

Pflanzenzucht LEDs / Grow-LEDs

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	1
Einleitung / Motivation	3
1 Hintergrund	4
1.1 Spektrum des sichtbaren Lichts	4
1.2 Einheiten des Lichts	4
1.3 Das von Pflanzen genutzte Licht.....	5
1.4 Die Wirkung der Lichtwellenlängen.....	8
1.4.1 Das Phytochromsystem.....	10
1.5 Photorespiration und -Inhibition.....	12
2 Konkrete Beispiele für Grow-LEDs	13
2.1 LED-Leuchtstreifen	13
2.2 „Full Spectrum Grow LED“	14
3 Fazit, Tipps und Empfehlungen.....	19
3.1 Lux-Meter bzw. PAR-Meter.....	19
3.2 Tageslichtnutzung.....	20
3.3 Die optimale Beleuchtungsdauer	20
3.4 Gepulstes Licht	29
3.5 Weiße LEDs	32
3.5.1 LEDs in klassischer T8 Leuchtstoffröhrenform	33
3.6 Kommerzielle LEDs für Pflanzenbeleuchtung	34
3.6.1 Growy Pflanzenzucht-LEDs.....	34
3.6.2 SANlight LEDs.....	35
3.7 Die Selbstbaulösung	35
3.7.1 Osram Oslon SSL	36
3.7.1.1 Wirkungsgradbetrachtungen.....	41
3.7.2 Konstantstromquelle Meanwell LCM60.....	43
3.7.3 LED-Empfehlung	46
3.7.3.1 Oslon SSL Pflanzenleds oder LED-Röhren.....	46
3.7.3.2 Leistungsfähige kompakte LED-Lampen mit E27 Gewinde als einfache Alternative.	48
3.8 Die Anordnung von LEDs.....	49
3.8.1 Diffuses Licht	51

3.8.2	Situation bei natürlichem Sonnenlicht.....	51
3.8.3	Beleuchtungssituation mit einer 60° LED.....	52
3.8.4	Beleuchtungssituation bei einer 120° LED mit Reflexion.....	54
3.8.5	Beleuchtungssituation bei flächig angeordneten LEDs.....	55
3.8.6	Beleuchtung mit zusätzlichem Seitenlicht	56
3.8.7	Beleuchtungsversuch: Vergleich Seitenlicht und Licht von oben	57
3.8.8	Exkurs zu Reflexionsmaterialien	60
3.8.8.1	Alufolie, SW-Folie und Papier	60
3.8.8.2	Orca Grow Film	66
3.8.8.3	Mylar-Folie.....	68
3.8.8.4	Fazit Reflexionsmaterialien	69
3.9	Ein günstiger und flexibler Growschrank.....	69
3.10	Weitere Wachstumsbedingungen.....	72
3.10.1	Temperatur.....	73
3.10.2	CO ₂ -Versorgung.....	77
3.10.3	Düngung	80
3.10.3.1	EC-Wert	84
3.10.3.2	pH-Wert.....	91
3.10.3.3	Blattdüngung	93
3.10.4	Substratwahl.....	93
3.10.4.1	Generelles.....	93
3.10.4.2	Aeroponik	94
3.10.4.3	Ebbe-Flut-Systeme	94
3.10.4.4	Herkömmliches Substrat	95
3.10.4.5	Deep Water Culture (DWC)	96
3.10.5	Schädlingsbekämpfung	98
3.10.5.1	Allgemeines	98
3.10.5.2	Mechanische Bekämpfung	98
3.10.5.3	Chemische Keule	99
3.10.5.4	Biologische Bekämpfung	100
3.10.6	Weitere Effekte.....	102
3.10.6.1	Die (In)Effizienz von Pflanzen bzw. Photosynthese	104
4	Schlussbemerkungen	106
5	Anhang	107

Einleitung / Motivation

Frisches, selbstgezogenes Biogemüse erfreut sich zunehmender Beliebtheit oder man möchte einfach nur die Pflanzen für den Sommer bereits im Spätwinter vorziehen. Da hier das natürliche Licht meistens nicht ausreicht, hilft man mit künstlicher Beleuchtung nach.

Pflanzen erscheinen grün, weil sie grünes Licht reflektieren und somit grünes Licht weniger nutzen als rotes und blaues. Es liegt daher nahe Pflanzen nur mit blauem und rotem Licht zu beleuchten um sich die Energie für den grünen Lichtanteil zu sparen. Das menschliche Auge ist übrigens bei grünem Licht am empfindlichsten. (<https://de.wikipedia.org/wiki/V-Lambda-Kurve>).

Für die Pflanzenbeleuchtung wurden daher spezielle sog. Grow (englisch für wachsen) LEDs entwickelt. Man bekommt sie oft sehr günstig direkt aus China, aber auch im Amazon Shop sind sie als fertige Leuchten erhältlich.

Nur wie gut sind diese LEDs tatsächlich? Ohne spezielle Messgeräte kann man das nicht beurteilen. Ist eine rot-blau Beleuchtung wirklich optimal? Um hier ein wenig Licht in das Dunkel zu bringen und anderen dabei zu helfen Energie zu sparen, bessere Ergebnisse in der Pflanzenzucht zu erzielen und dadurch mehr Freude bei ihrem Hobby zu haben, entstand dieses Dokument. Bis Version 1.1 drehte es sich hauptsächlich nur um die LEDs. Da für gutes Wachstum jede Menge pflanzliche Faktoren eine Rolle spielen, wurde dieses Dokument auch um diesen Aspekt erweitert. Hinzu kam die Anordnung der LEDs und die Nutzung der Reflexion. Von 16 Seiten in Version 1.1. sind wir nun bei 39 Seiten in Version 1.2.

In Version 1.3 wurde der EC-Wert, sowie die Auswirkungen der Beleuchtungsdauer aufgenommen. Des Weiteren wurde nun Phytochrom ausführlicher betrachtet und auf die Idee LEDs zu pulsen eingegangen. Eine weitere Beleuchtungssituation mit zusätzlichem Licht von der Seite wurde aufgenommen. Weiterhin wurde ein Bewässerungscomputer vorgestellt, sowie detailliert der Prozess des Aufbaus einer rot-blau Beleuchtung mittels Osram Oslon LEDs beschrieben. Des Weiteren wurde ein Vergleich zur Substitube LED gezogen. Der Umfang hat sich fast verdoppelt, wir sind in Version 1.3 nun bei 75 Seiten angelangt.

Version 1.4 entstand Anfang des Jahres 2017, 2020 und dann wieder 2021. Es wurde Orca Growfilm sowie zugehörige Messungen aufgenommen, ein darauf basierender Growschrank und moderne E27 Weißlicht LEDs als die günstigste Option für kleine Anbauflächen vorgestellt. Das Dokument umfasst nun 102 Seiten.

In Version 1.5 wurde ein neues Luxmeter vorgestellt, eine Quelle von Thiamethoxam zur Schädlingsbekämpfung, zahlreiche neue weißen und wirtschaftlichen LEDs, insbesondere in E27-Form hinzugefügt, sowie die Vorteile von diffusem Licht nochmals herausgestellt.

In Version 1.6 wurde der Hinweis auf die App PPFD Meter ergänzt, sowie die Erläuterungen zu SAN-Light LEDs überarbeitet.

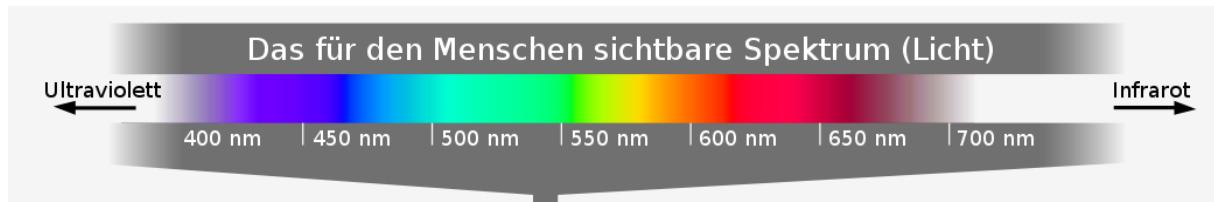
In Version 1.7 wurde Mylar als weiteres Reflexionsmaterial hinzugefügt, sowie kleinere Ergänzungen/Korrekturen vorgenommen.

Die aktuellste Version dieses Dokuments ist unter <https://github.com/JsBergbau/GrowLEDs> zu finden.

1 Hintergrund

1.1 Spektrum des sichtbaren Lichts

Das sichtbare Licht geht von ca. 380 nm bis 780 nm.



Quelle: Horst Frank / Phrood / Anony - Horst Frank, Jailbird and Phrood, CC BY-SA 3.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=3726606>

1.2 Einheiten des Lichts

Die Lichtstärke wird in Lux gemessen. Lumen pro Quadratmeter ergibt Lux. PAR ist die photosynthetisch aktive Strahlung und wertet jedes Photon im Bereich von 400 nm bis 700 nm gleichmäßig. Man spricht auch vom Photonenfluss. Sie wird oft W/m² oder in μmol/(m² * s) angegeben (ganz exakter Weise dann „Photosynthetically Active Photon Flux Density“ PPFD, kurz PFD genannt) und entspricht damit Lux beim sichtbaren Licht, μmol/s entspricht dem Lumen. 6,022*10¹⁷ Photonen/s ergeben 1 μmol/s. Um LEDs mit der höheren Effizienz fürs Pflanzenwachstum zu erhalten, ist diejenige mit dem höheren Photonenfluss in μmol pro Sekunde und Watt zu wählen.

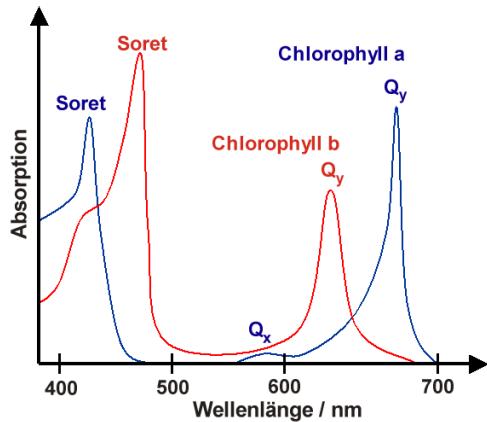
Hier eine Tabelle zur Umrechnung. Die Werte stammen aus <http://www.landwirtschaftskammer.de/gartenbau/beratung/technik/artikel/lichtwerte-umrechnen.htm>. Der Umrechnungsfaktor für Lux hängt von der Lichtquelle ab und ist hier bezogen auf Tageslicht. In meinen eigenen Messungen habe ich den Umrechnungsfaktor von μmol/(m²*s) auf Lux mit 55 bestimmt, sodass die Angabe von 56 glaubhaft ist.

Messwert						
von nach	Sensor bewertet ca.	... W/m ²	... kLux	... Lux	... μmol/(s·m ²) PAR	... W/m ² PAR
W/m ² Solarimeter	300-3000 nm	1	0,13	130	2,3	0,5
kLux	380-780 nm	8	1	1000	18	4
Lux	380-780 nm	0,008	0,001	1	0,018	0,004
μmol/(s·m ²) PAR	400-700 nm	0,43	0,056	56	1	0,22
W/m ² PAR	400-700 nm	2	0,26	260	4,6	1

Um genauer, in Abhängigkeit der Lichtquelle, von Lux auf PAR bzw. PPFD umzurechnen, kann man diese Webseite benutzen <https://www.waveformlighting.com/horticulture/convert-lux-to-ppfd-online-calculator>. Um das DLI (daily light integral), also die Summe über den Tag zu errechnen, kann man diese Webseite <https://www.waveformlighting.com/horticulture/daily-light-integral-dli-calculator> benutzen oder man multipliziert den PAR/PPFD Wert in μmol/(m² * s) mit der Anzahl der beleuchteten Sekunden und dividiert es dann durch 1.000.000 um zum DLI-Wert in mol/d zu gelangen.

1.3 Das von Pflanzen genutzte Licht

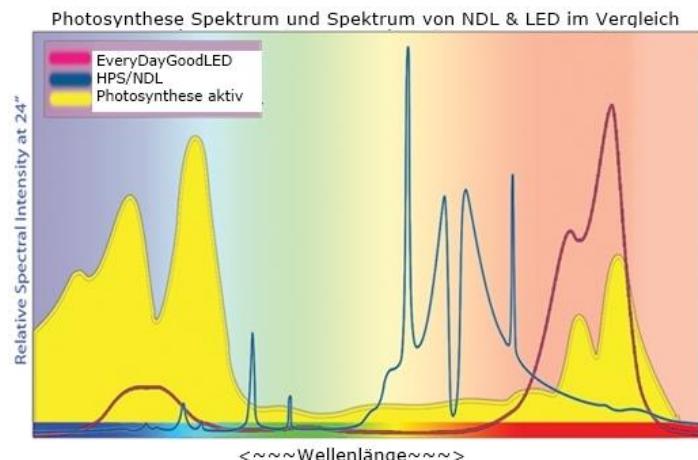
Im Internet sieht man oft die Absorptionsspektren des Chlorophylls, wie hier:



Quelle: aegon - Eigenes Werk, CC BY-SA 3.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=1019093>

Wie zu erkennen, findet zwischen 500 und 600 nm durch das Chlorophyll kaum Absorption statt. Die angegebenen Spektren gelten allerdings nur für in Lösungsmittel extrahiertes Chlorophyll. Im Gesamtsystem Pflanze können auch andere Wellenlängen verarbeitet werden.

So werden Hochdrucknatriumdampflampen (HPS/NDL) ebenfalls gerne für die Pflanzenzucht eingesetzt, da sie mit einer Lichtausbeute von bis zu 150 lm/W sehr effizient sind. Sie strahlen allerdings das Licht in einem Wellenlängenbereich (steiler Anstieg bei ca. 550nm bis ca. 625 nm) aus, der nicht optimal den Absorptionsspektren für die Photosynthese entspricht.

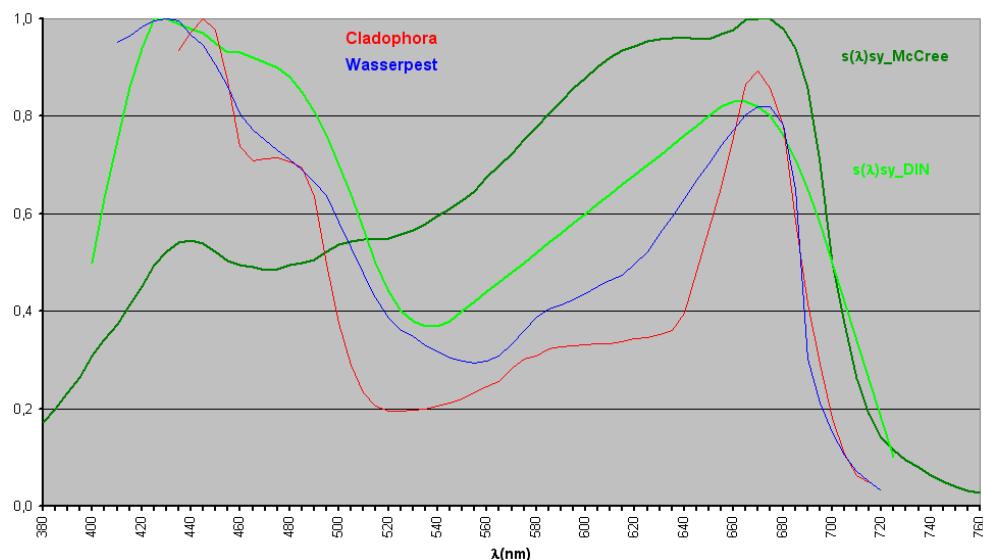


Quelle: <http://www.grow-highpower-led.com/everydaygood-led-lampen/led-und-pflanzenwachstum.html>

Nach der obigen Grafik dürften die Pflanzen somit bei ausschließlicher Beleuchtung durch eine Natriumdampflampe nur langsam wachsen. Es hängt jedoch sehr von der Pflanze ab, wie das Licht jeder Wellenlänge genutzt wird. Sehr interessant dazu ist http://www.hereinspaziert.de/Sehlicht_2009/Bewertung.htm. Ganz kurze Zusammenfassung: Es gibt viele Untersuchungen zu den Wirkspektren der Photosynthese. Eine herausragende Arbeit ist die vom japanischen Forscher Keith J. McCree. In seiner Photosynthekurve sind 61 verschiedene

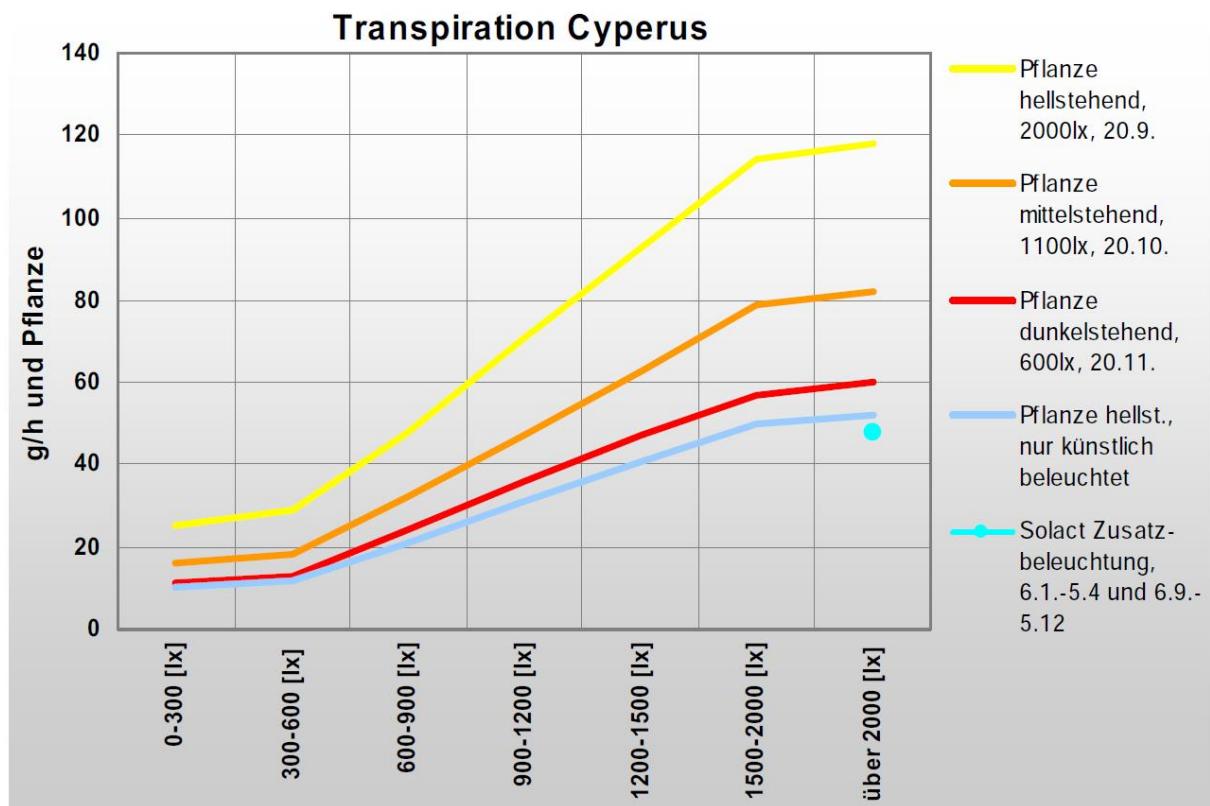
Pflanzenarten eingeflossen. Eine weitere wurde vom Deutschen Institut für Normung herausgegeben, mit dem Hinweis, dass sie nicht für alle Pflanzen gültig sein kann.

Schauen wir uns nun diese Grafik an:



Quelle:
[http://www.hereinspa
zierte.de/Sehlicht_2009
/Bild6.htm](http://www.hereinspa zierte.de/Sehlicht_2009 /Bild6.htm)

Wie man erkennt, wird je nach Pflanze/Untersuchung Licht bei einer Wellenlänge von 600 nm zwischen ca. 35 % und ca. 90 % genutzt. Pflanzen sind sehr anpassungsfähig. Meine Meinung ist, dass sich die Pflanzen an das vorhandene Lichtspektrum anpassen und es nach einiger Zeit effizienter nutzen können. Manche Pflanzen mehr, manche Pflanzen weniger. Daher kommt es bei solchen Messungen auch immer darauf an, wie lange man die Pflanze mit dem untersuchten Licht beleuchtet bevor man misst, sodass die Pflanze auch Zeit hat sich anzupassen. Cyperus alternifolius (Zypergras, auch Zyperngras genannt) passt z.B. seine Verdunstungsleistung dem vorhandenen Licht an. Es geschieht einmal kurzfristig im Laufe von ca. 30 Minuten je nach Lichtstärke, sowie im Zeitraum von ca. einer Woche. https://nachhaltigwirtschaften.at/resources/hdz_pdf/endbericht_sunnyresearch_id2782.pdf PDF S. 103 bzw. 89 (unten rechts auf der Seite). Je nachdem wieviel Licht die Pflanze innerhalb der letzten Woche bekam, schwankt die Verdunstungsleistung pro Stunde zwischen bei gleicher Beleuchtungsstärke (z.B. Bereich 1500-2000 Lux) zwischen ca. 110 Gramm pro Stunde und ca. 50 Gramm pro Stunde. Das ist ein Unterschied von mehr als 100 % und lässt auf eine große Anpassungsbereitschaft der Pflanzen schließen. Eigene Versuche haben gezeigt, dass Zyperngras, welches vorher sehr dunkel stand, einige Tage brauchte, bis es unter künstlicher Beleuchtung sein maximales tägliches Wachstum erreichte.



Quelle: https://nachhaltigwirtschaften.at/resources/hdz_pdf/endbericht_gruenes_light_id3606.pdf PDF S. 342 bzw. 321

Bei der Solact Zusatzbeleuchtung handelt es sich meiner Vermutung nach um Halogenglühlampen. Da Pflanzen ihre Spaltöffnungen vor allem durch blaues Licht öffnen (<http://www.spektrum.de/lexikon/biologie-kompakt/spaltoeffnungsbewegungen/10965>), ist es nicht weiter verwunderlich dass die Verdunstungsleistung mit der künstlichen Beleuchtung sehr gering ist. Merkwürdigerweise werden zu diesen Lampen keinerlei Lumen oder ein Energieeffizienzlabel angegeben.

Ca. 50 % der Sonnenstrahlung liegen im photosynthetisch verwertbaren Bereich vor. Die restliche Hälfte ist größtenteils Wärmestrahlung. Angenommen man hat 50.000 Lux einmal durch Sonnenlicht und einmal durch LED-Licht. Beim Sonnenlicht kommt die Wärmestrahlung hinzu. Dadurch steigt die Temperatur der Blätter an, wodurch die Pflanze schneller wächst, wenn es sie näher an ihren optimalen Temperaturbereich bringt, siehe Abschnitt „3.10.1 Temperatur“. Durch die höhere Temperatur steigt auch die Verdunstungsrate deutlich an. Zum einen verdunstet das Wasser bei höherer Temperatur schneller, zum anderen sinkt durch die höhere Temperatur die relative Luftfeuchtigkeit, was die Verdunstung ebenfalls begünstigt. Gleichzeitig kann sich durch die entstehende Erwärmung ein schwacher Luftstrom bilden, welcher die CO₂-Versorgung unterstützt und durch Abtransport der feuchten Luft die Verdunstung ebenfalls nochmals steigert.

Die folgende Tabelle zeigt den Einfluss der Luftfeuchtigkeit auf die Verdunstungsleistung einer Arekapalme, auch Goldfruchtpalme genannt (*Chrysalidocarpus lutescens*). Diese verdunstet im Vergleich zu anderen Pflanzen relativ viel Wasser. Das beschriebene Exemplar war 1,42 Meter hoch, in einem Topf mit 36 cm Durchmesser. Da die Arekapalme sehr langsam wächst (bei sehr guten Bedingungen ca. 25 cm / Jahr) und sie keine Staunässe verträgt, ist das Zyperngras als Luftbefeuhter

besser geeignet. Interessant ist vor allem die erste und zweite Zeile. Bei gleicher Temperatur stieg die Verdunstung um 36 % als sich die Luftfeuchtigkeit von 52 % auf 37 % verringerte.

Average Water Loss 24-Hour Period (ml)	Average Room Temperature F° (C°)	Average Room Relative Humidity (%)
900	73 (22.8)	36.7
660	73 (22.8)	52.0
675	81 (27.2)	57.0
550	76 (24.4)	62.0

Quelle: <https://web.archive.org/web/20171229010346/http://www.wolvertonenvironmental.com/airFAQ.htm>

1.4 Die Wirkung der Lichtwellenlängen

Viele Growleds verwenden einen Rot zu Blau Anteil zwischen 4:1 und 8:1. Auch hier hängt es vermutlich wieder von der Pflanze ab, welchen genauen Anteil sie sich für optimales Wachstum wünscht. Blaues Licht ist energiereicher als rotes Licht und ist für die Photosynthese nicht direkt verwendbar. Ein Teil der Energie wird in Form von Wärme abgegeben, die restliche Energie entspricht der von rotem Licht, dennoch treibt dieselbe Anzahl blauer Photonen die Photosynthese nicht so stark an wie rote Photonen. Die unterschiedliche Wirkung auf die Pflanze scheint vor allem durch biologische Prozesse zu entstehen. Ähnlich wie sich manche Menschen lieber ein warmweißes Licht ins Wohnzimmer wünschen um sich wohler zu fühlen, obwohl Licht im Prinzip Licht ist.

Blau-rot Beleuchtung eignet sich so gesehen am besten bei bereits vorhandenem Tageslicht als Zusatzbeleuchtung. Möchte man die Pflanzen ausschließlich unter Kunstlicht ziehen, empfiehlt es sich weiße LEDs einzusetzen, eventuell in Kombination mit roten LEDs. In einem NASA-Experiment zur Salatzucht unter Kunstlicht wurde eine um ca. 47 % höhere Trockenmasseproduktion, sowie eine um 31,5 % größere Blattfläche bei Salat unter weißem Licht im Vergleich zur nur blau-rot Beleuchtung festgestellt. Die Beleuchtung bestand bei weiß aus 15 % blau, 24 % grün und 61 % rot, bei rot-blau aus 16 % blau, 84 % rot. Jeweils in beiden Versuchen erhielten die Salatpflanzen mit $150 \mu\text{mol}/(\text{m}^2*\text{s})$ praktisch gleich viele Photonen pro Sekunde, umgerechnet ca. 8250 Lux. Selbst unter kaltweißen Leuchtstoffröhren wuchs der Salat besser als unter rotblau Beleuchtung. Auch hier waren es $150 \mu\text{mol}/(\text{m}^2*\text{s})$. Absorbiert wurden bei rot-blau 89 % des Lichtes, bei weißem Licht 82% und bei der Leuchtstoffröhre sogar nur 73 %.

https://web.archive.org/web/20180328180544/http://hortsci.ashpublications.org/content/39/7/16_17.full.pdf Bei einem weiteren Experiment

<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0304423812004797> wurden Leuchtstoffröhren mit rotblau und rotblauweiß Beleuchtung verglichen. Auch hier wuchs der Salat bei reiner rotblau-Beleuchtung am schlechtesten. Die RBW, rotblauweiß Beleuchtung, in diesem Experiment enthielt vergleichsweise wenig weißes Licht. Da Salat generell sehr viel des grünen Lichts reflektiert, kommt die weiße Beleuchtung bei anderen Spezies vermutlich noch besser weg.

Da neutral- bzw. kaltweiße LEDs bereits selbst einen signifikanten Blauanteil besitzen, kann man hier sehr wahrscheinlich auf zusätzliche blaue LEDs verzichten. Abhängig ist das wohl von der Lichtstärke

und geringere Lichtstärken sind am wirtschaftlichsten, siehe Abschnitt 3.3 „Die optimale Beleuchtungsdauer“.

Im Versuch mit Gurkenpflanzen wurde gezeigt, dass die maximale Photosyntheserate bei einem Blauanteil von 50 % stattfand http://juser.fz-juelich.de/record/9587/files/J.Exp.Bot._2010_61.11_3107-3117.pdf. Es könnte damit zusammenhängen, dass blaues Licht die Spaltöffnungen öffnet. Je weiter diese geöffnet sind, desto einfacher kann Kohlenstoffdioxid nachströmen. Ein Ventilator kann dann hier ebenfalls helfen, siehe Abschnitt 3.10.2 CO₂-Versorgung. Die Erhöhung der Photosyntheseleistung durch blaues Licht hat auch dieser Artikel https://www.jstage.jst.go.jp/article/ecb1963/41/2/41_2_121/_pdf auf Seite 7 zum Thema. Durch die Gabe von blauem Licht über einen kurzen Zeitraum von 5 bis 30 Minuten kann eine Zunahme der Trockenmasseproduktion von bis zu 20 % erreicht werden. Es wird vermutet, dass durch diese Gabe zu Tagesbeginn die Spaltöffnungen sich öffnen. Mit Zunahme des blauen Lichtes stieg ebenfalls die Wurzelmasse. Blaues Licht führt ebenfalls zu einem dichten Wuchs der Pflanze, mit dem Phytochromsystem lässt sich das nicht erklären, da bei 450 nm die Absorptionskurve von Pfr (zu den Begriffen siehe Abschnitt „1.4.1 Das Phytochromsystem“ unten) getroffen wird und somit das Längenwachstum angeregt werden müsste.

Da grünes Licht nicht so stark absorbiert wird, wie rotes und grünes Licht, ist es in der Lage weiter in die Tiefe des Blattes vorzudringen und kann dort für die Photosynthese genutzt werden. Wenn grünes Licht absorbiert wird, dann wird es auch für die Photosynthese genutzt. Insgesamt wurde eine Absorption des grünen Lichts (550 nm) an Pflanzen zwischen 50 % (Kopfsalat, deswegen erscheint er hellgrün) und 90 % (bei bestimmten immergrünen Bäumen) gemessen, d.h. die Pflanze kann davon zwischen 50% und 90% für Photosynthese nutzen. Zum Vergleich rotes und blaues Licht wird zwischen 80 bis 95 % absorbiert. Der Absorptionsgrad ist auch vom Auftrittswinkel des Lichtes abhängig. Je senkrechter das Licht einfällt, desto mehr wird absorbiert.

Sehr interessant ist diese Untersuchung <http://pcp.oxfordjournals.org/content/50/4/684.full.pdf+html>: Bei hohen Lichtstärken unter weißem Licht, wenn die Pflanze bereits in Lichtsättigung ist, kann durch Gabe von grünem Licht die Photosyntheseleistung gesteigert werden. Rotes und blaues Licht wird bereits sehr stark in den oberen Schichten absorbiert, sodass eine zusätzliche Gabe kaum einen Effekt hat.

Die Wachstumssteigerungen durch grünes Licht ist je nach Pflanze wiederum verschieden. Bei Radieschen und Paprika ist der Einfluss von grünem Licht nicht so ausschlaggebend. https://web.archive.org/web/20170706022045/http://cpl.usu.edu/files/publications/poster/pub_3_801011.pdf. Eigene Erklärung: Salat wächst sehr dicht (Salatköpfe), sodass eine tiefeindringende Strahlung hier mehr Vorteile aufweisen kann als bei den beiden anderen Pflanzen. Mit zunehmender Pflanzengröße könnte sich hier ein Grünanteil ebenfalls stärker positiv bemerkbar machen (im Experiment wurden Jungpflanzen untersucht). Die Autoren vermuten ebenfalls, dass sich der positive Effekt bei Salat noch verstärkt hätte, sobald die Pflanzen den Boden vollständig bedeckt hätten und sich somit gegenseitig beschatten.

Laut <http://www.ledstyles.de/index.php/Thread/4008-Pflanzenwachstum-unter-LED-Licht/?postID=313723#post313723> gibt es bei weißem Licht mehr Wurzeln als nur bei rot-blau Beleuchtung. Eventuell war bei der rot-blau Beleuchtung auch nur der Rotanteil zu groß, da rotes Licht die Auxinbildung verringert, welches wiederum für die Wurzelbildung verantwortlich ist, s.u.

Die ersten/einfachen Grow-LEDs bestanden aus blauen und roten LEDs, sodass die Pflanze insgesamt Licht zweier verschiedener Wellenlängen erhält. Die genauen Wellenlängen variieren je nach LED-Typ und Anbieter. Es macht Sinn zwei Wellenlängen für rot zu verwenden, da es das Photosystem 1 mit Absorptionsmaximum bei 700 nm hat und Photosystem 2 mit einem Absorptionsmaximum bei 680 nm. <https://de.wikipedia.org/wiki/Emerson-Effekt> In der Praxis kann dies daran scheitern, dass in diesem Wellenlängenbereich keine LEDs mit einem hohen Wirkungsgrad verfügbar sind.

In diesem Youtube Video <https://www.youtube.com/watch?v=LJgvU8AJg1M> wird zu rot/blau bzw. weißen Licht die Aussage getroffen, dass rotes und blaues Licht zwar aus Energieeffizienzgründen sehr sparsam sind, aber nur bis zu sehr geringen Lichtstärken. Die Pflanze hat verschiedene Lichtsammeleinheiten, die die Energie des Photons dann auf 680 nm und 700 nm für beide Photosysteme verringern. Bei hohen Lichtstärken sind diese für rot blau ausgelastet, aber grün hat noch Kapazität, sodass dieses Licht genutzt wird. Bei 50 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 * \text{s})$ war rot blau im Hinblick auf die Energieeffizienz überlegen, fast der doppelte Ertrag, bei 100 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 * \text{s})$ war es ca. gleich und ab 200 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 * \text{s})$ war dann das weiße Licht eindeutig überlegen.

1.4.1 Das Phytochromsystem

Salat ist ein Lichtkeimer. Immer wenn die Bestrahlung mit fernem rot endete, sank die Keimungsrate, wie die Abbildung zeigt, extrem. Einige Salatsorten keimen bei Temperaturen über 20 °C nur schlecht. Bei Belichtung mit Hellrot wird diese temperaturabhängige Keimhemmung aufgehoben.

Tab. 13. Einfluß von Hellrot- und Dunkelrot-Bestrahlung auf die Keimung von Salat (aus RUGE 1966, verändert)

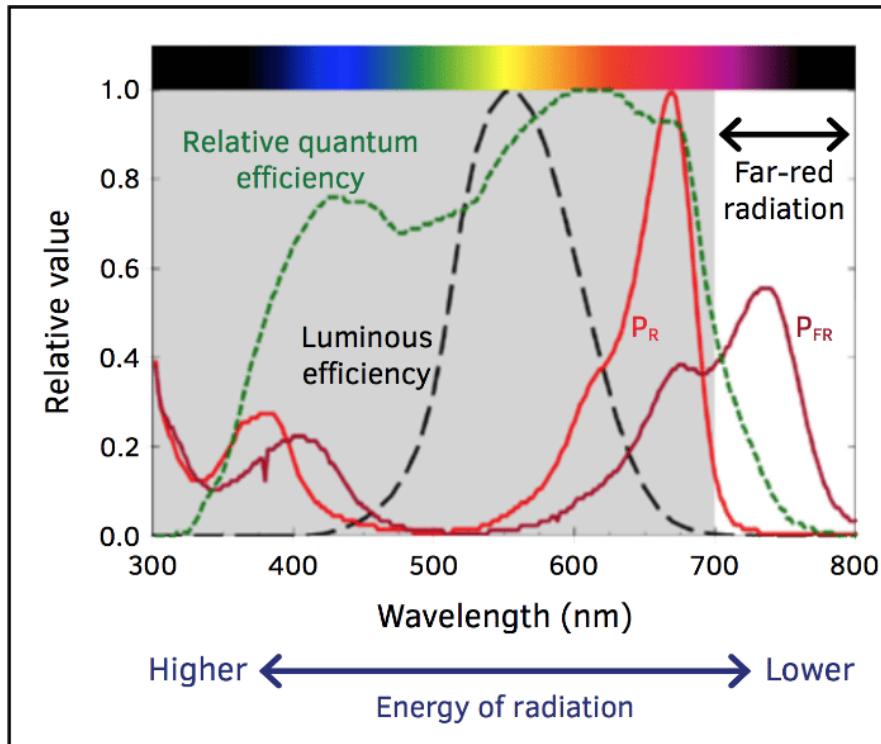
Bestrahlungsabfolge	% Keimung
HR	70
HR – DR	6
HR – DR – HR	74
HR – DR – HR – DR	6
HR – DR – HR – DR – HR	76
HR – DR – HR – DR – HR – DR	7
HR – DR – HR – DR – HR – DR – HR	81
HR – DR – HR – DR – HR – DR – HR – DR	7

Quelle: Jansen,
Bachthaler, Fölster,
Scharpf - Gärtnerischer
Pflanzenbau, 3. Auflage
S. 119

Hellrot (660nm) und Dunkelrot (730nm) beziehen sich auf das Phytochromsystem mit den beiden Absorptionsmaxima bei 660 nm und 730 nm. Phytochrom mit dem Absorptionsmaximum bei 660 nm bezeichnet man auch als P660 bzw. Pr-Form (r für red/rot) und wird als die inaktive Form bezeichnet. Phytochrom mit dem Absorptionsmaximum bei 730 nm wird auch als P730 bzw. Pfr-Form (fr, far red, dunkelrot) bezeichnet, als die aktive Form. Bestrahlung mit 660nm überführt das Phytochrom in die aktive Form P730. Dunkelrotes Licht verwandelt P730 wieder zurück zur inaktiven Form P660. Auch ohne Licht mit 730nm findet diese Umwandlung statt, nur sehr viel langsamer. Der frühere Name beträgt Hell-Dunkelrot-System.

Die Bezeichnung aktive (P730) und inaktive (P660) Form ist verwirrend gewählt, denn liegt vermehrt die P660 Form, die inaktive vor, findet verstärktes Längenwachstum der Pflanzen statt, die sog. Schattenflucht <https://de.wikipedia.org/wiki/Schattenflucht> (s.u.). Leichter verständlich wird diese Bezeichnung, wenn man sich vorstellt P730, die aktive Form, hemmt die Schattenflucht-Reaktion. Durch dunkelrotes Licht liegt weniger davon vor, wodurch das Längenwachstum weniger gehemmt wird.

Im natürlichen Tageslicht sind die Anteile von hellrotem und dunkelrotem Licht in etwa gleich. Das Gleichgewicht liegt jedoch relativ stark auf der Seite von P730. Bei Sonnenaufgang und –Untergang ist der Dunkelrot-Anteil im Vergleich zur Mittagssonne erhöht.



Quelle: <http://www.gpnmag.com/article/a-closer-look-at-far-red-radiation/>

Wenn man sich diese Grafik ansieht, versteht man warum. Die P730-Form absorbiert im Vergleich zur P660 Form nur ca. 60 % der Strahlung. Phytochrom liegt in der Pflanze unter natürlichem Sonnenlicht in einem bestimmten Verhältnis vor, da es ständig hin- und her umgewandelt wird. Je mehr dunkelrotes Licht im Verhältnis zum hellroten Licht einstrahlt, desto mehr P660 liegt vor. Phytochrome messen also das Verhältnis zwischen Hell- und Dunkelrot. Je mehr das Gleichgewicht auf der Seite von P660 liegt, desto mehr streckt sich die Pflanze wächst in die Länge, Blätter werden größer (Schattenflucht oder Schattenvermeidungsreaktion genannt).

Hellrot wird von der Pflanze stark absorbiert, Dunkelrot hingegen durchdringt die Pflanze hauptsächlich oder wird reflektiert. Dies führt dies zu folgendem interessanten Effekt. Wird die Pflanze durch andere Pflanzen verschattet, dringt nun viel mehr Dunkelrot zu ihr als Hellrot. Dadurch liegt nun mehr P660 Phytochrom vor. Daraufhin wird mehr der Auxine Wachstumsregulatoren gebildet, welches ein Längenwachstum auslöst. Die Pflanze wächst nun in die Höhe um den Schatten der anderen Pflanze zu verlassen.

Ohne dunkelrot ist das Längenwachstum deutlich verringert, die Pflanze verzweigt sich mehr und bildet dicke Blätter. Sonnenliebende Pflanzen reagieren auf diesen Effekt deutlich stärker als Pflanzen, die an schattigen Orten wachsen, denn unter dem Blätterdach im Wald bedürfte es eines extremen Längenwachstums um es zu durchstoßen. Ein paar weiterführende Links:
<http://www.gpnmag.com/article/a-closer-look-at-far-red-radiation/>
<http://www.gpnmag.com/article/r-fr-ratio/>

Phytochrome sind in der Pflanze nur in sehr geringer Konzentration vorhanden, weshalb das hellrote Licht hauptsächlich von Chlorophyll absorbiert und folglich für die Photosynthese genutzt wird. Phytochrome kommen in höherer Konzentration in den Meristemen (Bildungsgewebe), z.B. den Triebspitzen vor. Werden diese gezielt mit dunkelrot belichtet, bilden sich dort die Auxine, welche dann mit 10 bis 20 cm pro Stunde in die Pflanze hinuntergeleitet werden. Die Konzentration nimmt in Richtung Wurzeln jedoch ab, da auf dem Weg dorthin Abbauprozesse stattfinden. Auxine helfen bei der Wurzelbildung. Unter diesem Gesichtspunkt wird nun auch verständlich warum bei einer reinen rot-blau Beleuchtung weniger Wurzeln gebildet werden als bei weißem Licht. Gehen wir von demselben Photonenfluss bei einer weißen und einer rot-blau Lichtquelle aus. Bei letzterer muss es deutlich mehr Photonen im roten Bereich geben um denselben Photonenfluss zu erhalten. Dies führt dazu, dass das Phytochrom-Gleichgewicht deutlich stärker zu Pfr verschoben wird, wodurch weniger Auxin und damit weniger Wurzeln gebildet werden.

Die gezielte Gabe von Dunkelrotem Licht zur Auslösung der Schattenfluchtreaktion kann bei bestimmten Pflanzen zur vorzeitigen Blüte und Samenproduktion führen, die Pflanze denkt ums Überleben kämpfen zu müssen. Ist die Pflanze bisher gut gewachsen und hat damit entsprechend Biomasse produziert, kann damit, je nach Art, die Blüte schneller eingeleitet werden.

1.5 Photorespiration und -Inhibition

Bei C3 Pflanzen, die meisten Pflanzen gehören dazu, gibt es einen interessanten Effekt namens Photorespiration. <https://de.wikipedia.org/wiki/Photorespiration>. Das bedeutet, dass die Pflanze statt CO₂ aus der Luft aufzunehmen Sauerstoff aufnimmt und anschließend CO₂ statt Sauerstoff abgibt. Man schätzt, dass ohne Photorespiration ca. 30 % mehr Biomasse durch die Photosynthese erzeugt werden könnte.

Je weniger CO₂ im Verhältnis zu Sauerstoff vorhanden ist, desto ausgeprägter ist dieser Effekt, da sich das Enzym RuBisCO statt an CO₂ an Sauerstoff bindet. Je höher die Temperatur, desto größer ist die Photorespiration, da Sauerstoff im Vergleich zu CO₂ bei höheren Temperaturen besser löslich ist. Je geschlossener die Spaltöffnungen sind, desto weniger CO₂ gelangt zur Pflanze, sodass ein zu hoher Rotanteil die Photorespiration erhöhen kann und damit umsonst beleuchtet würde (es sei denn man „düngt“ mit CO₂ <https://de.wikipedia.org/wiki/Kohlenstoffdioxid-D%C3%BCngung>).

Übrigens gilt nicht: Viel hilft viel, bei zu viel Licht reduziert sich das Wachstum. Das Ganze nennt sich Photoinhibition. Die genauen Werte hängen natürlich auch wieder von Pflanzenart und wahrscheinlich auch von deren individuellen Bedingungen (z.B. unter wieviel Licht gewachsen) ab. <https://de.wikipedia.org/wiki/Photoinhibition>

2 Konkrete Beispiele für Grow-LEDs

2.1 LED-Leuchtstreifen

Meine erste Erfahrung mit Grow-LEDs war ein im November 2015 bei Banggood bestellter LED Streifen. Er wird auch mehr als 5 Jahre später immer noch unter diesem Link <https://web.archive.org/web/20160514035420/http://www.banggood.com/de/1M-2M-3M-4M-5M-41-5050-SMD-LED-Hydroponic-Plant-Grow-Strip-Light-12V-p-973918.html> angeboten. Der Preis ist ungefähr immer noch ca. derselbe wie vor einem Jahr (ca. 17 € inkl. Versand)

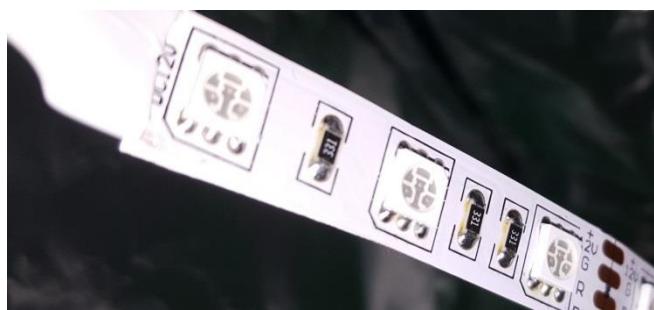
Eigenschaften:

- Rot zu Blau Anteil 4:1
- 12 Volt Spannung
- Mit 12 Watt pro Meter angegeben
- Wellenlänge rot: 625-660nm, blau 450-465 nm

Es wurde die 5 Meter Version bestellt. Bei 12 Watt pro Meter müsste das 60 Watt machen.



2,64 Ampere bei 12 Volt sind 31,68 Watt und damit nur die Hälfte der versprochenen Leistung.



Es sind immer 3 rote LEDs in einer Dreiergruppe sowie eine Dreiergruppe bestehend aus 2 roten und einer blauen LED im Wechsel. Der Vorwiederstand ist immer gleich, der Aufdruck beträgt 331 und damit 330 Ohm. Blaue LEDs haben eine höhere Spannung als rote LEDs, d.h. in der Dreiergruppe mit der blauen LED, bekommen die roten LEDs weniger Spannung ab als in der Dreiergruppe mit drei roten LEDs. Der Spannungsabfall am Widerstand in der Gruppe mit drei roten LEDs beträgt 5,5 Volt, in der anderen Dreiergruppe mit zwei roten und einer blauen LED 4,8 Volt. $5,5/12=0,46$, d.h. 46 % der Energie wird in der Dreiergruppe mit roten LEDs in Wärme umgewandelt, $4,8/12=0,4$ d.h. 40 % sind es bei der

Dreiergruppe mit einer blauen und zwei roten LEDs. Da diese beiden Gruppen immer im Wechsel sind, beträgt der Gesamtverlust am Widerstand $0,4+0,46)/2=43\%$.

Es handelt sich hier um SMD LEDs der Bauform 5050 mit je 6 Anschlüssen. Es sind drei einzelne LEDs in den Gehäusen untergebracht. Unverständlicherweise wird der Grow-LED-Streifen so geliefert, dass nur eine dieser drei LEDs leuchtet. Erst wenn man die beiden mittleren Anschlusskontakte auf Masse legt, leuchten auch die beiden anderen Einzelleds innerhalb einer 5050 SMD-LED. Die Tatsache, dass der Grow-LED-Stripe nur mit einem Drittel seiner Möglichkeiten betrieben wurde, ist mir erst bewusstgeworden, als ich für diesen Bericht nachgemessen habe. Sehr merkwürdig vom Hersteller, dass er die beiden anderen Kontakte nicht gleich auf Masse setzt, denn 99 % der Käufer werden einfach an die vom Hersteller herausgeführten Anschlüsse die 12 Volt anlegen. Somit bleiben auch die beiden rechten SMD-Widerstände im Bild oben im „Herstellerbetrieb“ ohne jeden Stromdurchfluss. Werden die beiden anderen Kontakte auf Masse gelegt, erreicht man sogar 18 Watt pro Meter, statt der vom Hersteller angegebenen 12 Watt pro Meter.

Mit diesem 5 Meter LED-Streifen wurde auf einer Fläche von ca. $0,4 \text{ m}^2$ Radieschen, Kopfsalat und Thymian gezogen. Der Thymian ging ein, die Radieschen und der Kopfsalat waren stark vergeilt. Mit einem PAR-Meter, einem Messgerät, welches die photosynthetisch aktive Strahlung misst, wurde ein Vergleichswert von lächerlichen 1000 Lux gemessen. Wäre der LED-Streifen mit allen drei Einzelleds der 5050 SMD-LEDs betrieben worden, wären es 3000 Lux gewesen, bei dreifachem Stromverbrauch versteht sich. Nun ist jedenfalls das Ergebnis des äußerst schlechten Wachstums klar, obwohl ca. 18 Stunden am Tag beleuchtet wurde (jeweils 9 Stunden mit 3 Stunden Dunkelpause). Mit weißen LEDs und guten 150 Lumen pro Watt wären gute 11.900 Lux erreicht worden ($12V*2,64A=31,68 \text{ W}$; $31,68 \text{ W} * 150 \text{ Lumen/Watt} = 4752 \text{ Lumen}$; $4752 \text{ Lumen} / 0,4 \text{ m}^2 = 11.880 \text{ Lux}$). Nehmen wir mal an bei diesem Grow-LED-Stripe wären keine Verluste in den Vorwiderständen zu verzeichnen, d.h. statt 1000 Lux wären es nun $1000/0,43=2326 \text{ Lux}$, sprich der Wirkungsgrad der weißen LEDs ist immer noch ca. fünfmal höher als jener der gelieferten roten und blauen LEDs.

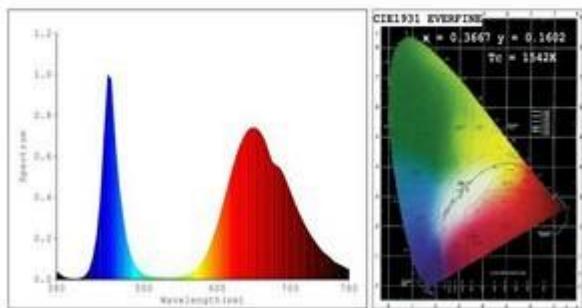
2.2 „Full Spectrum Grow LED“

Der aktuelle Renner in China-Shops (gemessen an der Anzahl der Angebote) sind „Full Spectrum Grow LEDs“. Sie werden größtenteils als fertige 220V Lösungen angeboten. Leider sind solche Lösungen, was die elektrische Sicherheit angeht, oftmals leider auf einem sehr niedrigen Standard. Da ich keine Lust auf einen Wohnungsbrand habe, wurden die Chips für Niederspannung bestellt um sie mit einem sicheren Netzteil betreiben zu können.

Hier geht's zum Produkt <https://www.aliexpress.com/item/Hydroponic-1W-3W-10W-30w-50W-100w-Led-Grow-light-Chip-Epistar-Bridgelux-chip-full-spectrum/32669288029.html>

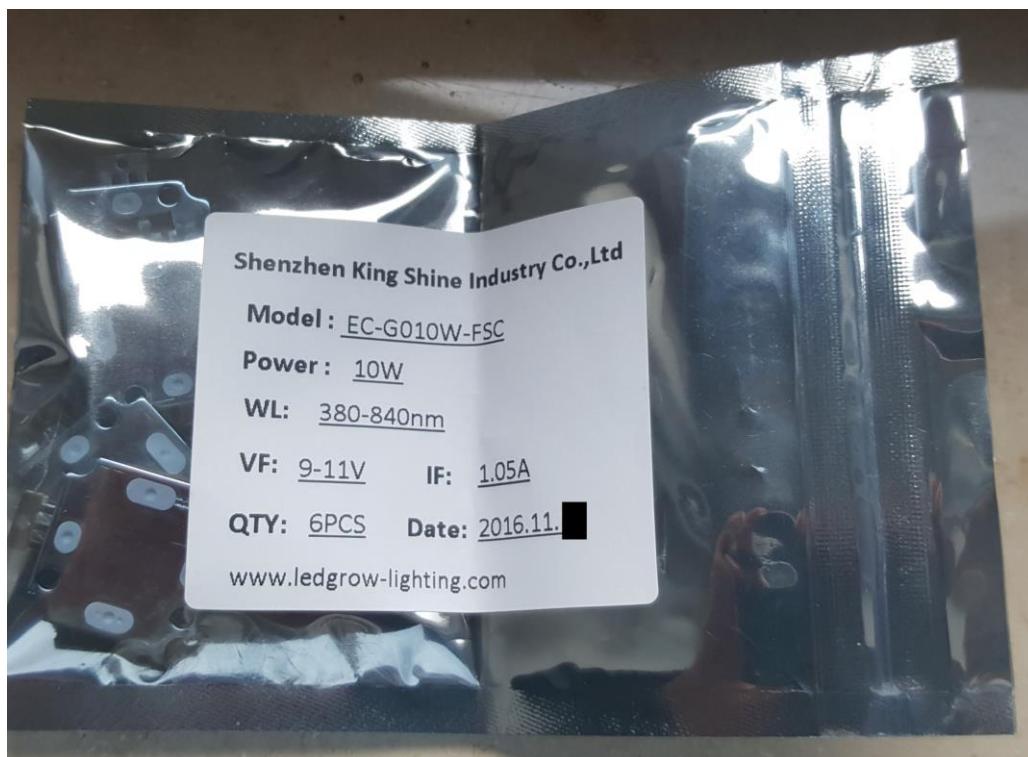
Es wird mit namhaften Herstellern wie Epistar und Bridgelux geworben. Interessanterweise findet man auf deren Webseite keine LEDs, die die beworbenen technischen Daten haben. Das hätte mich schon stutzig machen müssen.

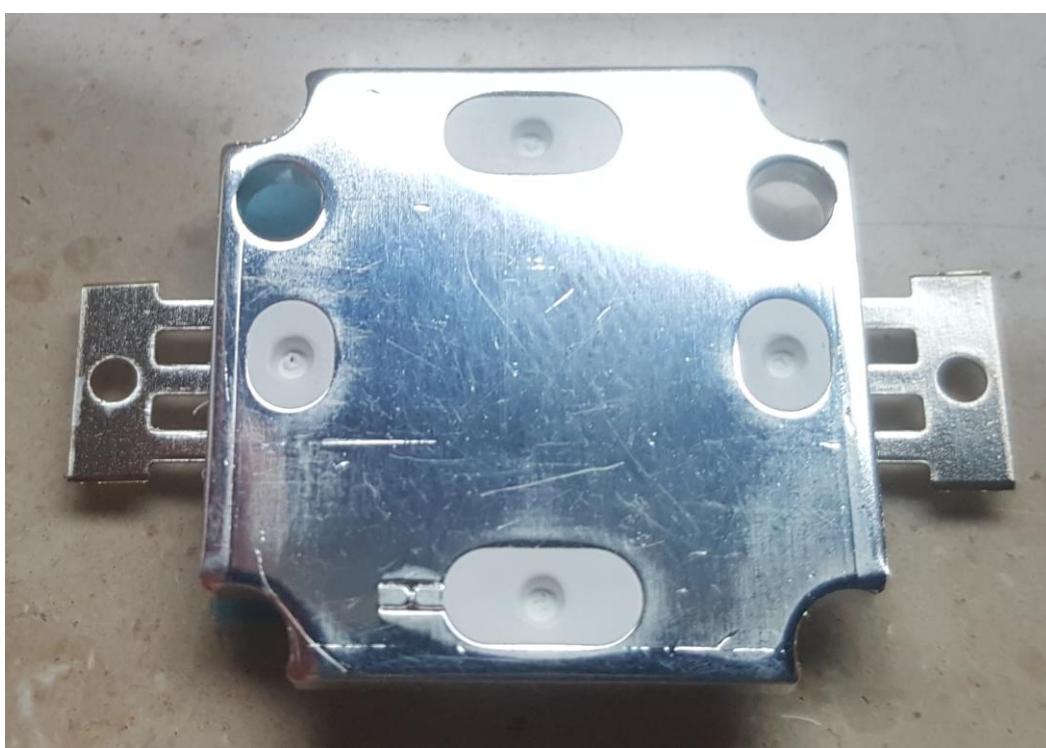
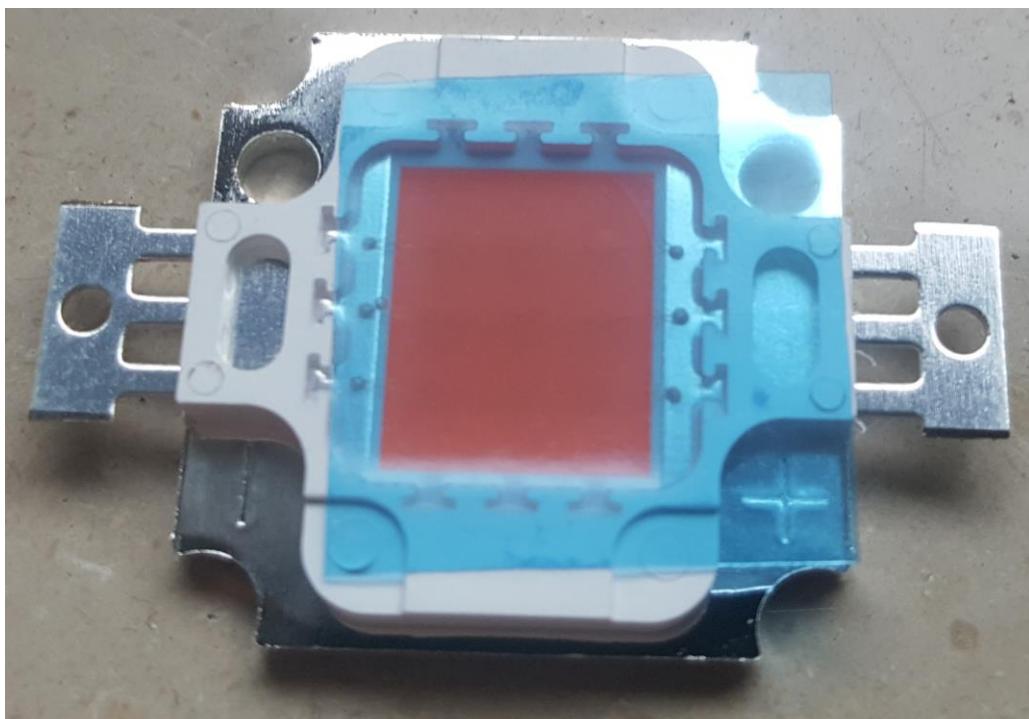
Led full spectrum(380-840nm)



Quelle: Siehe Aliexpress Link oben

Es wird mit „Full Spectrum“ geworben. Gemeint ist, dass es im roten Bereich eine große Verteilungskurve gibt. Dies ist, wie oben beschrieben aufgrund von Photosystem 1 und 2 sinnvoll. Dennoch ist unter Full Spectrum eigentlich ein weißes Licht mit einem hohen Farbwiedergabeindex (CRI) zu verstehen. Die Abbildung der CIE Farbtafel ergibt für mich hier gar keinen Sinn.





So sieht die Lieferung aus (genauer Bestelltag unkenntlich gemacht). Die blaue Folie kann und sollte im Betrieb natürlich abgezogen werden.

Technische Daten:

- 10 Watt
- Betriebsspannung 9 – 11 V
- Betriebsstrom 1,05 A
- Abstrahlwinkel 120°

Wenn man die LED an eine viel zu geringe Betriebsspannung anschließt, kann man die einzelnen LEDs schwach glimmen sehen und man erkennt, dass es sich um 3 in Reihe geschaltete einzelne LEDs handelt, das ganze 3 mal, sodass hier 9 LEDs zu je 1 Watt verbaut sind.

Es musste relativ viel Spannung am Vorwiderstand vernichtet werden, sodass bei einer Leistungsaufnahme von 10 Watt an der LED das Netzteil 15 Watt aufnahm, d.h. hier haben wir schon 50 % Verlust durch die Stromversorgung bei dieser LED.

Wie macht sich die LED? Leider ziemlich schlecht. Nachdem ich mit dem Leuchtstreifen so hereingefallen war, war ich dieses Mal besonders wachsam und habe mir extra hierfür ein PAR-Meter bestellt um zu messen wie gut die LED ist.

Beide LEDs sind mit einem Abstrahlwinkel von 120° angegeben. Links ist eine warmweiße LED, Leistung 3,8 Watt, 340 Lumen, rechts die Grow LED. Um auf dieselbe fotosynthetische Wirkung bei gleichem elektrischem Wirkungsgrad wie die warmweiße LED zu kommen müsste sie $15/3,8$ den 3,94 fachen Wert, also 631 anzeigen. Selbst bezogen auf die Nennleistung von 10 Watt müssten es $10/3,8=2,63$ müssten es 421 sein.

Diese spezielle Grow-LED, die theoretisch aufgrund des fehlenden Grünanteils im Spektrum einen Wirkungsgradvorteil haben müsste, ist um Welten schlechter als die billige 230 Volt LED mit nicht einmal 100 Lumen pro Watt. Auch die überaus starke Erwärmung des Kühlkörpers lässt auf eine niedrige Effizienz schließen.



3 Fazit, Tipps und Empfehlungen

Augen auf beim Kauf von Grow-LEDs. Wie man sieht, wird da sehr viel Mist verkauft. Von günstigen Fertiglösungen für 220 Volt aus China rate ich dringend aufgrund der elektrischen Sicherheit und der Brandgefahr immer ab. Leider sind solche auch direkt bei Amazon.de zu bekommen, also aufgepasst.

Unter http://www.literacy.at/fileadmin/literacy/redaktion/pdf/vwa_stollberger.pdf findet sich eine interessante Arbeit, wo das Wachstum bei einer warmweißen LED und nur blau-rot Beleuchtung mit jeweils 10 Watt Leistung verglichen wird. Man sieht dort auf S. 41, dass sie weiße LED deutlich mehr pflanzenverwertbares Licht als die rot-blauen LEDs liefern. Es wird dort auch vermutet, dass es nicht allein auf die Absorptionskurven von gelöstem Chlorophyll ankommt, sondern im Gesamtsystem Pflanze auch andere Wellenlängen zum Wachstum beitragen. Salat z.B. zeigte bei rot-blau Licht eine deutlich verlängerte Keimdauer (Lichtkeimer), sowie eine deutlich verringerte Keimquote. Weißes Licht wird als die beste Lichtquelle für künstliche Beleuchtung angesehen. Anmerkung: Der Autor der Arbeit ist vermutlich ebenfalls auf billige China-LEDs hereingefallen, weswegen er mit der warmweißen LED so extrem bessere Ergebnisse als mit rot-blau Beleuchtung erzielt hat.

Persönlich habe ich zu viel Zeit und auch Geld in den Chinamüll investiert, sodass ich mich nun auf weiße Marken-LEDs konzentriere. Alles andere lohnt sich weder finanziell noch zeitlich.

3.1 Lux-Meter bzw. PAR-Meter

Es gibt von UNI-T das UT383BT Luxmeter. Dieses kann via Bluetooth mit dem Smartphone verbunden werden. Es ist kompatibel mit der App PPFD Meter

(<https://play.google.com/store/apps/details?id=com.homestudio.ppfdmeter>). In dieser kann man seine Lichtquelle eingeben und bekommt sehr preisgünstig den passenden PAR-Wert angezeigt. Leider ist die Messeinheit nicht von der Anzeigeeinheit getrennt, aber durch Bluetooth kann man das Smartphone unkompliziert als Anzeigeeinheit benutzen.

Beim auf der vorherigen Seite gezeigten PAR-Meter (Kaufpreis 300 €) ist die Messeinheit ebenfalls direkt eingebaut. Ohne externe Ablesemöglichkeit, wie z.B. via Bluetooth, dies ist sehr unpraktisch, weswegen es retourriert wurde. Hinzukommt, dass in dieser 300 € Preisklasse immer noch ein sehr ungenaues Messergebnis erzielt wird, siehe den Test unter <https://web.archive.org/web/20200121021027/https://www.advancedaquarist.com/2013/2/equipment>. Da reicht ein günstiges Lux-Meter für Vergleichsmessungen aus.

Wer ein normales Luxmeter hat, kann mit dieser Webseite <https://www.waveformlighting.com/horticulture/convert-lux-to-ppfd-online-calculator> den PAR bzw. PPFD-Wert sehr leicht selbst bestimmen.

Wer selbst seine Grow-LEDs mittels Luxmeter messen möchte: Um den gemessenen Lux-Wert für die 10 Watt Grow-LED auf äquivalente Tageslicht-Lux umzurechnen ist der Faktor ca. 1,9. Sprich der gemessene Wert entspricht ca. den doppelten Lux, wenn es weißes Licht wäre.

3.2 Tageslichtnutzung

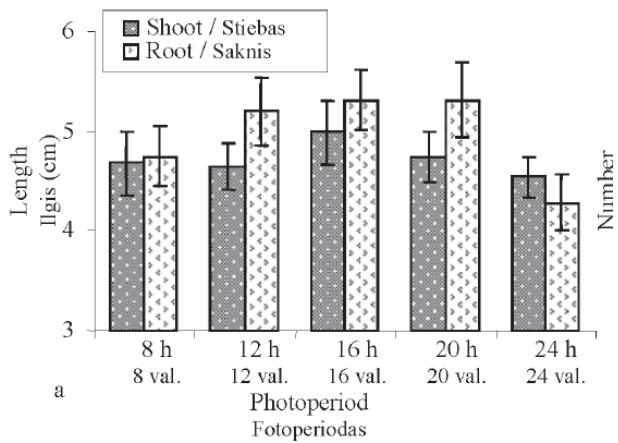
Es lohnt sich so viel Tageslicht wie möglich auszunutzen. An einem trüben Tag oder an einem Nordfenster fallen oftmals noch 5000 Lux ein ($\approx 40 \text{ W/m}^2$ Gesamtstrahlung). Bei einer Fensterfläche von einem Quadratmeter bräuchte man bei einer LED-Effizienz von 150 Lumen pro Watt mehr als 33 Watt um dieselbe Beleuchtungsstärke zu erreichen (unter optimaler Ausnutzung der Fensterfläche). Optimal sind natürlich Südfenster, da hier die Sonne praktisch den ganzen Tag scheint und aufgrund der unterschiedlichen Leuchtdichtenverteilung auch bei Bewölkung am meisten Licht eindringt. 50.000 Lux bei Sonnenschein (entsprechend 330 Watt mit LEDs) und mehr sind keine Seltenheit. Es lohnt sich mit Alufolie Reflektoren zu bauen. An sonnigen Tagen messe ich ca. 5000 Lux an den Nordfenstern, am Südfenster deutlich über 50.000 Lux. An einem trüben Tag ist das Licht wesentlich gleichmäßiger verteilt, schwankt allerdings mitunter auch stark. So wurden Mitte Februar zunächst 12.000 Lux am Nordfenster und 16.000 Lux am Südfenster zur Mittagszeit gemessen. Die Sonne stand in Achse zum Fenster. Ca. 10 Minuten später waren es am Nordfenster 8.200 Lux, am Südfenster 12.600 Lux. Dieses Mal war die Sonne sogar ganz schwach hinter der (Hoch)Nebelschicht zu sehen und trotzdem wurden insgesamt weniger Lux gemessen. Die Nord- und Südfenster sind identisch, gleiche Größe, gleiches Wärmeschutzglas (Zweifachverglasung). Es wurde in der Mitte des Fensters ganz unten am Glas gemessen und der Sensor in der Neigung so ausgerichtet, dass der maximale Luxwert angezeigt wird. Die umgebende Bebauung ist in beiden Fällen praktisch vernachlässigbar.

3.3 Die optimale Beleuchtungsdauer

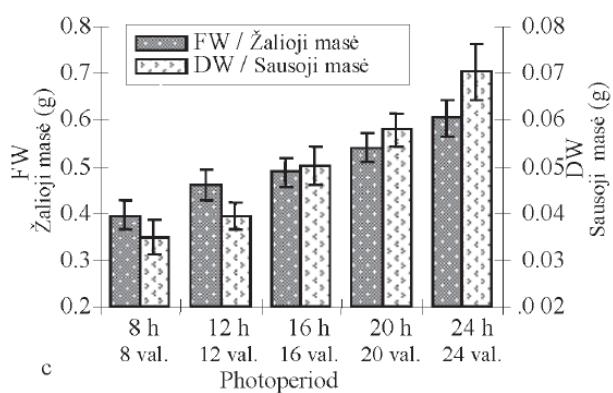
Wie lange soll man beleuchten? Dies ist eine sehr schwierige Frage, zunächst ein paar Informationen hierzu:

Wie dieser Versuch mit Chrysanthemen zeigt
[https://web.archive.org/web/20170829032204/http://sodininkyste-darzininkyste.lsdi.lt/straipsniai/27-2/27\(2\)-4.pdf](https://web.archive.org/web/20170829032204/http://sodininkyste-darzininkyste.lsdi.lt/straipsniai/27-2/27(2)-4.pdf) nimmt die Größe der Pflanze mit der Beleuchtungsdauer zunächst zu, bei 24 Stunden wieder deutlich ab, während die Trockenmasseproduktion bei 24 Stunden am größten war. Dies könnte mit dem Phytochrom-System und den Auxinen zu tun haben, siehe unten. Die Lichtstärke betrug $56 \mu\text{mol}/(\text{m}^2*\text{s})$, umgerechnet ca. 3000 Lux, die Versuchsdauer betrug 42 Tage.

Wir konzentrieren uns auf das Trockengewicht, da für das Frischgewicht jede Menge Wassereinlagerungen verantwortlich sein können. Das Trockengewicht hält fest wieviel Biomasse die Pflanze aufgebaut hat. Interessant ist der Sprung in der Trockenmasse von 12 auf 16 Stunden und von 20 auf 24 Stunden.



Quelle: [http://sodininkyste-darzininkyste.lsdi.lt/straipsniai/27-2/27\(2\)-4.pdf](http://sodininkyste-darzininkyste.lsdi.lt/straipsniai/27-2/27(2)-4.pdf) S. 42



Sehr interessant ist auch nachfolgende Grafik. Diese zeigt das Wachstum verschiedener Bäume über 9 Monate, die unter einer Glühbirne mit einer Beleuchtungsstärke von ca. 1000 bis 2000 Lux beleuchtet wurden. Glühbirnen haben ihre Hauptstrahlung im roten Bereich, sodass das Phytochromsystem mehr in Richtung P660 verschoben wird, wodurch das Längenwachstum anregt wird.

130

PLANT PHYSIOLOGY

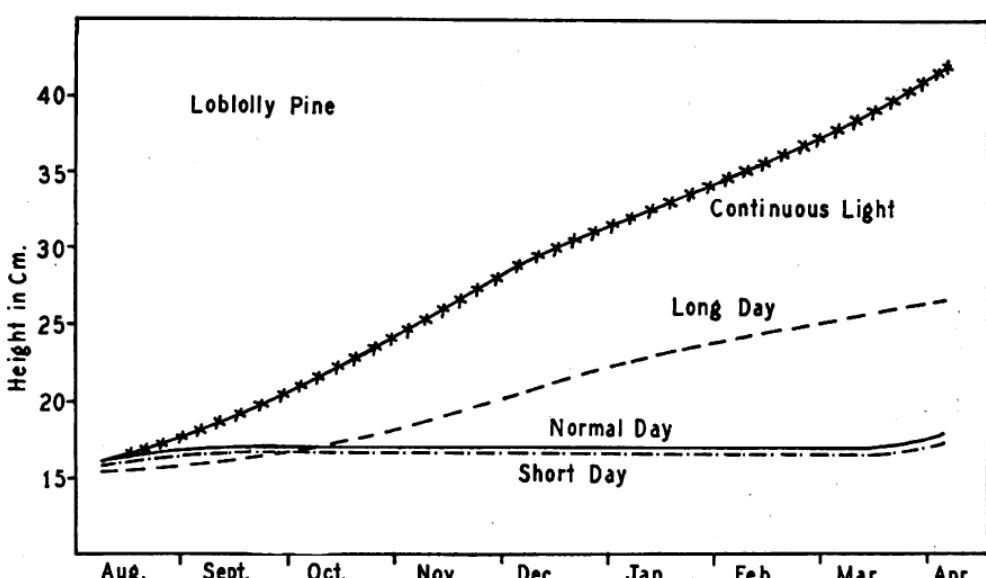


FIG. 1. Shoot growth of loblolly pine with photoperiods of various lengths.

Quelle: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC439866/pdf/plntphys00311-0132.pdf> S. 4

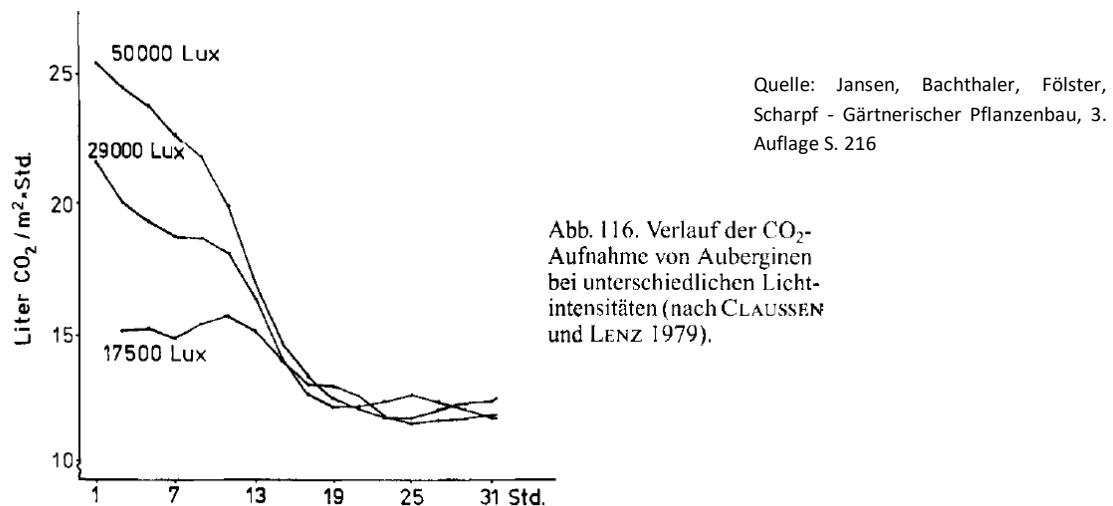
Mit der 24 Stunden Beleuchtung hat sich ausführlich dieses Dokument [http://www.globalsciencebooks.info/Online/GSBOOnline/images/2010/PS_4\(1\)/PS_4\(1\)5-17o.pdf](http://www.globalsciencebooks.info/Online/GSBOOnline/images/2010/PS_4(1)/PS_4(1)5-17o.pdf) beschäftigt. Hier werden sehr viele verschiedene Studien aufgezählt und ist sehr lesenswert. Um möglichst viel Trockenmasse, d.h. das Licht photosynthetisch am effizientesten zu verwenden, ist es besser niedrigere Lichtstärken länger als hohe Beleuchtungsstärken für kürzere Zeit zu geben (S. 4 links oben). Es werden hierbei explizit Salat und Radieschen erwähnt. Das ist einleuchtend, da man so der Lichtsättigung vorbeugt. Was man immer bedenken muss bei Versuchen unter Kunstlicht gilt: Je größer die Pflanze, desto näher ist sie an der Lampe und erhält damit mehr Licht, sodass sie mehr Trockenmasse aufbauen kann. Ein paar genauere Werte bezüglich Salat und 24 Stunden Beleuchtung findet sich hier: <https://journals.ashs.org/hortsci/view/journals/hortsci/33/6/article-p988.pdf> Generell kann festgehalten werden, je länger die Beleuchtungsdauer und je höher die CO₂-Konzentration, desto mehr Trockenmasse wurde produziert. Es wurde mit Lichtstärken von 100, 200 und 300 µmol/(m²*s), sowie einer CO₂ Konzentration von 400 ppm und 800 ppm gearbeitet. Die Werte der Tabelle auf S. 4 wurden in folgende Tabelle übertragen:

Lichtintegral mol/(m ² /Tag)	CO ₂ ppm	PPF µmol/(m ² *s)	Belichtungsdauer Stunden/Tag	Trockenmasse mg	Trockenmasse / Lichtmenge	Zugewinn in % 24 h Beleuchtung	% Trockenmasse	Verhältnis Spross/Wurzel
8,6	400	100	24	60	0,332225914	33,33	5,9	5,8
8,6	400	150	16	45	0,249169435		5,3	4,5
17,3	400	200	24	117	0,322047894	20,62	8,1	2,8
17,3	400	300	16	97	0,266996972		6,3	2,7
8,6	800	100	24	91	0,503875969	18,18	4,3	4,3
8,6	800	150	16	77	0,426356589		3,6	3,6
17,3	800	200	24	122	0,335810625	-1,61	8,9	2,3
17,3	800	300	16	124	0,341315717		8,1	1,9

Bei gleichbleibender Gesamtlichtmenge (DLI, daily light integral), war die Produktion an Trockenmasse größer, wenn diese über einen längeren Zeitraum gegeben wurde. Gleichzeitig der Anteil der Trockenmasse im Spross bei der längeren Belichtung größer. Das ist gerade bei Kopfsalat vorteilhaft, da man nur den Spross verzehrt. Dieses Ergebnis unterstützt die These, dass durch das in Dunkelphasen gebildete Phytochrom P660 vermehrt Auxine gebildet werden, welche dann das Wurzelwachstum (und auch das Streckenwachstum) anregen, siehe Abschnitt „1.4.1 Das Phytochromsystem“. Es wurden kaltweiße Leuchtstoffröhren zur Beleuchtung verwendet, welche nur einen extrem geringen Anteil im Dunkelroten besitzen. Am stärksten war der Vorteil der 24 Stunden Belichtung gegenüber der 16 Stunden Belichtung bei geringen Lichtstärken und normaler CO₂-Konzentration von 400 ppm. Erst bei hoher CO₂-Konzentration und hoher Lichtstärke ist ein minimal schlechteres Ergebnis der 24 Stundenbeleuchtung zu verzeichnen. Allerdings nicht so gravierend, dass man davon abraten sollte. Ich deute das Ergebnis als einen gewissen Sättigungseffekt, 300 µmol/(m²*s) sind ca. 16.500 Lux, sodass die Photosyntheseprodukte hier nicht mehr rasch genug abgeführt werden konnten. Die höchste Ausbeute an Trockenmasse pro Lichtmenge wurden mit den geringeren Lichtstärken erreicht, durch die Verdoppelung des CO₂-Gehaltes wurde die Ausbeute der Lichtmenge um 50 % erhöht. Mehr zum CO₂ im Abschnitt „3.10.2 CO₂-Versorgung.“

Dass manche Pflanzen eine Ruhepause benötigen, um die durch die Photosynthese produzierten Stoffe abtransportieren zu können, zeigt die auch folgende Grafik beispielhaft für Auberginen. Je höher die Lichtstärke ist, desto schneller fällt die Photosyntheserate (gemessen an der CO₂-Aufnahme) im Verlauf der Zeit ab. Bei höheren Lichtstärken wird dennoch insgesamt mehr CO₂ aufgenommen. Meine Erklärung: Auch die unteren Blätter bekommen hier mehr Licht und können sich besser an der

Photosynthese beteiligen, siehe Abschnitt 3.8 „Die Anordnung von LEDs“. Da hier insgesamt mehr Blätter an der Photosyntheseleistung beteiligt sind und die CO₂-Aufnahme auf denselben Wert abfällt wie bei niedrigeren Beleuchtungsstärken, könnte der Engpass hier z.B. im Stamm liegen. Schade, dass bei dieser Untersuchung nicht gezeigt wurde wie lange die Belichtungspause sein muss, damit die CO₂-Aufnahme wieder so stark wie am Anfang ist.



17500 Lux * 2 = 35000 Lux, selbst bei 50.000 Lux haben wir nicht die doppelte CO₂-Aufnahme. Obwohl dies deutlich mehr als das Doppelte der Lichtstärke ist, ist die CO₂-Aufnahme nicht annähernd doppelt so groß. Das bringt uns zur Frage der Wirtschaftlichkeit der Beleuchtung. Wieviel sollte man beleuchten? Schauen wir uns die folgende Grafik an. Je größer man die künstliche Beleuchtungsstärke erhöht, desto geringer fällt die Wuchssteigerung aus. Das deckt sich auch mit dem obigen Experiment zum Kopfsalat. Im Beispiel der Auberginen könnte man z.B. konstant über 24 Stunden mit 12.000 Lux (geschätzt) beleuchten um eine konstante CO₂-Aufnahme und damit das optimale Wachstum bezogen auf den Lichtenergieeinsatz zu haben. Bezogen auf die Energie- und Investitionskosten für die Beleuchtung wäre das am wirtschaftlichsten. Es ist nicht bekannt wie die Auberginenpflanzen in diesem Versuch zuvor beleuchtet wurden. Wenn sie vorher bei deutlich schwächerem Licht gezogen wurden, wäre die Kurve wahrscheinlich nach oben verschoben, wenn sie diesen Lichtstärken zuvor dauerhaft ausgesetzt worden wären.

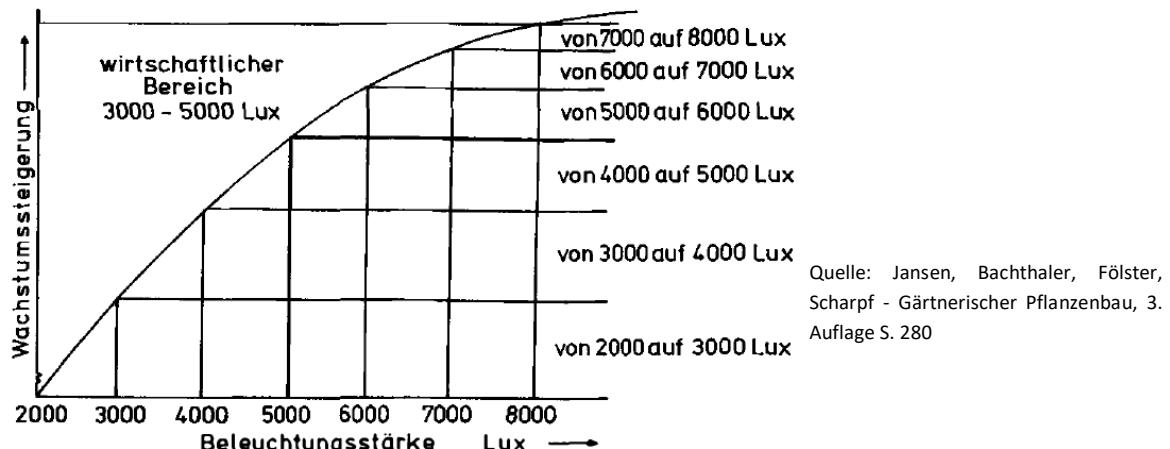


Abb. 143. Wachstumssteigerung bei Gurken in Abhängigkeit von zunehmender Beleuchtungsstärke (bei konstanter Temperatur) (nach RUF 1975).

Möchte man die Pflanzen nach außen Pflanzen, empfiehlt es sich sie durch höhere Lichtstärken sukzessive daran zu gewöhnen, da sie ansonsten empfindlich auf Sonnenlicht reagieren, <https://journals.ashs.org/hortsci/view/journals/hortsci/33/6/article-p988.pdf> S. 1 linke Spalte. Da es wegen der hohen Investitionskosten unwirtschaftlich ist dies mit hohen Lichtstärken durchzuführen, stellt man die Pflanze nach draußen und schützt sie zunächst vor der Sonne. Jeden Tag gibt es ein bisschen mehr davon. Am ersten Tag nur eine Stunde Sonne, am zweiten 2 usw. Nach drei Tagen bekommt sie dann Früh- und Abendsonne, nach ca. einer Woche dann auch die Mittagssonne.

Es gibt sog. Kurztag- und Langtagpflanzen. Je nach Art benötigen sie eine sog. kritische Taglänge um das Blühen einzuleiten <https://de.wikipedia.org/wiki/Photoperiodismus> Bei diesen ist es wichtig die entsprechende Anzahl an Stunden zu beleuchten um die Blüte einzuleiten. Ein geringes Störlicht wie eine Straßenlaterne oder nachts für wenige Sekunden das Licht anzuschalten kann bereits ausreichen, dass die Pflanze von einer längeren Tageslänge ausgeht und die Blütenbildung deshalb unterbleibt. Die Störlichtempfindlichkeit ist artabhängig.

Für fruchttragende Pflanzen kann eine 24-Stundenbeleuchtung niedrigere Erträge liefern. Dies wurde für Himbeeren und Erdnüsse festgestellt. Die Pflanze selbst jedoch wies im Vergleich zur 12 bis 15 Stunden belichteten Pflanze deutlich mehr Biomasse auf (S. 4 rechts oben). Bei Pepperoni/Chilis hingegen stieg der Schärfegehalt und sie trugen jede Menge Früchte (S.3 rechts unten). Bei Wilderdbeeren zeigte sich durch 24 Stundenbeleuchtung ein „großartiger Effekt auf die Blütenbildung“ (S. 3 rechte Spalte). Im eigenen Versuch zeigten Mitte März gelieferte Klettererdbeeren von Hummi ca. 10 cm hoch bereits nach 5 Tagen geöffnete Blüten sowie zahlreiche Knospen bei 20 Stunden täglicher Beleuchtung. Chili und Paprikapflanzen zeigten bei ca. 20 Stunden Belichtung am Tag (tagsüber erhielten sie Tageslicht, nachts wurden sie unter Kunstlicht gestellt)

Beim obigen Versuch zum Kopfsalat wurde gezeigt, dass es weniger auf das Integral der Lichtmenge, sondern vielmehr auf die Dauer der Beleuchtung ankommt. Die Gesamtlichtmenge ist in einem gewissen Umfang dennoch wichtig. Paprikapflanzen profitierten am meisten von nächtlichem Zusatzlicht, wenn sie tagsüber wenig Sonnenstrahlung erhalten hatten (S. 5 links Mitte).

Basierend auf dem Abschnitt „3.10 Weitere Wachstumsbedingungen“ und „1.4.1 Das Phytochromsystem“ schließe ich, dass bei Dunkelphasen sich das Phytochrom Gleichgewicht in

Richtung P660 verschiebt. Dadurch werden Auxine gebildet, was das Längenwachstum anregt. Außerdem gilt je niedriger die Temperatur während des Wachstums, desto kompakter wird die Pflanze. Sollte die Pflanze durch die hohe Lichtstärke und/oder Dauerlicht zu kompakt wachsen, kann man durch Gabe von Dunkelrot das Längenwachstum wieder anregen (bitte beachte: die Stärke dieses Effektes hängt ganz von der Pflanzenart ab, siehe den Abschnitt zum Phytochromsystem). Da Dunkelrot nicht zur Photosyntheseleistung beiträgt und der Wirkungsgrad der aktuellen Oslons mit 730 nm hier nur 42 % gegenüber 56 % der Oslons mit 660 nm beträgt, lohnt es sich die Bestrahlung mit dunkelrot auf die Triebspitzen zu fokussieren. Hat man eine Dunkelphase schaltet man diese 730 nm LEDs am besten für 30 Minuten vor der Dunkelphase ein und die anderen LEDs aus, damit sich das Phytochrom in die P660-Form umwandeln kann. Manchmal ist das als „Afterburn Effect“ zu lesen und ihm werden starke Wachstumssteigerungen, auch in der Trockenmasseproduktion, nachgesagt. Wie sich zeigte liegt das daran, dass durch die Behandlung mit dunkelrotem Licht die Pflanzen größer wurden, damit näher an die Lampe rückten und somit mehr Strahlung erhielten.
https://www.jstage.jst.go.jp/article/ecb1963/41/2/41_2_121/_pdf S. 5.

Im eigenen Versuch mit Osram Substitube LEDs mit neutralweißer Farbe bei 4000K mit Paprikapflanzen und 20 Stunden Beleuchtungsdauer am Tag, bei ca. 20-23 Grad Raumtemperatur trat das Problem auf, dass die Pflanzen zu dicht/kompakt wuchsen. Die frischen Blätter hatten nicht genug Abstand zu den bereits vorhandenen Blättern und es bildete sich zwischen den Blättern Kondenswasser. Gleichzeitig bekamen die alten Blätter natürlich so auch zu wenig Licht und CO₂. Hier wäre wohl eine kürzere Beleuchtungsdauer (ineffizienter), warmweißes Licht oder zusätzliche Rotbeleuchtung erforderlich gewesen.



Reines Kondenswasser durch zu kompakten Wuchs bei Paprikapflanzen

Interessanterweise wird hier http://www.ishs.org/ishs-article/580_17 durch die Gabe von hellrotem Licht 30 Minuten vor der Dunkelphase ein deutlich besseres Wachstum erreicht. Allerdings ist dieser Versuch etwas wirr beschrieben, es ist nicht auszuschließen, dass hier auch dunkelrot mit im Spiel war. Logisch klingt jedenfalls die Wachstumssteigerung durch dunkelrotes Licht.

Rekapitulieren wir diesen Abschnitt kurz. Möchte man maximale Biomasse haben, beleuchtet man 24 Stunden, sofern es die Pflanze verträgt (siehe unten). Möchte man große und kräftige Pflanzen haben, beleuchtet man 18 bis 20 Stunden pro Tag. Kommt es rein auf die Größe der Pflanze an, beleuchtet man 16 Stunden. Achtung das hier ist nur eine grobe Faustregel, je nach Pflanzenart kann das Ergebnis unterschiedlich sein.

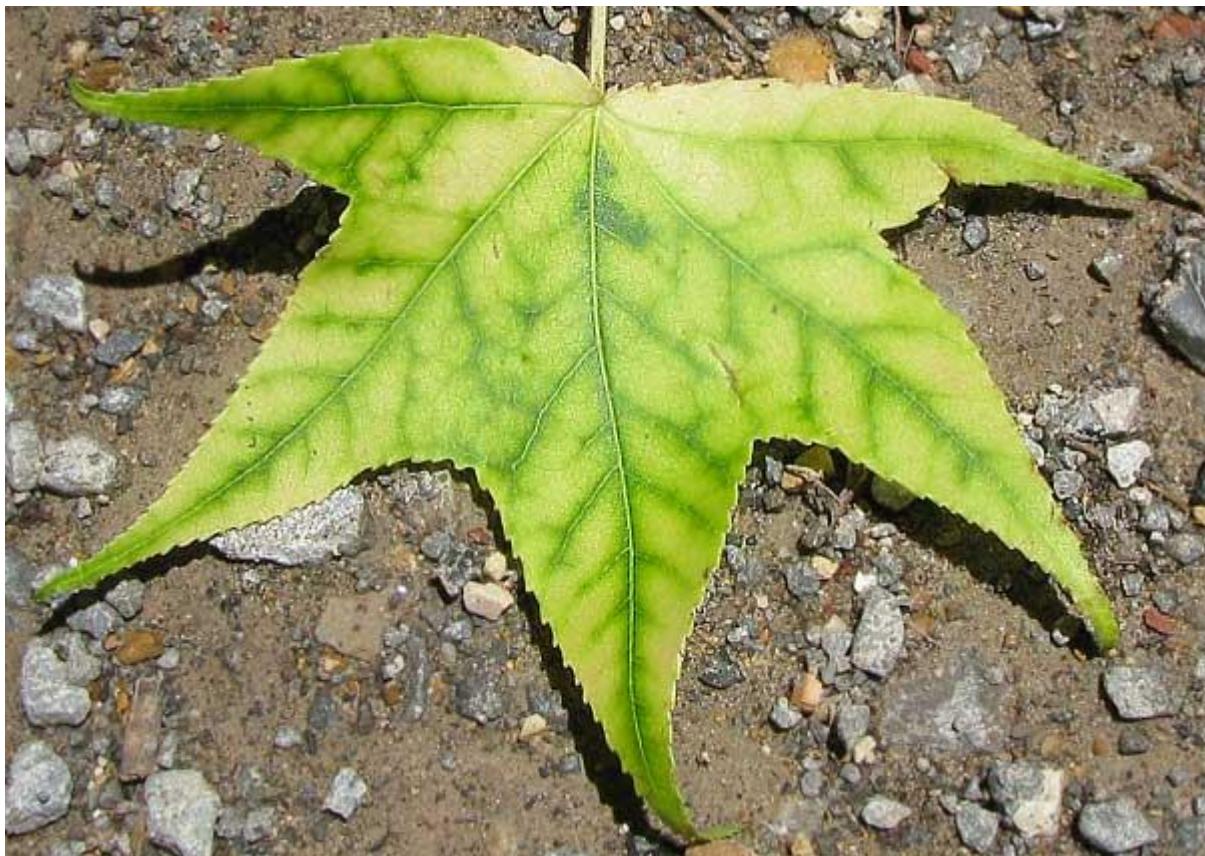
„Die Dauer der täglichen Belichtung ist abhängig von dem Verhältnis zwischen Kosten und Wachstumsleistung der Pflanzen. Bei vielen Pflanzen ist eine Nachtruhe von mindestens vier Stunden zur Verlagerung der Assimilate sinnvoll. Bei sehr jungen Pflanzen ist oft eine Dauerbelichtung ohne Chlorophyllschäden möglich.“ Zitatquelle: Jansen, Bachthaler, Fölster, Scharpf - Gärtnerischer Pflanzenbau, 3. Auflage S. 283

An diese Empfehlung halte ich mich selbst und beleuchte 20 Stunden pro Tag.

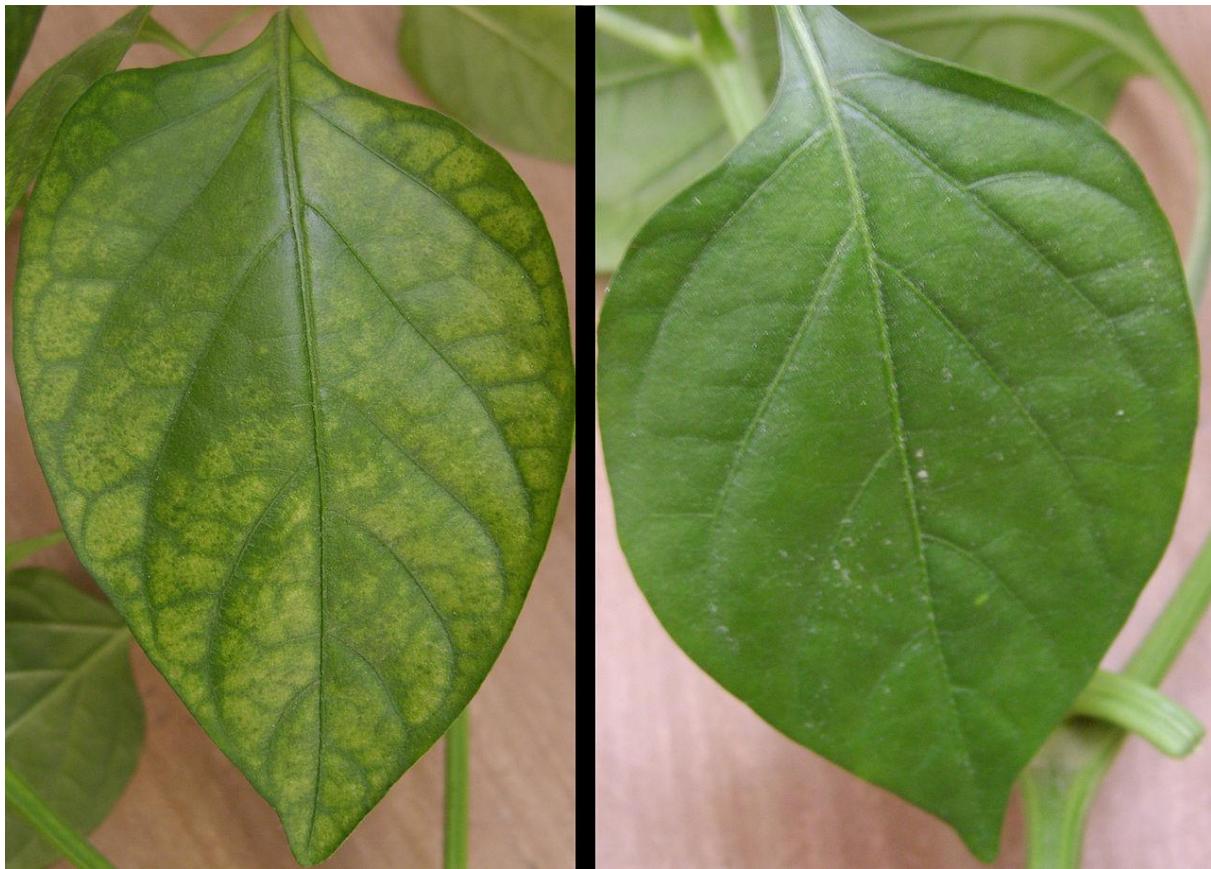
Aus wirtschaftlichen Aspekten (Anschaffungskosten) ist eine längere Belichtungsdauer bei geringerer Lichtstärke im Vorteil.

Chlorophyllschäden bezeichnet man auch als Chlorosen, was zu einem Chlorophyllmangel führt. Vor allem Tomaten sind für diese Schäden anfällig. Selbst bei 12 Stunden Licht und 4 Stunden Dunkelphase zeigten sich die Schäden. Interessanterweise nicht bei 16 und 20 Stunden Dauerbeleuchtung mit je 4 Stunden Dunkelphase. <https://www.jstor.org/stable/2438816> (Artikel “Injury of Tomato Plants by Continuous Light and Unfavorable Photoperiodic Cycles”)

Beispiele für Chlorosen:



Quelle: <https://de.wikipedia.org/wiki/Datei:Sweetgum-leaf-interveinal-chlorosis.jpg>



Quelle: https://de.wikipedia.org/wiki/Datei:Capsicum_annuum_clorosis.jpg

Links das Blatt mit Chlorose, rechts ein gesundes Blatt. Bei fortschreitendem Stadium können sich sog. Nekrosen bilden. Das Blatt rollt sich ein und bekommt braune, abgestorbene Stellen, vor allem am Blattrand. Chlorose und Nekrose können allerdings auch ein Zeichen von Überdüngung sein, deswegen unbedingt auch den pH-Wert und EC-Wert kontrollieren, siehe Abschnitt 3.10.3 Düngung.

Für diejenigen, die Zimmerpflanzen gerne in eine dunkle Ecke stellen, ist folgende Tabelle interessant.

TABLE 8. *Survival at Low Intensities*

Plant	No. of Days Grown	Light Intensity (foot-candles)	Per-cent-age Survival	Percentage Increase in Dry Weight
Sunflower.....	48	46	0	—
<i>Geum</i>	54	41	90	358
Redwood.....	55	30	90	66
<i>Galinsoga</i>	35	25	92	1,670
Buckwheat.....	48	26	96	2,500

Quelle: <http://www.jstor.org/stable/2435785> S. 17 bzw. 370.

Die angegebenen Beleuchtungsstärken wurden über 12 Stunden gegeben. 25 Foot Candle sind ca. 270 Lux. Sehr erstaunlich, dass die Pflanzen bei so geringen Lichtstärken noch überleben und sogar wachsen konnten. Es ist vom „Dry Weight“, also Trockenmasse die Rede. Vermutlich ist jedoch Frischmasse gemeint, da zur Bestimmung der Trockenmasse die Pflanze getötet werden muss. „2,500“ meint sehr wahrscheinlich 2.500 % also das 25 fache (englische Notation). Für Redwood

(Mammutbaum) wurde der Versuch fortgesetzt, am Ende des 7. Monats lebten noch die Hälfte der Pflanzen.

3.4 Gepulstes Licht

Teilweise ist davon zu lesen, dass man durch Pulsen der LEDs das Wachstum verbessern könnte. Statt die LED dauerhaft leuchten zu lassen, schaltet man sie mit hoher Frequenz an und aus. In dieser Studie https://www.jstage.jst.go.jp/article/jshita1991/14/3/14_3_136/_pdf konnte mit 2500 Hertz Frequenz und einer Pulsweite von 33% und bei 50 % eine Verbesserung des Wachstums von ca. 20 % gegenüber Dauerlicht festgestellt werden. Bei 50 % Pulsweite leuchtet die LED für die Hälfte der Zeit mit der doppelten Intensität. Bisher sind diese Ergebnisse nicht in kommerzielle Lampen eingeflossen, obwohl eine solche Steuerung sehr leicht und mit wenig Verlust zu realisieren wäre. Es ist sehr gut möglich, dass die extrem kurzen Dunkelphasen einfach nur das Längenwachstum stimulieren. Dadurch wachsen die Pflanzen höher an die Lichtquelle und nehmen insgesamt mehr Photonen auf. Dies trat so bereits mit fernen Rot (>700nm) auf, siehe vorheriger Abschnitt.

Hier http://www.ishs.org/ishs-article/1134_28 gibt es auch nochmal Untersuchungen dazu. Die Blätter waren bei gepulstem Licht größer und dünner. Auch Schattenblätter sind sowohl dünner und größer als Sonnenblätter. Die Trockenmasse wurde leider nicht gemessen. Das Verhältnis zwischen Frischmasse und Trockenmasse kann erheblich variieren, siehe vorheriger Abschnitt, sodass diese Untersuchung ohne Trockenmassenmessung nur bedingt aussagekräftig ist.

Um beim Pulsen der LED auf die gleiche Strahlungsmenge zu kommen muss bei einer Pulsdauer von 50 % bei gleicher Spannung die Stromstärke theoretisch verdoppelt werden. Leider verdoppelt sich die Lichtstärke bei doppelter Stromstärke nicht. Das Mitglied Cossart vom LED-Styles Forum war so freundlich hierzu zwei Grafiken zur Verfügung zu stellen, bei denen man dies sehr anschaulich sieht. Die blaue Linie ist der tatsächliche Verlauf der Lichtintensität in Abhängig der Stromstärke. Die braune Linie stellt den linearen, idealen Verlauf dar, d.h. doppelte Stromstärke ist doppelte Lichtleistung.

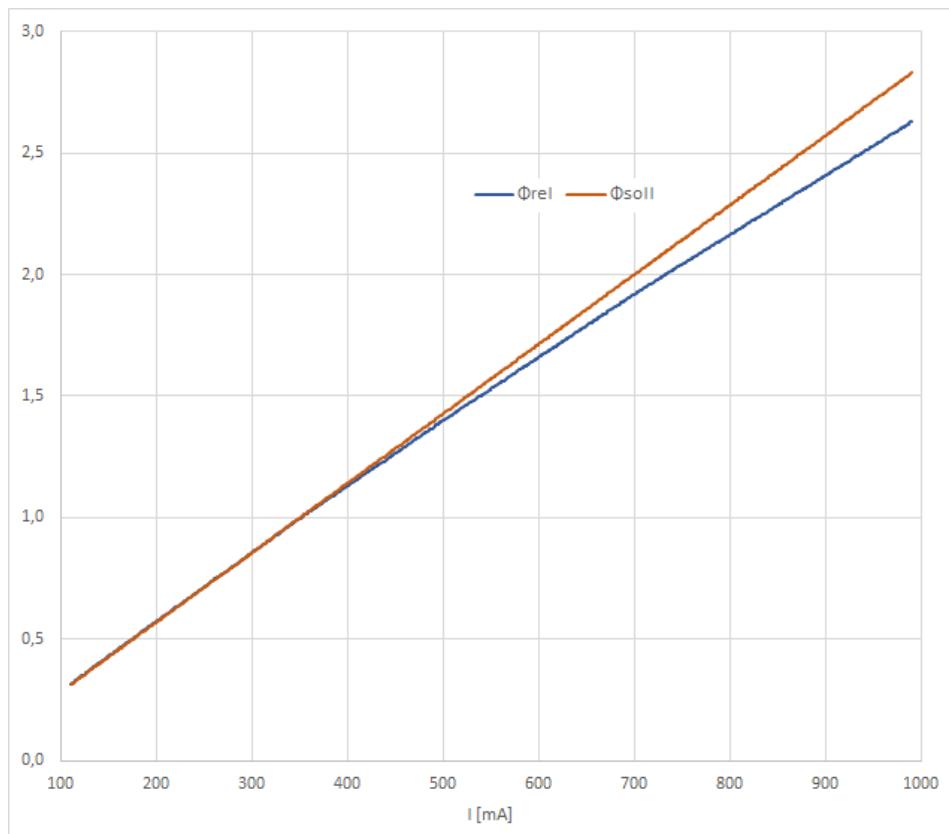
Schauen wir uns zunächst die rote Osram SSL GH CSSPM1.24 an. Bei 700 mA beträgt die Lichtleistung nur ca. das 1,93fache der Leistung bei 350 mA. Das ergibt einen Verlust von 7 % an Licht. Bei 350 mA wird eine Spannung von ca. 2,15 Volt benötigt, macht eine Leistung von 0,7525 Watt und ergibt laut Datenblatt eine Strahlungsleistung von 425 mW bzw. einen Wirkungsgrad von **56,5 %**. Für 700 mA werden

2,4 Volt benötigt

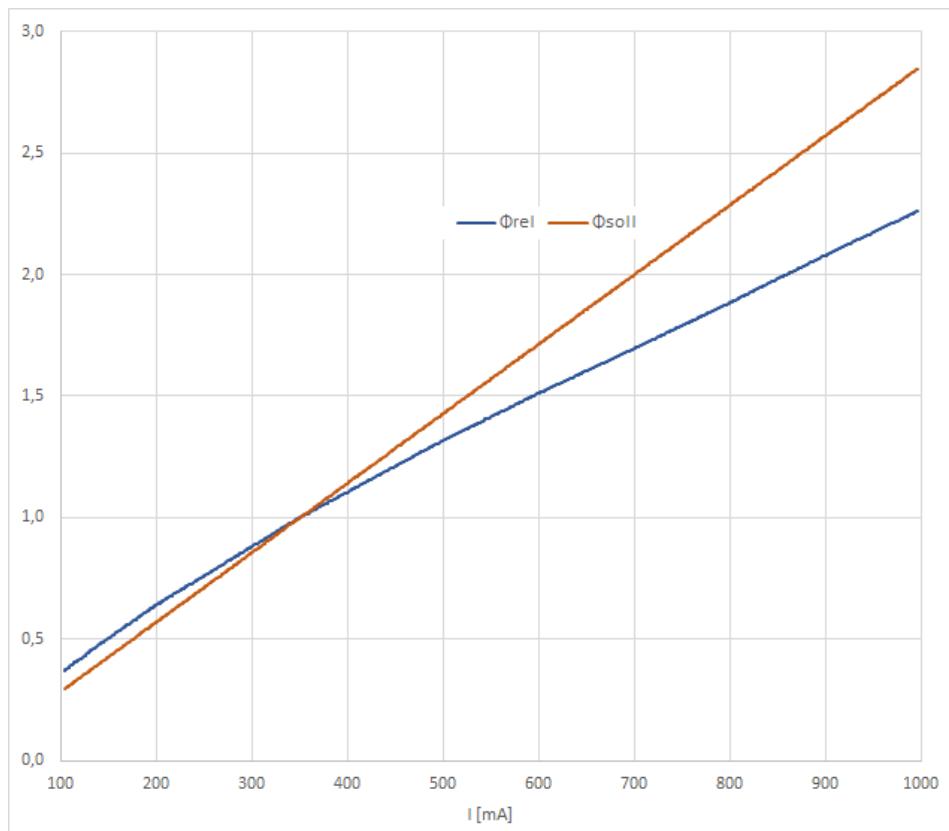
(Datenblatt

[http://www.osram-os.com/Graphics/XPic8/00253477_0.pdf/GH%20CSSPM1.24%20-%20OSLON%20SSL%20120%20\(EnglishDeutsch\).pdf](http://www.osram-os.com/Graphics/XPic8/00253477_0.pdf/GH%20CSSPM1.24%20-%20OSLON%20SSL%20120%20(EnglishDeutsch).pdf)

S. 8) macht eine Leistung von 1,68 Watt. Dies ist das 2,23fache der Leistung von 350 mA. Dafür haben wir nur das 1,93fache von 425 mW Strahlungsleistung, also 0,82025 Watt. Um tatsächlich das Doppelte an Lichtleistung zu erhalten, müssten wir die 2,31fache/2 (da 50 % Pulsweite) = 1,155fache an elektrischer Energie aufwenden (plus Verlust für den MOSFET). Es wurde hier linear approximiert. Um auf die doppelte Lichtstärke zu kommen, müsste in der Realität die Spannung noch mehr erhöhen, was den Verlust nochmals erhöht. Der Wirkungsgrad der LED ist übrigens auf ca. **48,8 %** gesunken, was ein Verlust von 13,6 % ist.



Relative Lichtleistung in Abhängigkeit der Stromstärke bei roten Oslon SSL GH CSSPM1.24 LEDs



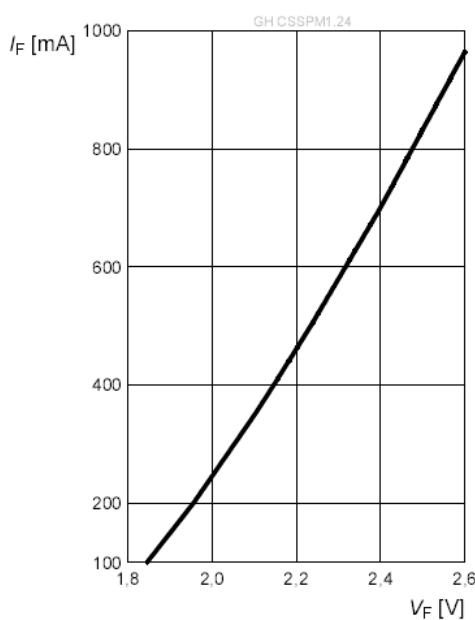
Relative Lichtleistung in Abhängigkeit der Stromstärke bei blauen Oslon SSL GD CSSPM1.24 LEDs

Schauen wir uns nun die blaue Osram Oslon GD CSSPM1.14 an (untere Grafik). Da die meisten weißen LEDs auf blauen LEDs basieren (siehe unten), gilt dies auch für weiße LEDs. Hier wird bei 700 mA nur das ca. 1,7fache der Lichtleistung wie bei 350 mA erreicht. Hier haben wir einen Verlust an Lichtleistung von 30 %. Bei 350 mA wird eine Spannung von 2,85 Volt benötigt, macht eine Leistung von 0,9975 Watt und ergibt laut Datenblatt eine Strahlungsleistung von 690 mW bzw. einen Wirkungsgrad von **69,2 %**. Für 700 mA werden ca. 2,96 Volt benötigt (Datenblatt [http://www.osram-os.com/Graphics/XPic8/00253459_0.pdf/GD%20CSSPM1.24%20-%20OSLON%20SSL%20120%20\(EnglishDeutsch\).pdf](http://www.osram-os.com/Graphics/XPic8/00253459_0.pdf/GD%20CSSPM1.24%20-%20OSLON%20SSL%20120%20(EnglishDeutsch).pdf) S. 8) macht eine Leistung von 2,072 Watt. Das ist das 2,08fache der Leistung von 350 mA. Dafür haben wir nur das 1,7fache von 690 mW Strahlungsleistung, also 1,173 Watt. Um tatsächlich das Doppelte an Lichtleistung zu erhalten, müssten wir die 2,44fache/2 (da 50 % Pulsweite) = 1,22fache an elektrischer Energie aufwenden (plus Verlust für den MOSFET). Es wurde hier linear approximiert. Um auf die doppelte Lichtstärke zu kommen, müsste in der Realität die Spannung noch mehr erhöhen, was den Verlust nochmals erhöht. Der Wirkungsgrad ist auf ca. **56,6 %** gesunken, was ein Verlust von 18,2 % ist.

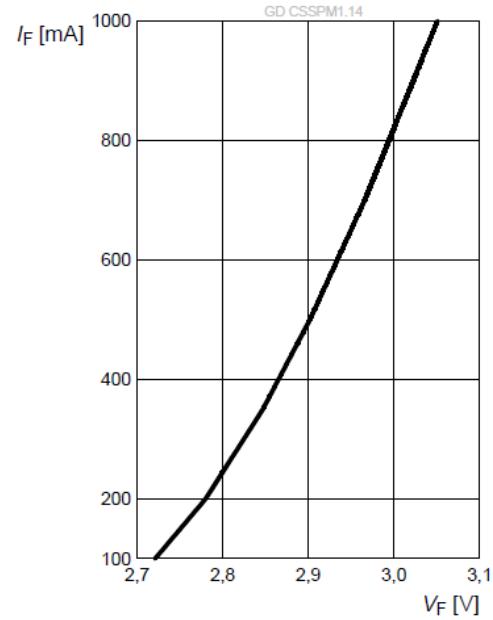
Die blaue LED hat zwar bei doppelte Stromstärke deutlich weniger Licht als die rote LED, gleichzeitig braucht sie für die doppelte Stromstärke eine wesentlich geringere Spannungsverhöhung, sodass die blaue LED beim Pulsen im Vergleich zur roten LED nicht so extrem viel schlechter wegkommt, wie ein erster Blick auf die Diagramme vermuten lässt.

Werfen wir hierzu einen kurzen Blick auf die Spannungs-Stromstärke-Diagramme. Auf den ersten Blick sehen die Kurven sehr ähnlich, jedoch ist das Spannungsintervall bei den roten Oslons ca. 0,8 Volt breit für einen Bereich zwischen 100 mA und 1000 mA, während es bei den blauen Oslons nur 0,4 Volt sind.

Forward Current 5) page 21 , 6) page 21
Durchlassstrom 5) Seite 21 , 6) Seite 21
 $I_F = f(V_F); T_S = 25^\circ\text{C}$



Forward Current 5) page 21 , 6) page 21
Durchlassstrom 5) Seite 21 , 6) Seite 21
 $I_F = f(V_F); T_S = 25^\circ\text{C}$



Stromverlauf Oslon rot

Quelle Oslon Datenblatt S.8, Links s.o

Stromverlauf Oslon blau

Diese hier beschriebene Reduzierung des Wirkungsgrades bei höheren Stromstärken basiert lediglich auf der Stromstärke allein, denn die Kurve wird durch einen kurzen Stromimpuls ermittelt. Bei

Lumileds (der Hersteller der Luxeon-LEDs) werden die Werte mit einem einzigen, nur 20ms dauernden Impuls ermittelt. Eine höhere Temperatur verringert den Wirkungsgrad ebenfalls, bei rot ab ca. 60 °C Sperrsichttemperatur, siehe Abschnitt 3.7.1.1 „Wirkungsgradbetrachtungen“. Durch das Pulsen mit hoher Frequenz (PWM mit 50 % Pulsweite) bleibt die Temperatur gegenüber 350mA theoretisch gleich. Durch den abfallenden Wirkungsgrad wird sie jedoch geringfügig höher ausfallen.

In der Praxis kommt dann des Weiteren noch ein geringer Verlust durch den benötigten MOSFET hinzu. Selbst wenn tatsächlich durch Pulsen eine Wachstumssteigerung erreicht werden könnte, wird dies durch den sinkenden Wirkungsgrad bei höheren Stromstärken zu Nichte gemacht. Wahrscheinlich hat aus diesem Grund diese Technik keinen Einzug in kommerzielle Grow-LED-Leuchten gefunden.

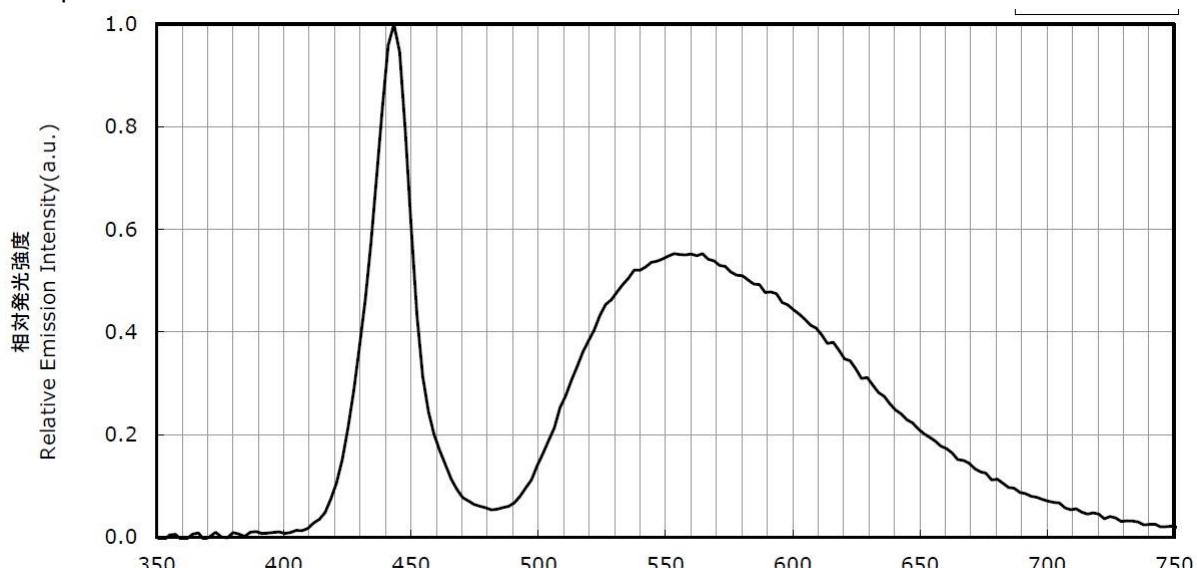
Fazit: Ein Pulsen der LEDs zur Wachstumssteigerung lohnt sich nicht.

3.5 Weiße LEDs

Eine kostengünstige Lösung und um Welten besser als die billigen China-Grow-LEDs sind herkömmliche weiße LEDs von einem vertrauenswürdigen Hersteller auf dessen Lumenangabe man sich verlassen kann.

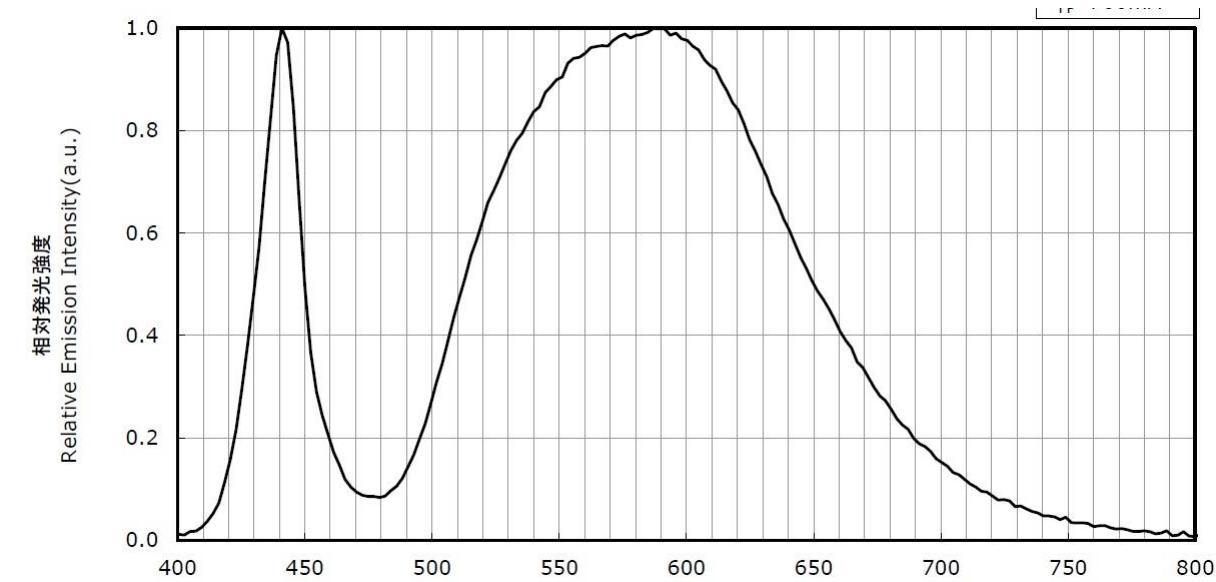
Blaue Leuchtdioden lassen sich mit sehr hoher Effizienz herstellen, deswegen werden für Weißlicht-LEDs hauptsächlich solche verwendet. Man bringt dazu eine Phosphorschicht auf, die einen Teil des blauen Lichtes in langwelligeres gelbes Licht umwandelt, wodurch der Eindruck eines weißen Lichts entsteht. Blaues und gelbes Licht ergibt weiß, aus diesem Grund ist die Phosphorschicht bzw. sind weiße LEDs im ausgeschalteten Zustand gelb. Kaltweiße LEDs lassen sich mit einer höheren Effizienz, also mehr Lumen pro Watt, herstellen als warmweiße LEDs. Sie emittieren jedoch annähernd dieselbe Anzahl an Photonen. Dieser Effekt führt dazu, dass für dieselbe PAR-Leistung bei kaltweißen LEDs mehr Lumen benötigt werden um ein μmol PAR zu erhalten. Für die Photosyntheseleistung zählt vor allem die Anzahl der Photonen. Bei gleichem Lux-Wert haben warmweiße LEDs also den höheren PAR-Wert. So beträgt beispielsweise bei einer warmweißen LED 1 der Umrechnungsfaktor von $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ zu Lux 58, bei einer kaltweißen LED 2 sind es 63 (abhängig vom jeweiligen Spektrum der LED).

Das Spektrum einer kaltweißen LEDs sieht z.B. so aus:



Quelle: [https://www.nichia.co.jp/specification/products/led/NVSW219B-V1-E.pdf S.12](https://www.nichia.co.jp/specification/products/led/NVSW219B-V1-E.pdf)

Einer warmweißen:



Quelle: <https://www.nichia.co.jp/specification/products/led/NVSL219B-V1-E.pdf>

Da es sich um relative Werte handelt, sind die Kurven nicht direkt vergleichbar. Es fällt auf, dass der Blauanteil bei der kaltweißen LED wesentlich höher ist als bei der Warmweißen. Der Blauanteil wird (je nach Pflanze), wie in Abschnitt 1 Hintergrund effektiver verwertet als der Anteil um 600 nm herum.

3.5.1 LEDs in klassischer T8 Leuchtstoffröhrenform

Dieser Abschnitt ab den Substitube LEDs mit 150 Lumen pro Watt entspricht dem Stand von 2017. Mittlerweile, 2023, sind die Substitubes auf 185 Lumen pro Watt angewachsen. Von Philips gibt es die Philips Master LEDtube UE 1200mm G13/T8 11.9W. Diese erreicht 2500 Lumen und kostet ca. 30 €. Ebenfalls ca. 30 € pro Stück kostet die Philips Master LEDtube UE 1500mm G13 mit 17,6 Watt. Diese erreicht 3700 Lumen bei 4000K Farbtemperatur. Damit erreicht sie ca. 58 µmol/s. Das sind 3,29 µmol/s und Watt bzw. man erhält 1,93 µmol pro €. Damit sind sie für den Anbau im großen Stil erheblich wirtschaftlicher als die E27 Varianten.

Osram hat z.B. die Substitube Baureihe mit über 150 Lumen pro Watt (und das mit Netzteilverlust und Verlust durch den Diffusor). Siehe dazu hier <http://www.ledstyles.de/index.php/Thread/25763-Die-Osram-Substitube-LED-zerlegt-und-untersucht-Link-zu-PDF/> Dort ist auch eine Umrüstung auf 12 Volt beschrieben.

Im Netzteil tritt bei der Substitube ein Verlust von ca. 10 % auf, sodass die reine LED auf mindestens 165 Lumen/Watt kommt (Verluste durch den Diffusor unbekannt, vermutlich im Bereich von 10 %). Die Wirkungsgradberechnung gestaltet sich hier etwas schwerer. Je nachdem wie das gewünschte Spektrum aussehen soll, ändern sich die maximal möglichen Lumen pro Watt. Hier <https://www.dial.de/de/article/effizienz-von-leds-die-hoehste-lichtausbeute-einer-weißen-led/> gibt es schöne Berechnungen dazu (Abschnitt "Lichtausbeuten in Abhängigkeit vom Spektrum"). Am vergleichbarsten ist die vorletzte LED mit Farbtemperatur 4000K und 35 Watt. Hier beträgt die

theoretische maximale Effizienz ca. 319 Lumen/Watt. Das heißt die verbauten LEDs in der Substitube kommen auf einen Wirkungsgrad von mindestens $165/319=51,7\%$. Die Substitube LED-Röhre gibt es mit verschiedenen Farbtemperaturen. Für die Pflanzenzucht wird hier die 4000K Version als am effizientesten empfohlen. Die 3000K Version erreicht „nur“ 137,5 Lumen/Watt, die anderen Farbtemperaturen erreichen wie die 4000K Version 150 Lumen pro Watt. Da mit zunehmender Höhe der Farbtemperatur der Umrechnungsfaktor Lux pro μmol steigt, haben diese dann eine geringere PAR-Ausbeute. Siehe vorheriger Abschnitt. Bei einfarbigen LEDs sind noch bessere Wirkungsgrade möglich, siehe Abschnitt 3.7 Die Selbstbaulösung.

3.6 Kommerzielle LEDs für Pflanzenbeleuchtung

Im professionellen Gartenbau werden neben weißen LEDs teilweise auch ausschließlich rot blaue LEDs eingesetzt, dann oftmals lediglich als zusätzliche Beleuchtung neben dem Tageslicht. Allerdings sind diese Leuchten von namhaften Herstellern mit einem sehr guten Wirkungsgrad. Da der Fokus auf professionelle Gewächshäuser liegt, sind sie für Privatanwender kaum erschwinglich bzw. einfach nicht wirtschaftlich. Wahrscheinlich werden sie das erst, wenn man für mehrere Jahre 24 Stunden am Tag verwendet. Professionelle, seriöse Grow-LED Hersteller geben die photosynthetisch aktive Strahlung in $\mu\text{mol}/(\text{s} \cdot \text{m}^2)$ an. Neben rot und blau werden auch noch andere Wellenlängen eingesetzt. In wieweit UV-LEDs und LEDs im fernen Rot sinnvoll sind oder mehr dem Marketing dienen, kann hier nicht beurteilt werden. Hier nun eine kleine Auflistung von gefundenen Lampen.

3.6.1 Growy Pflanzenzucht-LEDs

Beim Stöbern auf LEDStyles.de bin ich auf <http://www.growy.eu/cards/eu-growy-catalogue.pdf> gestoßen und habe mich an einer Berechnung versucht. Allerdings geben die angegebenen Werte aus meiner Sicht wenig Sinn. Gehen wir von Seite 21 aus. Dort wird eine Lampe mit im Durchschnitt 0,81 $\mu\text{mol}/(\text{s} \cdot \text{m}^2)$ pro Watt angeboten. Seltsamerweise ändert sich der Wert je nach Höhe. Das macht keinen Sinn, da der Wirkungsgrad unabhängig von der Höhe ist. Wenn wir davon ausgehen, dass es die Beleuchtungsstärke ist, macht das ebenfalls keinen Sinn, da sie viel zu gering ist, sodass wir nun mit dem avg $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ rechnen, in diesem Fall mit 24,15. Es wird damit geworben, dass Osram LEDs enthalten sind. Die trifft übrigens schon zu, wenn eine einzige verbaute LED von Osram ist...

Es ist eine stabförmige Lampe, d.h. wir stellen eine große Tobleroneschachtel vor in dessen Spitze die Grow-LED befestigt ist. Bei einer Höhe von einem Meter und einem Winkel von 80° kann man sich die beiden Enden dieser Schachtel als gleichschenkliges Dreieck vorstellen. <https://rechneronline.de/pi/gleichschenkliges-dreieck.php> Gibt man dort als Länge der Schenkel 1,31, als Länge der Basis(=Breite der Tobleroneschachtel) 1,68 an, so erhält man das gleichschenklige Dreieck mit einer Höhe von einem Meter und einem „Dachwinkel“ von 80° . Die Lampe selbst ist 0,48 m lang, das ist die Länge unserer Toblerone. Das macht dann eine Grundfläche von 0,48 (Länge der Schachtel) * 1,68 (Breite der Rolle) = 0,8064 m^2 . Wir gehen davon aus, dass die Lampe ihre gesamte Leistung auf diese Fläche strahlt. Wenn wir annehmen diese Leistung auf eine Fläche von einem Quadratmeter normieren, dann können wir das in Lux umrechnen bzw. der Lux-Wert entspricht dem Lumen-Wert. Daher $24,15 \cdot 0,8064 = 19,47$ Dementsprechend mit 56 multiplizieren um ihn in Lux umzurechnen. $19,47 \cdot 56 = 1090$ Lumen/Lux. Die Lampe hat 30 Watt d.h. bezogen auf eine weiße LED werden hier nur ca. 36 Lumen pro Watt erreicht.

Die nächste angebotene Lampe auf Seite 22 ist doppelt so lang und hat die doppelte Leistung. Damit verdoppelt sich in unserer Vorstellung der Tobleroneschachtel die Länge, da der Abstrahlwinkel von 80° gleich ist. Da wir auch die doppelte Leistung haben, müsste der avg $\mu\text{mol}/\text{m}^2\text{s}$ Wert in etwa gleich sein. Er ist aber ca. das Doppelte mit 48,30. Rechnen wir hier kurz durch. $1,68 * 0,954 = 1,60 \text{ m}^2$. $48,3 * 1,6 = 77,28$. $77,28 * 56 = 4328$ Lumen. Diese Lampe hat 60 Watt, wodurch wir hier 72 Lumen pro Watt erreichen würden. Das gibt wenig Sinn, dass diese Lampe nun doppelt so effizient sein sollte.

Vielleicht kann mir jemand die Werte erklären, einen Rechenfehler finden oder es sind einfach nur schön klingende Werte, was den Griff zu normalen weißen LEDs für die Pflanzenzucht nur noch weiter untermauert.

3.6.2 SANlight LEDs

Beim Stöbern im Hotchiliforum <https://chiliforum.hot-pain.de/threads/sanlight-m30-erfahrungen-vergleich.28061/> bin ich auf die Firma SANlight gestoßen. Dieser Firma muss ein großes Lob aussprechen. Sie geben das Spektrum an, den genauen Abstrahlwinkel, die erreichten $\mu\text{mol}/\text{s}$ sowie die Effizienz in $\mu\text{mol}/\text{J}$. Die höchste Effizienz erreicht deren Produkt (Stand März 2017) P4W mit 2,5 $\mu\text{mol}/\text{J}$ (= $\mu\text{mol}/\text{W}$) für das Gesamtsystem und 2,7 $\mu\text{mol}/\text{J}$ für die LED allein, also ohne Netzteilverluste. Stand Januar 2021 erreichen sie wohl die 2,7 $\mu\text{mol}/\text{J}$ wohl für das Gesamtsystem. Es handelt sich hierbei um Licht mit einem warmweißen Eindruck. Zum Vergleich die blauen Oslons erreichen 2,6 $\mu\text{mol}/\text{J}$, die roten sogar 3,1 $\mu\text{mol}/\text{J}$ (ohne Netzteilverluste). Vorteil dieser professionellen Lösung ist, dass man die Lampen mit fast keinerlei Bastelaufwand in Betrieb nehmen kann. Die Abstrahlcharakteristik ist rechteckig, sodass sie sich ideal für typische Anbausituationen eignen. Die Angaben sind glaubhaft, die Lampen machen einen sehr guten Eindruck. Leider haben diese Lösungen allerdings ihren Preis, denn ein 30 W LED-Modul kostet 138 € (Amazon).

Stand Dezember 2023 haben sich die Lampen nochmals weiterentwickelt. Das aktuelle Spitzenmodell ist wohl die EVO-Series 1.5. Diese schaffen ca. 2,72 $\mu\text{mol}/\text{s}$ und Watt. Auf den ersten Blick ist sie damit erheblich ineffizienter als die aktuellen kommerziellen weißen LEDs. Bei Letzteren hat man jedoch einen höheren Abstrahlwinkel und sollte einen Reflektor einsetzen, um mehr des Lichts zu nutzen. Betrachtet man den engeren Abstrahlwinkel der SANLight-Lampe reduziert sich der Unterschied in der Effizienz deutlich. Die EVO 4-100 1.5 kostet aktuell 466 € und erreicht 725 $\mu\text{mol}/\text{s}$. Man erhält hier 1,56 μmol pro Euro. Damit ist sie im Vergleich zur Philips Master LEDtube UE 1500mm G13 unwirtschaftlicher, schließlich ist diese um ca. 21 % effizienter als die SANLight EVO und auch noch günstiger in der Anschaffung. Mit SANLight bekommt man allerdings ein fertiges System, mit optionalem Dimmer und mindestens gegen Spritzwasser geschützt. Ob es dieser Aufpreis wert ist, muss jeder selbst entscheiden. Die Firma investiert auch viel um die Lampen auf das Pflanzenwachstum abzustimmen.

3.7 Die Selbstbaulösung

Wer auf eine rot-blau Beleuchtung setzen möchte und mehr Bastelarbeit nicht scheut, tief und effizient einsteigen möchte, der kann sich selbst eine Pflanzen-LED bestehend aus roten und blauen LEDs bauen. Aber bitte mit effizienten LEDs.

3.7.1 Osram Oslon SSL

Update Dezember 2023: Rot / Blau Beleuchtung ist nicht mehr Standard, siehe dazu Ende des Abschnitts 1.4 Die Wirkung der Lichtwellenlängen. Zu Referenzzwecken wurde dieser Abschnitt beibehalten, da er auch wichtige Details wie einen deutlich höheren elektrischen Wirkungsgrad von blauen LEDs enthält.

Als derzeit energieeffiziente LEDs kommen hier die Osram Oslon SSL LEDs CSSPM1.24 in Frage https://www.osram.com/appsn/ProductSelector/?refinementList%5Bhbc%5D%5B0%5D=OSLON%7CSSL&refinementList%5Bcolor_multi_keyword%5D=&page=2

Es gibt sie mit 80°, 120° und 150° Abstrahlwinkel. Beim Überfliegen der technischen Daten wurde festgestellt, dass diese, bis auf die Abstrahlwinkel, gleich sind. Die weiteren Werte sind dem Datenblatt der 120° Version entnommen. 120° oder 80° Abstrahlwinkel bedeutet, dass die Hälfte der Lichtleistung innerhalb dieses Winkels abgegeben wird. Es wird also ein beträchtlicher Teil auch in einem deutlich größeren Winkel abgestrahlt.

Rote Photonen haben weniger Energie als blaue Photonen und nachdem es für die Photosynthese nur auf die Anzahl der Photonen ankommt, ist es energiesparender mehr rote Photonen (=rotes Licht) zu verwenden als Blaues.

Obwohl die blaue LED einen um 13 Prozentpunkte oder einen um 23 % höheren Wirkungsgrad hat, ist in Bezug auf die Photonenanzahl pro Watt die rote LED um ca. 20 % überlegen.

	Preis	Spannung	λ	eV	Strom	Leistung	Strahlungsleistung [W]	Verlustleistung [W]	Wirkungsgrad	Photonen/J	Photonen/s	$\mu\text{mol}/\text{s}$	Photonen/W	$\text{€}/\mu\text{mol}$
rot	1,74	2,15	660	1,88	0,35	0,7525	0,425	0,3275	56,48	3,32252E+18	1,4121E+18	2,34	1,8765E+18	0,7421
blau	1,37	2,85	451	2,75	0,35	0,9975	0,69	0,3075	69,17	2,27039E+18	1,5666E+18	2,60	1,57049E+18	0,5266
dunkelrot	2,23	1,85	730	1,7	0,35	0,6475	0,27	0,3775	41,70	3,67491E+18	9,9222E+17	1,65	1,53239E+18	1,3534

Daten zu den Osram Oslon SSL GH CSSPM1.24. Der Preis gilt bei Abnahme von 25 Stück, inkl. 19 % Mehrwertsteuer

Update Januar 2021: Mittlerweile gibt es neuere Versionen der Oslon SSLs, so haben die blauen mit 120° Abstrahlwinkel 74 % Wirkungsgrad, die mit 150° Abstrahlwinkel sogar typischerweise 75 % Wirkungsgrad. Da es nun verschiedene Selektionen zu kaufen gibt, wurde auf eine detaillierte Berechnung verzichtet.

Bei den roten LEDs war der Wirkungsgradsprung nochmal deutlich stärker. Diese haben nun typischerweise 65 % statt 56 % Wirkungsgrad. Und nochmal deutlich effizienter wurden die dunkelrote LEDs. Diese haben nun statt 42 % Wirkungsgrad 56 % Wirkungsgrad.

Datenblätter

- blau https://dammedia.osram.info/media/resource/hires/osram-dam-15260202/GD%20CSSPM1.14_EN.pdf
- Rot: https://dammedia.osram.info/media/resource/hires/osram-dam-8841544/GH%20CSSPM1.24_EN.pdf
- Dunkelrot: https://dammedia.osram.info/media/resource/hires/osram-dam-9119318/GF%20CSSPM1.24_EN.pdf



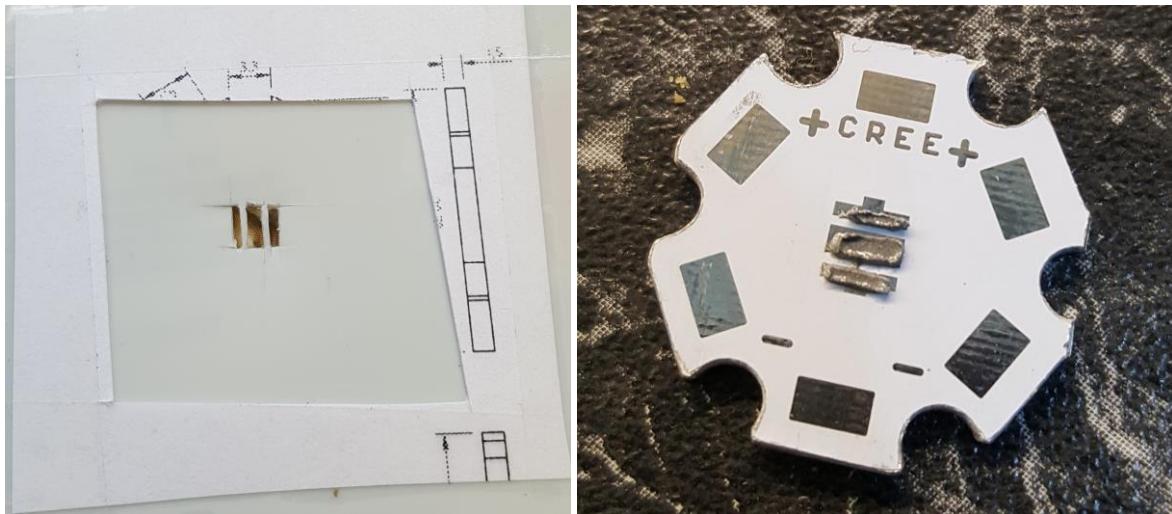
Die LEDs kommen verschweißt in einem diffusionsdichten Beutel mit Trockengel und einem Indikatorpapier, welches idealerweise dreimal blau zeigt. Die meisten SMD-Bauteile sollte man unmittelbar nach dem Öffnen auch verarbeiten, da sie sonst selbst bei normaler Raumfeuchte, geringe Wassermengen aufnehmen könnten und dieses sich beim Erhitzen ausdehnen könnte und sie dadurch beschädigt werden

können, ähnlich dem Platzen eines Maiskornes, wenn es zum Popcorn wird. Die Oslons fallen unter Level 2 der JEDEC J-STD-020 und sind damit sehr robust. Man kann Sie bis zu einem Jahr außerhalb des Schutzbeutels lagern und das sogar bei 30 °C und 60 % Luftfeuchtigkeit. https://de.wikipedia.org/wiki/Moisture_Sensitivity_Level Normalerweise wird für den Fall der Überlagerung dann eine Backanweisung gegeben. Meistens müssen die Bauteile dann für 24 Stunden bei 125 °C und weniger als 5 % Luftfeuchte gebacken werden. Selbst bei 100 % Luftfeuchtigkeit und 20 °C hat auf 125 °C erwärmte Luft deutlich unter 5 % relativer Feuchte, sodass ein Backofen zum Trocknen geeignet wäre.

Die LEDs sind mit 3 mal 3 Millimetern sehr klein. Ein Zahnstocher im Vergleich verdeutlicht die Größenverhältnisse. Abgebildet sind hier die blauen LEDs, sie erscheinen ausgeschaltet weiß. Die roten LEDs sind rötlich gefärbt. Leider wurde kein Bild von der Unterseite gemacht. Es sind 3 Kontakte auf der Unterseite. Zwei schmale an den Außenseiten und ein breiter in der Mitte. Die äußeren Kontakte sind die Anschlusskontakte für Minus- und Pluspol bzw. bei LEDs spricht man von Anode und Kathode. Damit man beide unterscheiden kann, ist am mittleren Kontakt zu einem Kontakt hin, eine Markierung angebracht. Achtung, diese Kennzeichnung ist sinnigerweise bei den roten und blauen unterschiedlich. Bei den roten Oslons ist die Markierung näher an der Anode, bei den Blauen an der Kathode. Der mittlere Kontakt ist elektrisch neutral und dient vor allem der Wärmeableitung.

Die LEDs werden im sog. Reflow-Lötverfahren gelötet, was einer spezielle Lötpaste bedarf. Diese wird oft mit SMD und BGA im Namen angeboten. Die Paste wird für gewöhnlich mittels lasergeschnittener Metallschablone auf die Platine aufgebracht und die LED dann darauf platziert. Wichtig: Auf gar keinen Fall die LED andrücken, sonst verteilt sich die Lötpaste, was zum Kurzschluss führt.

Die LEDs kann man auf sog. Star-Platinen löten. Diese ist eigentlich für die Cree XP-Serie gedacht. Der Durchmesser beträgt ca. 2 cm. Man kann sie aus China z.B. über Aliexpress sehr günstig erwerben, wenn man ein bisschen Geduld für die Lieferung hat. Unten links ist nun die Schablone zu sehen. Sie wurde mit Hilfe dieses PDFs https://lumstatic.com/jF/sM/RiPZ9hnxQ-u-Q8_Fng.pdf erstellt, welches mit einer benutzerdefinierten Größe von 35% ausgedruckt wurde, sodass die gedruckten Maße auch die tatsächlich so groß abgedruckt werden. Der Ausdruck wurde ein bisschen zurechtgeschnitten und auf eine Plastikverpackung einer Canon-Tintenpatrone mit Tesafilm geklebt. Anschließend wurde vorsichtig mit einem Teppichmesser die drei Schlitze herausgeschnitten. Andere Blisterverpackungen sollten genauso funktionieren. Diese Schablone legt man nun Deckungsgleich auf die Platine, bringt einen Tropfen Lötpaste auf und zieht diese, z.B. mit einer Scheckkarte, ab. Auf dem Bild unten rechts sieht man die Star-Platine mit aufgebrachter Lötpaste. Wichtig ist nun noch einmal zu kontrollieren, dass die Lötpaste nicht miteinander verbunden ist. Ein Zahnstocher hat sich als sehr hilfreich erwiesen ungewollte Verbindungen wieder zu trennen.



Mit einer Pinzette wird nun vorsichtig die LED plaziert. Zum Löten kann man das ganze nun auf 230 °C Ober- und Unterhitze auf mittlerer Ebene bei 2 Minuten und 15 Sekunden „gebacken“ werden. Anschließend das Blech herausholen und abkühlen lassen. Heißluft empfiehlt sich nicht, die würde nur alles Verwehen. Selbst beim Öffnen des Backofens sollte man anschließend kurz warten und das Blech von unten in den Ofen schieben, sonst verwirbelt die austretende heiße Luft das Backpapier. Viel einfacher ist jedoch das Löten über eine Kerze, siehe unten.

Nach dem Abkühlen wird die LED als erstes auf Kurzschluss getestet. Ist dieser Test negativ verlaufen, testet man ob sie leuchtet. Für die Roten nimmt man am besten eine volle herkömmliche 1,5 V Alkaline Batterie. Hat man alles richtig gemacht, leuchtet sie schwach rot. Für Blau nimmt man die Kombination aus einer 1,5V Alkaline Batterie und einem Akku. Auch mal die umgekehrte Polarität testen. Manchmal kommt es vor, dass die LED durch das flüssig werdene Lot verrutscht und nicht ordentlich auf den Kontakten sitzt.

Leuchtet die LED nicht oder man hat einen Kurzschluss, muss man sie irgendwie wieder von der Platine bekommen. Dazu nimmt man die Platine in eine Zange und hält sie knapp über eine Kerzenflamme, sodass es nicht rußt und die Platine sauber bleibt. Gleichzeitig drückt man schwach mit einem Zahnstocher gegen die LED, bis sie sich löst. Man lässt die LED kurz abkühlen. Um Lötsinn von den Kontakten der LED zu bekommen, geht man vorsichtig mit einer dünnen Lötkolbenspitze hin. Es ist unglaublich wie zäh diese LEDs sind, so hing eine LED kurzzeitig am Lötkolben fest und funktioniert dennoch tadellos.

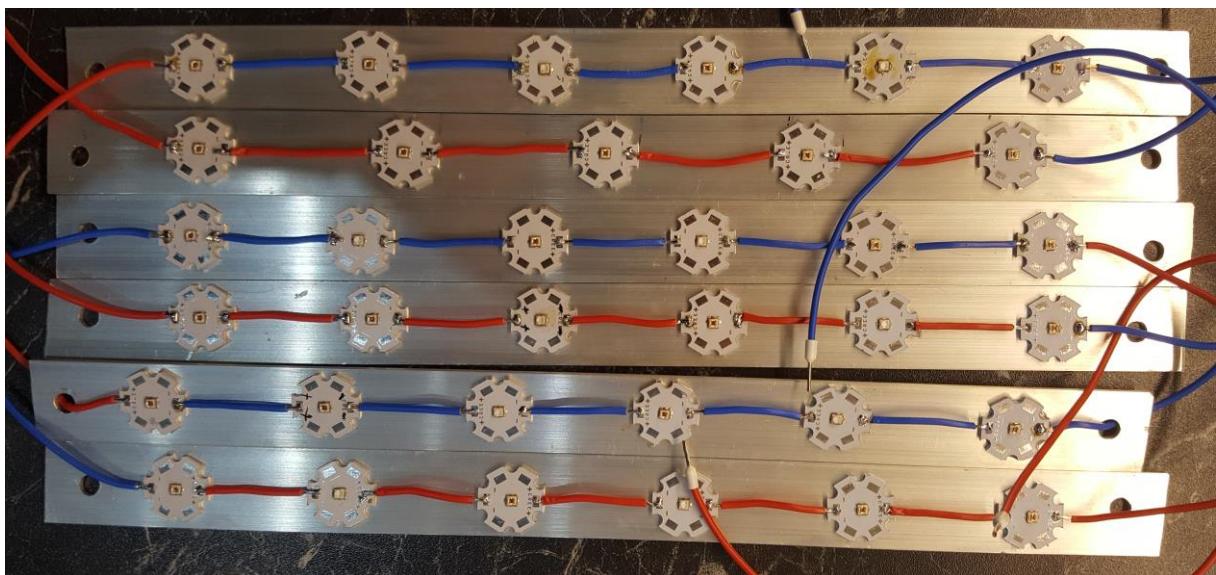
Auch zum Löten kann man die Platine über die Kerze halten. Wichtig ist, dass man die Platine sehr gerade hält. Sobald die Lötpaste flüssig wird (geschieht plötzlich), nimmt man die Platine von der Flamme und kurz daraufhin erstarrt sie. Zum schnelleren Abkühlen kann man sie auf einen leicht feuchten Lappen legen. Die letzte LED wurde auf diese Art- und Weise gelötet und als wesentlich einfacher empfunden. Auch eine schiefen LED konnte durch diese Methode korrigiert werden. Da die Platine komplett aus Metall ist und keine weiteren Bauteile vorhanden sind, die beschädigt werden könnten, ist diese Kerzenmethode deutlich einfacher.

Diese ganze Lötterei ist ohne spezielles SMD-Werkzeug sehr filigran. Insbesondere das Platzieren mittels Pinzette erwies sich als sehr zeitaufwändig, hinzu kam das Korrigieren der fehlerhaftgelöteten LEDs. Alles in allem wurden allein für das Löten von 35 LEDs ca. 5 Stunden benötigt. Hinzukommt der

Aufwand für das Erstellen der Schablone. Durch den Erfahrungszuwachs wäre es nun vielleicht in der Hälfte der Zeit zu schaffen.

Die Starplatten wurden zusammen mit den LEDs mittels Arctiv Silver Wärmeleitkleber auf ein Aluminiumprofil geklebt. Dieses gibt es z.B. bei Hornbach in 2 Metern Länge. Das Profil in seiner gesamten Länge biegt sich sehr schnell durch, was beim Transport und Abstellen zu beachten ist. Es wurden Stücke mit ca. 33 cm Länge geschnitten und die Schnittkanten per Feile entgratet. An jedem Ende wurden Löcher gebohrt, sodass die Streifen auch aufgehängt werden können. Je größer der Bohrer, desto schneller wird das Loch aufgrund der höheren Winkelgeschwindigkeit gebohrt, langsam starten, damit der Bohrer in Position bleibt. Die gekürzten Streifen halten die LEDs ohne durchzuhängen. Sollte ein Stück durch den Transport etwas gebogen sein, unbedingt vor dem Anbringen der Leds gerade biegen, da bei nachträglichen Biegeversuchen sich die geklebte Platine lösen könnte.

Vier rote wurden mit zwei blauen LEDs kombiniert (Verhältnis 2:1) und verlötet. Für die Zwischenverbindung wurde zuerst eine Seite angelötet, anschließend auf die richtige Länge zur nächsten LED gekürzt, abisoliert und verzinnt. Die Kabel ließen sich sehr angenehm verlöten. Kleben, Löten und erste Tests benötigten insgesamt ein paar Stunden.



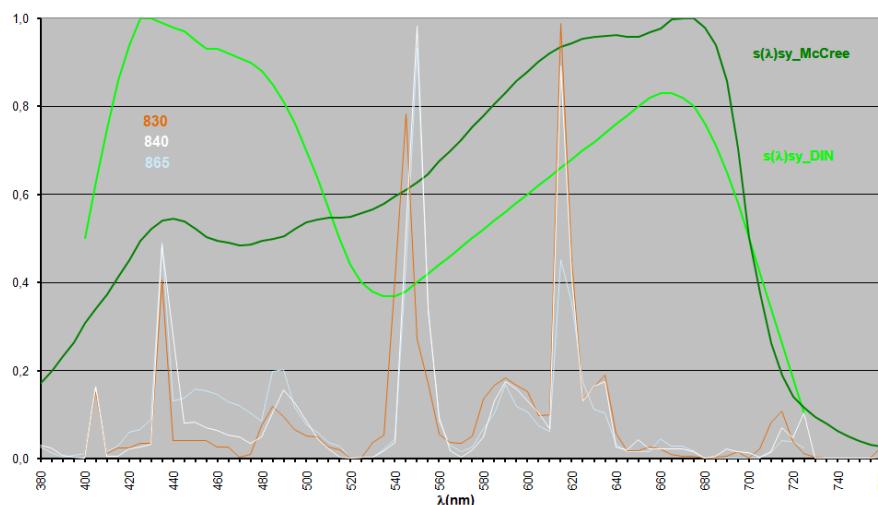
Ich wurde durch viel Erfahrung belohnt. Wenn man seine Rückhand in ca. 10 cm über sie hält, spürt man bei 500 mA richtig die Wärme durch die Lichtstrahlung der LEDs. NIEMALS direkt in die LEDs blicken. Bei 350 mA beträgt die Erwärmung des Alustreifens direkt über einer LED-Platine ca. 10 K, bei 520 mA ca. 15K. Gemessen wurde mittels Infrarotthermometer, wobei Paketklebeband auf der Oberseite aufgebracht wurde, damit korrekt gemessen werden kann.

Dreht man diese rot-blau Beleuchtung in einem dunklen Raum auf, wartet ca. eine Minute und schaltet dann wieder weißes Licht ein, wirkt es grün. Genauso wirken weiße Kontrollleuchten in der rot-blau Umgebung grün. Diese Effekt entsteht, weil lediglich die roten und blauen Rezeptoren in den Augen genutzt waren und die Grünen nun besonders empfindlich sind.

Sehr eindrucksvoll ist das Zypergras unter der rot-blau Beleuchtung zu beobachten. Es wirkt bei niedrigeren Intensitäten einfach nur schwarz. Damit man diesen Effekt auf Foto einigermaßen festgehalten werden kann, muss das Bild etwas unterbelichtet werden.



Das Zyperngras wirkt auch unter einer Drei-Banden-Leuchtstoffröhre 840 bereits sehr kräftig sattgrün, viel stärker als unter natürlichem Tageslicht. Schauen wir uns folgende Grafik an, welche die Spektren von Leuchtstoffröhren aufzeigt.



Quelle:
http://www.hereinspaziert.de/Sehlicht_2009/LL_3B_b.gif

Durch die sattgrüne Farbe beim *Cyperus alternifolius* unter einer 840er Leuchtstoffröhre hat die Pflanze in seiner Absportionskurve vermutlich im Bereich von 400 bis ca. 500 nm den Verlauf der DIN-Kurve und dann den der McCree Kurve, also insgesamt eine sehr starke Absorption. Diese trägt wahrscheinlich zu dessen sehr schnellen Wachstum bei.

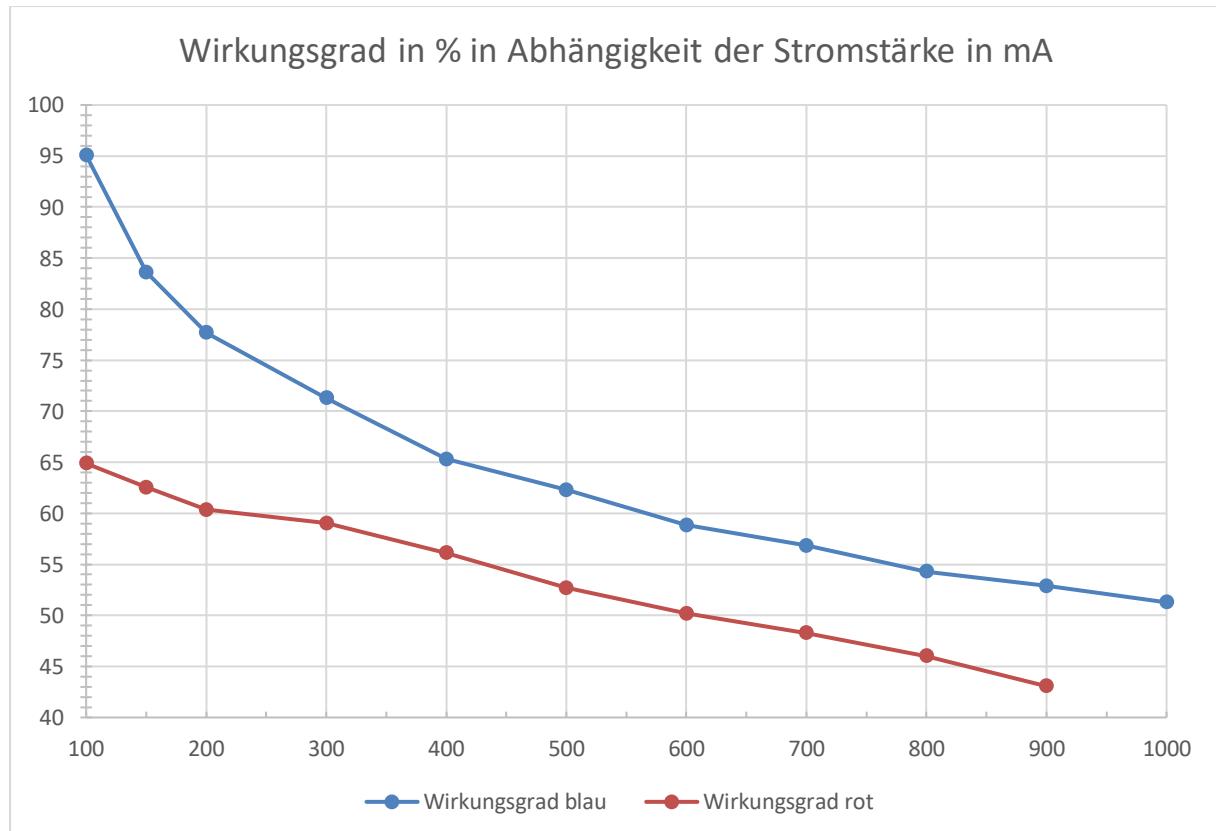
Im Hintergrund ist eine Grünlilie zu sehen. Die Blätter wirken deutlich grauer, d.h. es wird mehr Licht ungenutzt reflektiert. Auch bei den Paprikapflanzen rechts fällt auf, dass die jungen Blätter noch relativ viel Licht reflektieren. Die Kresse ist minimal heller als das Zyperngras.

3.7.1.1 Wirkungsgradbetrachtungen

Bei entsprechend dimensionierten Kühlkörpern, kann man die Oslons auch mit mehr als 350 mA betreiben. Hierbei sinkt jedoch der Wirkungsgrad enorm. Diesem Effekt sind wir bereits im Abschnitt 3.4 Gepulstes Licht begegnet. Leider führt Osram in seinem Datenblatt keine Kurve auf, die den Wirkungsgrad in Abhängigkeit von der Stromstärke aufzeigt. Daher wurde aus den beiden Diagrammen auf Seite 8 die benötigten Werte extrahiert. Diagramm 1 zeigt den Stromfluss in Abhängigkeit von der anliegenden Spannung. Diagramm 2 zeigt die relative Strahlung im Vergleich zur Normstrahlung bei 350 mA. Aus Diagramm 2 wurde nun die relative Strahlungsleistung bei 100, 150, 200, 300, ... 1000 mA abgelesen, aus Diagramm 1 bei den genannten Stromstärken die dazu benötigte Spannung. Mit Spannung und Strom berechnet man die elektrische Leistungsaufnahme. Aus relativer Strahlungsleistung und Normstrahlungsleistung bei 350 mA erhält man die tatsächliche Strahlungsleistung. Setzt man diese in Bezug, ergibt sich der Wirkungsgrad.

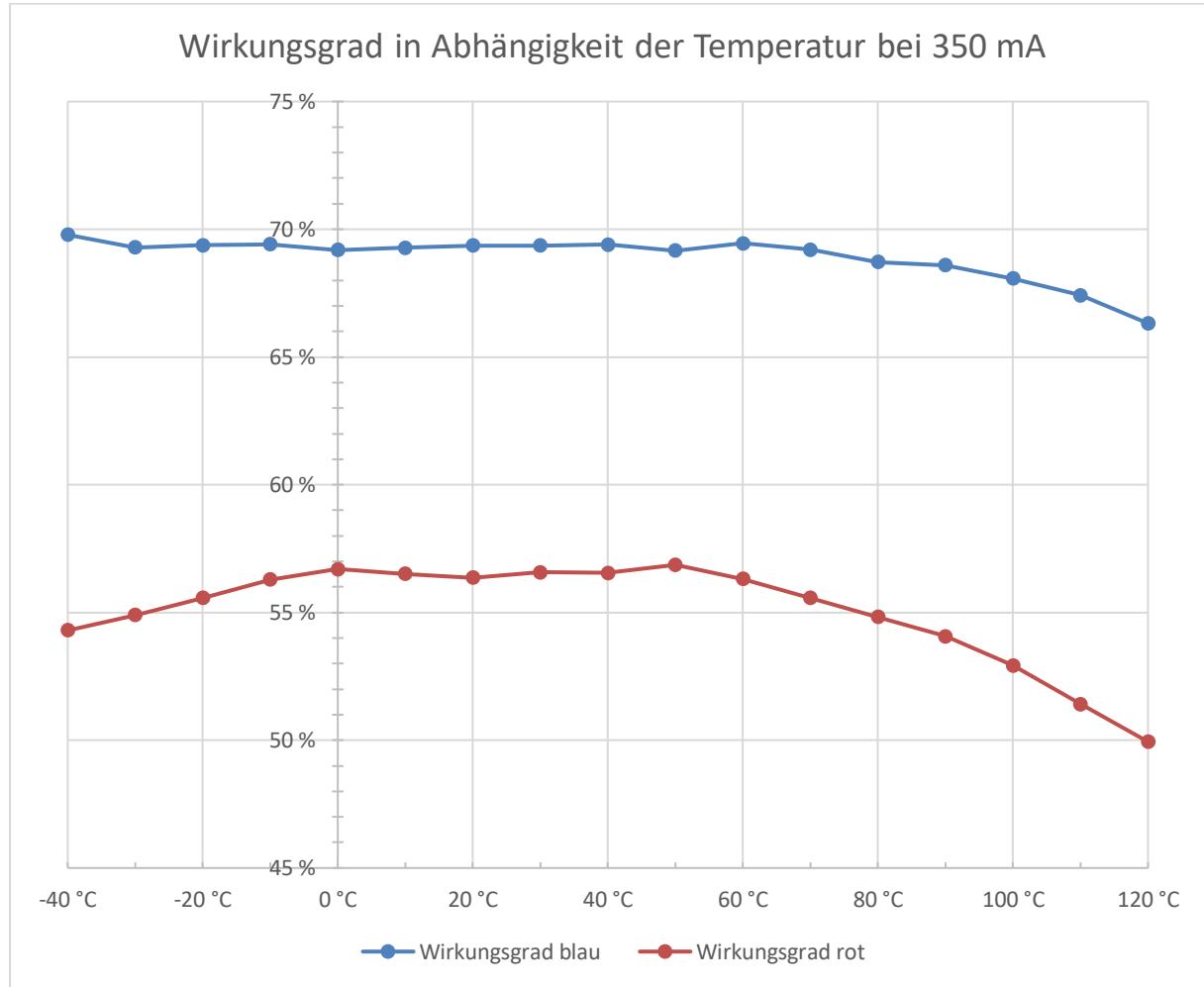
Datenblatt Olson blau: [http://www.osram-os.com/Graphics/XPic8/00253459_0.pdf/GD%20CSSPM1.24%20-%20OSLON%20SSL%20120%20\(EnglishDeutsch\).pdf](http://www.osram-os.com/Graphics/XPic8/00253459_0.pdf/GD%20CSSPM1.24%20-%20OSLON%20SSL%20120%20(EnglishDeutsch).pdf)

Datenblatt Oslon rot: [http://www.osram-os.com/Graphics/XPic8/00253477_0.pdf/GH%20CSSPM1.24%20-%20OSLON%20SSL%20120%20\(EnglishDeutsch\).pdf](http://www.osram-os.com/Graphics/XPic8/00253477_0.pdf/GH%20CSSPM1.24%20-%20OSLON%20SSL%20120%20(EnglishDeutsch).pdf)



Sehr auffällig ist der äußerst steile Verlauf der blauen LEDs bei geringen Stromstärken. Es wurde mehrmals nachgemessen, größere Fehler sind nicht erkennbar. Die Linie ist manchmal etwas zackig, das liegt an der dicken Linie im Originaldiagramm, sodass ein sehr exakter Wert schlecht abzulesen ist. Aufgrund von Exemplarstreuungen lassen sich sehr exakte Werte sowieso nur schlecht angeben.

Kommen wir zum Wirkungsgrad in Abhängigkeit der Temperatur. Bisher bin ich davon ausgegangen, dass der Wirkungsgrad umso höher ist, je besser man die LED kühlt. Schauen wir uns dazu die folgende Grafik an:



Bis ca. 70 °C hat die blaue LED (und damit Weiße) einen annähernd konstanten Wirkungsgrad. Erst ab ca. 90 °C fällt er steil ab. Die roten Oslons erreichen nur bis ca. 60 °C ihren hohen Wirkungsgrad. Danach fällt die Kurve sehr steil ab. Interessanterweise verliert sie auch bei Temperaturen unter dem Gefrierpunkt an Wirkungsgrad.

Die angegebene Temperatur betrifft die Sperrsicht. Um von der Kühlkörpertemperatur auf die Sperrsichttemperatur schließen zu können, brauchen wir den thermischen Widerstand. Dieser ist glücklicherweise ebenfalls in den Datenblättern angegeben.

In der folgenden Tabelle wurden die Werte zusammengefasst, sowie die Temperaturerhöhung gegenüber dem Kühlkörper beispielhaft für 350 mA und 700 mA durchgerechnet. Der elektrische

Wärmewiderstand ist weniger praxistauglich und nur interessehalber mit angegeben, da bei ihm die durch die Lichtstrahlung abgegebene Energie vernachlässigt wird, sodass er deutlich geringer ausfällt. Da bei 700 mA der Wirkungsgrad sinkt, somit weniger Energie in Form von Licht abgestrahlt wird, ergeben Rechnungen auf Basis des elektrischen Wärmewiderstands deutlich zu niedrigere Temperaturen. Interessant ist, dass trotz gleicher mechanischer Bauweise die roten LEDs einen geringeren Wärmewiderstand aufweisen.

	blau	ΔT 350 mA	ΔT 700 mA	rot	ΔT 350mA	ΔT 700mA
Wärmewiderstand Sperrsicht typ K/W	8,2	2,5	7,3	5,3	1,7	4,6
Wärmewiderstand Sperrsicht max K/W	9,8	3,0	8,8	8,3	2,7	7,2
elektrischer Wärmewiderstand typ K/W	2,6	2,6	5,4	2,4	1,8	3,0
elektrischer Wärmewiderstand max K/W	3,1	3,1	6,4	3,7	2,8	4,7

Wie wir sehen beträgt im ungünstigsten Fall bei den blauen LEDs und 700 mA die Erhöhung der Sperrsichttemperatur 9K gegenüber dem Kühlkörper. Gehen wir davon aus, dass die Star-Platine auf den Kühlkörper nochmals eine Temperaturerhöhung von 2K verursacht. Sehr wahrscheinlich ist das viel zu hoch gegriffen, da die Starplatine mit einer großen Fläche an den Kühlkörper angekoppelt ist und die übertragene Leistung relativ gering ist. Insgesamt machen beide Werte addiert 11K. Gehen wir davon aus der Kühlkörper erwärmt sich um 20 K gegenüber der Umgebung und die Umgebungstemperatur betrage 25 °C, da die LEDs oben angebracht sind und sich dort warme Luft gerne mal staut. Insgesamt macht das eine Sperrsichttemperatur von $25 + 20 + 11 = 56$ °C. Damit sind wir sowohl bei den blauen, als auch noch bei den roten LEDs in einem Bereich wo keine Wirkungsgradeinbußen aufgrund der Temperatur zu erwarten sind. Zur Erinnerung, dieser Fall betrachtete den unwirtschaftlichen Betrieb mit 700 mA. Bei 350 mA sieht die Sache noch viel besser aus. 20 K Kühlkörpererwärmung ist ebenfalls sehr konservativ gerechnet, da bei den eigenen gefertigten Oslons bei 350 mA nur 10 K Temperaturerhöhung auftraten.

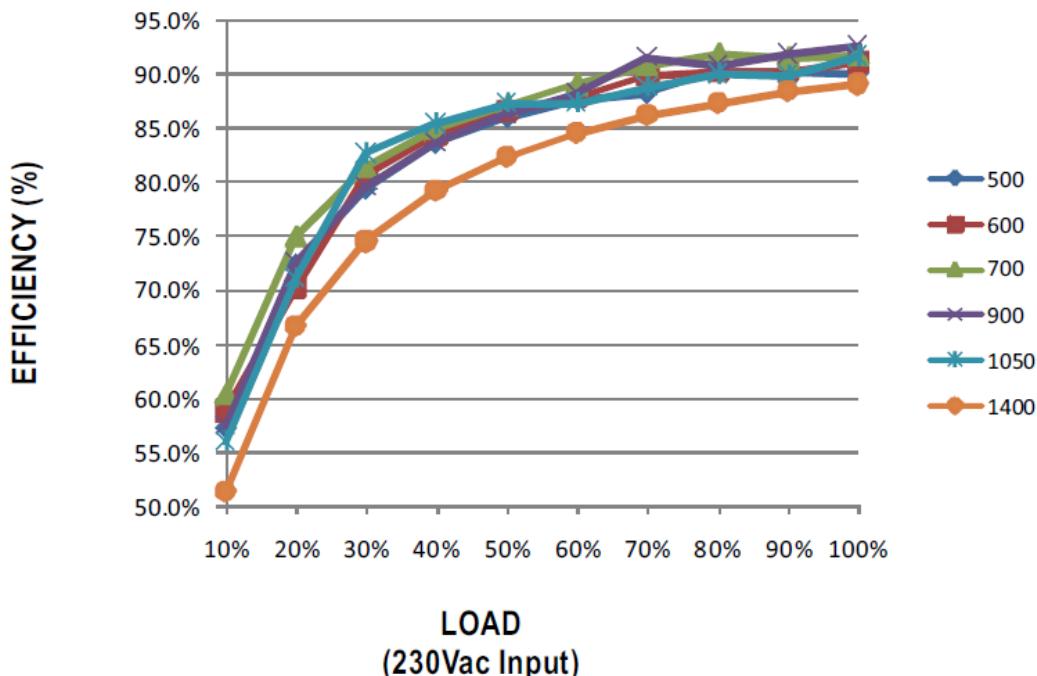
3.7.2 Konstantstromquelle Meanwell LCM60

Ohne eine Konstantstromquelle läuft bei LEDs nichts. Dieser Tatsache war ich anfangs sehr skeptisch gegenüber, besonders, weil man so oft LEDs sieht, die mit einem Vorwiderstand betrieben werden. Im Abschnitt **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden. „Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.“** wurde ein Umbau der Osram Substitube LED auf 12 Volt gezeigt. Hierzu wurde ein Vorwiderstand von 1,25 Ohm verwendet. Es hat sich nun gezeigt, dass bei Anschluss zweier weiterer dieser umgebauten LED-Paneele, das bereits zuvor angeschlossene Panel wahrnehmbar dunkler wird. Die Spannung fällt gerade einmal um 0,1 Volt ab, das sind 0,025 Volt pro LED, dennoch reicht das aus um die Stromaufnahme spürbar zu reduzieren. LEDs haben eine sehr steile Stromkurve in Abhängigkeit der Spannung. Aus diesem Grund, so muss man knallhart sagen, ist ein Betrieb von LEDs ohne Konstantstromquelle Pfusch.

Konstantstromquellen gibt es viele. Um flexibel zu sein, wurde sich für das LCM60 von Meanwell entschieden. Der Ausgangsstrom ist zwischen 500mA und 1400mA in 6 Stufen konfigurierbar, wobei es bis zu 60 Watt leistet. Dies jedoch erst ab 700 mA, bei 500 mA beträgt aufgrund der maximalen Ausgangsspannung von 90 V die Maximalleistung 45 Watt. Die Leerlaufspannung (ohne Last) kann sogar bis zu 95 Volt (oder 102, je nach Version des Datenblatts) betragen: Deswegen hier bitte äußerste

Vorsicht walten lassen und die netzseitige Stromversorgung erst herstellen, wenn der Ausgang sicher mit den LEDs verschaltet ist.

Das LCM60 hat einen Wirkungsgrad von bis zu 92 %. Das kann sich sehen lassen.

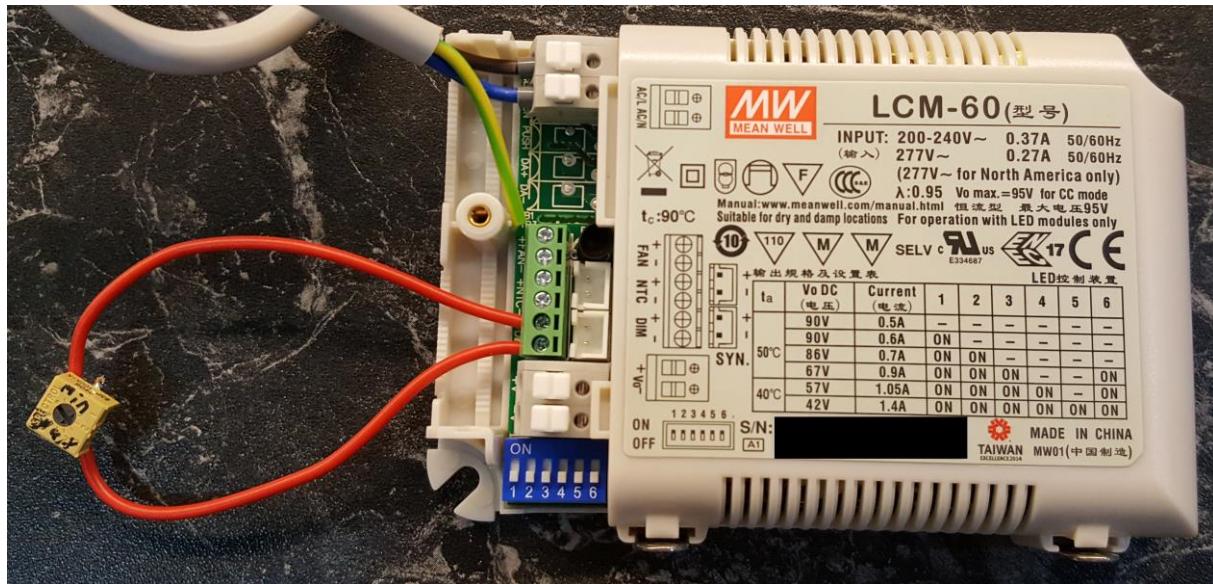


Quelle: LCM-60 Datenblatt <http://www.meanwell.com/productPdf.aspx?i=259> S. 7

Wie man sieht, hängt der Wirkungsgrad sowohl von der Auslastung, als auch von der Stromstärke ab. Es gibt das LCM-25 mit 25 Watt Ausgangsleistung. Dieses erreicht allerdings maximal 86 % Wirkungsgrad. Dieser Wert wird beim LCM-60 bereits bei ca. 50 % Auslastung erreicht. Bei 12,5 Watt Last hat das LCM-25 ca. 80 % Wirkungsgrad, das LCM-60 hat hier ca. 76 % Wirkungsgrad. Da das LCM-60 nur wenige Euro mehr kostet das als LCM-25, ist ersteres preislich am attraktivsten. Das LCM-40 mit maximal 40 Watt Ausgangsleistung und ebenfalls maximal 92 % Wirkungsgrad kann zwar im Gegensatz zum LCM-60 350 mA, erreicht seine 40 Watt Ausgangsleistung allerdings erst ab 500 mA.

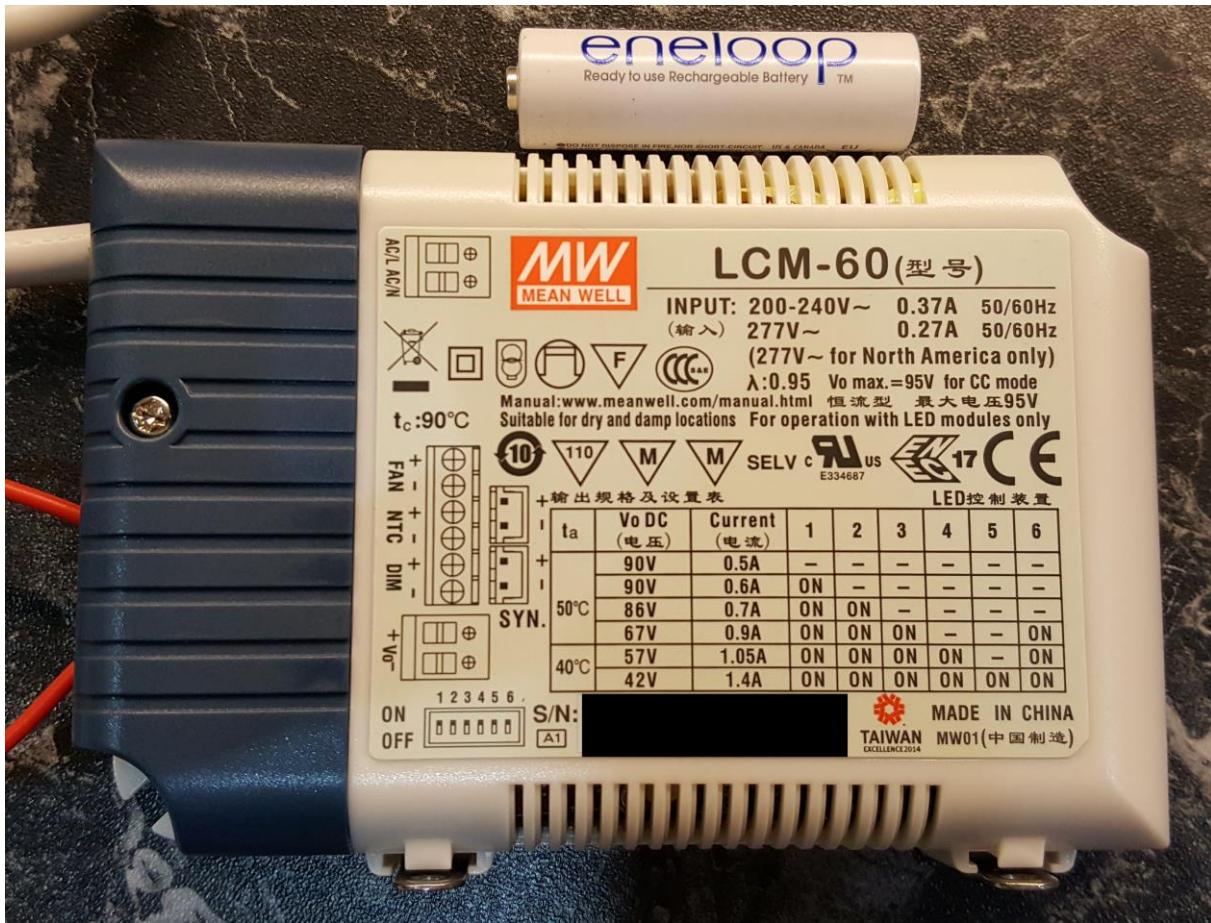
Mit dem LCM-60 ist man am flexibelsten, da man z.B. zwei LED Serienschaltungen parallel schalten kann um bei einer eingestellten Ausgangstromstärke von 700 mA jeden Kreis mit 350 mA zu betreiben. Hier bitte mehrere LEDs (mindestens 5) in Reihe schalten, da es sonst aufgrund der Serienschwankungen zu erheblich abweichenden Stromstärken in den einzelnen Kreisen kommen kann. Am besten immer nachmessen um ein genaues Bild des tatsächlichen Stromverlaufes zu bekommen. Um zu testen wie sich bei zwei parallelen Stromkreisen der Strom aufteilt, wurden von insgesamt 20 LEDs 10 in Reihe und diese beiden parallel geschaltet. In Stromkreis 1 schwankte das Multimeter zwischen 0,26/0,27 A und in Stromkreis 2 zwischen 0,27/0,28 A. Die Gesamtstromstärke betrug übrigens immer 0,52A bei eingestellten 0,5 A und keinerlei Dimmung. Das ist im Rahmen, da Meanwell eine bis zu 6 % höhere Stromstärke angibt.

Das LCM-60 lässt sich auf 3 Arten dimmen, per PWM, per Spannung von 0-10 Volt und mit einem Potentiometer zwischen 0 und 100 Kiloohm. Dadurch kann man auch sehr einfach auch nur einen LED-Strang mit 350 mA betreiben. Die LCM-60DA Version lässt sich sogar per Taster dimmen. Schauen wir uns nun das LCM-60 mit seinen Anschlüssen an.



Ganz oben ist der Stromanschluss. Wie man sieht sind darunter drei Felder leer. Diese sind der LCM-60DA (Dali-Interface) vorbehalten. Diese Version ist ca. 3-5 € teurer als die normale LCM-60 Version. Ich vermute, dass man durch Anlöten von Kontakten ein normales LCM-60 zur Dali-Version machen kann, da der Aufpreis wahrscheinlich hauptsächlich durch die Dali-Lizenzzgebühren begründet ist.

Ansonsten hat dieses Netzteil noch eine Reihe weiterer nützlicher Funktionen, z.B. einen 12 Volt Anschluss für einen Lüfter (max. 50 mA). An der NTC Buchse kann man einen Widerstand anschließen. Dieser wird auf den Kühlkörper der LEDs angebracht. Je nach Temperatur und NTC-Widerstandstyp wird nun der Ausgangstrom bei steigender Temperatur reduziert. Details siehe im verlinkten Datenblatt. Es gibt des Weiteren Synchronisationsausgänge mit denen man mehrere LCM-60 synchronisieren kann. So wie ich das verstehe betrifft das nur die relative Ausgangsleistung, d.h. der Ausgangstrom wird weiterhin über den blauen DIP-Schalter konfiguriert. Gleichzeitig sollte man auch ein LCM-60DA mit einem normalen LCM-60 synchronisieren können.



Hier das LCM-60 nochmal mit einem AA-Akku um einen Eindruck von der Größe zu bekommen.

3.7.3 LED-Empfehlung

3.7.3.1 Oslon SSL Pflanzenleds oder LED-Röhren

Dieser Abschnitt entstand bereits zu Beginn dieses Dokuments und insbesondere die Preise sind nicht mehr aktuell, aber insgesamt ist das Verhältnis ungefähr gleichgeblieben.

Schauen wir uns folgende Tabelle an, die die technischen Eigenschaften der Oslons mit der Substitube vergleicht.

	Preis	Lumen / Watt	Lumen / μmol	V	nm	eV	Strom	Leistung	Strahlungsleistung [W]	Wirkungsgrad %	Photonen/J	Photonen/s	μmol/s	μmol/W
rot 350 mA	1,83	k.A.	k.A.	2,15	660	1,88	0,35	0,7525	0,425	56,48	3.322.517.225.408.200.000	1,41207E+18	2,3448519111	3,116082274
blau 350 mA	1,3	k.A.	k.A.	2,85	451	2,75	0,35	0,9975	0,69	69,17	2.270.386.770.695.600.000	1,56657E+18	2,601406297	2,607926112
rot 700 mA	1,83	k.A.	k.A.	2,4	660	1,88	0,7	1,68	0,8205	48,84	3.322.517.225.408.200.000	2,72613E+18	4,526943513	2,694609234
blau 700 mA	1,3	k.A.	k.A.	2,96	451	2,75	0,7	2,072	1,173	56,61	2.270.386.770.695.600.000	2,66316E+18	4,422390704	2,134358448
LEDs aus Substitube	21,5	167	65	weiß				22,6				58,06461538	2,569230769	

Der Preis für die Oslons ist jeweils bei Abnahme von 25 Stück. Die Substitube ist mit 22,6 Watt angegeben, da wir den Netzteilverlust von 10 % herausrechnen müssen um sie mit den Oslons vergleichen zu können. Die 167 Lumen pro Watt sind mit Verlusten durch den Diffusor. Entfernt man diesen, verbessert sich die Leistung der Substitube weiter.

Unten sehen wir nun einen Vergleich zwischen weißem Licht durch Osram Substitube LED-Röhren, sowie den Osram Oslons. Einmal haben wir einen Einsatzhorizont von 2 Jahren, beim anderen von 10 Jahren. Die Beleuchtungsdauer beträgt einheitlich 20 Stunden am Tag. Wie wir sehen, ist bei einer

Einsatzdauer (wer weiß schon, ob er sein Hobby dann immer noch ausführt?) von 2 Jahren die Substitube im Vorteil. Nutzt man tagsüber das Tageslicht und belichtet nur nachts, wird die Substitube weiter begünstigt. Da es nur ein Vergleich zwischen Oslons und Substitube ist, wurde der Netzeilverlust vernachlässigt. Für die Oslons wurde außerdem vernachlässigt, dass man noch Platinen, und Kühlkörper (neben der Lötpaste) benötigt. Der Effizienzgrad ist ein angenommener Faktor mit dem die Pflanzen das Licht verarbeiten können. Da Pflanzen den grünen Anteil reflektieren, ist er bei weißen LEDs geringer als bei der rot-blau Beleuchtung, aber auch diese wird nicht zu 100% verarbeitet, siehe Abschnitt 1.4 „Die Wirkung der Lichtwellenlängen“.

Zieht man die Pflanzen in einer Reflektorbox wie im Abschnitt 3.8.8 „Exkurs zu Reflexionsmaterialien“ vorgestellt, wird ein Großteil des grünen Lichts wieder reflektiert und ein Teil davon dann von den Pflanzen aufgenommen. Angenommen die Pflanze absorbiert 80 % des grünen Lichtes, d.h. 20 % werden von der Pflanze reflektiert. Von diesen 20 % werden wiederum 90 % an den Wänden reflektiert, d.h. 18 % erreichen wieder die Pflanze. Davon werden wieder 80 % absorbiert, d.h. 14,4 %, d.h. insgesamt wurden nun 94,4 % des Lichtes genutzt. Das ist nur eine Beispielrechnung zur Verdeutlichung des Prinzips. Die genauen Verhältnisse sehen ein wenig anders aus.

Beleuchtung/Tag	20			Beleuchtung/Tag	20		
Jahre	2			Jahre	10		
Gewünschte $\mu\text{mol/s}$	400			Gewünschte $\mu\text{mol/s}$	400		
entspricht Lumen	22400			entspricht Lumen	22400		
Preis/kwh	0,25			Preis/kwh	0,25		
Preis Konstantstromquelle €/W	0,5			Preis Konstantstromquelle €/W	0,5		
	rot+blau 350 mA	rot+blau 700 mA	weiß		rot+blau 350 mA	rot+blau 700 mA	weiß
Anteil blau	0,5	0,5	-	Anteil blau	0,5	0,5	-
Anzahl Substitube Röhren	-	-	6,88888	Anzahl Substitube Röhren	-	-	6,88888
Anz. LED rot	85,293233	44,1799		Anz. LED rot	85,293233	44,1799	
Anz. LED blau	76,881493	45,2244		Anz. LED blau	76,881493	45,2244	
Anschaffungskosten	326,46878	223,605	148,111	Anschaffungskosten	326,46878	223,605	148,111
Energieverbrauch	140,87245	167,927	155,689	Energieverbrauch	140,87245	167,927	155,689
Effizienzgrad	0,95	0,95	0,85	Effizienzgrad	0,95	0,95	0,85
korrig. Energieverbrauch	148,28679	176,766	183,163	korrig. Energieverbrauch	148,28679	176,766	183,163
Gesamtkosten	867,71555	868,799	816,656	Gesamtkosten	3032,7026	3449,58	3490,84

Die Substitube gibt es in verschiedenen Längen. Bezüglich des Preisleistungsverhältnis ist man mit der 1,5 Meter Version am besten dran. Hier erhält man 3600 Lumen für 21,50 €. Somit erhält man für 1 € 167,4 Lumen. Bei der 1,2 Meter Version erhält man nur noch 2400 Lumen und zahlt dafür 16 €. Man erhält hier nur 150 Lumen für 1 €. Das sind ca. 10 % Preisunterschied. Es gibt noch kleinere Substitubes, hier ist das Preisleistungsverhältnis nochmals schlechter. Zudem gibt es sie einer dünnen, T5, Variante, hier kostet sie ca. 40 € bei 5600 Lumen, macht 140 Lumen für 1 €.

Fazit: Insbesondere, wenn man den Aufwand berücksichtigt, den man hat um die Oslons zu löten, zu verkleben usw. empfehle ich klar die Substitube zur Pflanzenbeleuchtung. Sie ist zurzeit eine der preisgünstigsten Quellen für hocheffiziente LEDs auf deren Leistungsangaben man sich auch verlassen kann. Bedenkt man, dass Pflanzen teilweise unter weißem Licht deutlich besser wachsen als nur unter einer rot-blauen Beleuchtung, wird die rot-blau Beleuchtung nochmals uninteressanter. Selbst Kopfsalat, der 50 % des grünen Lichtes reflektiert, wuchs unter weißem Licht besser als nur unter rot-blau Beleuchtung, siehe Abschnitt 1.4 „Die Wirkung der Lichtwellenlängen“.

Optimal ist, wenn die Anbaufläche mindestens 1,50 Meter lang ist, denn dann kann man die Substitube unverändert einsetzen. Wenn man der Lüsterklemmenvariante wie im Substitube-PDF gezeigt, misstraut, kauft man sich G13 Fassungen. Diese kosten ca. 1 € pro Stück. Es reicht aus die Seite mit dem Netzteil per Strom zu versorgen. Auf keinen Fall die andere Seite, sonst gibt es einen Kurzschluss. Details siehe dazu das PDF, hier nochmals der Link <http://www.ledstyles.de/index.php/Thread/25763-Die-Osram-Substitube-LED-zerlegt-und-untersucht-Link-zu-PDF/>

Die Osram Substitube ist mit einem Abstrahlwinkel von 180 ° angegeben. Bei sehr großem Abstand zu den Pflanzen kann sich der Einsatz eines Reflektors wie des Dennerle Trocal lohnen, insbesondere in Kombination mit dem Orca Grow Film, siehe 3.8.8 Exkurs zu Reflexionsmaterialien. Dieser verringert den Abstrahlwinkel auf ca. 120°. Mit ca. 15 € ist er preislich attraktiv und aufgrund der Doppelellipsoidform wird auch das letzte bisschen Restlicht des Diffusors an die Pflanzen gebracht.

Wenn die Fensterbank lange genug ist, kann man diese auch ideal dazu benutzen Zusatzlicht auf die Pflanzen zu bringen. Da sie schmal ist, nimmt sie im Tagesbetrieb wenig Licht weg und man kann sie ideal abhängen indem man die Schnur z.B. im Fenster einklemmt oder mittels Tesa-Powerstripes oder anderem doppelseitigem Montageklebeband restlos entfernbare Haken an den Rahmen anbringt. Die LED wird auf der nicht stromzuführenden Seite an den beiden Kontakten aufgehängt, damit sie sich nicht nach unten drehen kann. Dies macht sie ansonsten gerne, da der Schwerpunkt dann tiefer liegt und die LED gleichzeitig nach oben strahlen würde.

Ist die Anbaufläche kleiner, kann man den Diffusor entfernen und die LED in 3 Teile teilen und mit der mitgelieferten Stromquelle betreiben. Bitte immer nur Einschalten, wenn man nicht mit den Leitungen in Berührung kommen kann, da hier über 120 Volt anliegen. Genauso wichtig ist, dass alle 3 Stränge tatsächlich parallelgeschaltet sind, ansonsten droht Überhitzung und damit Zerstörung der LEDs, unter Umständen sogar Feuer. Die neueren LED-Röhren bestehen immer öfters aus Glas. Dort ist ein flexibler Platinenstreifen aufs Glas aufgeklebt. Dieser lässt sich nur sehr schwer oder kaum zerstörungsfrei vom Glas trennen und auch nur unter kontinuierlichem Brechen des Glases. Das ist eine nicht unerhebliche Verletzungsgefahr und daher dringen davon abgeraten.

Man kann auch probieren das Licht von der Seite zu geben. Bei Cyperus Papyrus funktioniert das hervorragend <http://www.pflanzenspass.de/cyperus-papyrus-zimmergewächshaus-auswertung/>

3.7.3.2 Leistungsfähige kompakte LED-Lampen mit E27 Gewinde als einfache Alternative

Stand Dezember 2023 sind die E27 LEDs mit einem Wirkungsgrad von 210 Lumen pro Watt wirtschaftlich verfügbar. Die Osram Ledvance LED Ultra-Efficient Classic A100 7.2W erreicht 1521 Lumen mit 7,2 Watt bei 3000K Farbtemperatur, was 211 Lumen pro Watt entspricht. Aktuell ist sie für ca. 10 € pro Stück erhältlich. Sie erreicht ca. 25 µmol/s. Das sind also 3,47 µmol/s und Watt bzw. man erhält 0,4 µmol/s pro €. Es gibt sie in matter Optik und als klare Filamentvariante. Erstere ist aufgrund des diffuseren Lichts klar vorzuziehen. In Abschnitt 3.8.8.3 Mylar-Folie wurde ein Versuch beschrieben bei dem mit Orca Growfilm mindestens 85 % des Lichts genutzt werden konnten, was trotz des breiten Abstrahlwinkels einer effektiven Effizienz von herausragenden 2,95 µmol/(s * W) entspricht.

Es gibt auch deutlich leistungsfähigere LEDs mit E27 Gewinde, z.B. die Philips TrueForce CorePro LED HPL E27 26-125W/830 FR mit 4000 Lumen bei 26 Watt, was 153,8 Lumen pro Watt entspricht. Oder

die Osram Ledvance Retrofit Classic E27 15W/827, welche noch wärmeres 2700K Licht mit 2500 Lumen bei 15 Watt und damit 166,7 Lumen pro Watt liefert.

Stand Januar 2021: Mittlerweile gibt es sogar sehr effiziente LED Lampen für E27 Fassungen. So gibt es z.B. die Philips Classic LED Birne E27 13-120W/827 für ca. 7 €. Geboten werden 2000 Lumen bei 13 Watt Leistungsaufnahme, macht 285 Lumen pro Euro oder 153 Lumen / Watt bei einer Farbtemperatur von 2700 Kelvin. Das ist ideal fürs Pflanzenwachstum bei effizienter langer Belichtungszeit.

Natürlich haben sich auch die LED Röhren weiterentwickelt, so kostet jetzt eine 1,5 Meter LED Röhre „Osram Ledvance SubstiTUBE Advanced ST8A-EM 20.6W/840 G13/T8 150cm“ für ca. 10 € pro Stück. Macht 150 Lumen pro Watt, oder 310 Lumen pro Euro. Zwar ist die wärmere Lichtfarbe zu bevorzugen, allerdings ist eine flächigere Verteilung des Lichts fürs Pflanzenwachstum wiederum besser, siehe nächstes Kapitel, sodass der Vergleich zwischen diesen beiden Leuchtmitteln für mittlere bzw. Größere Anbauflächen unentschieden endet. Für kleine Anbaulösungen hingegen sind LED-Birnen mit E27 Gewinde preislich unschlagbar.

Bei Geizhals kann man ideal nach passenden LEDs suchen
https://geizhals.de/?cat=hhleuchtled&xf=1302_2000%7E2211_150

3.8 Die Anordnung von LEDs

Wie wichtig der Einfallswinkel des Lichtes ist, zeigt folgende Grafik. Bei waagrechten Blättern und senkrechtem Lichteinfall erhält das erste Blatt 72.000 Lux. Die meisten Pflanzen gehen hier in Lichtsättigung, sodass das Licht nicht effektiv ausgenutzt werden kann. Stehen die Blätter schräg zum einfallenden Licht, wird dieses wesentlich gleichmäßiger auf die Blätter verteilt und damit effektiver genutzt.

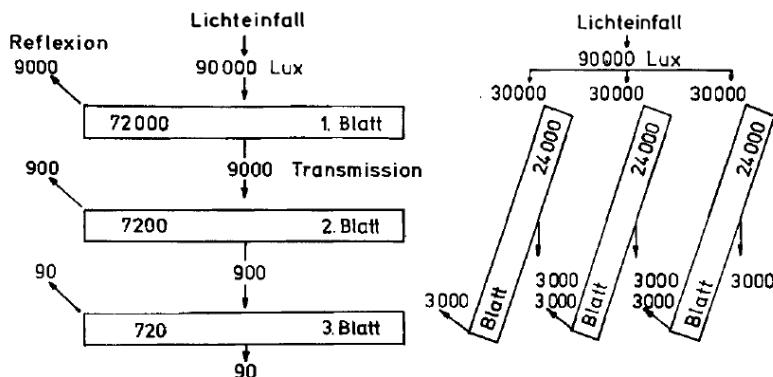
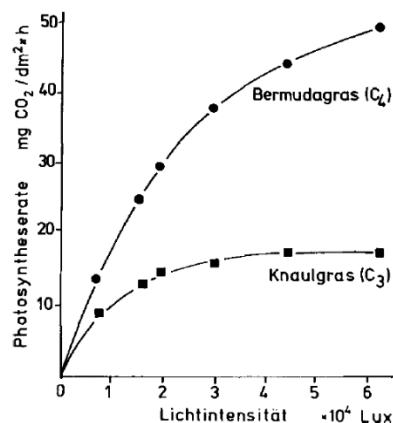


Abb. 113. Lichtnutzung eines Bestandes bei unterschiedlicher Blattstellung (Werte jeweils in Lux) (aus GEISLER 1970/71).

Quelle: Jansen, Bachthaler, Fölster, Scharpf - Gärtnerischer Pflanzenbau, 3. Auflage S. 214

Quelle: Jansen,
Bachthaler, Fölster,
Scharpf - Gärtnerischer
Pflanzenbau, 3. Auflage
S. 141

Abb. 71. Die Photosyntheserate von C₃- und C₄-Pflanzen in Abhängigkeit von der Lichtintensität am Beispiel von Knaulgras (*Dactylis glomerata*) und Bermudagrass (*Cynodon dactylon*).



Unter diesem Wissen können wir auch die linke Grafik besser verstehen. Primär wird gezeigt, dass C₄-Pflanzen auch bei hohen Lichtintensitäten das Licht noch effektiv ausnutzen können. Es fällt auf, dass die Kurve bei geringen Intensitäten sehr steil ansteigt und bei höheren Lichtstärken zunehmend abflacht. Meine Erklärung: Bei geringem Licht wird dieses durch die oberste Schicht optimal genutzt. Irgendwann geht diese in Sättigung, bei

weiterem Licht erreicht dieses durch die Transmission auch die unteren Schichten. Dies gilt sowohl für die tieferen Schichten innerhalb eines Blattes, als auch für die tieferliegenden Blattschichten. Beliebig kann man das Licht nicht steigern, sonst steigt die Photoinhibition überproportional an, besonders in den oberen Schichten. Je nach Pflanze bzw. deren Anordnung der Blätter und dem Lichteinfall ist die Krümmung der Kurve sehr wahrscheinlich unterschiedlich.

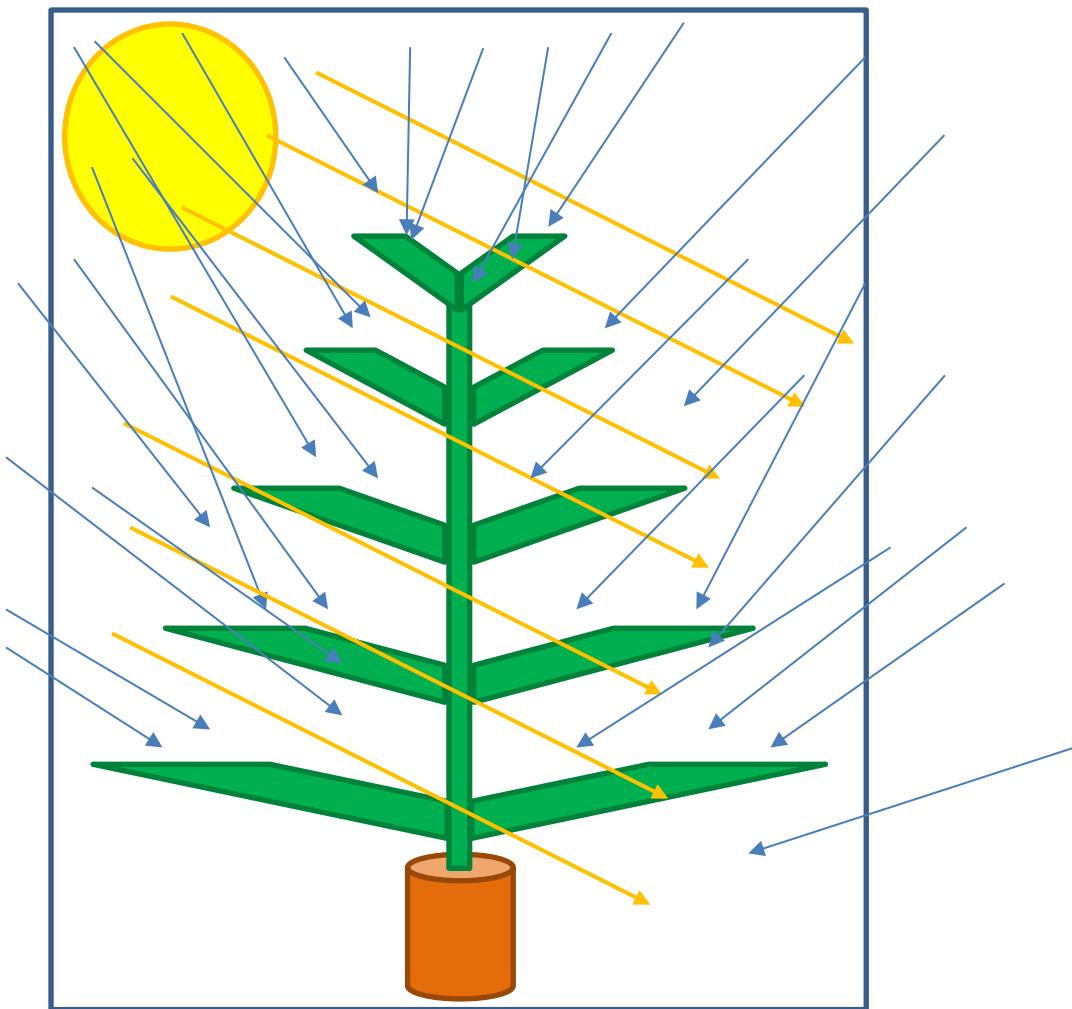
3.8.1 Diffuses Licht

Diffuses Licht erreicht die Pflanzen gleichmäßiger und vermeidet dadurch Hotspots. Im diffusen Licht können Pflanzen eine höhere Lichtmenge pro Tag / DLI (daily light integral) vertragen. Dies war zumindest bei Anthurium (Flamingoblume) der Fall. Während ein DLI von 10 mol/m²/d ohne diffuses Licht zu Blattschäden führte, war es bei diffusem Licht kein Problem. Erklärt wird das u.a. damit, dass es so zu keinen Hotspots kommt bzw. ohne diffuses Licht Teile der Pflanze durch Aufbauten im Gewächshaus verschattet werden. Ein Diffusor, welcher durch moderne Materialien kaum Lichtverlust bedeutet, sorgt hier für Ausgleich, siehe <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0304423814005172>

Um von PPFD in $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 * \text{s})$ auf das DLI umzurechnen, siehe 1.2 Einheiten des Lichts. Diffuse Reflektoren sind daher gegenüber spiegelnden Reflektoren zu bevorzugen.

3.8.2 Situation bei natürlichem Sonnenlicht

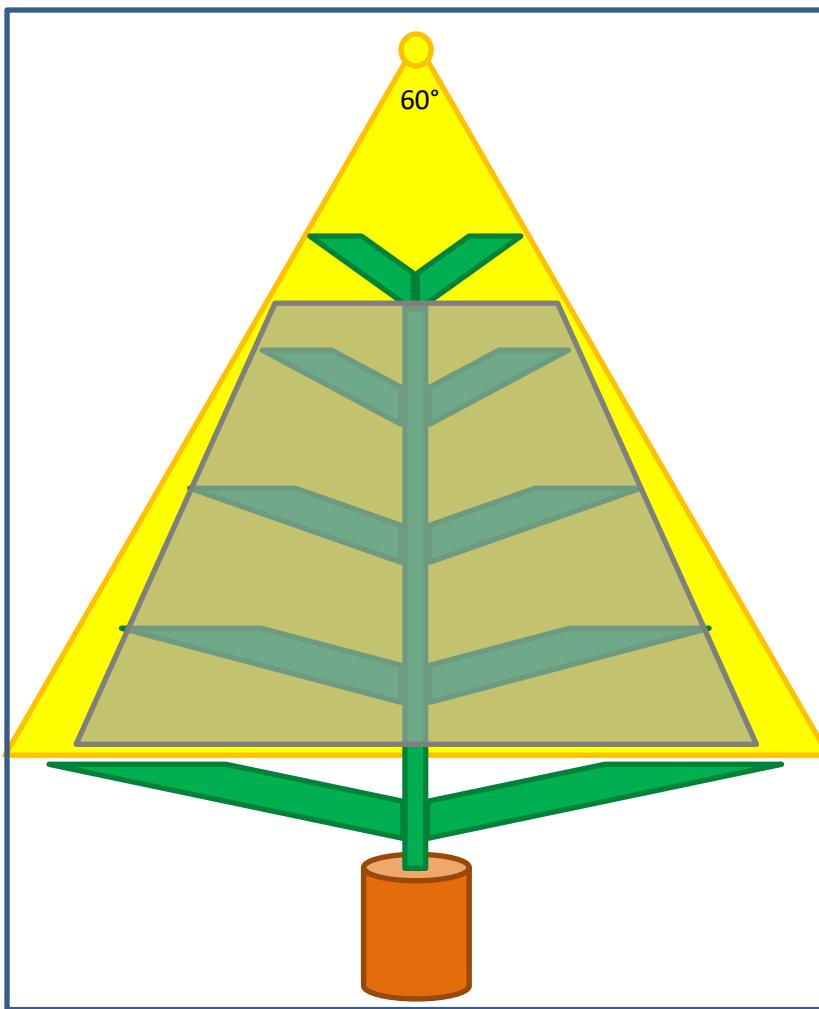
Nicht nur die Beleuchtungsstärke ist wichtig, sondern diese Leistung muss auch optimal an die Pflanze gebracht werden. Schauen wir uns erstmal eine Pflanze unter Sonnenlicht an. Wir gehen hier davon aus, dass die Pflanze alleine steht. Aufgrund des hohen Abstands der Erde zur Sonne können wir für unsere Zwecke die Sonnenstrahlen als parallel einfallend betrachten. In der folgenden Grafik ist die Situation skizziert. Ich hoffe die eigene Vorstellung mit Hilfe dieser zweidimensionalen Grafiken entsprechen anregen zu können. Die gelben Pfeile stellen die Sonnenstrahlen dar. Wie man sieht werden die Blätter von oben bis unten links und rechts des Stammes vom Sonnenlicht bestrahlt (auf der sonnenabgewandten Seite ist natürlich eine kleine Stelle des Blattes durch den Stamm beschattet). Die Pflanze erhält jedoch das Licht nicht nur durch direkte Sonnenstrahlung, sondern ebenfalls durch die Diffusstrahlung, auch Himmelsstrahlung genannt. Der Anteil der Diffusstrahlung zur Direktstrahlung schwankt. Im Winter ist der Anteil der Diffusstrahlung größer, genauso wie an Tagen mit höherer Trübung. Die Werte liegen bei 50° nördlicher Breite zwischen ca. 20 % (Sommer, geringe Trübung) bis ca. 40 % (Winter, hohe Trübung), Quelle Recknagel Taschenbuch für Heizung und Klimatechnik. Die Himmelsstrahlung ist hier mit blauen Pfeilen dargestellt und kommt aus allen Richtungen. Sie ist nicht gleichmäßig verteilt. Je näher sie aus Richtung Sonne kommt, desto stärker ist sie, besonders je höher die Trübung ist (<https://de.wikipedia.org/wiki/Tyndall-Effekt>). An schwachbewölkten Tagen ist fast ausschließlich Diffusstrahlung vorhanden und deutlich gleichmäßiger verteilt, sodass Nordfenster an solchen Tagen mehr Licht als an Tagen mit strahlendem Sonnenschein erhalten. An wolkenverhangenen Tagen gibt es ausschließlich Diffusstrahlung.



Pflanze unter natürlichem Sonnenlicht

3.8.3 Beleuchtungssituation mit einer 60° LED

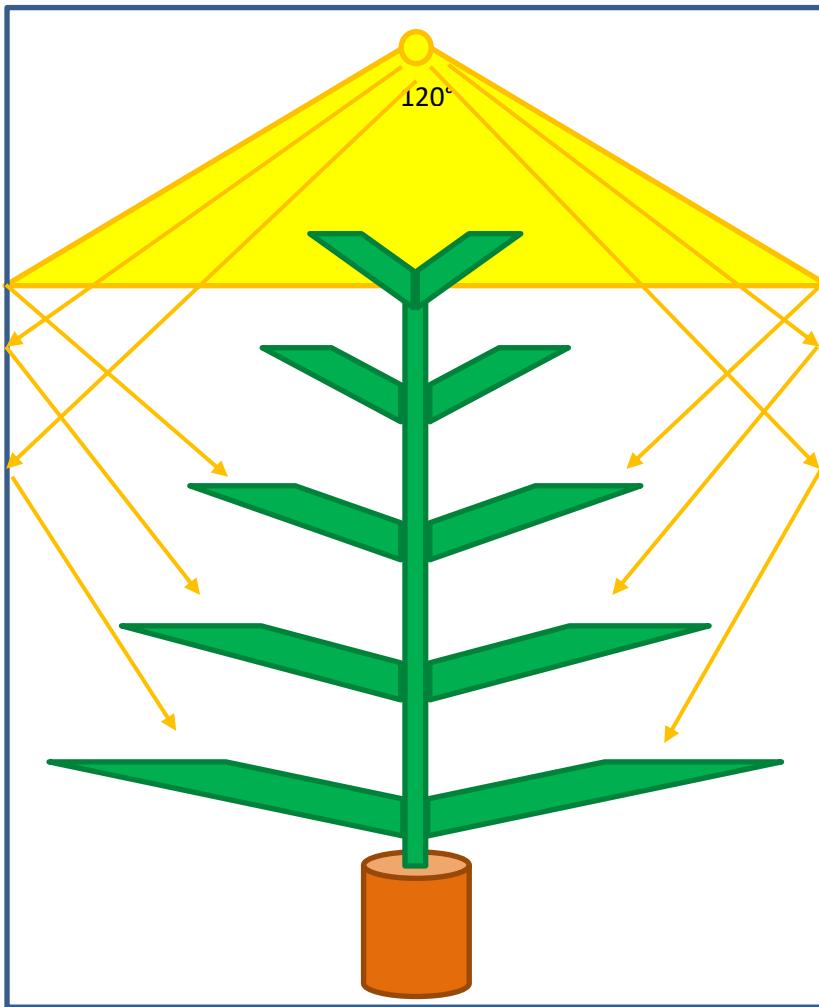
Nun zur Situation einer Pflanze unter einer LED mit einem Abstrahlwinkel von 60°. Fast die gesamte Strahlung wird in diesem Fall von der obersten Blattreihe absorbiert. Dort ist sie allerdings so hoch (bei einer leistungsstarken LED), dass die Sättigungslichtstärke erreicht wird. Das heißt ein Großteil des auftreffenden Lichts kann durch die obersten Blätter nicht genutzt werden. Gleichzeitig werden die weiter untenliegenden Blätter abgeschattet und können somit keine/kaum Photosynthese betreiben. Eine Steigerung des Lichtes ist hier sehr ineffizient, da die Steigerung vor allem dadurch wirkt, dass durch die oberste Blattschicht hindurch noch etwas Licht auf die zweite Reihe fällt, siehe Abschnitt 3.8 Die Anordnung von LEDs. Für Keimlinge, die frisch austreiben kann diese LED bedenkenlos eingesetzt und in einem Abstand angebracht werden. Gerade am Fensterbrett kann man eine solche LED hochpositioniert anbringen, sodass sie das natürlich einfallende Licht kaum abschattet.



Pflanze unter einer LED mit 60° Abstrahlwinkel

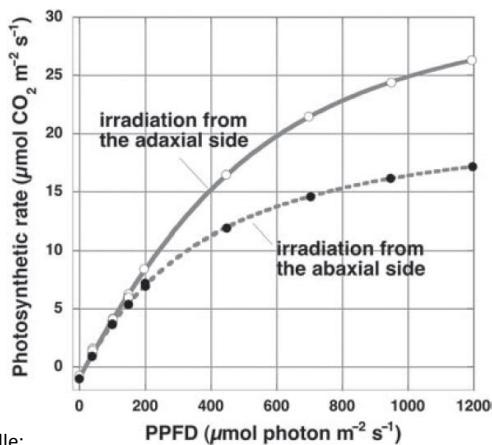
3.8.4 Beleuchtungssituation bei einer 120° LED mit Reflexion

Betrachten wir nun eine Pflanze unter einer LED mit 120° Abstrahlwinkel. Auf den ersten Blick sieht es kaum besser aus, nur dass nun viel mehr Licht in den Raum gestrahlt wird. Machen wir nun die Wände reflektierend um dieses Licht zu nutzen, z.B. mit der matten Seite einer Alufolie. Die Reflexionspfade sind skizziert. Wie zu erkennen ist, erreicht das LED Licht nun auch die unteren Blattschichten. Grundsätzlich gilt bei Reflexion Einfallswinkel = Ausfallwinkel. Da wir die matte Seite verwenden und diese einem Lambert-Strahler ähnelt (siehe Abschnitt 3.8.8 Exkurs zu Reflexionsmaterialien), gilt diese Regel nur in abgeschwächter Form und das Licht wird gleichmäßiger in alle Richtungen reflektiert.



Pflanze unter einer LED mit 120° Abstrahlwinkel

3.8.5 Beleuchtungssituation bei flächig angeordneten LEDs



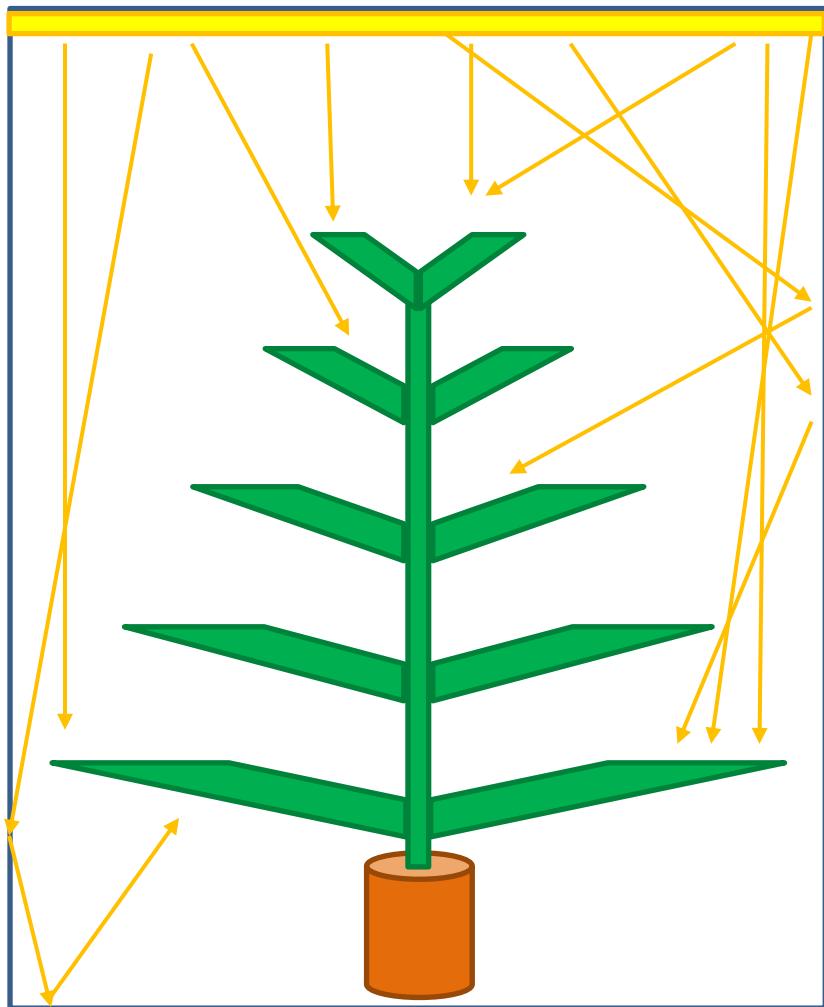
Quelle:

<http://pcp.oxfordjournals.org/content/50/4/684.full.pdf+htm>

S. 10 Fig. 9.

Belichtung von der Unterseite erst bei noch höheren Lichtstärken ein, so wie die Pflanzen ihre Blätter an die Lichtmenge anpassen (Sonnen- und Schattenblätter). Dies legt die Lektüre der Bildquelle nahe. Es empfiehlt sich auch den Blumentopf in Alufolie einzukleiden, da bei einem angenommenen Reflexionsgrad von 0,9 selbst nach fünfmaliger Reflexion noch $0,9^5 = 0,59 = 59\%$ des Lichtes übrig sind.

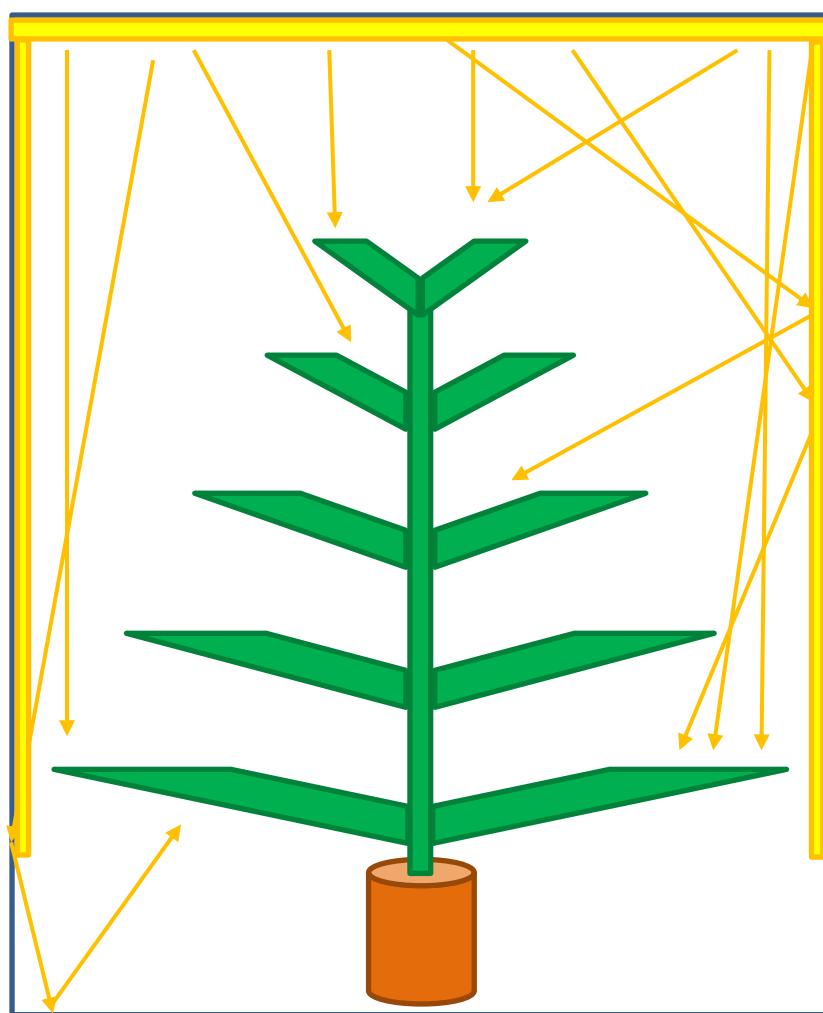
Die Lichtausnutzung lässt sich weiter verbessern. Stellen wir uns vor wir nehmen statt einer starken LED, viele und dafür schwächere LEDs und ordnen diese matrixförmig über der Pflanze an. Da die Skizze nur zweidimensional ist, hier nun als Leuchtband (wie z.B. eine Leuchtstoffröhre) dargestellt. Das Licht erreicht nun sogar die Blattunterseite. Wie man sieht macht es bis $200 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ (\triangleq ca. 11.000 Lux Tageslicht) bei einer Sonnenblume praktisch keinen Unterschied ob von oben oder unten belichtet, sodass dieses reflektierte Licht in den unteren Schichten optimal verwertet werden kann. Vermutlich tritt die Lichtsättigung bei dauerhafter



Pflanze unter Leuchtbänder / LED-Matrix

3.8.6 Beleuchtung mit zusätzlichem Seitenlicht

Wie wir im vorherigen Punkt gesehen haben, ist eine flächige Beleuchtung von oben mit zusätzlicher Seitenreflexion bereits deutlich besser fürs Pflanzenwachstum als nur Licht von oben. Das Licht kommt dadurch gleichmäßiger aus allen Richtungen. Wenn die Pflanze nun sehr stark in die Breite wächst, ist nur noch wenig Platz für die Reflexion, besonders wenn die Pflanze oben fast genauso breit wächst wie unten. Hier bietet es sich nun an zusätzliches Licht von den Seiten zu geben, dafür kann man dann die Beleuchtung von oben reduzieren. Dieses Zusatzlicht kann z.B. in den vier Ecken die positioniert werden, dort hat der Lichtstrahl genug Abstand zur Pflanze um sich zu verbreitern. Je gleichmäßiger das Licht auf die Pflanze trifft, desto effektiver kann es verwertet werden. Man kann sich die Pflanze wie schwarzes Loch vorstellen, das Licht aus allen Richtungen des Raumes aufnimmt und zum Wachsen einsetzt.



Pflanze unter Leuchtband / LED-Matrix mit Seitenlicht (z.B. in den Ecken)

3.8.7 Beleuchtungsversuch: Vergleich Seitenlicht und Licht von oben

Da die ursprünglichen Preisleistungssieger LED-Röhren Substitube von Osram 1,50 Meter Länge waren und im Vergleich zu E27 Birnen flächiger strahlen, wäre es schön, wenn man diese auch senkrecht anordnen könnte. Hierfür wurde ein Beleuchtungsversuch mit 84 SMD-LEDs oben angebracht und 87 SMD-LEDs seitlich angebracht durchgeführt. Im seitlichen Versuch sind es 3 LEDs mehr um den Verlust der Reflexionsfläche zu kompensieren. Die LEDs wurden in zwei gleichgroßen mit Alufolie verkleideten (matte Seite) Kartons mit Belüftungslöchern untergebracht. Durch die Reflexion ist natürlich kein reines Licht von der Seite bzw. von oben vorhanden und aufgrund der Lichtausbreitung wird beim Seitenlicht an der Alufolie oben weniger Licht reflektiert als an den Seitenwänden mit den LEDs oben. Da beim Seitenlicht sich die LEDs sich gegenüber gegenseitig anleuchten, dürfte hier die Lichtausnutzung insgesamt etwas geringer sein, da dort nur wenig Reflexion stattfindet.



Als Versuchspflanzen wurden jeweils Kresse und Hirse (C4-Pflanze) ausgesät. Zu Beginn wurde mit 20 Stunden täglich beleuchtet. Später wurde kontinuierlich reduziert, da die Hirse eine Chlorose zeigte. Sie erholte sich allerdings nicht. Als Erde wurde Kokosnusssubstrat verwendet. Vermutlich war deshalb die Chlorose durch Nährstoffmangel bedingt.

Nun ein paar Bilder um das Ergebnis zu sehen. Auf Wiegen wurde verzichtet, da nicht die gleiche Anzahl an Pflanzen verwendet wurde und dadurch keine Vergleichbarkeit gegeben wäre. Auf allen Bildern: Links Wuchs mit Licht von oben, rechts mit Seitenlicht.



Nach 5 Tagen



Nach 9 Tagen

Auswertung des Beleuchtungsversuchs Seitenlicht und Licht von oben nach 15 Tagen:



Man sieht, dass bei Licht von oben der Wuchs kompakter ist. Bei Seitenlicht strebt die Kresse mehr nach außen, die Blätter sind etwas kleiner.



Hier die Ansicht von der Seite. Man sieht beim Seitenlicht hängt die Kresse deutlich nach unten. Um besser vergleichen zu können, wurde die Kresse mit einem Gummi zusammengebunden.



Wie man sieht ist die Kresse mit Licht von oben mit etwas größeren Blättern gewachsen und macht insgesamt einen gesünderen Eindruck. Sie war relativ stabil, während die Kresse mit Seitenlicht zum Umfallen neigte. Interessanterweise ist die Hirse mit dem Seitenlicht insgesamt höher gewachsen als

beim Licht von oben. Lediglich ein „Ausreißer“ ist beim Licht von oben höher gewachsen. Da die Hirse zu Beginn nur als kleiner Stängel nach oben wächst, trifft bei Seitenlicht natürlich mehr Licht auf diese um Photosynthese zu betreiben.

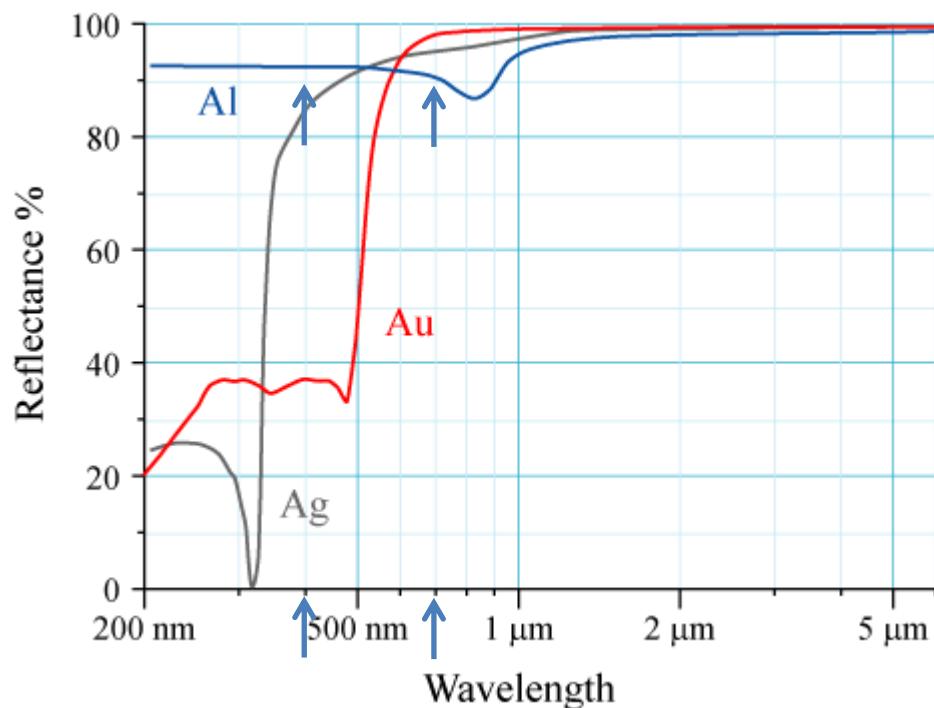
Fazit: Die meisten Pflanzen richten ihre Blätter so aus, dass von oben einfallendes Licht optimal genutzt wird, deshalb ist Licht von oben hier im Vorteil. Die Wuchsunterschiede könnten allerdings auch darauf zurückzuführen sein, dass beim Seitenlicht durch die gegenüberliegende Anordnung der LEDs konstruktionsbedingt durch weniger Reflexion insgesamt weniger Licht zur Verfügung stand.

3.8.8 Exkurs zu Reflexionsmaterialien

Um die Wirkungsweise von Reflektoren zu demonstrieren und die Pflanzen möglichst wirtschaftlich zu beleuchten, hier ein paar Beleuchtungsmessungen.

3.8.8.1 Alufolie, SW-Folie und Papier

In vielen Foren wird empfohlen so einen Wachstumsschrank (auch Growschrank oder Growbox genannt) mit Schwarz-Weiß-Folie oder abgekürzt als „SW-Folie“ mit der weißen Seite nach Innen auszukleiden. Von Alufolie wird abgeraten, diese würde zu wenig Licht reflektieren. Schaut man sich allerdings den Reflexionsgrad von Aluminium an, so liegt dieser sehr hoch:



Quelle:
<http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/9/9d/Image-Metal-reflectance.png>

Der für Pflanzen interessante Wellenlängenbereich befindet sich zwischen 400 und 700 nm (in der Grafik der Bereich zwischen den 2 Pfeilen). Jedenfalls sieht man anhand der Grafik, dass Aluminium im geforderten Spektrum das Licht zu über 90 % reflektiert, was ein sehr guter Wert ist.

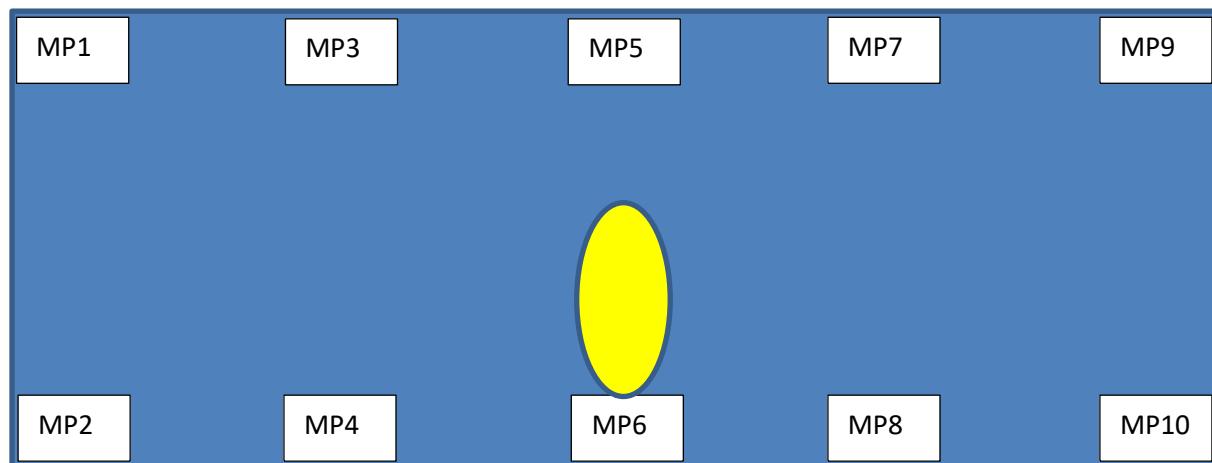
Unerklärlich war für mich deshalb, wieso Aluminium als Reflektor so schlecht sein sollte und ich wollte es genauer wissen.

Testaufbau:

- Schrankfach mit den Maßen: 82x31x37,5 cm (BxLxH)
- Kompakt-Energiesparlampe 12 Watt, Farbe 827, 660 Lumen
- Die Lampe wurde oben in der Mitte befestigt, wobei sie sich etwas weiter vorne befand

Die Fläche des Testaufbaus beträgt entsprechend $0,82\text{m} * 0,31\text{m} = 0,2542 \text{ m}^2$. Bei den 660 Lumen, die die Lampe bringt ergibt das bei gleichmäßiger Ausleuchtung und idealer Ausleuchtung theoretisch eine Beleuchtungsstärke von $660 \text{ Lumen} / 0,2542 \text{ m}^2 = 2596 \text{ Lux}$. Dieser Wert ist sehr mit Vorsicht zu betrachten, da die Lichtmenge von Leuchtstofflampen sehr von der Temperatur abhängig ist.

Es gab 10 Messpunkte, die wie in folgender Grafik zu sehen sind lagen (MP = Messpunkt):



Das gelbe Oval stellt die Position der Lampe in ca. 37 cm Höhe über den Messpunkten dar. Sie war deutlich näher an Messpunkt 6 als an Messpunkt 5.

Das Schrankfach wurde mit folgenden Materialien ausgekleidet und dann die Helligkeit an den 10 Messpunkten gemessen:

- Ohne Auskleidung, d.h. das Holz reflektierte direkt, Farbton leicht beige
- Weißes Kopierpapier (kein Umweltpapier) (Reflexionsgrad dürfte dem von SW-Folie entsprechen)
- Alufolie, sodass die spiegelnde Seite reflektiert
- Alufolie, sodass die matte Seite reflektiert

Das Ergebnis ist in Tabelle 1 festgehalten:

	Ohne	Papier	Alufolie spiegelnd	Aulufolie matt
Messpunkt 1	320	-47,45	1410	-17,40
Messpunkt 2	410	-32,68	1320	-22,67
Messpunkt 3	640	5,09	1900	11,31
Messpunkt 4	820	34,65	2000	17,16
Messpunkt 5	810	33,00	2140	25,37
Messpunkt 6	1150	88,83	2400	40,60
Messpunkt 7	550	-9,69	1660	-2,75
Messpunkt 8	780	28,08	1760	3,10
Messpunkt 9	290	-52,38	1270	-25,60
Messpunkt 10	320	-47,45	1210	-29,12
Summe	6090	17070	21610	22320
Durchschnitt	609	1707	2161	2232
Abweichung gesamt	379,31	195,08	100,51	92,29
Abweichung von max	-76,54	-34,24	-16,76	-14,02

Tabelle 1: Auswertung des Beleuchtungsversuchs

Erklärung der Tabelle: Links sind die Messpunkte aufgetragen. Die Spaltenüberschriften (Ohne, Papier, ...) stellen das getestete Reflexionsmaterial dar. In der linken Spalte unter dem Reflexionsmaterial ist der gemessene Wert in Lux dargestellt. Rechts hiervon ist die Abweichung von der durchschnittlichen Helligkeit dargestellt.

Unterhalb der einzelnen Luxwerte wurden diese aufsummiert. In der darauffolgenden Zeile findet sich die Durchschnittshelligkeit.

Die Zeile mit „Abweichung gesamt“ ist ein Maß für die Helligkeitsstreuung und gibt an wie sehr unterschiedlich die Beleuchtungsstärke an den verschiedenen Positionen ist. Ein geringer Wert ist anzustreben.

Die letzte Zeile „Abweichung von max“ gibt an wie sehr die Durchschnittliche Helligkeit von der maximalen theoretischen Helligkeit von 2596 Lux (siehe oben) abweicht. Je größer der Wert, desto besser. Hinweis: Der Wert muss immer kleiner als 0 sein, -76,54 ist kleiner als -14,02 (negative Werte!).

Nun zur Interpretation:

Ohne Reflektor verschenkt man 75 % des Lichts, die Streuung der Helligkeit ist sehr groß. Nur unter dem Messpunkt 6 wird eine Beleuchtungsstärke über 1000 Lux erreicht.

Mit **Papier** als Reflektor verbessert sich der Wirkungsgrad enorm. Es geht „nur“ noch 1/3 des Lichtes verloren. Die Helligkeitsverteilung ist wesentlich gleichmäßiger als ohne Reflektor.

Mit **Alufolie** und der **spiegelnden** Seite verbessert sich das Ergebnis nochmals deutlich. Der Verlust halbiert sich gegenüber dem des Papiers.

Das Beste Ergebnis konnte ich mit der **matten** Seite der **Alufolie** als Reflektor erzielen. Hier ergibt sich die beste Helligkeitsverteilung. Hotspots, also Stellen die im Vergleich zur Umgebung deutlich heller Beleuchtet werden, werden durch die Anwendung der matten Seite verringert. Denkbar ist, dass bei der spiegelnden Seite insgesamt mehr Licht reflektiert wird, die Hotspots jedoch nicht an den Messpunkten lagen.

Fazit: Alufolie mit der matten Seite als Reflektor ist in einem Wachstumsschrank sehr zu empfehlen und stellt außerdem einen der kostengünstigsten Reflektoren dar. Wenn die Alufolie beim Anbringen

zernittet ist dies unproblematisch, sondern ganz im Gegenteil, es verbessert sogar die Eigenschaften als Lambert-Strahler (http://de.wikipedia.org/wiki/Lambertsches_Gesetz) (Quelle https://www.scienceacademy.de/archiv/SABW2011/ScienceAcademyBW_2011_5_Physik.pdf S. 18). Die Alufolie sollte natürlich auch an der Decke und am Boden ausgebracht werden. Je mehr reflektierende Fläche, desto besser.

Tipp: Auch für Pflanzen auf dem Fensterbrett verbessert Alufolie die Lichtausbeute. Einfach Alufolie hinter den Pflanzen anbringen und das Licht wird auf die Pflanzen zurückreflektiert. Bei meinen Messungen konnte ich dadurch je nach Winkel (leicht schräg zur Pflanze hingeneigt) bis zum doppelten der Beleuchtungsstärke feststellen. So wird allerdings auch Sonnenlicht nach außen reflektiert. Im Sommer mag das erwünscht sein, im Winter führt es zu höheren Heizkosten.

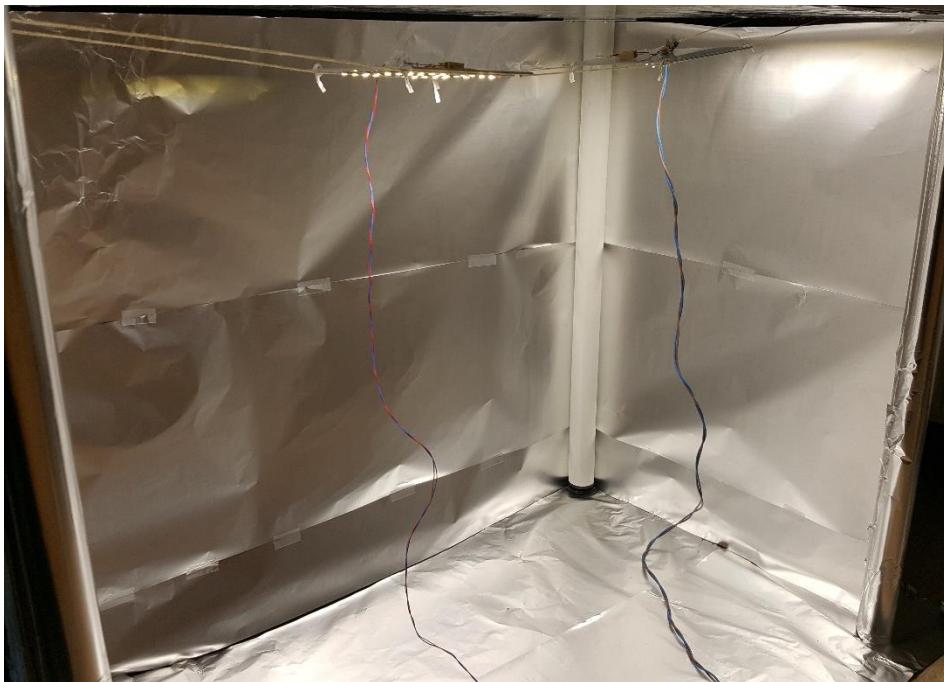
Ein weiterer Reflexionsversuch wurde mit der matten Seite und einem Ikea-Tisch vorgenommen. Zunächst wurde die Unterseite des Tisches mit Alufolie und der matten Seite als Reflektor beklebt. Anschließend wurde sie an Bein 1 mittels Tesafilm fixiert und dann bis zu Bein 4 gespannt. An Bein 2 und 3 wurde sie ebenfalls fixiert. Es wurde von oben nach unten gearbeitet, sodass insgesamt 3 versetzte Lagen angebracht wurden. Mit Tesafilm wurde an mehreren Stellen der Überlappungsbereich festgeklebt, damit die Alufolie einen guten Kontakt hat. Steht sie voneinander ab, verirrt sich das Licht dort hinein und geht verloren bzw. „läuft sich tot“. Wenn oben und unten ein paar mm Luftspalten bleiben so ist dies gut, damit die Luft zirkulieren kann und neues CO₂ zugeführt wird.

Die Längsseite wurde offengelassen, damit die Konstruktion zugänglich bleibt. Da hier eine erhebliche Menge an Licht nach außen dringt, wurde Alufolie auf eine große Kartonplatte aufgeklebt, die flexibel davorgestellt und wieder weggenommen werden kann. Nachfolgende Messungen sind mit der davorgestellten Kartonplatte durchgeführt worden. Um die Werte ermitteln zu können wurde mittels einer Webcam das Bild per Kabel auf ein Tablet übertragen, so konnten die Werte optimal abgelesen werden.

Abmessung	Breite	Länge	Höhe				
	0,5	0,9	0,7				
Fläche	0,45						
Lumen pro L	1044						
Anzahl Lamp	2						
Gesamtlume	2088						
Lux rechneri	4640						
Messergebnisse							
	3840	4210	4350	4510	3720		
	4130	4370	4600	4510	4150		
	4350	4420	4500	4510	4060		
Summe Lux	64230						
Mittelwert L	4282						
Verlust %	7,71551724						

Der blaue Rahmen soll den Tisch darstellen. Es gab insgesamt 15 Messpositionen. An den grünen Messpunkten befand sich die LED genau darüber in ca. 70 cm Höhe. Zum Vergleich: Mit nur geringer seitlicher Reflexion wurden lediglich 700 Lux gemessen. Wie man sieht beträgt der Verlust ca. 8 %. Dieser Versuch wurde mit der Konstantstromquelle wiederholt und dessen Ergebnisse hier ausgezeigt, sodass die Lichtleistung und damit die Ergebnisse sehr genau sind und praktisch nur von der Genauigkeit des Luxmeters abhängen. Da fast keinerlei Gegenstände (außer Kabel, Luxmeter und Webcam) im Reflexionsraum vorhanden waren, schaukelt sich das Licht hier ähnlich wie der Schall in einer Kathedrale oder einem Schwimmbad immer weiter auf, was diesen sehr geringen Verlust plausibel macht.

Mit dem 12 Volt Netzteil und Vorwiderständen wurde ein Lichtverlust von 17 % ermittelt, da die Lampen nicht auf ihre volle Helligkeit kamen. Die Messungen wurden am Boden durchgeführt. Je näher man in Richtung Lampe rückt, desto geringer wird der Verlust sein. Man sollte die Größe des Reflexionsraums demnach an die Pflanzengröße anpassen. Sind die Pflanzen noch klein, kann man sie auf einen Pappkarton stellen um sie näher an die Lampe zu bekommen. Ein Tieferhängen der Lampe ist hier vermutlich nicht ganz so effektiv, da sich dann „Lichttotraum“ über der Lampe bildet.



Reflexionsraum leer

Abmessungen (LxBxH): 0,9x0,5x0,7

Um die LEDs einfach aufhängen zu können, wurden zwei Schnüre gespannt. Bei einem erneuten Aufbau, werden zuerst die beiden „Zwischenbeine“ mit Alufolie umwickelt, damit diese das Licht ebenfalls reflektieren.



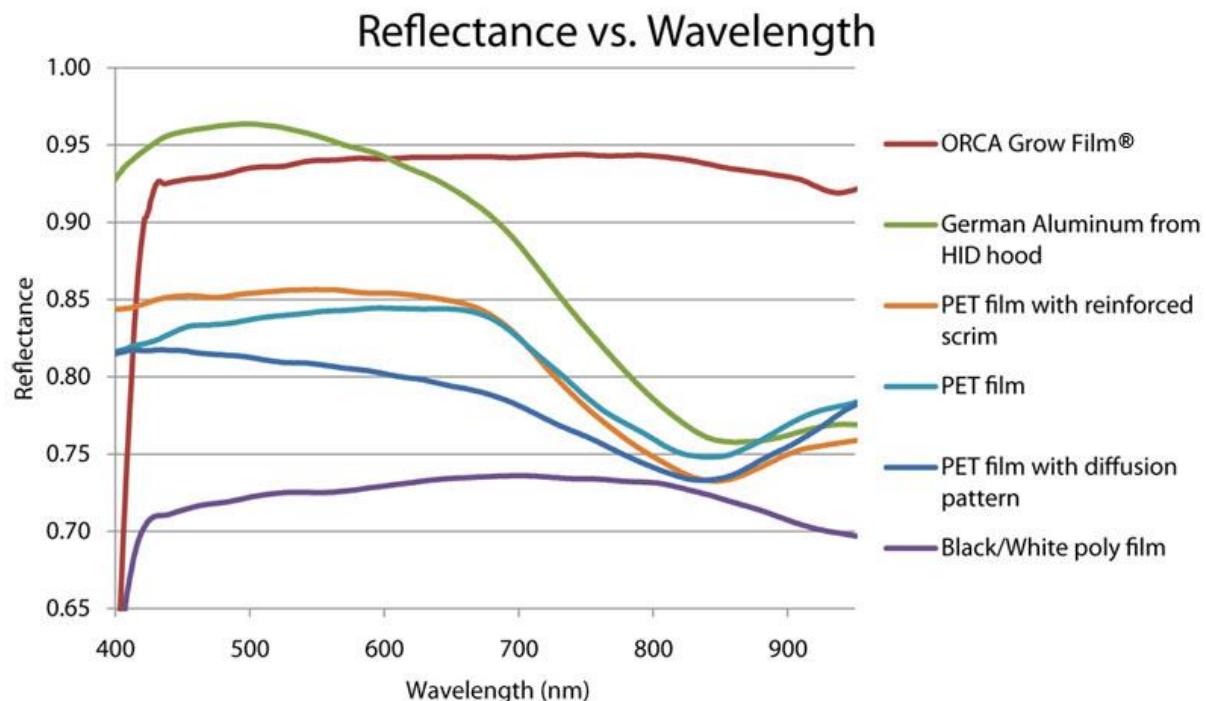
Paprika und Peperoni auf Karton stehend um näher an der Lampe zu sein

Weitere Reflexionsmaterialen: Es gibt sog. Alusprays, mit denen man Aluminium auf eine Oberfläche sprühen kann. Leider ist die Lichtreflexion dieses Sprays sehr schlecht. Für den Versuch wurde das Aluspray dick/deckend auf ein weißes Blatt DIN A4 aufgesprüht.

Für die folgenden Messungen wurde eine Box mit ca. 20,5 cm Länge auf 18,5 cm Breite und ca. 30 cm Höhe mit den entsprechenden Materialien ausgekleidet und dann die Beleuchtungsstärke in den 4 Ecken, sowie in der Mitte gemessen. Diese Messwerte wurden addiert und durch 5 dividiert um die durchschnittliche Beleuchtungsstärke zu erhalten. Auch auf dem Boden befand sich das entsprechende Versuchsmaterial um nicht genutztes Licht „im Raum zu behalten“. Lediglich die langwellige Wärmestrahlung der Haut wurde spürbar reflektiert.

3.8.8.2 Orca Grow Film

Als sehr vielversprechendes Material hat sich **Orca Grow Film** erwiesen. Orca Grow Film reflektiert 94 % des Lichts zu 99 % diffus.



Quelle: <https://www.orcagrowfilm.com/v/vspfiles/assets/images/chart.jpg>

„German Aluminium from HID Hood“ deckt sich auch sehr gut mit den Werten in der Grafik für Alu ganz zu Beginn dieses Abschnitts 3.8.7. Da Sonnenlicht zu ca. 50 % aus Infrarot/Wärmestrahlung besteht, siehe Abschnitt 1.3 Das von Pflanzen genutzte Licht, reflektiert Orca Growfilm diese Strahlung deutlich besser als Alufolie.

Dies wurde auch durch eine Vergleichsmessung von Orca Growfilm, Alufolie matt und glänzend bestätigt. Dazu wurde jeweils ein Stück im selben Winkel von der Sonne durch ein Fenster bei ca. 20 °C Raumtemperatur beschienen. Die Temperatur wurde rückseitig kontaktlos über ein Infrarotthermometer gemessen. Auf der Alufolie wurde hierzu ein Tesafilmrechteck angebracht um die Temperatur gut messen zu können, da Alufolie in diesem Wellenlängenbereich sehr gut reflektiert und somit ansonsten keine eigene Strahlungsemision aufweist.

Orca Grow Film	24,6
Alufolie matt	27,1
Alufolie glänzend	25,7

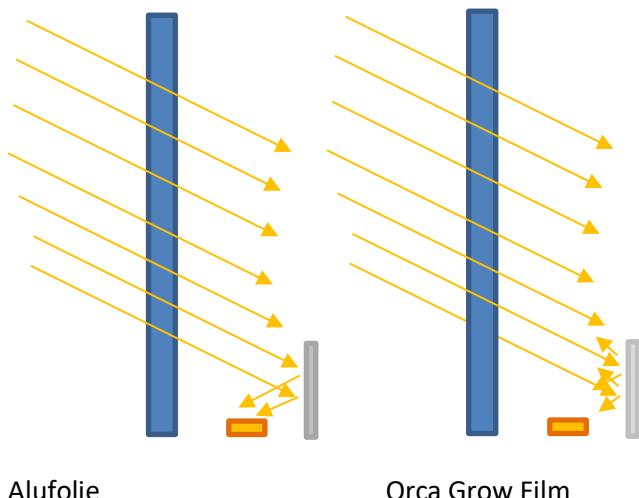
Auf der Rückseite gemessene Temperatur bei Sonnenbestrahlung

Material	durchschnittliche Lux
Orca Grow Film	13.544
Alufolie matt	10.028
Aluspray	4.554
weißes Papier	7.808

Vergleich verschiedener Reflexionsmaterialien

Orca Grow Film ist ziemlich stabil und kann auch wieder abgewaschen werden. Alufolie ist da wesentlich fragiler und reißt deutlich schneller ein. Selbst mit der matten Seite reflektiert Alufolie immer noch etwas gerichtet. Das führt dazu, dass bei der Verwendung am Fenster Alufolie zu einer höheren Beleuchtungsstärke als beim Orca Grow Film führt. Die Grafik veranschaulicht das. Bei der Alufolie wird der überwiegende Teil des Lichts nach unten zum Messgerät reflektiert, während des beim Growfilm in sämtliche Richtungen gestreut wird. Bei kleinen Sämlingen dürfte demnach Alufolie besser sein, bei einer großen Pflanze, die große Teile des Fensters ausfüllt, Orca Grow Film.

Reflektor	Lux	Steigerung %
Ohne	2.240	
Alu matt	4.130	84,375
Orca	3.200	42,85714286



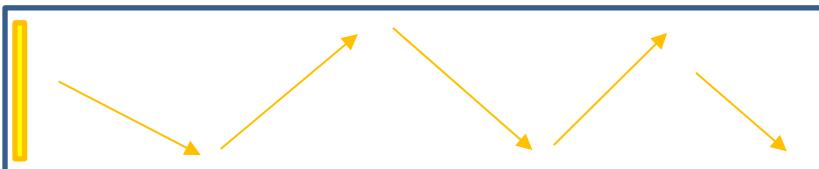
- **Highly Reflective Surface:** 94% reflectivity across the full visible light spectrum. Reflectivity % is not measured at a singular wavelength peak.
- **Highly Diffuse Surface:** 99% diffuse reflection. Microfiber structure creates even light distribution across material surface regardless of incident angle of light. Isotropic surface luminance eliminates/reduces hot spots and does not require surface to be hung flat.
- **100% Light Tight.**
- **No Color Shift or Iridescence:** Light reflected maintains the original color spectrum/wavelength.
- Thermal reflecting.
- 280 microns thick, extremely durable, puncture and tear resistance.
- Waterproof.
- Washable & cleanable with common household cleaners.
- Helps stop mold and algae growth.
- UV Stable - does not yellow.
- Recyclable & eco friendly, contains no halogens, plasticizers or VOCs.



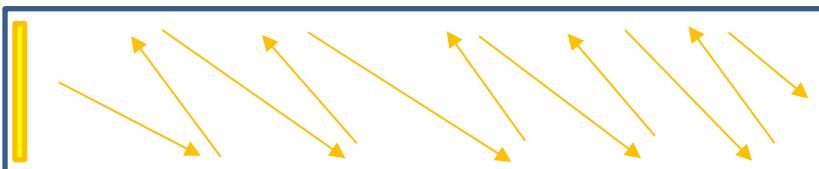
Orca Grow Film „Beipackzettel“

Quelle: Eigene Fotografie

Auf bei einem großen Abstand zwischen Pflanze und Lichtquelle haben die Messungen gezeigt, dass hier bei Alufolie mehr Licht an der Pflanze ankommt. Aber wie bereits oben geschrieben, sollten die Pflanzen dann auf Kartons oder Ähnliches gestellt werden um näher ans Licht zu kommen. Zur Verdeutlichung der Situation hier eine Grafik bei der die Lampe einen großen Abstand zur Pflanze hat. Aus Darstellungsgründen wurden die Grafiken waagerecht gezeichnet. Bei senkrechter Aufstellung ist die Situation reflexionstechnisch unverändert.



Situation bei Alufolie: Das Licht wird ziemlich zielstrebig zur Pflanze gelenkt.



Situation bei Orca Grow Film: Das Licht wird teilweise zurück reflektiert. Über die längere Entfernung kommt deutlich weniger Licht als bei Alufolie an. Daher ist die gemessene Beleuchtungsstärke in diesem Fall mit Orca Grow Film geringer als bei Alufolie.

3.8.8.3 Mylar-Folie

Häufig findet man im Internet als Reflexionsmaterial auch Mylar-Folie. Teilweise wird hierfür ein Reflexionsgrad von 97 % angegeben. Eine solche Mylarfolie mit angeblich 97 % Reflexion habe ich in einer Box mit 17,5 cm x 20 cm bei einer Höhe von 30 cm mit der Osram Ledvance LED Ultra-Efficient Classic A100 7.2W mit 1521 Lumen getestet, siehe 3.7.3.2 Leistungsfähige kompakte LED-Lampen mit E27 Gewinde als einfache Alternative. Rechnerisch ergibt das bei der Fläche von 0,035 m² eine Lichtintensität von 43.457 Lux.

Zunächst wurde die Box an allen Seiten, also auch oben und unten mit Orca Growfilm ausgekleidet. Gemessen wurde die Beleuchtungsintensität jeweils in den 4 Ecken mit dem UT383BT, indem es vollständig in die Box gelegt und der Wert via Bluetooth abgelesen wurde. Beim Orca Growfilm ergab sich hier 36.900, 36.200, 37.300 Lux, 36.600 Lux. Durchschnittlich ergibt das 36.750 Lux. Also 85 % des erwarteten Lichts. Anmerkung: Das ist ein sehr guter Wert, da die Lampe ja das Licht fast vollständig in alle Richtungen abgibt. Selbst Pflanzenlampen, die gerichtet strahlen, benötigen immer noch Reflexionsmaterialien um das Licht an den Seiten einzufangen und verlieren dabei weiter an Effizienz.

Nachdem Orca Grow Film diffus reflektiert und mit 94 % Reflexionsgrad angegeben ist, war die Idee dass die Gesamtlichtstärke zunehmen müsste, wenn das Licht von unten nach oben reflektiert wird.

Insgesamt nahm die Lichtstärke jedoch ab. Die Messwerte betragen im Einzelnen: 35.500 Lux, 34.200 Lux, 35.300 Lux, 35.100 Lux. Durchschnittlich 35.025 Lux und damit etwas schlechter als mit Orca Growfilm. Nachdem Mylar ebenfalls silbern erscheint, vermute ich, dass sie zwar in einem bestimmten Wellenlängenbereich mit 97 % reflektiert, aber nicht konstant über den PAR-Bereich und daher insgesamt deutlich schlechter als Orca Grow Film ist.

Als nächstes wurde oben Mylar angebracht, der Rest, auch unten, war wieder Orca-Growfilm. Nachdem Mylar sehr spiegelnd reflektiert, so die Idee, kommt hier mehr Licht nach unten. Die Messung wurde nach nur 2 Messpunkten abgebrochen. Gemessen wurde: 33.140 Lux und 32.300 Lux, was im Durchschnitt 32.720 Lux ergibt und damit immer noch deutlich schlechter als mit Orca Growfilm.

Als letztes wurde eine Alufolie („alio Aluminiumfolie“) frisch von der Rolle mit der matten Seite oben angebracht. An allen anderen Seiten, auch unten, befand sich Orca Growfilm. Gemessen wurde 32.200 Lux, 30.400 Lux, 31.000 Lux und 28.400 Lux. Es fällt die unregelmäßige Verteilung auf. Durchschnittlich sind das 30.500 Lux und damit noch schlechter als Mylar.

3.8.8.4 Fazit Reflexionsmaterialien

Orca Growfilm ist zwar am teuersten (Stand Februar 2024 war das günstigste Angebot 120 € für 13,7 m²), hat aber auch die höchste Reflexion und ist gleichzeitig am stabilsten.

Danach kommt Mylar-Folie, die weniger stabil und auch weniger reflexiv ist. Durch die gespiegelte Reflexion ergibt sich hier eine weniger gleichmäßige Lichtverteilung.

Am schlechtesten schneidet bei der Reflektion tatsächlich Alufolie ab, aber ist natürlich immer noch besser als kein Reflexionsmaterial.

3.9 Ein günstiger und flexibler Growschrank

Es wurde ein günstiger Stoffkleiderschrank so umgebaut, dass er das Licht optimal reflektiert und Pflanzen flexibel darin beleuchtet werden können. So ein Gebilde wird in der Szene meist als Growschrank, deutsch Wachstumsschrank, bezeichnet.

Zunächst wurden die Stäbe zusammengesetzt und die inneren Stangen mit Alufolie umwickelt um den Lichtverlust durch die schwarzen Stangen deutlich zu reduzieren. Anschließend wurde an der ersten senkrechten Stange der Vorderseite Orca Growfilm einmal umgewickelt und festgeklebt. Anschließend wurde die Rolle über die linke Seite, sowie die hintere und rechte Seite herum abgewickelt und so die Reflexionsfolie auf den Kleiderschrank gespannt. Zuletzt wurde sie an der vorderen rechten Stange wieder herumgewickelt und festgeklebt. Zum besseren Halt ist an jeder Seite mittig oben eine

Musterklemme, die Reflexionsfolie mit der Stoffabdeckung verbindet und so ein herunterrutschen der Folie verhindert.



Innenansicht Grow-Stoffkleiderschrank

Der Lüfter auf dem Bild sollte Frischluft und damit CO₂ in den Schrank bringen. Die Erwärmung der LED Lampen ist jedoch vollkommen ausreichend um für einen konstanten Luftstrom und damit ausreichend Luftaustausch zu sorgen. Dies wurde mittels CO₂-Messgerät nachgemessen.

Auf die Stofftüren wurde ebenfalls Orca Growfilm aufgebracht indem er mit vielen Musterklemmen fixiert wurde.

Ein Karton in der Größe der Innenseite des Kleiderschrankes wurde ebenfalls auf der Unterseite mit Orca Growfilm verkleidet und an zwei Schnüren aufgehängt. Die Schnüre sind um Zahnstocher gewickelt, die die Kraft gleichmäßiger auf den Karton verteilen. Die Schnüre werden mit IKEA-Beutelclips fixiert um die Höhe zu verstehen.

Diese Konstruktion ermöglicht eine flexible Höhenverstellung der Lichtquelle. Zum damaligen Zeitpunkt LEDs auf Aluplatten. Die Decke des Kleiderschrankes wurde nicht verkleidet, da sich der Karton davor befindet.



Höhenverstellbarer Karton bzw. Lichtquelle im Kleidergrowschrank: Ansicht von unten



Höhenverstellbarer Karton bzw. Lichtquelle im Kleidergrowschrank: Ansicht von oben



Höhenverstellbarer Karton bzw. Lichtquelle im Kleidergrowschrank: Deckelansicht mit Höhenverstellmechanismus

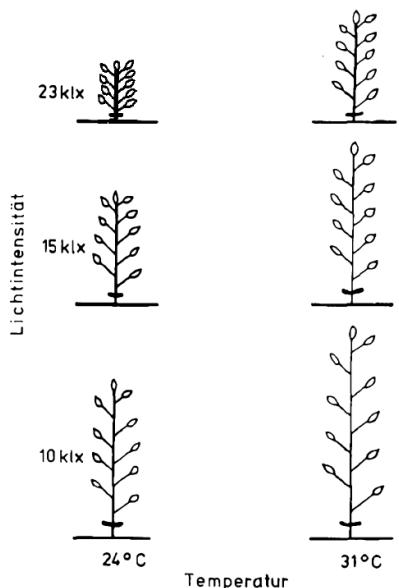
Genauso möglich ist die Lichtquelle fix oben anzubringen und den Boden höhenverstellbar zu machen indem diese mit hineingestellten Kartons reduziert wird.

Mit dieser Lösung erhält man einen leichten und damit transportablen, aber dennoch vielseitigen Growschrank.

3.10 Weitere Wachstumsbedingungen

Nachdem wir uns so sehr mit der Optimierung des Lichtes beschäftigt haben, gibt es hier noch ein paar weitere Faktoren, die es zu beachten gilt. Da dies Auswirkungen von mehr als 10% haben kann, sollten wir uns diesen ebenso intensiv widmen. Die Nachfolgenden Bedingungen können von Pflanze zu Pflanze sehr variieren, deswegen sollte man je nach angebauter Pflanzenart selbst nachrecherchieren. Bevor wir bestimmte Wachstumseigenschaften dem LED-Licht zuordnen, sollten wir wissen, dass es auch in der Natur den einen Wuchstyp nicht gibt. Die Wuchsform und das Aussehen einer Pflanzenart hängt ganz entscheidend von Licht und Temperatur ab. Im Hochgebirge ist es kälter als im Tal und es gibt mehr Licht, auch der Blauanteil ist höher, da die verdunkelnde Atmosphäre dünner ist.

An der folgenden Grafik schlecht zu erkennen: Auch die Blätter werden bei höherer Lichtstärke kleiner ausgebildet. Ein hoher Dunkelrot-Anteil bewirkt ein verstärktes Längenwachstum. Das ist insofern interessant, wenn man mit sehr hohen Beleuchtungsstärken arbeitet und der Hellrotanteil davon nicht ausreicht. Dann kann man mit dunkelroten LEDs nachhelfen, damit die Pflanze eine normale Wuchsform behält (ein größerer Blauanteil erhöht die maximale Photosynthesekapazität, siehe Abschnitt „1.4 Die Wirkung der Lichtwellenlängen“).



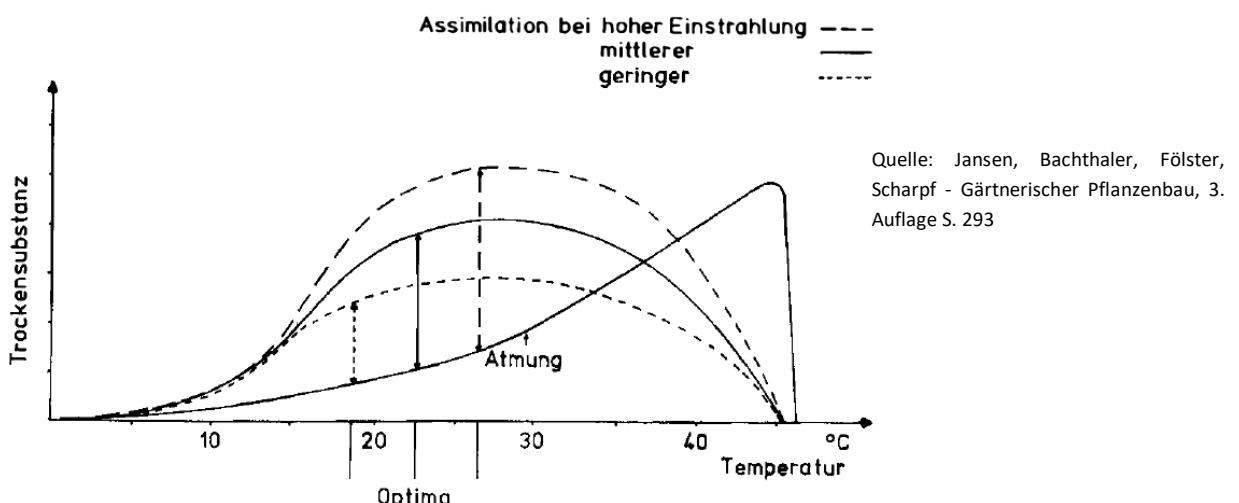
Quelle: Jansen, Bachthaler, Fölster, Scharpf - Gärtnерischer Pflanzenbau, 3. Auflage S. 50

Abb. 32. Einfluß der Lichtintensität auf das Längenwachstum in Abhängigkeit von der Temperatur.

Neben der Lichtstärke an sich, hängt die Wuchsform auch von der Beleuchtungsdauer ab. Im Versuch mit Chrysanthemen wurde das größte Längenwachstum bei 16 bis 20 Stunden festgestellt. Danach wurde die Pflanze wieder kleiner. Siehe dazu auch Abschnitt 3.3 Die optimale Beleuchtungsdauer.

3.10.1 Temperatur

Pflanzen haben einen optimalen Temperaturbereich in dem sie optimal wachsen. Dieser hängt sowohl von der Beleuchtungsstärke als auch von der Art ab. Schauen wir uns als Beispiel den Verlauf bei Tomaten an:

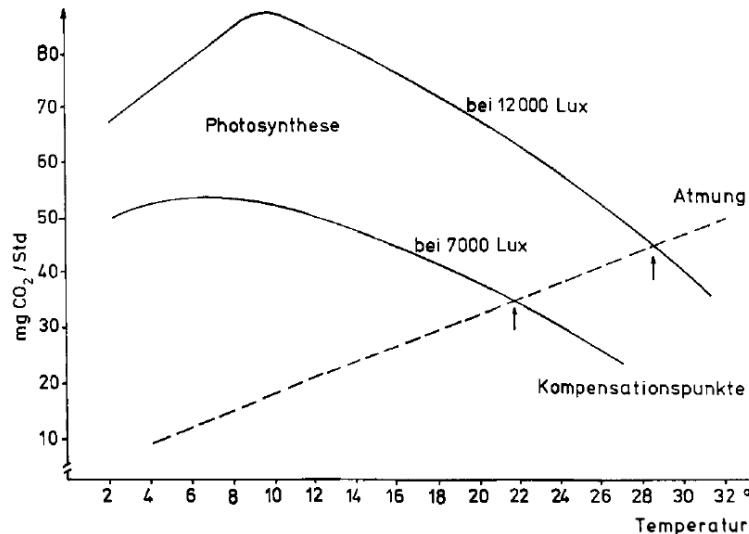


Quelle: Jansen, Bachthaler, Fölster, Scharpf - Gärtnерischer Pflanzenbau, 3. Auflage S. 293

Abb. 152. Verschiebung des Temperaturoptimums in Abhängigkeit von der Einstrahlung bei Tomaten (schematisch).

Die Atmung steigt mit der Temperatur immer schneller an. Das Maximum der Photosyntheseproduktion ist unabhängig von der Lichtmenge bei ca. 27 °C. Wird es wärmer oder kälter, sinkt die Photosyntheserate wieder. Wie stark die Pflanze nun wächst ergibt sich aus der Differenz zwischen Photosyntheseleistung und der Atmung.

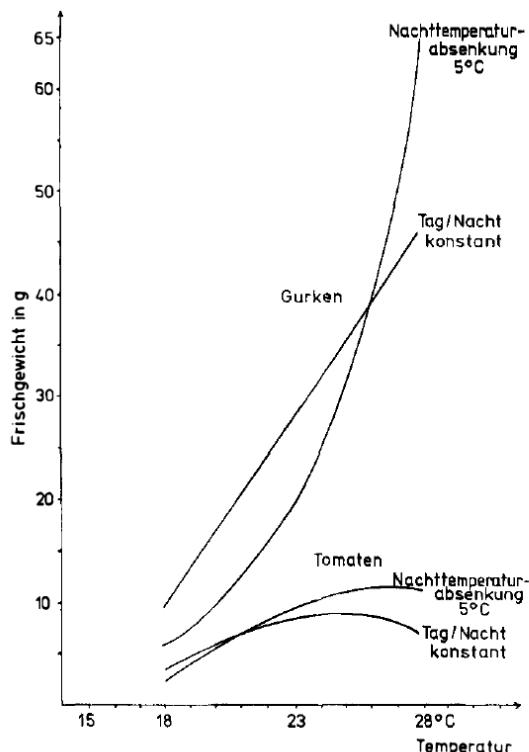
Sehr interessant ist die Grafik für Kopfsalat. Bei 12.000 Lux liegt das Optimum bei kühlen 9 °C, bei 7000 Lux sogar bei 6 °C. Bei erhöhter Zimmertemperatur mit 22 °C und 7000 Lux baut der Salat keine neue Substanz auf, bei 12.000 Lux liegt dieser Punkt bei ca. 28 °C. Es mag überraschen, dass manche Pflanzen bei so kühlen Temperaturen ihr optimales Wachstum aufweisen.



Quelle: Jansen, Bachthaler, Fölster, Scharpf - Gärtnerischer Pflanzenbau, 3. Auflage S. 210

Abb. 108. Photosynthese und Atmung von Kopfsalat in Abhängigkeit von Temperatur und Lichtintensität; Kompensationspunkte bei etwa 22° bzw. 28°C (nach WIEBE und LORENZ 1977).

Da die Atmung rein von der Temperatur abhängig ist, liegt es nahe, die Pflanzen nachts kühler zu stellen. Da nachts keine Photosynthese stattfindet, werden hauptsächlich die tagsüber die erzeugten Produkte in die Wurzeln transportiert (natürlich auch tagsüber), deswegen ist eine zu kalte Temperatur nicht förderlich. Bereits eine Absenkung von 5 °C in der Nacht bringt eine starke Verbesserung des Substanzaufbaus von ca. 60 %. Auch kann man sehr gut erkennen, dass bei zu kühlen Temperaturen mit Nachtabsenkung das Wachstum gegenüber der dauerhaft konstanten Temperatur verringert ist.



Quelle: Jansen, Bachthaler, Fölster, Scharpf - Gärtnерischer Pflanzenbau, 3. Auflage S. 57

Abb. 37. Wachstum von Tomaten und Gurken bei konstanten Temperaturen bzw. bei Wechseltemperaturen zwischen Tag und Nacht.

Zum Abschluss dieses Abschnittes noch eine Tabelle mit verschiedenen Anbaupflanzen und deren optimalen Temperaturbereiche. Heizung ist die Temperatur auf die die Heizung eingestellt ist. Lüftung bedeutet, dass ab dieser Temperatur die Wärme durch Lüftung abgeführt wird. Durch Sonneneinstrahlung sind diese Temperaturen schnell erreicht. Meistens beträgt diese Differenz 4 °C. Dies hat meines Wissens regelungstechnische Gründe (Hysterese), lüftet man schon ab niedrigeren Temperaturen erreicht man schnell wieder die Schwelle bei der die Heizung einschaltet.

Interessant ist der große Unterschied zwischen den verschiedenen Kulturen. Während im oberen Bereich wie bei Tomaten die Temperatur tagsüber auf 20 °C und nachts auf 16 °C geheizt wird, wird bereits ab 24 °C gelüftet um die Temperatur nicht weiter ansteigen zu lassen. Hierbei handelt es sich um die Anzucht von Jungpflanzen.

Bei den Pflanzen im mittleren Bereich handelt es sich um vollständige Kulturen, also von der Keimung bis zur Ernte. So wird hier beim Feldsalat Tag und Nacht auf etwa 3 °C geheizt, aber andererseits gelüftet erst ab 20 - 23 °C, ähnlich beim Radieschen, wobei hier teilweise ab 18 °C bis 23 °C gelüftet wird. Zur schnelleren Keimung hingegen wird die Temperatur anfangs deutlich höher gehalten. Bei den Pflanzen aus dem oberen Bereich ist auch dieser Unterschied deutlich geringer.

Tab. 38. Günstige Sollwerteinstellungen für die Heizung (Tag-/Nachttemperatur in °C) und Lüftung bei Gemüsekulturen im Gewächshaus

Jungpflanzen-anzucht	Heizung T/N °C		Lüftung °C
	zur Keimung	nach Aufgang	
Aubergine	24/20	24/20–20/16	28
Chinakohl	22/18	22/18	24
Fenchel	18/14	18/14–12/10	24
Gurken	24/20	24/20–22/18	28
Kohlrabi	16/12	12/10–10/6	20
Kopfkohl	16/12	12/10–10/6	20
Kopfsalat	16/12	12/10–10/6	20
Melone	24/20	22/18–20/16	28
Paprika	24/20	24/20–20/16	28
Petersilie	16/12	12/10	20
Porree	20/16	18/14–16/12	24
Sellerie	20/16	20/16	24
Stangenbohnen	22/18	20/16	24
Tomaten	22/18	20/16	24
Rosenkohl	16/12	10/6	20
Schnittlauch	18/14	18/14–15/10	24
Zucchini	20/16	18/14	24

Frühjahr-/Herbstkul-turen	Herbst		Frühjahr	
	Heizung T/N °C	Lüftung °C	Heizung T/N °C	Lüftung °C
Feldsalat*	3/ 3	23–20	12/10 → 3/3	23–20
Kohlrabi	10/ 6	23–20	12/10 → 10/6	23–20
Petersilie	12/10	25–23	12/10	25–23
Radies *	3/ 3	18–16	12/10 → 8/6 → 3/3	23–18
Rettich*	12/10–10/6	20–18	12/10 → 10/6	23–20
Kopfsalat	3/ 3	20–16	10/ 6 → 8/6	20–16
Spinat	3/ 3	20–18	8/ 6	20–18
Porree	1. Woche 16/12 danach 12/10		25–23	
Sellerie	1. Woche 16/12 danach 12/10		25–22	

* 1–2 Wochen nach Aussaat 12/10°C für eine schnellere Keimung

Sommer-kulturen	1. Woche nach Pflanzung	März	April	Mai-Sept	Lüftung °C
Gurken	22/18	20/16	20/16	18/14	25–23
Paprika	22/18	20/16	20/16	18/14	25–23
Stangenbohnen	20/16	20/16	18/14	12/10	24–22
Tomaten	20/16	18/14	18/14	18/14	25–22
Zucchini	18/14	18/14	18/14	12/10	25–22

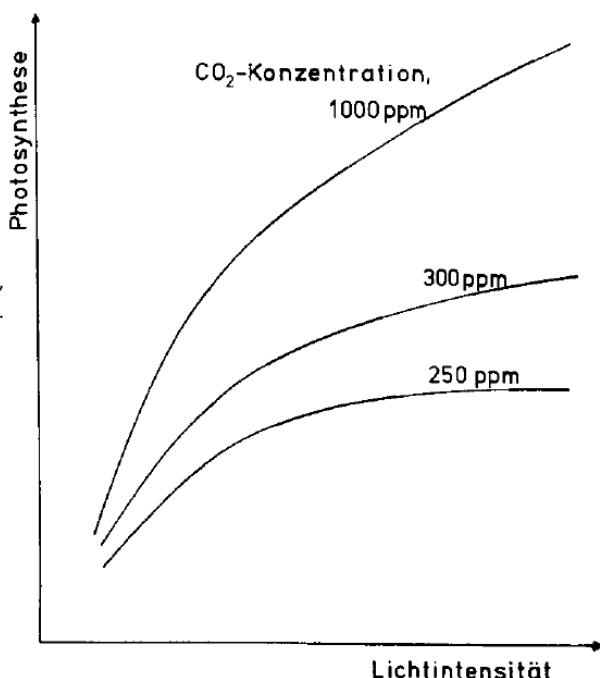
Quelle: Jansen, Bachthaler, Fölster, Scharpf - Gärtnerischer Pflanzenbau, 3. Auflage S. 299

3.10.2 CO₂-Versorgung

Pflanzen brauchen für die Photosynthese Kohlenstoffdioxid. Je höher der CO₂-Gehalt an der Pflanze ist, desto mehr Licht kann gegeben werden bevor die C3-Pflanze in Lichtsättigung geht. Bei C4-Pflanzen ist letztere größtenteils unabhängig vom CO₂-Gehalt. Hierzu zwei Grafiken:

Quelle: Jansen, Bachthaler, Fölster, Scharpf - Gärtnerischer Pflanzenbau, 3. Auflage S. 209

Abb. 107. Photosyntheseraten von Tomatenblättern in Abhängigkeit von Lichtintensität und CO₂-Konzentration (aus ITO 1973).



Strahlung
Wh/m²/d

Quelle: Jansen, Bachthaler, Fölster, Scharpf - Gärtnerischer Pflanzenbau, 3. Auflage S. 377

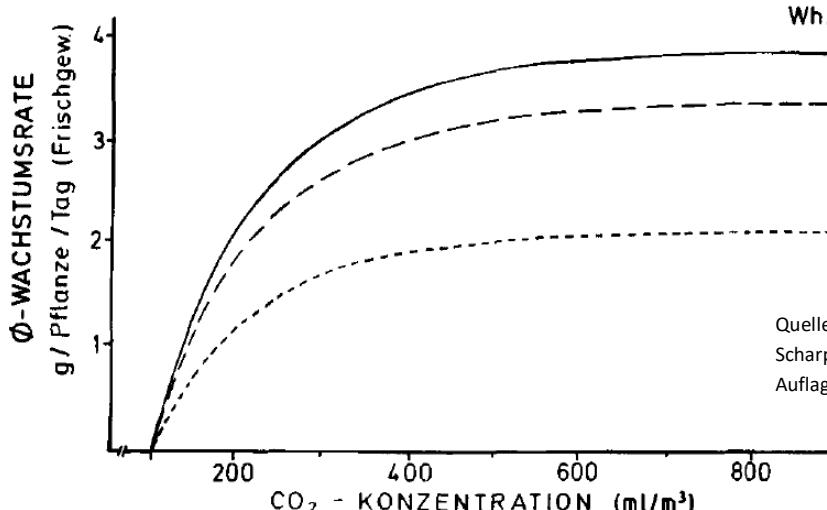


Abb. 192. Wachstumsraten von Kopfsalat bei 14°C in Abhängigkeit von CO₂-Konzentration und Lichtintensität (Winterkultur) (nach MANN 1986).

Wie man sieht, wächst bei ausreichend Licht die Pflanze mit größerem CO₂-Gehalt schneller. Wir sind übrigens im Moment bei einem CO₂-Gehalt von 0,04 % (=400 ppm = 400 ml/m³) und haben damit schon ein relativ gutes Wachstum. Den aktuellen CO₂-Gehalt kann man z.B. mit dem „Aircontrol CO₂ Monitor Mini TFA 31.5006“ messen. Dieses Messgerät ist mit ca. 70 € vergleichsweise preiswert, geht

dafür „nur“ bis 0,3 % CO₂ (3000 ppm). Die angegebene Genauigkeit mit +- 7 % für unsere Zwecke vollkommen ausreichend. Es gibt eine PC-Software dazu mit der man den Verlauf am PC aufzeichnen kann. Nachteil an diesem vergleichsweise günstigen Gerät: Es kalibriert sich einmal alle 8 Tage in dem es den niedrigsten gemessenen CO₂-Wert als 400 ppm nimmt. Die Netatmo-Wetterstationen gehen genauso vor. Man kann das allerdings deaktivieren. Man lässt das Gerät für 8 Tage im Freien, startet es neu, sodass der CO₂-Wert genau genug angezeigt wird. Wenn nicht, lässt man es nochmals 8 Tage im Freien. Dann nimmt man den Deckel hinten ab, zwei Taster sind nun freigelegt und man kann das Gerät wie in der Originalanleitung in Englisch beschrieben einstellen.
<http://www.co2meter.com/collections/fixed-wall-mount/products/co2mini-co2-indoor-air-quality-monitor> Alternativ gib es als Modul den MH-Z19 CO₂ Sensor für ca. 20 € aus China. Zusammen mit einem ESP32 oder Raspberry PI lässt sich damit ebenfalls der CO₂-Gehalt messen. Der Sensor kann direkt per Kabel auf einen Wert von 400 ppm kalibriert werden. Im Gegensatz zum TFA Gerät zeigt er allerdings niemals weniger als 400 ppm CO₂ an.

Zu viel CO₂ ist für die Pflanzen schädlich (je nach Quelle ab 0,5 – 1 % Vol.-Anteil, das sind 5000 bis 10000 ppm CO₂). Möchte man mit CO₂ düngen kommt man um eine professionelle Anlage, die in Abhängigkeit vom aktuellen CO₂-Gehalt entsprechend dosiert, nicht herum. Dies ist natürlich nicht günstig. Billiger ginge es mittels Verbrennung, allerdings ist das wegen Brandgefahr nicht zu empfehlen, hinzukommt die Gefahr einer Kohlenmonoxidvergiftung. Auch Kerzen sind nicht ungefährlich und dürfen niemals unbeaufsichtigt brennen. 1 Gramm Paraffinwachs erzeugt ungefähr 3 Gramm CO₂ (<http://www.chemieonline.de/forum/showthread.php?t=88577>). Ein Teelicht (je nach Hersteller) enthält ca. 10 Gramm und brennt ca. 4 Stunden. D.h. pro Stunde verbrennen 2,5 Gramm Wachs, was 7,5 g CO₂ oder ca. 3,75 Liter macht. Ein Beutel mit 100 Teelichern kostet ca. 3 € und ergeben 3 kg CO₂, macht einen CO₂-Kilopreis von 1 €. Man kann sog. „Schwimmlichter“ kaufen. Mit diesen kann man Pflanzenöl statt Wachs als Brennstoff verwenden. Der Liter Rapsöl kostet 99 Cent und verbrennt zu ca. 2,6 kg CO₂, macht einen CO₂-Kilopreis von 38,1 Cent. Ein normaler Docht hält aber nur wenige Tage, danach ist er soweit verbrannt, dass die Flamme erlischt. Um dem vorzubeugen kann man einen 2mm Glasfaserdocht kaufen. Dieser verbrennt nicht, muss aber ca. einmal täglich von Rußrückständen befreit werden, ansonsten brennt die Flamme deutlich schwächer. Achtung zieht der Glasfaserdocht Wasser brennt er nicht mehr richtig, deshalb immer rechtzeitig Öl nachfüllen. Unbedingt mind. Eine 1 cm Wasserschicht unterhalb des Öles haben. Bei Öl mangel liegt ein größeres Stück Docht frei, die Flamme wird deutlich größer, ruft und das Plastik des Schwimmlichtes schmilzt. Die Wasserschicht dient der Sicherheit und verringert das Risiko eines Brandes. Neben der Brandgefahr ist die die Stickoxidbelastung problematisch, da diese die Pflanzen schädigen. Stickoxide das sind die Schadstoffe, bei denen VW getrickst hatte. <http://www.umweltbundesamt.de/service/uba-fragen/warum-sind-stickstoffoxide-schaedlich>

Gefahrlos kann man CO₂ auch mittels Hefe (z.B. Trockenhefe oder Frischhefe) in Zuckerwasser erzeugen. Durch die Gärung entsteht neben CO₂ auch noch Alkohol. Irgendwann ist der Alkoholgehalt so hoch, dass die Hefe abstirbt. Es steigen dann keine Gasbläschen mehr auf, die Lösung klart sich auf und am Boden sammelt sich eine Art Schlamm. Das ist die abgestorbene Hefe. Es ist Zeit den Ansatz zu erneuern. Je nach Zuckerdosierung bleibt davon etwas ungenutzt in der Lösung zurück. 1 kg Zucker ergibt unter vollständiger alkoholischer Vergärung (der Sauerstoffeintrag wird vernachlässigt, da zu gering)

ca.	125	Gramm	CO ₂ .
-----	-----	-------	-------------------

<http://hobbybrauer.de/modules.php?name=eBoard&file=viewthread&tid=2675> Das Kilo Zucker kostet 69 Cent, macht einen CO₂-Kilopreis von 5,52 €. Würden wir der Hefe Sauerstoff zuführen

(energieintensiv), würde sich die CO2-Menge verdreifachen, 375 Gramm CO2, macht einen Kilopreis von 1,84 €.

Die CO2-Erzeugung durch alkoholische Gärung wird allerdings durch deren Dauer uninteressant. <https://web.archive.org/web/20180910021116/http://www.d-steini.de/wein/305.htm> Man rechnet für die Gärung mit ca. 4 Wochen. Die Rezepte gehen meistens von 200 Gramm Zucker in 250 ml Wasser aus. Diese Mischung wird mit einer Tüte Tortenguss aufgekocht. Nach Erkalten wird die Hefe, ein paar Löffel Zucker und etwas Wasser dazugegeben. Durch die Gelee-Masse erfolgt die CO2 Freisetzung gleichmäßiger. Gehen wir von 10 kg Zucker aus, macht das ca. 44 Gramm CO2 pro Tag. Das macht es relativ uninteressant, hinzu kommt die Geruchsbelastung.

Schauen wir uns folgendes Zitat an: „Unter Berücksichtigung der im Gewächshaus stark schwankenden Licht- und Temperaturbedingungen scheint für die meisten Kulturen der anzustrebende Optimalbereich bei 600 bis 800 ml/m³ CO2 zu liegen (die Mehrerträge erreichen unter Praxisbedingungen 10 bis 20%). Sehr häufig reicht es bereits, die CO2-Konzentration unmittelbar an der Pflanze bei 400 ml/m³ zu halten, um einen positiven Effekt zu bekommen. Bei ausreichendem Luftvolumen ist dies schon durch Luftumwälzung (Ventilator) möglich. Höhere Konzentrationen als 800 ml/m³ führen zwar bei einzelnen Pflanzenarten noch zu Mehrerträgen, doch nimmt das Risiko von Pflanzenschäden zu.“ (Zitat aus Jansen, Bachthaler, Fölster, Scharpf - Gärtnerischer Pflanzenbau, 3. Auflage S. 90).

Der einfachste und kostengünstigste Weg ist also der Einsatz eines Ventilators. Bereits ein ganz schwacher Luftstrom reicht hierfür aus. Je nach Anbaugröße kommen hier normale Standventilatoren, wie man sie auch im Sommer verwendet, oder kleinere USB-Ventilatoren in Frage. Ein normaler Standventilator braucht selbst auf kleinster Stufe schnell zwischen 20 und 30 Watt, ein USB Ventilator ca. 0,5-5 Watt. Die CO2-Menge in der Wohnung ist durch die ausgeatmete Luft der Bewohner nochmals größer als im Freien. Der Mensch stößt pro Stunde ca. 22 Liter CO2 (ungefähr 44 Gramm) aus [http://www.buerger-für-technik.de/body_co2-abgabe_an_die_atmosphare.html](http://www.buerger-fuer-technik.de/body_co2-abgabe_an_die_atmosphare.html). Dieser Wert ist bezogen auf einen ruhenden Menschen. Ist man körperlich aktiv, stößt man deutlich mehr CO2 aus. Gehen wir von einem 25 m² Raum mit einer Höhe von 2,5 Metern aus. Das macht 62,5 m³ Volumen. Die zusätzlichen 22 Liter CO2 machen eine Erhöhung des CO2-Gehaltes der Luft um 352 ppm pro Stunde (bei komplett luftdichter Wohnung) oder nach 24 Stunden um 8.448 ppm. Wieviel CO2 durch die Pflanzen abgebaut wird, hängt natürlich von der Pflanzenmenge und Größe ab. Schauen wir uns hierzu die Grafik zur CO2-Aufnahme von Auberginen auf Seite 23 in „3.10.6 Weitere Effekte“ an. 1 m² Auberginen benötigt bei 50.000 Lux zu Beginn 25 Liter CO2 pro Stunde, also ungefähr so viel wie ein Mensch erzeugt.

Fazit: Für unsere Zwecke kann je nach Anbaugröße in den meisten Fällen auf eine CO2-Düngung verzichtet werden. Ein schwacher Luftstrom zur Verbesserung der CO2-Versorgung ist meistens ausreichend. Ist man zu wenig anwesend, sollte man lüften damit mehr CO2 hereinkommt.

Um selbst einen Eindruck von den Auswirkungen eines leichten Windes zu bekommen, kann man ein kleines Experiment machen. Zwei Teller mit der gleichen Menge Wasser gefüllt werden in einem Raum platziert, zwischen die beiden Teller kommt ein großer Karton oder etwas Ähnliches, damit sie voneinander windtechnisch getrennt sind. Einen dieser beiden Teller lässt man nun von einem schwachen Luftstrom anblasen. Es reicht wirklich schon ein schwacher Luftstrom und man wird sehen, dass aus diesem Teller deutlich schneller das Wasser verdunstet sein wird. Bitte darauf achten, dass

kein Sonnenschein auf die Teller fällt um das Ergebnis vergleichbar zu halten. Durch den künstlichen Wind steigt selbstverständlich auch der Wasserbedarf der gezogenen Pflanzen.

3.10.3 Düngung

Auch eine optimale Nährstoffversorgung ist für ein schnelles und gesundes Pflanzenwachstum wichtig. Dieses Thema ist sehr komplex, es wird hier nur eine kleine Einführung gegeben und selbst diese ist umfangreich. Man unterscheidet Makronährstoffe, von diesen benötigt die Pflanze sehr viele. Hierbei handelt es sich um:

- Stickstoff
- Phosphor
- Kalium
- Calcium
- Magnesium
- Schwefel

Eine Übersicht zu den Makronährstoffen, ihre Mangel- und Überdüngungserscheinungen findet sich hier <http://www.duenger-und-erde.de/hintergrundwissen/pflanzen-naehrstoffe.html>

Stickstoff ist zwar jede Menge in der Luft vorhanden, allerdings können ihn die Pflanzen in der gasförmigen Form nicht verwerten. Von Phosphor herrscht in den Gewässern ein Mangel, deswegen tritt bei Phosphorzufuhr durch Abwasser schnell eine Algenblüte ein, wodurch das Gewässer durch die absterbenden Algen und der damit verbundene Sauerstoffverbrauch oftmals umkippt. Es fehlt an Sauerstoff, die Fische sterben. Aus diesem Grund wurde Phosphor aus Waschmitteln und Geschirrspülmitteln verbannt. Der Mangel entsteht, weil Phosphor sehr leicht chemische Verbindungen bildet, die schwer in Wasser löslich sind. Dadurch fällt er aus, sinkt zu Boden und ist für die Algen nicht mehr verfügbar. Bei Landpflanzen ist dieses Problem weniger stark ausgeprägt, da viele Pflanzen in ihrer unmittelbaren Wurzelumgebung den pH-Wert senken können, wodurch der Phosphor wieder aufgeschlossen werden kann.

Daneben gibt es noch die Mikronährstoffe. Hiervon benötigt die Pflanze deutlich weniger, in Nährlösungen unter 1 mg/l. Obwohl im Boden genug Nährstoffe vorhanden sein können, sind sie nicht immer pflanzenverfügbar. Durch Überdüngung mit einem Nährstoff, kann die Verfügbarkeit eines anderen stark abnehmen, sodass es zum Mangel kommt. Die Verfügbarkeit der Nährstoffe hängt ebenfalls vom pH-Wert ab, manche gehen bevorzugt bei saurem Substrat in Lösung (z.B. Eisen und Mangan), andere bei alkalischem. Dies kann schnell zu einem Mangel oder einer Überdüngung führen. Wegen der Nährstoffverfügbarkeit sollte der pH-Wert im leicht sauren Bereich zwischen 5,5 und 6,5 liegen. Die Mikronährstoffe im Einzelnen:

- Eisen
- Mangan
- Molybdän
- Kupfer
- Zink
- Bor

- Chlor

Eine gute Übersicht über die Aufgaben und Mangelsymptome der Mikronährstoffe findet sich hier <http://www.duenger-und-erde.de/hintergrundwissen/spurennahrstoffe.html>

Mikro- und Makronährstoffe sind essentiell, d.h. es werden alle für ein gesundes Pflanzenwachstum benötigt. Neben diesen notwendigen Nährstoffen gibt es noch sog. nützliche Elemente. Diese fördern bei manchen Pflanzen an bestimmten Standorten das Wachstum. Unter normalen Wachstumsbedingungen sind sie entbehrlich. Die Angaben dieser einzelnen Elemente variieren von Quelle zu Quelle, weswegen hier nicht tiefer darauf eingegangen wird.

Die meisten Flüssigdünger sind sog. N-P-K-Dünger, also Stickstoff, Phosphor und Kalium, teilweise enthalten sie noch Spurenelemente. Kalzium und Magnesium (bilden die Wasserhärte) sowie Schwefel (Sulfate) sind im Leitungswasser bereits enthalten. Bei Calciumgehalten zwischen 50 und 100 mg/l und Magnesiumgehalten von 20 bis 40 mg/l wird der Bedarf normalerweise allein durch das Gießwasser gedeckt. In festen Düngermischungen sind letztere manchmal enthalten.

Es gibt organische und anorganische Dünger. Bei ersterem sind die Nährstoffe in organischer Substanz gebunden. Diese muss erst zersetzt werden, bevor die Pflanzen sie verwenden können. Dadurch setzt die Düngerwirkung langsamer, dafür gleichmäßiger und länger anhaltend ein. Die Gefahr einer Auswaschung ist relativ gering. Bei anorganischen Düngern sind die Nährstoffe direkt als Salz vorhanden. Beachte: Salz meint hier nicht das normale Kochsalz (Natriumchlorid). Versalzung im Pflanzenbereich meint die Anreicherung von Nährstoffsalzen im Substrat. In Flüssigdüngern sind einige Nährstoffe als sog. Chelat-Komplexe enthalten, dadurch können sie von den Pflanzen besser aufgenommen werden und eine insgesamt geringere Konzentration im Dünger ist ausreichend um die Pflanze damit zu versorgen. Chelate sind organische Moleküle, welche die Nährstoffionen festhalten und dadurch verhindern, dass sie durch Bildung unlöslicher Verbindungen ausfallen. Gerade Eisen neigt schnell dazu unlösliches Eisenoxid zu bilden. Chelate sind nur in einem bestimmten pH-Bereich wirksam. Außerhalb dieses Bereichs können sie die Metallionen nicht mehr festhalten, sie lösen sich und bilden die wasserunlöslichen Verbindungen. Aus diesem Grund ist die Einhaltung eines sauren pH-Wertes so wichtig (http://www.welker-gartenbauartikel.de/index.htm_files/Chelatierte-Spurenelemente-YARA.pdf). Es gibt zwar Chelate wie EDDHA, die laut Herstellerangaben auch bis zu einem pH-Wert von 8 stabil sein sollen, im praktischen Versuch zeigte sich jedoch, dass ein niedriger pH für den Wuchs am besten ist. Es wurde zwar beim hohen pH-Wert und EDDHA mehr Eisen aufgenommen, dafür wurden allerdings weniger Mangan, Kupfer und Zink aufgenommen. In diesem Versuch lag nur Eisen chelatisiert vor. <https://web.archive.org/web/20170922024406/http://edepot.wur.nl/14218> Einen Dünger mit allen Spurenelementen und EDDHA-Chelaten konnte ich leider nirgends finden und selbst wenn, wäre dieser wahrscheinlich extrem teuer. Die Kontrolle des pH-Wertes bleibt zunächst der einzige gangbare Weg für ein optimales Wachstum.

Man unterscheidet auch noch zwischen beweglichen und unbeweglichen Nährstoffen. Bewegliche Nährstoffe kann die Pflanze bei Mangel an den benötigten Ort transportieren, unbewegliche Nährstoffe verbleiben fest an Ort und Stelle, wo sie ursprünglich eingebaut wurden. Ein Mangel an beweglichen Nährstoffen äußert sich darin, dass zuerst die ältesten Blätter absterben. Bei unbeweglichen Nährstoffen hat der Austrieb Probleme.

Neben dem pH-Wert hängt die Nährstoffverfügbarkeit und Wasseraufnahmekapazität der Wurzeln auch von der Temperatur ab. Ist der Boden deutlich kälter als die Luft, haben es die Wurzeln schwerer genügend Wasser aufzunehmen. Ist der Boden zu warm (ab ca. 30 °C), droht Wurzelfäule, da warmes Wasser deutlich weniger Sauerstoff aufnehmen kann.

Bitte bei Düngern darauf achten, dass dort „chlorarm“ steht. Laut EU-Verordnung dürfen sie aber immer noch 2 % Chlor enthalten (das bisschen Chlor, welches die Pflanze braucht bekommt sie schon über das Leitungswasser). Man stelle sich vor wieviel Chlor die Dünger enthalten, auf denen das nicht angegeben ist. Chlorid-Salze sind für den Düngerproduzenten günstiger, weswegen diese bevorzugt eingesetzt werden. Allerdings kann ein chlorarmer Dünger für den Verbraucher günstiger als der chlorhaltige sein. Beispielsweise kostet der chlorarme K-Class (Kaufland) Universaldünger je Liter 1,25 €, der B1 Universaldünger mit identischer Nährstoffangabe 1,59 € pro Liter ohne Aufdruck „chlorarm“ (Stand 2017).

Es gilt das Minimumprinzip, d.h. ein Mangel an einem essentiellen Nährstoff kann nicht durch einen anderen Nährstoff ausgeglichen werden, allerdings gilt, dass die Pflanze umso besser wächst, je mehr die anderen Nährstoffe in ihrem optimalen Bereich sind.
[\(<https://de.wikipedia.org/wiki/Minimumsgesetz>\)](https://de.wikipedia.org/wiki/Minimumsgesetz)

Hier eine Grafik zur Veranschaulichung. Im optimalen Nährstoffbereich wächst die Pflanze am besten.

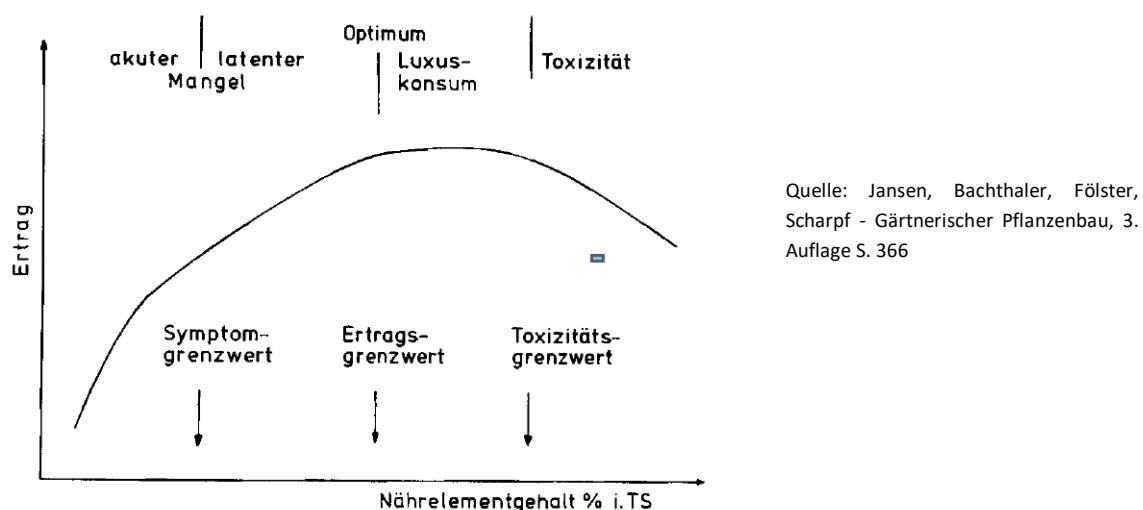


Abb. 187. Beziehung zwischen dem Nährelementgehalt in der Pflanze und dem Ertrag (aus FINCK 1982).

Der Nährstoffbedarf einer Pflanze ist nicht konstant, sondern ändert sich im Verlauf des Wachstums. So sinkt beispielsweise der Kalium- und Stickstoffbedarf stark, während der Calciumbedarf stark steigt, wie die folgende schematische Abbildung zeigt. Der Phosphorbedarf bleibt hingegen relativ konstant.

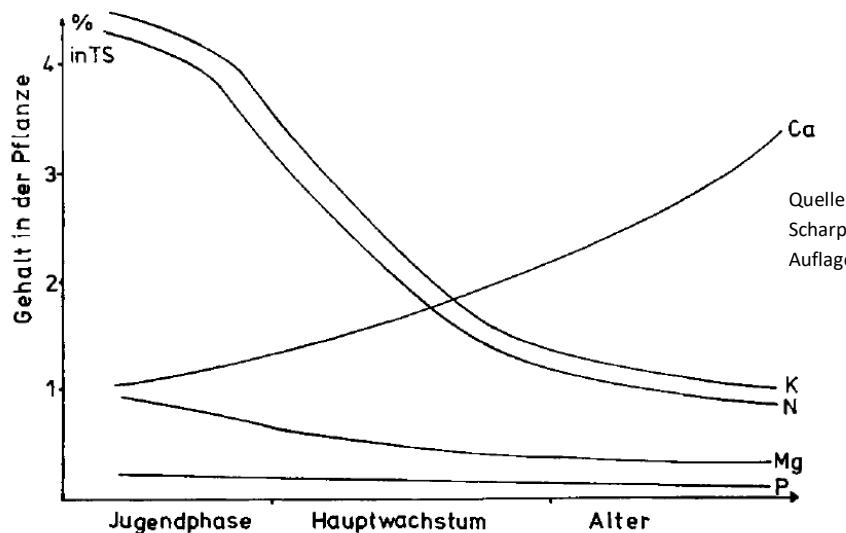


Abb. 188. Veränderungen von Nährelementgehalten in der Pflanze im Verlauf der Entwicklung (schematisch).

Wie man an nachfolgender Grafik am Beispiel von Spinat erkennen kann, ändern sich sowohl der Ertrag als auch für die Ernährung wichtige Inhaltsstoffe je nach vorhandenem Nährstoffangebot, sodass es schwierig ist von „der optimalen Nährstoffversorgung für die Pflanze“ zu sprechen.

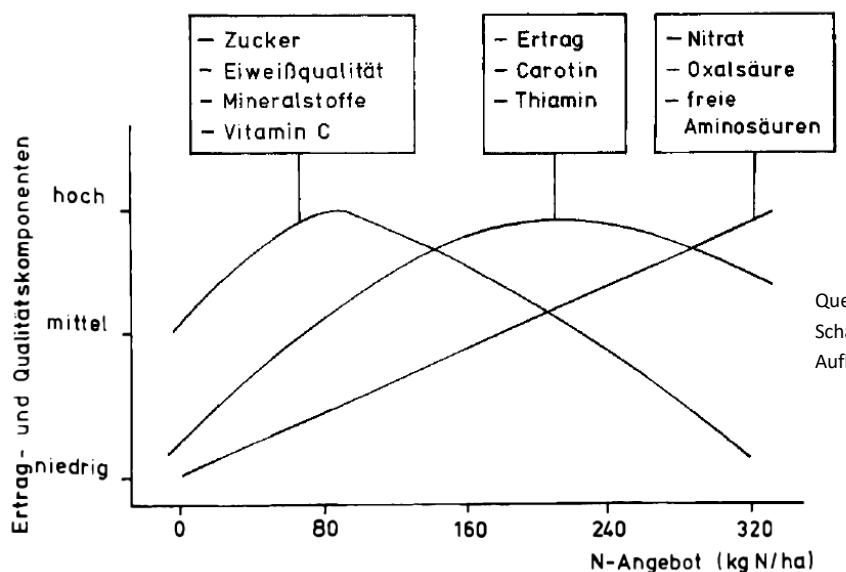


Abb. 174. Ertrags- und Qualitätskomponenten in Abhängigkeit von der N-Versorgung bei Spinat (schematisch).

3.10.3.1 EC-Wert

Ein grober Anhaltspunkt über die Nährstoffkonzentration gibt der EC-Wert (electric conductivity). Je mehr Nährsalze im Wasser gelöst sind, desto stärker leitet es. Die verschiedenen Ionenarten tragen unterschiedlich stark zur Erhöhung des Leitwertes bei, daher ist er nur ein Anhaltspunkt. Der EC-Wert wird in mS/cm (Milli-Siemens), $1 \text{ mS/cm} = 1 \text{ EC} = 1000 \mu\text{S/cm}$. Achtung: Unterhalb eines pH-Wertes von 4,5 ist der EC-Wert durch die Wasserstoffionenkonzentration stark erhöht, je niedriger der pH-Wert, desto stärker. Je wärmer das Wasser, desto höher der EC-Wert. Das hiesige Trinkwasser hat z.B. bei 20 °C laut Trinkwasseranalyse einen EC-Wert von 0,46, bei 25 °C 0,51. Details zum Umrechnen gibt es hier <http://www.aqion.de/site/130> Es gibt eine lineare Methode, welche einfacher anzuwenden ist und eine kompliziertere. Die lineare Methode arbeitet mit der Formel $\text{EC25} = \text{EC} / [1 + a (t - 25)]$, wobei $a = 0,02$ ist. EC25 ist der EC-Wert bei 25 Grad, T ist die Temperatur in Celsius. Setzt man in diese Formel 0,46 und 20 °C ein, kommt man auf 0,51111.

Pflanzen nehmen das Wasser über einen Vorgang namens Osmose auf. Ist Wasser unterschiedlicher Salzgehalte über eine semipermeable Membran getrennt, ist das Wasser bestrebt Ausgleich zu schaffen. Das Wasser diffundiert in die Lösung mit dem höheren Salzgehalt, wodurch sich diese verdünnt und die andere Lösung aufkonzentriert, solange bis dieselbe Konzentration zwischen beiden Seiten herrscht.

Für Pflanzen heißt das, dass sie osmotisch wirksame Substanzen z.B. Glucose, organische Säure und insbesondere Ionen in den Wurzeln einlagern. Ist der Salzgehalt im Wasser zu hoch (z.B. durch Überdüngung), können sie nur sehr schwer oder gar kein Wasser aufnehmen. Sie schließen dann die Spaltöffnungen um die Verdunstung zu reduzieren und Wasser zu sparen. Reicht auch das nicht aus, beginnen sie zu welken. Da Keimlinge oder junge Stecklinge noch kaum Gelegenheit hatten etwas in den Wurzeln einzulagern, sind sie laut Literatur für Überdüngung besonders gefährdet und benötigen deswegen anfangs keinen oder nur sehr weniger Dünger. Die Düngerkonzentration kann dann allmählich gesteigert werden. Dies beugt Salzstress vor und die Pflanzen wachsen besser. Für Tomaten wird bei frischen Kulturen im Hydroanbau ein EC-Wert von 1,5 empfohlen, den man dann im Laufe einer Woche auf den endgültigen Wert von 2,2 steigern soll. Anschließend sollte die Konzentration ebenfalls möglichst konstant gehalten werden.

Bei Erdkulturen sorgt die Erde für einen gewissen Puffereffekt, deswegen kann dort der Nährstoffgehalt in der Düngerlösung höher liegen als bei Hydrokultur, wo man von einer sog. Nährlösung spricht. So ergibt der Substral Pflanzennahrungsdünger (welcher leider kein Bor enthält) bei Leitungswasser mit einem EC-Wert von 0,46 EC (20 °C) in der für Zimmerpflanzen in Erde empfohlenen Mischung einen EC-Wert von 4,8 EC, in der Dosierung für Hydropflanzen sind es ca. 1 EC, jeweils bei 20 °C. [\(leider nur noch via <https://www.yumpu.com/de/document/read/21876620/download-pdf-hauertcom> zugänglich\)](https://hauert-duenger.de/fileadmin/user_upload/hauert_profi_de/Das_wichtigste_zur_Duengung.pdf) S. 58 spricht bei salzverträglichen Pflanzen von 2,0 EC bis 2,5 EC im Gießwasser (1,3-1,8 EC), bei weniger empfindlichen 1,5-2 EC (0,8-1,2 EC), empfindlich 1,0-1,5 EC (0,6-0,8 EC) und sehr empfindlich 0,5-1,0 EC (0,4-0,6 EC). In Klammern die Werte für das Substrat. Der Wert für das Substrat bestimmt man indem 200 ml entmineralisiertes Wasser in ein Gefäß gegeben werden, anschließend wird mit Boden mit bis zu einer 300 ml Markierung aufgefüllt. Es wird eine Minute lang geschüttelt und anschließend direkt der EC-Wert dieser Suspension gemessen. Jungpflanzen sind der Kategorie empfindlich

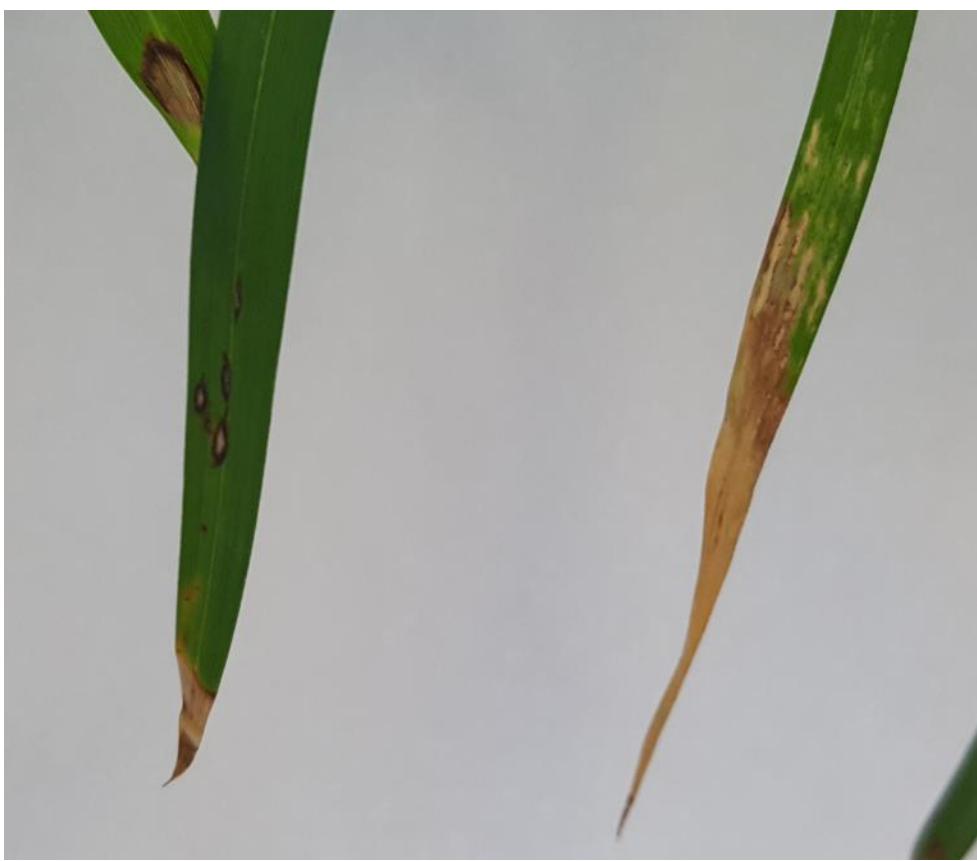
zugeordnet. Eine Temperaturangabe steht nicht dabei. Grundsätzlich wird der EC-Wert auf 25 °C bezogen, sodass auch von dieser Temperatur auszugehen ist.

Die angegebenen EC-Werte des Gießwassers gelten bei Einsatz von Regenwasser. Bei Leitungswasser muss dessen EC-Wert zu diesen Werten hinzugaddiert werden. Ist z.B. ein EC-Wert von 2,0 für die Pflanze im Gießwasser erlaubt und hat das Leitungswasser einen EC-Wert von 0,5 so ist für die resultierende Lösung ein EC-Wert von 2,5 für die Pflanze in Ordnung. Oder umgekehrt man kann beim Ansetzen von Düngerlösungen von dessen EC-Wert den EC-Wert des Leitungswassers abziehen. Dies gilt allerdings nur, wenn der EC-Wert hauptsächlich durch die Wasserhärte verursacht wird. Aufschluss darüber gibt die Trinkwasseranalyse, die die Wasserversorger meistens im Internet zur Verfügung stellen. Hintergrund ist, dass Calcium und Magnesium-Ionen nur sehr wenig osmotisch wirksam sind http://www.hortipendium.de/Gie%C3%9Fwasser#Pflanzenn.C3.A4hrstoffe_als_Inhaltsstoffe. Diese geringe osmotische Wirkung hat vermutlich zwei Ursachen. Zum einen fällt der Kalk der sog. Karbonhärte bei Verdunstung als Calciumcarbonat aus, zum anderen ist das molare Gewicht der Carbonate im Vergleich zu Salzen wie NaCl deutlich höher. Einer zusätzlichen Kalzium- oder Magnesiumdüngung bedarf es nicht, wenn der Kalzium-Gehalt zwischen 50 und 100 mg/l liegt, bei Magnesium sind es 20 bis 40 mg/l (s.o.).

Bevor ich mich genauer mit dem EC-Wert beschäftigte, hatte ich ein Zyperngras aus Versehen mit ca. 10-11 EC gewaltig überdüngt. Glücklicherweise gehört diese Pflanzen zu den moderat salztoleranten Pflanzen. Bei frisch bewurzelten Ablegern wird überschüssiges Salz in den übriggebliebenen Stängel transportiert, welcher dann abstirbt. Gleichzeitig scheidet die Pflanze an der Basis Salze aus. Die Blätter rollten sich teilweise ein. Die braunen Blattspitzen wanderten langsam mit einer Geschwindigkeit von ca. 1-2 cm / Monat in Richtung Stängel, sodass der Überdüngungsschaden nur sehr schleichend bemerkbar machte. Auf manchen Blättern entstanden, wie im übernächsten Bild zu sehen, auch weiter innen kreisförmige bis ovale braune Flecken, die von dunkelbraunen Ringen umgeben wurden. Das Zypergras wuchs trotz Nordostfensters teilweise bis zu 4 cm am Tag. Junge Ableger verkrafteten die Überdüngung deutlich schlechter. Es starben die kleinen Blätter teilweise schon wieder ab bevor sie richtig ausgetrieben waren. Interessanterweise flog in diesen Topf ein Samen einer Spuckpalme (Madagaskarjuwel, Euphorbia leuconeura) und dieser keimte. Eine gesunde Pflanze entwickelt sich daraus und das obwohl Sämlinge sehr salzempfindlich sein sollen. Auch das Drainagewasser einer Grünlilie hatte mehr als 10 EC aufgrund von Salzanreicherungen durch entwässertes Wasser (s.u.) und trotzdem wächst diese Pflanze bis auf ein paar braune Blattspitzen gesund.

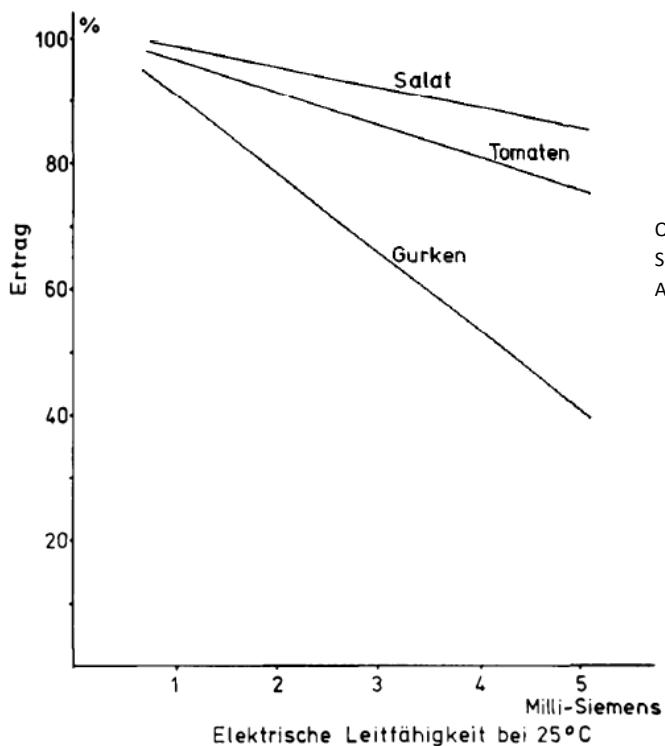


Salzausscheidungen bei überdüngtem Zypergras



Braune Blattspitzen sowie dunkle Flecken im Blatt durch Überdüngung.

Nachfolgende Grafik zeigt den Einfluss des Salzgehaltes auf die Ernte. Diese Werte sind für das Rohwasser, also ohne Düngerzugabe. Gibt man Dünger hinzu, erhöhen sich die EC-Werte nochmals.



Quelle: Jansen, Bachthaler, Fölster,
Scharpf - Gärtnерischer Pflanzenbau, 3.
Auflage S. 322

Abb. 166. Einfluß des Salzgehaltes im Gießwasser auf den Ertrag von Kopfsalat, Tomaten und Gurken (unterschiedliche Kulturdauer!) (nach SONNEVELD und VAN BEUSEKOM 1974).

Verdunstet Wasser steigt der EC-Wert, da sich die gelösten Salze nun auf weniger Wasser verteilen. Da Kalk beim Verdunsten ausfällt und sich beim Nachfüllen nicht wieder löst (so entstehen Kalkflecken), steigt der EC-Wert langsamer als erwartet. Problematisch wird es allerdings, wenn entwässertes Wasser verwendet wird. Üblicherweise werden hier Calcium-Ionen und Magnesium-Ionen gegen Natrium-Ionen ausgetauscht. Verdunstet nun Wasser, hinterlässt das zwar weiterhin Flecken. Diese können jedoch nun mit normalem Wasser entfernt werden, da sie wasserlöslich sind. In Duschen werden sie bei der nächsten Benutzung zumindest teilweise mit weggespült. Kalkflecken gibt es jedoch weiterhin, da man die Wasserhärte nicht vollständig entfernt, da das Wasser ansonsten zu korrosiv ist und die Rohre angreift. Das Putzen spart man sich also keinesfalls! Man braucht lediglich weniger Putzmittel zur Kalklösung. Im Versuch (s.u.) war dies sehr schön zu sehen: Beim Nachfüllen des Bechers mit dem entwässerten Wasser schwammen viele kleine Brocken im Wasser, während beim unentwässerten Wasser davon fast nichts zu sehen war. Da im behandelten Wasser weniger Calcium- und Magnesium-Ionen und stattdessen mehr Natriumionen vorhanden sind, reichern sich letztere nun verstärkt im Substrat an. Weil Natrium für Pflanzen nicht verwertbar ist, kann diese erhöhte Konzentration das Wachstum hemmen oder sogar für Pflanzenschäden sorgen.

Um die EC-Wert-Problematik mit entwässertem Wasser zu analysieren, wurde ein Versuch mit Trinkwasser mit einem EC von 0,5 (25 °C) und 15 °dH vorgenommen. Dieses Wasser wurde durch eine Entwässerungsanlage auf 9 °dH entwässert. Zusätzlich wird zum Korrosionsschutz Natriumphosphat dem Trinkwasser beigemischt. In Waschmitteln und neuerdings auch in Geschirrspülmaschinenreiniger wurde Phosphat übrigens verboten, da es zur Überdüngung der Gewässer beiträgt und hier mischt man es dem gesamten Trinkwasser bei. Hinzukommt, dass speziell natriumarmes Wasser verkauft wird und mit solchen Entwässerungsanlagen gibt man es dem Trinkwasser hinzu. Irgendwie Schizophren.

Es wurden von dem entharteten und unentharteten Wasser jeweils ca. 1,5 Liter Wasser in einem 200ml Gefäß verdunstet und gewartet bis die letzte Restfeuchte verdunstet ist. Anschließend wurden nochmals 200ml Wasser aufgefüllt, ca. 24 Stunden stehen gelassen, gut umgerührt und der EC-Wert gemessen. Das unbehandelte Wasser hatte nun einen EC-Wert von 3,6, das Enthartete von 6,7. Das ist ein massiver Unterschied. Aus diesem Grund ist von enthartetem Wasser (auf Ionenaustauschbasis mit Natrium) als Gießwasser abzuraten. Auch unter dem Aspekt des Umweltschutzes (Überdüngung) sowie der Gesundheit (Natrium im Trinkwasser) ist von enthartetem Wasser abzuraten.

Gerade bei künstlicher Beleuchtung und damit einem Wachstum deutlich schneller als bei Tageslicht, kann es sehr schwer sein den EC-Wert im optimalen Bereich zu halten. Bei der Aufzucht von *Cyperus alternifolius* wurde versucht den EC-Wert bei 3 einzuhalten ohne darüber hinaus zu kommen. Da die Pflanze viel Wasser verdunstet, kann der Wert schnell höher liegen. Genauso braucht sie viele Nährstoffe, sodass der Wert auch genauso schnell auf 2 EC absinken kann. Da sie in Perlite wächst, gibt es keinerlei Pufferkapazität durch den Boden. Auch die Messung ist relativ aufwändig, da man erst das Wasser extrahieren und dann messen muss und das pro Topf. Es gibt zwar von Xiaomi ein interessantes Gerät, (englisch Gadget) welches sowohl Licht, Feuchtigkeit, Temperatur als auch den EC-Wert misst. Je nach Händler heißt es dort „Mi Flora“ oder „Plants Monitor“ und mit ca. 10 € ist es relativ preisgünstig. In Verbindung mit einem Smartphone oder Raspberry PI können die Werte angezeigt werden, außerdem werden sie archiviert, sodass man den zeitlichen Verlauf gut verfolgen kann. Leider wird der EC-Wert nur sehr ungenau gemessen. Steckt man es ins Perlite-Substrat, ist der angezeigte EC-Wert deutlich zu niedrig, hält man es direkt ins Wasser, ist er zu hoch. Wahrscheinlich hemmt Perlite den Stromfluss. Der Lichtsensor dieses Gerätes ist sehr stark richtungsabhängig und zeigt damit gegenüber einem Luxmeter deutlich geringere Lichtstärken an. Mein Fazit: Allerhöchstens brauchbar um eine grobe Richtung über die Tageslichtmenge zu bekommen.

Für ca. 25 € gibt es einen Blumfeldt Aquanova Bewässerungscomputer. Damit kann man mehrmals täglich frische Nährlösung mit dem gewünschten EC-Wert zuführen. Dadurch kann man den EC-Wert sehr bequem im Nährlösungsvorrat messen. Für Hydrokultur ist diese Vorgehensweise ideal, bei Erdkultur wird die Erde vermutlich im Laufe der Zeit weggespült werden. Auch ohne Bewässerungscomputer kann man etwas für einen konstanteren EC-Wert machen. Man gießt mit deutlich zu viel Nährlösung und lässt den Überschuss einfach ablaufen. Dazu bohrt man einfach ein Loch ein paar Zentimeter über dem Topfboden. Je mehr Wasser im Topf stehen bleiben soll, desto höher wird das Loch gebohrt.

Möchte man den Topf nicht anbohren, kann man dafür ein anderes, nebenstehendes Gefäß in der entsprechenden Höhe anbohren, dargestellt im Bild unten. Leider ist dies schwer erkennbar, weswegen ein roter Pfeil auf die entsprechende Stelle weißt. Das mit Wasser gefüllte Glas dient gleichzeitig als Beschwerer und um den Schlauch aus dem Pflanzgefäß nach unten zu drücken. Wie man sieht, kann man auch mehrere Gefäße ohne Anbohren miteinander verbinden. Es wurden dazu große Strohhalme bis an den Gefäßboden mit eingebracht und in diese der Schlauch gesteckt. Um den Schlauch mit Wasser gefüllt zwischen die Gefäße zu bringen, kann man ihn in der Mitte mit einem Beutelclip festzudrücken und dann heißt es schnell sein. Wichtig ist, dass das ganze System nicht „trockenläuft“. Hat einer der Verbindungsschläuche Luft gezogen, funktioniert der Ablauf nicht mehr und hier Bild würde das rechte Gefäß überlaufen. Das ganze System ist leider sehr fragil und ich würde es wegen der Gefahr eines Wasserschadens in Innenräumen nicht unbeobachtet laufen lassen. Man

kann dieses Schlauchsystem auch benutzen um den Wasservorrat eines Blumentopfes zu erweitern. Es empfiehlt sich lichtdichte Schläuche zu verwenden, da nach längerer Zeit sich in transparenten Schläuchen Algen bilden. Diese wiederum bilden Sauerstoff oder die im Wasser gelösten Gase werden freigesetzt und sammeln sich an die höchste Stelle des Schlauches, wodurch der Wasserfluss unterbrochen wird. Um ihn dann wieder in Gang zu bringen, hält man das Wassergefäß deutlich höher. Durch den Wasserdruck wird dann die Luft aus dem Schlauch gespült. Die Erfahrung hat gezeigt, dass dünne Schläuche irgendwann verstopfen.



Der das Ende des Ablaufschlauchs, dessen Startpunkt mit dem roten Pfeil gekennzeichnet ist, muss sich über der Wasseroberfläche befinden, wie auf dem Bild mit dem roten Eimer gezeigt, sonst funktioniert der Ablauf nicht richtig. Es muss ebenfalls ein konstantes Gefälle vorhanden sein, sonst

stockt der Wasserfluss ebenfalls. Im ungünstigsten Fall führt das dazu, dass das Pflanzengefäß überläuft und ein Wasserschaden eintritt. Die Förderhöhe des Aquanova beträgt weniger als einen Meter, sodass der erlaubte Höhenunterschied zwischen Bewässerungscomputer und bewässerter Pflanze nur sehr gering sein darf. Hat der Blumfeldt Luft gezogen, braucht er meistens „Förderhilfe“ indem man den Bewässerungsschlauch tiefer als das Wassergefäß hält um den Wasserfluss in Gang zu bringen. Anschließend kann er wieder normal platziert werden. Das Gerät muss immer tiefer als die Pflanze stehen, da sonst das Wasser dauerhaft läuft.

Hier nochmal ein Beispiel wie der Aquanova Kletter-Erdbeerpflanzen versorgt. Rechts ist der Zulaufschlauch. Links unten läuft das Wasser ab. Die Nährlösung durchläuft somit einen möglichst großen Bereich des Substrates.



Der Ablaufschlauch befindet sich auf etwa mehr als 2 cm Höhe, dadurch ist immer ausreichend Wasserreserve für die Pflanzen sichergestellt. Perlite transportiert das Wasser so gut nach oben, dass selbst die ca. 10 cm höherliegende Oberfläche gut angefeuchtet ist.

Wenn man das Loch für den Ablaufschlauch etwas kleiner als den Schlauchdurchmesser bohrt, geht er nur sehr stramm einzuführen, hält dafür umso fester und dicht. Beim Abstand vom Gefäßboden habe ich mich an der Höhe der im Blumenkasten vorhandenen „Ablaufhöcker“ orientiert (siehe Bild oben).

Wurzeln benötigen ebenfalls Sauerstoff zum Atem, fehlt dieser im Wurzelraum, geht die Pflanze ein. Sumpf- und Wasserpflanzen verfügen über ein sog. Aerenchym (Luftleitgewebe), welches Sauerstoff in die Wurzeln transportiert. Deshalb können diese Pflanzen dauerhaft „einen nassen Fuß“ haben, also komplett im Wasser stehen. Viele Pflanzen reagieren darauf jedoch anfällig, die Wurzeln faulen und die Pflanzen gehen ein. Nimmt eine Pflanze Wasser aus dem Substrat auf, muss der Raum, an dem sich vorher das Wasser befand, ausgefüllt werden. Hierzu strömt nun Luft aus der Umgebung nach. Gießt man die Pflanze, wird diese verbrauchte Luft wieder verdrängt, die Pflanze nimmt das Wasser wieder auf, usw.

Schwierig ist es den optimalen Zeitpunkt zu erwischen. Gießt man zu häufig, bekommen die Wurzeln zu wenig Luft. Gießt man nicht schnell genug, schließt die Pflanze aufgrund des Wassermangels ihre Spaltöffnungen und die Wachstumsgeschwindigkeit verlangsamt sich, das Licht wird nicht mehr optimal ausgenutzt.

Um dieses Problem zu lösen, gibt es verschiedene Substratformen, siehe Abschnitt 3.10.4 Substratwahl

3.10.3.2 pH-Wert

Sehr interessant ist die nachfolgende Grafik. Sie zeigt den Verlauf des pH-Wertes im Verlauf der Zeit in Abhängigkeit der Gießwasserhärte. Bei Poinsettien handelt es sich übrigens um den beliebten Weihnachtsstern. Bei der geringsten Wasserhärte versauert der Boden immer mehr, da die Pflanze Kalzium fürs Wachstum der Erde entzieht. Der Profigärtner tut gut daran regelmäßig den pH-Wert nachzumessen (z.B. alle 2 Wochen) und ihn in einem für seine Pflanze optimalen Bereich zu halten. Zur Messung einfach das überschüssige, durch den Topf sickernde Wasser verwenden. Gleichzeitig kann man zur Kontrolle den EC-Wert gleich mitbestimmen. Besteht Korrekturbedarf kann man das Gießwasser um einen pH-Wert-Punkt höher oder niedriger als den gemessenen Wert einstellen, denn der pH-Wert sollte nur langsam geändert werden. Zur pH-Wert Erhöhung kann man Kaliumcarbonat benutzen, das gibt's sehr günstig zu kaufen, ein anderer Name ist Pottasche. In pH-Plus für Schwimmbäder ist oft Natriumcarbonat, auch Soda genannt. Da nur sehr geringe Mengen erforderlich sind, kann man Natron kaufen, enthalten ist Natriumhydrogencarbonat. Dieses erhitzt man auf über 50 °C, dadurch zersetzt es sich zu Soda und wirkt dadurch alkalischer. Man merkt hierbei deutliches Sprudeln als würde das Wasser bereits bei niedriger Temperatur kochen. Da die Pflanzen das Natrium allerdings nicht wirklich brauchen, könnte sich das im Boden anreichern und die Kaliumaufnahme blockieren. Zur pH-Wertsenkung eignet sich theoretisch Essig oder Zitronensäure und weitere organische Säure. Diese werden jedoch durch Bakterien zersetzt, sodass die Wirkung nicht von Dauer ist. Gleichzeitig wird bei der Zersetzung Sauerstoff abgebaut, die Wurzeln haben somit weniger Sauerstoff zur Verfügung! Und da diese organische Säure das Hydrogencarbonat aus dem Wasser

entfernt hat, ist nach dem Abbau der pH-Wert sogar höher als zuvor! Für eine dauerhafte Wirkung sollte man deshalb auf mineralische Säuren wie Phosphorsäure oder Salpetersäure zurückgreifen. Nachdem diese Säuren sehr stark und man höllisch aufpassen muss, habe ich nach einem sichereren Produkt gesucht. Das einfachste ist pH-Minus fürs Schwimmbad. Dies enthält meistens Natriumhydrogencarbonat, hier haben wir allerdings wieder die Gefahr der Natriumanreicherung. Andererseits werden zunehmend Wasserenthärtungsanlagen eingesetzt. Diese funktionieren so, dass Calcium-Ionen gegen Natriumionen ausgetauscht werden, was die Natriumproblematik nochmals verschlimmt, siehe oben. Die deutsche Gesellschaft für Hydrokultur sieht zu viel Natrium im Gießwasser als Problem an. <http://www.dghk.net/index.php?artikel=1879> Wer auf das Natrium verzichten möchte, der nimmt Kaliumhydrogencarbonat. Leider habe ich hierfür keine günstige Quelle gefunden außer reinsten Chemikalien, die dementsprechend teuer sind. Allerdings gibt es „Bayrol Aquabrome Regenerator“. Dieses enthält Kaliumhydrogencarbonat, sowie Kaliumperoxomonosulfat. Letzteres ist ein Desinfektionsmittel, deswegen niemals direkt ins Gießwasser geben. Es zersetzt sich bei 90 °C. Daher einfach eine gewisse Menge kochen und anschließend entsprechend dosieren. Auch bei diesen Chemikalien ist Vorsicht beim Umgang angebracht.

Die genannten Chemikalien sind meistens in technischer Qualität und können daher verunreinigt sein. Für Pflanzen, die als Lebensmittel dienen sollen, kann das problematisch sein. Sehr wahrscheinlich sind die Spuren davon zu gering um Auswirkungen zu haben, aber um auf Nummer sicher zu sehen, müsste man die Chemikalien in sehr hoher Reinheit kaufen.

Glücklicherweise gibt es für essbare Pflanzen von General Hydroponics einen pH-Wert-Senker in Pulverform namens „pH Down Dry“ bzw. ab 2020 umbenannt in „pH – Powder“ https://www.eurohydro.com/de/regul_ph.html. In größeren Mengen (1 kg ca. 20 €, 5 kg ca. 40 €) ist er relativ günstig erhältlich. Er enthält Harnstoffphosphat, dadurch ist er gleichzeitig Stickstoff und Phosphorlieferant, eine 1%ige Lösung hat einen pH-Wert von 1,8 <http://www.ammanns-hanfparadies.ch/files/v151002003749/shop/ph-down-dry.pdf>

Da es sehr schwer ist den optimalen Nährstoffbedarf seiner Pflanzen zu ermitteln und entsprechend zu düngen, empfiehlt es sich bei zunehmender Nährstoffanreicherung (steigender EC-Wert) das Substrat zu spülen.

Man könnte auf die Idee kommen mit (Umkehr)Osmosewasser zu gießen, dieses enthält nur noch ca. 5 % des ursprünglichen Mineralstoffgehaltes, allerdings kann es da schnell zu einem Kalzium-, Schwefel- und Magnesiummangel kommen.

So zeigt die folgende Grafik den Verlauf des Substrat pH-Werts bei 3 verschiedenen Härtegraden des Gießwassers. Hier liegt der optimale Karbonhärtegrad des Gießwassers wohl irgendwo zwischen 5 °dKH und 8,5 °dKH um einen einigermaßen konstanten Verlauf des pH-Werts im Verlauf der Kultur zu erhalten.

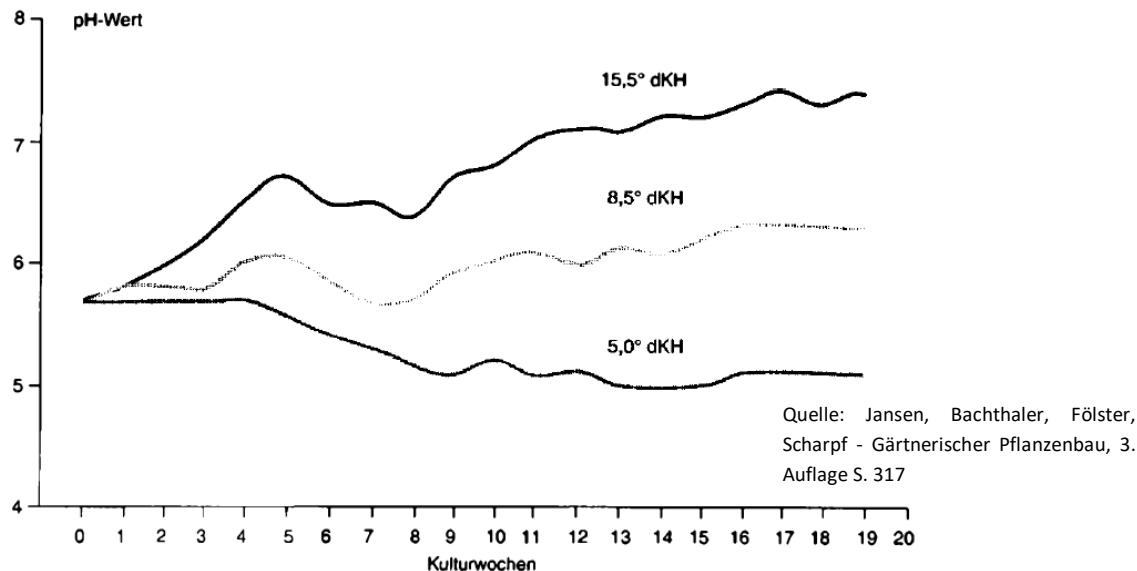


Abb. 164. Einfluß der Karbonathärte ($^{\circ}\text{dKH}$) des Gießwassers auf den Verlauf der pH-Werte während einer Poinsettienkultur in Einheitserde (nach SCHÄFER 1984).

3.10.3.3 Blattdüngung

Zitruspflanzen leiden bei einem zu hohen PH-Wert schnell unter Eisenmangel, was sich in gelblichen Blättern, insbesondere beim jungen Austrieb zeigt. Hier kann man schnell mit einer Blattdüngung Abhilfe schaffen. Eisendünger kann man sich auch leicht selbst herstellen. Dazu nimmt man eine Eisentablette aus dem Nahrungsergänzungsmittelbereich und löst diese in Wasser auf. Kommerzielle Eisendünger enthalten z.B. 5 % Eisen. Zum Gießen werden 20 mg pro Liter Gießwasser hinzugefügt. Beim Spritzen via Blattdüngung sind es nur noch 2,5 mg pro Liter Gießwasser. Beim Spritzen von Eisendünger aufpassen, da das schnell Rostflecken ergeben kann. Quelle: <https://www.duenger-shop.de/Duenger/Wuxal/Wuxal-Eisenduenger-250-ml.html>

3.10.4 Substratwahl

3.10.4.1 Generelles

Wichtig ist es, dass die Gefäße absolut lichtdicht sind, da Licht das Algenwachstum fördert und dies zu einer massiven Erhöhung des pH-Werts führt. Bei CO₂ Mangel im Wasser ziehen die Algen CO₂ aus Hydrogencarbonat. Calciumcarbonat fällt dadurch aus. Es hat einen höheren pH-Wert als die Hydrogencarbonatform. Natriumhydrogencarbonat wird deshalb manchmal auch als doppeltkohlesaures Soda, Natron oder Natriumbicarbonat bezeichnet und Soda/Natriumcarbonat hat einen deutlich höheren pH-Wert als Natron/Natriumhydrogencarbonat.

3.10.4.2 Aeroponik

Kommen wir als erstes zum in der Internetgemeinde beliebtesten System, der Aeroponik. Aeroponik bedeutet, dass die Wurzeln in Luft gezogen und nur mit Wasser benetzt werden. Man unterscheidet zwischen Hochdruckaeroponik, Niederdruckaeroponik und die Vernebelung der Nährlösung mit Ultraschallzerstäubern. Im Netz findet man meistens Selbstbaulösungen oder auch kommerzielle Systeme zur Niederdruckaeroponik, wie z.B. Aerogrow 19, wo ein Topf (für eine Pflanze) bereits knapp 9 € kostet. Die „originale“ Aeroponik war jedoch die Hochdruckaeroponik und diese weiß einige Vorteile auf. Man liest immer wieder, dass auch die NASA Aeroponik einsetzt. Das ist korrekt, nämlich in der Hochdruckvariante. Die Nährlösung wird dabei sehr fein zerstäubt, sodass man nur sehr wenig Wasser benötigt. In der Schwerelosigkeit des Weltalls ist das natürlich von besonderem Vorteil, da Wasser zum einen sehr begrenzt zur Verfügung steht und zum anderen nicht munter durch die Raumstation schwebt. Die größte Herausforderung besteht darin mit der richtigen Wassermenge zu bestäuben und da die Pflanzen wachsen und je nach Umgebungsbedingungen mehr oder weniger Wasser verdunsten, ist das keine so leichte Aufgabe.

Bei der Niederdruckaeroponik nimmt man einfach normale Sprühdüsen und besprüht die Wurzeln mit Wasser. Dabei wird relativ viel Wasser umgesetzt. Wird so ein Schlauch undicht, führt das in der Wohnung schnell zu einem Wasserschaden. Aber auch ohne Beschädigungen kann das Wasser durch Ablenkung an Wurzeln usw. leicht nach oben spritzen und dort austreten.

Generell scheint bei Aeroponik ein enormes Wurzelwachstum aufzutreten. Die Pflanze nutzt das Licht aus unserer Sicht ziemlich ineffizient, von Wurzelgemüse wie Radieschen oder Kartoffeln einmal abgesehen. Besonders bei Ultraschallverneblern treten sehr viele feine Wurzeln auf. Je kleiner die Tröpfchen, desto feiner die Wurzeln. Zur Stecklingsbewurzelung durchaus brauchbar. Bei Niederdruckaeroponik treten relativ große Tröpfchen auf, welche zu einer geringeren Wurzelsauerstoffverfügbarkeit im Vergleich zur Hochdruckaeroponik führen.

In einem Versuch zwischen einer Niederdruck-Aeroponik und Substrat auf Kokosnusssubstrat im Freien von Mitte August 2017 bis Anfang Oktober wuchs Kopfsalat zunächst das aerponische System sichtbar schneller. Mit zunehmenden kalten Nächten holten die in Substrat gezogenen Kopfsalatpflanzen aber deutlich auf und zogen mit den aerponisch gezogenen Pflanzen gleich.

3.10.4.3 Ebbe-Flut-Systeme

Eine weitere Möglichkeit die Wurzeln mit ausreichend Sauerstoff zu versorgen sind Ebbe-Flut-Systeme. Die Pflanzen befinden sich einem gut wasserdurchlässigen Substrat, wie z.B. Perlite oder Blähton. Mehrmals am Tag steigt nun das Wasser an, verdrängt die verbrauchte Luft und bringt frische Luft an die Wurzeln, wenn der Wasserstand wieder sinkt. Kommerziell erhältliche Systeme sind relativ hochpreisig und auch auf große Anbauflächen ausgelegt. So kostet das GHE Ebb & Grow System mit einer Anbaufläche von 0,86 m auf 0,86 m (ca. ein dreiviertel Quadratmeter) stolze 160 €. Dafür ist dann die Pumpe, ein Wasserablassschlauch und eine Öffnung um die wichtigsten Wasserwerte kontrollieren zu können, dabei. Möchte man dauerhaft Pflanzen anbauen, ist es sicherlich eine lohnende Investition, wobei vermutlich nach Abzug aller Kosten (LED-Anschaffung, Betriebsstrom usw.) das Gemüse aus dem Supermarkt wahrscheinlich sogar günstiger kommt. Nachteilig an Ebbe- und Flutsystemen ist, dass sie einen großen Wasservorrat benötigen. Sämtliche Töpfe müssen geflutet werden und ebenfalls die Zwischenräume. Da kommt einiges Wasser zusammen. Gleichzeitig bleibt immer eine gewisse

Menge am Boden stehen. Dies führt zu hoher Verdunstung, Versalzungsgefahr und auch zur Veralgung mit dem Problem des erhöhten pH-Wertes.

Sollte man dennoch ein Ebbe-Flut-System einsetzen wollen, so ist sehr leicht selbst zusammengebaut. Man nehme einen Wasserbehälter, z.B. einen IKEA Variera für 8 €. Dazu eine stabile Plastikschale, sowie eine Aquarium-Tauchpumpe und ein wenig Schlauch. Die Löcher bohrt man ein paar Millimeter kleiner als den Außendurchmesser, drückt sie in der Mitte ein und kann sie so durch das Loch ziehen, wodurch sie dicht mit dem Rand abschließen. Der Pumpenschlauch schließt ziemlich bündig mit dem Boden der Wanne ab. Der Ablauchschlauch ist etwas tiefer als der gewünschte maximale Wasserpegel (tiefer, damit das Wasser ausreichend Druck aufbauen kann um ebenso schnell abzulaufen, wie es die Pumpe nachbefördert). Die Plastikschale sollte allseitig nur wenige Zentimeter (1-2cm) über dem Wasserbehälter überstehen, da ansonsten, insbesondere wegen des Restwassers große Kipp- und damit Wasserschadengefahr besteht. Auch wenn es nach nicht viel Restwasser ausschaut, die Menge ist doch ganz erheblich.

3.10.4.4 Herkömmliches Substrat

Hierunter zähle ich Pflanzenerde, z.B. auf Torfbasis, aber auch Kokosnusserde. In beiden Fällen sind die Pflanzen in einem relativ dichten Substrat, welches Wasser sehr gut hält. Hier ist es wichtig das Substrat auch einmal trockener werden zu lassen, damit Luft bzw. Sauerstoff an die Wurzeln kommt. Das ist natürlich auch der große Nachteil, da es sehr schwer ist die optimale Wassermenge zu dosieren und die Pflanzen schnell entweder unter Wurzelsauerstoffmangel leiden oder aufgrund von Wassermangel langsamer wachsen. Sowohl Pflanzenerde auf Torfbasis als auch Kokosnusserde sind von Natur aus sehr nährstoffarm. Es gibt sie bereits aufgedüngt oder man muss bereits zu Beginn selbst für die richtige Nährstoffzufuhr sorgen. Die Kontrolle des pH-Werts gestaltet sich bei herkömmlichen Substrat natürlich etwas schwieriger als bei „wasserbasierten“ Systemen. Achtung Kokosnusserde kann auch ohne Nährstoffe zu enthalten bereits sehr versalzen sein, also einen hohen EC-Wert haben. Das ist natürlich sehr schlecht für die Pflanzen und deswegen sollte man eine Probe mit Wasser auffüllen und den EC-Wert messen. Bei erhöhten EC-Werten sollte man vorher gut spülen bis der EC-Wert gegenüber dem zulaufenden Leitungswasser nur geringfügig erhöht ist. Ich hatte dieses Problem zum Beispiel mit Kokosnusserde, die als „Kokoseinstreu Bodengrund, Terrarienerde für Reptilien“ verkauft wurde.

3.10.4.5 Deep Water Culture (DWC)

Deep Water Culture ist eines der ersten hydroponischen Systeme. Hierbei wächst die Pflanze in einem Netztopf, welcher in einem großen mit Wasser gefülltem Gefäß hängt. In dieses Wasser wird Luft

eingeblasen um die Sauerstoffversorgung der Wurzeln sicherzustellen. Diese Systeme sind aus Fernost sehr günstig erhältlich. Man muss nur etwas suchen und teilweise durch zahlreiche unpassende Ergebnisse klicken. Passende Suchbegriffe sind „DWC“, „Hydroponic System“, „Deep water culture“, „planting box“ oder „plant box“. Da die Hersteller die Suchbegriffe gerne immer wieder mal anpassen, können diese auch als Einstiegspunkt dienen und weitere Suchbegriffe kann man anhand der Ergebnisse finden. Tipp: Sollte der Zoll das Paket aufhalten, weil er fälschlicherweise glaubt die Wertgrenze von aktuell 22 € bzw. 26,30 € sei überschritten (eine Umsatzsteuer von unter 5 € wird in Deutschland bei Sendungen aus dem Ausland nicht erhoben), reicht es aus dem Zoll Kaufbestätigung oder Paypal-Auszug per E-Mail und der Referenznummer

aus dem erhaltenen Schreiben zu schicken und der Zoll über gibt daraufhin die Sendung der Post. Es fallen keine Kosten, auch keine Versandkosten, an und man spart sich Zeit und Wege. Ab 1. Juli 2021 soll es gar keine Zollfreigrenze mehr geben <https://www.chinahandys.net/zollfreigrenze-gekippt-deutsche-post-meldet-neuerungen-ab-2021/> Vermutlich sind die Systeme dann ebenfalls noch relativ preisgünstig aus EU Lagern erhältlich. Auch die Möglichkeit eines „EU Direktversandes“ wie es viele Chinahändler schon seit Jahren praktizieren ist denkbar. Dabei wird die Ware über ein anderes EU-Land nach Deutschland eingeführt, wodurch für den deutschen Verbraucher auch kein Zoll bzw. Einfuhrumsatzsteuer anfällt.





Plastikbox für Deep Water Culture für 6 Pflanzen

Als Komplettset inklusive Luftpumpe, Schlauch und Sprudelstein bekommt man so eine Box mit 6 Pflanzenlöchern für ca. 15-16 €. Es gibt auch noch Boxen mit mehr Löchern. Da die mittleren Pflanzen bei diesen aber ziemlich eingeengt sind, sind nur die Boxen mit 6 Löchern empfohlen. Den Abstand der Boxen kann man dann ziemlich variabel einstellen um die Pflanzen optimal mit Licht zu versorgen. Die mitgelieferte Luftpumpe macht zwar einen soliden Eindruck, aber wegen potentiellen Brandgefahr wird besser zu einer hochwertigen Luftpumpe, wie der Tetra APS Aquarienpumpe gegriffen. Hier auf dem Bild ist ein US-Stromstecker zu sehen. Manchmal sind auch einfache, billige Adapter mitgeliefert. Achtung: Bei US-Steckern sind die hinteren Enden nicht isoliert. zieht man Stecker leicht aus dem Adapter, können die Kontakte berührt werden und dadurch besteht die Gefahr eines Stromschlags.

Der mitgelieferte Sprudelstein und der Schlauch sind durchaus brauchbar. Der Schlauch ist durch ein blaues Stück zweigeteilt. Bei diesem blauen Teil handelt es sich um ein Rückschlagventil. So wird verhindert, dass durch ungünstige Umstände Wasser angesaugt wird und in die Pumpe läuft, wenn diese tiefer steht. Es gibt im Netz zahlreiche Sprudelsteine in länglicher Form. Der mitgelieferte kleine Stein hat bisher in der Mitte der Kiste am Boden platziert völlig ausgereicht.

Bei den Boxen ist ein Schwimmer mitgeliefert, sodass man auf einen Blick den Wasserstand sehen kann. Es wird empfohlen den Wasserstand immer möglichst hoch zu halten. So können die Pflanzen die Wurzelfläche optimal nutzen und bilden nicht unnötig viele Wurzeln im Bodenbereich.

Um Energie zu sparen wurde die Belüftung nur alle 6 Stunden für 15 Minuten (analoge Zeitschaltuhr) aktiviert. Es gibt sog. Floßsysteme. Dabei schwimmen Pflanzen in einem Netztöpf, der in Styropor eingebettet ist, direkt auf der Wasseroberfläche. Vorteil: Die Wurzeln sind immer bis oben hin von Wasser umgeben. Oftmals wird das Wasserreservoir dieser Floßsysteme nicht zusätzlich belüftet und die Pflanzen wachsen gut. Für mich etwas verwunderlich, dass ohne Sauerstoffanreicherung des Wassers die Pflanzen so gut wachsen.

Da die Box aus hellem Plastik ist, lässt sie leider Licht durch. Man sollte sie mit Alufolie verkleiden um Algenwachstum und damit eine pH-Wert Erhöhung zu vermeiden. Mit Alufolie geht es ganz schnell.

Den Kasten komplett beziehen und dann die Netztöpfe durch die Löcher stechen. Die dünne Alufolie reißt dabei problemlos. Danach rausziehen und sichergehen, dass kein Alu nach unten in den Kasten ragt um keinen Kontakt mit dem Wasser zu bekommen. Insbesondere durch den sauren pH-Wert könnte sonst einiges an Aluminium in die Nährlösung übergehen und von den Pflanzen aufgenommen werden. Aluminium steht im Verdacht Erkrankungen wie Alzheimer oder Brustkrebs auszulösen, deswegen hier lieber auf Nummer sicher gehen und den Kontakt zur Nährösung vermeiden <https://www.quarks.de/gesundheit/so-schaedlich-ist-aluminium-wirklich/>

Man kann natürlich auch Orca Growfilm auf die Box legen. Da dieser allerdings deutlich fester als Alufolie ist, muss man ein bisschen Schneiden um die Löcher freizubekommen. Tipp: An den Rändern fixieren (z.B. mit Klebeband), damit nichts verrutscht und alle Löcher an der richtigen Stelle liegen.

3.10.5 Schädlingsbekämpfung

3.10.5.1 Allgemeines

Da das Gebiet der Schädlingsbekämpfung sehr umfangreich ist, hier nur einige wenige Worte dazu. Bei mir traten am Zyperngras vor allem Spinnmilben und Thripse auf. Oft ist zu lesen, dass diese bei zu trockener Luft auftreten und Besprühen helfen würde. Besprühen hilft allerdings nur kurzfristig, denn sobald die Pflanze getrocknet ist, ist die Luftfeuchtigkeit genauso niedrig wie vorher. Es gibt Raubmilben (s.u.), diese brauchen sogar eine hohe Luftfeuchtigkeit um die Schädlinge zu bekämpfen. Genauso ist manchmal zu lesen es würde helfen über die Pflanze eine Tüte zu ziehen, damit die Luftfeuchtigkeit ansteigt und die Tiere absterben würden. Das ist allerdings unlogisch, vielmehr würde eine geringe Luftfeuchtigkeit die Tiere austrocknen lassen. Meine Erklärung warum Spinnmilben gerne bei Zimmerpflanzen im Winter auftreten: Pflanzen stehen meist auf dem Fensterbrett über dem Heizkörper. Durch die höhere Temperatur können sich die Tiere schneller vermehren, die trockene Luft schwächt die Pflanze, sodass sie deshalb unter diesen Bedingungen leicht eingehen. Den schlimmsten Spinnmilbenbefall hatte ich im Sommer am Zyperngras. Es war sehr warm in der Wohnung bei gleichzeitig hoher Luftfeuchtigkeit. Die Pflanze steckte es gut weg, hatte aber deutliche Netze am Großteil der Schirmchen. In der Literatur ist von einer Vermehrung der Schädlinge bei trockenem, warmen Wetter die Rede. Mit „trocken“ ist meiner Ansicht nach weniger die Luftfeuchtigkeit, sondern fehlender Niederschlag gemeint. Der Regen, der die Spinnmilben einfach von der Pflanze wäscht, fehlt natürlich auch im Zimmer. <http://www.hortipendium.de/Spinnmilben> Daher ist mein erster Ratschlag, die Pflanze wenn möglich seitlich drehen (damit kein Wasser in den Topf läuft) und mit kaltem Wasser ordentlich abbrausen. So bekommt man schonmal den Großteil der Spinnmilben und Thripse weg, niemals jedoch alle. Für eine dauerhafte Bekämpfung kommt jetzt entweder die chemische Keule oder die biologische zum Einsatz.

3.10.5.2 Mechanische Bekämpfung

Gegen Trauermücken helfen Gelbfallen sehr gut. Bitte etwas Geduld, da nur die Erwachsenen Tiere dingfest gemacht werden, sodass sie an einer erneuten Eiablage gehindert werden. Nicht jede Gelbtafel ist gleich gut, hier <http://www.tropenland.at/trp/cont/rundum/gelbtafel-test-trauermuecken.asp?title=Gelbsticker-Test> wurden Neudorff-Gelbsticker mit Gelbsticker decor von Compo verglichen. Beide waren im selben Topf gesteckt. Während der Gelbsticker von Neudorff nach 16 Tagen 264 Trauermücken fing, waren es beim Compo nur 7.

Teilweise werden Blautafeln gegen Thripse angeboten. Ich hatte davon noch nie gehört. Meine Erfahrung: ziemlich wirkungslos. Trauermücken reagieren überhaupt nicht darauf und Thripse verirrt sich nur sehr vereinzelt dahin, selbst zum Monitoring nur sehr schlecht geeignet. Die eingesetzten Tafeln waren sehr gut klebend, sodass es wahrscheinlich auch nicht am Kleber lag.

3.10.5.3 Chemische Keule

Saugende Insekten wie Spinnmilben, Thripse, Blattläuse lassen sich sehr einfach mit Bi-58 (Wirkstoff Dimethoat) bekämpfen. Eigentlich ist es als Spritzmittel vorgesehen, wirkt aber insbesondere bei Pflanzen, die viel Wasser brauchen besser über das Gießwasser. Bei dieser Anwendungsart werden auch Trauermücken wirkungsvoll bekämpft. Bereits wenige Tropfen genügen, so waren ca. zwei Tropfen ins Gießwasser für einen 15 cm Topf vollkommen ausreichend. Erwischt man zu viel, nimmt die Pflanze einige Wochen lang deutlich weniger Wasser auf, was sich durch Gelbwerden zeigt. Meine Dosierungsempfehlung: Ca. 4 Tropfen pro Liter Gießwasser.

Auch beim Spritzen ist dieses Mittel gegenüber natürlichen Wirkstoffen wie Pyrethrum deutlich überlegen. Es zieht in die Pflanze einzieht und bekämpft dadurch saugende Insekten wie Blattläuse, Spinnmilben, Thripse, usw., auch wenn man diese Insekten nicht direkt besprüht hat, weil sie sich in einem eingerollten Blatt oder Ähnlichem versteckt haben. Natürliche Produkte wie Pyrethrum wirken nur im direkten Kontakt mit den Schädlingen. Da es fast unmöglich ist alle zu erwischen, muss man die Anwendung nach kurzer Zeit bereits wiederholen. Wichtig ist es alle Zimmerpflanzen gleichzeitig zu behandeln, sonst steckt eine Pflanze die nächste an. Gerade durch den Verzicht aufs Spritzen eignet sich BI-58 ideal für die Bekämpfung im Innenraum. Achtung: Dieses mittel ist wirklich extrem giftig, sodass es Bienengefährlich ist. Bitte keinesfalls an Blühpflanzen im Freien anwenden. Sollte man es an essbaren Pflanzen eingesetzt haben, beträgt die Wartezeit bevor man die Pflanze wieder essen sollte laut Literatur je nach Pflanze ca. 20 Tage. Ich empfehle 30 Tage zu warten um einigermaßen sicher zu sein.

Ideal ist Thiamethoxam, dessen Wirkung bis zu 12 Wochen anhält. Bisher war es in Deutschland nicht erhältlich. Mittlerweile ist es in einer Konzentration von 10 % in AGITA enthalten. Der offizielle Einsatzbereich sind Fliegen in Ställen, deswegen ist (Z)-9-TRICOSENE zwischen 0,01 bis 0,1 % enthalten. Dabei handelt es sich um ein Fliegenlockmittel. Für die Pflanzen ist es nicht schädlich. Gute Erfahrungen habe ich mit einer Dosierung von 0,5 Gramm pro Liter Substrat gemacht, entsprechend 0,05 g Thiamethoxam pro Liter. Offiziell wirkt es beim Gießen nicht gegen Spinnmilben. In dieser Dosis habe ich die Erfahrung gemacht, dass es auch gegen Spinnmilben wirkt. Man kann es auch leicht mit einem Dosierlöffel verwenden, 1 Gramm Agita entspricht 1,74ml.

Thiamethoxam war mit einer Konzentration von 1 % in Actara G Profi enthalten (https://www.buergi.ag/fileadmin/Dateien/Downloads/Ratgeber_Profi_2020.pdf). Die Dosierungsempfehlung lautete 2 g/l Substrat in der höchsten Dosis, entsprechend 0,02 g Thiamethoxam pro Liter Substrat.

Durch einen Rechenfehler hatte ich 0,5 Gramm, entsprechend 5 Gramm AGITA pro Liter Substrat dosiert. Selbst das haben eine Grünlilie, Orchidee und Gummibaum klaglos weggesteckt. Bei Bi58 wären bei dieser Überdosierung die Pflanzen längst eingegangen. Thiamethoxam macht die Pflanze auch resistenter gegen Stress

https://www.kingquenson.com/Company_News/Thiamethoxam%20vs%20imidacloprid.html

Für Spritzlösungen löst man 1 Gramm Agita (entsprechend 0,1g Thiamethoxam/Liter) in einem Liter Wasser auf. Man kann das bei Zimmerpflanzen auch mit einem Pinsel oder Wattestäbchen applizieren um keine giftigen Aerosole zu bilden.

Achtung: Für die obige chemische Keule gilt: Niemals bei Pflanzen im Freien anwenden, da sie erheblich bienengefährlich sind.

3.10.5.4 Biologische Bekämpfung

Biologisch und effektiv sind Raubmilben. Es gibt zahlreiche verschiedene Arten. So ist Phytoseiulus persimilis zwar sehr effektiv in der Bekämpfung eines starken Befalls, schwächtelt aber, wenn nur noch wenige Milben vorhanden sind. Sie ziehen dann weiter oder verfallen in Kannibalismus. Mein Favorit ist Amblyseius californicus. Diese Raubmilbe verträgt niedrigere Luftfeuchtigkeit, als auch höhere Temperaturen, bedeutet aber gleichzeitig, dass sie sich nicht so schnell wie Phytoseiulus persimilis bei niedrigen Temperaturen vermehrt. Sie ist sehr wirksam gegen Spinnmilben (*Tetranychus urticae*, *T. cinnabarinus*), der Zitrus-Milbe (*Panonychus citri*) und der Roten Baumspinne (*P. ulmi*). Thripse bekämpft sie indem sie die Larven angreift (die erwachsenen Tiere sterben dann altersbedingt), außerdem greift sie noch Weichhautmilben an. Diese Milben übersteht auch mehrwöchige Hungerphasen und ernährt sich von Pollen und ist auch noch relativ tolerant gegen Pflanzenschutzmittel (aber bestimmt nicht gegen Bi-58 oder Thiamethoxam). <http://www.nuetzlinge.de/produkte/freiland/amblyseius-californicus/> Durch diese Eigenschaften eignet sie sich ideal um auch präventiv auf die Pflanzen ausgebracht zu werden.

Die Raubmilben kommen meist in kleinen Tüten, welche einfach zwischen die Pflanze gehängt werden. In der Tüte sind ein oder 2 kleine Löcher über die die Raubmilben nach und nach aus der Tüte kriechen. Durch kalte und feuchte Lagerung im Kühlschrank kann man die Raubmilben auch ein paar Wochen im Kühlschrank aufbewahren, ohne dass sie nennenswert an Qualität verlieren. Durch die kühle Temperatur werden die Raubmilben inaktiv und verbleiben größtenteils in den Tüten.



Das ist vorteilhaft, da die Tüten kommerziell nur in größeren Mengen erhältlich. Die kleinste Menge, die ich finden konnte, gibt es bei renatur und kostet 25 Tüten, welche für 100 m² reichen. Im September 2014 kosteten sie 14,24 €, mittlerweile (Stand Februar 2020) sind es bereits 18,50 €. Pro Tüte sind ca. 100

Raubmilben enthalten. Des Weiteren sind Kleie, sowie Mehlmilben als Futter enthalten. Laut dieser Studie <https://pdfs.semanticscholar.org/8abc/0ce353a3c99b360ac70913fbb2ec7037dd86.pdf> sind Mehlmilben (*Acarus siro*) allerdings als alternatives Futter nicht so geeignet.

Als Nahrung dient ebenfalls Pollen. Dadurch kann man sich immer einen Vorrat dieser Tierchen halten



USB-Mikroskopaufnahmen der Kleie mit Tierchen. Ob das die Raubmilben oder Mehlmilben sind, ist unbekannt nach Literaturangabe zwischen 30 cm und einem Meter groß, Vogelmiere bleibt klein und die Pollenausbeute je Blüte ist gering.

und hat sie bei Bedarf sofort einsatzbereit oder man legt immer wieder Blüten in die zu schützenden Pflanzen als Futter für die dortigen Raubmilben. Interessanterweise ist nicht jeder Pollen gleich gut geeignet. Welcher Pollen wie gut geeignet ist, wurde in [1] untersucht. Es wurden 20 Futterquellen getestet. Klee und Löwenzahn, beides einfach zu kultivierende Pollenproduzenten wurden leider nicht getestet. Am interessantesten dieser Pflanzen zur Züchtung sind die Vogelmiere mit einem täglichen Raubmilbenwachstum von ca. 17 % und Pfefferminze mit einem täglichen Wachstum von ca. 28 %.

Vogelmiere lässt sich sehr einfach kultivieren und wächst vielerorts sogar als Unkraut. Pfefferminze wird je

[1] <http://www.bulletinofinsectology.org/pdfarticles/vol62-2009-153-158ragusa.pdf>

Amblyseius californicus ist auch unter folgenden Synonymen bekannt: *Neoseiulus californicus*, *Typhlodromus californicus*, *Cydnodromus californicus* und *Neoseiulus chilenensis*. http://entnemdept.ufl.edu/creatures/beneficial/Neoseiulus_californicus.htm

Als Zuchtkästen kann man Petrischalen verwenden. Dieser Aufbau wurde etwas modifiziert und soll die Aufzucht der Milben vereinfachen. <https://journals.flvc.org/flaent/article/view/58277/55956>

In diesem Dokument https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-90-481-9837-5_69 auf der nachfolgenden Seite unter „Workpackage 4“ ist zu lesen, dass ein Massenaufzuchtsystem für *Amblyseius californicus* für die niederländische Firma Koppert entwickelt wurde. Der genaue Inhalt der Studie ist leider aus diesem Grund nicht zugänglich. Es wurde Pollen von *Quercus ilex* (Steineiche), *Quercus ithaburensis* (Taboreiche), *Pistacia atlantica* (Atlantische Pistazie), *Pistacia lentiscus* (Mastixstrauch / Wilde Pistazie), *Pistacia palaestina* (Terpentin-Pistazie / Terebinthe), *Pistacia vera* (echte Pistazie) und *Zea mays* (Mais) als geeignete Nahrungsquelle gefunden. Laut dieser Arbeitspaketzusammenfassung wurden zwei Methoden entwickelt. Einmal mit „künstlichen Arenen“ und einmal auf Sojabohnenpflanzen. Beide male mit Pollen als Futter.

Weitere Zuchtmethoden:

https://www.researchgate.net/publication/267888505_A_cage_design_for_small_to_medium_scale_production_of_Phytoseiulus_persimilis_Mesostigmata_Phytoseiidae Hier wird ebenfalls der Weg über Plastikbehälter als Aufzuchort für die Milben beschrieben. Als Futter werden Spinnmilben verwendet, die auf Bohnenblättern gezüchtet wurden. Interessanter Aspekt: Die dort verwendete Limabohne produziert viel Linamarin, welches sich über die Generationen hinweg in den Raubmilben

ansammelte und dies war wahrscheinlich die Ursache, dass die Raubmilbenproduktion im Laufe der Zeit langsamer verlief.

Hier <https://www.jstor.org/stable/25009225> wird beschrieben wie für ein kleines Gewächshaus von 100 m² unter anderem *Neoseiulus californicus* auf ein wenig Rotklee kontinuierlich gezüchtet werden um die Spinnmilbenpopulation im Gewächshaus im Zaum zu halten.

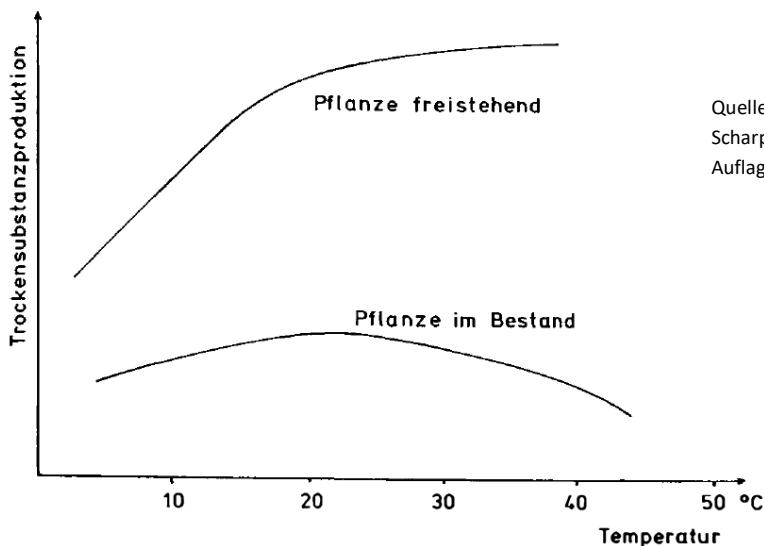
Auch für andere Schädlinge gibt es zahlreiche biologische Bekämpfungsmöglichkeiten, eine gute Übersicht findet sich unter <http://www.nuetzlinge.de/produkte/>

Neben den Raubmilben gibt es zum Beispiel auch die Raubwanze *Orius laevigatus*. Diese dient primär der Thripse Bekämpfung, aber sie ist ebenso gegen Spinnmilben, Blattläuse, Weiße Fliege einsetzbar. Mit (Stand Februar 2020) 42 € für 500 Stück, ausreichend für 50 m² - 100 m², sind sie nochmals deutlich teurer als *Amblyseius californicus*. Meine eigenen Erfahrungen gegen Blattläuse sind sehr schlecht. Es wurde kaum eine Wirkung festgestellt. Die Pflanzen standen in einem Growschrank, welcher allerdings zahlreiche Öffnungen zur Belüftung hatte. Meinem Eindruck sind die Raubwanzen durch diese sehr schnell entkommen und somit in Innenräumen nicht zu empfehlen. Auch die Lagerdauer ist bei ihnen im Vergleich zu den Raubmilben deutlich geringer.

Abschließend noch ein Wort zur Spinnmilbenbekämpfung mittels Ozon: Eine Tomatenpflanze wurde mit Ozon aus einem Ozongenerator (9,5 g/Stunde) begast (tags zuvor wurde die Spinnmilbenpopulation durch Abrausen stark dezimiert). Sie stand in einem umgebauten Kleiderschrank, siehe Abschnitt 3.9 Ein günstiger und flexibler Growschrank, sodass ein bisschen Luft entweichen konnte. Nach diesen 30 Minuten roch der ganze Raum stark nach Ozon, sodass erstmal gelüftet werden musste. Die Spinnmilben hatten dem Ozon jedoch getrotzt und waren weiterhin fleißig aktiv. Besonders gut konnte man es sehen, wenn sie über die roten Tomaten gelaufen sind. Am nächsten Tag hatte die Tomatenpflanze wahrscheinlich durch diese Behandlung zahlreiche welke Blätter bekommen. Im Laufe der nächsten Woche, wurden immer wieder zahlreiche wilde Blätter entfernt. Interessanterweise konnten nun keine Spinnmilben mehr festgestellt werden. Das Ozon hat anscheinend zeitverzögert gewirkt. Da die Pflanze danach extrem gerupft aussah, rate ich von Ozon ab. Da es auch Schimmel usw. bekämpft, eignet es sich wahrscheinlich sehr gut um den Aufzuchort zu sterilisieren.

3.10.6 Weitere Effekte

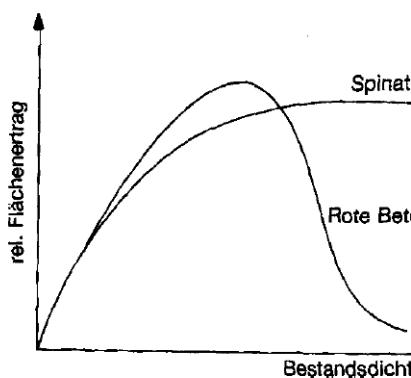
Nachfolgende Grafik zeigt die unterschiedliche Trockensubstandproduktion in Abhängigkeit der Temperatur bei freistehenden Pflanzen bzw. Pflanzen in einem Bestand. Man erkennt deutlich, dass einzelstehende Pflanzen eine größere Trockenmasseproduktion erreichen. Irgendwie auch logisch, da bei Pflanzen in einem Bestand deutlich weniger Licht für jede einzelne Pflanze übrigbleibt. Interessant ist jedoch, dass zusätzlich bei deutlich höheren Temperaturen die Trockenmasseproduktion sogar noch minimal zunimmt, während sie bei Pflanzen im Bestand deutlich abnimmt, Stichwort Atmung, siehe Abschnitt 3.10.1 Temperatur. Eventuell hängt es ganz einfach damit zusammen, dass freistehende Pflanzen sich besser durch Verdunstung kühlen können.



Quelle: Jansen, Bachthaler, Fölster,
Scharpf - Gärtnerischer Pflanzenbau, 3.
Auflage S. 210

Abb. 109. Einfluß der Temperatur auf die Trockensubstanzproduktion einer freistehenden Pflanze und einer Pflanze im Bestand (schematisch).

Folgende Grafik zeigt exemplarisch anhand von zwei Extrembeispielen, Spinat und rote Beete, dass je nach Pflanzenart der Ertrag bei zunehmender Bestandsdichte je nach Art ganz unterschiedlich ausfallen kann.



Quelle: Jansen, Bachthaler, Fölster,
Scharpf - Gärtnerischer Pflanzenbau, 3.
Auflage S. 212

Abb. 111. Ertragsbildung
von Spinat und Rote Bete
in Abhängigkeit von der
Bestandesdichte
(schematisch).

Für die Pflanzenzucht ist die Qualität des Saatgutes entscheidend. Es wird ein Haltbarkeitsdatum auf Sämereien aufgedruckt. Aus eigener Erfahrung kann ich sagen, dass es einige Zeit danach zwar noch keimt, jedoch deutlich schlechter. Es braucht wesentlich länger bis die Keimung eintritt, die Keimungsrate sinkt ebenfalls. Besonders häufig war bei Saatgut, welches das Haltbarkeitsdatum überschritten hatte, zu beobachten, dass der Keimling die Samenschale nicht abstoßen konnte (bei Radieschen und Paprika beobachtet). Die Keimblätter können sich dadurch nicht voll entfalten. Teilweise wuchs die Pflanze dann einfach nicht mehr weiter. War das Saatgut noch älter (ca. 4 Jahre über dem Haltbarkeitsdatum) trat bei Salat gar keine Keimung mehr ein. Auch wenn bei frischem Saatgut praktisch alle Samen aufgehen, empfiehlt es sich deutlich mehr Pflanzen als benötigt auszusähen und anschließend nur die Keimlinge stehen zu lassen, die sich am besten entwickelt haben.

3.10.6.1 Die (In)Effizienz von Pflanzen bzw. Photosynthese

Wie (in)effizient manche Pflanzen die photosynthetisierten Stoffe nutzen bzw. sie wieder veratmen und wie wichtig es deshalb ist optimale Bedingungen zu schaffen, soll folgende Rechnung zeigen.
<https://web.archive.org/web/20200615163410/http://www.wald.de/wie-viel-kohlendioxid-co2-speichert-der-wald-bzw-einbaum/> Hier ist das Beispiel einer 120jährigen Buche, 35 Meter hoch, Stammdurchmesser 50 cm, ein ordentliches Gerät also. Diese hat in den 120 Jahren 3,5 Tonnen CO₂ gespeichert. Pro Tag macht das rechnerisch 80 Gramm CO₂ welches sie speichert. Da in diesem Beispiel das gebundene CO₂ durch die Wurzeln nicht berücksichtigt ist, rechnen wir 100 Gramm CO₂ pro Tag. Die 100 Gramm CO₂ pro Tag ergeben (bei einer angenommenen Dichte von 1,98 kg/m³) ca. 50 Liter CO₂ pro Tag welches die Buche aufnimmt. Zum Vergleich, der Mensch stößt in Ruhe alleine durch seine Atmung ca. 22 Liter CO₂ pro Stunde aus, siehe Abschnitt 3.10.2 CO₂-Versorgung, macht rechnerisch 11 Buchen, die ein Mensch alleine für seine Atmung braucht. Der CO₂ Ausstoß durch Verkehr, Strom usw. ist da noch überhaupt nicht enthalten.

Ein Quadratmeter Auberginen nimmt, wenn wir von der niedrigsten CO₂-Aufnahme ausgehen ca. 12,5 Liter pro Stunde auf. Bei einem 8 Stunden Tag sind das 100 Liter CO₂. Gut auch die Auberginen werden nachts CO₂ ausatmen, dennoch darf man nicht außer Acht lassen, dass hier 1 m² Auberginen mit einem riesigen Baum verglichen wird. Der Baum wirft jährlich sein Laub ab, kann im Winter keine Photosynthese betreiben und muss dementsprechend einen Teil seiner gespeicherten Produkte verbrauchen. Dennoch hört sich das sehr ineffizient an, sodass ich verzweifelt nach einem Fehler in dieser Rechnung suche, aber keinen finden kann.

Da mich das Thema Effizienz gepackt hat, habe ich mal weiter recherchiert wie effizient Pflanzen mit dem eingestrahlten Sonnenlicht umgehen. Um das Ergebnis vorwegzunehmen: Leider sehr ineffizient. Schauen wir uns dazu die folgende Tabelle an.

	Pappeln	Mais	Weidelgrasweiden	Mähweiden	Buche	Algen (Becken)	Algen (Reaktor)	Solarzellen
CO ₂ Bindung / Hektar und Jahr in Tonnen	19,1	35	19,1	14,7	12	100	200	
Energie in kWh gebunden in CO ₂	47473,93269	86994,1175	47473,93269	36537,52935	29826,55457	248554,6214	497109,2428	
Nutzungsfaktor Sonnenenergie in %	0,431581206	0,790855614	0,431581206	0,332159358	0,271150496	2,259587467	4,519174935	bis 46 %
bezogen auf PAR in %	0,863162413	1,581711227	0,863162413	0,664318715	0,542300992	4,519174935	9,03834987	

Die Werte der CO₂ Bindung pro Hektar sind von <https://web.archive.org/web/20160318144023/https://energiepflanzen.fnr.de/energiepflanzen/algen/> und <https://web.archive.org/web/20160827155335/http://www.iasp.asp-berlin.de/bilder/co2-2012.pdf> entnommen. Es wurde jeweils sogar die höchste Zahl gewählt, damit die Pflanzen besser abschneiden.

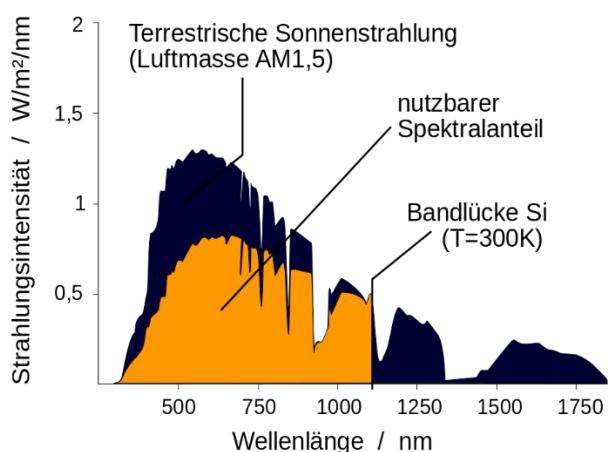
Als Basis der eingestrahlten Energie wurden 1100 kWh pro m² und Jahr angenommen. In Deutschland schwankt dieser Wert zwischen 900 und 1200. Tendenziell ist er im Süden höher als im Norden. Den genauen Wert kann man auf einer sog. Solarkarte ablesen. Zum Vergleich, für Spanien beträgt die Globalstrahlung ca. 2000 kWh/m² und Jahr und für die Sahara 2500 kWh/m² und Jahr.

Pflanzen nutzen, wie in Abschnitt 1.2 „Einheiten des Lichts“ beschrieben, nur den Wellenlängenbereich von 400 bis 700 nm. In diesem Bereich stellt das Sonnenlicht ca. die Hälfte der Energie bereit, deshalb wurde die letzte Spalte „bezogen auf PAR“ hinzugefügt. Man sieht, die effizientesten Pflanzen sind Algen im Reaktor (Bild siehe unten), allerdings erreichen diese auch gerade mal eine lächerliche Nutzung der Sonnenenergie von 2,25 %. Hinzu kommt, dass man bei Algen diese im Winter beheizen muss, was die Effizienz nochmals verringert. Solarzellen produzieren auch im Winter Strom. Die

angegebenen 46 % beziehen sich auf spezielle Solarzellen, die z.B. erst einmal mit Optiken das Licht bündeln (wie eine Lupe) um dann ein Vielfaches der Sonnenenergie auf den eigentlichen Kollektor zu leiten. Die auf vielen Hausdächern zu findenden Solarzellen sind meistens vermehrt aus Monokristallinem Silizium und erreichen Modulwirkungsgrade von ca. 20 %. Wechselrichter erreichen locker 98 % Wirkungsgrad, was einen Gesamtwirkungsgrad von 19,8 % ergibt. Mit dem Alter verlieren Solarzellen an Wirkungsgrad. Die Hersteller garantieren meist noch 80 % der ursprünglichen Leistung nach 25 Jahren, umgerechnet ein Wirkungsgrad von 16 %. Bei hohen Temperaturen und durch die unvermeidliche Verschmutzung sinkt der Wirkungsgrad zusätzlich noch ein bisschen. Aber alles in allem übertrifft er Pflanzen bei weitem und es wird ganzjährig die Sonnenenergie genutzt.



Algen-Reaktor, Quelle:
https://energiepflanzen.fnr.de/fileadmin/_processed/_csm_IMG_0011_1eabc81287.jpg



Von Silizium-Solarzellen genutztes Spektrum Quelle:
https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/8/8a/Solarzelle_SiSpektrum.svg/922px-Solarzelle_SiSpektrum.svg.png

Solarzellen nutzen einen erheblichen Teil des Lichtes > 700 nm. Die Forschung bei Solarzellen geht weiter, sodass in Zukunft noch höhere Wirkungsgrade erreicht werden. Bei Pflanzen kann eine nennenswerte Steigerung des Nutzungsgrades des Sonnenlichts allerhöchstens nur noch durch die umstrittene Gentechnik erreicht werden.

Da sich Strom im Moment nur sehr aufwändig speichern lässt, sind die Energiepflanzen bezogen auf die Energiespeicherung klar im Vorteil.

4 Schlussbemerkungen

Um Energie zu sparen und schnelles Wachstum zu erreichen, ist nicht nur der Einsatz effizienter LEDs wichtig. Zahlreiche weitere Faktoren spielen hier ebenso eine wichtige Rolle. Das Lebewesen Pflanze ist unglaublich anpassungsfähig und es gibt jede Menge Unterschiede zwischen den Arten. Was für eine Art gilt, kann bei einer anderen schon wieder ganz anders sein, z.B. die optimale Temperatur. Um das Optimum für seine Zielpflanze(n) zu ermitteln, bräuchte man wahrscheinlich viele Jahre intensiver Forschung mit teuren Gerätschaften. Bei Beachtung der hier gezeigten Faktoren lässt sich jedoch der Ertrag bereits bedeutend steigern.

5 Anhang

Als Anhang gibt es die Excel Datei „Kostenvergleich Oslon vs. Weißlicht.xlsx“

Hier kann man die Parameter verschiedener LED-Lampen, Stromkosten, Beleuchtungsdauer und vieles mehr eintragen um eine Kostenvergleichsrechnung durchzuführen.