

Ackerunkrautkontrolle mit UV-C Strahlung am Beispiel der Modellpflanze Ölrettich, *Raphanus sativus* var. *oleiformis*

*Weed control with UV-C radiation using oil radish, *Raphanus sativus* var. *oleiformis* as model plant*

Sarah Katharina Limpächer^{1*}, Becke Strehlow¹, Eike Stefan Dobers¹, Bärbel Gerowitt²

¹Hochschule Neubrandenburg, Fachbereich Agrarwirtschaft und Lebensmittelwissenschaften, Neubrandenburg

²University of Rostock, Faculty of Agricultural and Environmental Sciences, Rostock

*limpaecher@hs-nb.de

DOI: 10.5073/20220124-065108

Zusammenfassung

In konventionellen Ackerbausystemen werden derzeit überwiegend Herbizide zur Kontrolle von Unkräutern eingesetzt. Der Einsatz von Herbiziden wird wegen unerwünschter Wirkungen auf abiotische Ressourcen sowie die Biodiversität kritisch diskutiert. Um ihren Einsatz zu reduzieren, müssen mittelfristig alternative Lösungen gefunden werden.

Als Alternative kommt UV-C Strahlung in Frage. Diese wirkt ab einer bestimmten Dosis irreversibel zellschädigend, wodurch das Wachstum von Pflanzen reduziert wird. Der wichtigste Parameter der UV-C Applikation ist die Dosis, die sich aus der Strahlungsstärke des Strahlungsfeldes und der Dauer der Bestrahlung ergibt.

Ziel der Untersuchungen war es, eine UV-C Dosis zur Unkrautkontrolle zu finden, mit der das Wachstums von Unkrautpflanzen beeinträchtigt wird.

Am Beispiel von *Raphanus sativus* wird eine Dosis-abhängige Wachstumshemmung der UV-C Strahlung gezeigt. Die höchste Reduktion im Vergleich zur unbehandelten Kontrolle betrug 93 % der Trockenmasse. Neben der UV-C Dosis hatte auch der zeitliche Abstand zwischen wiederholten Bestrahlungen einen Einfluss auf die Biomasseentwicklung der Pflanzen.

Stichwörter: Biomassereduktion, physikalische Kontrollmethoden, Unkrautkontrolle, UV-C Strahlung, Wachstumskontrolle

Abstract

In conventional arable farming systems, herbicides are predominantly used to control weeds. The use of herbicides is highly debated due to undesirable effects on abiotic resources and biodiversity. In order to reduce their use, alternative solutions are needed.

UV-C radiation could be an alternative method to control weeds. Here, an irreversible cell-damaging effect on plants applicated at high doses reduce their photosynthetic capacity and growth. The most important parameter of UV-C application is the dose, which results from the irradiance of the radiation field and the duration of irradiation.

The investigations aim on finding a suitable dose with high impact on plant biomass in order to control weeds effectively.

A dose-dependent growth inhibition of UV-C radiation was found for *Raphanus sativus* as model plant. Besides the UV-C dose, the time interval between repeated irradiations also influenced the biomass of treated plants.

Keywords: biomass reduction, growth inhibition, physical control method, UV-C radiation, weed control

Einleitung

In konventionellen Ackerbausystemen erfolgt die Unkrautkontrolle überwiegend durch den Einsatz von Herbiziden. Das Ausmaß des Einsatzes von Herbiziden in der konventionellen Landwirtschaft wird wegen unerwünschter Wirkungen auf abiotische Ressourcen (Wasser, Boden, Luft) stark diskutiert (LECHENET et al., 2017). Insbesondere Herbizidresistenzen haben einen großen Einfluss auf die Strategie der Anwendung und damit gehen unsichere ökonomische und ökologische Auswirkungen einher (BECKIE et al., 2019). Vor diesem Hintergrund müssen neue, vor allem nicht-chemische Alternativen zur Unkrautkontrolle entwickelt werden.

Eine Alternative könnte sein, das Wachstum von Unkrautpflanzen durch die Applikation von UV-C Strahlung zu hemmen. Der UV-Teil des elektromagnetischen Spektrums umfasst langwellige UV-A (320-400 nm), mittelwellige UV-B (280-320 nm) und kurzwellige UV-C Strahlung (100-280 nm). Im Gegensatz zu UV-A und UV-B Strahlung erreicht die von der Sonne emittierte UV-C Strahlung nicht die Erdoberfläche, da diese größtenteils von der Ozonschicht absorbiert wird. Nach dem Planck'schen Strahlungsgesetz sind Wellenlänge und Energiedichte negativ korreliert. Demnach ist die UV-C Strahlung die energiereichste im UV-Bereich - ein großer Vorteil, wenn UV-Strahlung zur Behandlung von Pflanzen genutzt werden soll, da hohe Energiedichten bereits bei kurzer Behandlungsdauer Effekte auf das Pflanzenwachstum erwarten lassen (URBAN et al., 2016).

Die Auswirkungen von UV-C Strahlung auf Pflanzen ist bislang wenig untersucht. Ausnahme ist die schädigende Wirkung von UV-C Strahlung auf die Thylakoidmembran der Chloroplasten, die Fotosyntheseaktivität reduziert (MANTAI et al., 1970; WITUSZYNSKA et al., 2015; URBAN et al., 2016). Neben diesen direkt schädigenden Effekten wurden auch indirekt schädigende Effekte in Pflanzen nachgewiesen: UV-C Bestrahlung führt zur Bildung von reaktiven Sauerstoffspezies, die ihrerseits Zellorganellen schädigen (GAO et al., 2008).

In der vorliegenden Untersuchung wurden UV-C Dosen ermittelt, mit Hilfe derer eine starke Beeinträchtigung des Wachstums von Unkrautpflanzen erreicht wird. Als Modellpflanze wurde Ölrettich, *Raphanus sativus*, ausgesucht, stellvertretend für Unkrautpflanzen mit planophiler Blattstellung, dicker Wachsschicht und moderater Behaarung. Diese Eigenschaften könnten einen Einfluss auf den Behandlungserfolg haben. Hierbei ist davon auszugehen, dass die planophile Blattstellung aufgrund der UV-C Behandlung von oben den Bekämpfungserfolg erhöht, die Dicke der Wachsschicht und die Behaarung der Pflanze den Bekämpfungserfolg jedoch reduzieren, da diese die Pflanze gegebenenfalls davor schützen, dass die Bestrahlung tiefer in die Epidermis eindringt.

Es wurde die Hypothese untersucht, dass *R. sativus* aufsteigende Dosen mit einer graduellen Biomassereduktion bis hin zur vollständigen Abtötung reagiert.

Material und Methoden

Versuchsaufbau und UV-C Applikation

Die Wirkung von UV-C Strahlung auf die oberirdische Biomasseentwicklung von *R. sativus* wurde unter standardisierten Gewächshausbedingungen getestet. Es wurde, nach der Versuchsdurchführung mit einer Einmalbehandlung, der Einfluss verschiedener zeitlicher Abstände zwischen wiederholter Bestrahlungen untersucht. Die Pflanzen wurden dreimal nacheinander mit UV-C Strahlung (T1, T2 und T3) behandelt. Dabei lagen bei einer Variante jeweils 24 Stunden (Behandlungsstrategie Intervall 24h) und bei der anderen 48 Stunden zwischen den einzelnen Bestrahlungen (Behandlungsstrategie Intervall 48h).

Außerdem wurden verschiedene UV-C Dosen angewandt, die über die Einwirkzeit variiert wurden. Bei der Einmalbehandlung wurden vier verschiedene UV-C Dosen getestet ($1,15 \text{ Ws} \cdot \text{cm}^{-2}$, $2,3 \text{ Ws} \cdot \text{cm}^{-2}$, $4,6 \text{ Ws} \cdot \text{cm}^{-2}$, $9,2 \text{ Ws} \cdot \text{cm}^{-2}$). Bei der dreimaligen Behandlung wurden diese Dosen zu T1, T2 und T3 appliziert (Gesamtdosis $3,5 \text{ Ws} \cdot \text{cm}^{-2}$, $6,9 \text{ Ws} \cdot \text{cm}^{-2}$, $13,8 \text{ Ws} \cdot \text{cm}^{-2}$, $27,6 \text{ Ws} \cdot \text{cm}^{-2}$). Die Strahlung wurde im BBCH-

30. Deutsche Arbeitsbesprechung über Fragen der Unkrautbiologie und -bekämpfung, 22. – 24. Februar 2022 online

Stadium 11-12 appliziert. Pro UV-C Dosis und einer unbehandelten Kontrolle waren je zehn Wiederholungen angelegt.

Als Strahlungsquelle dienten neun UV-C Röhren (Lichtleiste 75W T8 VVG, 75W UV-C Röhre mit 254nm). Das Strahlungsfeld wurde in definierten Abständen mit einem Spektrometer (AvaSpec-4096CL-EVO) vermessen. Die durchschnittliche Intensität des Strahlungsfeldes betrug $7661,71 \mu\text{W}\cdot\text{cm}^{-2}$ im Abstand von 7,5 cm.

Die Topfversuche wurden in einem Gemisch aus Einheitserde und Quarzsand (2,8 : 1) durchgeführt. Pro Topf (13x13x18 cm) wurden 9 Samen ausgesät. Die Töpfe wurden randomisiert im Gewächshaus aufgestellt und bis zur Bonitur \varnothing 4 Wochen unter Standardbedingungen kultiviert (Tagestemperatur: 20 °C; Nachttemperatur: 15 °C; simulierte Tageslänge mit Zusätzlich: 16 h).

Bonitur

Der Effekt der Strahlungsapplikation wurde durch regelmäßige Blattflächenmessungen und Ermittlung der oberirdischen Trockenmasse 14 Tage nach der UV-C Behandlung beurteilt. Die Blattflächenmessung wurde bildgestützt (Olympus TG5) durchgeführt. Die Auswertung erfolgte über die opensource Software FIJI (<https://imagej.net/software/fiji/>, 06.10.2021; GE et al., 2016). Die Blattfläche wird über die Anzahl und Größe grüner Pixel im Bild ermittelt. Die Größe wurde über die Maße der Töpfe geometrisch kalibriert. Der, für die Bildauswertung, angewendete Algorithmus erfasst ausschließlich die grünen Bereiche der RGB-Bilder, nekrotisierte Bereiche werden nicht quantifiziert. Zusätzlich wurden exemplarische Messungen der Chlorophyll-Fluoreszenz durchgeführt, dafür wurde der FluorPen FP 110 (Photon Systems Instruments) genutzt.

Für die Ermittlung der oberirdischen Trockenmasse wurde das Pflanzenmaterial je Topf geerntet und getrocknet (105 °C für 48 h) und relativ zur Trockenmasse der unbehandelten Kontrolle dargestellt. Frisch- und Trockenmassen waren sehr eng korreliert, daher beziehen sich die dargestellten Ergebnisse ausschließlich auf die Trockenmasse.

Die Auswertung erfolgte mit der statistischen Softwareumgebung R (Foundation, 2021). Neben den Standardpaketen wurden die Pakete multcompView und agricolae genutzt. Signifikante Unterschiede zwischen den UV-C Dosen innerhalb und zwischen den beiden Behandlungsstrategien wurden mit dem Tukey's posthoc Test ($p \leq 0,05$) geprüft.

Ergebnisse

Erste Effekte der UV-C Behandlung konnten visuell und olfaktorisch bereits direkt nach der ersten UV-C Behandlung wahrgenommen werden: glänzendes Aussehen der oberen Blattepidermis sowie ein kohlantiger Geruch. Die Auswertung der RGB-Bilder ergab, dass sowohl die UV-C Dosis als auch die Behandlungsstrategie einen Einfluss auf die grüne Blattfläche hatte. Die grüne Blattfläche sank mit zunehmender UV-C Dosis (Abb. 2). Zudem zeigte die Behandlung mit 48 h Intervall zwischen den Bestrahlungen deutlichere Effekte als ein Intervall von 24 h.

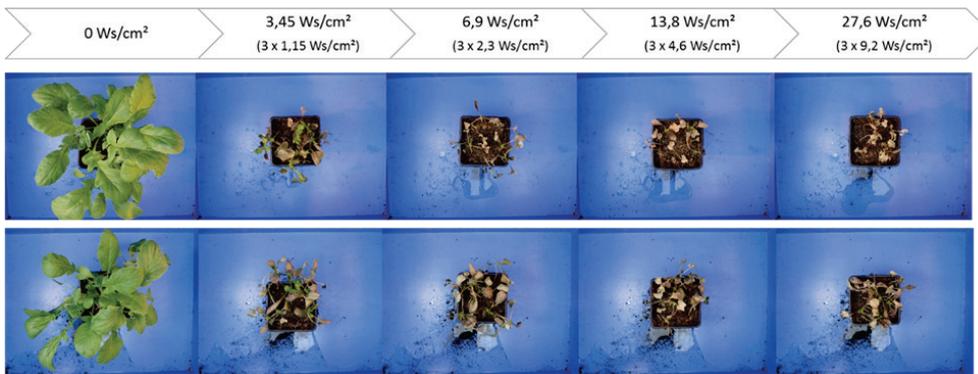


Abbildung 1 RGB-Bilder von *R. sativus* 6 Tage nach der letzten UV-C-Behandlung bei unterschiedlichen Strahlungsdosen und zeitlichen Abständen zwischen den drei Bestrahlungen; oben: Intervall 48 h, unten Intervall 24 h.

Figure 1 RGB images of *R. sativus* 6 days after the last UV-C treatment with different radiation doses and time intervals between the three irradiations; above: interval 48 h, below interval 24 h.

Die Blattflächenmessung zeigte eine deutliche Abnahme der grünen Blattfläche bereits 24 Stunden nach der ersten UV-C Behandlung. Die maximale Reduktion der grünen Blattfläche wurde wenige Tage nach der letzten Behandlung erreicht; zwischen den UV-C Dosen wurden nur leichte Unterschiede gemessen. Am letzten Tag der Blattflächenmessung (34-35 Tage nach der Saat) wurde eine Zunahme der grünen Blattfläche gegenüber vorherigen Boniturterminen ermittelt, die von der Dosis und der Behandlungsstrategie abhängig war; dieser Wiederaustrieb war bei geringeren UV-C Dosen und insbesondere beim Intervall 24 h stärker ausgeprägt (Abb. 2).

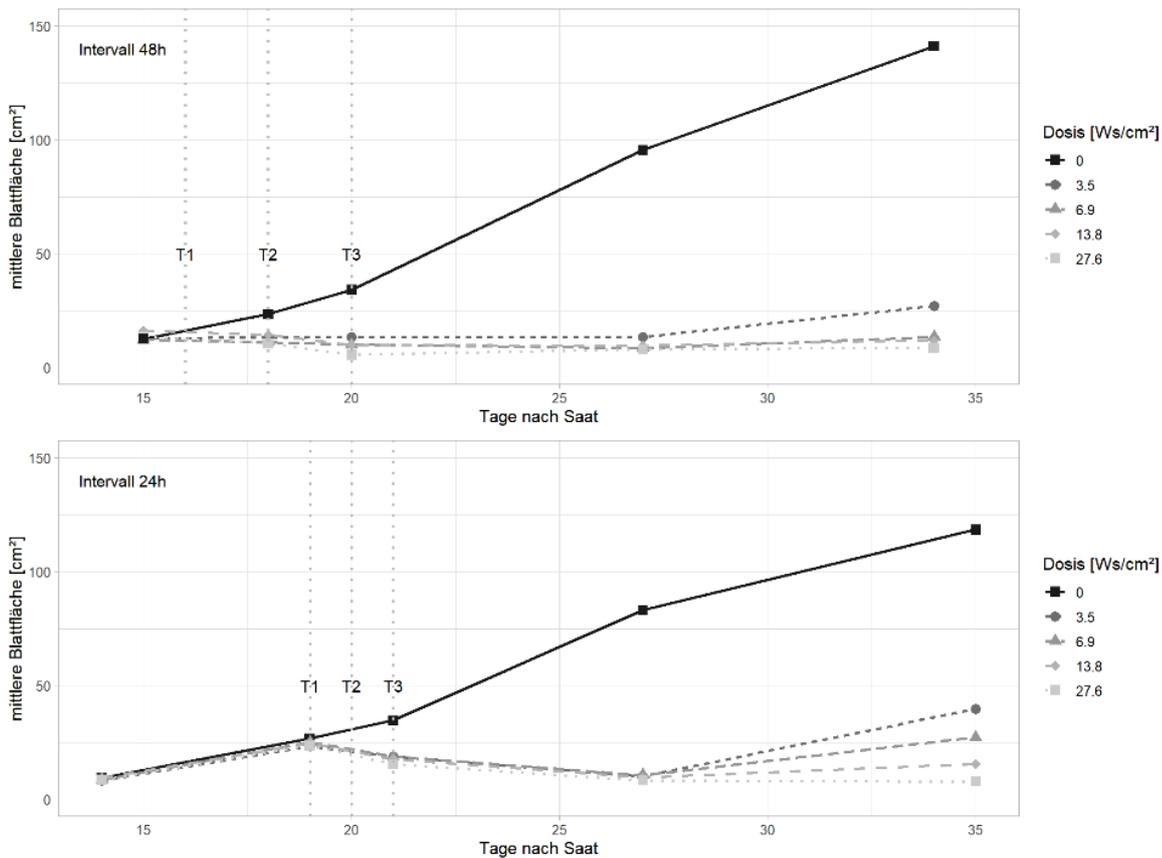


Abbildung 2 Entwicklung der grünen Blattfläche (cm^2) bei unterschiedlichen Strahlungsdosen und zeitlichen Abständen zwischen den drei Bestrahlungen (Intervall 48h und Intervall 24h).

Figure 2 Development of the green leaf area (cm^2) with different radiation doses and time intervals between the three irradiations (interval 48h and interval 24h).

Durch die UV-C Behandlung wurde die Biomasse von *R. sativus* stark reduziert; die mittlere Biomassereduktion betrug bei der höchsten UV-C Dosis von 27,6 Ws*cm⁻² im Vergleich zur unbehandelten Kontrolle 93% beim Intervall 48 h und 88 % beim Intervall 24 h. Die Biomassereduktion mit vergleichbar hohen UV-C Dosen fiel bei der dreimaligen Behandlung höher aus als die Biomassereduktion bei der Einmalbehandlung. Die einmalige UV-C Behandlung mit 2,3 und 4,6 Ws*cm⁻² führte zu einer Biomassereduktion um 22,6 % bzw. 30,2 % im Vergleich zur unbehandelten Kontrolle. Die vergleichbare Strahlungsdosis bei der dreimaligen Behandlung (dreimal 1,15 Ws*cm⁻²; Gesamtdosis 3,5 Ws*cm⁻²) reduzierte die Biomasse um 83,2 % (Intervall 48 h) bzw. 72 % (Intervall 24 h).

Beide Behandlungsstrategien mit dreimaliger UV-C-Bestrahlung führten dazu, dass die Steigerung der UV-C Dosis zu einer stärkeren Biomassereduktion führte; signifikant unterschied sich nur die kleinste Dosis von den drei höheren Dosen (Intervall 48 h, p≤0,001) bzw. nur die kleinste Dosis von den zwei höchsten Dosen (Intervall 24 h, p≤0,01) (Abb. 3). Außerdem bestanden zwischen den Behandlungsstrategien Unterschiede in der Biomassereduktion; die Reduktion war höher bei einem zeitlichen Abstand von 48 h zwischen den drei Bestrahlungen als bei einem Abstand von 24 h; signifikante Unterschiede zeigten sich hierbei jedoch nur bei den geringen UV-C Dosen von 3,5 Ws*cm⁻² und 6,9 Ws*cm⁻² (p≤0,01).

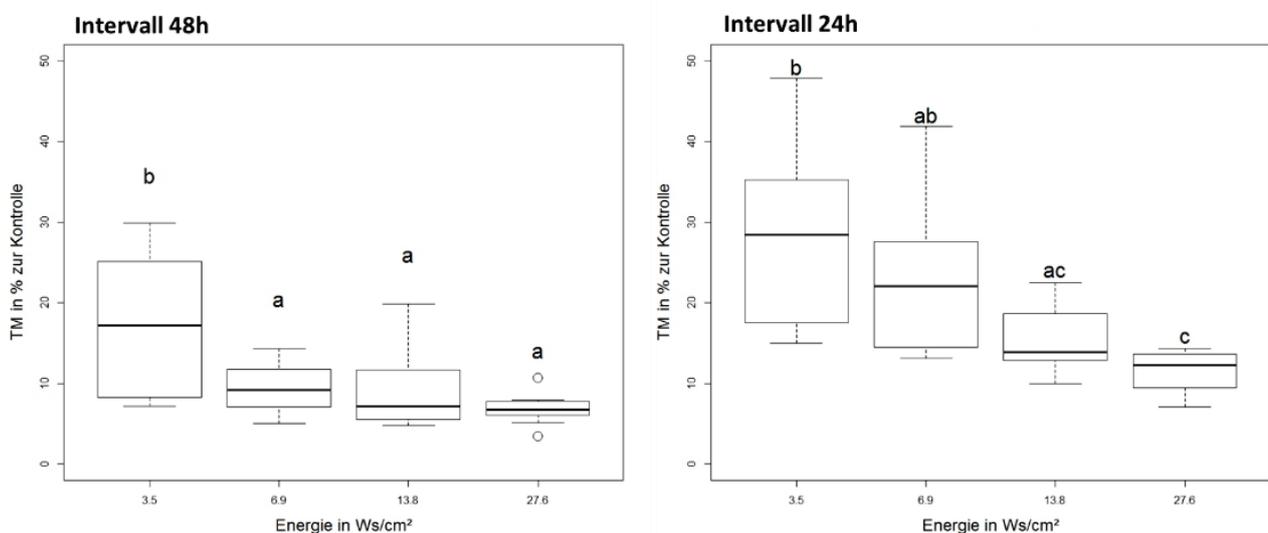


Abbildung 3 Trockenmasse (%) von *R. sativus* relativ zur unbehandelten Kontrolle bei unterschiedlichen Strahlungsdosen und zeitlichen Abständen zwischen den drei Bestrahlungen (Intervall 48h und Intervall 24h). Unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede zwischen den Dosen (p≤0,05).

Figure 3 Dry matter (%) of *R. sativus* relative to the untreated control with different radiation doses and time intervals between the three irradiations (interval 48h and interval 24h). Different letters indicate significant differences between the doses (p≤0.05).

Diskussion und Ausblick

Am Beispiel von *Raphanus sativus* konnte eine Dosis-abhängige Wachstumshemmung durch UV-C Strahlung gezeigt werden. Neben der UV-C Dosis hatte vor allem der zeitliche Abstand zwischen wiederholten Bestrahlungen einen Einfluss auf die Biomasseentwicklung der Pflanzen.

ANDREASEN et al. (1999) untersuchten den Effekt von UV-C Strahlung auf verschiedene Pflanzenarten, wie zum Beispiel *Brassica napus* und *Pisum sativum*. Die Arten unterschieden sich erheblich in ihrer Empfindlichkeit gegenüber UV-C Strahlung; die mittlere effektive Wirkdosis (ED₅₀) auf das Frischgewicht variierte zwischen 1,0 Ws*cm⁻² (*U. dioica*) und 31,0 Ws*cm⁻² (*P. sativum*). Die Dosis-Wirkungskurve für *B. napus* zeigte eine Dosis-abhängige Wachstumshemmung mit einer deutlichen Biomassereduktion bei 1,0

30. Deutsche Arbeitsbesprechung über Fragen der Unkrautbiologie und -bekämpfung, 22. – 24. Februar 2022 online
Ws*cm⁻² und steht in grundsätzlicher Übereinstimmung mit den eigenen Ergebnissen. ANDREASEN et al. (1999) führten nur einmalige Behandlungen durch.

TIBURCIO et al. (1985) untersuchten die Wirkung gestaffelter UV-C Behandlungen. Hier wurden Tabak-Pflanzen (*Nicotiana rustica*) täglich eine Minute über einen Zeitraum von 58, 65 bis 86 Tage mit 0,00014 Ws*cm⁻² behandelt. Die Gesamtdosen lagen mit 0,487 Ws*cm⁻², 0,546 Ws*cm⁻² und 0,722 Ws*cm⁻² weit unter den angewandten UV-C Gesamtdosen der vorliegenden Arbeit. Die Untersuchungen von TIBURCIO et al. (1985) konzentrierten sich nicht auf den Einfluss der UV-C Strahlung auf die Biomasse, sondern auf die löslichen Proteine und morphologischen Veränderungen. Andere Arbeiten, welche die Wirkung von Behandlungsintervallen untersuchten, sind den Autoren nicht bekannt.

Der Bewertung des beobachteten Wiederaustriebs der Pflanzen ist positiv, denn die Untersuchungen der vorliegenden Arbeit hatten, neben der Feststellung der letalen Dosis, die Wachstumskontrolle zum Ziel. Es gelang trotz der erheblichen Wachstumsbeeinträchtigungen jedoch nicht, eine letale Dosis für *R. sativus* zu ermitteln. Exemplarische Erhebungen zur Chlorophyll-Fluoreszenz (FluorPen FP 110, Photon Systems Instruments), welche ein Maß für die Fotosynthese-Effizienz ist, zeigten keine Beeinflussung in diesem Parameter im Vergleich zur unbehandelten Kontrolle. Inwieweit die durch UV-C stark im Wachstum beeinträchtigten Pflanzen daher in einem Kulturpflanzenbestand noch ausreichend konkurrenzfähig sind und tatsächlich weiterwachsen und sich vermehren können, muss gesondert untersucht werden.

Die in der vorliegenden Arbeit durchgeführten UV-C Applikationen gingen mit sensorischen Auffälligkeiten einher, wie das glänzende Aussehen der oberen Blattepidermis und der kohlartige Geruch. Die optische Veränderung beobachteten auch TIBURCIO et al. (1985) in ihren Untersuchungen und erklärten es sich mit der Schädigung der Epidermiszellen. WITTSTOCK et al. (2003) stellten fest, dass *Brassicaceae* Senföle nach einer Verwundung der Blätter freisetzen. Senföle sind für den kohlartigen Geruch dieser Pflanzenfamilie verantwortlich. Es liegt nahe, dass durch die UV-C Bestrahlung, die obere Epidermiszellen verletzt wurde und Senföle synthetisiert wurden.

Seit vielen Jahren werden Untersuchungen zur Wirkung von UV-C auf Pflanzen durchgeführt, doch der Vergleich mit vielen dieser Arbeiten ist schwierig. Insbesondere in älteren, z.T. mit sehr differenzierter Versuchsdurchführung ausgelegten Arbeiten, finden sich oft nur Informationen über die eingesetzten Wellenlängen, seltener aber genaue Angaben über die tatsächlich verwendeten Dosen (siehe z.B. BORNMAN et al., 1983). In Arbeiten jüngerer Datums dagegen finden sich zwar Angaben zur verwendeten Dosis jedoch wird in diesen Arbeiten oft mit Zellkulturen und vergleichsweise geringen Energiemengen gearbeitet (BALESTRAZZI et al., 2010).

Die weiteren Arbeiten werden sich anderen dikotylen und monokotylen Unkrautarten widmen und zudem die Behandlungsparameter Dosis und Intervall näher untersuchen.

Förderung

Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung, FKZ 03WIR2806A, Verbund "Physics for Crops" im Bündnis "Physics for Food", Förderprogramm "WIR! - Wandel durch Innovation in der Region" gefördert.

Literatur

- ANDREASEN, C., L. HANSEN, J.C. STREIBIG, 1999: The Effect of Ultraviolet Radiation on the Fresh Weight of Some Weeds and Crops. *Weed Technology* **13**, 554-560.
- BALESTRAZZI, A., V. LOCATO, M.G. BOTTONE, L. DE GARA, M. BIGIIOGERA, C. PELLICCIARI, S. BOTTI, D. DI GESÚ, M. DONA, D. CARBONERA, 2010: Response to UV-C radiation in topo I-deficient carrot cells with low ascorbate levels. *Journal of Experimental Botany* **61**, 575–585.

30. Deutsche Arbeitsbesprechung über Fragen der Unkrautbiologie und -bekämpfung, 22. – 24. Februar 2022 online
- BECKIE, H.J., M.B. ASHWORTH, K.C. FLOWER, 2019: Herbicide Resistance Management: Recent Developments and Trends. *Plants* **8**, 1-13.
- BORNMAN, J.F., R.F. EVERT, R.J. MIERZWA, 1983: The effect of UV-B and UV-C radiation on sugar beet leaves. *Protoplasma* **117**, 7-16.
- GAO, C., D. XING, L. LI, L. ZHANG, 2008: Implication of reactive oxygen species and mitochondrial dysfunction in the early stages of plant programmed cell death induced by ultraviolet-C overexposure. *Planta* **227**, 755-767.
- GE, Y., G. BAI, V. STOERGER, J.C. SCHNABLE, 2016: Temporal dynamics of maize plant growth, water use, and leaf water content using automated high throughput RGB and hyperspectral imaging. <http://dx.doi.org/10.1016/j.compag.2016.07.028>.
- <HTTPS://IMAGEJ.NET/SOFTWARE/FIJI/>. (06.10.2021).
- LECHENET, M., F. DESSAINT, G. PY, D. MAKOWSKI, N. MUNIER-JOLAIN, 2017: Reducing pesticide use while preserving crop productivity and profitability on arable farms. *Nature Plants* **3**, 1-6.
- MANTAI, K.E., J. WONG, N.I. BISHOP, 1970: Comparison studies on the effects of ultraviolet irradiation on photosynthesis. [https://doi.org/10.1016/0005-2728\(70\)90036-8](https://doi.org/10.1016/0005-2728(70)90036-8).
- THE_R_FOUNDATION, 2021: <https://www.r-project.org/>. Retrieved from <https://www.r-project.org/about.html>
- TIBURCIO, A.F., M.T. PINOL, M. SERRANO, 1985: Effect of UV-C on growth, soluble protein and alkaloids in *Nicotiana rustica* plants. *Environmental and Experimental Botany* **25**, 203-210.
- URBAN, L., F. CHARLES, M.R.A. DE MIRANDA, J. AARROUF, 2016: Understanding the physiological effects of UV-C light and exploiting its agronomic potential before and after harvest. <http://dx.doi.org/10.1016/j.plaphy.2016.04.004>.
- WITTSTOCK, U., K. FALK, M. BUROW, M. REICHEL, J. GERSHENZON, 2003: Die Biochemie der Glucosinolat-Hydrolyse: Wie entschärfen Insekten pflanzliche Senfö-Bomben? Retrieved from <https://www.mpg.de/869312/forschungsSchwerpunkt1>
- WITUSZYNSKA, W., M. SZECHYNSKA-HEBDA, M. SOBCEK, A. RUSACZONEK, A. KOZLOWSKA-MAKULSKA, D. WITON, S. KARPINSKI, S., 2015: Lesion simulating disease 1 and enhanced disease susceptibility 1 differentially regulate UV-C-induced photooxidative stress signaling and programmed cell death in *Arabidopsis thaliana*. *Plant Cell Environ.* **38**, 315-330.