



Felix Höfer, *1998

Schule:
Gymnasium Othmarschen,
Hamburg

Eingang der Arbeit:
Juli 2014

Zur Veröffentlichung angenommen:
Juli 2014

Lichtempfindliche Proteine

Transmissionsverhalten von Blättern der Bohne *Phaseolus vulgaris* nach Rotlichtbestrahlung

Pflanzen brauchen Licht. Das ist klar, aber wie können sie Licht wahrnehmen? Die Antwort lautet: mithilfe von lichtempfindlichen Proteinen, also Fotorezeptoren. In meiner Arbeit befasste ich mich mit einem dieser Fotorezeptoren, dem Phytochrom, und versuche, ihn in-vivo anhand der Lichtdurchlässigkeit des Blattes nachzuweisen. Dazu habe ich eine präzise Messapparatur entwickelt, mit der es mir gelungen ist, einen Phytochrom-typischen Effekt zu messen.

1 Einleitung

Fotorezeptoren sind lichtempfindliche Proteine, die es Pflanzen ermöglichen, sich an wechselnde Umweltbedingungen anzupassen und zu überleben. In der Literatur werden verschiedene Fotorezeptoren beschrieben: Phytochrome, Cryptochrome und Phototropine. Phytochrome messen das Verhältnis aus hell- und dunkelrotem Licht und sind an Samenkeimung [1], Schattenflucht [2] und Photomorphogenese beteiligt. Cryptochrome sind als Blaulichtrezeptor auch an der Photomorphogenese beteiligt [3]. Ebenso wie die Cryptochrome absorbieren auch die Phototropine vorwiegend im UV-/Blau-Spektrum. Mit ihrer Hilfe kann eine Pflanze in Richtung des Lichtes wachsen (Phototropismus) [4]. In meiner Arbeit konzentriere ich mich auf den Fotorezeptor Phytochrom.

Der Nachweis von Phytochrom in-vitro und in isolierter Form ist aufwändig. Ziel der Versuche ist es, mithilfe von LEDs die Transmission des Blattes nach einer hell- und dunkelroten Bestrahlung zu messen und so Phytochrom in-vivo nachzuweisen. Dieser Nachweis ist theoretisch möglich, da Phytochrom in zwei Zuständen P_r und P_{fr} vorkommt, die mithilfe von Licht ineinander umgewandelt werden können. Phytochrom liegt zunächst in der P_r -Form vor. Es kann durch hellrote Bestrahlung in die P_{fr} -Form umgewandelt werden. Durch dunkelrote Bestrahlung wird die P_{fr} -Form wieder in die P_r -Form umgewandelt.

2 Überblick

Zur Untersuchung des Transmissionsverhaltens werden bewurzelte Pflanzen der Art *Phaseolus vulgaris* (Buschboh-

ne) in eine Dunkelkammer mit einer von mir konzipierten und gebauten Messapparatur gestellt. Dort rufe ich durch die Bestrahlung mit zwei hellen Leuchtdioden (LED, engl. light-emitting diode) HR-LED (hellrot, 660 nm) und DR-LED (dunkelrot, 740 nm) im Blatt Veränderungen hervor ("Bestrahlung"). Dazu werden sowohl Bestrahlungsdauern als auch Dunkelphasen variiert. Um die Veränderungen im Blatt zu analysieren, wird das Blatt mit dem Licht verschiedenfarbiger Leuchtdioden bestrahlt ("Messung").

Mit einem Fototransistor hinter dem Blatt wird die Transmission gemessen und die Veränderung der Transmission bei den verschiedenen Wellenlängen untersucht (Abb. 1). Dazu wird das Signal des Fototransistors in einer Verstärkerschaltung verstärkt. Werfen wir

nun einen Blick auf die Elektronik: Die Steuerzentrale, die alle LEDs und Verstärkerschaltungen steuert, heißt LabJack. LabJack ist ein USB Mini-Mess-Labor, wie ihn die Hersteller-Website Meilhaus Electronic [5] beschreibt. LabJack bietet digitale und analoge Input- und Output-Kanäle, die man über USB vom Computer steuern kann. Die Steuerung von LabJack erfolgt durch ein selbstgeschriebenes VBA-Programm (engl. Visual Basic for Applications).

3 Die Messanordnung zur Bestimmung des Transmissionsverhaltens von Blättern

Im Folgenden werde ich auf die Messanordnung eingehen, mit der ich das Transmissionsverhalten der Blätter messen kann.

3.1 Elektronik

Es gibt zwei Spannungswandler (siehe Abb. 2): der eine versorgt praktisch die gesamte Schaltung mit einer Spannung von 5 Volt, der andere ist nur für die Verstärkerschaltung da, da diese sehr empfindlich auf kleinste Spannungsschwankungen reagiert. Der "Treiber" ermöglicht die Steuerung der hell- und dunkelroten LEDs bis zu einem Strom von 1 Ampere. Diesen benötigt man, da LabJack keine so hohen Ströme schalten kann. Die 13 LEDs werden auch vom LabJack gesteuert. Durch die Steuerschaltung vor diesen LEDs werden diese 13 LEDs mit nur vier Steuerleitungen angesteuert. Die Verstärkerschaltung verstärkt das Signal, das vom Fototransistor kommt und gibt dieses an LabJack weiter.

3.1.1 Die Schaltzentrale: LabJack

LabJack (siehe Abb. 3) bietet acht flexible Ein-/Ausgänge FIO0 bis FIO7, die als digitale Ein-/Ausgänge oder als analoge Eingänge (12 Bit A/D-Wandler) dienen können, sowie zwei analoge Ausgänge DAC0 und DAC1 (14 Bit D/A-Wandler). LabJack wird von dem Computer aus gesteuert.

3.1.2 Die LEDs zur Bestrahlung

In der Dunkelkammer (siehe Abb. 5, Seite 28) sind zwei LEDs an der Decke befestigt, eine hell-(660 nm) und eine dunkelrote (740 nm) LED. Diese bestrahlen das zu untersuchende Blatt. Sie dienen nicht zur Messung.

1. Bestrahlung (z.B. HR)
2. Messung
3. Bestrahlung (z.B. DR)
4. Messung
5. Bestrahlung (z.B. HR) ...

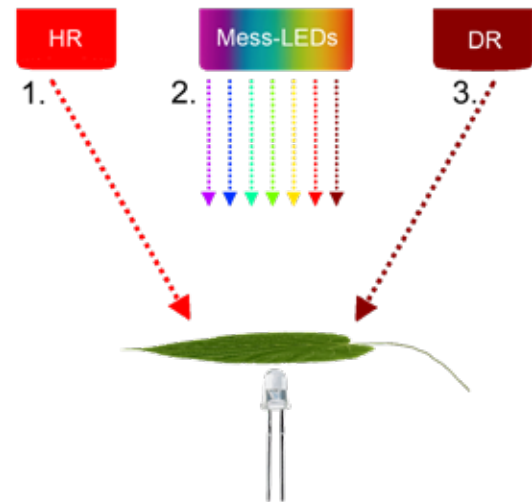


Abb. 1: Prinzipieller Aufbau des Versuchs und schematischer Ablauf.

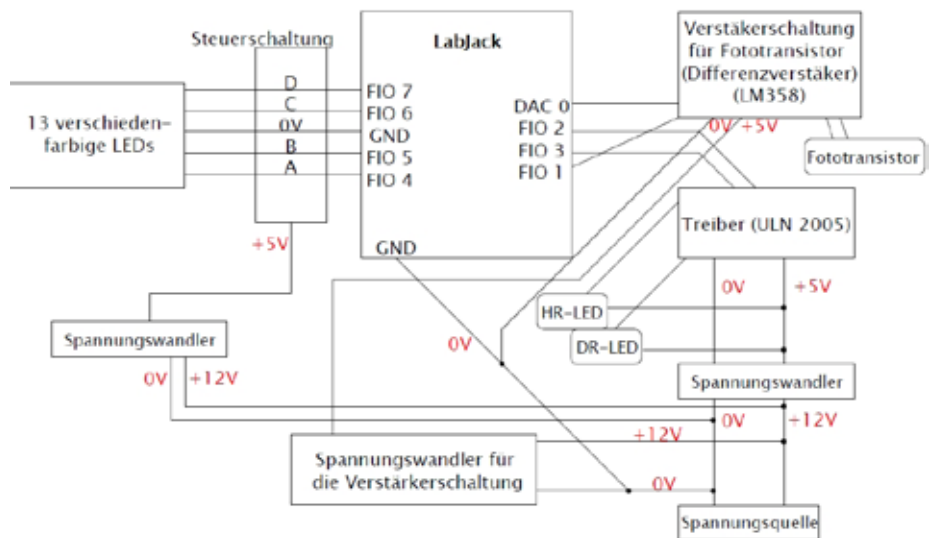


Abb. 2: Block Schaltplan.

3.1.3 Die LEDs zum Messen

Ich habe insgesamt 13 Mess-Leuchtdioden ausgewählt, die weitgehend das gesamte sichtbare Spektrum abdecken: 400 nm, 460 nm, 505 nm, 525 nm, 545 nm, 572 nm, 590 nm, 605 nm, 625 nm, 660 nm, 740 nm, 875 nm, (950 nm).

3.1.4 Die Verstärkerschaltung

Die Verstärkerschaltung verstärkt das Signal, welches vom Fototransistor kommt. Der Fototransistor bildet mit dem Widerstand R5 einen Spannungsteiler (siehe Abb. 4, Seite 28). Fällt kein Licht auf den Fototransistor, so sperrt er, fällt etwas Licht auf ihn, so beginnt er immer mehr zu leiten, und die Spannung wächst an. Da die Spannungsänderungen am Fototransistor sehr gering sind, musste ich das Signal verstärken. Dies gelingt mit zwei



Abb. 3: LabJack U3.

Operationsverstärkern (OP) vom Typ LM358. Im ersten OP wird die Differenz um den Faktor $\approx 100 = R_6/R_7$ verstärkt. Eine höhere Verstärkung ist nicht sinnvoll, da die 13 LEDs unterschiedlich hell sind und das Blatt bei verschiedenen Wellenlängen unterschiedlich viel Licht absorbiert. Das Signal am Ausgang des ersten OP könnte schon mit dem A/D-Wandler des LabJack vermessen werden. Allerdings beträgt die Auflösung nur 12 Bit, so dass die Veränderungen nicht genau genug gemessen werden können. Daher wende ich einen Trick an: Das Signal des Ausgangs des ersten OP wird mit einem geeigneten analogen Ausgangssignal (im Folgenden als Referenzspannung bezeichnet) am Port DAC0 des LabJack verglichen. Dies macht der zweite Operationsverstärker als Differenzverstärker. Die Verstärkung beträgt wieder $\approx 100 = R_2/R_1$ wobei $R_1 = R_3$ und $R_2 = R_4$. Die Spannung am Ausgang des OP misst der analoge Eingang FIO1 des LabJack. Praktisch wird die Genauigkeit durch die Qualität des analogen Ausgangs des LabJack begrenzt.

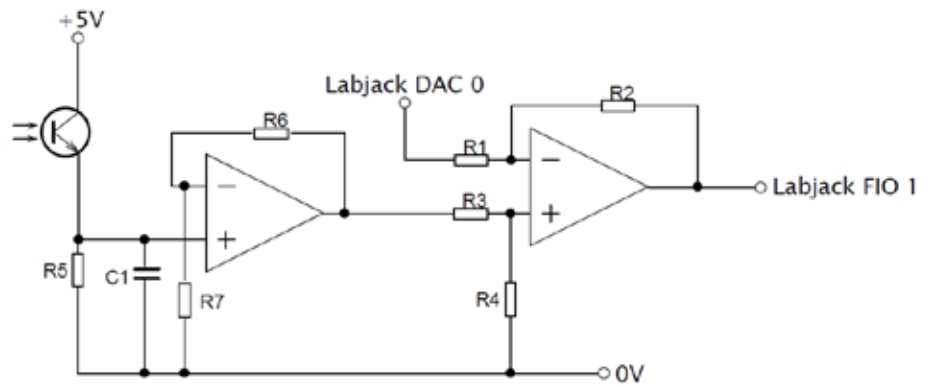


Abb. 4: Schaltplan des Differenzverstärkers.

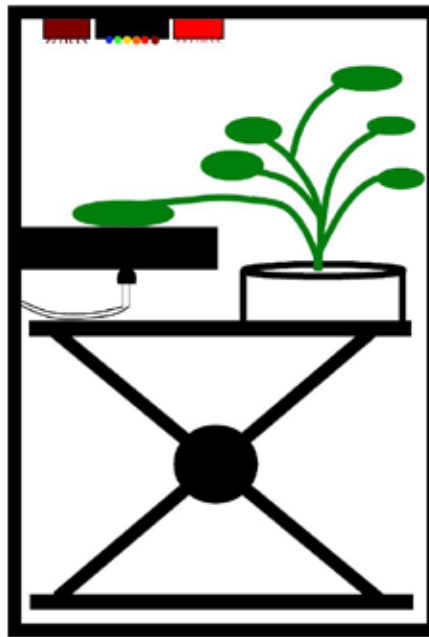


Abb. 5: Die Dunkelkammer.

3.2 Die Dunkelkammer

Die Messungen finden in der Dunkelkammer statt (Abb. 5). Damit kein Licht hereinkommt, ist sie während der Messungen immer verschlossen. Das Blatt wird mithilfe von kleinen Klemmen fixiert. Unter dem Blatt ist der Fototransistor befestigt. Über dem Blatt sitzen alle LEDs. Auf der Rückseite befindet sich die Mess-Elektronik.

4 Programmierung

Die Programmierung des LabJack fand in der Programmiersprache VBA in Excel statt. Zuerst werden mit dem Programm die Referenzspannungen für jede der 13 LEDs festgestellt (siehe unten). Diese Referenzspannungen hängen von der LED und vom Blatt ab. Sie werden über den Port DAC0 ausgegeben und so gewählt, dass der Wert am Port FIO1 möglichst bei ca. 1,25 V, der Hälfte der maximal messbaren Spannung von 2,5 V, liegt, sodass man Helligkeitsschwankungen in beide Richtungen gut beobachten kann. Eine höhere Spannung bedeutet hierbei eine höhere Transmission. Im zweiten Schritt werden je nach

Messung verschiedene Bestrahlungs-LEDs angestellt, z.B. kann man zuerst 5 Minuten die HR-LED anstellen (zwischendurch werden mit allen 13 LEDs in einem gewissen zeitlichen Abstand Messungen durchgeführt) und dann z.B. die DR-LED anstellen und Messungen durchführen. Jede Messung ist eine Mittelung aus mehreren Messwerten. Die Referenzspannung wurde mit einem Intervallhalbierungsverfahren ermittelt: LabJack setzt den Port DAC0 auf $(0+5)/2$ V und misst den Wert am Ausgang des zweiten OP mit dem Port FIO1.

Erster Schritt: Wenn die Spannung an FIO1 zwischen 1,0 V und 1,5 V liegt, ist das Ziel erreicht. Wenn die Spannung an FIO1 höher als 1,5 V ist, dann setzt LabJack DAC0 auf

$(2,5+5)/2$ V. Wenn die Spannung an FIO1 geringer als 1,0 V ist, dann setzt LabJack DAC0 auf $(0+2,5)/2$ V. Dies wird so lange wiederholt, bis die Spannung an FIO1 zwischen 1,0 V und 1,5 V liegt oder der Wert an DAC0 sich nicht mehr ändert, da die Auflösung erreicht ist (letzterer Fall tritt im Allgemeinen nicht auf). Steigt die Spannung an FIO1 im Laufe der Messungen über 1,5 V bzw. fällt sie unter 1,0 V, so wird die Referenzspannung entsprechend variiert.

5 Probleme

5.1 Technische Probleme bei der Messapparatur

Ein Problem, das der Gewinnung valider Versuchsergebnisse zum Transmissionsverhalten der Pflanzen im Wege stand, war die Störanfälligkeit des

Signals vom Fototransistor. Mithilfe eines Oszilloskops konnte ich ein klares sinusförmiges Störsignal feststellen. Ein abgeschirmtes Kabel für die Verbindung zwischen Fototransistor und der Verstärkerschaltung reduzierte das Störsignal deutlich. Ein weiterer wichtiger Optimierungsschritt war die Wahl eines geeigneten Materials für das Gehäuse der Verstärkerschaltung. Eine weitere Idee, als Stromversorgung eine Batterie mit in das Metallgehäuse zu integrieren, brachte keine Genauigkeitsverbesserung und wurde daher nicht weiter verfolgt. Des Weiteren habe ich ein metallisches und geerdetes Klebeband um die Objektträgerplatte, in der der Fototransistor steckt, geklebt. Dadurch wurden eventuell einfallende Störspannungen wirkungsvoll abgeleitet, bevor sie zum Fototransistor gelangten. Auch habe ich für die Verstärkerschaltung Metallfilmwiderstände verwendet, da diese wesentlich temperaturunabhängiger sind als die herkömmlichen Kohleschichtwiderstände. Für die Verstärkerschaltung ist ein eigener Präzisions-Spannungsregler vom Typ LT1086CT5 eingebaut, um Schwankungen der Spannung, insbesondere aufgrund thermischer Effekte, möglichst auszuschließen.

5.2 Probleme bei der Messung der Transmission

Leider konnte ich nicht einfach eine einzige Messung mit einer LED machen, da die Messfehler des in geringem Umfang immer noch vorhandenen sinusförmigen Störsignals zu hoch waren. Eine Mittelung über 10 Messwerte hat sich als guter Kompromiss zwischen statistischer Genauigkeit und Messdauer herausgestellt. Dadurch ist die Messung des Ausgangssignals am ersten Operationsverstärker bis zu einer Genauigkeit von etwa 0,25 mV möglich. Änderungen des Potentials am Fototransistor werden folglich mit einer Genauigkeit von etwa 3 µV gemessen. Die im Folgenden genannten Spannungen und Spannungsänderungen beziehen sich immer auf den Wert am Ausgang des ersten OP.

5.3 Kontrollmessungen mit Papier (Validitätskontrolle)

Um auszuschließen, dass die gemessenen Effekte auf Fehlfunktionen der

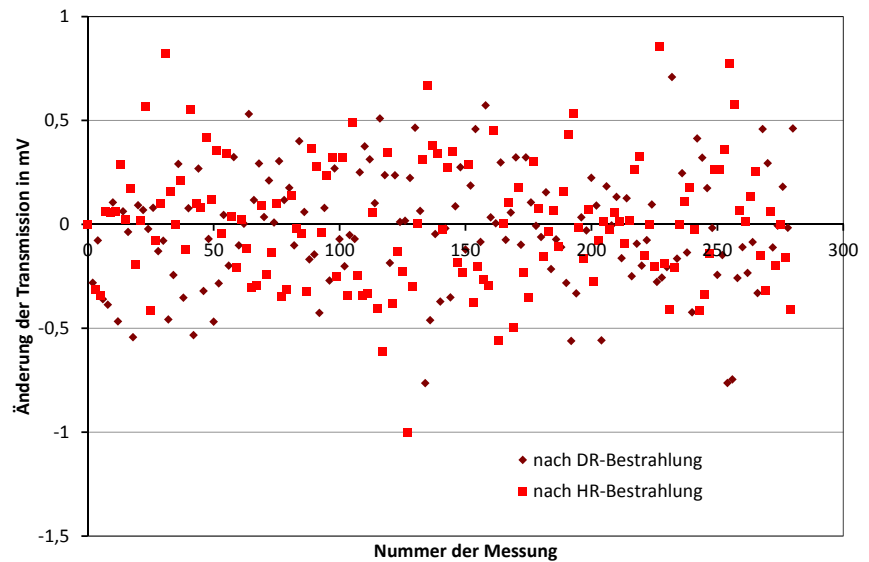


Abb. 6: Messung der Transmission von Papier (525 nm).

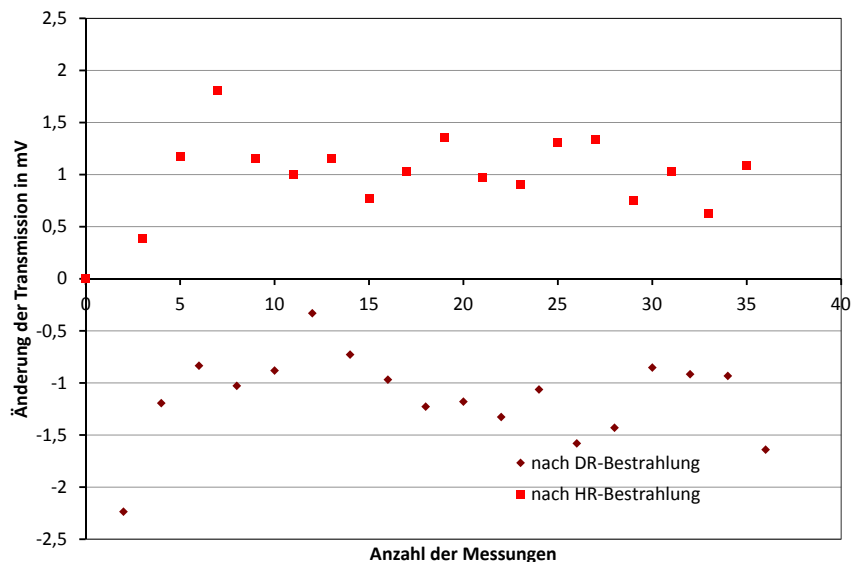


Abb. 7: Versuch mit fester Bestrahlungsdauer: Messung bei 590 nm nach jeweils 5 min Bestrahlung.

Elektronik zurückzuführen sind, habe ich mehrmals Versuche mit einem nicht fotosensitiven Material, einem Blatt Papier, anstelle von Blättern der Buschbohne durchgeführt. Bei dem folgenden Versuch habe ich ein Blatt Papier fünf Minuten lang, abwechselnd HR- und DR-Bestrahlung (HR=hellrot, DR=Dunkelrot) ausgesetzt.

Das Ergebnis ist in Abb. 6 angegeben. Die x-Achse zeigt die Nummer der Messung, die y-Achse die Änderung der Transmission zum Messzeitpunkt im Vergleich zur vorangegangenen Messung. Die Änderung der Trans-

mission wird gemessen als Änderung des gemessenen Potentials [mV] am Ausgang des ersten Operationsverstärkers im Vergleich zur vorangegangenen Messung. Wie man sieht, ist eine gleichmäßige Verteilung der Werte nach einer HR- und nach einer DR-Bestrahlung zu sehen. Die Werte streuen im Rahmen der Messgenauigkeit um den Wert 0.

6 Versuche

Nachdem mithilfe des Kontrollversuchs mit Papier die Validität der Messungen sichergestellt war, führte ich Messungen am lebendigen Blatt durch, die den beiden Kategorien "feste Be-

strahlungsdauer" und "variierende Bestrahlungsdauer" zugeordnet werden können. Bei einer festen Bestrahlungsdauer ist die Bestrahlungsdauer, in der das Blatt mit der HR- oder der DR-LED bestrahlt wird, immer gleichbleibend. Bei einer variierenden Bestrahlungsdauer wird die Dauer verändert. So wollte ich feststellen, wie lange ein Blatt bestrahlt werden muss, um eine Reaktion in Form der Änderung der Durchlässigkeit messen zu können.

6.1 Versuch mit fester Bestrahlungsdauer

Das Blatt wurde abwechselnd mit hell- und dunkelrotem Licht 5 Minuten lang bestrahlt. Nach jeder Bestrahlung wurde eine Messung mit den Mess-LEDs durchgeführt, um die Transmission zu bestimmen. Das Ergebnis zeigt Abb. 7, Seite 29. Bei diesem Versuch wurden 36 Messungen gemacht. Die Abbildungen zeigen immer die Änderungen der Durchlässigkeit (Spannung in mV) im Vergleich zur vorherigen Messung, also die Ableitung, in diesem Fall für die 590 nm-LED, die repräsentativ für alle LEDs außer die 875 nm LED ist. Die x-Achse zeigt die Nummer 0 ... 35 der Messung. Bei allen weiteren Versuchen dieser Art lag die HR-Kurve immer über der DR-Kurve aller LEDs. Bei einem reinen Phytochrom-Effekt hätte ich erwartet, dass sich die Kurven bei 740 nm genau andersherum verhalten.

6.2 Versuche mit variierender Bestrahlungsdauer

6.2.1 Bestrahlungsdauer 10 bis 50 Sekunden

Das Blatt wurde wieder im Wechsel mit HR- und DR-Licht bestrahlt. Im ersten Abschnitt dauerte die Bestrahlung jeweils 10 Sekunden, dann jeweils 30 Sekunden und schließlich 50 Sekunden. In jedem Abschnitt wurden 15 HR und 15 DR Bestrahlungen durchgeführt. Vor jeder Bestrahlungseinheit wurde eine Stunde gewartet. In Abb. 8 ist das Ergebnis gezeigt. Auffallend ist die Spiegelung der Transmissionsänderungswerte nach einer HR- und einer DR-Bestrahlung an der x-Achse. Auch gibt es nach der ersten Messung einer Messreihe (10, 30, 50 Sek.) einen Rückgang der Transmissionsänderungen.

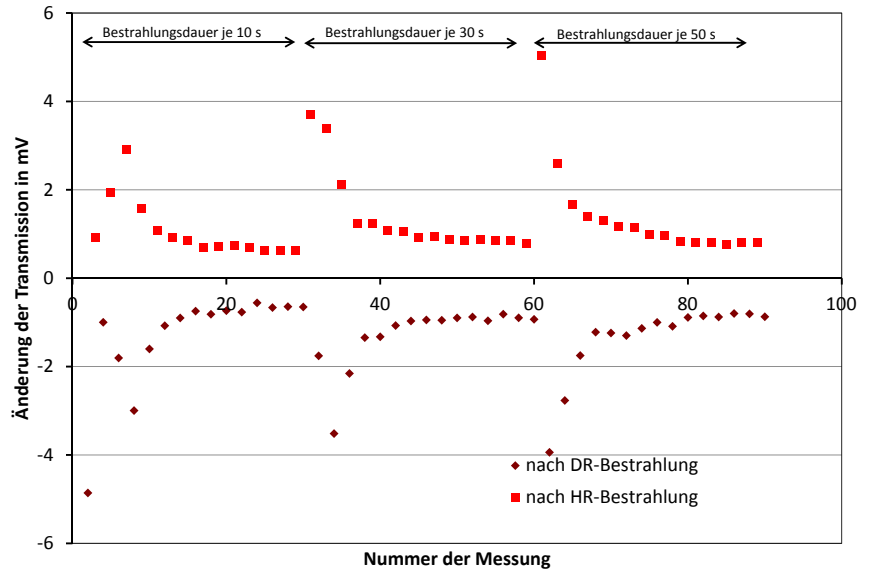


Abb. 8: Versuch mit variierender Bestrahlungsdauer zwischen 10 und 50 Sekunden. Messung bei 460 nm.

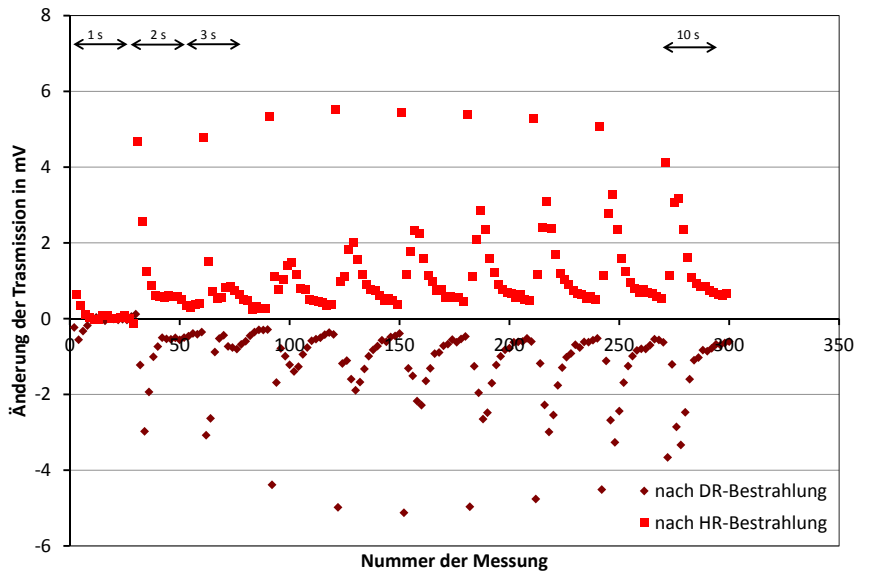


Abb. 9: Versuch mit variierender Bestrahlungsdauer zwischen 1 und 10 Sekunden. Messung bei 460 nm.

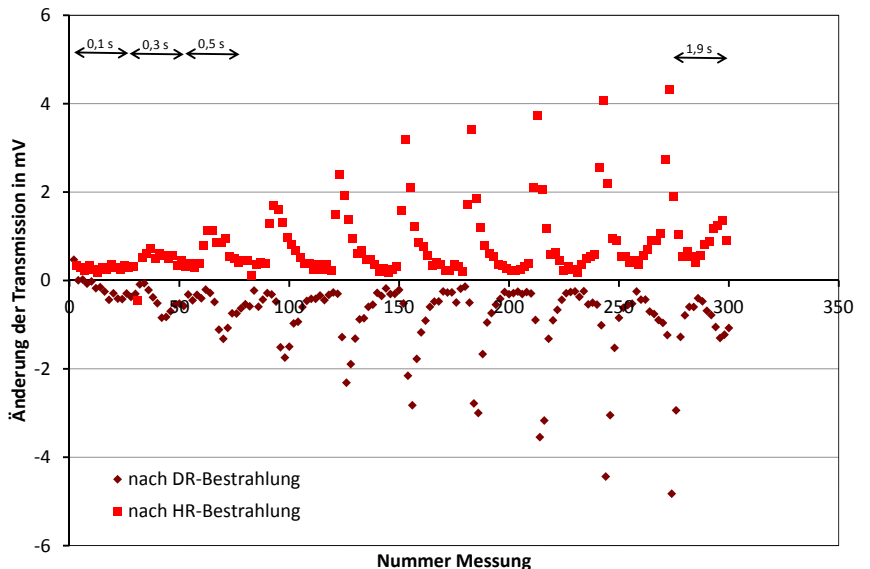


Abb. 10: Versuch mit variierender Bestrahlungsdauer zwischen 0,1 und 1,9 Sekunden. Messung bei 460 nm.

6.2.2 Bestrahlungsdauer 1 bis 10 Sekunden

Der Ablauf ist der gleiche wie im vorangegangenen Versuch, jedoch wurde das Blatt nur 1,2,3 ... 10 Sekunden lang bestrahlt, siehe Abb. 9. Die Transmissionsänderungen steigen bis zu einer Bestrahlungsdauer von ca. 5 Sekunden an, wobei wieder eine Spiegelung der HR- und DR-Werte an der x-Achse sowie ein Rückgang nach der ersten Messung einer Messreihe zu beobachten ist.

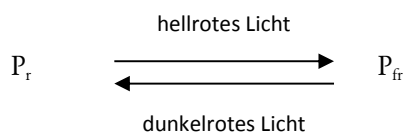
6.2.3 Bestrahlungsdauer 0,1 bis 1,9 Sekunden

Der Ablauf ist der gleiche wie im vorangegangenen Versuch, nur wurde das Blatt jetzt noch kürzer mit 0,1; 0,3; 0,5 ... 1,9 Sekunden Dauer bestrahlt, siehe Abb. 10. Die Transmissionsänderungen steigen mit höher werdender Bestrahlungsdauer an. Wieder sind eine Spiegelung der HR- und DR-Werte an der x-Achse sowie ein Rückgang nach der ersten Messung einer Messreihe zu beobachten.

7 Diskussion

7.1 Versuche mit fester Bestrahlungsdauer

Das forschungsleitende Ziel meiner Arbeit war es, durch eine Bestrahlung mit hellrotem (HR) und dunkelrotem (DR) Licht das Phytochrom in den Blättern (in-vivo) der Bohne *Phaseolus vulgaris* nachzuweisen. Dieser Nachweis ist theoretisch möglich, da Phytochrommoleküle in zwei Zuständen vorkommen (P_r , P_{fr}), die mithilfe von Licht ineinander umgewandelt werden können. Phytochrom wird durch HR-Bestrahlung in den P_{fr} -Zustand versetzt, durch DR-Bestrahlung in den P_r -Zustand (siehe Abb. 11):



Der Versuch mit einer Bestrahlungsdauer von 5 Minuten hat gezeigt, dass die Durchlässigkeit nach einer HR-Bestrahlung bei allen Wellenlängen (400 nm, 460 nm, 505 nm, 525 nm, 545 nm, 572 nm, 590 nm, 605 nm, 625 nm, 660 nm, 740 nm) größer war als nach einer DR-Bestrahlung. Bei einem reinen Phytochrom-Extrakt

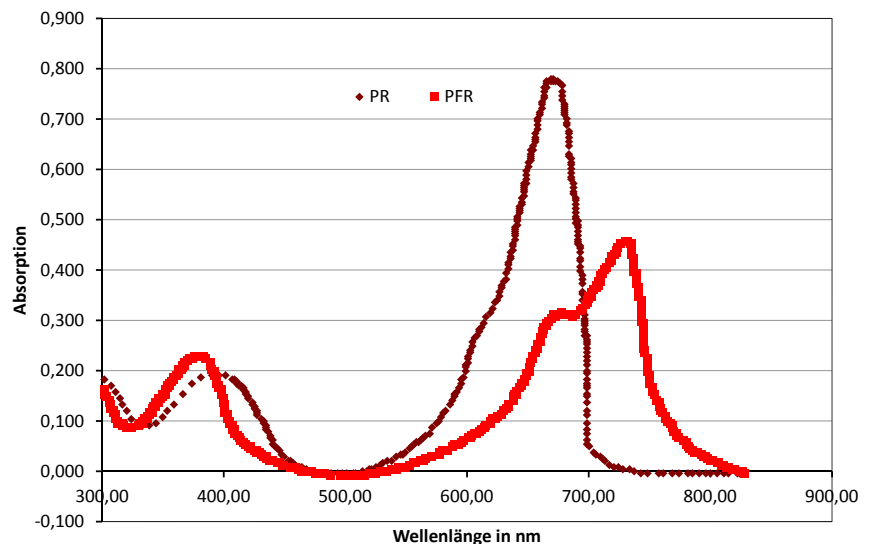


Abb. 11: Absorptionsspektrum der beiden Formen des Phytochroms P_r und P_{fr} . [6]

müsste sich die Durchlässigkeit nach einer DR-Bestrahlung bei 740 nm genau andersherum verhalten, d.h. sie müsste, durch DR-Bestrahlung in die P_r -Form versetzt, höher sein. Dies ist nicht der Fall. Daher habe ich keinen reinen Phytochrom-Effekt gemessen. Auch in der pflanzenphysiologischen Forschung stellen in-vivo Messungen von Phytochrom ein bislang nicht befriedigend gelöstes Problem [7] dar. Als biologische Gründe werden die geringen Phytochrom-Konzentrationen in-vivo genannt sowie die Tatsache, dass Chlorophyll und andere Blattfarbstoffe im gleichen spektralen Bereich absorbieren wie Phytochrom.

7.2 Versuche mit variierender Bestrahlungsdauer

Auffällig bei diesen Versuchen war, dass sich die beiden Kurven an der x-Achse praktisch spiegeln. Der erste Versuch (Abb. 8) hat gezeigt, dass innerhalb der Messreihen mit den jeweiligen Bestrahlungsdauern die "Reaktivität" abnimmt, mit Ausnahme der ersten Bestrahlungsdauer: 10 Sekunden. Deshalb habe ich die gleiche Messung mit Bestrahlungsdauern von 1 bis 10 Sekunden durchgeführt. Wieder gab es einen Rückgang innerhalb der Messreihen mit den jeweiligen Bestrahlungsdauern.

Der Rückgang direkt nach der ersten Messung war immer der größte. Insgesamt betrachtet ist das "Reaktivitätsmaximum" bei ca. 5 Sekunden Bestrahlungsdauer. Wieder habe ich die Bestrahlungsdauern verkleinert,

auf 0,1 bis 1,9 Sekunden. Ich habe mich auf einige wenige Mess-LEDs beschränkt, da sonst die eigentliche Messung unter Umständen länger gedauert hätte als die Bestrahlung. Unter diesen Bedingungen ist ein fast linearer Anstieg, bzw. Rückgang nach einer DR-Bestrahlung zu erkennen. Bei der Betrachtung der Abbildungen 8 und 9 sieht man, dass schon bei kurzen Bestrahlungsdauern ein Effekt zu messen ist, der mit steigender Bestrahlungsdauer stärker wird. Ab einer Bestrahlungsdauer von ca. 5 Sekunden (ca. 6 mV) tritt ein Sättigungsverhalten ein. Selbst bei einer Bestrahlungsdauer von 50 Sekunden ist nur noch eine Änderung der Transmission von 7 mV zu messen.

In den Versuchen mit variierender Bestrahlungsdauer wird ein Sättigungsverhalten, das die Transmission in Abhängigkeit von der Bestrahlungsdauer betrifft, deutlich, das als Gleichgewichtszustand interpretiert werden kann. Diese Sättigung setzt nach ca. 5 Sekunden Bestrahlungsdauer ein. Bemerkenswert ist ein entgegengesetztes Verhalten bei der Transmission nach einer HR- bzw. DR-Bestrahlung mit variierender Bestrahlungsdauer. Dies bedeutet, dass der gemessene Effekt nach HR-Bestrahlung schon durch kürzeste Bestrahlung mit DR-Licht umgekehrt wird (reversibel).

8 Zusammenfassung

Mithilfe meiner selbst konzipierten und gebauten Messapparatur konnte ich Transmissionsänderungen von

Licht verschiedener Wellenlängen durch ein Blatt nach einer HR- und DR-Bestrahlung nachweisen. Die gemessenen Effekte sind tatsächlich Reaktionen innerhalb des Blattes und gehen nicht auf einen mangelhaften Versuchsaufbau zurück, wie ich in Kapitel 5.3 zeigen konnte. Die Messergebnisse lassen sich auf Grund der spektralen Verteilung des Effektes durch einen reinen Phytochrom-Effekt nicht erklären, da bei allen gemessenen Wellenlängen die Transmission nach HR-Bestrahlung größer als nach DR-Bestrahlung ist. Dies ist auch der Grund dafür, dass der pflanzenphysiologische Effekt, der meinen Messungen zugrunde liegt, nicht allein auf Ebene der Blattfarbstoffe zu suchen ist. Deshalb gehe ich von einem Effekt aus, der sehr wahrscheinlich durch Phytochrom gesteuert ist, da das Blatt genau in dem spektralen Bereich reagierte, der auf das Phytochrom zurückzuführen ist. Bei Algen (*Mougeotia*) wurde eine Phytochrom gesteuerte Chloroplastenbewegung festgestellt [8]. Jedoch ist einerseits nicht klar, ob dies auch für Bohnen gilt; und andererseits dauern diese Bewegungen um die 30 Minuten, weshalb dieser Erklärungsansatz in Bezug auf meine Versuchsergebnisse zweifelhaft ist. Mein anfängliches Ziel, Phyto-

chrom in-vivo zu messen, hat sich als schwieriger herausgestellt als anfangs gedacht. Jedoch habe ich es geschafft, ohne Verwendung teurer Messinstrumente experimentell einen Effekt zu dokumentieren, der sehr wahrscheinlich vom Phytochrom gesteuert ist. Eine mögliche Erklärung für den von mir dokumentierten Effekt könnte ein phytochrominduzierter Zusammenschluss kolloidaler Teilchen sein. Ein solcher Zusammenschluss würde die Fläche der Teilchen, die für eine Absorption von Licht durch die kolloidalen Teilchen zur Verfügung steht, verringern und somit über das gesamte Spektrum hinweg eine erhöhte Transmission erklären.

9 Ausblick

Wie ist der Effekt zu erklären? Bei der Suche nach möglichen Lösungen habe ich auch an eine Phytochrom-gesteuerte Lageveränderung von Chloroplasten gedacht, wie sie bei der Alge *Mougeotia* beschrieben worden ist. Eine andere Erklärung für die Änderung des Transmissionsverhaltens nach Bestrahlung könnte eine Verlagerung kolloidaler Teilchen, wie eventuelle Chloroplastenbewegungen oder sich zusammenklumpende Proteinkomplexe sein. Dies will ich auf jeden Fall mit einem Mikroskop stärkerer Vergröße-

rung überprüfen. Des Weiteren führe ich aktuell Versuche mit abgeschnittenen Blättern durch und beobachte sie vom Zeitpunkt des Abschneidens bis sie tot sind, d.h. keine Reaktion auf Lichtimpulse zeigen. So erhoffe ich, Rückschlüsse auf den Zeitpunkt des Abschneidens anhand der Reaktionsfähigkeit auf Lichtimpulse zu gewinnen ("Wie frisch ist mein Salat?").

Danksagung

Ich danke meinem Betreuer und Lehrer Dr. Dr. Horst Schneeweiß. Des Weiteren möchte ich mich auch bei Dr. habil. Hartwig Lüthen von der Universität Hamburg für seine fachliche Unterstützung und die Bereitstellung von Messgeräten herzlich bedanken.

Quellenverzeichnis

- [1] <http://www.pflanzenforschung.de/index.php?cID=8251>
- [2] Peter, H. Rauen, Ray F. Evert, Susan E. Eichhorn: Biologie der Pflanzen. 4. Auflage. De Gruyter, Berlin, New York 2006. ISBN 978-3-11-018531-7. S. 722
- [3] <http://de.wikipedia.org/wiki/Fotorezeptor>
- [4] <http://www.pflanzenforschung.de/index.php?cID=8251>
- [5] <http://www.meilhaus.de/vergleichstabellen/labjack-das-usb-mini-messlabor>
- [6] <http://www.wissenschaft-online.de/lexilca/images/biok/f2f752.jpg>
- [7] Peter, H. Rauen, Ray F. Evert, Susan E. Eichhorn: Biologie der Pflanzen. 4. Auflage. De Gruyter, Berlin, New York 2006. ISBN 978-3-11-018531-7. S. 720
- [8] Axel Brennicke und Peter Schopfer: Pflanzenphysiologie. 7. Auflage. Spektrum Akademischer Verlag 2010. ISBN 978-3-8274-2351-1. S. 578