

## **Sachbericht zum FuE-Vorhaben**

Reg.-Nr.: **MF170035**

FuE-Einrichtung: **Optotransmitter-Umweltschutz-Technologie e.V.**

Titel: **LED-Meter**

Projektlaufzeit: **01.10.2017 - 30.09.2019**

Berlin, den 30.09.2019

---

Name der Projektleiter: **Dr. Adrian Mahlkow / Sebastian Liehm**  
Tel.-Nr. der Projektleiter: **+49 30 609847-230 / -236**

Firmenstempel

---

Unterschrift der Projektleiter

---

Rechtsverbindliche Unterschrift

## 1. Zielstellung des Vorhabens

Es soll ein Messgerät für die absolute sowie spektrale Vermessung von LEDs zwischen 250 nm und 2500 nm entwickelt werden. Prinzipbedingt wird eine hohe Modularität und große Robustheit erreicht, sodass keine Rekalisierung durch den Anwender erfolgen muss. Durch diese Eigenschaften sowie der Tatsache, dass Messungen innerhalb weniger Millisekunden möglich sind, ist eine Einsatzbereitschaft sowohl im Service als auch zur Inlinekontrolle gegeben.

## 2. Durchgeführte Tätigkeiten im Vergleich zu den Arbeitspaketen des bewilligten Arbeitsplanes

(Arbeitsstand je Arbeitspaket darstellen, gewonnene Zwischenergebnisse)

Im Berichtszeitraum wurden folgende Arbeitspakete (AP) bearbeitet:

|                                                         |                     |
|---------------------------------------------------------|---------------------|
| AP1 - Recherche und Definition eines Pflichtenhefts     | (10/2017 - 11/2017) |
| AP2 - Charakterisierung ausgewählter LEDs               | (11/2017 - 09/2018) |
| AP3 - Auswahl und Charakterisierung von Photodioden     | (11/2017 - 05/2018) |
| AP4 - Thermische Charakterisierung der Photodioden      | (02/2018 - 06/2018) |
| AP5 - Entwicklung Degradationsmessplatz für Photodioden | (10/2017 - 02/2018) |
| AP6 - Degradationsuntersuchungen an Photodioden         | (12/2017 - 02/2019) |
| AP7 - Mathematische Modellierung                        | (02/2018 - 06/2018) |
| AP8 - Laboraufbau                                       | (03/2018 - 06/2018) |
| AP9 - Elektronikentwicklung                             | (06/2018 - 10/2018) |
| AP10 - Systementwicklung                                | (09/2018 - 03/2019) |
| AP11 - Softwareentwicklung                              | (09/2018 - 03/2019) |
| AP12 - Prototypenbau                                    | (11/2018 - 03/2019) |
| AP13 - Erprobung unter Realbedingungen                  | (03/2019 - 06/2019) |
| AP14 - Redesign                                         | (04/2019 - 08/2019) |
| AP15 - Dokumentation                                    | (10/2017 - 09/2019) |

---

## **AP 1: Recherche und Definition eines Pflichtenhefts**

**Laufzeit: 10/2017 - 11/2017**

Im Rahmen der aktualisierenden Marktrecherche von LEDs sind neben den bekannten Herstellern drei weitere Anbieter von Spezial LEDs identifiziert worden und bei zweien über den Distributor Epigap Bauelemente erworben worden. Darüber hinaus sind wissenschaftliche Veröffentlichungen analysiert worden, bei denen eine größere Marktnähe erkennbar war. Der für das Pflichtenheft wesentliche, relevante Spektralbereich kann damit auf 205 nm – 3200 nm festgelegt werden. Bei Nennstrom imitieren diese Bauelemente laut Datenblattangaben mindestens 0,5  $\mu$ W. Daher wird das Minimum der Intensitätsmessung auf 0,5  $\mu$ W festgelegt. Die Angabe einer oberen Leistungsgrenze erweist sich bei dem sehr dynamischen Markt der LED als sehr schwierig. Nunmehr existieren COB-Module mit über 200 W optischer Ausgangsleistung. Da bei solchen Leistungsdichten eine aktive Entwärmung der Fotoempfänger notwendig und schwierig wird, wird die Definition der oberen Leistungsdichte erst nach Abschluss des Arbeitspaketes 4 vorgenommen.

Seit der Antragstellung sind keine neuen Materialsysteme marktfähig geworden, sodass alle am Markt verfügbaren LEDs den vier Materialgruppen AlInGa<sub>N</sub>, AlInGa<sub>P</sub>, AlInGa<sub>As</sub> und AlInGa<sub>Se</sub> zugeordnet werden können. Von allen sind sowohl Emitter (LEDs) als auch Empfänger (Photodioden) erworben worden.

## **AP 2: Charakterisierung ausgewählter LEDs**

**Laufzeit: 11/2017 - 09/2018**

Nach der umfangreichen Kalibrierung des Doppel-Monochromators Spektralradiometers 320D von Instrument Systems in 2017 und den dabei vorgenommenen, mechanischen Anpassungen konnte durch den Erwerb zweier weiterer optischer Fasern der Einsatzbereich des Messgerätes zum einen maßgeblich erweitert und zum anderen weiter vereinfacht werden. Der im letzten Zwischenbericht dokumentierte Einsatz eines 1000 W konnte wieder zurückgenommen werden, zumal der erhebliche Wärmeeintrag des Strahlers in den Versuchsaufbau im optischen Tunnel die Wiederholbarkeit von teilautomatisierten Messregimen thermisch beeinflusste. Dies konnte in den parallel dazu gespeicherten Temperaturkurven in der dafür eingerichteten SQL-Datenbank deutlich nachgewiesen werden.

Anhand der zuvor aufgestellten Arbeitsanweisungen zur Durchführung der umfangreichen Messregime wurden erste LEDs charakterisiert und die jeweiligen Merkmalsausprägungen anhand der Variation der einzelnen Randbedingungen wie Flussstrom, Temperaturbereich und Wärmeabfuhr der Gegenkühlung gemessen. Durch eine Teilautomatisierung dieser Messregime konnte zudem der Umgang der

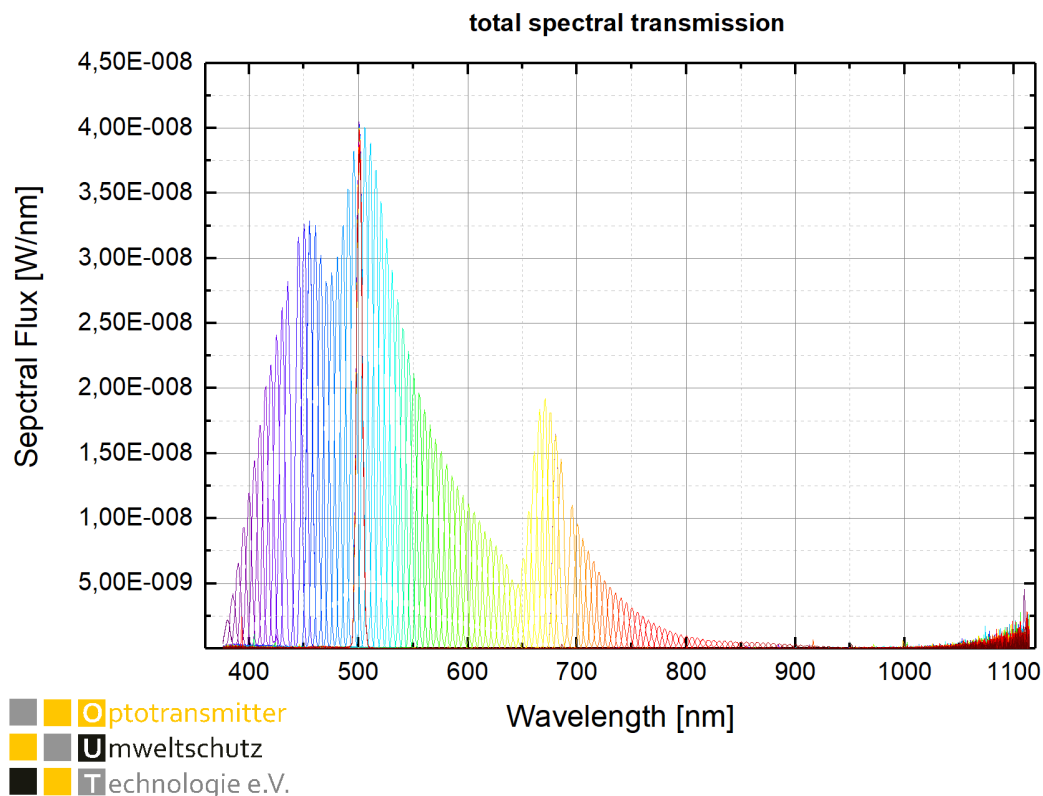
erfassten Parameter, deren Auflösungsgenauigkeit und auch die Anzahl der zu vermessenden Exemplare deutlich erweitert werden. Dies lieferte speziell für die nachgelagerte Modellbildung erhebliche Vorteile bei der Identifikation und Gewichtung der einzelnen Einflussfaktoren. Die dabei entstandene Datenmenge konnte durch Erweiterungen des Speicherplatzes der zentralen Instituts-NAS Rechnung getragen werden. Zum Zeitpunkt dieser Berichterstattung befinden sich gerade auch aufgrund der realisierten Automatisierung bereits über 120.000 Einzelmessungen im Datenpool.

Durch den Einsatz der im wissenschaftlichen Umfeld etablierten Bibliothek zur Datenanalyse umfangreicher Datenmengen Pandas konnte in Verbindung mit einer auf der Open-Source-Distribution Anaconda basierten Python-Umgebung und der dafür konzipierten Oberfläche Jupyter eine sowohl sehr mächtige als auch kostengünstige Basis für die Analyse und methodenbasierte Modellbildung nicht nur in diesem Projekt realisiert werden. Mit ihr war es möglich, den Umfang der im Folgenden zur Modellbildung betrachteten Eingangsgrößen der LED-Charakterisierung von eingangs noch acht auf nun insgesamt 25 anzuheben.

### **AP 3: Auswahl und Charakterisierung von Photodioden**

**Laufzeit: 11/2017 - 05/2018**

Ausgehend von den in der vorangegangenen Berichtszeitraumphase erfassten Charakterisierungsmessungen erster Photodioden wurde durch die Anschaffung der zusätzlichen Fasern eine erneut höhere Auflösung der zum Charakterisieren eingesetzten Lichtquelle angestrebt. Durch die so gewonnene Charakterisierung des Messplatzes können detaillierte Aussagen zur beaufschlagten, wellenlängenabhängigen Sensitivität der einzelnen Photodioden gegeben werden. In **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** ist exemplarisch die Vermessung einer der Konfigurationen des Messplatzes anhand des Doppel-Monochromators Spektralradiometers 320D von Instrument Systems dargestellt.



**Abbildung 1** Spektrale Vermessung der lichtleitenden Faser zur Charakterisierung der beaufschlagten Strahlungsverteilung der einzelnen Photodiodenmessungen

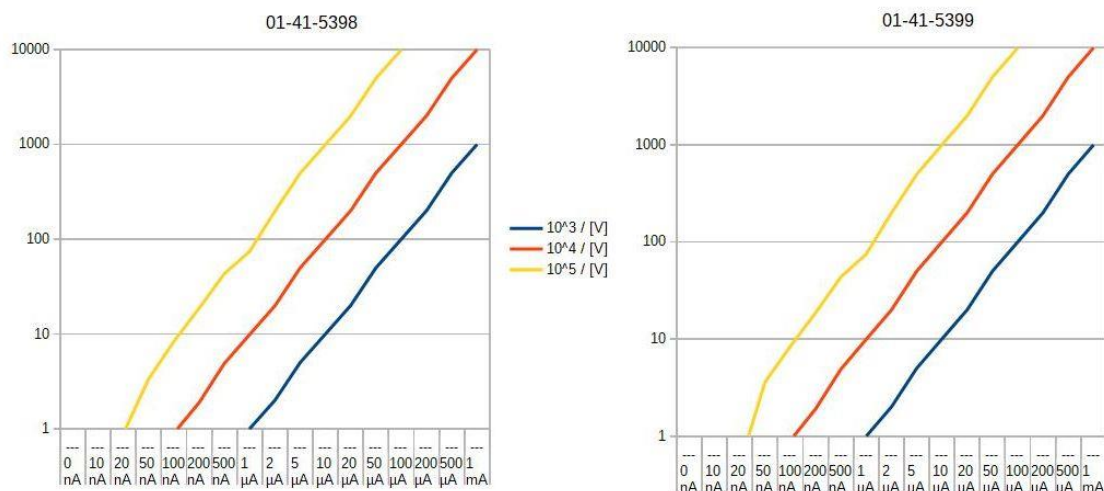
Die deutlich sichtbare Markierung bei 500 nm stammt aus den Referenzmessungen bei dieser Wellenlänge, um etwaige temperatur- und laufzeitabhängige Variationen bei der Strahlungsquelle zu berücksichtigen, so dass zunächst bei jeder 10. später bei jeder 20. Messung die Referenzwellenlänge überprüft wurde. Durch die feine Auflösungsgenauigkeit mit lediglich 2,5 nm Bandbreite beim Doppel-Monochromator konnten Messintervalle von 5 nm Abstand realisiert werden, was in der Summendarstellung der in **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** dargestellten 130 Einzelmessungen zu einem überproportionalen, da summierten Rauschanteil ab 1050 nm führte. Dies kann jedoch für die jeweiligen Einzelmessungen und somit auch für die spätere Modellbildung vernachlässigt werden.

Anhand einer Mikroskopleuchte KL150 von Schott und der zuvor durchgeführten Faserkalibrierung zur Bestimmung der Übertragungsfunktion von Strahlungsquelle und aufgebauter Messplatzapplikation konnten die wellenlängenabhängigen Sensitivitäten der einzelnen Photodioden sehr detailliert charakterisiert werden.

## AP 4: Thermische Charakterisierung der Photodioden Laufzeit: 02/2018 - 06/2018

Die thermische Charakterisierung erfolgte analog zu den bereits seit Jahren im optischen Labor durchgeführten Untersuchungen an LEDs. Der Messaufbau musste dafür lediglich an die einzelnen Bauformen der jeweiligen Photodioden angepasst werden, damit die typenabhängigen Aufnahmen an das zentrale Peltierelement angesetzt werden konnten. Die Messprozedure konnte nach geringen Anpassungen der Ansteuerungsroutinen ebenfalls adaptiert werden. Die zum Teil recht geringen Photoströme insbesondere in den Randgebieten der Empfindlichkeitsbereiche mussten vor der Vermessung jedoch entsprechend extern verstärkt werden. Hier kamen DLPCA-200 Hochpräzisionsverstärker der Firma Femto zum Einsatz, die zuvor auf Exemplar- und Verstärkungsfaktorstreuung hin untersucht wurden.

In Abbildung 2 sind die doppelt-logarithmisch aufgetragenen Verstärkungskurven in



Abhängigkeit der jeweils eingestellten Verstärkungsfaktoren dargestellt. Hier hängt die Güte der Übertragungsfunktion maßgeblich von der eingangs durchgeführten Nullpunktkalibrierung ab, die vor jedem Messregim erneut präzise eingestellt werden muss.

Der enorme Aufwand bei der Charakterisierung der einzelnen, im späteren Messaufbau verbauten Einzelkomponenten rechnet sich bei der anschließenden Modellbildung, da so erheblich belastbarere Aussagen zur Messgenauigkeit und der Bestimmung von externen Einflüssen möglich sind. Auch robuste Komponenten, bei denen externe Einflüsse wie Temperatur oder Höhe der beaufschlagten Merkmalsausprägung nur geringe Auswirkungen auf die Messgenauigkeit haben, können

**Abbildung 2** Übertragungsfunktionen der genutzten Verstärkungsfaktoren über den gesamten Messbereich der beiden eingesetzten DLPCA-200 zur Verstärkung der Photoströme

später entsprechend bei der Modellierung berücksichtigt werden, da diese Teile keinen so hohen Detaillierungsgrad und somit geringere Komplexität bei der Simulation erfordern.

**AP 5: Entwicklung Degradationsmessplatz für Photodioden**  
**Laufzeit: 10/2017 - 02/2018**

Durch die Vorarbeiten im bereits abgeschlossenen Projekt „Hochleistung UV-Ofen“ konnte das in diesem Rahmen entwickelte und aufgebaute Laborgerät wie bereits im letzten Bericht ausführlich beschrieben für die Degradationsuntersuchungen und zur Unterscheidung von photochemischer und thermischer Degradation genutzt werden. Aufbauend auf den bereits zahlreich gesammelten Erfahrungen im Umgang mit diesem Laborgerät konnten die umfangreichen Degradationsuntersuchungen der einzelnen Materialpaarungen zeitnah abgeschlossen werden. Für Bauteile, die während der Projektlaufzeit noch hinzukamen, wurde zudem eine einheitliche Arbeitsvorschrift erstellt, so dass auch künftig die gleichen Randbedingungen für nachgeschaltete Zusatzuntersuchungen gewährleistet werden können. Die Wiederhol- und Vergleichbarkeit dieser Messungen sind wesentliche Voraussetzungen für eine modellbasierte Beschreibung der zeitlichen Veränderungen beim Einsatz von Bauteilen, die zum Teil unter sehr leistungsstarken Versuchsbestrahlung stehen. Dieses Verhalten exponenziert sich in seinen Auswirkungen bei außerhalb ihrer Spezifikation betriebenen Bauteilen noch zusätzlich.



**Abbildung 3** Frontansicht des im Betrieb befindlichen Hochleistungs-UV-Ofen zur künstlichen Alterung von Bauteilen durch Beaufschlagung von vorab definierten Strahlungsdosen

---

**AP 6: Degradationsuntersuchungen an Photodioden**  
**Laufzeit: 12/2017 - 02/2019**

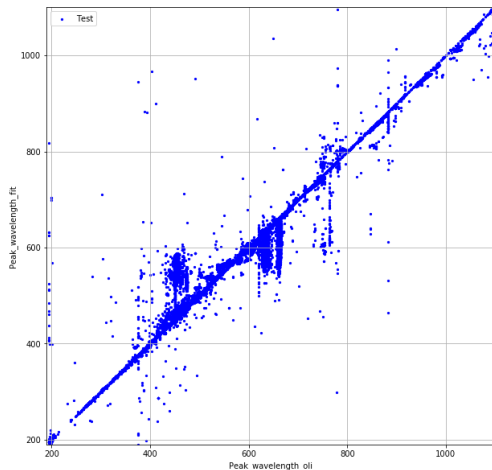
Durch die bereits im ersten Zwischenbericht beschriebenen Degradationsleiterplatten für Photodioden in bedrahteter und in SMD-Bauweise konnten die ersten Arbeiten an den eingangs verfügbaren Chargen an Photodioden sehr zügig abgeschlossen werden. Parallel zu den beschleunigten Degradationsuntersuchungen anhand des in Abbildung 3 dargestellten Hochleistungs-UV-Ofens wurden zusätzlich auch einzelne Modelle für eine Langzeituntersuchung aufgebaut, um den beschleunigt generierten Ergebnissen noch die klassisch über zeitintensive Langzeitversuche erhaltenen, realen Messwerte und somit den in der Industrie etablierten Alterungsverfahren gegenüberstellen zu können. Die Gegenüberstellung von vorab beschleunigt degradierten und real gealterten Bauteilen zeigt, dass beide im Rahmen von Chargenschwankungen ein ähnlich reduziertes Schwanken und Rauschen von Messwerten liefern. Dies rechtfertigt somit den Einsatz von künstlichen Alterungsverfahren zur Generierung von stabilisierten Bauteilen zur Verbesserung der Langzeitmessungen.

**AP 7: Mathematische Modellierung**  
**Laufzeit: 02/2018 - 06/2018**

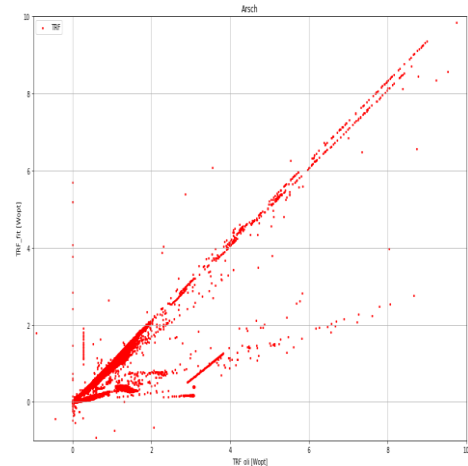
Mit Hilfe der in AP 2 beschriebenen Analyseumgebung zur Charakterisierung ausgewählter LEDs konnten die ersten Arbeiten zur Identifikation der maßgeblichen Merkmalsausprägungen bei der Erfassung der zu bestimmenden Bauteile identifiziert werden. Anhand der über den gesamten Datenbestand der letzten Jahre erfassten Optikmessungen laufenden Analysen zeigte sich, dass eine einfache Gaußfunktion zur Abstraktion der spektralen Verteilungsfunktion einer LED zwar bereits gute Ergebnisse bei der Zuordnung der zentralen Wellenlänge liefert, der Aufwand zur Bestimmung der Parameter einer Doppelgaußfunktion sich aber rechtfertigt, da die Ergebnisse deutlich exakter die gesuchte Peakwellenlänge der gesuchten LEDs liefern.

Die Gegenüberstellung der über die Simulation bestimmten Peakwellenlänge (gefittet) zu der von dem Spektrometer OL770 der Firma Instrument System bestimmten ist in Abbildung 4 dargestellt. Es ist dabei zu beachten, dass für die Simulation zunächst der gesamte Datenbestand mit aktuell bereits über 120.000 Einzelmessungen der letzten Jahre genutzt wurde. Die nicht auf der Winkelhalbierenden liegenden Ergebnisse werden dabei durch die Vielzahl an nicht-monochromatischen und meist farbstoffkonvertierten LEDs (bspw. weiße LEDs) innerhalb des Datenpools an optischen Einzelmessungen verfälscht. Klar ersichtlich ist aber die ablesbare Übereinstimmung von Simulationsmodell und professioneller Messtechnik. In Abbildung 5 ist der gesamte Strahlungsfluss eines

Bauteils als Parameter „total radiant flux“ als simuliertes Integral der spektralen Verteilung durch wellenlängenabhängige Messungen und der erneut vom professionellen Messgerät ausgewerteten Merkmalsausprägung gegenübergestellt. Auch hier wird ersichtlich, dass sich die jeweiligen Werte voneinander ableiten lassen können.



**Abbildung 4** Gegenüberstellung von gemessenen und gefitteten Peakwellenlängen



**Abbildung 5** Gegenüberstellung von gemessenen und gefittetem Strahlungsfluss

## **AP 8: Elektronikkonzept** **Laufzeit: 03/2018 - 06/2018**

Basierend auf den bereits in AP 4 beschriebenen Einsatz der zur Charakterisierung verwendeten DLPCA-200 Hochpräzisionsverstärker der Firma Femto, muss das Messsignal der einzelnen Photodioden sowohl bereichs- als auch intensitätsangepasst verstärkt werden. Hinzu kommt, dass die in **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** aus AP 3 aufgezeigten Sensitivitäten der unterschiedlichen Halbleitermaterialie innerhalb der Photodiodensubstrate nur einen Teil des gesamten, abzudeckenden Spektralbereichs abdecken. Es kann so zu Konstellationen kommen, bei denen angrenzende Photodioden nur ein sehr geringes Signal generieren können, diese Messwerte aber nicht überproportional verstärkt werden dürfen, um den Schwerpunkt der einstrahlenden Untersuchungs-LEDs nicht aus ihrer zentralen Spektralsignatur zu verschieben. Um im Rahmen der Modellbildung und Verifikation noch flexibel Anpassungen an den später festgelegten Verstärkungsfaktoren der einzelnen Kanäle vornehmen zu können, wurden neben dem Aufbau von statischen Verstärkerschaltungen auch in vier Bereiche separierte und über einen Mikrocontroller ansteuerbare Adapterplatinen entwickelt, die eine spätere Veränderung der Verstärkerleistung ermöglichen. Aufbauend auf den Erfahrungen aus vorangegangenen Projekten, wurde beim Design darauf geachtet, dass durch Pinkompatibilität diese Platinen auch bei später angepassten Photodiodendadapterplatinen unabhängig von der Kanalzugehörigkeit eingesetzt werden können.

**AP 9: Laboraufbau**  
**Laufzeit: 06/2018 - 10/2018**

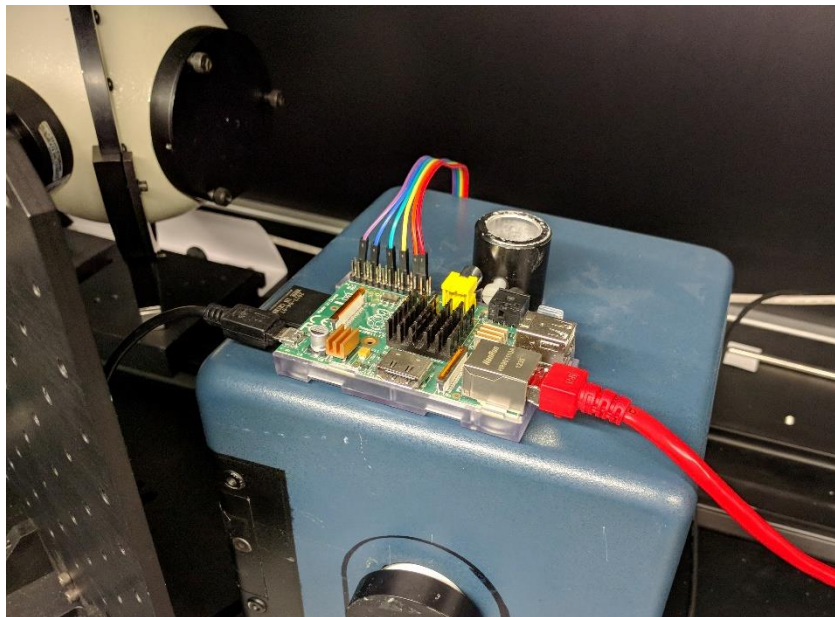
Der Aufbau der optischen Systeme erfolge auf der optischen Bank im Optiktunnel des institutseigenen Optiklabors unter Verwendung der DLPCA-200 Hochpräzisionsverstärker der Firma Femto. Der Messplatz wird fortlaufend temperaturüberwacht, so dass Abweichungen bei den Messungen mit etwaigen Temperaturveränderungen korreliert werden können. Durch die in Abbildung 6 gut sichtbaren, lichtdichten Türen ist der Gesamtaufbau während der im Laufe des Projektes zunehmend teilautomatisierten Messungen vor Streulicht und anderen externen Einflüssen weitestgehend abgeschirmt. Durch selbst angepasste Hülsen zur Montage der jeweiligen Paarungen der optischen Fasern ist ein schneller Wechsel für den jeweils benötigten Spektralbereich beim Vermessen gewährleistet. Der Messaufbau lässt sich in dieser Konstellation künftig auch für Auftragsmessungen beim Charakterisieren von kundenspezifischen Photodioden adaptieren, was zusätzliche Refinanzierungen der ansonsten zum Teil aus Eigenmitteln getätigten Investitionen ermöglicht.



**Abbildung 6** Optische Bank im oberen Teil des optischen Tunnels mit verkleideten Seitentüren zur optischen Abschirmung im klimatisierten Optiklabor des Instituts

## AP 10: Elektronikentwicklung Laufzeit: 09/2018 - 03/2019

Um eine zeit- und auch kostenintensive Neuentwicklung in diesem Stadium der Labormusterentwicklung zu vermeiden, wurde bei der Elektronikentwicklung auf die Ansteuerung von den jeweiligen Herstellern bereits am Markt positionierten Entwicklerplatinen - sogenannten Eval-Boards - zurückgegriffen. In Abbildung 7 ist der für diesen Einsatz ausgewählte Kleincomputer in Form eines Raspberry Pi im Versuchsaufbau dargestellt. Durch die auf Unix basierte Systembasis kann so sowohl in nativem C als auch in Python entwickelt werden.



**Abbildung 7** Standardisierte Entwicklungsplatine mit digitalen und analogen Ein-/Ausgängen als Basis für die Elektronikentwicklung

Durch den immer stärker werdenden Bereich der anwendergestützten Homeautomation im Selbstbaubereich (DIY), existieren auch noch weitere, vielfach adaptierbare Platinen mit vorbestückten Sensoren und Elektronikbaugruppen, die ein einfaches Testen zur späteren Komponentenselektion ermöglichen, ohne zuvor den kompletten Entwicklungsaufwand zur Beschaltung von Ansteuerungsperipherie immer komplexerer Kleincomputerkerne selbst bewerkstelligen zu müssen. Nach erfolgter Komponentenauswahl und Festlegung auf die zu favorisierende Prozessorfamilie kann in einem nachgeschalteten Redesign auf die nicht benötigten Komponenten verzichtet und das Ansteuerungsdesign adaptiert werden. Dies sichert vergleichbare Signalqualitäten, ohne mehrfache zyklische Entwicklungsphasen selbst durchlaufen zu müssen. Das Risiko von Entwicklungsfehlschlägen kann so zwar auch künftig nicht vollständig vermieden aber mit zunehmender Kompetenz in diesen hochkomplexen Controllerplattformen zumindest deutlich reduziert werden.

## AP 11: Systementwicklung

Laufzeit: 09/2018 - 03/2019

In Rücksprache mit aktuellen und ehemaligen Kooperationspartnern aus Industrie und Forschung wurden die für beide Anwendungsgebiete erforderliche Kenndaten zur Erstellung bedarfsgerechter Gehäusekonzepte aufgestellt. Basierend auf den dabei gesammelten Randbedingungen musste ein Kompromiss aus einer möglichst kompakten Messeinheit und den dabei zugrundeliegenden physikalischen Grenzgrößen zur Gewährleistung einer optimalen Homogenisierung der eingestrahelten Testquellen getroffen werden. In Abbildung 8 ist der Systemkern in Form zweier Halbschalen einer Ulbrichtkugel dargestellt, an den gleichzeitig bis zu drei unterschiedliche und speziell an den jeweiligen Anwendungsbereich angepasste Photodioden-Platinen appliziert werden können.



**Abbildung 8** Ausgeklappte Doppel-Halbschalen-Ulbrichtkugel als Basis der homogenisierten Testkörpereinstrahlung

Um bei den unterstützten Wellenlängenbereichen und der zugehörigen Auswahl an dafür zum Einsatz kommenden Photodioden so flexibel wie möglich zu bleiben, können nun bis zu drei unterschiedliche Photodioden-Platinen gleichzeitig zum Einsatz kommen. Die Kuglinnenoberfläche wurde bei der kundenspezifischen Anfertigung entsprechend groß dimensioniert, so dass die vier erforderlichen Portausschnitte die Erzeugung der diffusen Gesamtverteilung nur geringfügig stören.

---

**AP 12: Softwareentwicklung**  
**Laufzeit: 11/2018 - 03/2019**

Mit der Überführung der Modellbildung aus AP7 ergaben sich Konstellationen, die sich so auf einem Kleinst-Evalboard mit noch übersichtlicher Peripherieelektronik nicht in vollem Umfang umsetzen ließen. Die eingangs noch verfolgte Strategie, die auf der ausgewählten Entwicklungsplatine nicht benötigten Schnittstellen bei einem adaptierten Nachbau entfallen zu lassen und nur die erforderlichen Komponenten in den eigenen Entwurf zu übernehmen, gestalteten sich aufgrund der enormen Komplexität sowohl des mathematischen Modells als auch der dafür erforderlichen Systemumgebung zur Abbildung als nicht mehr praktikabel. Es wurde daher auch bei der weiteren Entwicklung auf die Verwendung der in AP10 aufgezeigten Kleinstcomputerplatine Raspberry Pi gesetzt, für die es aufgrund der breiten DIY-Community bereits eine Vielzahl von Shields genannten Erweiterungsplatinen mit entsprechend angepassten Gehäuseoptionen gibt.

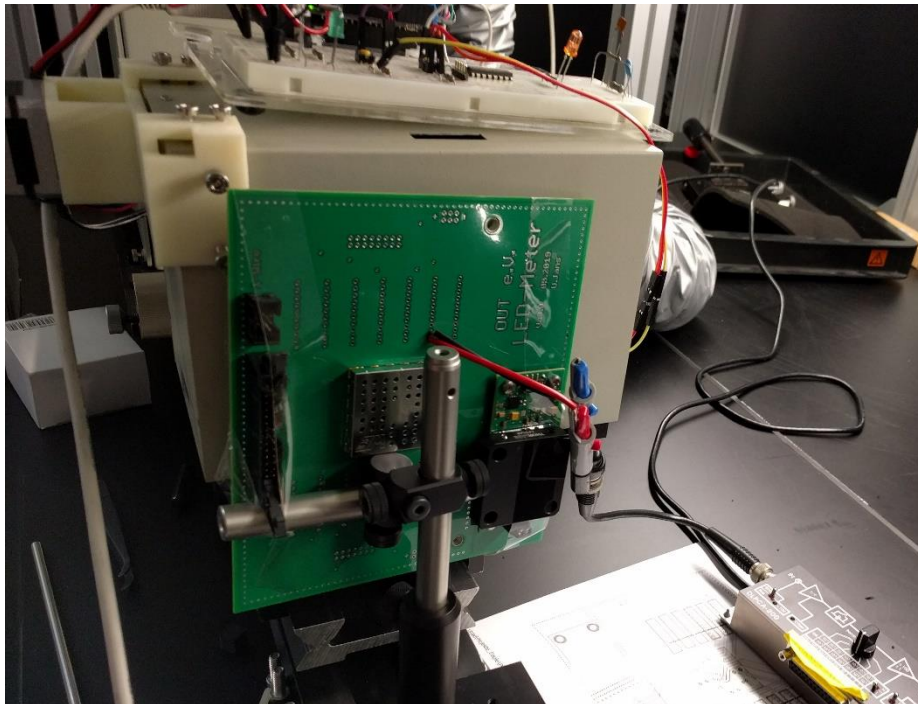
Die in Python begonnene Modellbildung kann, wenn auch mit deutlichen Abstrichen bei der Performance, weiter adaptiert werden, da die Entwicklungsplattform des Raspberry Pi entsprechende Python-Module zur Verfügung stellt. Die vor Projektbeginn noch als kritisch eingestufte Parallelisierung der Signalverarbeitung konnte als untergeordnet eingestuft werden, zumal der hardwareoptimierte C-Quellcode eine sehr performante Entwicklung ermöglicht und so trotz recht leistungsschwacher Hardware gute Ergebnisse liefert. Die Anpassungen zur Vereinfachung des mathematischen Grundgerüsts wurden in voneinander abgrenzbaren Bibliotheken konzipiert, um auch weiterhin nicht von der bisherigen Robustheit beim Identifizieren von monochromatischen LEDs abrücken zu müssen.

Durch die integrierte Netzwerkschnittstelle kann von jedem normalen Bürorechner sehr bequem remote auf das Entwicklungsboard zugegriffen werden. Entsprechend konzipierte Protokolle ermöglichen eine für den jeweiligen Einsatzzweck angepasste und betriebssystemunabhängige Kommunikation mit oder aus Applikationen auch ohne Anwenderoberfläche. Für den Laboreinsatz basiert die Kommunikation auf dem SSH-Protokoll, dessen Stack ebenfalls im Grundsystem integriert ist.

Durch die Beibehaltung des Entwicklungsboards Raspberry Pi als Ansteuerungsplatine ließen sich zeitintensive Entwicklungsressourcen zum Nachbau der eingesetzten Plattform einsparen, was eine Konzentration auf die mehrstufige Überbearbeitung der Messelektronik im Bereich der kanalabhängigen Photodiodenverstärkung in AP14 ermöglichte.

### AP 13: Erprobung unter Realbedingungen Laufzeit: 04/2019 - 08/2019

Nach Fertigstellung von Strahlkörper, Photodiodenmodulen und Ansteuerplatine muss der Aufbau zunächst kalibriert werden, damit die wellenlängenabhängigen Sensitivitäten der jeweiligen Photodioden entsprechend kanalbasiert vorverstärkt werden können. Dies erfolge erneut im Optiktunnel des institutseigenen Optiklabors anhand eines Monochromators, der das multispektrale Ausgangslicht einer breitbandigen Halogenlampe in schmalbandige Abschnitte reduziert, um die jeweiligen Wellenlängen typischer monochromatischer Leuchtmittel wie LEDs abzubilden. So kann anhand von zuvor erstellten Referenzmessungen mittels Spektrometer mit definierten Messwerten gearbeitet und die Messsignale der einzelnen Photodioden im Überlappungsbereich bestimmt werden. Dies ermöglicht die Abstimmung der jeweiligen Eingangswerte für das mathematische Modell und eine Adaptierung von kanalabhängigen Gewichtungsfaktoren, um ein robustes Bestimmungsverhalten für die einzelnen Ausgangsgrößen zu erzielen.



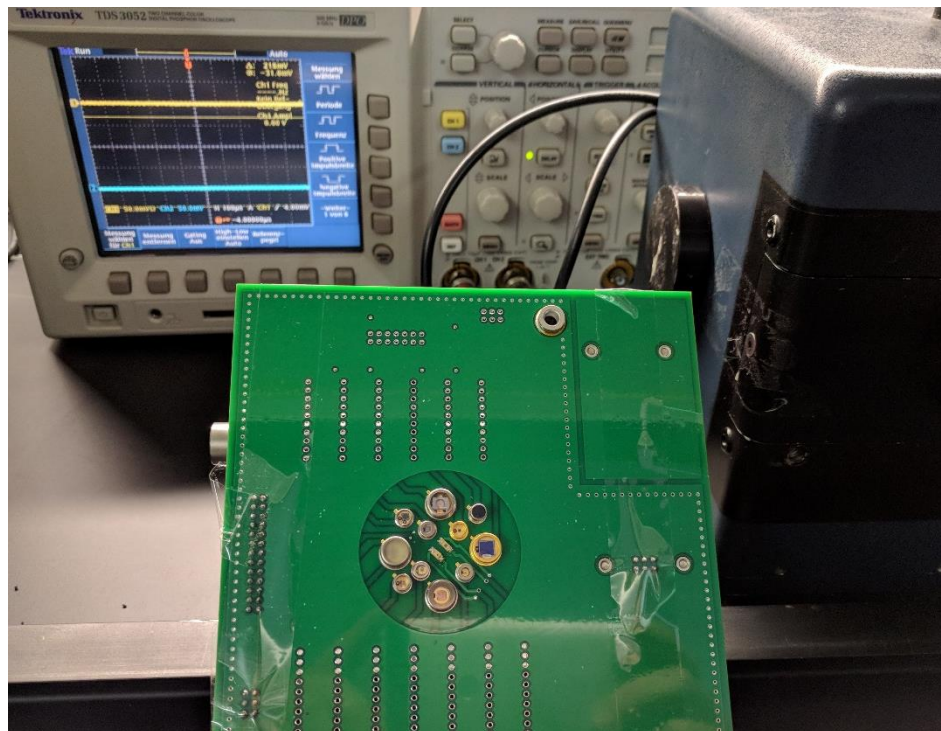
**Abbildung 9** Kalibrierung des Photodiodenmoduls zur Bestimmung der kanalabhängigen Verstärkungsfaktoren (hier Modul 3)

In Abbildung 9 ist das Kalibrieren des Photodiodenmoduls 3 unter Einsatz des eingangs beschriebenen Monochromators mittels Referenzverstärker von Femto dargestellt. Bei der anschließenden Versuchsreihe kann auf den umfangreichen Messdatenbestand aus einer Vielzahl an optischen Bauteilcharakterisierungen der LED-Gruppe des OUT e.V. zurückgegriffen werden. Die dabei zuvor vermessenen monochromatischen LEDs können dabei als Basis für die Bewertung des mathematischen Modells herangezogen werden, da das Ergebnis der zugewiesenen ID zugeordnet werden kann.

## AP 14: Redesign

**Laufzeit: 08/2019 - 09/2019**

Durch die Entscheidung, auf einen speziell adaptierten Eigenentwurf bei der Ansteuerungsplatine zu verzichten, konnte sich auf das Optimieren des Photodiodenlayouts und die kanalabhängigen Verstärkerschaltungen konzentriert werden, um so ein möglichst rauscharmes Design zu realisieren. Dies ist insbesondere für die Eingangsgrößen des mathematischen Modells sehr wichtig, um ein hinsichtlich der Rechenzeit aufwändiges Mitteln via fließender Durchschnittsberechnung zur Reduzierung von Störgrößen zu vermeiden. Das Grundlayout der Empfängerplatinen ist dabei durch die Abmaße des Ulbrichtkugelgehäuses vorgegeben, so das hauptsächlich bei der Komponentenauswahl und der Bauteilpositionierung, der Schirmflächen und den mehrlagigen Durchkontaktierungen experimentiert wurde.



**Abbildung 10 Empfängerplatine mit vollständig bestückten Photodioden (letzter Stand mit 13 Einzelkanälen)**

In Abbildung 10 ist das Ergebnis einer iterativ überarbeiteten Empfängerplatine während einer bauteilcharakterisierenden Vermessung des Signal-Rauch-Verhältnisses dargestellt, bei der alle 13 Einzelkanäle jeweils mit einer speziellen Photodiode bestückt wurden. Anhand dieser Messungen können die Anpassungen bei jeder Redesignphase nachvollzogen, miteinander verglichen und anhand der Ergebnisse eingestuft werden. Insgesamt können drei solcher Empfängerplatinen an dem Laboraufbau montiert werden, um entweder besonders schwache Wellenlängenbereiche insbesondere in den Randbereichen des eingangs getroffenen Spektralbereichs zu verstärken oder enger gestaffelte Abschnitte in

kundenspezifisch definierten Wellenlängenbereichen anzubieten und so durch entsprechende Vorfilterung an ansonsten baugleichen Photodioden noch feinere Auflösungen zu etablieren.

#### **AP 15: Dokumentation**

**Laufzeit: 10/2017 - 09/2019**

Durch die über die gesamte Projektphase dokumentierten Teilabschnitte entstand für jeden Arbeitsschritt eine auch im Anschluss nachvollziehbare Datenerhebung, die künftige Anpassungen sowohl am elektrischen Design als auch der informationstechnischen Ansteuerung ermöglicht. Insbesondere eine spätere Überführung in ein verkaufsfertiges Produkt in Kooperation mit einem Industriepartner setzt eine sehr detaillierte Entwurfsdokumentation voraus, da bereits Kleinserienoptimierungen so erheblich schneller kommuniziert und umgesetzt werden können. Aufgrund der umfangreichen Messreihen wird aktuell auch an eine Veröffentlichung der wissenschaftlichen Hintergründe bei der Modellbildung und des über die Jahre angesammelten Messdatenbasis in Form eines Papers vorbereitet. Für die spätere Vermarktung hat dies zudem den Vorteil, einen erheblich umfangreicheren Verbreitungsgrad zu ermöglichen.

### **3. Zusammenfassung und Verwertung der Ergebnisse**

(einschließlich aufgetretene Probleme und deren Lösung bei der bisherigen Vorhabensbearbeitung)

Die ursprünglich geplanten Ergebnisse konnten fast vollständig erreicht werden. Es steht ein Degradationsmessplatz für Photodioden zur Verfügung, und auch die spektrale Charakterisierung von Photodioden ist nun routinemäßig möglich. Derzeit wird die vollständige Automatisierung dieses Messplatzes noch weiter vorangetrieben, um eine noch größere Anzahl von Photodioden verschiedener Hersteller charakterisieren zu können. Hierbei halten sich der Mehraufwand für die Automatisierung und die Zeitersparnis in Verbindung mit dem Vorhaben, diesen Messplatz künftig auch für externe Messaufträge bereitstellen zu können, die Waage. Dafür entsteht ein robuster Messplatz, der auch im Rahmen von anderen Projekten zur Charakterisierung von Photodioden nach einem standardisierten Protokoll eingesetzt werden kann. Einziges Problem bei dem Photodiodenmessplatz war die geringe Intensität am Ausgang des Doppel-Monochromators, diese konnte durch eine neue Strahlungsquelle mit optimierter Fasereinkopplung deutlich erhöht werden. Der Demonstrator des LED-Meters steht zur Verfügung und wird durch Erweiterungen in der Bediensoftware komplettiert. Dadurch kann das Konzept des LED-Meters jederzeit vorgeführt werden und neue Projekte beflügeln bzw. ermöglichen. Beim Kooperationsprojekt „Flickermeter“ konnte die hohe Messgeschwindigkeit zu Aussagen bei der Farbverschiebung innerhalb weniger Mikrosekunden führen, was das Konzept für den Laboraufbau deutlich verändert und verbessert hat.

### **4. Wirtschaftliche Verwertung der Ergebnisse**

#### *Darstellung der Marktsituation und des Marktes*

Im Bereich der schnellen und präzisen Spektrometer ist (wie schon bei Antragstellung) vor allem Instrument Systems mit einem Marktanteil von über 80 % bei der LED-Messtechnik mit ihrem Flaggschiff der CAS 140-Produktfamilie dominant. In direkten Gesprächen mit der Geschäftsführung und dem Leiter der FuE wurden die Möglichkeiten einer Umsetzung des LED-Meters über das Unternehmen bereits erörtert. Derzeitiger Stand ist, dass die Zeitdomäne unter 1 Millisekunde nur selten angefragt wird und daher zunächst die Zusammenarbeit mit dem OUT e.V. auf die Entwicklung von Kalibriernormalen im Weißen fokussiert wird. Sollten sich die Anfragen an Instrument Systems häufen, so ist hier eine über 20 Jahre gewachsene Vertrauenskultur gegeben, dass dann das LED-Meter als Messgerät in das Produktportfolio aufgenommen wird.

#### *Charakterisierung der Marktgröße und des angestrebten Anteils*

Die Einschätzungen über die Marktgröße seitens der Geschäftsführung von Instrument Systems gehen, basierend auf den aktuellen Verkaufszahlen und Marktanteil, von derzeit 500 verkauften Spektrometern der Klasse CAS 140 aus. Die noch höhere Messgeschwindigkeit wäre eine Ergänzung vor allem für die sehr hochfrequenten Produktionslinien, die hier den Produktionstakt in den Bereich von über 50 Hz bringen möchten. Dies bedeutet einen Produktanteil von weniger als 5 % und damit weniger als 25 Geräte pro Jahr, die mit einem LED-Meter erweitert werden würden.

### *Einschätzung der wirtschaftlichen Erfolgsaussichten und Transferkonzeption*

Dieser Marktzugang stellt den direktesten dar, da er ohne den Aufbau eines eigenen Vertriebsnetzes als reiner OEM-Hersteller auskommt. Daher wird dieser Weg weiter favorisiert und vorangetrieben. Eine weitere wirtschaftliche Verwertung der Forschungsergebnisse erfolgt des Weiteren

- im Rahmen der Forschungs- und Entwicklungstätigkeit im OUT e.V.
- im Rahmen des OUT e.V. durch Erwirtschaftung direkter Umsätze
- durch Erzielung von Umsätzen in KMU, die die Forschungsergebnisse des F&E-Vorhabens nutzen (indirekte Umsätze).

Da die direkte Vermarktung des LED-Meters noch etwas mehr Zeit benötigt, werden parallel dazu die gewonnenen Erkenntnisse einzeln vermarktet. Die Entwicklungen zur Ansteuer- und Messelektronik haben zu verbesserten Kenntnissen in diesem Bereich geführt und den OUT insbesondere bei der Verstärkerelektronik als Kooperationspartner attraktiver gemacht. So konnten, basierend auf den Ergebnissen ganz konkret zwei ZIM KF-Anträge („Flickermeter“ und „Kleinwindkraftanlage“), eine BMBF-Skizze („Zurrgurt“) beantragt und zwei Großaufträge eingeworben werden. Bei den ZIM KF-Projekten wurde eines bewilligt, bei der BMBF-Skizze steht die Entscheidung noch aus. Weitere Aufträge im Rahmen von Forschungsprojekten bezogen sich insbesondere auf die Aufnahme von Photodioden-Kennlinien im erweiterten Spektralbereich bis 3200 µm und die präzise Vermessung von Spektraldrift im Zeitregime unter einer Millisekunde.

### *Umsatzerwartungen im OUT e.V.*

Durch Dienstleistungen (Wirtschaftlicher Geschäftsbetrieb) in Form von Messungen, Analysen und Beratungen, die im Ergebnis des Vorhabens durchgeführt werden können, werden jährlich Umsatzerlöse im OUT e.V. in Höhe von ca. 20.000 € bis 25.000 € erwartet. Hier liegen die für dieses Jahr realisierten Umsätze mit derzeit 8.800 € im ersten Quartal etwas über den Erwartungen.

Durch Forschungsaufträge (Zweckbetrieb), die im Ergebnis des Vorhabens vom OUT e.V. durchgeführt werden können, können weitere Einnahmen in Höhe von ca. 50.000 € bis 60.000 € jährlich erzielt werden. Hiervon sind zum gegenwärtigen Zeitpunkt für das

---

Jahr 2020 bereits ein direkter FuE-Auftrag und ein TransferBonus i.H. von 46.000 € realisiert worden.

Die Verwertung der Projektergebnisse im ideellen Bereich durch das erfolgreiche Einwerben von neuen Projekten kann derzeit mit einem bewilligten ZIM KF-Thema mit 116.500 € für die Laufzeit von 18 Monaten angegeben werden. Bei den anderen Themen (u.a. ein IGF-Thema) stehen die Entscheidungen noch aus.

### *Genereller Nutzen und Umsatzerwartungen für KMU*

Eine Verwertung der erlangten F&E-Ergebnisse durch potentielle Anwender wird in einigen Jahren zu Umsatzerlösen in mehrfacher Höhe der Projektkosten führen. Bereits im Jahre 2021 könnten die prognostizierten indirekten Umsätze ein Mehrfaches der Projektkosten betragen.

Zudem führt die Nutzung der im OUT e.V. erzielten Forschungsergebnisse zur Ausweitung der Kooperationsbeziehungen, zur Schaffung neuer Geschäftsbereiche und neuer Arbeitsplätze sowie zur Erschließung neuer Marktsegmente durch die Nutzer. Es werden weiterführende zwei- und mehrseitige F&E-Kooperationsprojekte von F&E-treibenden KMU mit dem OUT e.V. als externer Industrieforschungseinrichtung und als F&E-Dienstleister auf dem Gebiet der Spektraluntersuchungen und schneller optischer Messtechnik erwartet.

### *Refinanzierung*

Unter Berücksichtigung von Umsätzen, die durch die Nutzung der Ergebnisse bei potentiellen Herstellern und Anwendern entstehen, refinanziert sich das Vorhaben ca. zwei bis drei Jahre nach Abschluss des Projektes. Die Refinanzierung des Eigenanteils des OUT e.V. erfolgt im Wesentlichen bereits in anderthalb Jahren nach Abschluss des Projektes.

### *Zusammenfassende Einschätzung*

Unter Berücksichtigung der zu erwartenden direkten und indirekten Umsatzerlöse sowie der kurzen Refinanzierungszeiten sind die finanziellen Erfolgsaussichten hoch.

### *Transfer über bestehende Netzwerke*

Der Transfer der F&E-Ergebnisse erfolgt im Wesentlichen auf der Grundlage der seit mehreren Jahren erfolgreich operierenden Netzwerke. Darüber hinaus ist der OUT neues Mitglied in den Netzwerken „AgriPhotonik“, „DigiProEW“, „MoDiSeM“, „ProAnimalLife“ und „AmbuCare“, um nur die Netzwerke mit thematischer Bindung an die Projektergebnisse des LED-Meters zu nennen. Die Netzwerkpartner werden über die F&E-Ergebnisse informiert, und ihnen wird die Nutzung dieser Ergebnisse angeboten.

#### Transfer über bestehende und angebahte Kooperationsbeziehungen

Die F&E-Ergebnisse des OUT e.V. werden Kooperationspartnern zur Nutzung angeboten und sind darüber hinaus Grundlage zur Einwerbung von Forschungsaufträgen. Der OUT e.V. unterstützt derzeit den Hersteller Instrument Systems bei Maßnahmen zur Generierung eines Marktbedarfes für das LED-Meter. Insbesondere leistet der OUT e.V. Beiträge zur Erstellung technischer Publikationen für Fachzeitschriften und zu Vorträgen im Rahmen von Konferenzen und Messeauftritten. Mögliche Nutzer der F&E-Ergebnisse und potentielle Hersteller werden vom OUT e.V. forschungsmäßig begleitet.

#### Transfer über bestehende Institutionen des Technologietransfers

Durchführung einer gemeinsamen Veranstaltung mit der OptecBB im Rahmen einer Online-Vorlesung mit Unterstützung durch die Innovationsagentur Berlin GmbH bzw. der Zukunftsagentur Brandenburg zur Ableitung weiterer Maßnahmen zur Nutzung und Nachnutzung der Ergebnisse. Gezielte Information von Technologie- und Gründerzentren sowie Innovations- und Technologieparks – vorrangig im Berlin-Brandenburger Raum – über die Ergebnisse und die Möglichkeiten der Nutzung. Präsentation der F&E-Ergebnisse und Angebote zur Nachnutzung im Rahmen einer Forschungs- und Technologiestelle des OUT e.V. im Innovationspark Wuhlheide (IPW) in Berlin-Köpenick (Sitz des OUT e.V.).

#### Transfer im Rahmen des OUT e.V.

##### - externer Transfer

Die F&E-Ergebnisse werden den Mitgliedsunternehmen des OUT e.V. zur Nutzung angeboten und sind darüber hinaus Grundlage zur Einwerbung von Forschungsaufträgen.

##### weitere Maßnahmen:

- Erarbeitung von Preisvorschlägen für die aus dem Projekt resultierenden Dienstleistungen und Aufnahme der Ergebnisse in das Leistungsangebot des OUT e.V.
- Darstellung der F&E-Ergebnisse in den regelmäßig erscheinenden Forschungs- und Tätigkeitsberichten des OUT e.V. sowie im Internetauftritt

##### - interner Transfer

Die F&E-Ergebnisse werden allen Fachbereichen des OUT e.V. präsentiert mit dem Ziel, neue F&E-Projekte zu kreieren und Aufträge zu akquirieren.

##### weitere Maßnahmen:

- Durchführung regelmäßiger Beratungen mit Hauptnutzern zur effektiven Nutzung von Teilergebnissen sowie zur Fortsetzung der Arbeiten
- Realisierung einer Teilnutzung von Messgeräten und Messplätzen im Rahmen der technologischen Prozesse bei Hauptnutzern
- Durchführung eines Kolloquiums unter Teilnahme potentieller Anwender zur Darstellung von Ergebnissen und Teilergebnissen mit dem Ziel der Nutzung
- Prüfung von Ergebnissen bzw. Teilergebnissen auf Patentfähigkeit und Einreichung eines Patentes

- Überführung technologischer Teilergebnisse in die Labor- und Fertigungsprozesse bei Hauptnutzern
- Einreichung einer Veröffentlichung in einer Fachzeitschrift
- Durchführung eines gezielten Forschungspersonalaustausches zur Gewährleistung eines effektiven Technologietransfers in Hauptnutzer-Unternehmen.

## **5. Bewertung des aktualisierten Verwertungsplanes im Vergleich zum ursprünglichen Verwertungskonzept**

Insbesondere die zögerliche Nachfrage seitens Instrument Systems aufgrund leicht veränderten Marktverhaltens für sehr schnelle Spektrometer hat uns die Vermarktungsstrategie dahingehend anpassen lassen, als das die Verwertung der im Rahmen des Projektes erworbenen Fähigkeiten und Messmöglichkeiten im Vordergrund steht und die direkte Vermarktung eines zu einem Produkt weiterentwickelten LED-Meters zeitlich etwas in den Hintergrund hat treten lassen.

## **6. Angaben zu erworbenen bzw. angemeldeten Schutzrechten für Vorhabensergebnisse**

Die potentielle Anmeldung von Schutzrechten wird derzeit noch intern im Detail geprüft, eine erste Gebrauchsmusteranmeldung erfolgt derzeit auf einen kleinen Teilaspekt zur schnellen Messung von Spannungsveränderungen an den Photodioden.

## **7. Zusammenstellung aller erfolgten bzw. geplanten Veröffentlichungen**

Die Vorstellung der Projektidee und die Präsentation von Teilergebnissen bei potentiellen Kunden wiesen eine positive Resonanz auf. Erste Gespräche mit dem größten Interessenten an dem LED-Meter fanden und finden regelmäßig statt.

Geplant sind derzeit eine Darstellung der Projektergebnisse auf dem Innovationstag des BMWi bei der AiF Projekt GmbH, eine Darstellung auf dem Fachausschuss Licht & Beleuchtung des OptecBB an der TU Berlin, sowie ein Fachartikel in einem anwendungsnahen Fachjournal, wie IEEE.