrichtkugel: 30 mm
- Stabile Innenbeschichtung der Messkugeln: Bariumsulfat, hoher Weißgrad, Reflektiongrad > 92 %

Abb. 9: 5fach-Messkopf kurz vor der Beschichtung mit $BaSO_4$

Mit diesem Messkopf können Bauelemente mit einem Durchmesser von bis zu 10 mm optischer Größe und 40 mm mechanischen Abmessungen gemessen werden.
Nach eingehender Recherche über die zur Zeit am weltweiten Markt befindlichen Hochleistungs-LED, wurden in unserem Labor letztendlich nahezu 220 Typen als prüfenswert befunden und dann etwa die Hälfte nicht weiter untersucht. Gründe für die Nichtmitaufnahme in die Messzyklen waren zumeist die Unsicherheit der Wiederbeschaffungsmöglichkeit in naher Zukunft und keine ausreichende Gewährleistung der Beibehaltung der Leistungsdaten laut Datenblättern in der Zukunft, was einen Unsicherheitsfaktor in der Verwendung und Beurteilung des Bauteiles darstellt. Die folgende stark verkleinert dargestellte Tabelle in Abbildung 10 zeigt die Verwaltung der Prüflinge und soll einen Eindruck über die Vielfalt in Hersteller, Type und Farbe (Wellenlänge) vermitteln.

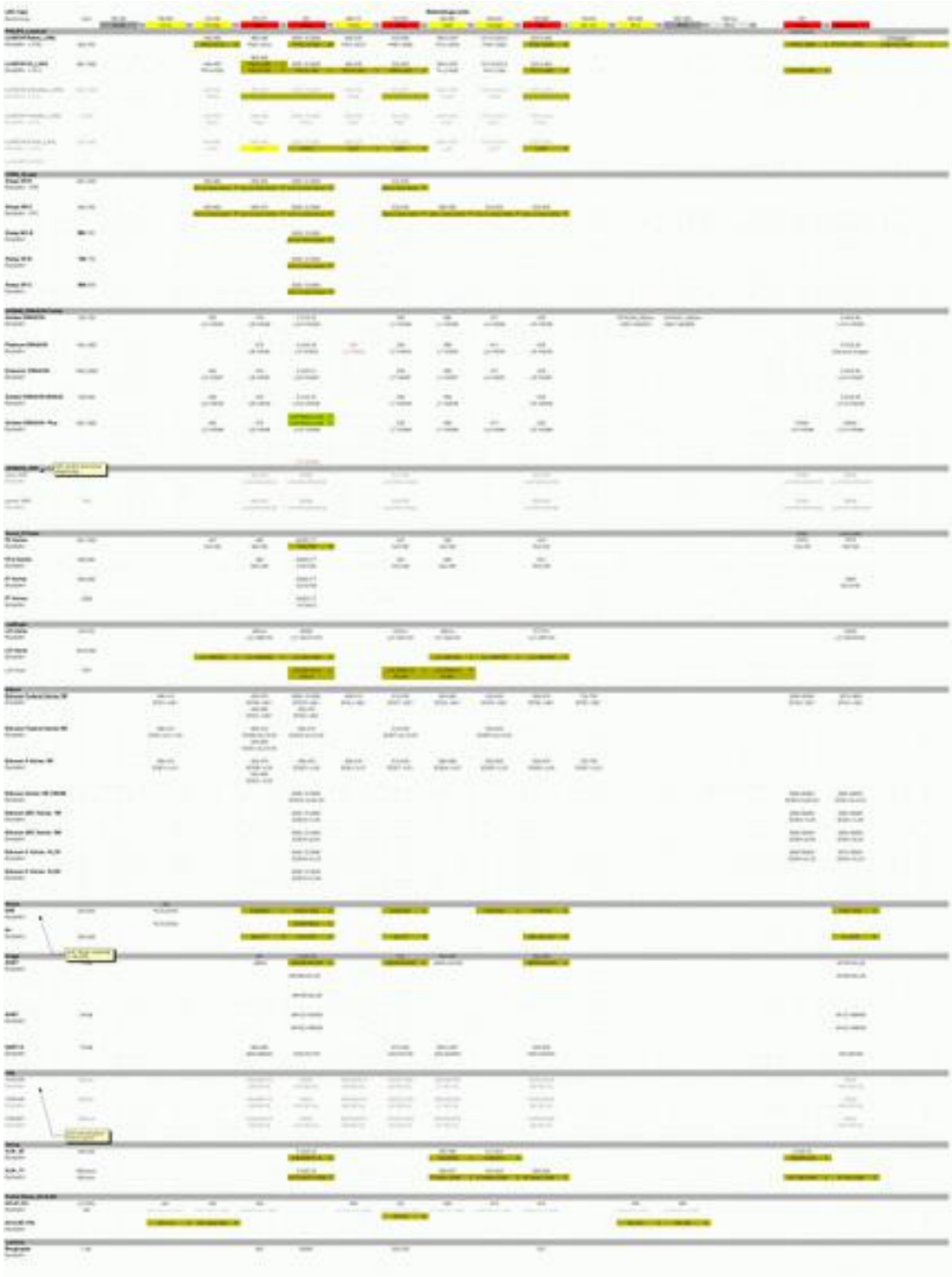
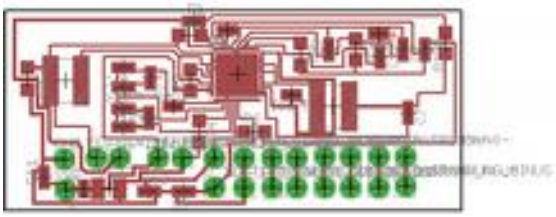


Abb. 10: Tabelle der Prüfling-Verwaltung mit Start und Ende der Prüfung, allen Parametern und Randbedingungen.

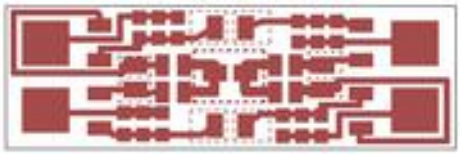
Grundlegend lässt sich hinzufügen, dass das physikalische und technologische Entwicklungstempo im Bereich der Hochleistungs-LED in den letzten 3 Jahren so rasant angestiegen und eine Entwicklungsstagnation in keiner Weise absehbar ist. Die Leistungskonstanz einer bestimmten Bauteiltype ist grundsätzlich in Frage gestellt. Die Konstanz eines individuellen Bauelementes ist auf sehr hohem Niveau, d.h. mit hoher Konstanz möglich.

AP 3: Temperaturstabile Ansteuerelektronik für Strom- und Umgebungstemperatur der LED (08/08 – 02/09)

Die Temperaturkonstanz des pn-Überganges der LED wird über ein Peltiermodul (TEC) mit angeschlossener Ansteuerelektronik geregelt. Hierfür wurden mehrere Versuchsaufbauten realisiert. Sowohl ein fertiges Evaluation-Kit für einen MAX1978 als auch eigens entwickelte Ansteuerelektroniken wurden getestet. Die Entwärmung bzw. Kühlung des eigentlichen Peltierelementes stellte sich in der Praxis als sehr komplex heraus. Eine entsprechend exakte Dimensionierung der Bauteile und Ansteuerungelektronik ist realisiert worden.

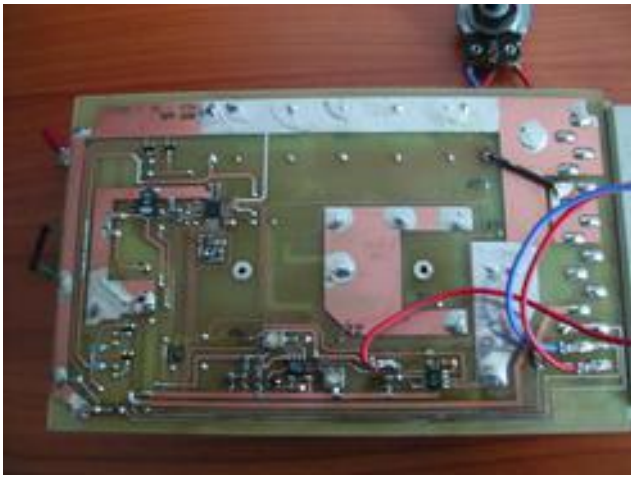


TEC_Steuerplatine

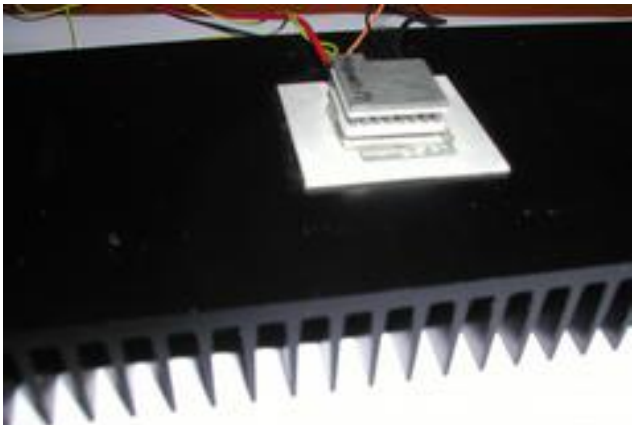


Konstantstromquelle_ LM317

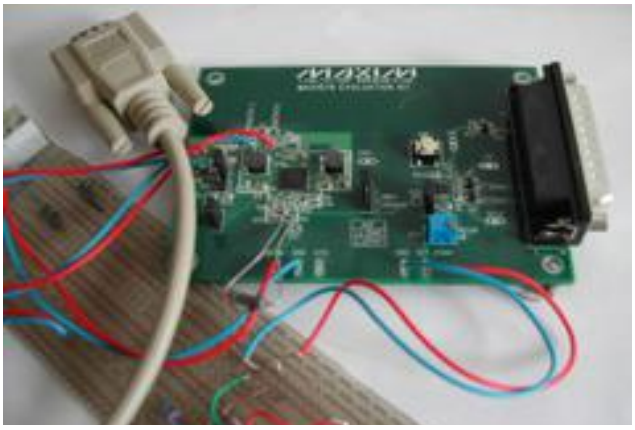
im Labor entwickelte Ansteuerelektronik (TOP-layer)



im Labor entwickelte Ansteuerelektronik (BACK-layer)



Kühlrippe, Doppelpeltier



MAXIM Max1978

Abb. 11: Ansteuerelektronik für Konstantstrom und -temperatur

Für die nötige Stabilität im Ausgangsstrom muss nach den Voruntersuchungen dieser möglichst unabhängig von der Umgebungstemperatur sein. Hier wurde der Schwerpunkt hin verlagert. Nach verschiedenen Konzepten zur Bereitstellung eines konstanten Stroms scheint ein möglichst einfacher Aufbau mit wenigen Bauteilen und einer Standardstromquelle am vielversprechendsten. Ein Linear-Spannungsregler (LM317) kann einen konstanten Strom liefern, dessen Konstanz von der Stabilität eines Strom-Rückkoppel-Widerstands abhängt. Nach langen Recherchen ist es gelungen, Bauelemente zu finden, die im hier relevanten Strombereich Temperaturkoeffizienten von unter 0,01 ppm/K aufweisen. Diese Spezial-Widerstände sind aus neuen Metallfolien aufgebaut und bemerkenswert in ihrem Temperaturverhalten und der geringen Spannungsabhängigkeit der Werte. Zudem zeigen sie gute ESD-Verträglichkeit. Durch die integrierte Peltieransteuerung wird die Temperatur des optischen und der relevanten elektronischen Bauelemente auf unter ± 0,1 K konstant gehalten. Die Elektronik liefert damit einen Strom, der mit einer relativen Schwankung von 0,001 ppm = 10^{-9} aufwartet. Die größte Schwankung im Strom ist nun durch das thermische Eigenrauschen des Halbleiter-Bauelements gegeben. Bei Raumtemperatur (25°C) liegt dieser Wert laut Datenblatt bei 0,003 %. Rauscharme Binings dieses Bauelement-Typs existieren, sind nur schwierig zu beschaffen (militärischer Standard). Hier laufen gegenwärtig noch Bemühungen. Die bisherige Stromquelle zeigte vor allem von außen eingestreute Schwankungen im Strom. Hier wird eine komplett geschirmte Hausung deutliche Verbesserungen bringen.

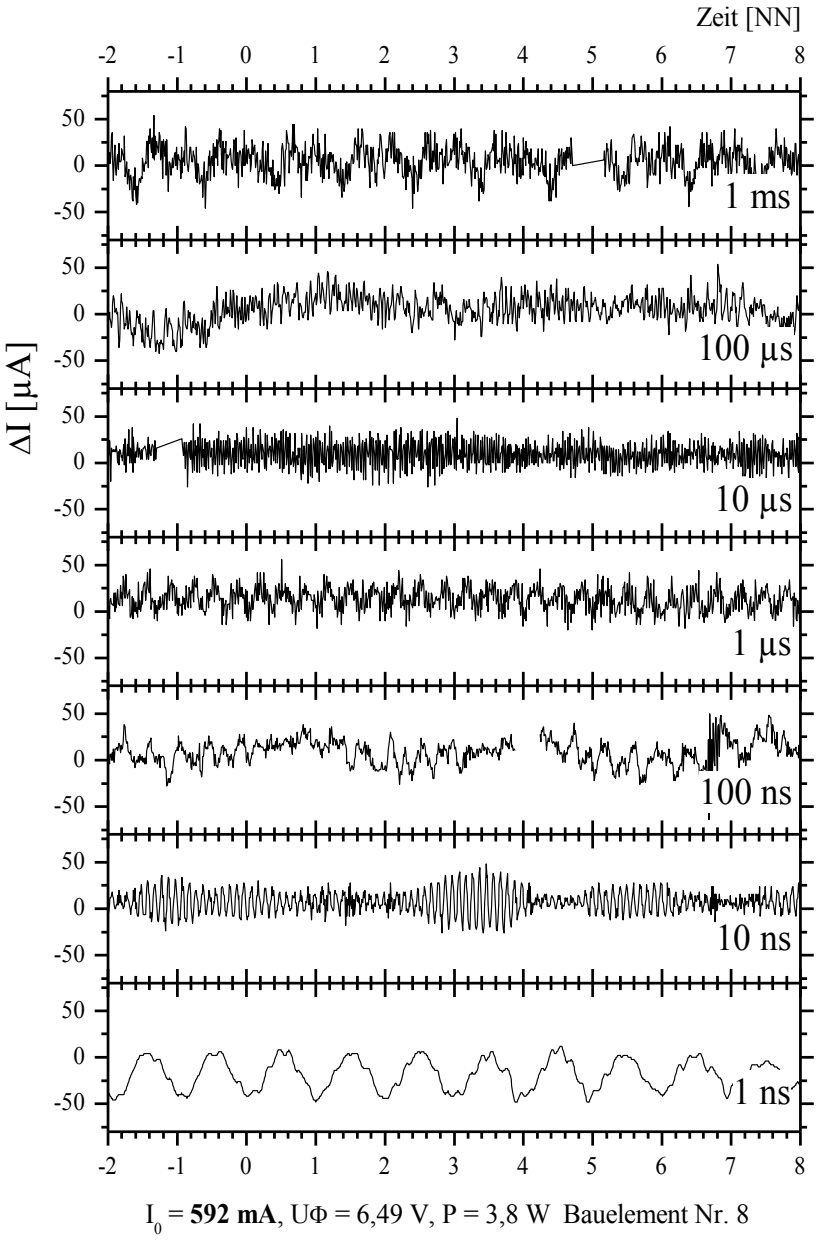


Abb. 12: Rauschpegel über 7 Dekaden von 100 Hz bis 100 MHz.

AP 4: Optische Eigenschaften der Hausung
(03/09 – 05/09)

Für Kalibriernormale dürfen sich durch die Hausung die optischen Ausgangswerte nicht mit der Zeit ändern. Zudem ist eine spektrale Verschiebung äußerst ungünstig, da bei verschiedenen V(λ)-angepassten Detektoren unterschiedliche Wert gemessen werden könnten. Durch Fluoreszenz wird ein Teil der primären Strahlungsleistung in Anteile mit größerer Wellenlänge verschoben. Besonders bei blauen LED könnten durch das Abdeckglas z.B. grüne Fluoreszenzen eine deutlich höhere Intensität vortäuschen, denn die spektrale Empfindlichkeit des Auges (V(λ)-Kurve) bei Grün kann einige hundert mal größer sein als bei Blau. Daher wurden alle zur Verwendung anstehenden Materialien einer kompletten Anregungsspektroskopie unterzogen. Explizit sind dies Aluminiumoberflächen, Edelstahl, Glas (BK7), Quarz-Glas und Bariumsulfat-Oberflächenbeschichtungen bzw. schwarzer Kameralack. Für den letztgenannten stehen die Messungen noch aus, da die genaue Spezifikation noch nicht festgelegt ist.

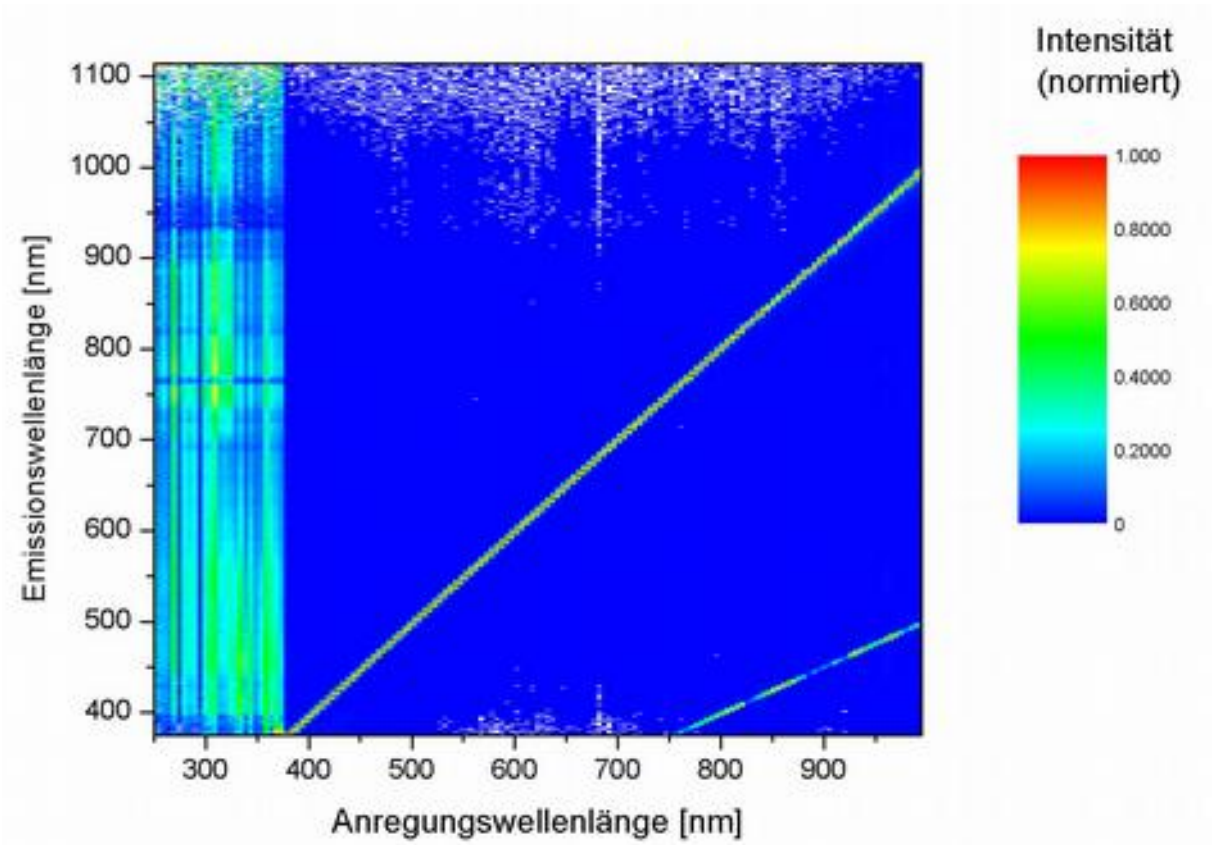


Abb. 13: FLuoreszenz-Spektrogramm von Glas BK7 (optische Qualität).

Bei Glas sieht man deutlich die starke Zunahme des Rauschuntergrundes durch die Normierung der Werte auf 1 und der fehlenden Streustrahlung durch die Absorptionskante des Glases bei 320 nm sowie den Messbereich in der Emission von 385 bis 1114 nm. Es zeigen sich aber auch bei einer logarithmischen Skalierung keine Fluoreszenzen im betrachteten Spektralbereich. Gleiches gilt für Edelstahl, Aluminium und Messing. Hier wurde die Auswertung auf das Auffinden kleinster Fluoreszenzanteile ausgedehnt, ohne Störungen finden zu können.

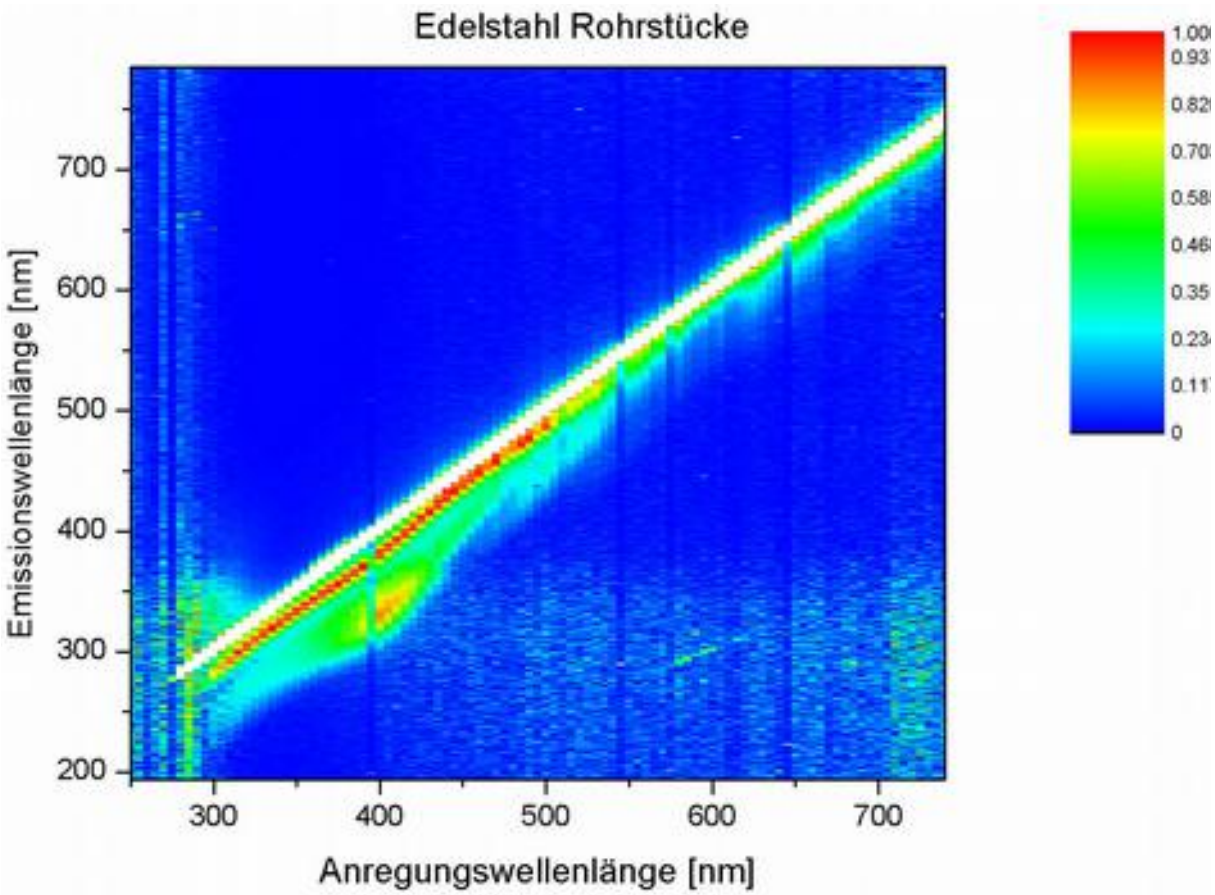


Abb. 14: Fluoreszenz-Spektrogramm von Edelstahl mit überhöhter Skalierung für die Erkennung möglicher Nebenmaxima

Bei der neu entwickelten Auswertetechnik für die Anregungsspektrogramme zeigt sich besonders stark Streuung im verwendeten Monochromator und auch im Radiospektrometer. Es tauchen Spektralanteile mit höherer Energie als das anregende Licht auf, was aus Gründen der Energieerhaltung physikalisch ausgeschlossen werden kann. Der uns zur Verfügung stehende Monochromator ist ein Einfach-Monochromator mit einem Reflexionsgitter. Deutlich werden Streuungen im Bereich um 400 nm, die bei 350 bis 300 nm liegen. Dies deutet auf Probleme beim Monochromator hin, da bei dieser Wellenlänge die Anregungslampe vor dem Monochromator eine starke und breite Linie besitzt. Streuung innerhalb des Radiospektrometers bei ansonsten reiner Strahlung würde sich durch einen breiter verteilten und konstanteren Untergrund bemerkbar machen. Mit der Verwendung eines stabilen Neon-Helium-Lasers als Strahlungsquelle konnte dieses verifiziert werden. Der Untergrund ist deutlich, aber signifikant kleiner, als in der oben dargestellten Messung. Hinzu kommen Interferenzerscheinungen innerhalb durch Spektrometers durch die hohe Kohärenzlänge der Strahlung.

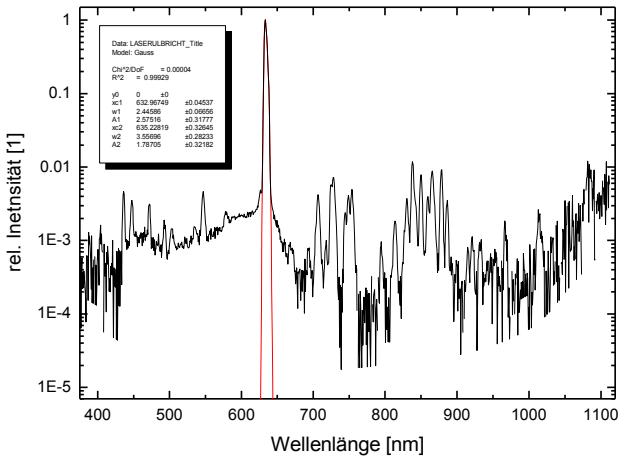


Abb. 15: Streufunktion eines NeHe-Lasers

AP 5: ESD-Festigkeit
(03/09 – 05/09)

Nach zahlreichen Voruntersuchungen zu Schutzschaltungen an der Versorgungselektronik und den LED selbst (siehe nachstehende Ergebnis-Tabelle) wurde eine einfache Doppel-Z-Diode mit hoher Belastbarkeit und einer geringen z-Spannung als gute Wahl identifiziert. Für einem ESD-Test mit verschiedenen Spannungen zwischen 2 kV und 16 kV mit Einzel- und Repitativ-Entladungen wurden die verschiedenen Konzeptstudien mit sehr kurzen Anschlussdrähten versehen und untersucht.

	ESD-Puls aus	Richtung 1										Richtung 2									
		1 kV		2 kV		5 kV		8 kV		16 kV		1 kV		2 kV		5 kV		8 kV		16 kV	
Diode	Funktionstest aus	Richtung 1	Richtung 2	Richtung 1	Richtung 2	Richtung 1	Richtung 2	Richtung 1	Richtung 2	Richtung 1	Richtung 2	Richtung 1	Richtung 2	Richtung 1	Richtung 2	Richtung 1	Richtung 2	Richtung 1	Richtung 2	Richtung 1	Richtung 2
1	ohne z-Diode	✓	✓	✓	✓	✓	✓	×	×	×	×	✓	✓	✓	✓	☠	☠	×	×	×	×
2	ohne z-Diode	✓	✓	✓	✓	✓	✓	☠	×	×	×	✓	✓	✓	✓	✓	☠	×	×	×	×
3	ohne z-Diode	✓	✓	✓	✓	✓	✓	☠	✓	×	×	✓	✓	✓	✓	✓	✓	×	☠	×	×
4	ohne z-Diode	✓	✓	✓	✓	✓	✓	☠	×	×	×	✓	✓	✓	✓	✓	☠	×	×	×	×
5	ohne z-Diode	✓	✓	×	✓	×	✓	×	×	×	×	☠	✓	×	✓	×	☠	×	×	×	×
6	mit z-Diode	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	×	☠	✓	✓	✓	✓	✓	✓	☠	✓	×	×
7	mit z-Diode	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	☠	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	☠	×
8	mit z-Diode	✓	✓	✓	✓	✓	✓	×	✓	×	×	✓	✓	✓	✓	☠	✓	×	☠	×	×
9	mit z-Diode	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	☠
10	mit z-Diode	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	×	×	✓	✓	✓	✓	✓	✓	☠	☠	×	×
11	mit z-Diode	✓	✓	✓	✓	✓	✓	×	✓	×	✓	✓	✓	✓	✓	☠	✓	×	✓	×	☠

Abb. 16: Ergebnis-Tabelle einer ungünstigen Schutzschaltung.

Das günstigste Schutz-Bauelement ist in einer kleinen Bauform verfügbar und wird von großen Herstellern (z. B. on-semiconductor) hergestellt. Nachfolgend sind die Ergebnisse für zwei verschiedene Chargen dieser Schutzdiode gezeigt.

Prüfprotokoll	2 kV								8 kV								16 kV							
	single						multi		single						multi		single						multi	
	plus			minus			plus	minus	plus			minus			plus	minus	plus			minus			plus	minus
161210	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
170220	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓

✓ = Puls schadfrei überstanden
× = Test nicht mehr möglich
☠ = Bauelement bei diesem Puls zerstört

Abb. 17: Prüfprotokolle für Hochleistungs-LED mit Schutzdioden

Die für den Schutz der wertvollen LED eingesetzten Doppel-Z-Dioden besitzen eine ausreichend schnelle Ansprechzeit, so dass auch nach repitativen Entladepulsen keine Änderung der Ausgangsleistung der LED messbar war. Damit kann auf eine Rekalibrierung nach einem ESD-Puls verzichtet werden. Dies ist insbesondere für Entladungen im direkten Kontakt, die zumeist unbemerkt bleiben, sehr wichtig. Die nebenstehende Abbildung zeigt eine Testleiterplatte für eine aktuelle Hochleistungs-LED (LZ4 mit 10 Watt Verlustleistung) mit integrierten Schutzdioden für jeden einzelnen Chip in dieser Vierfach-LED. Die Schutzdioden können kurzzeitig eine Leistung von 150 Watt abführen und begrenzen innerhalb von circa 1,5 ns die Spannung an dem entsprechenden LED-Chip auf 15 V. Durch ein vergleichsweise schnelles Speicheroszilloskop (500 MHz analoge Bandbreite) kann der zeitliche Verlauf des ESD-Pulses sichtbar gemacht werden. Hier-

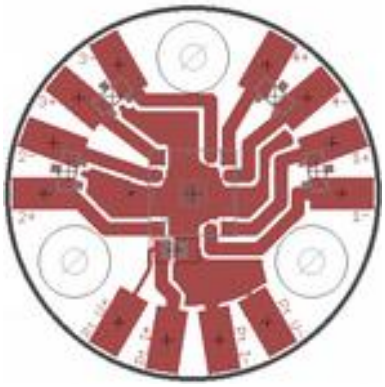


Abb. 18: Layout mit Schutzdioden für eine LZ4 von LEDEngin

bei wird die elektromagnetische Strahlung der Zuleitungskabel über ein einfaches, ungeschirmtes Kabel als Induktion aufgenommen. Durch einen Abschlußwiderstand im Bereich des Wellenwiderstandes von 50 Ohm sind damit Zeitkonstanten von 0,5 ns möglich und auch realisiert.

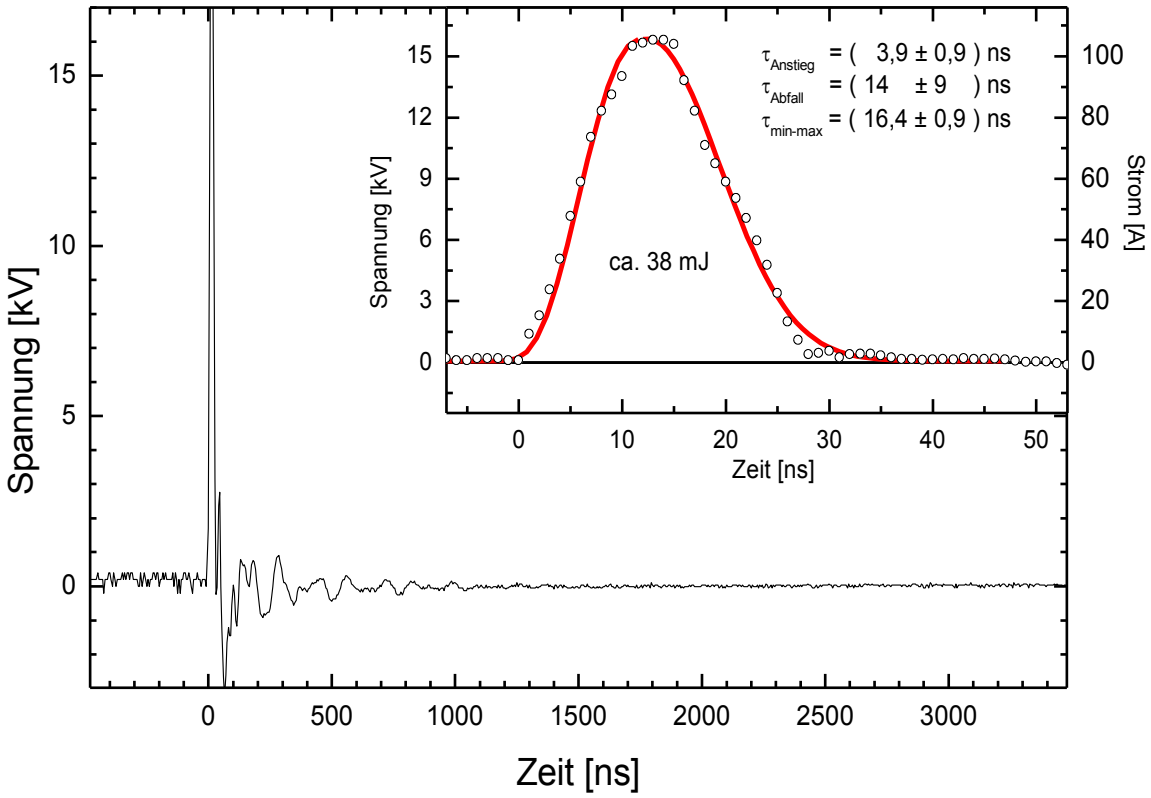


Abb. 19: Zeitlich aufgelöster ESD-Puls mit nominell 16 kV Entladespannung im HBM (human body model = Funkenentladung)

AP 6: Langzeitstabilität der Einheit LED-Elektronik
(06/09 – 04/10)

Hier sind verschiedene Konzepte ausgewählt und in verschiedenen Lebensdaueruntersuchungen mit und ohne Klimawechselbelastung im Betrieb genommen worden. Durch die im Jahr 2009 einsetzende Flut von neuen Herstellern und Bauformen ist die endgültige Festlegung auf ein Bauelement eines Herstellers erst sehr spät im Projekt im November 2009 erfolgt. Die vorliegenden Ergebnisse lassen den Schluss zu, dass eine von Beginn an favorisierte Lösung mit einem Linear-Regler die besten Ergebnisse liefert. Alle aktuellen integrierten Schaltkreise und Schaltregler sind zumeist auf Wirkungsgrad, geringe Bauform und Preis hin optimiert, nicht auf Langzeitstabilität. Die nachfolgende Abbildung zeigt den Ausgangsstrom bei einer Klima-Wechselbelastung zwischen den extremen Temperaturen -25 °C und +85 °C, die in der Praxis an einem Kalibriernormal nicht auftreten.

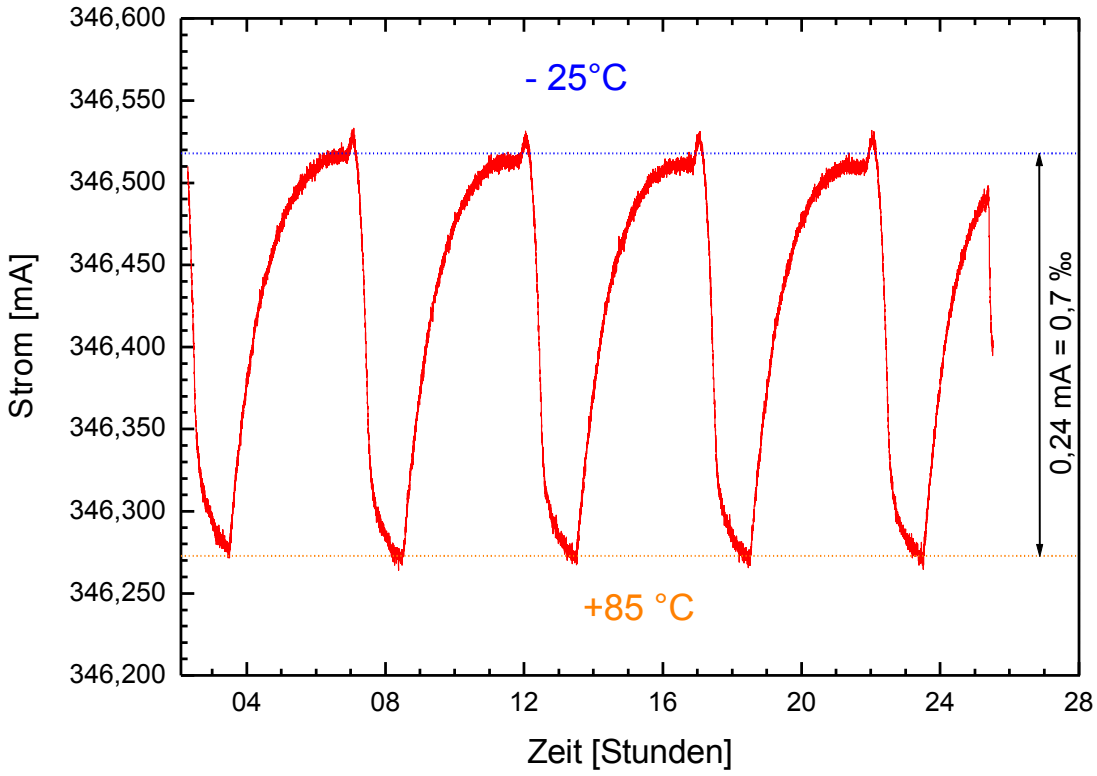


Abb. 20: Zyklentest einer Konstantstromquelle mit ausgesucht stabilem Linearregler und hochpräzisem Stromkoppelwiderstand

Real liegen die Temperaturen für ein solchen Normal bei Laborbetrieb zwischen 18 und 28 °C. Selbst wenn die Konstantstromquelle nicht thermisch stabilisiert wird, was nach den vorliegenden Ergebnissen auch nicht notwendig ist, kann von einer Genauigkeit besser 60 ppm ausgegangen werden. Die Langzeitstabilität ist zunächst über einen Zeitraum von 100 Stunden erfasst worden. Hier haben sich vor allem Rauschen im Strom gezeigt. Eine Drift bzw. Degradation konnte nicht signifikant erfasst werden. Die nächste Abbildung zeigt den Verlauf des Stromes mit der Zeit und einigen Auswertungen zur Messung. Hier ist die gleiche Schaltung wie in Abbildung 20 untersucht worden.

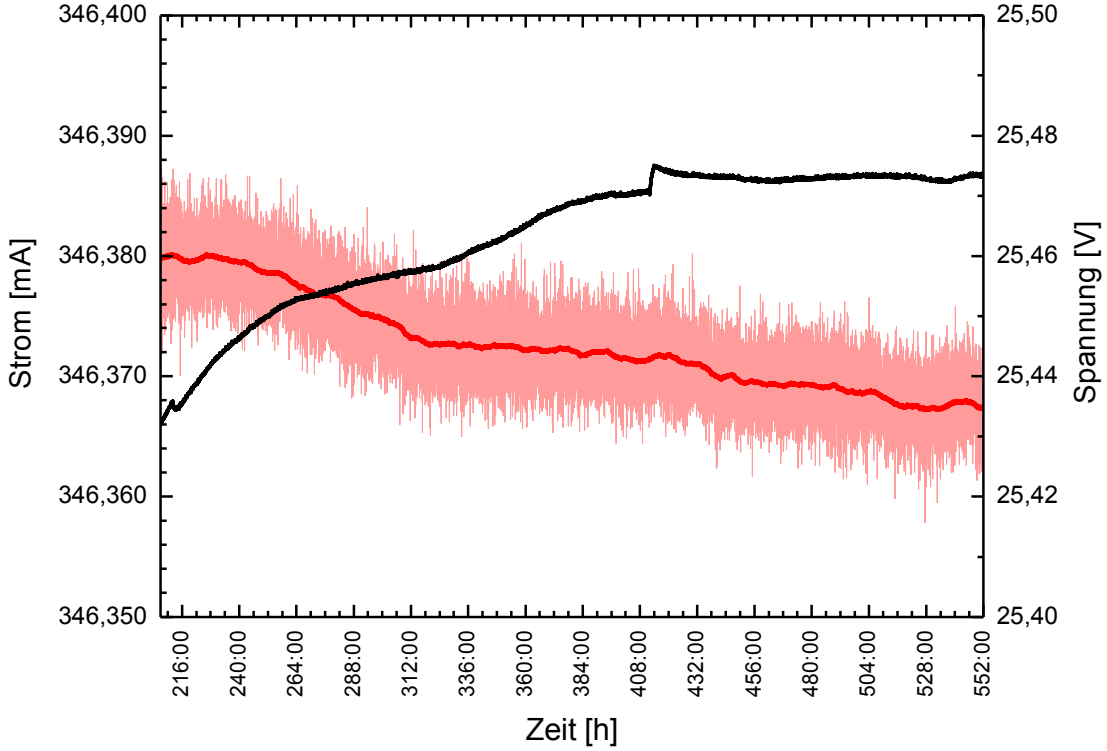


Abb. 21: Strom und Spannungsverlauf über einen größeren Zeitraum. Drift, Rauschen und mögliche Degradation sind abschätzbar.

Die Langzeitmessung an der favorisierten Stromquelle zeigt eine Drift von 10 µA, der nicht zeitlich sondern durch die Drift in der Flussspannung begründet ist. Dies erkennt man an dem streng diametralen Zusammenhang zwischen beiden Größen. Diese Drift beträgt

$$\sigma = \frac{\Delta I}{\Delta U} = \frac{13\ \mu A}{40\ mV} = 0{,}325\ mA/V = 0{,}94\ ‰/V$$

Die optische Ausgangsleistung der LED hängt streng linear und physikalische begründet vom Flussstrom ab, so dass Schwankungen in der Flussspannung von wenigen Millivolt sich nicht auf die optische Ausgangsleistung auswirken werden. Problematischer bei der Langzeituntersuchung ist der Einfluss des Rauschens im Strom. Dieses ist zum großen Teil durch lange Zuleitungskabel an der Konstantstromquelle gegeben und in einem geschirmten Gehäuse mit kurzen Leitungen zur LED bzw. die Integration direkt auf der gleichen Platine einfach zu reduzieren. Zudem liegt die Größenordnung des Rauschens (± 2σ) bei konstanten 8,5 µA, die zeitliche Drift ist kleiner als 7 nA/h.

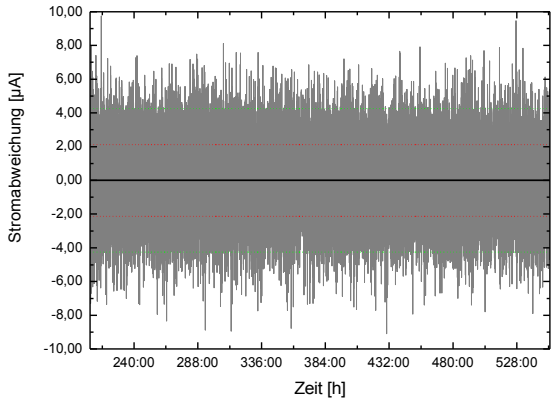


Abb. 22: Rauschen im Strom

Durch die Verlängerung des Projektpartners

stand bis Ende unseres Projektteils noch kein komplettes Labormuster des Kalibriernormales zu vollständigen Langzeituntersuchungen zur Verfügung. Insbesondere die thermischen Rückkopplungen zwischen Gehäuse, Peltierelement und Isolierungen, der Luftschicht innerhalb des Moduls und Wärmebrücken sind schwer vorhersagbare Einflüsse. Dies Messungen werden auch nach Projektende in enger Abstimmung mit dem Projektpartner durchgeführt werden, um alle zuvor gemachten Entwicklungen zu verifizieren. Zur Zeit sprechen alle Erfahrungen der Projektlaufzeit für einen Erfolg des Labormusters.

AP 7: Vollständige Optoelektronische Charakterisierung des Labormusters
(06/09 – 06/10)

Alle Teilkomponenten, die optischen Einfluss haben könnten, wurden untersucht. Durch die im Jahr 2009 einsetzende Flut von neuen Herstellern und Bauformen ist die endgültige Festlegung auf ein Bauelement eines Herstellers erst sehr spät im Projekt im November 2009 erfolgt. Dadurch hat sich insbesondere dieses Arbeitspaket verschoben und teilweise verlängert. Im Rahmen der engen Zusammenarbeit mit Instrument Systems sind optisch relevante Fragestellungen in Bezug auf die Einklebung des Abdeckgläschens (Milchglas mit AR-Beschichtung), der Schwärzung des Innenraums und dem Aufsetzen eines Reflektormoduls direkt auf die LED geklärt worden. Sobald diese Komponenten nach Abschluss durch den Projektpartner vorliegen, kann die abschließende Charakterisierung des Labormusters erfolgen und die Teilmessungen an Schlüsselkomponenten verifizieren.

AP 8: Dokumentation und Abschlussbericht
(06/10 – 06/10)

Zahlreiche Ergebnisse der beschriebenen Arbeitspakete finden ihren Niederschlag in den Zwischenberichten, dem Abschlussbericht und den Projekttreffen und Besprechungen. Die vorliegende, abschließende Dokumentation aller Teilschritte, Zwischenergebnisse und erzielten Werte sind durchgeführt worden.

3. Darstellung der erreichten Ergebnisse

Die angestrebten technischen Funktionalitäten bestanden in

- der Entwicklung eines Normals für Lichtstärke im Bereich von einigen 1000 Candela
- der Entwicklung eines Normals für Lichtstrom im Bereich bis 1000 Lumen
- der schnellen Betriebsbereitschaft von weniger als einer Minute
- der längeren Rekalibrierzeiten als bei konventionellen Normalen
- der höheren Lebensdauer als bei konventionellen Normalen
- der größeren Ähnlichkeit des Normals zu den zu vermessenden Bauelementen

Die vorliegenden Labormuster, aufgebaut mit einer LZ4 von LEDEngin erreichen bei einem Betriebsstrom von 1000 mA einen Lichtstrom von nahezu 800 lm, so dass die angestrebte Funktionalität sowohl in Bezug auf den Lichtstrom als auch die Lichtstärke als im Rahmen der technischen Vorhersagbarkeit erfüllt angesehen werden kann. Die Betriebsbereitschaft der Module mit der neuen, integrierten Elektronik ist zur Zeit noch von der Peltiersteuerung abhängig. Die reine Konstantstromquelle erreicht einen thermisch stabilen Betrieb nach wenigen Sekunden. Mit einigem Zusatzaufwand, der gegenwärtig vom Kooperationspartner durchgeführt wird, ist auch mit der Gesamtelektronik in weniger als einer Minute eine Betriebsbereitschaft zu erreichen. Die hohe Lebensdauer ist in zahlreichen Untersuchungen an allen Teilkomponenten gezeigt worden. Alle Driften und Instabilitäten der Teilkomponenten lassen erwarten, dass das Gesamtmodul sicher eine längere Rekalibrierzeit als bestehende Lichtquellen erreichen werden.

4. Verwendung der FuE-Kooperations-Ergebnisse

Parallel zu der Abarbeitung der Forschungsaufgaben im Rahmen des Projektes sind durch die Kooperationspartner Vorbereitungen getroffen worden, die Ergebnisse nach Projektende zügig in Produkte umzusetzen. Beim OUT e.V. ist eine erweiterte und auf die Bedürfnisse von Instrument Systems angepaßte Möglichkeit geschaffen worden, LED für Kalibriernormale über lange Zeit einzubrennen und die Intensitäten zu protokolieren. Dadurch kann nach Abschluss des Projektes eine wesentliche Teilkomponente des neuen Kalibriernormals beim OUT e.V. entstehen und durch IS in neue Produkte eingebaut werden.

5. Einschätzungen der Marktaussicht

Es ist zu erwarten, dass in naher Zukunft komplette Kalibrier-Sets mit einem großen Spektralbereich durch IS angeboten werden können. Die Elektronik in dem Normal wird externe Geräte für Temperatursteuerung und Konstantstrom ersetzen können und damit deutlich konkurrenzfähiger als bestehende Lösungen sein. Die zur Zeit eingesetzten Geräte zur Versorgung von Kalibrier-LED bedürfen einer Investition von 15 k€. Desweiteren drängen in jüngster Zeit viele neue Hersteller von Hochleistungs-LED auf den Markt, wie auch die Geschäftsentwicklung der AIXTRON AG als Marktführer bei Epitaxie-Anlagen für LED aufzeigt. Dieser Trend wird noch entsprechend der Auftragsbücher von AIXTRON noch einige Jahre anhalten. Neben Wachstums-Reaktoren ist produktionsbegleitende Messtechnik unabdingbar. Hier stellt Instrument Systems zumindest in der Qualität die Marktführerschaft dar.

6. Gemeinsame Verwertung

Neben der durch den Kooperationsvertrag festgelegten Beteiligungen kann der OUT e.V. durch das Einbrennen und Vermessen der LED als wesentliche Kernkomponente in einer Auftragsleistung direkt an dem zu erwartenden Erfolg partizipieren.