

Schlussbericht zum Teilprojekt 11: Lichtquellen für nachhaltige Beleuchtungskonzepte

Im Verbundprojekt „Verlust der Nacht“: Ursachen und Folgen künstlicher Beleuchtung für Umwelt, Natur und Mensch

Zuwendungsempfänger	INP Greifswald, Felix-Hausdorff-Str. 2, 17489 Greifswald
Förderkennzeichen	033L038G
Teilprojekt	Lichtquellen für nachhaltige Beleuchtungskonzepte (TP 11)
Verbundprojekt	Ursachen und Folgen künstlicher Beleuchtung für Umwelt, Natur und Mensch. Verlust der Nacht
Projektlaufzeit	01.05.2010 – 31.12.2013
Projektleiter	Dr. Dirk Uhrlandt
Projektmitarbeiter	Dr. Steffen Franke, Dr. Ralf Methling, Dr. Heinz Schöpp, Karina Barkowski, Jacob Zalach

VERLUST
der
NACHT 



Inhalt

- I. Kurzdarstellung
 - I.1. Aufgabenstellung
 - I.2. Voraussetzungen, unter denen das Projekt durchgeführt wurde
 - I.3. Planung und Ablauf des Vorhabens
 - I.4. Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde
 - Angabe bekannter Konstruktionen, Verfahren und Schutzrechte, die für die Durchführung des Vorhabens benutzt wurden
 - Angabe der verwendeten Fachliteratur sowie der benutzten Informations- und Dokumentationsdienste
 - I.5. Zusammenarbeit mit anderen Stellen
- II. Eingehende Darstellung
 - II.1. Verwendung der Zuwendung und des erzielten Ergebnisses im Einzelnen, mit Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele
 - II.1.1. Wirkung von Licht auf Fische
 - II.1.2. Integrationsprojekt Feld (IP Feld)
 - II.1.3. Zusammenfassung
 - II.1.4. Literaturverzeichnis
 - II.2. Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises
 - II.3. Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit
 - II.4. Voraussichtlicher Nutzen, insbesondere Verwertbarkeit des Ergebnisses im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans
 - II.5. Während der Durchführung des Vorhabens dem ZE bekannt gewordener Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen
 - II.6. Erfolgte oder geplante Veröffentlichung des Ergebnisses nach Nr. 6



I. Kurzdarstellung

I.1. Aufgabenstellung

Das Verbundprojekt „Verlust der Nacht“ zielte darauf ab, in unterschiedlichen Disziplinen gemeinsam die ökologischen, chronobiologischen sowie kulturellen und sozioökonomischen Ursachen und Auswirkungen der zunehmenden Beleuchtung der Nacht in aquatischen und angrenzenden terrestrischen Lebensräumen – am Beispiel des Untersuchungsraums Berlin-Brandenburg – zu untersuchen. Darauf aufbauend sollten langfristig wissenschaftlich abgesicherte Indikatoren und Richtlinien für nachhaltige Beleuchtung definiert, Prioritäten beim Schutz von Mensch und Natur gesetzt sowie erste Beleuchtungskonzepte unter Berücksichtigung sozialer, energiepolitischer, gesundheitlicher und ökologischer Belange entwickelt werden. Ein inter- und transdisziplinärer Ansatz ist dazu zwingend erforderlich (Kooperation von Wissenschaft, Kommunen und betroffener Bevölkerung), um darüber hinaus erstmalig auch wissenschaftliche Grundlagen für eine Risikobewertung und Technikfolgenabschätzung zu legen.

Das Teilprojekt 11 ordnete sich in das Verbundprojekt ein, in dem interdisziplinär exemplarisch der nächtliche Einfluss von künstlichem Licht auf die Fauna in einem Auengebiet untersucht werden sollte. In enger Zusammenarbeit des INP Greifswald mit dem Fachgebiet Lichttechnik der TU Berlin (TU-Lt) und dem IGB Berlin wurden Lichtszenarien erarbeitet, welche die Untersuchungsmethoden der biologisch und ökologisch orientierten Partner zum Einfluss von künstlichem Licht auf Biotop unterstützten. Dabei sollte insbesondere ein Testfeld konzipiert, erstellt und vermessen werden, mit dem die Lichteinflüsse auf die Fauna an einem Wasserlauf innerhalb eines Kalenderjahres bestimmt werden können. Weiterhin waren Kurzzeitversuche im Freiland sowie im Labor vorgesehen, in denen einzelne Tierarten wie auch die Wirkung auf den Menschen genauer betrachtet werden. Die Kurzzeitversuche im Freiland sollten soweit wie möglich in das ganzjährig zu untersuchende Testfeld integriert werden. Damit würde ein erster Standard für ein Testfeld in der Erforschung von Lichtverschmutzung geschaffen. Langfristig sollten aus den auf diesem Testfeld gewonnenen Daten spektrale Empfindlichkeitskurven für verschiedene biologische und ökologische Systeme erstellt werden. Diese könnten dazu dienen, ein Anforderungsprofil für zukünftige Leuchtmittel für die Außenbeleuchtung zu erarbeiten. Die Bewertung dieser Leuchtmittel sollte dabei nicht wie bisher ausschließlich auf den visuellen Eigenschaften und der Energie-Effizienz beruhen, sondern auch ökologische Auswirkungen auf den Lebensraum und physiologische Beeinflussungen des circadianen Rhythmus des Menschen mit einbeziehen.

I.2. Voraussetzungen, unter denen das Projekt durchgeführt wurde

In das Verbundprojekt waren 8 Forschungsinstitute eingebunden, die in 14 Teilprojekten die Aufgabenstellung bearbeitet haben. Das Teilprojekt 11 wurde vom INP Greifswald verantwortet. Dort war es im Forschungsbereich „Materialien und Energie“ angesiedelt. In diesem Forschungsbereich wurde über viele Jahre zu Hochdruckentladungslampen geforscht. Diagnostik und Simulation von Plasmalampen gehören zu den Kernkompetenzen des INP. Mit dem Projekt PLACAR wurde bereits von 2006 bis 2009 erfolgreich ein Projekt zur biologischen Wirkung von Licht bearbeitet. Das Teilprojekt 11 „Lichtquellen für nachhaltige Beleuchtungskonzepte“ konnte an diese Erfahrungen anknüpfen, wobei der Schwerpunkt von der Forschung an Plasmalampen hin zur lichttechnischen Charakterisierung von Beleuchtungssituationen und der biologischen Wirkung von Licht verschoben wurde. Mit Dr. Steffen Franke konnte ein Erfahrungsträger auf dem Gebiet der Plasmalampen und der Lichttechnik

für die Bearbeitung des Teilprojekts gewonnen werden. Die Koordination des Verbundprojektes lag beim IGB Berlin in Person von Dr. Franz Hölker. Das Projekt wurde vom BMBF finanziert und vom Projektträger Jülich betreut.

I.3. Planung und Ablauf des Vorhabens

Die Aufgabenstellung des Teilprojekts 11 war von Anfang an darauf ausgerichtet, die lichttechnische Expertise des INP Greifswald in andere Teilprojekte einzubringen. Es war offenkundig erforderlich lichttechnisches Know-How in das Verbundprojekt zu integrieren, da ausführliche Vorkenntnisse in den soziologisch, medizinisch und biologisch orientierten Teilprojekten nicht vorausgesetzt werden konnten. Dieser Aufgabe hat sich das INP Greifswald gemeinsam mit dem Fachgebiet Lichttechnik der TU Berlin gestellt. Gemeinsam mit dem Fachgebiet Lichttechnik der TU Berlin wurde das Integrationsprojekt IP Feld im Teilprojekt 14 „Projektkoordination“ begleitet, das vom IGB Berlin koordiniert wurde. Darüber hinaus gab es eine intensive Zusammenarbeit des INP Greifswald mit dem IGB Berlin im Teilprojekt 9 „Lichtverschmutzung – Wirkung auf Fische“. Beratende Gespräche zur Beleuchtung in Versuchen gab es in den Teilprojekten 7 „Lichtverschmutzung – Wirkung auf Vögel“, Teilprojekt 8 „Einfluss von Lichtverschmutzung auf obligat nachtaktive Säugetiere (Fledermäuse)“ sowie Teilprojekt 10 „Evolutionsökologische Konsequenzen am Beispiel Stechmücken“.

Die Arbeiten am INP Greifswald wurden hauptverantwortlich von Dr. Steffen Franke durchgeführt. Darüber hinaus wurden zeitweise weitere Mitarbeiter des INP in dem Teilprojekt beschäftigt und mit konkreten Aufgaben betraut. Dazu gehörten Karina Barkowski, Jacob Zalach und Dr. Ralf Methling. Dr. Heinz Schöpp hat als festangestellter Wissenschaftler zeitweise inhaltlich an dem Projekt mitgewirkt und Ergebnisse auf einer internationalen Tagung präsentiert. Das Projekt lief vom 1. Mai 2010 bis zum 30. April 2013. Eine zuwendungsneutrale Verlängerung der Projektlaufzeit bis zum 31. Dezember 2013 wurde vom Projektträger bewilligt. In der Projektlaufzeit fanden 11 Workshops des Verbundprojektes statt, bei denen über den aktuellen Stand der Arbeiten berichtet wurde und weitere Aufgaben abgesprochen wurden.

In der ersten Projekthälfte konzentrierten sich die Arbeiten auf den Aufbau und die lichttechnische Charakterisierung einer Aquarienbeleuchtung für das Teilprojekt 9 am IGB Berlin. In der zweiten Projekthälfte kam die lichttechnische Charakterisierung des „IP Feld“ im Teilprojekt 14 hinzu. Zum Ende der Projektlaufzeit lieferte das INP Greifswald Beiträge zur Auswertung der Versuche im Teilprojekt 9.

I.4. Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde

Lichtverschmutzung als astronomisches Problem ist bereits seit mehr als einem Jahrhundert bekannt, rückte aber erst in jüngerer Zeit in den Fokus der Biologie und Medizin. In den 1980er Jahren wurde durch Laborexperimente nachgewiesen, dass Licht nicht nur auf die Stimmung und das Verhalten des Menschen, sondern auch direkt auf physiologische Parameter wie Herzschlag und Körpertemperatur Einfluss nehmen kann (Aschoff 1981). Wesentlich sind hierbei die endogenen Rhythmen im menschlichen Körper wie zum Beispiel der Schlaf- Wach-Rhythmus. Dieser ist besonders für die Beeinflussung durch Licht zugänglich, da Tageslicht natürlicherweise dazu dient, ihn mit dem äußeren Rhythmus von Tag und Nacht zu synchronisieren.

In vielen Untersuchungen der 1990er Jahre wurde der Mechanismus der Synchronisation weiter untersucht (Brainard 1988; Czeisler 1986), wobei unter anderem auch die spektrale Empfindlichkeitskurve bestimmt wurde. Zudem wurden verschiedene Effekte des Lichts, wie

Phasenverschiebung des Tagesrhythmus (Czeisler 1999) als auch Unterdrückung des üblichen abendlichen Anstiegs des Hormons Melatonin (Brainard 1994; Brainard 1997) nachgewiesen. Damit wurde zugleich deutlich, dass nächtliches Licht eine Veränderung des natürlichen metabolischen Ablaufs herbeiführen kann. Wie in Kohortenstudien mit Schichtarbeitern inzwischen aufgezeigt wurde, kann dies nicht nur zu Schlafstörungen führen, sondern langfristig u.U. auch zur Genese chronischer Erkrankungen beitragen, zum Beispiel von Herz-Kreislauf-Erkrankungen oder Krebs (Erren 2008; Knutsson 2003). Dennoch ist der Mechanismus der Einwirkung von Licht, und somit auch der durch Licht zur falschen Zeit verursachten Schädigung, nicht abschließend geklärt.

Bezüglich Tieren oder gar ganzen Ökosystemen ist nur sehr wenig bekannt. Die Lichtverschmutzung ist zwar in den letzten Jahren zunehmend in den Fokus der Forschung gerückt, die aktuellen Publikationen beschäftigen sich jedoch vor allem mit Verhaltensveränderungen einzelner Arten oder von Artengruppen. Dabei wird vor allem die Beobachtung der Tiere in bestehenden Beleuchtungssituationen eingesetzt, gelegentlich werden diese Untersuchungen durch physiologische Beeinflussungstests ergänzt. Die genaue Art der Lampen, ihre spektrale Zusammensetzung und Lichtintensität sowie die Abstrahlcharakteristik von Leuchten werden nicht näher betrachtet. Aus diesem Grund sind die Untersuchungen schwer zu bewerten und in geringem Maße vergleichbar, da Außenbeleuchtungssysteme entsprechend der Aufgabenstellung lichttechnisch sehr unterschiedliche Charakteristiken aufweisen. Ohne die neu zu gewinnenden Daten ist es insoweit nicht möglich, die Effekte zu quantifizieren und die Grundlage für die zukünftige Erstellung spektraler und intensitätsabhängiger Wirkungsfunktionen zu legen.

Es existieren nur wenige Veröffentlichungen (Vera 2010) die zumindest erste Hinweise dazu bieten. Insbesondere sind visuelle Empfindlichkeitskurven nur für wenige Tiere, überwiegend Nutztiere (Gilbert 1986; Prescott 1999), bekannt. Aus ihnen wird jedoch deutlich, dass Tiere oft eine wesentlich andere Wahrnehmung besitzen als der Mensch. So nehmen z.B. Vögel (Prescott 1999) auch Strahlung im nahen Ultraviolett (UV) wahr, die für den Menschen unsichtbar bleibt.

Zusammenfassend ist festzustellen, dass die gegenwärtig vorliegenden Daten nicht ausreichend sind, um die neuen Anforderungen, die an Lichtquellen gestellt werden, zu präzisieren. Es ist notwendig, verhaltensbiologische Beobachtungen auf eine solide physiologisch-physikalische Basis zu stellen.

Zudem fehlen bisher integrative Studien, welche die Expertise von Biologen, Lichttechnikern, Astronomen und Physikern zusammenführen. Jede dieser Disziplinen misst zum Beispiel Licht mit Geräten und in Einheiten, die in dem jeweiligen Fachgebiet üblich sind – Biologen mit PAR-Sensoren oder Luxmetern, Astronomen u.a. mit Sky-Quality-Metern, Lichttechniker mit Luxmetern und Leuchtdichtekameras, Physiker mit Spektrometern. Die Maßzahlen lassen sich aber nur bedingt vergleichen. Ein interdisziplinärer Austausch erscheint daher in diesem Kontext notwendig.

- **Angabe bekannter Konstruktionen, Verfahren und Schutzrechte, die für die Durchführung des Vorhabens benutzt wurden**

Für die Aquarienbeleuchtung, die am INP Greifswald aufgebaut und am IGB Berlin eingesetzt wurde, konnte keine kommerziell verfügbare Beleuchtungslösung eingesetzt werden. Es wurden auch keine Lampen verwendet, die typischer Weise für die Aquarienbeleuchtung eingesetzt werden. Insofern handelt es sich um eine individuelle Lösung unter Verwendung von Standard-Leuchtstofflampen, die über ein EIB/KNX-Bussystem angesteuert werden. Im Integrationsprojekt Feld (IP Feld) wurden kommerzielle Straßenleuchten (Schreder Saphir) eingesetzt. Im Rahmen des Projektes wurden verschiedene Luxmeter bzgl. ihrer Eignung für Messungen im Projekt evaluiert. Zuletzt kam eine modifizierte Version des Luxmeters der Firma Czibulla & Grundmann Berlin zum Einsatz.

- **Angabe der verwendeten Fachliteratur sowie der benutzten Informations- und Dokumentationsdienste**

Für Literaturrecherchen stand ein Zugang des INP Greifswald zum Web of Knowledge zur Verfügung (www.webofknowledge.com). Ausgewählte Literatur ist im Literaturverzeichnis (Abschnitt II.1.4) angegeben.

I.5. Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Die Aufgabenstellung des Teilprojekts 11 zielte darauf ab, die lichttechnische Expertise des INP Greifswald in andere Teilprojekte einzubringen. Es war offenkundig erforderlich lichttechnisches Know-How in das Verbundprojekt zu integrieren, da ausführliche Vorkenntnisse in den soziologisch, medizinisch und biologisch orientierten Teilprojekten nicht vorausgesetzt werden konnten. Dieser Aufgabe hat sich das INP Greifswald gemeinsam mit dem Fachgebiet Lichttechnik der TU Berlin gestellt. Die Begleitung des Integrationsprojektes Kommune (IP Komm) lag in der Verantwortung der Lichttechnik/TUB. Gemeinsam mit dem Fachgebiet Lichttechnik der TU Berlin wurde das Integrationsprojekt IP Feld im Teilprojekt 14 „Projektkoordination“ begleitet, das vom IGB Berlin koordiniert wurde. Darüber hinaus gab es eine intensive Zusammenarbeit des INP Greifswald mit dem IGB Berlin im Teilprojekt 9 „Lichtverschmutzung – Wirkung auf Fische“. Beratende Gespräche zur Beleuchtung in Versuchen gab es in den Teilprojekten 7 „Lichtverschmutzung – Wirkung auf Vögel“, Teilprojekt 8 „Einfluss von Lichtverschmutzung auf obligat nachtaktive Säugetiere (Fledermäuse)“ sowie Teilprojekt 10 „Evolutionsoökologische Konsequenzen am Beispiel Stechmücken“.

II. Eingehende Darstellung

II.1. Verwendung der Zuwendung und des erzielten Ergebnisses im Einzelnen, mit Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele

Die wesentlichen Aufgaben des Teilprojekts 11 bestanden in der Konzeption und Vermessung der Beleuchtung des Testfeldes (IP Feld) sowie in dem Aufbau und der Charakterisierung der Beleuchtung in Laborversuchen. Mit den Ergebnissen aus den biologischen Versuchen sollten Rückschlüsse auf zukünftige, nachhaltige Beleuchtungskonzepte gezogen werden.

Diese Ziele wurden im Wesentlichen erreicht.

Urbane Außenbeleuchtung wird stärker berücksichtigen müssen, dass die Abstrahlung von Leuchten in den oberen Halbraum weitgehend vermieden wird. Die Leuchtdichteverteilung der Leuchte sollte darüber hinaus so beschaffen sein, dass nur die notwendigen Flächen beleuchtet werden. Außerdem sollte die maximale Beleuchtungsstärke von öffentlichen Flächen im Interesse eines minimalen Einflusses auf angrenzende Ökosysteme begrenzt werden ebenso wie die maximale Leuchtdichte einer Leuchte. Wissenschaftlich validierte Grenzwerte können mit den bisher vorliegenden Ergebnissen jedoch noch nicht festgelegt werden. Selbst qualitative Empfehlungen für die spektrale Abstrahlcharakteristik von Leuchten können noch nicht angegeben werden. Dafür sind weitere Untersuchungen erforderlich. Die Verwendung einer Technologie, wie z.B. LED, Leuchtstofflampen oder Hochdrucklampen, garantiert allein noch keine verbesserte Umweltverträglichkeit der Außenbeleuchtung. Aspekte, wie z.B. die Vermeidung von zu scharfen Hell-Dunkel-Grenzen im Verkehrsraum oder die Reduzierung von Streulicht in nicht zu beleuchtende Flächen, sind unabhängig von der Lampentechnik zur berücksichtigen.

II.1.1. Wirkung von Licht auf Fische

Im Teilprojekt 9 „Lichtverschmutzung – Wirkung auf Fische“ waren unter anderem Laborexperimente mit Fischen in Aquarien geplant, für die eine geeignete Beleuchtung benötigt wurde. Hintergrund für diese Untersuchungen ist die Frage, wie die Beleuchtung von Flächen in Gewässernähe auf Fische wirkt. Konkreter ist zu fragen:

1. Wie wirkt nächtliche Beleuchtung z.B. auf ihr Reproduktionsverhalten oder ihren circadianen Rhythmus?
2. Welches Licht (Beleuchtungsstärke, spektrale Zusammensetzung) ist zu empfehlen, um negative Wirkungen auf Fische zu minimieren?

Es muss ein deutlicher Effekt von künstlichem Licht in der Nacht auf Fische erwartet werden, denn es ist bekannt, dass bei der Fischerei Fische mit Licht angelockt werden können (Matsumoto 2005; Okamoto 2008). Außerdem weiß man seit längerem, dass beleuchtete Brücken die Migration von Fischen behindern können, was für die Reproduktion der Fische nachteilig ist (Riley 2012). Im Kontext urbaner Beleuchtung stellt sich deshalb auch an diesem Beispiel das Spannungsfeld künstlicher nächtlicher Beleuchtung zwischen Sicherheit, Ästhetik und Ökologie dar. Sicherheit, weil auch auf Brücken die Verkehrssicherheit durch eine ausreichende Beleuchtung gewährleistet werden muss. Ästhetik, weil Brücken gerade als architektonische Wahrzeichen von Städten auch ästhetischen Gestaltungsmomenten unterliegen. Ökologie, weil die menschliche Zivilisation nicht zulassen kann, dass durch unbedachte Beleuchtung ein Verlust an Biodiversität provoziert wird.

Für die Beleuchtung von Aquarien standen zunächst zwei Fragen im Vordergrund:

1. Ab welcher nächtlichen Beleuchtungsstärke sind Wirkungen des Lichts auf die Physiologie von Fischen nachweisbar?
2. Welche spektralen Bereiche sind besonders wirksam bezüglich ihres Effekts auf die Physiologie von Fischen?

Es war also eine geeignete Beleuchtung zu finden, mit der diesen Fragen nachgegangen werden konnte. Das Design der geplanten Laborexperimente sah wie folgt aus. In einer ersten Studie sollten juvenile Barsche nachts einer weißen Beleuchtung unterschiedlicher Helligkeit ausgesetzt werden. In einer zweiten Studie sollten die Fische rotem, grünem und blauem Licht ausgesetzt werden, um Effekte der spektralen Verteilung des Lichts eingrenzen zu können. In jeder Studie sollte eine Referenzgruppe nicht beleuchtet werden. Von jeder Beleuchtungssituation waren mehrere Replikate erforderlich (siehe Abb. 1). Die Versuche sollten mit Plötzen wiederholt werden.

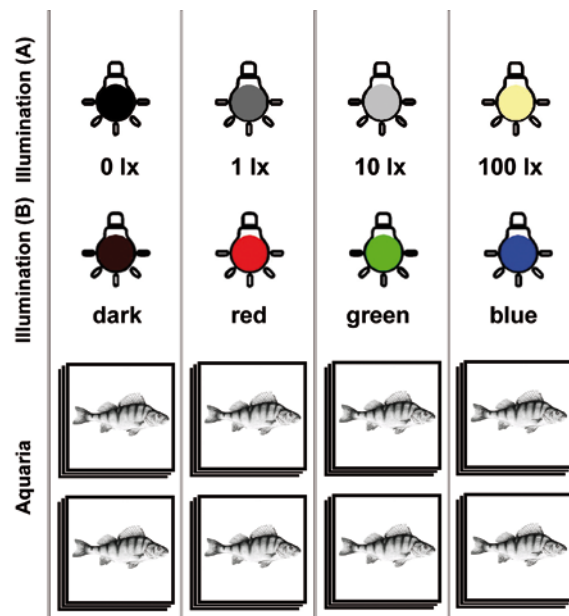


Abbildung 1: Beleuchtung (A) – weißes Licht unterschiedlicher Beleuchtungsstärke. Beleuchtung (B) – farbiges Licht in rot, grün und blau.

Barsche und Plötzen wurden ausgewählt, weil es sich bei ihnen um typische Vertreter von Süßwasserfischen in heimischen Gewässern mit sehr unterschiedlicher Lebensweise handelt. Der Barsch ist ein tagaktiver Räuber, die Plötze ein Friedfisch, der noch geringe Lichtintensitäten nutzen kann und auch in der Dämmerung aktiv ist. Auch das visuelle System der beiden Fischarten ist unterschiedlich ausgeprägt. Während es sich beim Barsch um einen Dichromaten mit zwei visuellen Rezeptoren im sichtbaren Spektralbereich handelt (Cameron 1982), ist die Plötze ein Tetrachromat mit vier visuellen Rezeptoren, von denen ein Rezeptor auch im nahen UV empfindlich ist (Downing 1986). Die unterschiedliche spektrale Empfindlichkeit der unterschiedlichen Rezeptoren in Fischeaugen macht bereits deutlich, dass die dem menschlichen Auge angepassten photometrischen Größen wie z.B. die Beleuchtungsstärke, die Farbtemperatur oder der Farbwiedergabeindex die visuelle Wahrnehmung bei Fischen nicht ausreichend beschreiben, es sogar Unterschiede zwischen verschiedenen Fischarten geben kann. Aus diesen Gründen sollte eine künstliche Beleuchtung für Laborexperimente möglichst breitbandig sein und über den gesamten sichtbaren Spektralbereich und im nahen UV emittieren. Damit soll vermieden werden, dass Lampen, die zwar eine für das menschliche Auge sehr gute Farbwiedergabe haben, die visuelle Wahrnehmung der Fische in unbestimmter Weise beeinflussen und damit die biologischen Ergebnisse verzerren.

1.1.1.1. Konzeption der Aquarienbeleuchtung

Es erscheint nahe liegend das künstliche Licht weitgehend dem natürlichen Tageslicht anzupassen. Dabei stellt sich aber zunächst die Frage: Was ist Tageslicht?

Abbildung 2 zeigt die horizontale Beleuchtungsstärke von Tageslicht an drei verschiedenen Tagen im Oktober 2010. Es werden Werte zwischen etwa 6 000 und 60 000 lx erreicht. Selbst an bewölkten Tagen werden unter freiem Himmel also Beleuchtungsstärken erreicht, die mindestens einen Faktor 10 größer sind als die Beleuchtungsstärken, welche für Büroarbeitsplätze vorgeschrieben sind (300-600 lx).

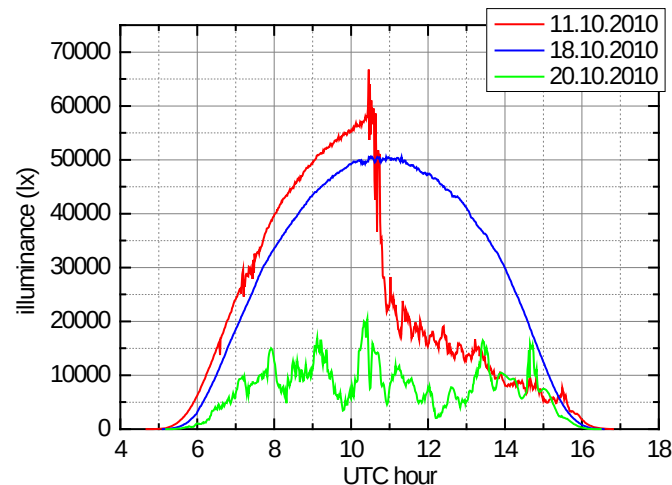


Abbildung 2: Horizontale Beleuchtungsstärke im Tagesverlauf für drei Tage im Oktober 2010. UTC ist die koordinierte Weltzeit.

Diese Dynamik an Helligkeit und seine Variabilität im Tagesverlauf lässt sich nur schwer mit einer künstlichen Beleuchtung nachbilden. Es müssen deshalb ein paar vereinfachende Randbedingungen definiert werden. Die erste Randbedingung lautet: Die Beleuchtungsstärke wird auf ca. 6 000 lx beschränkt. Mehr ist technisch nur schwer zu realisieren. Hinzu kommt, dass ein Wert von 6 000 lx deutlich über der Beleuchtungsstärke liegt, die in den meisten Aquarien zu finden ist. Andererseits könnte eine zu hohe Beleuchtungsstärke Blendung und/oder Stress auslösen, insbesondere da die Fische in Laboraquarien keine Rückzugsmöglichkeiten haben. Eine zu niedrige Beleuchtungsstärke könnte sich hingegen auf die Photogeschichte der Fische auswirken. Denn es wird erwartet, dass die physiologische Reaktion auf nächtliche Beleuchtung von der Beleuchtung am Tag abhängig ist (Vera 2010). Die zweite Randbedingung lautet, dass tagsüber eine gleichbleibende Helligkeit angeboten wird, und die dritte Randbedingung ist die Simulation der Dämmerung, ausgehend von dem Beleuchtungsniveau der Tagbeleuchtung. Damit ist klar, dass die künstliche Beleuchtung der Aquarien im Labor eher einem bewölkten Tag entspricht. In Abbildung 3 ist ein mögliches Szenario dargestellt. Es ist also während der Dämmerung ein Helligkeitsabfall über etwa drei Größenordnungen innerhalb von mindestens einer Stunde zu realisieren und ein Beleuchtungsniveau von 6 000 lx über den Tag. Der Abbildung ist übrigens auch zu entnehmen, dass die Beleuchtungsstärke auch an einem bewölkten Tag durchaus um einen Faktor 10 variiert.

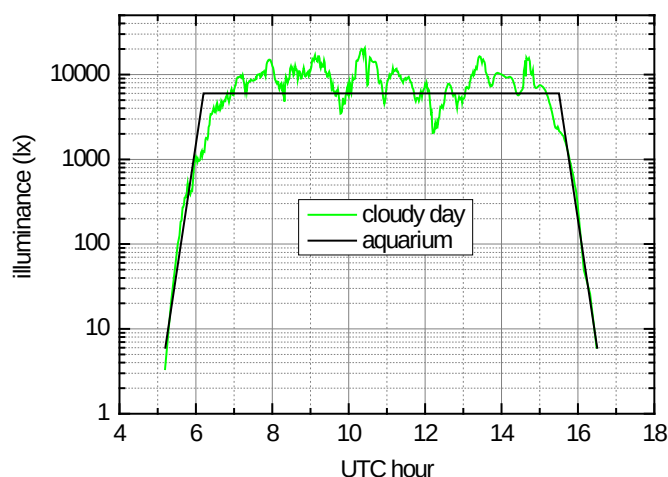


Abbildung 3: Beleuchtungsstärke eines bewölkten Tages in halblogarithmischer Darstellung und ein möglicher Helligkeitsverlauf künstlicher Aquarienbeleuchtung.

Die Farbtemperatur des Spektrums sollte ca. 5 500 K bis 6 500 K betragen. Ein entsprechendes Tageslichtspektrum bei 6 500 K ist in Abbildung 4 dargestellt. Auch wenn das Maximum der Emission im sichtbaren Spektralbereich liegt, zeigt das Spektrum von Tageslicht deutliche Anteile im UV und im nahen Infrarot (NIR). Diese Spektralbereiche müssen bei der künstlichen Beleuchtung der Aquarien ausgeklammert werden, da die meisten Lampen auf den sichtbaren Spektralbereich zwischen 400 und 700 nm beschränkt sind.

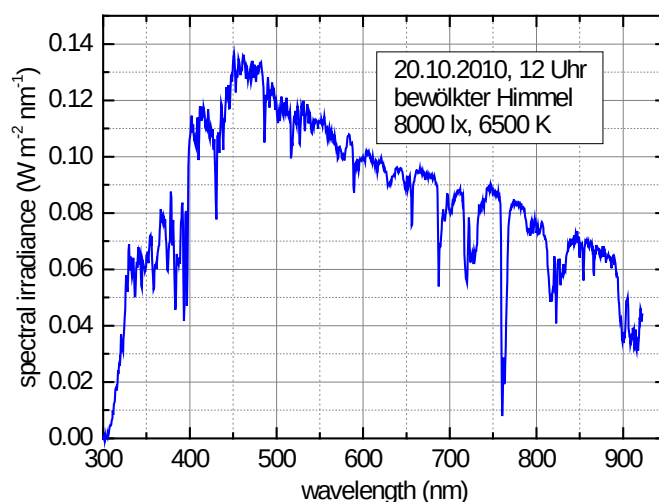


Abbildung 4: Spektrale Bestrahlungsstärke von Tageslicht für einen bewölkten Himmel.

Neben weißem Tageslicht sollte auch eine weiße Nachtbeleuchtung realisiert werden. In Abbildung 5 ist ein Beispiel für die spektrale Strahldichte des Mondlichts gegeben. Diese kann natürlich von dem Stundenwinkel des Mondes und den Wetterverhältnissen abhängen (Wegstrecke, Luftfeuchtigkeit, Aerosole). Grundsätzlich ist aber festzuhalten, dass Mondlicht eine geringere Farbtemperatur aufweist als das Tageslicht. Es ähnelt damit eher dem Spektrum des direkten Sonnenlichts beim Sonnenuntergang. Für die Laborversuche ist dies unerheblich, da die nächtliche Beleuchtung nicht natürliches Licht sondern künstliche Beleuchtung zwischen 1 lx und 100 lx simulieren soll. Die natürliche nächtliche Beleuchtungsstärke liegt dagegen meist unter 0.1 lx. Ein sinnvoller Ansatz ist daher, nachts dasselbe Spektrum auf die Fische anzuwenden wie bei der Tagbeleuchtung, um nicht eine weitere Variable in die Untersuchungen einzuführen.

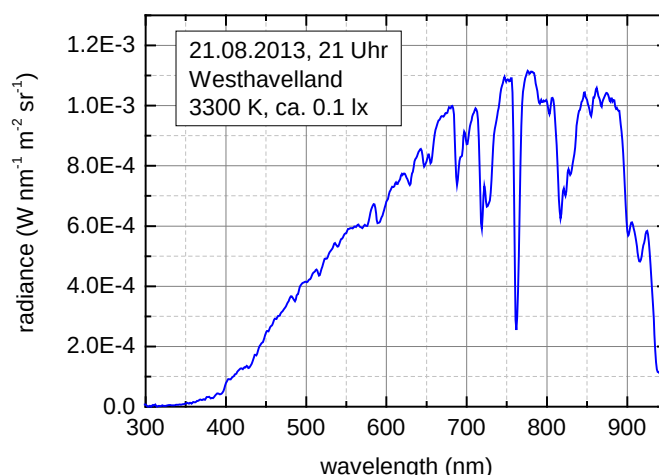


Abbildung 5: Spektrale Strahldichte des Mondlichts am 21.08.2013 um 21:00 Uhr im Westhavelland gemessen.

Ein herausragender Kandidat zur Simulation von Tageslicht wären Metallhalogenidlampen. Diese Lampen arbeiten bei hohen Drücken mit verschiedenen Füllbestandteilen, wie z.B. Iodiden der seltenen Erden. Die Strahlungsbeiträge dieser Füllbestandteile führen zu einem ausgesprochen homogenen Spektrum. Für Laborexperimente mit Aquarien sind diese Lampen aber ungeeignet, weil sie sich schlecht dimmen lassen. Das wäre aber notwendig, um unterschiedliche Helligkeiten einzustellen und die Dämmerung zu simulieren. Außerdem sind es Punktlichtquellen, bei denen eine Blendwirkung in Betracht zu ziehen ist, wenn nicht Vorkehrungen getroffen werden um das Licht diffus zu streuen. Schließlich gibt es diese Lampen bevorzugt für höhere elektrische Leistungen. Sie sind damit zu hell um ein einzelnes Aquarium gleichmäßig auszuleuchten.

Alternativ ist eine Beleuchtung mit LEDs in Betracht zu ziehen. Zum Zeitpunkt der Konzeption der Aquarienbeleuchtung waren LEDs aber definitiv zu lichtschwach, um eine ausreichende Beleuchtung von 6 000 lx Weißlicht zu garantieren. Sie sind zudem noch immer sehr teuer und bei dem Versuch weißes Licht aus farbigen LEDs zu mischen, ist mit spektralen Lücken in der Emission sowie mit Problemen bei der Langzeitstabilität des Mischspektrums zu rechnen.

Tatsächlich wurde die Tagbeleuchtung mit Leuchtstofflampen (T8/18W) realisiert. Dazu wurde zunächst das Spektrum unterschiedlicher Leuchtstofflampen (OSRAM Lumilux 965, Hagen Sun Glo, Hagen Aqua Glo, OSRAM Biolux) gemessen und bewertet. Die gleichmäßigste spektrale Verteilung bei einer Farbtemperatur in der Nähe des natürlichen Tageslichts wurde bei einer OSRAM Biolux festgestellt (siehe Abbildung 6). Mit drei Lampen dieses Typs wird eine Beleuchtungsstärke von etwa 6 000 lx in einem Abstand von etwa 10 cm vor der Leuchte gemessen. Die verbleibenden Peaks im Spektrum, die auf Spektrallinien des Quecksilbers zurückzuführen sind, können von den Rezeptoren in Fischeaugen nicht aufgelöst werden und stören daher nicht. Die weiße Nachtbeleuchtung wurde mit demselben Lampentyp umgesetzt, wobei die technische Herausforderung der Beleuchtung darin bestand, die Beleuchtungsstärke von ca. 0.6 bis 6 000 lx zu variieren. Das sind vier Größenordnungen Helligkeitsunterschied. Es ist aber klar, dass durch Dimmen von Leuchtstofflampen im günstigen Fall zwei Größenordnungen abgedeckt werden können. Für die weiße Nachtbeleuchtung muss das Licht also weiter abgeschwächt werden, z.B. durch abschirmende Bleche oder Neutralsichtfolien.

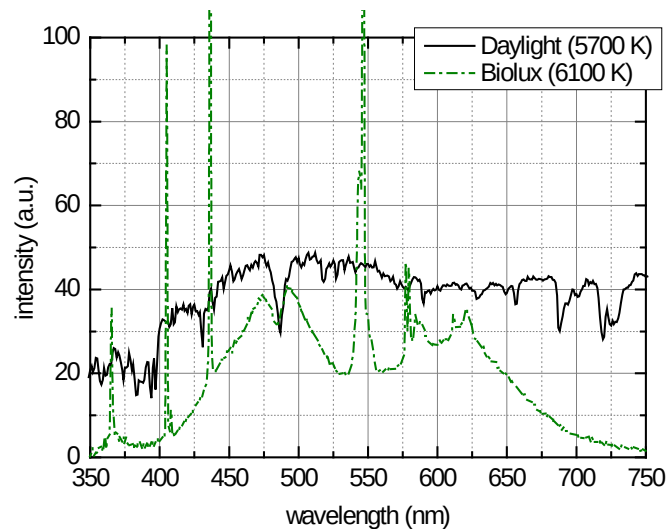


Abbildung 6: Vergleich eines Tageslichtspektrums mit dem Spektrum einer OSRAM Biolux.

Für die farbige Nachtbeleuchtung kamen Farbfilterfolien in Frage wie in (Vera 2010) oder farbige LEDs. Es zeigte sich aber, dass die verfügbaren Farbfilterfolien eine spektrale Bandbreite (FWHM = full width at half maximum) von mindestens 40 nm hatten. Farbige LEDs liegen zum Teil deutlich unter diesem Wert. Um die Wirkung unterschiedlicher Spektralbereiche bestmöglich zu trennen, ist eine möglichst schmalbandige Beleuchtung von Vorteil. Abbildung 7 zeigt die Spektren unterschiedlicher farbiger LEDs mit ihren Halbwertsbreiten (FWHM) und der Fläche unter der Kurve (Area). Die grüne LED von Tridonic offenbart eine erhöhte Emission im blauen Spektralbereich. Offensichtlich handelt es sich um eine blaue LED, deren Licht durch einen Leuchtstoff in grünes Licht umgewandelt wird. Diese LED scheidet damit für die geplanten Untersuchungen aus, weil möglicherweise auch bei Fischen die circadiane Wirksamkeit im Blauen viel stärker ist als in anderen Spektralbereichen. In diesem Fall könnte nicht ausgeschlossen werden, dass die gemessene Wirkung nicht durch das grüne Licht hervorgerufen wird sondern durch die Reststrahlung der blauen LED. Die amber-farbene LED füllt die spektrale Lücke zwischen grüner LED und roter LED und wird in die Konzeption auch deshalb einbezogen, weil sie ihr Maximum der Emission in der Nähe der Natriumdampflampen hat. Das wäre eine sehr gute Ergänzung zu den bisher geplanten Experimenten. Die Wahl fällt schließlich auf die blaue und die amber-farbene LED von Tridonic sowie die grüne und die rote LED von Lumitronix.

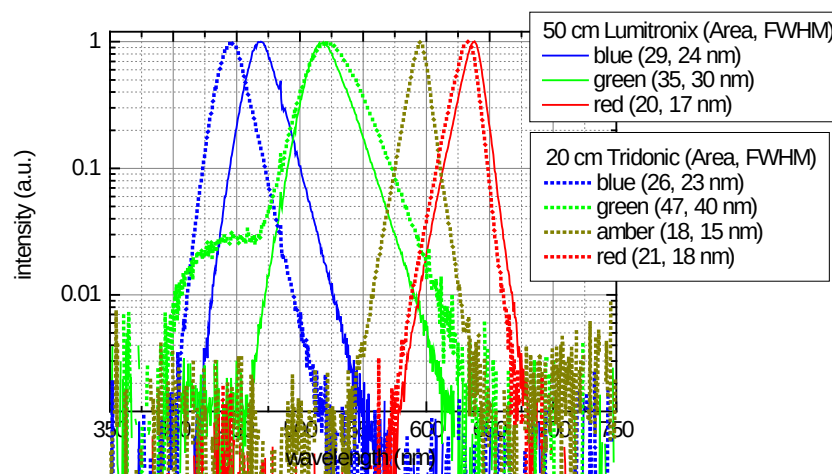


Abbildung 7: Vergleich farbiger LED-Spektren.

Bemerkenswert ist in diesem Zusammenhang, dass durch Optimierung der Intensitätsverhältnisse der ausgewählten einzelnen LEDs ein für den Menschen als weiß wahrgenommenes Licht gemischt werden kann (siehe Abbildung 8). Die Farbwiedergabe beträgt in diesem Fall $R_a = 82$ und die Farbtemperatur 6 000 K bei minimalem Farbabstand. Trotzdem scheidet diese Lösung als Tageslicht für die Aquarien aus, weil zum einen nur eine Beleuchtungsstärke von einigen Hundert Lux erreicht würde und weil es zum anderen zwischen den Peaks der LEDs spektrale Lücken gibt, weshalb das für den Menschen weiße Licht von Fischen nicht als weiß wahrgenommen werden muss, sondern auch farbstichig sein könnte.

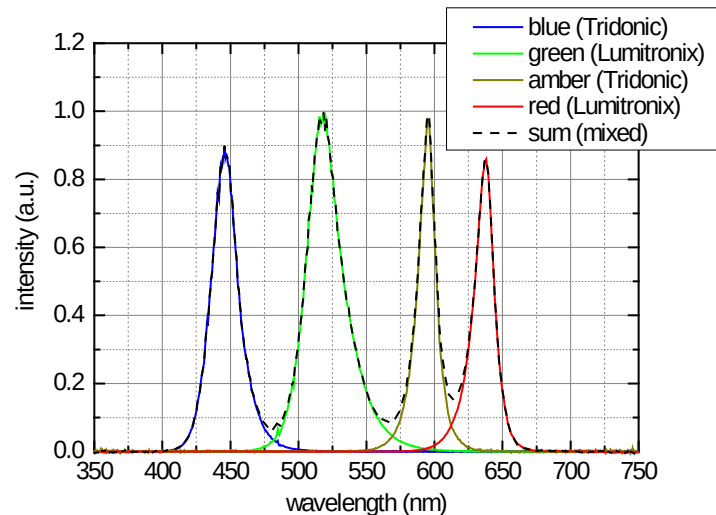


Abbildung 8: Optimiertes LED-Spektrum mit einer Farbtemperatur von 6000 K, einem Farbwiedergabeindex $R_a = 82$ und einem Farbabstand $DC = 0$.

Die Frage der Skalierung der einzelnen LED-Intensitäten stellt sich aber auch noch aus einem anderen Gesichtspunkt. Um biologische Wirkungen von Licht vergleichen zu können empfiehlt es sich mitunter, statt der spektralen Bestrahlungsstärke die Strahlung als Photonenflussdichte zu messen und anzugeben. Dahinter steht die Betrachtungsweise, dass pro Photon eine Kette biochemischer Reaktionen ausgelöst wird. Der Reiz ist somit proportional zur Anzahl der Photonen, wobei es eine wellenlängenabhängige Wahrscheinlichkeit gibt, dass ein Photon eine Reaktionskette auslöst.

Tabelle 1: Kennzahlen der ausgewählten farbigen LEDs.

	Blau	Grün	Amber	Rot
max. spektr. Bestrahlungsstärke ($\text{mW m}^{-2} \text{ nm}^{-1}$)	1.37	1.37	1.37	1.37
Full Width Half Maximum (nm)	23	35	18	20
Bestrahlungsstärke (mW m^{-2})	35	48	25	28
Photonenflussdichte ($\text{mE s}^{-1} \text{ m}^{-2}$)	0.131	0.208	0.123	0.148
Menschliche relative Melatoninunterdrückung	23	0.5	5E-3	2E-4

Tabelle 1 zeigt verschiedene Kennzahlen der ausgewählten farbigen LEDs. Normiert man die Intensität aller LEDs auf dieselbe maximale spektrale Bestrahlungsstärke, ergeben sich unterschiedliche Bestrahlungsstärken durch Integration über die Wellenlänge. Davon zu unterscheiden ist aber die Photonenflussdichte. Die Umrechnung von spektraler Bestrahlungsstärke $E_{\lambda,e}$ in eine Photonenflussdichte E_p gemessen in Mikro-Einstein pro m^2 pro s ergibt sich mit folgender Formel:

$$E_p = \int_0^{\infty} E_{\lambda,e} \frac{\lambda}{119.6} \frac{\mu E}{J \text{ nm}} d\lambda = [\mu E \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}] \quad (1)$$

Hier ist λ die Wellenlänge in nm. In den Versuchen mit farbiger Nachtbeleuchtung wurden die verschiedenen LEDs auf dieselbe Photonenflussdichte eingestellt. In der letzten Zeile von Tabelle 1 steht die menschliche relative Melatoninunterdrückung, um zu veranschaulichen, dass bei vergleichbarer Photonenflussdichte sich die biologische Wirkung um Größenordnungen unterscheiden kann. In einer verallgemeinerten Form lässt sich die Rate der biologischen Wirkung durch diese Gleichung berechnen:

$$R = k_p \int_0^{\infty} a_p(\lambda) \Phi_{\lambda,p} d\lambda = k_e \int_0^{\infty} a_e(\lambda) \Phi_{\lambda,e} d\lambda \quad (2)$$

Sie gilt sowohl für spektrale Photonenflussdichten (Index p) als auch für spektrale Bestrahlungsstärken (Index e). Entscheidend ist die wellenlängenabhängige Wirkungsfunktion a_p bzw. a_e , welche für die menschliche nächtliche Melatoninunterdrückung bezogen auf die spektrale Bestrahlungsstärke angegeben wird (DIN V 5035-100 2009). Die Faktoren k sind festzulegende Proportionalitätskonstanten.

Eine Wirkungsfunktion für die nächtliche Melatonin-suppression bei Fischen liegt nicht vor. Im günstigen Fall erlaubt die Versuchskonzeption die Bestimmung von Wellenlängenbereichen, in denen die Physiologie der Fische besonders empfindlich reagiert und einen deutlichen Effekt auf die Hormonexpression zeigt.

Aus den genannten Gründen ist die Anwendung der Maßeinheit Lux (lx) nicht zielführend für die Untersuchung von Fischen, weil sie auf das menschliche Hellempfinden bezogen ist. Sie wird trotzdem verwendet, um die Helligkeit der Versuchsbeleuchtung in ein Verhältnis zur Allgemeinbeleuchtung zu setzen, die auf menschliche Bedürfnisse ausgerichtet ist sowie zur Veranschaulichung der vom Menschen empfundenen Helligkeit.

Grundsätzlich ist festzuhalten, dass bei der Untersuchung der biologischen Wirkung von Licht immer die wellenlängenaufgelöste Verteilung in Einheiten der spektralen Bestrahlungsstärke ($W \text{ m}^{-2} \text{ nm}^{-1}$) und/oder spektralen Strahldichte ($W \text{ m}^{-2} \text{ nm}^{-1} \text{ sr}^{-1}$) anzugeben sind. Die Beleuchtungssituation ist aber auch durch die Angabe der relativen spektralen Verteilung in Verbindung mit der Angabe der Beleuchtungsstärke (lx) und/oder der Leuchtdichte (cd/m^2) ausreichend charakterisiert, weil damit auf die spektrale Bestrahlungsstärke bzw. die spektrale Leuchtdichte geschlossen werden kann.

1.1.1.2. Realisierung der Aquarienbeleuchtung

Für 12 Aquarien mit den Abmessungen 80 cm x 35 cm x 40 cm wurden Abdeckungen zur Beleuchtung der Aquarien gebaut und vermessen. Damit können gleichzeitig vier verschiedene Beleuchtungsszenarien eingestellt werden mit je drei Replikaten (gleiche Beleuchtung). Ein Szenario ist als Referenzgruppe ohne nächtliche Beleuchtung geplant (dunkel). Die Aquarien werden in einem Kühlraum platziert. Der nominelle Wasserstand in den Aquarien beträgt 30 cm. Die Aquarien werden lichtdicht von allen Seiten abgedunkelt. Auch die Abde-

ckung ist lichtdicht konstruiert. Alle Aquarien werden mit drei Trilux-Lichtleisten bestückt mit OSRAM Biolux T8/18W Lampen für die Tagesbeleuchtung. 9 Aquarien werden mit einer weiteren Trilux-Lichtleiste und OSRAM-Lampe für die weiße Nachtbeleuchtung ausgestattet. Eine Abdunkelung der Lampe mit Blechen oder Folien ist erforderlich, um die niedrigen nächtlichen Beleuchtungsstärken zu erreichen (zunächst 1, 10, 100 lx). Für die farbige Nachtbeleuchtung werden drei Aquarien mit 60 cm Trilux-LED-Leisten in Blau, drei Aquarien mit 60 cm Trilux-LED-Leiste in Amber, drei Aquarien mit 50 cm Lumitronix-LED-Leiste in Grün und drei Aquarien mit 50 cm Lumitronix-LED-Leiste in Rot bestückt (Abbildung 9). Eine separate KNX-Steuereinheit ist mit einer Schaltzeituhr ausgestattet und ermöglicht, die Sonnenaufgang- und Sonnenuntergangszeiten einzustellen. Die Lampen werden über den gemeinsamen KNX/EIB-Bus angesteuert, einem Standard im Gebäude- und Lichtmanagement. Dazu befindet sich in jeder Abdeckung ein 1-10 V Steuermodul.



Abbildung 9: Aquarien im Klimaraum.
Links: Weiße Beleuchtung. Rechts: Farbige Beleuchtung.

Abbildung 10 zeigt die Anordnung der einzelnen Lampen in der Aquarienabdeckung. An verschiedenen Punkten wurde in Höhe der nominellen Wasseroberflächen die Beleuchtungsstärke gemessen. Bei voller Leistung werden in der Mitte des Aquariums Beleuchtungsstärken über 6000 lx erreicht. Trotz Verwendung gleichmäßig abstrahlender Leuchtstofflampen ist ein Abfall der Beleuchtungsstärke zu den Ecken und Rändern hin nicht zu vermeiden. Auch Streufolien erlauben nur eine geringfügig bessere Ausleuchtung. Eine höhere Bauform der Abdeckung mit zusätzlichen Streuscheiben kam aus Platzgründen nicht in Frage.

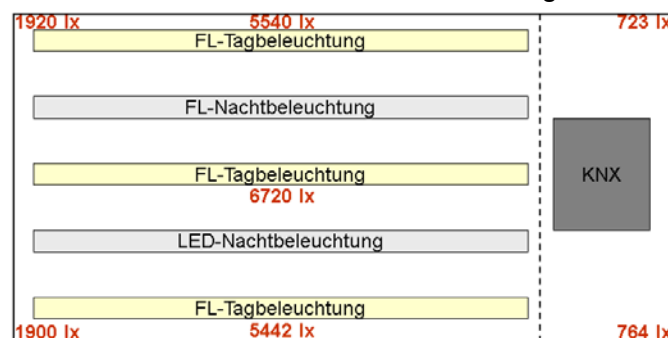


Abbildung 10: Homogenität der Beleuchtungsstärke der Tagbeleuchtung.

Entsprechendes lässt sich für die weiße Nachtbeleuchtung feststellen (Abbildung 11). Entscheidend ist in diesem Zusammenhang, dass die Messungen der einzelnen Aquarien untereinander vergleichbar sind. Referenzpunkt für die Messung der Beleuchtungsstärke ist hierfür die Mitte des Aquariums 30 cm über dem Boden. Auf die Fische wird mit der realisier-

ten Beleuchtung eine wohldefinierte und wohlunterschiedene Bestrahlung angewendet, welche es erlaubt, die biologische Wirkung verschiedener Helligkeiten und spektraler Verteilungen zu studieren. Die in diesem Aufbau verbleibende Inhomogenität der Ausleuchtung begrenzt die Genauigkeit verallgemeinernder Aussagen darüber, ab welcher Bestrahlungsstärke eine biologische Wirkung einsetzt. Aber auch das ist unkritisch, weil es zunächst darum geht, die Größenordnung einer biologischen aktiven Bestrahlung herauszufinden.



Abbildung 11: Homogenität der Beleuchtungsstärke der weißen Nachtbeleuchtung.

Zur Charakterisierung der Aquarienbeleuchtung gehörte die Messung der Konstanz der Beleuchtungsstärke sowie des Dimmverhaltens, mit dem die Dämmerung simuliert werden sollte. Die simulierte Dämmerung ist exemplarisch in Abbildung 12 gegeben. Im Unterschied zur Planung in der Konzeptionsphase (siehe Abbildung 3) hat sich bei der realisierten Beleuchtung gezeigt, dass eine lineare Leistungsvariation der Leuchtstofflampen von 1 % bis 100 % über drei Stunden sehr gut den Helligkeitsanstieg während der Dämmerung wiedergeben kann. Zum Vergleich wurde die natürliche Helligkeit in Abbildung 12 mit einem Faktor 0.63 multipliziert, weil Beleuchtungsstärken von etwa 10 000 lx nicht erreicht werden konnten und auch nicht erreicht werden sollten.

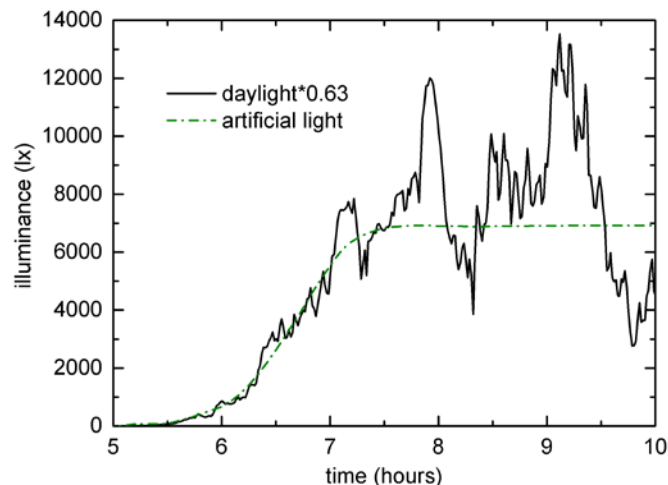


Abbildung 12: Beleuchtungsstärke von natürlichem Licht bei Sonnenaufgang (*0.63) am 20.10.2010 (vgl. Abb. 6) im Vergleich zur Aquarienbeleuchtung.

Zur Konstanz der Beleuchtungsstärke wurde ein Luxmeter im Aquarium über mehrere Tage platziert. Temperatursensoren wurden in der Abdeckung sowie im Wasser positioniert. Die Ergebnisse sind in Abbildung 13 zu finden. Die Beleuchtungsstärke verhält sich etwas anders als in den Vorversuchen (siehe Abbildung 12). Nachdem die maximale Beleuchtungsstärke erreicht wird, geht der Wert wieder um ca. 1.5 % zurück. Als Ursache ist eine Erwärmung der elektronischen Vorschaltgeräte für die Leuchtstofflampen in der Aquarienabde-

ckung anzunehmen, da der Rückgang mit der Temperaturzunahme in der Abdeckung korreliert. Die Wärmeabfuhr ist offensichtlich bei den beengten Raumverhältnissen in der Klimakammer nicht ausreichend, im Unterschied zur Messung in Abbildung 12, die an einer einzelnen Aquarienbeleuchtung ohne Aquarium durchgeführt wurde. Der Effekt ist aber geringfügig und beeinträchtigt die Experimente nicht. Vielmehr ist festzustellen, dass die maximal erreichbare Beleuchtungsstärke unter den tatsächlichen Versuchsbedingungen sogar 4 % größer ausfällt, weil von den Aquarienwänden Licht reflektiert wird.

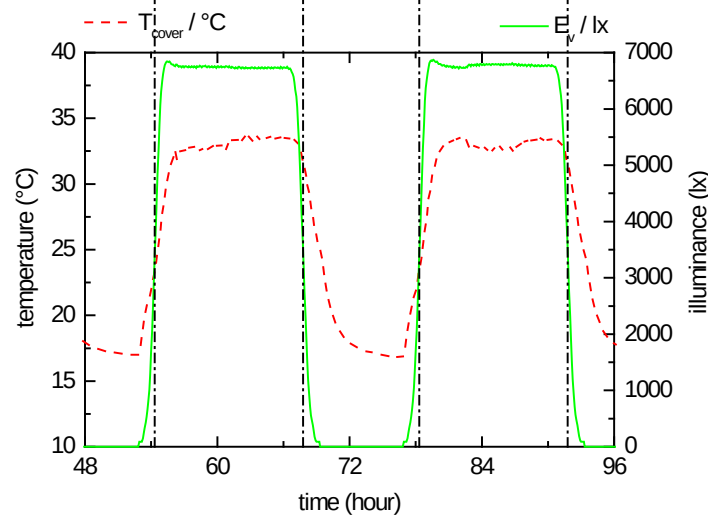


Abbildung 13: Temperatur in der Aquarienabdeckung und Beleuchtungsstärke auf Wasserniveau.

Damit erhebt sich natürlich die Frage, ob die Aquarienbeleuchtung auf die Wassertemperatur zurück wirkt. Eine vergleichende Messung der Temperatur in der Abdeckung und im Wasser ist in Abbildung 14 gegeben. Es ist gut zu erkennen, dass das gesamte System mit Klimaraum ca. einen Tag benötigt, um thermisch stabile Verhältnisse auszubilden. Aber trotz der Temperaturunterschiede von etwa 10 K in der Abdeckung im Verlauf eines Tages ändert sich die Wassertemperatur kaum und stellt sich bei $(14 \pm 0.25)^\circ\text{C}$ ein. Dabei folgt die Wassertemperatur mit einer gewissen Zeitverzögerung dem Temperaturanstieg in der Abdeckung. Die Ursache für die erhöhte Temperatur zwischen 58 und 62 Stunden konnte nicht geklärt werden und wurde nicht wieder beobachtet. Möglicherweise war die Temperaturregelung des Klimaraums kurzzeitig ausgeschaltet.

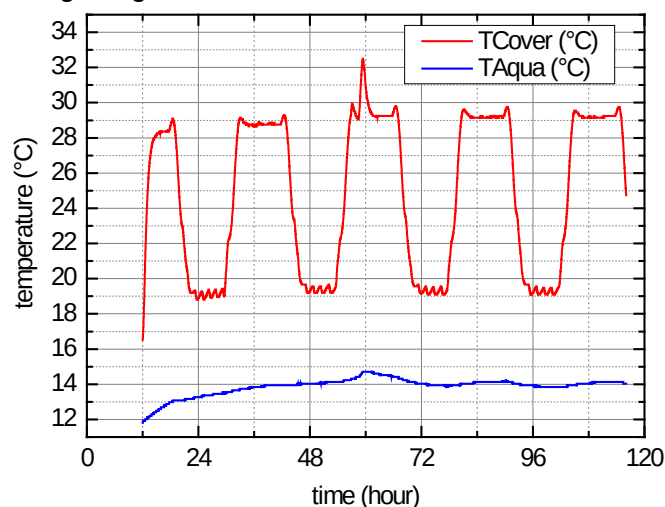


Abbildung 14: Temperatur in der Aquarienabdeckung und im Wasser.

1.1.1.3. Beiträge zur Auswertung der biologischen Versuche

Die biologischen Methoden zur Bestimmung Hormonexpression bei Fischen sind ausführlicher in dem Schlussbericht des Teilprojekts 9 „Lichtverschmutzung – Wirkung auf Fische“ beschrieben. An dieser Stelle soll lediglich auf die mathematischen Methoden eingegangen werden, um aus der Hormonkonzentration im Wasser des Aquariums auf die Hormonausschüttung der Fische in das Wasser zu schließen. Dieser Zugang ist denkbar, weil die Fische über ihre Kiemen Hormone in das Wasser entlassen.

Ein alternativer Zugang zur Bestimmung von Hormonprofilen wäre das Fangen und Töten der Fische in definierten Zeitintervallen und die Messung der Hormonkonzentration im Blut. Aber diese Prozedur birgt neben dem statistischen Fehler durch eine größere Anzahl wechselnder Versuchstiere das Risiko, bei den Fischen einen Stress zu induzieren, der die Ergebnisse beeinflussen könnte und würde auch mehr Biomasse benötigen.

Die Hormonausschüttung aus der Hormonkonzentration im Wasser zu bestimmen, bietet demgegenüber zwar einige Vorteile, aber es zeigen sich andere Herausforderungen.

Die Änderung der Melatoninkonzentration im Aquariumwasser kann durch eine Differentialgleichung beschrieben werden, die eine ständige Verdünnung der Hormonkonzentration im Wasser durch den kontinuierlichen Wasseraustausch mit Frischwasser und eine zeitabhängige Expression von Hormonen in das Wasser berücksichtigt:

$$\frac{dc}{dt} = -c \frac{1}{V} F + \frac{1}{V} r(t) m \quad (3)$$

Die Symbole stehen dabei für: c – Melatoninkonzentration im Wasser in pg/l, V – Wasservolumen im Aquarium in l, F – Wasserflussrate in l/h, r – reduzierte Hormonausschüttungsrate (reduzierte Releaserate) in $\text{pg h}^{-1} \text{kg}^{-1}$, m – Fischbiomasse in kg.

Zunächst stellt sich die Frage, welche Zeit benötigt wird, damit sich im Aquarium stationäre Verhältnisse einstellen. Um die Differentialgleichung zu lösen werden ein Volumen von 120 l und eine Fischbiomasse von 0.5 kg angenommen. Die zeitabhängige Hormonausschüttung soll dabei durch den folgenden periodischen Ansatz simuliert werden:

$$r = r_0 \left[\frac{\cos\left(2\pi \frac{t+t_0}{24 \text{ h}}\right) + 1}{2} \right]^x + r_1 \quad (4)$$

Hierbei ist t die Zeit in Stunden, r_0 ist die Amplitude der reduzierten Releaserate, die auf $100 \text{ pg h}^{-1} \text{kg}^{-1}$ gesetzt wird, in Anlehnung an Literaturwerte (Ellis 2004; James 2004). Die Phasenverschiebung t_0 und der Offset r_1 werden zunächst gleich Null gesetzt. Der Exponent x beeinflusst im Wesentlichen die Breite des nächtlichen Melatoninpulses und wird auf 4 gesetzt. Der zeitliche Verlauf der Melatoninexpression ist in Abbildung 15 dargestellt, mit einer maximalen Hormonausschüttung um Mitternacht und einem 24-Stunden-Rhythmus.

Mit diesem Ansatz kann die Differentialgleichung beispielhaft gelöst und die Hormonkonzentration im Wasser bestimmt werden. Die entsprechenden Verläufe sind in Abbildung 15 als gestrichelte und strich-punktierte Linien bei Flussraten von 4 l/h und 10 l/h gegeben. Bei kleineren Flussraten ist die Hormonkonzentration im Wasser höher, aber es dauert 4-5 Tage bis sich stationäre Verhältnisse einstellen. Bei höheren Flussraten stellt sich das dynamische Gleichgewicht innerhalb von 1-2 Tagen ein und die Hormonkonzentration schwankt um etwa

einen Faktor 2. Das könnte die Messgenauigkeit erhöhen; andererseits liegt die mittlere Hormonkonzentration deutlich niedriger als im ersten Fall und könnte schon unter die Nachweisgrenze fallen. In beiden Fällen ist ein zeitlicher Versatz des Maximums zur Releaserate von 2.5 bis 3 h zu erkennen. Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass eine Akklimatisierungsphase von 14 Tagen sicher ausreichend ist, damit sich stationäre Verhältnisse einstellen können, bevor die Versuche mit der nächtlichen Beleuchtung starten.

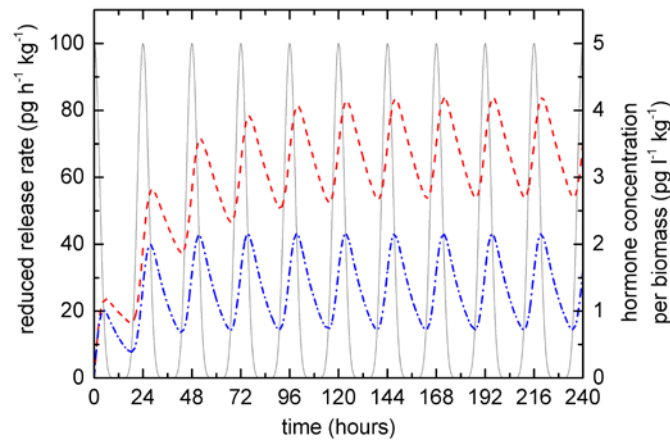


Abbildung 15: Ansatz für den zeitlichen Verlauf der Melatoninexpression (reduzierte Releaserate) als graue Linie sowie die Entwicklung der Hormonkonzentration bei unterschiedlichen Flussraten (gestrichelt: 4 l/h, Strich-Punkt: 10 l/h).

Als Nächstes ist zu klären, wie die Releaserate aus der Hormonkonzentration bestimmt werden kann. Dazu muss die Differentialgleichung umgestellt und die zeitliche Ableitung der Konzentration als finite Differenz dargestellt werden.

$$r(t_i - \Delta t/2) m = V \frac{c(t_i) - c(t_{i-1})}{\Delta t} + \frac{c(t_i) + c(t_{i-1})}{2} F \quad (5)$$

Hier bezeichnen t_i den Zeitpunkt der Probennahme, t_{i-1} den Zeitpunkt der vorherigen Probenahme und Δt die Zeitdifferenz. Mit dieser Formel wird die Releaserate für einen Zeitpunkt zwischen zwei Probennahmen ermittelt. In der Literatur findet sich noch eine andere Formel (Ellis 2004; Kusmic 2000).

$$r(t_i - \Delta t/2) m = F \frac{c(t_i) - c(t_{i-1}) \exp\left(-\frac{F}{V} \Delta t\right)}{1 - \exp\left(-\frac{F}{V} \Delta t\right)} \quad (6)$$

Die Gleichung erhält man, wenn ohne Beschränkung der Allgemeinheit angenommen wird, dass zwischen zwei Zeitpunkten die Releaserate konstant ist. In diesem Fall lässt sich die Differentialgleichung analytisch lösen. Beide Formulierungen sind äquivalent und führen wieder auf die gegebene Releaserate wie in Abbildung 15 gegeben. Dazu wurde ein numerisches Experiment durchgeführt, indem aus einer gegebenen Releaserate die Hormonkonzentration im Wasser berechnet wurde und aus dieser wiederum nach Gleichung (5) die Releaserate.

Allerdings ist anzumerken, dass es sich hier um ein inverses Problem handelt. Solche Operationen sind bekannt dafür, anfällig für Rauschen zu sein. Das kann durch ein weiteres numerisches Experiment demonstriert werden. In Abbildung 16 ist im rechten Teilbild eine Releaserate gegeben (grüne strich-punktierte Linie). Aus dieser Releaserate wurden für eine

Flussrate von 4.1 l/h und 84 l Wasservolumen sowie für eine Flussrate 10 l/h und 60 l Wasservolumen die Hormonkonzentrationen im Wasser bestimmt (obere und untere gestrichelpunktete Linie im linken Teilbild). Diese wurden wiederum mit einem relativ normalverteilten Rauschen überlagert (Linie mit roten Kreisen bzw. blauen Rauten). Mit diesen verrauschten Konzentrationswerten wurde wieder die Releaserate berechnet (siehe rechtes Teilbild in Abbildung 16). Das relativ normalverteilte Rauschen entspricht einem relativen statistischen Fehler in den Experimenten. Es ist zum einen zu erkennen, dass sich ein statistischer Fehler in der Konzentration bei der Berechnung der Releaserate verstärkt. Zum anderen wird deutlich, dass die Messunsicherheit reduziert werden kann, wenn die Flussrate erhöht und das Wasservolumen reduziert wird.

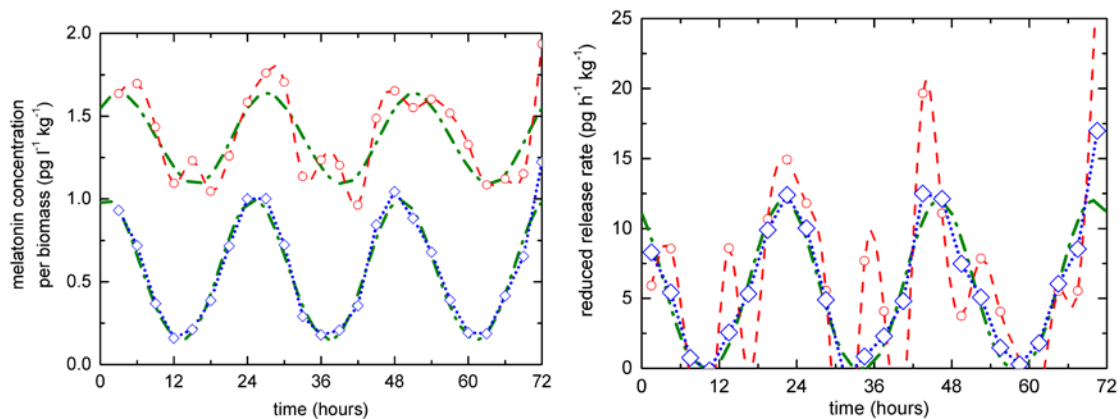


Abbildung 16: Links: Simulierte Melatoninkonzentration pro Biomasse im Aquariumwasser bei 4.1 l/h und 84 l (gestrichelte Linie) sowie bei 10 l/h und 60 l (gepunktete Linie) überlagert mit normalverteiltem Rauschen. Rechts: Aus Hormonkonzentrationen rekonstruierte reduzierte Releaserate.

Diese Schlussfolgerung ist deshalb relevant, weil der Fall mit der Flussrate von 4.1 l/h und 84 l Wasservolumen den tatsächlichen experimentellen Gegebenheiten entspricht. Auch die gemessenen Konzentrationen stellen sich ähnlich verrauscht dar. Gleichzeitig sind die Konzentrationen nahe an der Nachweisgrenze. Dennoch zeigen diese Betrachtungen mögliche Optimierungspotenziale auf.

Tabelle 2: Parameter zur Anpassung gemessener Melatoninkonzentrationen mit dem Ansatz in Gleichung (4).

	Wasser- volumen (l)	Wasser- flussrate (l/h)	Bio- masse (kg)	Reduzierte Releaserate ($\text{pg h}^{-1} \text{kg}^{-1}$)			
				Ampli- tude	Offset	Phasenver- schiebung (h)	Exponent (1)
0 lx	84	4.1	0.419	82	0	-2	2
100 lx	84	4.1	0.435	12	0	-2	1.2

Aus den gemessenen Melatoninkonzentrationen wurden die Releaseraten nach Gleichung (5) berechnet. Außerdem wurde mit dem Ansatz von Gleichung (4) nach den Parametern gesucht, welche die gemessenen Konzentrationen am besten wiedergeben. Die Ergebnisse sind für die 0 lx Referenzgruppe und die 100 lx nächtliche Beleuchtungsstärke in Tabelle 2 zusammengestellt. Aus der Amplitude wird deutlich, dass bei 100 lx eine signifikante Reduktion der Melatoninausschüttung stattfindet.

Weitere Einzelheiten zur Aquarienbeleuchtung und den biologischen Ergebnissen sind der veröffentlichten Literatur zu entnehmen (Brüning 2014; Franke 2013). Zusammenfassend ist festzuhalten, dass auch bei 1 lx nächtlicher Beleuchtung bereits eine Melatoninsuppression

festgestellt werden kann. Um eine Schwelle für die einsetzende Melatoninsuppression zu finden, sind deshalb weitere Experimente bei noch niedrigeren Beleuchtungsstärken durchzuführen. Die Versuche mit der farbigen Nachtbeleuchtung haben bisher kaum signifikante Unterschiede für die unterschiedlichen Farben ergeben. Es deutet sich an, dass Blau beim Barsch etwas weniger wirksam ist als Grün und Rot. Aber alle nachts beleuchteten Aquarien zeigen eine Melatoninsuppression bei den Fischen. Das ist überraschend, weil die Bestrahlungsstärken bereits um eine Größenordnung reduziert wurden, verglichen mit der ursprünglichen Planung. Dies geschah mit Blick auf die Ergebnisse zur Variation der Helligkeit der weißen Nachtbeleuchtung. Auch hier würden weitere Experimente bei noch kleineren Bestrahlungsstärken durchgeführt werden. Insgesamt wurde die Empfindlichkeit der Fische auf nächtliche Beleuchtung deutlich unterschätzt. Die untersuchten Barsche reagieren auch bei sehr geringen Lichtmengen bereits mit einer nächtlichen Melatoninsuppression. Diese Beobachtung unterstreicht damit die Notwendigkeit der bisher durchgeführten Untersuchungen. Siehe dazu auch den Schlussbericht zum Teilprojekt 9 „Lichtverschmutzung – Wirkung auf Fische“. Auch die Ergebnisse zu dem Hormon Cortisol sind in dem angegebenen Bericht zu finden. Grenzwerte für eine maximale Beleuchtungsstärke sowie Empfehlungen für eine optimierte spektrale Verteilung des Lichts können mit den vorliegenden Ergebnissen aus den oben genannten Gründen noch nicht angegeben werden.

II.1.2. Integrationsprojekt Feld (IP Feld)

Gemeinsam mit dem Fachgebiet Lichttechnik der TU Berlin wurde das Integrationsprojekt IP Feld im Teilprojekt 14 „Projektkoordination“ begleitet, das vom IGB Berlin koordiniert wurde. Mit dem IP Feld sollte die Möglichkeit geschaffen werden, unterschiedliche Spezies in einem Feldversuch zu untersuchen. Die Auswahl, Genehmigung und Einrichtung der Versuchsfelder war mit einem erheblichen Zeitaufwand verbunden. Hinzu kamen weitere Randbedingungen, wie Jahreszeit und Witterung, welche die Handlungsmöglichkeiten beschränkten. Die Beleuchtung wurde damit erst nach zwei Jahren Vorbereitung im Juli 2012 eingeschaltet. Eine erste lichttechnische Charakterisierung fand im August/September 2012 statt.

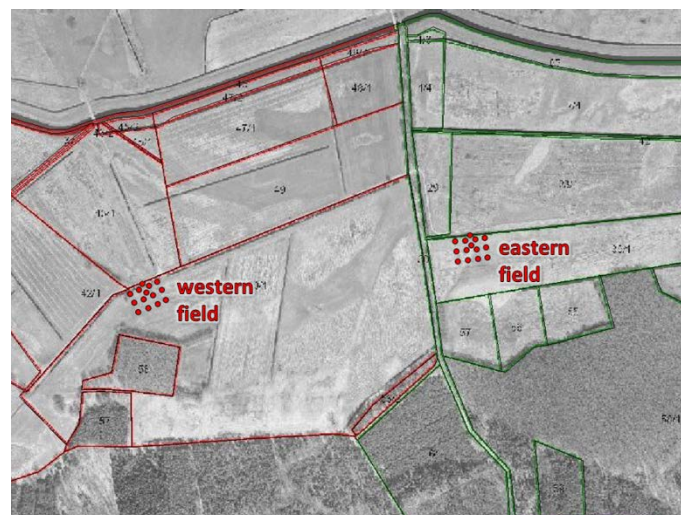


Abbildung 17: Lage des westlichen und des östlichen Versuchsfeldes im Westhavelland. Rote Punkte markieren die Leuchten sowie die Messtürme.

Die Feldversuche wurden im Westhavelland, westlich von Berlin in der Nähe von Rathenow, eingerichtet. Die relative Lage der beiden einzelnen Versuchsfelder zueinander ist in Abbildung 17 zu erkennen. Ein Feld sollte als Testfeld nachts beleuchtet werden. Das andere Feld sollte auch mit Leuchten ausgestattet sein, aber als Referenzfeld nicht beleuchtet wer-

den. Beide Felder sollten an einen Wasserlauf grenzen und in der Nähe eines Waldes stehen, um das interessierende Artenspektrum untersuchen zu können. Ihr Abstand sollte so groß sein, dass das beleuchtete Feld das unbeleuchtete Feld nicht stört. Diese Anforderungen erfüllen die ausgewählten Versuchsfelder, die mehrere hundert Meter voneinander getrennt liegen und durch eine Baumgruppe voneinander abgeschildert sind.

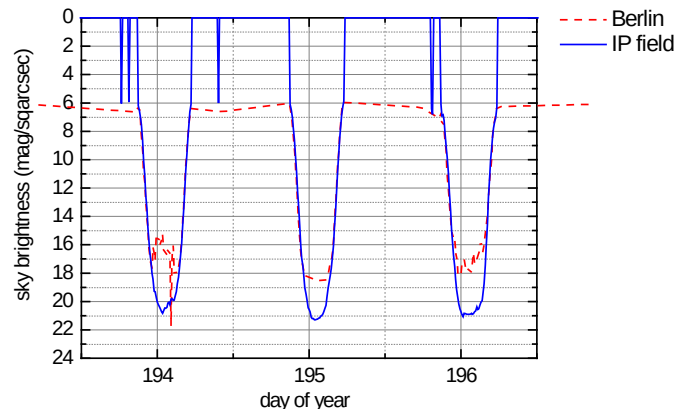


Abbildung 18: Messung der „sky brightness“ mit „sky quality meters“ (SQM) in Berlin (rot gestrichelt) und im IP Feld (blau).

Abbildung 18 zeigt die Messung der Himmelshelligkeit in Berlin und im Versuchsfeld im Jahr 2012. Ein kleinerer Wert entspricht einer größeren Helligkeit. Der Unterschied zwischen beiden Messorten beträgt in der Nacht ca. 3 mag/sqarcsec. Die Messung in Berlin ergibt also eine etwa 16-fach größere Helligkeit des Nachthimmels verglichen mit der Messung im Westhavelland. Es handelt sich bei den Versuchsfeldern also tatsächlich um eine sehr dunkle Region, auch wenn man berücksichtigt, dass die minimale natürliche Himmelshelligkeit bei einem Wert von etwa 22 mag/sqarcsec liegt.

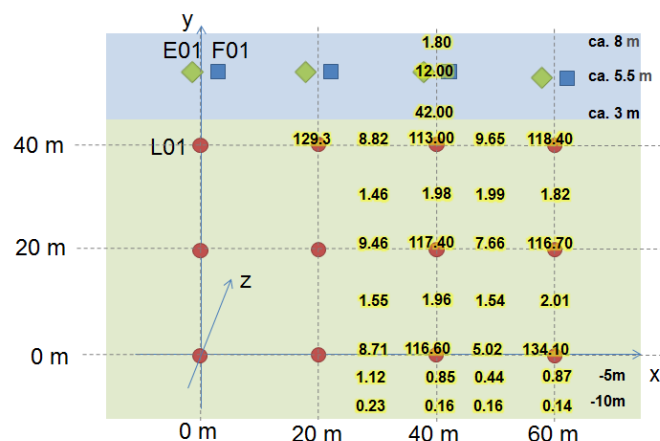


Abbildung 19: Lage der Leuchten und des Wassergrabens im Versuchsfeld sowie Messpunkte der horizontalen Beleuchtungsstärke in Lux 1.5 m über dem Boden mit den entsprechenden Werten.

Bei einer ersten lichttechnischen Charakterisierung des beleuchteten Westfeldes wurde zunächst die Position der Leuchten vermessen sowie die Lage des Wassergrabens zum Leuchtenfeld. Abbildung 19 stellt das Versuchsfeld schematisch dar. Es wurde ein Koordinatensystem eingeführt, dessen Ursprung bei der linken unteren Leuchte liegt. Damit können alle Messpunkte eindeutig angegeben werden. Die Leuchten stehen in drei horizontalen Rei-

hen zu 4 Leuchten in einem Abstand von 20 m voneinander und etwa 3 m von dem Wassergraben entfernt. Der Graben selbst ist ca. 5 m breit. In den Wassergraben wurden mehrere Emergenzfallen (E01 bis E04) sowie Fischkäfige (F01 bis F04) eingebracht. Die Leuchte L01 steht an der Position P(0m,40m). Alle weiteren Leuchten wurden zeilenweisen durchnummeriert. Ein Messturm befindet sich an der Position P(30m,30m). An ihm sind in Höhe von 3 m und 6 m verschiedenen Sensoren angebracht, z.B. zur Messung der Globalstrahlung. An Position P(30m,43m) wurden in einem Rohr Messfühler in das Wasser eingelassen, z.B. zur Messung des Sauerstoffgehalts des Wassers.

Aufgrund der Vegetation konnte das Beleuchtungsniveau nicht auf Bodenhöhe vermessen werden. Stattdessen wurde die horizontale Beleuchtungsstärke in Höhe von 1.5 m über dem Boden in einem groben Raster unter den Leuchten und zwischen den Leuchten bestimmt. Das Feld wurde dabei nur zur Hälfte vermessen, da es symmetrisch aufgebaut ist. Der Gradient über dem Wassergraben wurde an drei ausgewählten Punkten (siehe Abbildung 19) bestimmt ebenso wie der Abfall der Beleuchtungsstärke auf der rückwärtigen Seite des Leuchtenfeldes bis zu einem Abstand von 10 m. Die Messungen zeigen, dass mit dem Leuchtenfeld ein Beleuchtungsniveau erreicht wird, wie es auch in der Straßenbeleuchtung zu finden ist.

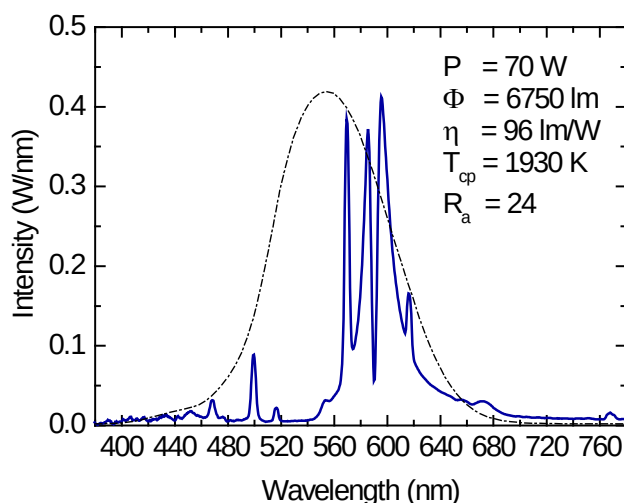


Abbildung 20: Spektrum einer Hochdruck-Natriumdampf-Lampe (OSRAM NAV-T 70 W), gemessen in einer Ulbricht-Kugel.

Als Leuchtenköpfe kamen kommerzielle Außenleuchten (Schröder Saphir 1) zum Einsatz, die mit einer Hochdruck-Natriumdampf-Lampe (OSRAM NAV-T 70 W) ausgestattet waren. Es gehörte zu den frühen Entscheidungen in der Konzeptionsphase der Versuchsfelder, die Untersuchungen zunächst auf Natriumdampflampen zu beschränken. Diese Entscheidung wurde von allen involvierten Verbundprojektpartnern getragen. Eine Umrüstung auf alternative Leuchtenköpfe mit LEDs (Schröder Saphir 1 LED) schien am Anfang noch möglich, musste dann aber wegen der bereits genannten Verzögerungen aufgegeben werden. Die Leuchtenköpfe sind in einer Höhe von 4.7 bis 4.8 m montiert. Das Spektrum der Lampe ist in Abbildung 20 zu finden.

In einem nächsten Schritt wurde die Beleuchtung mit der Software Dialux (Version 4) simuliert. Abbildung 21 zeigt das Leuchtenfeld in der Dialux-Simulation sowie die horizontale Beleuchtungsstärke 1.5 m über dem Boden als Falschfarbenabbildung. Die simulierten Werte wurden mit den gemessenen Werten verglichen. Die Maximalwerte der Beleuchtungsstärke (unter den Leuchten) stimmen auf etwa 10 % mit den Messungen überein. Die Minimalwerte

der Beleuchtungsstärke zwischen den Leuchten stimmen auf einen Faktor 2 mit den Messungen überein. Das ist im Rahmen der erwarteten Genauigkeit ausreichend. Die Simulation der Beleuchtung liefert also ein geeignetes Maß für den Helligkeitsverlauf im Feld auch für Positionen, die nicht vermessen wurden.

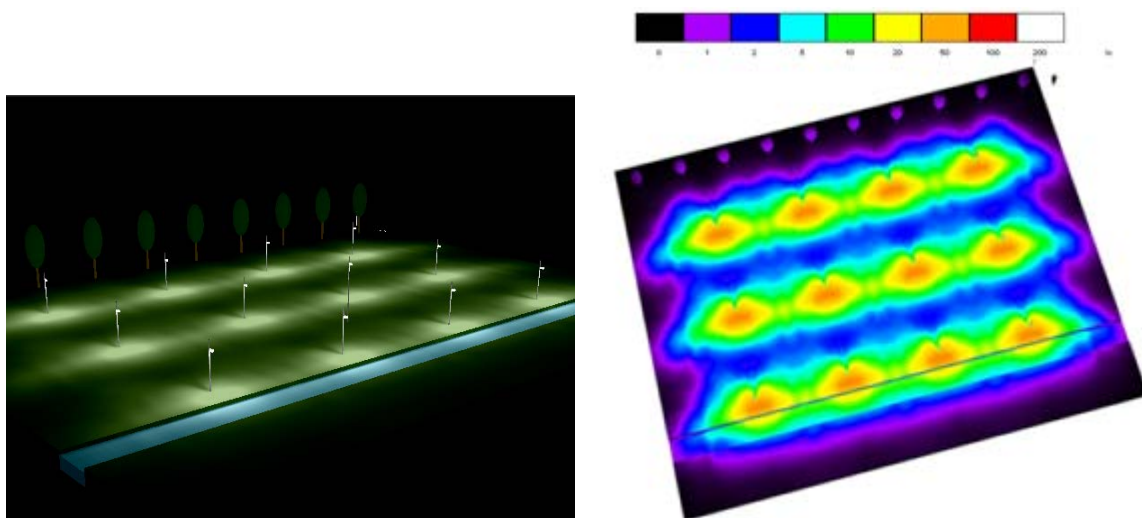


Abbildung 21: Links: Leuchtenfeld in der Dialux-Simulation. Rechts: Simulierte Beleuchtungsstärke 1.5 m über dem Boden.

Um zu beurteilen, wie stark das Licht abgeschwächt wird, wenn es in das Wasser dringt, wurden Messungen mit einem Kompaktspektrometer und einer wasserfesten Optik im Wassergraben durchgeführt. Der Messkopf wurde dafür an einem über dem Graben gespannten Seil in das Wasser abgelassen. Die Messung wurde bei bewölktem Himmel (diffuse Beleuchtung) bei stabilen Lichtverhältnissen durchgeführt. Abbildung 22 zeigt, dass die Transmission von Wasser im Spektralbereich zwischen 550 nm und 700 nm am größten ist. Blaues und rotes Licht wird besonders stark gestreut bzw. absorbiert. Bereits nach 30 cm Wassertiefe werden mehr als 40 % des Lichts absorbiert.

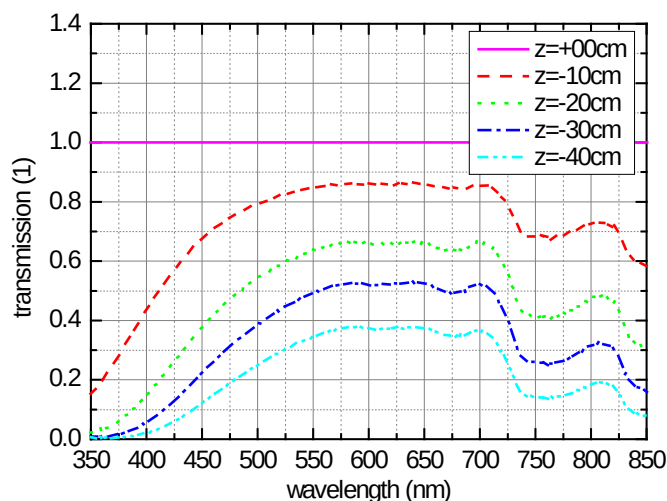


Abbildung 22: Transmission von Tageslicht im Wasser.

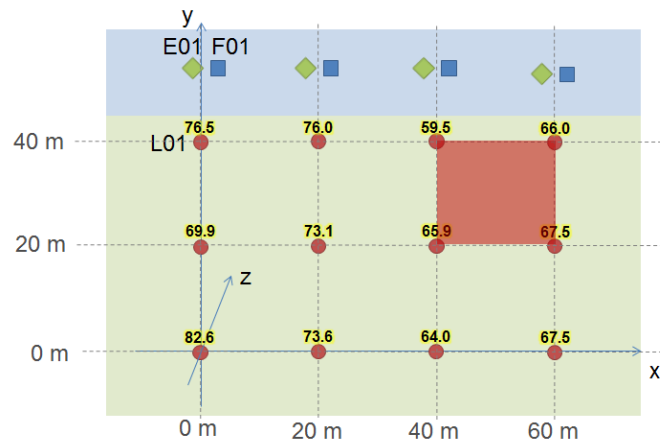


Abbildung 23: Beleuchtungsstärke unter den Leuchten auf Bodenniveau. Markierte Fläche: Ausgewähltes Messfeld für feine Rasterung.

In einer zweiten Messkampagne wurde ein feineres Raster in einem Teilfeld zwischen vier Leuchten vermessen (siehe Abbildung 23). Außerdem wurde die Beleuchtungsstärke unter allen Leuchten gemessen (Messwerte siehe Abbildung 23). Da zum Zeitpunkt der Messkampagne das Feld gemäht war, konnten die Messungen auf Bodenniveau durchgeführt werden. Die genaue Position war 1 m vor der Leuchte und 15 cm über dem Boden. Es fällt auf, dass die Beleuchtungsstärke von links nach rechts abzunehmen scheint. Die mittlere Beleuchtungsstärke der drei linken Leuchten beträgt 76.3 lx und die der drei rechten Leuchten beträgt 67 lx. Das sind ca. 12 % weniger. Die Ursache ist unklar. Sie könnte in der Leuchtenkopfausrichtung und in der Topografie des Geländes zu finden sein. Für die Versuche sind die Unterschiede sehr wahrscheinlich unerheblich. Sie gehen aber in die Genauigkeitsbetrachtung der Messung ein, ebenso wie Abweichungen in der Leuchtenkopfhöhe. Das heißt, die weiter oben angegebene Übereinstimmung zwischen Beleuchtungssimulation und Messung von 10 % in Leuchtennähe ist ausreichend und kann nicht besser erwartet werden.

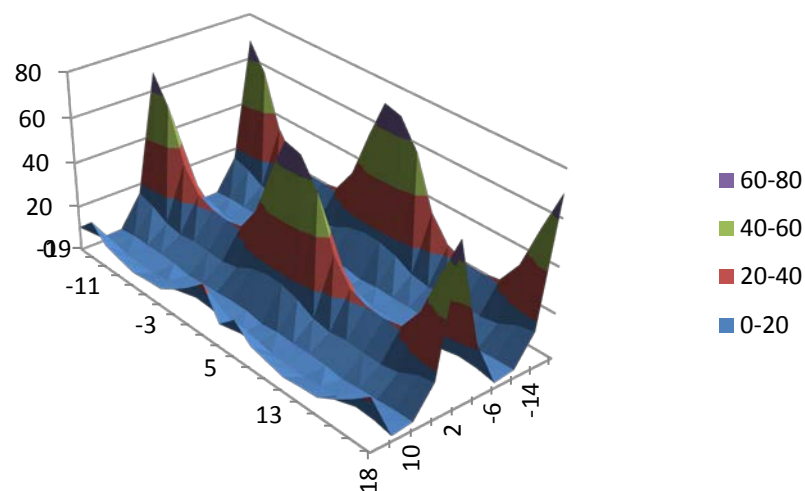


Abbildung 24: Helligkeitsverteilung um eine Leuchte.

Bei der Messung in einem feineren Raster wurden in dem in Abbildung F22 markierten Teilfeld 40 Einzelmessungen vorgenommen. Unter Annahme symmetrischer Verhältnisse wurden diese 40 Einzelmessungen periodisch fortgesetzt, sodass sich die in Abbildung 24 gegebene Helligkeitsverteilung um eine Leuchte (L07) ergibt. Ein Vergleich mit einer simulier-

ten Helligkeitsverteilung zeigt eine gute Übereinstimmung im Rahmen der diskutierten Genauigkeit.

Messungen der spektralen Strahldichte sollten Aufschluss darüber geben, welches Spektrum von der Leuchte abgegeben und wie es von dem Untergrund (Feldwiese) reflektiert wird. Abbildung 25 zeigt relative Spektren, die auf die maximale spektrale Strahldichte normiert wurden, gemessen mit einem JETI specbos. Es ist deutlich zu erkennen, dass neben der Emission im sichtbaren Spektralbereich zwischen 400 und 800 nm, Natriumdampflampen auch eine Emission im nahen Infrarot um 819 nm aufweisen (Na-Triplett). Vergleicht man die Strahldichte im Spektralbereich von 550 bis 700 nm (Na-D Linie) mit dem Spektralbereich von 800 bis 850 nm, ergibt sich ein Intensitätsverhältnis von 3:1 für das Spektrum der Leuchte. Für das vom Boden reflektierte Licht ergibt sich ein Intensitätsverhältnis von 1.5:1. Das bedeutet, das „gelbe“ Natriumlicht wird vom Boden schwächer reflektiert als die Strahlung im nahen Infrarot. Die Intensitätsverhältnisse verschieben sich damit für das reflektierte Licht zugunsten der langwelligeren Strahlung, aber die Strahlung im sichtbaren Spektralbereich ist immer noch einen Faktor 1.5 stärker. Dieser Effekt kann dort relevant werden, wo es nicht nur darum geht, dass Tiere durch das Licht der Leuchten angezogen werden, sondern wie sie sich auf der beleuchteten Fläche orientieren. Weitere Einzelheiten zur Messung der spektralen Strahldichte und der Leuchtdichte können dem Schlussbericht des Teilprojekts 12 „Innovative Beleuchtung bei Nacht“ des Fachgebiets Lichttechnik der TU Berlin entnommen werden.

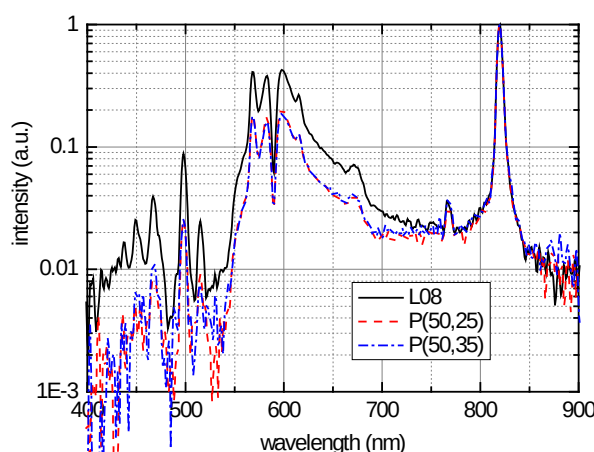


Abbildung 25: Spektrum der Leuchte (L08) und der Strahlung, die vom Boden an zwei Positionen reflektiert wird.

Für die photometrische und radiometrische Charakterisierung des IP-Feld kamen verschiedene Geräte zum Einsatz. Spektrale Bestrahlungsstärken wurden mit kalibrierten Avantes Kompaktspektrometern mit Kosinuskorrektor gemessen. Für die Messung spektraler Strahldichten wurde ein JETI specbos verwendet. Beleuchtungsstärken wurden mit einem Mobilux (Czibulla & Grundmann) oder einem Czibulla & Grundmann Photometer gemessen. Am IGB kommt für diesen Zweck in der Regel ein ILT1700 (International Light Technologies) zum Einsatz. Leuchtdichtemessungen wurden mit einer LMK von TechnoTeam ausgeführt. An den Messtürmen im IP-Feld sind Pyranometer von Kipp&Zonen für die Messung der Globalstrahlung installiert, sowie PAR-Sensoren derselben Firma. Für die Bewertung der nächtlichen Himmelhelligkeit werden ein SQM von Unihedron eingesetzt sowie ein Kuffner-Lightmeter von K2W Lights. Die spektralen Empfindlichkeiten von Pyranometern und PAR-Sensoren sind wohldefiniert, wie auch die resultierenden Messwerte. Das SQM und das Kuffner-Lightmeter haben jedoch nur grob spezifizierte spektrale Empfindlichkeiten, die vom verwendeten Detektor abhängen. Als Messwerte werden mitunter Leuchtdichte (cd/m^2) und

Beleuchtungsstärke (lx) angegeben, obwohl die spektrale Empfindlichkeit nicht der in Normen definierten Augenempfindlichkeit entspricht. In der Regel wird jedoch empfohlen, die Messgrößen in proprietären Einheiten anzugeben, also in mag/sqarcsec und in mV.

Um das Signal der Kuffner-Lightmeter wenigstens grob zur Beleuchtungsstärke ins Verhältnis setzen zu können, wurde über eine Nacht und eine Dämmerungsphase die Beleuchtungsstärke an der Position des Lightmeters im beleuchteten Westfeld in 3 m Höhe am 21. August 2013 gemessen. Das Ergebnis ist in Abbildung 26 zu finden. Der Detektor hat einen linearen Arbeitsbereich für Signale kleiner 200 mV. Bei größeren Intensitäten geht das Signal in Sättigung. Abweichungen vom linearen Verlauf für Beleuchtungsstärken kleiner 1 lx können durch variierende spektrale Zusammensetzung des Lichts erklärt werden. Das Lightmeter in 3 m Höhe misst nachts auch das Licht benachbarten Leuchten, die in 4.7 m Höhe angebracht sind. Die Farbtemperatur beträgt in diesem Fall ca. 2000 K. Gerade in der Dämmerung (siehe Helligkeitsanstieg bis 100 lx) ändert sich das natürliche Spektrum stark. Die Farbtemperaturen können zwischen 6 000 und 20 000 K und darüber hinaus variieren. Tagsüber (1 000 lx bis 100 000 lx) bewegt sich die Farbtemperatur in der Regel zwischen 5 500 K und 6 500 K.

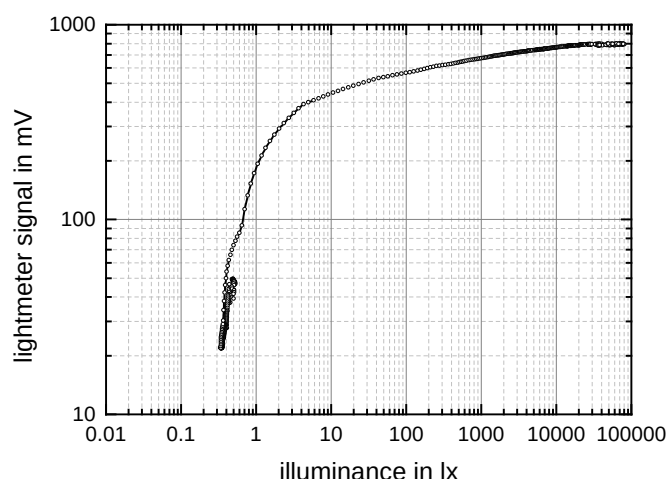


Abbildung 26: Signal des Kuffner-Lightmeters im beleuchteten Westfeld (3 m Höhe) über der Beleuchtungsstärke, gemessen am 21. August 2013.

Die Messunsicherheit bei der Bewertung unterschiedlicher Spektren mit der so bestimmten Kalibrationskurve lässt sich abschätzen, indem Spektren unterschiedlicher Farbtemperatur mit der menschlichen Augenempfindlichkeit (bzw. des Luxmeters) und der spektralen Empfindlichkeit des Kuffner-Lightmeters gewichtet und integriert werden. Normiert man die Ergebnisse auf eine Farbtemperatur von 6 000 K ergeben sich die Abweichungen für die anderen Spektren wie in Tabelle 3 angegeben. Der größte Fehler ergibt sich für das Spektrum der Natriumdampflampe (NAV-T). Weitere Ungenauigkeiten ergeben sich durch eine Abweichung des Empfängers von einer idealen Kosinuskorrektur sowie mögliche Offset- oder Temperaturfehler, die hier nicht berücksichtigt wurden. Eine Messgenauigkeit von $\pm 20\%$ erscheint realistisch und ist als grobe Schätzung ausreichend.

Tabelle 3: Fehler in der Kalibration eines Lightmeters in lx durch Änderung der spektralen Verteilung des Lichts..

Color temperature / K	Lux deviation / %
1925 (NAV-T)	-13
3000	-7.5
6000	0 (reference)
18000	3.9
32000	4.2

Mit den vorliegenden Ergebnissen ist das Testfeld lichttechnisch ausreichend charakterisiert, und es sollten damit Korrelationen zwischen biologischen Ergebnissen und Beleuchtungsverhältnissen möglich sein. Einzelheiten zu den biologischen Ergebnissen aus den Freilandversuchen sind den entsprechenden Berichten der Teilprojekte zu entnehmen. Eine Umrüstung des Testfelds auf eine alternative Beleuchtung war während der Projektlaufzeit nicht möglich. Zukünftige Untersuchungen sollten sich daher modernen Leuchtmitteln widmen. LEDs sind in der Außenbeleuchtung inzwischen immer weiter verbreitet. Ob für die Außenbeleuchtung eher warmweiße oder kaltweiße LEDs vorteilhaft sind, ist in Bezug auf ihre Wirkung auf angrenzende Ökosysteme noch offen. Der Mond kann als natürliche Lichtquelle am Nachthimmel sicher eine sinnvolle Referenz sein. Wenn man bedenkt, dass sich die natürliche Himmelselligkeit im Verlauf eines Tages über 6 Größenordnungen ändern kann (0.1 bis 100 000 lx, s.a. Abb. 27), dann ist vorstellbar, dass eine Änderung der spektralen Verteilung des Lichts nur in der Nähe einer physiologischen Schwelle einen signifikanten Effekt zeigt.



Abbildung 27: Vollmond im Westhavelland am 03.09.2012 mit einer vertikalen Beleuchtungsstärke von 0.6 lx.

II.1.3. Zusammenfassung

Im Rahmen dieses Teilprojekts waren vier Arbeitspakete zu bearbeiten.

AP 1: Konzeption eines Testfeldes

AP 2: Betreuung von Labor- und Freilandexperimenten außerhalb des Testfelds

AP 3: Charakterisierung und Betreuung des Messfeldes

AP 4: Weiterentwicklung bestehender Außenbeleuchtung

Die Arbeitspakete wurden in enger Absprache mit der Verbundprojektkoordination und den betreffenden Verbundprojektpartnern bearbeitet und abgeschlossen. Für die Weiterentwicklung bestehender Außenbeleuchtung konnten bisher nur vorläufige qualitative Schlussfolgerungen gezogen werden. Für quantitative Aussagen sind weitere Ergebnisse aus biologischen Versuchen erforderlich. Insbesondere ist nach wie vor zu klären, welche spektralen Bereiche des Lichts bei verschiedenen Spezies mit Blick auf die nächtliche Beleuchtung biologisch besonders wirksam sind. Für eine quantitative Bewertung ist die Kenntnis spektral abhängiger Wirkungsfunktionen notwendig, wie der für die nächtliche Melatoninsuppression beim Menschen (DIN V 5035-100 2009). Diese liegen aber bisher nicht vor.

Festzuhalten bleibt:

1. Die Empfindlichkeit der Fische wurde deutlich unterschätzt. Die Fische reagieren deutlich stärker auf nächtliche Beleuchtung als erwartet, auch in den bisher untersuchten spektralen Bereichen (blau, grün, rot). Dies unterstreicht aber nur, dass es sinnvoll und notwendig ist, die Folgen nächtlicher Beleuchtung in Ufernähe weiter zu untersuchen.
2. Die lichttechnische Charakterisierung der Freilandversuche kann nicht mit derselben Genauigkeit erfolgen wie bei einer typischen Straßenbeleuchtung. Vegetation und Topografie des Geländes schränken die Möglichkeiten ein. Rückschlüsse zur Wirkung der nächtlichen Beleuchtung im Vergleich zu einem dunklen Referenzfeld sollten in jedem Fall möglich sein. Die Messungen sind außerdem wichtig für einen späteren Vergleich mit der Beleuchtung nach einer Umrüstung auf alternative Lichtquellen.

II.1.4. Literaturverzeichnis

- Aschoff J. 1981. Biological Rhythms. New York: Plenum Press.
- Brainard GC, Lewy AJ, Menaker M, Fredrickson RH, Miller LS, Weleber RG, Cassone V, Hudson D. 1988. DOSE-RESPONSE RELATIONSHIP BETWEEN LIGHT IRRADIANCE AND THE SUPPRESSION OF PLASMA MELATONIN IN HUMAN VOLUNTEERS. Brain Res. 454(1-2):212-218.
- Brainard GC, Barker FM, Hoffman RJ, Stetson MH, Hanifin JP, Podolin PL, Rollag MD. 1994. ULTRAVIOLET REGULATION OF NEUROENDOCRINE AND CIRCADIAN PHYSIOLOGY IN RODENTS. Vision Res 34(11):1521-1533.
- Brainard GC, Rollag MD, Hanifin JP. 1997. Photic regulation of melatonin in humans: Ocular and neural signal transduction. J Biol Rhythm 12(6):537-546.
- Brüning A. 2014. Light pollution suppresses nocturnal melatonin production in European perch but does not affect cortisol release. Submitted to. J Pineal Res.
- Cameron NE. 1982. The Photopic Spectral Sensitivity of a Dichromatic Teleost Fish (Perca-Fluviatilis). Vision Res 22(11):1341-1348.
- Czeisler CA, Allan JS, Strogatz SH, Ronda JM, Sanchez R, Rios CD, Freitag WO, Richardson GS, Kronauer RE. 1986. BRIGHT LIGHT RESETS THE HUMAN CIRCADIAN PACEMAKER INDEPENDENT OF THE TIMING OF THE SLEEP-WAKE CYCLE. Science 233(4764):667-671.

- Czeisler CA, Klerman EB. 1999. Circadian and sleep-dependent regulation of hormone release in humans. *Recent Prog Horm Res* 54:97-132.
- DIN V 5035-100. 2009. Strahlungsphysik im optischen Bereich und Lichttechnik - Teil 100: Über das Auge vermittelte, nichtvisuelle Wirkung des Lichts auf den Menschen - Größen, Formelzeichen und Wirkungsspektren. Berlin: Beuth.
- Downing JEG, Djamgoz MBA, Bowmaker JK. 1986. Photoreceptors of a Cyprinid Fish, the Roach - Morphological and Spectral Characteristics. *J Comp Physiol A* 159(6):859-868.
- Ellis T, James JD, Stewart C, Scott AP. 2004. A non-invasive stress assay based upon measurement of free cortisol released into the water by rainbow trout. *J Fish Biol* 65(5):1233-1252.
- Erren TC, Pape HG, Reiter RJ, Piekarski C. 2008. Chronodisruption and cancer. *Naturwissenschaften* 95(5):367-382.
- Franke S, Brüning A, Hölker F, Kloas W. 2013. Study of Biological Action of Light on Fish. *J. Light & Vis. Env.* 37(4):194-204.
- Gilbert BJ, Arave CW. 1986. ABILITY OF CATTLE TO DISTINGUISH AMONG DIFFERENT WAVELENGTHS OF LIGHT. *J. Dairy Sci.* 69(3):825-832.
- James JD, Ellis T, Scott AP. 2004. Water-based measurement of rainbow trout melatonin. *J Fish Biol* 65(5):1298-1304.
- Knutsson A. 2003. Health disorders of shift workers. *Occupational Medicine-Oxford* 53(2):103-108.
- Kusmic C, Gualtieri P. 2000. Morphology and spectral sensitivities of retinal and extraretinal photoreceptors in freshwater teleosts. *Micron* 31(2):183-200.
- Matsumoto T, Kawamura G, Nishi T, Takada Y, Sugimura N, Yamashita Y, Kurihara K. 2005. Effectiveness of LED flicker lights on invasion by red sea bream *Pagrus major*. *Nippon Suisan Gakk* 71(2):188-197.
- Okamoto T, Takahashi K, Ohsawa H, Fukuchi K, Hosogane K, Kobayashi S, Moniwa M, Sasa K, Yoshino H, Ishikawa H and others. 2008. Application of LEDs to Fishing Lights for Pacific Saury. *J. Light & Vis. Env.* 32(2):88-92.
- Prescott NB, Wathes CM. 1999. Spectral sensitivity of the domestic fowl (*Gallus g. domesticus*). *Br. Poult. Sci.* 40(3):332-339.
- Riley WD, Bendall B, Ives MJ, Edmonds NJ, Maxwell DL. 2012. Street lighting disrupts the diel migratory pattern of wild Atlantic salmon, *Salmo salar* L., smolts leaving their natal stream. *Aquaculture* 330:74-81.
- Vera LM, Davie A, Taylor JF, Migaud H. 2010. Differential light intensity and spectral sensitivities of Atlantic salmon, European sea bass and Atlantic cod pineal glands ex vivo. *Gen Comp Endocr* 165(1):25-33.

II.2. Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Die größte Ausgabenposition sind die Beschäftigungsentgelte für wissenschaftliche Mitarbeiter. Die Arbeiten am INP Greifswald wurden hauptverantwortlich von Dr. Steffen Franke durchgeführt, der auch über die gesamte Projektlaufzeit aus Projektmitteln beschäftigt wurde. Darüber hinaus wurden zeitweise weitere Mitarbeiter des INP in dem Teilprojekt beschäftigt und mit konkreten Aufgaben betraut. Dazu gehörten Karina Barkowski, Jacob Zalach und Dr. Ralf Methling.

Die größte Investition im Rahmen dieses Projekts war die Aquarienbeleuchtung, die in Zusammenarbeit mit der Elektrofirma EIM-Greifswald gebaut wurde. Außerdem wurde aus Investitionsmitteln des Projekts ein Luxmeter der Firma Czibulla & Grundmann gekauft, das auch bei sehr geringen Beleuchtungsstärken messen kann, mit einer wasserfesten Optik ausgestattet ist und die kontinuierliche Datenerfassung erlaubt. Weiterhin wurde ein Kompaktspektrometer der Firma Avantes mit einer wasserfesten Optik von CMS Schreder angeschafft. Projektmitarbeiter sind zu zwei internationalen Tagungen im Ausland gereist, um die Projektergebnisse zu präsentieren (13th International *Symposium* on the Science and Technology of Lighting 2012 in Troy/USA, Lux Europa 2013 in Krakau/Polen).

II.3. Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Die Außenbeleuchtung hat in den vergangenen Jahrzehnten immer weiter zugenommen. Der nächtliche Himmel wird immer stärker erhellte. Immer weniger Regionen weisen eine natürliche nächtliche Helligkeit auf. Die Konsequenzen für Ökosysteme sind noch immer nicht abzuschätzen. Gleichzeitig bergen neue Beleuchtungstechnologien und fallende Kosten für Außenbeleuchtung das Risiko, die Umwelt durch weitere nächtliche Lichtverschmutzung noch stärker zu belasten. Aus diesem Grund sind die Arbeiten notwendig und sollten auch fortgeführt werden. Die interdisziplinäre Zusammenarbeit von Biologen und Physiker/Lichttechnikern hat sich als außerordentlich sinnvoll erwiesen, weil verschiedene Kompetenzen zusammenkommen und sich ergänzen. Das INP hat sich dabei an den Erfordernissen der Projektpartner orientiert und diese bestmöglich mit seiner Expertise unterstützt. Die Aufgaben wurden in enger Absprache mit den Projektpartnern bearbeitet.

II.4. Voraussichtlicher Nutzen, insbesondere Verwertbarkeit des Ergebnisses im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans

Der unmittelbare Nutzen, der in diesem Teilprojekt gewonnenen Ergebnisse, besteht zunächst in deren Verwertung für die beiden Teilprojekten 9 („Fische“) und 14 („IP Feld“), z.B. durch Berücksichtigung der lichttechnischen Charakterisierung der Beleuchtung bei der Auswertung der Versuche. Weitere verhaltensbiologische und physiologische Ergebnisse aus biologischen Versuchen sind aber notwendig, um quantitative Anforderungen an zukünftige Außenbeleuchtungssysteme zu definieren. Insbesondere ist nach wie vor zu klären, welche spektralen Bereiche des Lichts bei verschiedenen Spezies mit Blick auf die nächtliche Beleuchtung biologisch besonders wirksam sind. Für eine quantitative Bewertung ist die Kenntnis spektral abhängiger Wirkungsfunktionen notwendig, wie der für die nächtliche Melatonin-suppression beim Menschen (DIN V 5035-100 2009). Diese liegen aber bisher nicht vor. Der wissenschaftliche Nutzen ist an den Ergebnissen erkennbar, die auf Tagungen und in Fachzeitschriften präsentiert wurden sowie an der Resonanz auf dieses Thema in der wissenschaftlichen Gemeinschaft. Die öffentliche Wahrnehmung von Lichtverschmutzung hat nicht zuletzt durch das Verbundprojekt zugenommen und sicher zur Sensibilisierung für dieses Thema in der Öffentlichkeit beigetragen.

II.5. Während der Durchführung des Vorhabens dem ZE bekannt gewordener Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen

Sowohl die Laborversuche mit Fischen als auch die Freilandversuche im Westhavelland sind international einzigartig. Gleichwohl zeigte die vom Verbundprojekt organisierte internationale Tagung ALAN im Oktober 2013 in Berlin die große Resonanz zum Thema biologischer Wirkung nächtlicher Beleuchtung mit einer Fülle angrenzender Forschungsthemen. Ähnliche Untersuchungen wie im Verbundprojekt werden von einer niederländischen Gruppe am „Netherlands Institute of Ecology“ in Wageningen vorangetrieben:

<http://www.nioo.knaw.nl/en/node/2026>, <http://www.lichtopnatuur.org/>.

Allerdings hat man dort darauf verzichtet, zunächst die Wirkung einer typischen Straßenbeleuchtung, wie der Natriumdampflampe, zu untersuchen und gleich die unterschiedliche Wirkung verschiedener Lichtfarben (blau, grün, rot) bei Freilandversuchen in den Blick genommen. Die Untersuchungen sind insofern komplementär.

II.6. Erfolgte oder geplante Veröffentlichung des Ergebnisses nach Nr. 6

Konferenzbeiträge:

- [1] Franke, St.; Brüning, A.; Hölker, F.; Kloas, W.: Ecophysiological aspects of exterior lighting on fish. Laboratory experiments. *Proc. 12th European Lighting Conference* (Lux Europa, Krakow, Poland, 2013), p. 680-682
- [2] Brüning, A.; Franke, St.; Preuer, T.; Hölker, F.; Kloas, W.: Perches in spotlight - Does light pollution impair fish's biological rhythm? *Proc. First International Conference on Artificial Light at Night* (ALAN, Berlin, Germany, 2013), p. 41
- [3] Franke, St.; Brüning, A.; Schöpp, H.; Hölker, F.; Kloas, W.: Biological action of light on fish. How to create a proper experimental illumination design? *Proc. 13th Int. Symp. Sci. and Technol. of Lighting* (LS, Troy, New York, USA, 2012), p. 411-412

Paper:

- [1] Brüning, A.: Light pollution suppresses nocturnal melatonin production in European perch but does not affect cortisol release. Submitted to. *J. Pineal Res.* (2014)
- [2] Franke, St.; Brüning, A.; Hölker, F.; Kloas, W.: Study of Biological Action of Light on Fish. *J. Light & Vis. Env.* 37 (2013) 4, 194-204
- [3] Hölker, F.; Moss, T.; Griefahn, B.; Koas, W.; Voigt, Ch. C.; Henckel, D.; Hänel, A.; Kappeler, P. M.; Völker, St.; Schwoppe, A.; Franke, St.; Uhrlandt, D.; Fischer, J.; Klenke, R.; Wolter, Ch.; Trockner, K.: The Dark Side of Light: A Transdisciplinary Research Agenda for Light Pollution Policy. *Ecology and Society* 15 (2010) 4, 13

Greifswald, den 30. April 2014

Dr. Dirk Uhrlandt (Projektleiter)