

Institut für Landtechnik

**Wirksamkeit der Unkrautbekämpfung mittels Laser in Abhängigkeit verschiedener
biologischer und technisch-physikalischer Parameter**

Inaugural-Dissertation

zur

Erlangung des Grades

**Doktor der Agrarwissenschaften
(Dr. agr.)**

der

Landwirtschaftlichen Fakultät

der

Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn

vorgelegt am

06.01.2012

von

Johanna Marie Gude

aus

Aachen

Referent: Prof. P. Schulze Lammers

Korreferent: Prof. G. Noga

Tag der mündlichen Prüfung: 17.08.2012

Erscheinungsjahr: 2012

Meinen Eltern

Wirksamkeit der Unkrautbekämpfung mittels Laser in Abhängigkeit verschiedener biologischer und technisch-physikalischer Parameter

Seit einigen Jahren nimmt die Bedeutung des Präzisionspflanzenschutzes in der Landwirtschaft immer mehr zu. Ein wichtiges Ziel ist die Reduzierung der chemischen Pflanzenschutzmittel, besonders der Herbizide, im Ackerbau. Dies wird zum Teil schon realisiert durch eine teilflächenspezifische Ausbringung von Herbiziden oder den Einsatz mechanischer Verfahren. Eine weitere Alternative, die überwiegend im ökologischen Ackerbau bisher Einzug erhalten hat, ist die thermische Unkrautbekämpfung. In diesem Bereich gibt es bis jetzt hauptsächlich den Einsatz von Heißwasser/-schaum oder speziellen Abflamngeräten. Laser werden bis jetzt größtenteils in der Industrie oder Medizin eingesetzt. Der Hintergrund dieses Projektes ist es, durch Laserapplikation eine thermische Unkrautkontrolle durchzuführen. Das Ziel ist hierbei die Unterdrückung der Unkräuter in den Kulturpflanzen, wodurch die Konkurrenz um Platz, Nährstoffe und Wasser minimiert wird. Um dies zu realisieren, ist es notwendig, die Unkrautpflanze oder bestimmte Teile davon möglichst schnell und bei geringstem Energieeintrag zu schädigen. Von dieser Zielsetzung ausgehend wurden in ersten Versuchen die biologischen und technischen Versuchparameter für eine erfolgreiche Laserapplikation ermittelt. Hauptaugenmerk bei der Auswertung der Versuche lag darauf, die Auswirkungen des Lasers auf die Unkräuter festzuhalten, ihren Schädigungsgrad zu bestimmen und eine Einschätzung der Weiterentwicklung der Pflanze zu geben. Um eine möglichst genaue Beschreibung der Laserwirkung zu geben, fanden mikroskopische Untersuchungen mit Hilfe eines Stereo-Lichtmikroskops und eines Rasterelektronen-Mikroskops statt. Des Weiteren wurden eine Bonitur und eine Bestimmung der Frischmasse der Unkräuter durchgeführt, beide Methoden sollten den Wachstumszustand der Pflanzen über den Zeitraum von vier Wochen nach der Laserapplikation dokumentieren. In den unterschiedlichen Versuchsreihen zeigte sich deutlich, dass es bei einem guten Zusammenspiel der technischen und biologischen Parameter durchaus möglich ist, bis zu 100 % der Unkrautarten mittels Laserapplikation zu kontrollieren. Allerdings sollten die Pflanzen das Vierblattstadium nicht überschritten haben und die Applikationszeit nicht über 50 ms liegen, um das Verfahren auch für die Praxis interessant und rentabel zu gestalten.

Effectiveness of weed control using laser according to various biological and technical-physical parameters

Since a couple of years the importance of precision crop protection in agriculture increases. One of the main aims of precision crop protection is to reduce the chemical amount of pesticides, in particular the herbicides. This is partly realised by site-specific weed control or mechanical methods like hoeing machines. The thermal weed control is an efficient alternative to herbicides and physical treatment. Already known as a thermal weed control method are the flame-scarfing technology and the application of hot water or hot foam. Lasers are already known in medicine or industry to cut tissues or metals. Background of this project is a new way of thermal weed control by laser application. The aim is to depress the weeds in crops and to achieve a diminished competition between weeds and crops. To realize this idea it is necessary to achieve a fast heating of the weeds or its essential parts in a few seconds by a low energy input.

The first tests should help to detect the biological and technical parameters of laser and plant. The application experiments took place in the Fraunhofer Institute of Laser Technology in Aix-la-Chapelle. Two types of laser with varying power [kW], spot diameter [mm] and residence time [ms] were available in the institute, an Ytterbium-Fibre-Laser and a CO₂-Laser. Thereby it was possible to test different experimental series with diverse biological and technical parameters: plant species, growth stage, point of application, type of laser, power, spot diameter and residence time. The different experimental series show, that it is possible to destroy up to 100 % of weeds by laser application, if the interaction of the different test parameters is successful. Weed control with a laser is possible, if the weeds are not bigger than 4- leaf- stage. In addition to that the residence times should not be longer than 50 ms, to become this weed control a real alternative to the herbicides in practice. The power of the laser is a varying factor and depends on the characteristics of each laser, for the laser application with a CO₂- laser the power of 0,5 kW is sufficient. One important fact which was not object of these experiments is the route guidance and the accuracy of the laser. This is a main fact for this weed control, as a little divergence between laser target and plant target is enough to minimize the success of the system.

A	Inhaltsverzeichnis	
A	Inhaltsverzeichnis.....	7
B	Verzeichnis der Abbildungen.....	10
C	Verzeichnis der Tabellen.....	14
D	Verzeichnis der Abkürzungen.....	15
1	Einleitung und Problemstellung.....	16
2	Stand der Technik und des Wissens.....	18
2.1	Präzisionspflanzenbau.....	18
2.2	Konkurrenz zwischen Unkraut und Kulturpflanze.....	19
2.3	Unkrautregulierung.....	20
2.3.1	Chemische Verfahren.....	20
2.3.1.1	Herbizideinsatz.....	21
2.3.2	Physikalische Verfahren.....	21
2.3.2.1	Mechanisch.....	21
2.3.2.2	Thermisch.....	21
2.4	Unkräuter.....	22
2.4.1	Unterscheidung der Unkrautgruppen nach botanischen Merkmalen.....	23
2.4.2	Thermisch-tolerante und thermisch-sensible Arten.....	23
2.4.3	Morphologie der Pflanzen und Aufbau der Gewebe.....	25
2.4.3.1	Sprossachse.....	25
2.4.3.2	Blatt.....	26
2.4.3.3	Wurzel.....	26
2.4.3.4	Aufbau der Pflanzenzelle.....	27
2.4.4	Wechselwirkungen der Strahlungsenergie und dem biologischen Material....	28
2.4.4.1	Schädigung des Gewebes durch Wärme.....	28
2.4.4.2	Abwehrmechanismen bzw. Wachstumsschädigungen in Form von Welkeerscheinungen.....	28
2.5	Physikalische Grundlagen der Wärmestrahlung.....	29
2.5.1	Wärme als physikalische Größe.....	29
2.5.2	Wärmeübertragung.....	29
2.5.2.1	Wärmestrahlung.....	30
2.5.2.2	Absorptions- und Reflexionsspektrum von Pflanzenmaterial.....	30
2.6	Laser und Lasertechnik.....	31
2.6.1	Einsatzgebiete in Industrie und Medizin.....	31
2.6.2	Möglichkeiten des Lasers im Pflanzenschutz.....	32
3	Material und Methoden.....	35
3.1	Tastversuche am Institut für angewandte Physik in Bonn.....	35
3.1.1	Pflanzenmaterial: <i>Solanum lycopersicum</i> , <i>Phaseolus vulgaris</i>	35
3.1.2	Laser: Nd-YAG-Laser.....	35
3.1.3	Versuchsdurchführung.....	36
3.1.4	Versuchsaufbau.....	36
3.2	Versuche am Laserzentrum Hannover.....	37
3.2.1	Pflanzenmaterial.....	37
3.2.1.1	Diktyledone: <i>Amaranthus retroflexus</i> , <i>Galium aparine</i> , <i>Matrimomata camomilla</i> , <i>Senecio vulgaris</i>	37

3.2.1.2	Monokotyledone: <i>Poa annua</i>	38
3.2.1.3	Anzucht und Wachstumsstadium.....	38
3.2.2	Laser.....	39
3.2.3	Versuchsdurchführung und –auswertung.....	39
3.3	Versuche am Fraunhofer Institut für Lasertechnik in Aachen.....	40
3.3.1	Pflanzenmaterial.....	40
3.3.1.1	Dikotyledone: <i>Anthemis arvensis</i>	40
3.3.1.2	Monokotyledone: <i>Aleopecurus myosuroides</i>	40
3.3.1.3	Anzucht.....	41
3.3.1.4	Wachstumsstadium.....	41
3.3.1.5	Spektroskopie.....	42
3.3.2	Laser.....	43
3.3.2.1	Sicherheitsanforderungen.....	44
3.3.2.2	Bauart des Systems.....	44
3.3.2.3	Versuchsaufbau.....	44
3.3.3	Applikationsverfahren.....	45
3.3.3.1	Angriffspunkt des Lasers.....	46
3.3.3.2	Abstand des Lasers zur Pflanze.....	46
3.3.3.2.1	Strahldiagnose.....	46
3.3.3.3	Applikationszeit und Strahldurchmesser.....	48
3.3.4	Versuchsparameter.....	48
3.3.5	Versuchsdurchführung.....	49
3.3.6	Versuchsauswertung.....	49
3.3.6.1	Bonitur.....	49
3.3.6.2	Frischmassebestimmungen.....	49
3.3.6.3	Mikroskopische Auswertungen (REM und LM).....	50
3.3.6.4	High-Speed-Kamera und Thermokamera.....	50
3.3.6.5	Programm zur mathematischen und statistischen Auswertung der Ergebnisse.....	50
4	Versuchsergebnisse.....	51
4.1	Tastversuche am Institut für angewandte Physik.....	51
4.1.1	Makroskopische Veränderungen der Pflanzen.....	51
4.1.1.1	Einmalige Applikation (1 Puls; 7 ms).....	51
4.1.1.2	Mehrfache Applikation (Applikationszeit 1,5 s; 15 Pulse).....	53
4.2	Unterschiedliche Reaktion von Monokotyledonen und Dikotyledonen auf die Applikation von Laserstrahlung.....	54
4.2.1	Boniturdaten.....	54
4.2.1.1	Keimblattstadium.....	54
4.2.1.2	Vierblattstadium.....	58
4.3	Auswertung der Boniturdaten anhand der technisch-physikalischen und biologischen Versuchsparameter.....	61
4.3.1	Einfluss der Leistung.....	61
4.3.1.1	CO ₂ -Laser.....	61
4.3.1.1.1	<i>Anthemis arvensis</i>	61
4.3.1.1.2	<i>Aleopecurus myosuroides</i>	62
4.3.1.2	Faserlaser.....	63
4.3.1.2.1	<i>Anthemis arvensis</i>	63
4.3.1.2.2	<i>Aleopecurus myosuroides</i>	64
4.3.2	Einfluss der Applikationszeit.....	64

4.3.2.1	CO ₂ -Laser.....	64
4.3.2.1.1	<i>Athemis arvensis</i>	64
4.3.2.1.2	<i>Aleopecurus myosuroides</i>	66
4.3.2.2	Faserlaser.....	67
4.3.2.2.1	<i>Athemis arvensis</i>	68
4.3.2.2.2	<i>Aleopecurus myosuroides</i>	69
4.3.3	Einfluss des Lasertyps in Zusammenhang mit der Wellenlänge.....	71
4.3.3.1	Spektroskopie der Versuchspflanzen.....	73
4.3.4	Einfluss des Angriffspunktes.....	75
4.3.5	Einfluss des Wachstumsstadiums.....	77
4.4	Frischmassebestimmungen nach der Laserapplikation.....	81
4.4.1	<i>Athemis arvensis</i>	82
4.4.1.1	Keimblattstadium: Vergleich von CO ₂ - und Faserlaser.....	82
4.4.1.2	Vierblattstadium: Vergleich von CO ₂ - und Faserlaser.....	83
4.4.2	<i>Aleopecurus myosuroides</i>	84
4.4.2.1	Keimblattstadium: Vergleich von CO ₂ - und Faserlaser.....	84
4.4.2.2	Vierblattstadium: Vergleich von CO ₂ - und Faserlaser.....	84
4.5	Veränderungen des Pflanzengewebes durch die Laserbehandlung.....	85
4.5.1	Makroskopische Veränderungen.....	86
4.5.2	Mikroskopische Veränderungen.....	87
4.5.2.1	Stereolichtmikroskopische Aufnahmen.....	87
4.5.2.2	Rasterelektronenmikroskopische Aufnahmen.....	88
4.5.3	Aufnahmen mit der High-Speed-Kamera und der Thermokamera.....	90
5	Diskussion.....	93
5.1	Vorversuche.....	93
5.2	Wirkung auf das biologische Material.....	94
5.3	Einfluss der biologischen Parameter.....	97
5.3.1	Pflanzenart.....	97
5.3.2	Wachstumsstadium.....	98
5.3.3	Angriffspunkt.....	99
5.4	Einfluss der technisch-physikalischen Parameter auf den Behandlungserfolg.....	100
5.4.1	Lasertyp im Zusammenhang mit der Wellenlänge.....	100
5.4.2	Leistung.....	101
5.4.3	Applikationszeit.....	102
5.4.4	Strahldurchmesser.....	104
5.5	Energieaufwand.....	104
5.5.1	Wie viel Energie ist für eine erfolgreiche Kontrolle der Unkräuter durch den Laser notwendig?.....	104
5.5.2	Beispielrechnung Energieaufwand des Lasers im Vergleich zum konventionellen Abflammgerät.....	106
5.6	Ausblick: Möglichkeiten des Lasereinsatzes in der Praxis.....	108
6	Zusammenfassung.....	110
7	Literaturverzeichnis.....	112

B Verzeichnis der Abbildungen

Abb. 1:	Wärmeflussmechanismen der thermischen Unkrautkontrolle und Modell „thermisch-toleranter-sensibler“ Pflanzen (Bertram 2002).....	24
Abb. 2 a- b:	Querschnitt durch die Sprossachse dikotyler (a) und monokotyler (b) Pflanzen (Universität Karlsruhe).....	25
Abb. 3:	Schematischer Aufbau eines Laubblattes (Quelle: http://de.academic.ru/pictures/dewiki/54...-Aufbau_svg.png).....	26
Abb. 4:	Wurzelquerschnitt (Quelle: www.biokurs.de/skripten/bilder/heliant.jpg).....	27
Abb. 5:	Schematischer Aufbau der pflanzlichen Zelle (Quelle: www.agrar.unihoehenheim.de/fileadmin/einrichtungen/agrar/Studium/Tutorien/Unterlagen_alt/Bio_Pflanzenzelle.pdf).....	28
Abb. 6:	Spektrum der verschiedenen Wellenlängen mit Fokus auf sichtbarem und infrarotem Licht, in dem sich der Bereich des thermischen Infrarot befindet (Quelle: www.infrarot-service.de).....	30
Abb. 7:	Absorptionsspektrum (links) und Reflexionsspektrum (rechts) von Chlorophyll, Absorption und Reflexion jeweils in % (Quelle: roxor.eu/de_teknikinfo.htm).....	31
Abb. 8:	Versuchsaufbau beider Versuchsreihen mit dem Nd-YAG-Laser im Institut für angewandte Physik in Bonn; blau: Fokus 100 µm, Pulsenergie 10 mJ; rot: Fokus 200 µm, Pulsenergie 20 mJ.....	37
Abb. 9 a-b:	a) Keimblattstadium von <i>Aleopecurus myosuroides</i> in Saatschalen b) pikiertes Unkraut im Anzuchtopf.....	41
Abb. 10:	Screenshot Spektroskopsoftware UV WinLab, roter Kasten: Messeinstellungen.....	43
Abb. 11:	Schematische Darstellung des Versuchsaufbaus.....	45
Abb. 12:	Schematische Darstellung des Strahlenverlaufs eines Laserstrahls (rot) durch den Fokus.....	47
Abb. 13:	Kaustik des Laserstrahls, deutliche Abnahme der Leistung zum Rand des Laserstrahls (violette Flächendarstellung); Zentrum des Laserstrahls gelb dargestellt.....	47
Abb. 14:	Nahaufnahme des geschädigten Pflanzengewebes von <i>Phaseolus vulgaris</i> ca. eine Stunde nach der Laserapplikation (1 Puls; 7 ms); deutlich zu sehen ist ein Loch im Pflanzengewebe wo der Laserstrahl aufgetroffen ist und zusammengefallene Zellen in direkter Umgebung des Loches.....	52

- Abb. 15: Aufnahme des behandelten Pflanzenblattes von *Solanum lycopersicum* nach einer Woche im Gewächshaus; deutlich heben sich die gelben, ausgetrockneten Zellen vom restlichen Blattgewebe ab (1 Puls; 7 s)..... 52
- Abb. 16: mehrfach gepulste Laserapplikation in die Blattmitte (links) und an der Blattspitze (rechts)..... 53
- Abb. 17: Welkeerscheinungen der Keimblätter von *A. arvensis* (rot) und *A. myosuroides* (orange) in % gewelkte Blattfläche gegenüber der Leistung des Faserlasers von 1- 4 kW; Applikationszeit 10 ms; Strahldurchmesser 1 mm..... 55
- Abb. 18: Wirkungsgrad der Laserapplikation; a) Faserlaser 4 kW auf das Wachstumszentrum von *A. arvensis* bei drei unterschiedlichen Applikationszeiten; b) CO₂-Laser 0,5 kW auf das Wachstumszentrum von *A. myosuroides* bei einer Applikationszeit; Strahldurchmesser konstant 1 mm..... 57
- Abb. 19 a- d: Wirkungsgrad der Laserapplikation bei verschiedenen Applikationszeiten (a: 25 ms, b: 50 ms, c: 75 ms, d: 100 ms); Vergleich von Dikotyledonen (links) und Monokotyledonen (rechts) im Vierblattstadium; Faserlaser, Leistung 4 kW; Strahldurchmesser 2 mm; bonitiert über vier Wochen..... 59/60
- Abb. 20: auftretende Welkeerscheinungen [%] von *A. arvensis* bei unterschiedlichen Leistungen des CO₂-Lasers, bonitiert über drei Wochen; Applikationszeit 10 ms, Strahldurchmesser 1 mm..... 62
- Abb. 21: Welkeerscheinungen [%] von *A. myosuroides* bei unterschiedlichen Leistungen des CO₂-Lasers bis zu drei Wochen nach Applikation; Applikationszeit 10 ms; Strahldurchmesser 1 mm..... 63
- Abb. 22 a-d: Übersicht über den Bekämpfungserfolg dikotyler Pflanzen von *A. arvensis* im Vierblattstadium bei unterschiedlichen Applikationszeiten des CO₂-Lasers: a: 25, b: 50, c: 75 und d: 100 ms; Leistung 0,5 kW; Strahldurchmesser 2 mm..... 65
- Abb. 23 a-d: Übersicht über den Bekämpfungserfolg monokotyler Pflanzen von *A. myosuroides* bei unterschiedlichen Applikationszeiten des CO₂-Lasers; 25, 50, 75 und 100 ms; Leistung 0,5 kW; Strahldurchmesser 2 mm..... 67
- Abb. 24 a- d: Übersicht über den Bekämpfungserfolg dikotyler Pflanzen von *A. arvensis* bei unterschiedlichen Applikationszeiten des Faserlasers: 25, 50, 75 und 100 ms; Leistung 4 kW; Strahldurchmesser 2 mm..... 69
- Abb. 25 a- d: Übersicht über den Bekämpfungserfolg monokotyler Pflanzen von *A. myosuroides* bei unterschiedlichen Applikationszeiten des Faserlasers: 25, 50, 75 und 100 ms; Leistung 4 kW, Strahldurchmesser 2 mm..... 71

- Abb. 26: Unterschiede zwischen dem Wirkungsgrad des CO₂-Lasers (links) und des Faserlasers (rechts) auf *A. arvensis* bei einer Applikationszeit von 100 ms, Angriffspunkt Stielbasis; Leistung 0,5 kW; Strahldurchmesser 2 mm..... 72
- Abb. 27: Unterschiede zwischen dem Wirkungsgrad des CO₂-Lasers (links) und des Faserlasers (rechts) auf *A. myosuroides* bei einer Applikationszeit von 100 ms, Angriffspunkt Stielbasis; Leistung 0,5 kW; Strahldurchmesser 2 mm... 73
- Abb. 28 a- b: spektrale Reflexion und spektrale Absorption (berechnet) der Keimblätter von *A. arvensis* (a) und *A. myosuroides* (b) im sichtbaren und IR-Bereich. 74
- Abb. 29: Wirkungsgrad des CO₂-Lasers bei unterschiedlichen Angriffspunkten: schräg (links) und senkrecht (rechts) von oben auf *A. arvensis*; Applikationszeit 100 ms, Leistung 0,5 kW, Spotdurchmesser 1 mm..... 76
- Abb. 30: Wirkungsgrad des Faserlasers bei unterschiedlichen Angriffspunkten: schräg (links) und senkrecht (rechts) von oben auf *A. arvensis*; Applikationszeit 100 ms, Leistung 4 kW, Spotdurchmesser 1 mm..... 77
- Abb. 31 a- c: Vergleich des Wirkungsgrades des CO₂-Lasers bei unterschiedlichen Wachstumsstadien von *A. arvensis* (Drei- (a), Vier- (b) und Sechsstadium (c)); Leistung 0,5 kW, Applikationszeit 100 ms, Spotdurchmesser 1, 2 und 5 mm, Angriffspunkt Stielbasis..... 78/79
- Abb. 32 a- c: Vergleich des Wirkungsgrades des Faserlasers bei unterschiedlichen Wachstumsstadien von *A. arvensis* (Drei- (1), Vier- (2) und Sechsstadium (3)); Leistung 0,5 kW, Applikationszeit 100 ms, Spotdurchmesser 1, 2 und 5 mm, Angriffspunkt Stielbasis..... 80/81
- Abb. 33: Vergleich der Frischmasseentwicklung von *A. arvensis* im Keimblattstadium zwischen Kontrollpflanzen, CO₂-Laser (0,5 kW) behandelt oder Faserlaser (4 kW) behandelt bis zu vier Wochen nach der Laserapplikation; Applikationszeit 10 ms; Strahldurchmesser 1 mm..... 82
- Abb. 34: Vergleich der Frischmasseentwicklung von *A. arvensis* im Vierblattstadium zwischen Kontrollpflanzen, CO₂-Laser (0,5 kW) oder Faserlaser (4 kW) behandelt bis zu vier Wochen nach der Laserapplikation; Applikationszeit 50 ms; Strahldurchmesser 2 mm..... 83
- Abb. 35: Vergleich der Frischmasseentwicklung von *A. myosuroides* im Keimblattstadium zwischen Kontrollpflanzen, CO₂-Laser (0,5 kW) behandelt oder Faserlaser (4 kW) behandelt bis zu vier Wochen nach der Laserapplikation; Applikationszeit 10 ms; Strahldurchmesser 1 mm..... 84
- Abb. 36: Vergleich der Frischmasseentwicklung von *A. myosuroides* im Vierblattstadium zwischen Kontrollpflanzen, CO₂-Laser (0,5 kW) behandelt oder Faserlaser (4 kW) behandelt bis zu vier Wochen nach der Laserapplikation; Applikationszeit 50 ms; Strahldurchmesser 2 mm..... 85

Abb. 37 a- c: Unterschiede zwischen abgestorbenen und vitalen Pflanzen (<i>A. arvensis</i> und <i>A. myosuroides</i>) nach der Laserbehandlung; a: Dreiblattstadium, b: Vierblattstadium, c: Sechsblattstadium.....	86
Abb. 38: Geschädigte Blattoberfläche durch Laserapplikation von <i>Amaranthus retroflexus</i>	87
Abb. 39: Geschädigte Blattoberfläche durch Laserapplikation von <i>Poa annua</i>	88
Abb. 40: Aufnahme eines Blattes von <i>Galium aparine</i> : Übergang zwischen gesundem Pflanzengewebe (rechts) hin zu geschädigtem Pflanzengewebe durch die Laserapplikation (links).....	89
Abb. 41: Nahaufnahme des geschädigten Gewebes von <i>Galium aparine</i> nach Laserapplikation.....	89
Abb. 42: Aufnahme eines Blattes von <i>Poa annua</i> : Übergang zwischen gesundem Pflanzengewebe (links) hin zu geschädigtem Pflanzengewebe durch die Laserapplikation (rechts).....	90
Abb. 43: Momentaufnahme mit der Thermokamera bei einer Applikationszeit von 250 ms und einem Strahldurchmesser von 10 mm, <i>A. arvensis</i> im Sechsblattstadium; Leistung 4 kW.....	91
Abb. 44 a- b: <i>A. arvensis</i> im Vierblattstadium unmittelbar vor (a) und nach (b) der Behandlung mit dem Faserlaser; Leistung 4 kW; Applikationszeit 50 ms; Strahldurchmesser 2 mm.....	92
Abb. 45: Logarithmische Darstellung des Zeitaufwandes der Unkrautbekämpfung bei unterschiedlichen Applikationszeiten: 0,1 s und 1 s.....	103
Abb. 46: Entwicklung der Bestrahlungsstärke [J/mm^2] in Abhängigkeit von Zeit [ms] und Strahldurchmesser [mm] bei gleichbleibender Leistung von 4 kW	105
Abb. 47: Unterschied der aufgetragenen Bestrahlungsstärke in kJ/ha von Abflamngerät und Lasern in Abhängigkeit von der Unkrautdichte [Pflanzen/ha], logarithmische Darstellung.....	107

C Verzeichnis der Tabellen

Tab. 1:	Übersicht über chemische, physikalische, biologische und biotechnische Pflanzenschutzmaßnahmen.....	20
Tab. 2:	Übersicht der verwendeten Unkräuter und Wachstumsstadien am Laserzentrum Hannover.....	38
Tab. 3:	Übersicht über die verwendeten Laser, Spotgrößen und Energiedosen am Laserzentrum Hannover.....	39
Tab. 4:	Wachstumsstadien der Unkräuter.....	42
Tab. 5:	Übersicht über die verwendeten Laser und deren technische Parameter...	43
Tab. 6:	Bandbreite der Applikationszeiten und Spotdurchmesser der unterschiedlichen Versuchsreihen.....	48
Tab. 7:	Übersicht über alle biologischen und technischen Versuchsparameter.....	48

D Verzeichnis der Abkürzungen

<i>A. arvensis</i>	<i>Anthemis arvensis</i>
<i>A. myosuroides</i>	<i>Aleopecurus myosuroides</i>
BBCH	Biologische Bundesanstalt für Land- und Forstwirtschaft, Bundessortenamt und Chemische Industrie
FIBL	Forschungsanstalt für biologischen Landbau
ILT	Institut für Lasertechnik Aachen
IR	Infrarotstrahlung
K	Strahlqualität
LM	Lichtmikroskop
log	logarithmisch
LWIR	Langwelliges Infrarot
M ²	Beugungszahl
mmrad	Millirad
Nd-YAG	Neodym-dotierter Yttrium-Aluminium-Granat
NIR	Nahes Infrarot
Pfl.	Pflanzen
Pfl./ha	Pflanzen pro Hektar
PSM	Pflanzenschutzmittel
REM	Rasterelektronenmikroskop
RTK-GPS	Real Time Kinematic- Global Positioning System
SPP	Strahlparameterprodukt
UV	Ultraviolettes Licht
VIS	Visuelles Licht

1 Einleitung und Problemstellung

Die Unkrautbekämpfung ist nach wie vor ein elementares Problem in der Landwirtschaft, da die Unkräuter im Bestand in direkter Konkurrenz um Wasser, Nährstoffe und Licht mit den Kulturpflanzen stehen (Koch, 1967). Um trotzdem weiterhin einen lückenlosen Bestand und einen hohen Ertrag zu gewährleisten, wurden die Verfahren zur Unkrautbekämpfung immer wieder weiterentwickelt und verbessert. Nachdem zu Anfang hauptsächlich mechanische Verfahren zur Unkrautbekämpfung eingesetzt wurden, war es durch den Einsatz chemischer Mittel möglich, fast die gesamte Unkrautpopulation auf dem Feld zu kontrollieren.

In den letzten Jahren hat sich die Strategie des Pflanzenschutzes allerdings gewandelt. Nachdem es in früheren Zeiten so schien, als könnte durch eine hohe Dosis Herbizide oder andere Pflanzenschutzmittel das Problem der Unkräuter und Krankheiten auf dem Feld gelöst werden, beschäftigt man sich heute eingehender mit einer gezielten Pflanzenschutzmittelausbringung und alternativen Methoden.

Zusammengefasst werden diese neuen Methoden und Ansätze im Präzisionspflanzenbau (Dillon et al., 2007), dessen Teilgebiet der Präzisionspflanzenschutz ist.

Der Präzisionspflanzenschutz beschäftigt sich mit Alternativen zum konventionellen Pflanzenschutz bzw. der Optimierung bestehender Methoden. Hierzu zählt vor allem die Reduzierung chemischer Pflanzenschutzmittel auf ein Minimum. Ansätze sind z.B. die teilschlagspezifische Ausbringungen von Pflanzenschutzmitteln (Gerhards et al., 2006) und die Erstellung von Unkrautverteilungskarten sowie die Früherkennung von Blattkrankheiten und deren partielles Auftreten im Bestand (Mertens, 2008). Desweiteren gibt es aber auch den Einsatz alternativer Unkrautbekämpfungsmethoden, bei denen komplett auf chemische Mittel verzichtet werden soll, wie z. B. die Weiterentwicklung mechanischer und thermischer Methoden zur Unkrautregulierung.

Die thermische Unkrautkontrolle ist vor allem im organischen Ackerbau weit verbreitet (Diver, 2002). Dabei handelt es sich hauptsächlich um den Einsatz von Abflamngeräten, die die Unkräuter in den Kulturpflanzen stark erhitzen, ihre Zellen und somit die Gesamtpflanze irreversibel schädigen. Das Problem dieser Methode ist allerdings, die fehlende Selektivität, auch Kulturpflanzen können geschädigt werden, sofern das Abflamngerät nicht nur im Voraufbau eingesetzt wird. Ein weiterer Nachteil ist, dass ein

Großteil der eingesetzten Energie auf dem Weg vom Abflamngerät zur Pflanze verloren geht, was einen hohen Energieaufwand und somit auch hohe Kosten mit sich bringt (Dierhauer, 2000).

Die vorliegende Arbeit war Teil des Graduiertenkollegs „Use of Information Technologies for Precision Crop Protection“, gefördert von der Deutschen Forschungsgemeinschaft. Ziel war es, die Vorteile der thermischen Unkrautbekämpfung zu nutzen und diese mit den positiven Eigenschaften eines Lasers zu kombinieren.

Der Laser entwickelt wie auch andere thermische Verfahren hohe Temperaturen, die an die Pflanzen weitergegeben werden. Allerdings ist es durch die hohe Präzision möglich, die komplette Wärmeenergie auf einem minimal großen Punkt in die Pflanze einzubringen. Verluste sind hierbei relativ gering, der komplette Energieeintrag erfolgt in die Pflanze.

Die ersten Versuche, die hierzu in dieser Arbeit vorgestellt werden, waren reine Grundlagenversuche, die zeigen sollten, wie sich der Laser auf das Pflanzenmaterial auswirkt. Desweiteren war es wichtig herauszufinden, ob es Unterschiede zwischen einzelnen Lasern gibt, wie lang die Haltezeit des Lasers pro Pflanze beträgt, um diese nachhaltig zu schädigen und vor allem welches Wachstumsstadium die Pflanze höchstens erreichen darf, um eine Bekämpfung energetisch effizient und nicht zu zeitintensiv zu gestalten. Die einzelnen Parameter wurden Schritt für Schritt in mehreren Versuchsdurchgängen abgearbeitet, so dass man von einer groben Vorstellung zu ziemlich genauen Angaben darüber gelangte, wie Laser und Pflanzenmaterial beschaffen sein müssen, um eine erfolgreiche Bekämpfung zu gewährleisten.

2 Stand der Technik und des Wissens

Die unterschiedlichen Methoden zur Unkrautbekämpfung sind sehr vielseitig und auch im Präzisionspflanzenbau breit gefächert. Aus diesem Grund wird an dieser Stelle erst ein kurzer Überblick über die vorhandenen und gängigen Verfahren der Unkrautbekämpfung gegeben und die grundlegenden Prinzipien des Präzisionspflanzenbaus betrachtet. Ebenfalls wird auf den strukturellen Aufbau der Unkrautpflanzen eingegangen, aber auch der bisherige Einsatz von Lasern näher betrachtet und die physikalischen Hintergründe beleuchtet, um die Grundidee der Unkrautbekämpfung mit Lasern zu erläutern.

2.1 Präzisionspflanzenbau

Die moderne Landwirtschaft sieht sich mit dem Problem konfrontiert, dass immer höhere Erträge für eine ausreichende Ernährung der wachsenden Weltbevölkerung gewährleistet werden müssen (FAO, 2001), auf der anderen Seite aber auch eine strengere Regulierung durch Umwelt- und Produktauflagen z. B. in der Kontrolle der Rückstandsmengen in Lebensmitteln stattfindet (Nitsch und Osterburg, 2004). Die hohe Belastung der Umwelt und Kulturpflanzen durch chemische Pflanzenschutzmittel, besonders durch Herbizide, ist ein vorrangiges Thema in der heutigen Landwirtschaft. Denn auch der Einsatz von Herbiziden kann je nach Dosis und Entwicklungsstadium der Nutzpflanzen zu Ertragseinbußen führen. Dieses beruht hauptsächlich auf einer Senkung der Bestandesdichte und einer Reduzierung der Kornzahl pro Ähre (Pinthus und Nathowitz, 1967; Elliott et al. 1975; Merkelbach und Heyland, 1988). Ein Ansatz, der seit einigen Jahren verfolgt wird und eventuell eine Lösung dieses Problems darstellt, ist der Präzisionspflanzenbau (Dillon et al., 2007). Konzept des Präzisionspflanzenbaus ist die Abkehr von einer schlagbezogenen einheitlichen Bewirtschaftung der Ackerflächen hin zu einer teilschlagspezifischen und präzisen Bewirtschaftung (Werner, 2004).

Ein Teilbereich des Präzisionspflanzenbaus ist der Präzisionspflanzenbau. Ziel hierbei ist eine teilschlagspezifische Erfassung und Bekämpfung von Unkräutern und Schaderregern (Mertens, 2008). Der Pflanzenschutz ist ein effektives Mittel, um Ertragsverluste zu minimieren und dadurch die Bereitstellung von Nahrungsmitteln in ausreichender Menge zu

sichern. Allerdings ist die kleinste Einheit, in der Art und Dosierung der Pflanzenschutzmittel variiert werden können, in der Praxis meistens der komplette Ackerschlag (Mertens, 2008). Dabei sind Ackerschläge in vielen Fällen nicht homogen (Pätzold et al., 2008) und somit ist nach Dicke et al. (2007) auch die Unkrautverteilung auf dem Feld heterogen. Unkräuter zeigen sich in nester- und streifenweisen Verteilungsmustern auf Ackerflächen, welche sich mit weitgehend unkrautfreien Felbereichen abwechseln (Cardina und Norquay, 1997). Ein wichtiges Werkzeug des Präzisionspflanzenschutzes ist die teilschlagspezifische Ausbringung von Pflanzenschutzmitteln anhand von Unkraut- oder Krankheitsverteilungskarten (Dicke et al., 2007; Gerhards und Oebel, 2006). In den letzten Jahren hat sich der Präzisionspflanzenschutz im Hinblick auf die Unkrautbekämpfung nicht nur mit einer teilschlagspezifischen Ausbringung von Herbiziden beschäftigt, es sind auch alternative Methoden, wie z. B. das selektive Hacken (Gobor et al., 2006) anhand von Unkrautverteilung und Bodeneigenschaften, untersucht worden.

Alle Werkzeuge der Unkrautbekämpfung im Präzisionspflanzenschutz basieren auf dem Wissen über die heterogene Verteilung der Unkräuter im Bestand. Aufgrund dieser Annahmen und der Möglichkeit diese Verteilung anhand von Karten zu bestimmen, ist es möglich weitere selektive Maßnahmen zur Kontrolle der Unkrautpopulation zu etablieren.

2.2 Konkurrenz zwischen Unkraut und Kulturpflanze

Betrachtet man die Möglichkeiten der Unkrautbekämpfung auf dem Feld, ist ein wichtiger Aspekt das Verhältnis von Unkraut und Kulturpflanze zueinander, da diese beiden in direkter Konkurrenz um den Lebensraum auf dem Acker stehen. Wie sich die Entwicklung von Unkraut und Kulturpflanze nach dem Auflaufen darstellt, hängt von einigen Faktoren ab. Nach Koch (1967) geht die Konkurrenz der Unkräuter mit den Kulturpflanzen in erster Linie um die Wachstumsfaktoren Nährstoffe, Wasser und Licht. Des Weiteren beginnt laut Rademacher und Ozolins (1952) die Nährstoffkonkurrenz bereits während der Keimung und kann schon in diesem Stadium nachhaltige Folgen haben. Die Fähigkeit der Unkräuter, in den Kulturpflanzenbeständen zu überleben und sich dort zu vermehren, hängt davon ab, wie sie sich im Zusammenleben mit ihres gleichen (Artgenossen und andere Unkräuter) sowie mit den Kulturpflanzen und den jeweils durchgeführten acker- und pflanzenbaulichen Maßnahmen, durchzusetzen vermögen. Dabei spielt der verschiedene Entwicklungsrythmus

der konkurrierenden Arten eine wichtige Rolle (Koch und Rademacher, 1966). Denn auch ackerbauliche Maßnahmen können das Auflaufen von Unkräutern im Bestand begünstigen und sie konkurrenzfähiger gegenüber den Kulturpflanzen machen. So stellten Habel (1957) und Koch (1960) fest, dass besonders nach dem Eggen eine größere Zahl Unkrautsamen keimten und aufliefen. Eine Maßnahme, die die Konkurrenzfähigkeit der Unkräuter sinken lässt und den Kulturpflanzen einen Vorteil im Kampf um Nährstoffe, Licht, Wasser und Platz schafft, wäre eine gelungene Alternative zu den bisherigen Unkrautbekämpfungsmethoden.

2.3 Unkrautregulierung

Die Unkrautregulierung im Bestand kann auf mehrere verschiedene Arten erfolgen. Am verbreitetsten ist hierbei der Einsatz von Herbiziden. Des weiteren stark verbreitet sind die physikalischen Verfahren, diese sind meist mechanisch oder thermisch. Ebenfalls mögliche Verfahren der Unkrautkontrolle im Bestand sind ackerbauliche, biologische und biotechnische Verfahren.

Tab. 1: Übersicht über chemische, physikalische, biologische und biotechnische Pflanzenschutzmaßnahmen

Chemische Maßnahmen	Physikalische Maßnahmen	Ackerbauliche Maßnahmen	Biologische Maßnahmen	Biotechnische Maßnahmen
Pestiziden Fungizide Insektizide Herbizide Nematizide Bioregulatoren	Mechanisch Thermisch Bestrahlung	Bodenbearbeitung Fruchtfolge Ausrottung von Befallsherden, Neben- und Zwischenwirten Saat-, Vermehrungsmaterial	Nutzarthropoden Pathogene Nutzung von Antagonisten resistente Sorten Induzierte Resistenz	physikalische, chemische Reize Verwendung von Pheromonen Fertilitäts- und Entwicklungsregulatoren

2.3.1 Chemische Verfahren

Die chemischen Verfahren sind in der Unkrautregulierung am stärksten vertreten, nach Hock et al. (1995) und Bode und Bretthauer (2007) sind weltweit etwa 50 % der eingesetzten Pflanzenschutzmittel Herbizide.

2.3.1.1 Herbizideinsatz

Nachdem in der Vergangenheit nur Herbizide eingesetzt wurden, die alle Pflanzen, auch die Kulturpflanzen attackierten, wurde Mitte der 90er Jahre das erste selektive Herbizid auf den Markt gebracht (Giles et al., 2008). Herbizide können unterschiedliche Wirkmechanismen besitzen. Eine Aufnahme der Herbizide in die Pflanze erfolgt in den meisten Fällen entweder über den Boden oder das Blatt. Bei Einarbeitung der Herbizide in den Boden kann dies vor der Saat geschehen, vor Auflauf, beim Auflauf oder im Nachauflauf. Über das Blatt erfolgt die Aufnahme durch eine Blattspritzung oder eine Unterblattbehandlung. Aber nicht nur die chemische Zusammensetzung der Herbizide hat sich im Laufe der Jahre geändert, auch die Techniken der Herbizidapplikation durchlaufen einen ständigen Wandel. Im Vordergrund stehen hierbei die Reduzierung der Aufwandmengen von chemischen Pflanzenschutzmitteln und eine Senkung der Verluste bei Ausbringung. Diese Ziele sind auch im Präzisionspflanzenschutz wiederzufinden. Neben der teilschlagspezifischen Ausbringung von Herbiziden ist auch die Direkteinspeisung der PSM direkt an der Düse ein Versuch Herbizide einzusparen und zielgerichtet anzuwenden (Walgenbach et al, 2010).

2.3.2 Physikalische Verfahren

2.3.2.1 Mechanisch

Mechanische Verfahren der Unkrautkontrolle werden hauptsächlich in Reihenkulturen, besonders im Gemüsebau eingesetzt. Die gängigste Methode ist das Hacken zwischen den Reihen. Allerdings sind mechanische Verfahren nicht selektiv und können bei Einsatz im Bestand auch die Kulturpflanzen in hohem Maße schädigen, so dass ein Einsatz dieser Verfahren sich mit Blick auf Schäden an den Kulturpflanzen im Verhältnis zur Unkrautkontrolle nicht rentiert (Rasmussen et al., 2008). Besondere Schwierigkeiten stellen hier die Unkräuter dar, die innerhalb der Reihe oder zwischen den Kulturpflanzen, wachsen. Es gibt allerdings schon Ansätze automatisierter Hackgeräte, die in der Reihe arbeiten. Eine kommerzielle Verbreitung hat noch nicht wirklich stattgefunden (Ascard, 2007).

2.3.2.2 Thermisch

Eine der verbreitetsten Techniken in der thermischen Unkrautkontrolle ist das Erhitzen von Pflanzen und Boden mit Abflammgeräten. Diese Technik wird seit den 90er Jahren

hauptsächlich zur Unkrautbekämpfung im organischen Landbau eingesetzt (Diver, 2002). Es gibt verschiedene Verfahren des Abflammens, direkt, mit offener Flamme arbeitende Brenner, indirekt, durch Infrarot-Wärmestrahlung wirkende Brenner oder ein kombiniertes System mit direkter und indirekter Wärmestrahlung (Dierhauer, 2000). Die Verfahren können nicht selektiv im Voraufbau oder selektiv im Nachaufbau eingesetzt werden, wobei letzteres zu Qualitätsverlusten und Wachstumsrückschlägen der Kulturpflanzen führen kann. Die Wirkung des Abflammens kann ebenso gut sein wie diejenige eines Kontaktherbizids, allerdings ist der Wirkungsgrad sehr variabel und hängt vom richtigen Einsatzzeitpunkt und der Witterung, aber auch von Anzahl und Arten der Unkräuter ab (Dierhauer, 2000). Gerade bei manchen Ungräsern liegt der Vegetationspunkt weit unten an der Stielbasis. An dieser ist die Hitzeeinwirkung durch die Blattdichte oft zu kurz, die Unkräuter wachsen nach kurzer Zeit unbeschadet weiter. Die Schädigung der Blätter bewirkt aber einen Wachstumsrückstand der Unkräuter (Total, 2003). An einem zuverlässigen System zur Messung des Abflammerfolges bei der thermischen Unkrautregulierung wird noch immer gearbeitet (Bohne und Hensel, 2010). Nachteile bei jeder Art der Abflammtechnik sind hoher Energieverbrauch und CO₂-Ausstoß, Gefährdung bodenbewohnender Nützlinge und die kurze Einsatzperiode und Wirkungsdauer. Die jährlichen Kosten hingegen sind stark von der Auslastung abhängig (Dierhauer, 2000).

Ebenfalls eine Methode der thermischen Unkrautkontrolle ist der Einsatz von Heißwasser oder Heißschaum. Wie die Abflammtechnik ist diese eine Blattkontakttechnik, bei der durch Wärmeübertragung die Pflanzenteile auf eine letale Temperatur erhitzt werden. Die Wirkung hängt auch bei dieser Methode von Entwicklungsstadium und Zustand der Unkrautpflanzen ab (Kurfeß, 1998; Kurfeß et al., 1999). Desweiteren haben Kurfeß et al. (1999) festgestellt, dass die Langzeitwirkung bei Wurzelunkräutern abhängig von den Nährstoffreserven und der Lage der Vegetationspunkte ist. Gleichzeitig kommt es aber auch auf Tropfengröße und Wasserdurchfluss, sowie Benetzungsgrad und Wassertemperatur an (Hannsson, 2002; Hannsson und Mattsson, 2002; Hannsson und Mattsson, 2003).

2.4 Unkräuter

Im landwirtschaftlichen Sprachgebrauch bezeichnet man die auf bearbeitetem Kulturland neben den Nutzpflanzen wachsenden unerwünschten Pflanzen zusammengefasst als Unkräuter oder Ungräser (Klaßen und Freitag, 2004).

Pflanzen werden als Unkräuter bezeichnet, wenn sie:

- mit einer gezielt angebauten Nutzpflanze in Konkurrenz um Wachstumsfaktoren wie Nährstoffe, Licht und Wasser treten, so dass die Nutzpflanze nicht den gewünschten Ertrag erreicht;
- die Bewirtschaftung einer Fläche erschweren, indem sie z. B. in das Erntegut geraten und dieses verunreinigen
- eine massenhafte Verbreitung aufweisen (durch Samenflug, extrem lange Wurzelgeflechte, Verdrängung von Konkurrenten) und somit die Gefahr besteht, dass sie auf zu schützende Flächen übersiedeln
- wenn sie durch ihre Giftwirkung den Ertrag einer Fläche unbrauchbar machen (Herbstzeitlose in Heu) (Anonymus, 2008).

2.4.1 Unterscheidung der Unkrautgruppen nach botanischen Merkmalen

Zum Einen können Unkräuter nach ihrer Lebensdauer unterschieden werden. Es gibt einjährige (annuelle) und zweijährige (perennierende) Pflanzen. Annuelle Pflanzen durchlaufen in einem Jahr ihren gesamten Vegetationszyklus und vermehren sich hauptsächlich durch Samen. Bei mehrjährigen Arten kann eine Vermehrung sowohl über Samen (generativ) als auch über Sprosssteile (vegetativ) erfolgen (Hallmann et al., 2007).

Desweiteren ist eine Einteilung der Unkräuter durch die Anzahl ihrer Keimblätter möglich. Hierbei wird unterteilt in monokotyle (einkeimblättrige) und dikotyle (zweikeimblättrige) Pflanzen. Einkeimblättrige Pflanzen werden in der Regel als Ungräser bezeichnet, zweikeimblättrige als Unkräuter (Klaßen und Freitag, 2004).

2.4.2 Thermisch-tolerante und thermisch-sensible Arten

Pflanzen werden grob eingeteilt in thermisch-tolerant und thermisch-sensibel (Bertram, 2001). Bei den thermisch-toleranten Pflanzenarten liegt das angreifbare Pflanzenmaterial gut geschützt im Inneren der Pflanze und wird von einigen Schichten Zellgewebe vor der eindringenden Wärme geschützt. Im Fall der thermisch-sensiblen Arten liegt das vegetative Gewebe näher an der Pflanzenoberfläche und wird nur durch einige wenige Zellschichten von der Umwelt getrennt, siehe Abb. 1. Ein Wärmeeintrag in die Pflanze erfolgt je nach

Methode unterschiedlich. Bei Einsatz eines Gasbrenners gelangt die Wärme durch Konvektion in das Pflanzengewebe, durch indirekte Brenner oder Infrarotquellen wird Wärmestrahlung in die Pflanze eingebracht, dies wäre ebenfalls bei Behandlung mit einem Laser der Fall. Behandelt man die Pflanzen mit Wasserdampf, wird die Wärme über Kondensation transportiert, bei Ausbringung von Heißwasser oder –schaum wird die Wärme in die Pflanze geleitet (Bertram, 1994). Abgegeben wird die Wärme von der Pflanze an die Umwelt hingegen nur auf zwei verschiedene Arten, Transpiration, über Oberfläche oder Stomata, und Strahlung, nur über die Oberfläche (Cook et al., 1964; Gates, 1964).

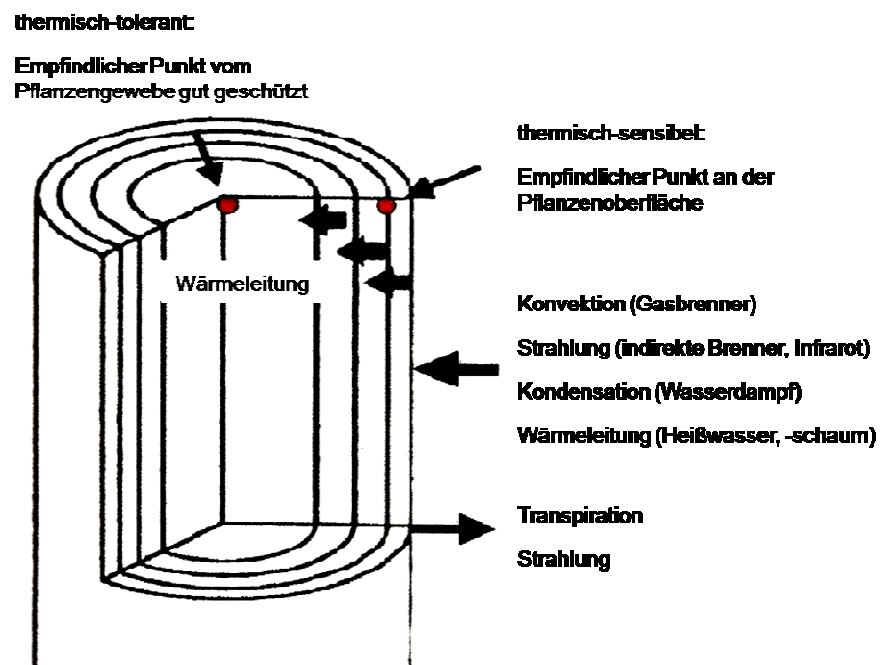


Abb. 1: Wärmeflussmechanismen der thermischen Unkrautkontrolle und Modell „thermisch-toleranter-sensibler“ Pflanzen (Bertram, 2001)

Nach Ascard (1995) ist für die Sensitivität einer Unkrautart weniger die Wärmetoleranz der Blätter maßgebend, als vielmehr die Fähigkeit der Pflanze nach der Behandlung erneut auszutreiben. Danach lassen sich Unkräuter in Abhängigkeit von ihren artspezifischen Eigenschaften in vier Gruppen unterschiedlicher Sensitivität einteilen, leicht bekämpfbare Arten (z. B. *Chenopodium album*), schwer bekämpfbare Arten (z. B. *Matricaria chamomilla*), sehr widerstandsfähige Arten (z. B. *Lamium purpureum*) und nahezu vollständig tolerante Arten (z. B. *Poa annua*).

2.4.3 Morphologie der Pflanzen und Aufbau der Gewebe (Blatt, Stängel, Meristem)

Die „thermische Empfindlichkeit“ einer Pflanzenart wird durch ihre morphologische Struktur bestimmt. Dazu gehören die Behaarung der Pflanze, Ausbildung der Kutikula, Lage des Vegetationspunktes, Ausbildung von Rhizomen, Dicke der Blätter und Alter der Pflanze (Bertram, 1996). Unkräuter setzen sich, wie andere Pflanzen auch, aus drei unterschiedlichen Pflanzenorganen zusammen: Stängel (Sprossachse), Blatt und Wurzel (Eames, 1936). Die Unterteilung in die verschiedenen Pflanzenorgane basiert hauptsächlich auf ihren unterschiedlichen Funktionen. Die Sprossachse dient als Stütze und für die Leitung von Wasser und Nährstoffen, das Blatt ist zuständig für die Photosynthese und die Wurzel für die Verankerung im Boden und die Absorption von Nährstoffen (Evert, 2006). Die Hauptunterschiede in der Struktur von Sprossachse, Blatt und Wurzel liegen in der relativen Verteilung von Leit- und Grundgewebe (Evert, 2006).

2.4.3.1 Sprossachse

Die Sprossachse dient der Stabilität, dem Transport, der Speicherung und bildet ein Skelett für die Blätter. Durch die Anordnung der Leitbündel kann man dikotyle und monokotyle Pflanzen unterscheiden. Die Leitbündel in der Sprossachse monokotyler Blätter sind zerstreut im Mark angeordnet, die dikotyler Pflanzen ringförmig (Abb. 2 a und b).

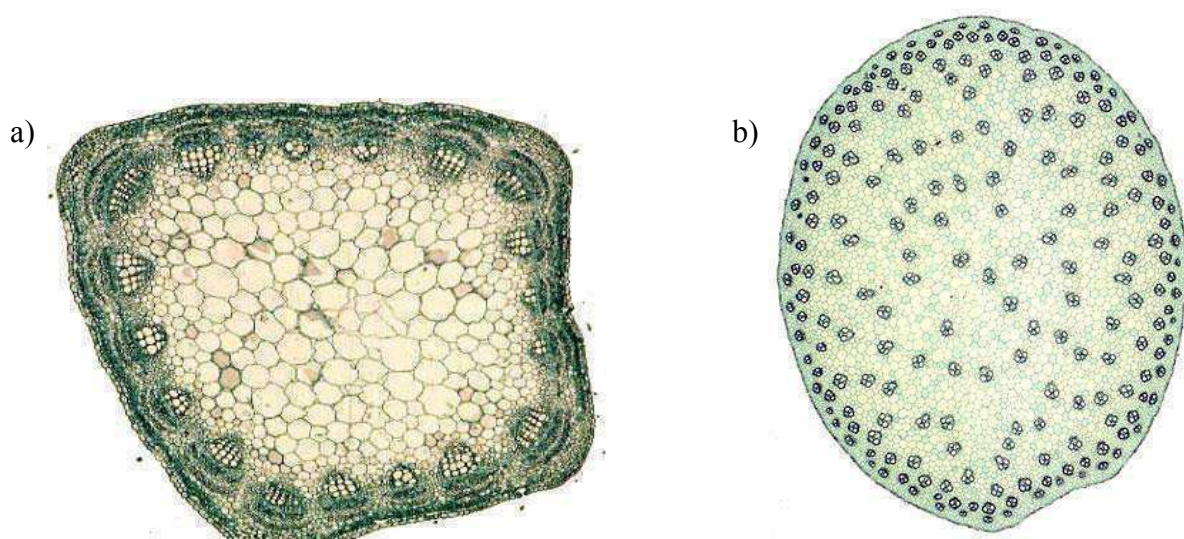


Abb. 2 a- b: Querschnitt durch die Sprossachse dikotyler (a) und monokotyler (b) Pflanzen (Universität Karlsruhe)

Des weiteren besteht die Sprossachse aus Grundgeweben und einem Hautgewebesystem. Das Hautgewebesystem ist bei Pflanzen ohne sekundäres Dickenwachstum die Epidermis, die die äußere Schutzschicht des primären Pflanzenkörpers bildet. Das Grundgewebe setzt sich zusammen aus Parenchym, Kollenchym und Sklerenchym (Evert, 2006).

2.4.3.2 Blatt

Das Blatt setzt sich aus zwei Grundgeweben, dem Palisadenparenchym und dem Schwammparenchym zusammen, diese werden jeweils von der Umwelt durch die Epidermis und der sich darauf befindlichen Kutikula abgegrenzt. Das Leitgewebe im Blatt setzt sich aus zahlreichen, untereinander verbundenen Blattadern zwischen Palisaden- und Schwammparenchym zusammen (s. Abb. 3).

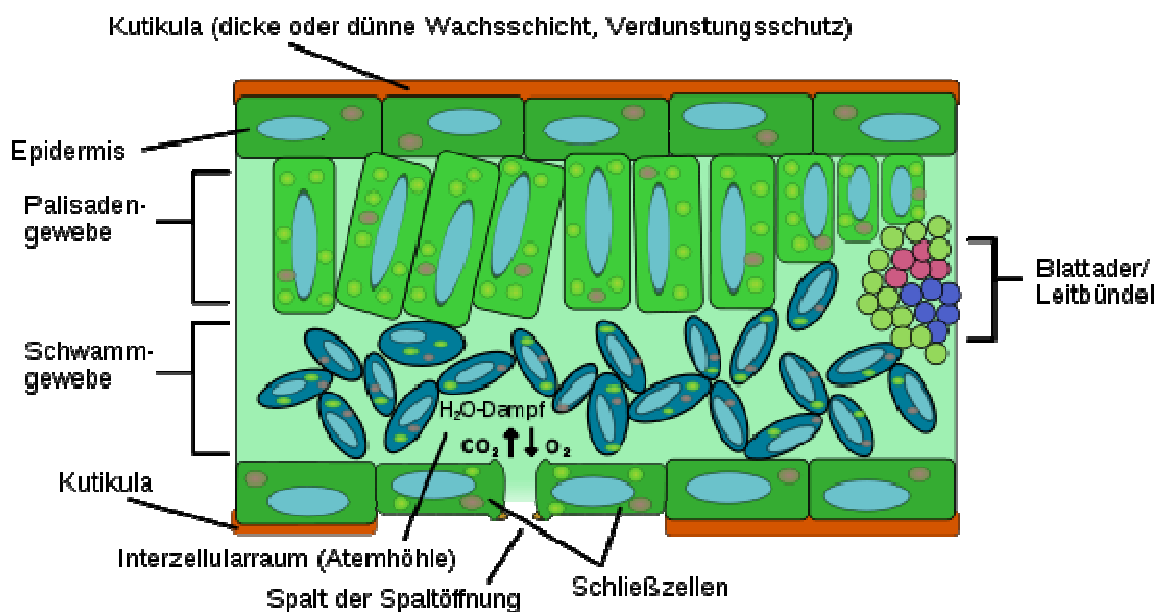


Abb. 3: Schematischer Aufbau eines Laubblattes
(Quelle: http://de.academic.ru/pictures/dewiki/54...-Aufbau_svg.png)

2.4.3.3 Wurzel

Der Aufbau der Wurzel gestaltet sich relativ simpel. Das Leitgewebe bildet im Inneren der Wurzel eine Art Hohl- oder Zentralzylinder. Dieser wird umschlossen von der Endodermis und diese wird wiederum vom Boden abgegrenzt durch die Exodermis und die darauf befindliche Rhizodermis, die vergleichbar mit der Epidermis der Sprossachse ist (Abb. 4).

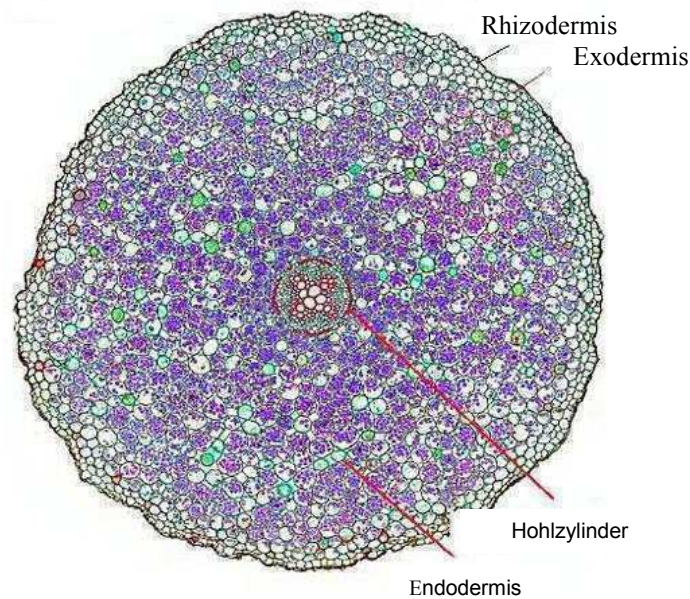


Abb. 4: Wurzelquerschnitt (Quelle: www.biokurs.de/skripten/bilder/heliant.jpg)

2.3.3.4 Aufbau der Pflanzenzelle

Die Pflanzenzelle (Prokaryot) wird begrenzt durch die Zellwand. Diese wird zusammengesetzt aus der Mittellamelle, der Primärwand und dem Plasmalemma, das die Zellwand nach innen abgrenzt. Die chemischen Bestandteile der Zellwand sind hauptsächlich Zellulose, Pektin und Proteine. Aufgabe der Zellwand ist vor allem die Aufrechterhaltung des Turgordruckes und der Stabilität der Pflanzenzelle. Des weiteren sorgt sie für den Wasser- und Stoffaustausch zwischen den Zellen durch Osmose.

Innerhalb der Zellwand befinden sich der Zellkern (genetischer Code der Zelle), die Vakuole (Wasserspeicher), die Chloroplasten (Photosynthese) und das Cytoplasma (Stoffwechsel) (Abb. 5).

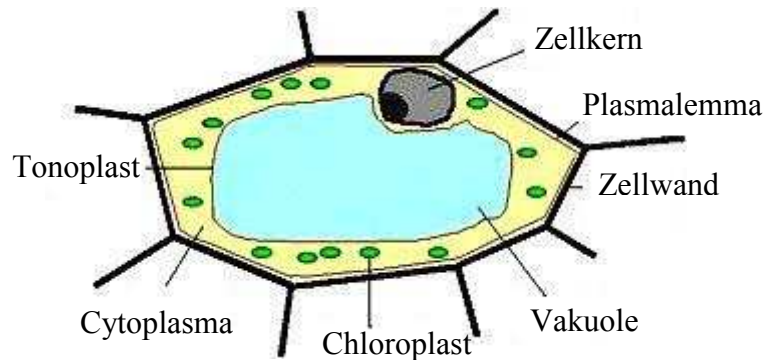


Abb. 5: Schematischer Aufbau der pflanzlichen Zelle (Quelle: www.agrar.uni-hohenheim.de/fileadmin/einrichtungen/agrar/Studium/Tutorien/Unterlagen_alt/Bio_Pflanzenzelle.pdf)

2.4.4 Wechselwirkungen zwischen Strahlungsenergie und dem biologischen Material

Um Unkräuter mittels Einsatz von Wärme schädigen und bekämpfen zu können, ist es notwendig zu wissen, wie das Pflanzenmaterial auf hohe Temperaturen reagiert und welche Abwehrmechanismen die Pflanze gegen diese aufweist.

2.4.4.1 Schädigungen des Gewebes durch Wärme

Alle thermischen Unkrautbekämpfungsmethoden erhitzen eine große Anzahl der Pflanzenzellen bis auf eine tödliche Temperatur (Rahkonen und Jokela, 2003). Hauptziel hierbei ist die Zerstörung der Zellwand der Pflanzenzelle durch Denaturierung der in ihr befindlichen Proteine, da diese schon bei Temperaturen ab 42 °C zerstört werden. Zellulose und Pektin werden erst bei höheren Temperaturen beeinflusst (Tanner, 1963; Daniell et al., 1969). Durch die Denaturierung der Proteine kommt es zum Verlust der Stabilität der Zellwand und der Turgordruck kann nicht aufrecht erhalten werden. Das wiederum führt zur Auflösung des festen Zellverbandes und zum Absterben der erhitzten Pflanzenteile. Ein weiterer Effekt durch Erhitzung des Pflanzengewebes ist das Verdampfen des Wassers aus der Vakuole, wodurch es ebenfalls zum Stabilitätsverlust kommt.

2.4.4.2 Abwehrmechanismen bzw. Wachstumsschädigungen in Form von Welkeerscheinungen

In Folge der erhöhten Temperaturen in der Pflanze kommt es zu einem Zusammenbrechen des Zellverbandes im Pflanzengewebe. Um sich vor Hitze zu schützen, haben einige

Pflanzen eine besonders dicke Kutikula oder zusätzliche Haare als Schutzschicht (Bertram, 1996). Allerdings können diese das Pflanzengewebe nicht vor den hohen Temperaturen schützen, die in der thermischen Unkrautbekämpfung aufgebracht werden. Es kommt somit zwangsläufig zu Schädigungen an den behandelten Pflanzenteilen (Welkeerscheinungen). Diese müssen anschließend entweder regeneriert oder durch neue Pflanzenteile ersetzt werden.

2.5 Physikalische Grundlagen der Wärmestrahlung

2.5.1 Wärme als physikalische Größe

In der Thermodynamik wird als Wärme (quantitativ auch Wärmemenge, Formelzeichen= Q , Einheit Joule) eine Art Energie bezeichnet, welche innerhalb eines thermodynamischen Systems oder über dessen Grenze transportiert wird, es handelt sich also um eine Prozessgröße (Anonymous, 2011).

Nach Böckh (2004) und Herwig und Moschallski (2009) ist Wärme aber keine Energieform, sondern eine Energietransportform über eine thermodynamische Systemgrenze als Folge von Temperaturunterschieden. Wärme ist neben Arbeit eine von zwei möglichen Formen, durch die Energie in ein System gelangen oder dieses verlassen kann (Herwig und Moschallski, 2009).

2.5.2 Wärmeübertragung

Die Wärmeübertragung kann durch Wärmeleitung und Strahlung erfolgen (Böckh, 2004). Wärmeleitung erfolgt innerhalb von Körpern und zwischen Körpern, die durch eine feste, flüssige oder gasförmige Substanz miteinander verbunden sind. Der Wärmestrom fließt stets vom Ort höherer Temperatur zum Ort niedrigerer Temperatur (Anonymus, 2011). Bei der Wärmeleitung in ruhenden Stoffen ist die Wärmeübertragung nur vom Temperaturgradienten und den Stoffeigenschaften abhängig (Böckh, 2004).

Wärmestrahlung erfolgt ohne stoffliche Träger. Die Wärme wird durch elektromagnetische Wellen von einer Oberfläche zu einer anderen Oberfläche transferiert (Böckh, 2004).

2.5.2.1 Wärmestrahlung

Wie schon erwähnt erfolgt die Wärmeübertragung durch Strahlung elektromagnetischer Wellen. Dabei wird Wärme durch diese elektromagnetischen Wellen von einem wärmeren Körper auf einen kälteren Körper übertragen. Erfolgt der Wärmetransfer nicht im Vakuum, sondern durch Stoffe, die die elektromagnetischen Wellen durchlassen (z. B. Gase), wird zusätzliche Wärme durch Wärmeleitung oder Konvektion übertragen (Böckh, 2004). Beim Auftreffen von Wärmestrahlung auf einen Körper kann die Strahlung teilweise durchgelassen (transmittiert), teilweise reflektiert oder teilweise absorbiert, das heißt vom Körper aufgenommen und in Wärme umgewandelt, werden.

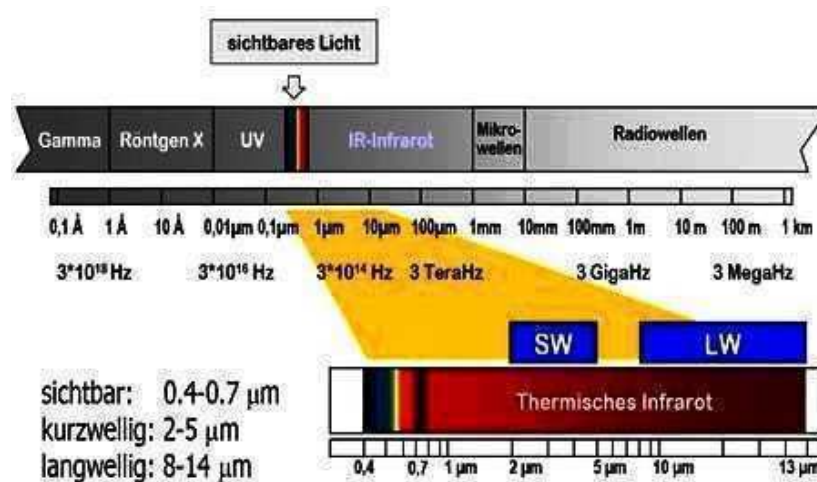


Abb. 6: Spektrum der verschiedenen Wellenlängen mit Fokus auf sichtbarem und infrarotem Licht, in dem sich der Bereich des thermischen Infrarot befindet (Quelle: www.infrarot-service.de)

2.5.2.2 Absorptions- und Reflexionsspektrum von Pflanzenmaterial

Das Absorptions- bzw. Reflexionsspektrum von Pflanzen zeigt an, welche Wellenlängen von den Pflanzenteilen reflektiert und welche absorbiert werden. Verantwortlich hierfür ist das Chlorophyll. Chlorophyll absorbiert das Licht im blauen und roten Wellenlängenbereich. Das grüne Licht wird reflektiert, wodurch Blätter und chlorophyllhaltige Pflanzenteile für unser Auge grün erscheinen (Metzler, 1988).

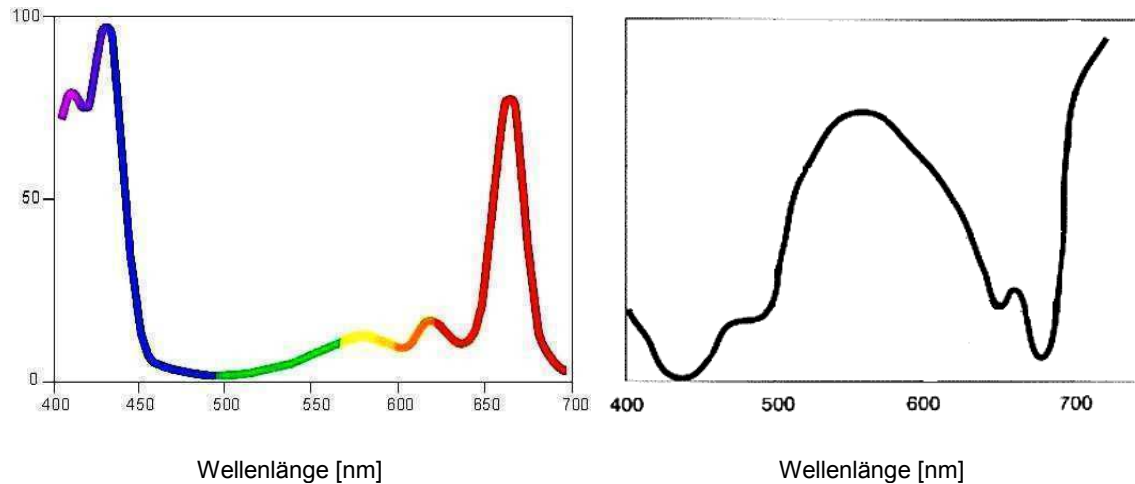


Abb. 7: Absorptionsspektrum (links) und Reflexionsspektrum (rechts) von Chlorophyll, Absorption und Reflexion jeweils in % (Quelle: roxor.eu/de_teknikinfo.htm)

2.6 Laser und Lasertechnik

Laser bedeutet „light amplification by stimulated emission of radiation“ und beschreibt den grundlegenden Prozess der Lichtverstärkung durch stimulierte Emission (Eichler und Eichler, 2006). Es gibt bis heute tausende Laser, die Strahlung von unter $0,01 \mu\text{m}$ bis über $1000 \mu\text{m}$ erzeugen und somit den Bereich der Röntgenstrahlung und des ultravioletten, sichtbaren und infraroten Lichtes abdecken. Gegenüber konventioneller Strahlung zeichnet sich ein Laser durch spezielle Eigenschaften aus, eine geringe spektrale Linienbreite, eine starke Bündelung (geringer Divergenzwinkel), eine hohe Strahlintensität oder – energie und die Eignung zur Erzeugung ultrakurzer Lichtimpulse (Eichler und Eichler, 2006). Laser werden meistens nach dem eingesetzten optisch aktiven Material kategorisiert und benannt. So gibt es Gaslaser, Farbstofflaser, Festkörperlaser, Halbleiterlaser und Freie-Elektronen-Laser. Die Eigenschaften eines Lasers werden bestimmt durch die Kenndaten Wellenlänge, Leistung und, bei gepulsten Lasern, die Pulsdauer. Weitere Parameter sind der Wirkungsgrad, das Strahlprofil, die Fokussierbarkeit und die Polarisation.

2.6.1 Einsatzgebiete in Industrie und Medizin

Anwendung finden Laser in vielen ganz unterschiedlichen Gebieten, je nach ihren bestimmten Vorteilen und Eigenschaften.

Ein großes Anwendungsgebiet ist der Bereich der Materialbearbeitung. Neben den Hauptbereichen Trennen und Fügen kann der Laser zum Beschichten, Umformen, Ändern von Stoffeigenschaften oder zum Beschriften oder Bedrucken verwendet werden.

In der Messtechnik findet der Laser Anwendung bei Präzisionsmessungen, Verkehrsüberwachung der Polizei durch Laserpistolen, das Abtasten von Barcodes, bei Brandmeldern und der Materialprüfung. Auch die Wissenschaft nutzt Laser bei der Mikroskopie, der Spektroskopie und der Vermessung.

Ein weiteres großes Anwendungsgebiet der Lasertechnik ist die Medizin. Für die Herstellung medizinischer Produkte bieten sich Laserverfahren vor allem auf Grund ihrer schonenden Wechselwirkung mit dem Werkstoff und der hohen Flexibilität an. Des Weiteren kann eine Oberflächenfunktionalisierung durch Laserstrahlung durchgeführt werden (Fraunhofer-Institut für Lasertechnik ILT, 2009). Ebenso nimmt die Zahl minimalinvasiver Operationen stark zu (Beck und Hecht, 2007), und Laser haben die Möglichkeit dort anzusetzen, wo traditionelle Methoden der Medizin scheitern (Fischer, 2007). Urologische Operationen mit Hilfe eines Lasers zum Trennen von biologischem Gewebe sind schon fast Routine (Mues und Knudsen, 2007), ebenso wie Laserbehandlungen in der Augenheilkunde, um z. B. Makuladegenerationen zu behandeln (Masters, 2007). Auch die Zahnmedizin hat Laser bereits für sich entdeckt, da diese schnell, sicher, schmerzlos und ohne Blutungen z. B. bei Parodontose und Wurzelbehandlungen, arbeiten (Kubacki, 2007).

2.6.2 Möglichkeiten des Lasers im Pflanzenschutz

Es stellt sich nun die Frage, ob der Laser als präzise arbeitendes Werkzeug und dem Wirkprinzip der Wärmestrahlung auch im Pflanzenschutz eingesetzt werden kann. Betrachtet man die Grundlagen der thermischen Unkrautbekämpfung, beruht eine Unkrautbekämpfung mit Hilfe eines Lasers auf den selben Prinzipien. Die große Bandbreite an unterschiedlichen Lasern und seine Vorteile, die durch den Einsatz in Medizin und Technik deutlich werden, machen den Laser als Instrument zur Unkrautkontrolle interessant. Hierzu gilt es zu aller erst Grundlagenforschung zu betreiben, um überhaupt herauszufiltern, welche Laser für solch einen Einsatz geeignet sind und wie sich die einzelnen Parameter sowohl auf technischer als auch auf biologischer Seite verhalten, um ein erfolgversprechendes Verfahren zu gewährleisten. Ziel dieser Arbeit war es, eben diese Parameter zu untersuchen und einzugrenzen, um eine Einschätzung geben zu

können, wann und mit welchen technischen Mittel eine Unkrautbekämpfung mit einem Laser erfolgversprechend ist.

Erste Versuche wurden dazu sowohl in Deutschland (Wöltjen et al., 2008) als auch in Dänemark (Heisel et al., 2000; Heisel et al., 2002; Mathiassen et al., 2006) erfolgreich durchgeführt. Heisel konzentrierte sich vor rund 10 Jahren allerdings noch darauf, Gräser mittels eines Lasers zu schneiden. Die Versuche waren dadurch eher im Bereich der mechanischen als der thermischen Unkrautkontrolle anzusiedeln. Die Frischmasse der Unkräuter ließ sich durch das Schneiden mit unterschiedlichen Lasern reduzieren, und es wurde eine eindeutige Dosis-Wirkung-Beziehung festgestellt, allerdings brachten auch Kontrollversuche mit Schneidmessern zufrieden stellende Ergebnisse. Heisel et al. (2000) resümierten, dass ein Lasereinsatz in dieser Form durchaus möglich wäre, der Energieaufwand aber deutlich höher liegt als beim konventionellen Mähen. Mathiassen et al. (2006) beschäftigten sich als Erste mit der Möglichkeit den Laser als ein Mittel der thermischen Unkrautbekämpfung einzusetzen. Dazu wurden die jungen Unkrautpflanzen von oben mit einem handgeführten Lasersystem bestrahlt. Die Leistungen lagen bei 5 und 90 W, die aufgebrachte Bestrahlungsstärke zwischen 0,5 und 50 J/mm² und die Applikationszeiten zwischen 70 ms und 3 s. Auch hier ließen sich eindeutige Dosis-Wirkungs-Beziehungen erkennen und eine lethale Dosis herleiten. Allerdings stand bei den Untersuchungen nur die generelle Wirkung des Lasers auf die Pflanzen im Vordergrund, eine Einschränkung der Parameter auf nützliche und umsetzbare Werte fand nicht statt. Wöltjen et al. (2008) kamen schon näher an die geeigneten Parameter für eine erfolgreiche und wirtschaftlichere Unkrautkontrolle heran. Es wurde in den Untersuchungen mit einem Diodenlaser, wie auch bei Mathiassen et al. (2006) und einem CO₂- Laser, wie bei Heisel et al. (2000) gearbeitet. Viele der technischen und biologischen Versuchsparameter wurden in den Untersuchungen schon eingeschränkt. Die Pflanzenart wurde durch monokotyle und dikotyle Pflanzen abgebildet, das Wachstumsstadium der Pflanzen wurde variiert und unterschiedliche Laser, Wellenlängen, Strahldurchmesser und Bestrahlungsstärken getestet. Als Angriffspunkt wurde allerdings nur das Sprossapikalmeristem anvisiert und die Applikationszeiten lagen zwischen 1 und 2 s. Ausgehend von der These, dass eine für den Feldeinsatz praktikable Methode der Laserunkrautbekämpfung entstehen könnte, sind die Applikationszeiten noch viel zu lang, und das Apikalmeristem bietet nicht den besten Angriffspunkt der Pflanzen auf dem Feld. Eine Veränderung der Parameter Applikationszeit und Angriffspunkt bringt aber gleichzeitig eine Anpassung der anderen

Versuchsparameter mit sich. Deshalb wurden in der vorliegenden Arbeit die genannten Versuchsparameter in vielen unterschiedlichen Versuchsreihen getestet, immer im Hinblick auf den praktikablen Einsatz des Lasers auf dem Feld, bei geringstem Zeit- und Energieaufwand und größtmöglicher Wirkung.

3 Material und Methoden

3.1 Tastversuche am Institut für angewandte Physik Bonn

Am Institut für angewandte Physik der Rheinischen Friedrich- Wilhelms- Universität in Bonn wurden erste Tastversuche zum Thema der laserbasierten Unkrautbekämpfung durchgeführt. Diese Versuche sollten hauptsächlich dazu dienen, sich dem Thema der Laserapplikation zu nähern und Erfahrungen im Umgang mit Laser und Pflanzenmaterial zu sammeln. Gleichzeitig konnten durch diese Versuche schon einige Versuchsparameter bestimmt und genauer differenziert werden.

3.1.1 Pflanzenmaterial: *Solanum lycopersicum*, *Phaseolus vulgaris*

Die Versuche wurden mit Tomaten- (*Solanum lycopersicum*) und Bohnenpflanzen (*Phaseolus vulgaris*) im Drei- bis Vierblattstadium (BBCH 13- 14) durchgeführt. Diese wurden unter konstanten Bedingungen (Temperatur und Licht) im Gewächshaus angezogen. Die Tomate ist ein Nachtschattengewächs, das bis zu 4 m hoch werden kann und unverzweigte Laubblätter aufweist. Die Bohne gehört zur Gattung der Hülsenfrüchte. Beide Pflanzenarten wurden im Keimblattstadium aus den Saatschalen in Anzuchtöpfe (7*7*9 cm) pikiert und weiter kultiviert bis das Drei- bis Vierblattstadium erreicht war.

3.1.2 Laser: Nd-YAG-Laser

Die Versuche wurden mit einem gepulsten Nd-YAG-Laser mit einer Wellenlänge von 1064 nm und einem Strahldurchmesser von 40 µm durchgeführt. Die Pulslänge betrug 7 s. Fokus und Pulsenergie konnten je nach Variante verändert werden. Es wurden zwei verschiedene Versuchsreihen durchgeführt. In der ersten Versuchsreihe betrug der Fokus 100 µm und die Pulsenergie dementsprechend 10 mJ, in der zweiten lag der Fokus bei 200 µm und die Pulsenergie bei 20 mJ. Die Pulsenergie ist abhängig vom Fokus bzw. umgekehrt, setzt man die Pulsenergie herunter, verkleinert man den Fokus, um pro Flächeneinheit trotzdem die gleiche Energiemenge zu erzielen. Vorteil bei einem kleineren Fokus ist, dass Ziele sehr genau anvisiert werden können, wenn eine geeignete Treffsicherheit gegeben ist.

3.1.3 Versuchsdurchführung

Die Tomaten- und Bohnenpflanzen wurden an verschiedenen Angriffspunkten mit dem Laser bestrahlt. Das oberste Blatt der Tomatenpflanzen wurde einmal gepulst, das darunter liegende Blatt zweimal, an jeweils der selben Stelle. Das geschah bei drei unterschiedlichen Pflanzen an je drei Angriffspunkten, Blattspitze, Blattmitte und Blattansatz. Bei den Bohnenpflanzen wurde anstatt einmal kurz zu pulsen der Laser für 1,5 s auf den entsprechenden Angriffspunkt an Blattspitze, -mitte oder -ansatz gerichtet. Bei 10 Pulsen pro Sekunde entsprach das einer Gesamtzahl von 15 Pulsen pro Angriffspunkt.

Die Schwierigkeit der Versuchsdurchführung lag in der Zielführung des Lasers, da das infrarote Licht des Laserstrahls auf dem Pflanzenmaterial nicht mit bloßem Auge zu erkennen war. Aus diesem Grund wurde als Lichtquelle eine einfache Lampe aus Richtung des Lasers aufgestellt. Diese schien durch eine 2 mm große Blende, die direkt vor der Pflanze in den Versuchsaufbau integriert war und zeichnete einen schwachen Lichtpunkt auf dem zu behandelnden Blatt ab. Da der Lichtstrahl der Lampe nicht genau über dem infraroten Licht des Lasers lag, gab es eine kleine Verschiebung zwischen dem Lichtpunkt und dem tatsächlichen Treffpunkt auf dem Blatt. Um diese Verschiebung so gering wie möglich zu halten, musste das Blatt möglichst eben an der Blende anliegen.

Eine Auswertung der Versuche erfolgte makroskopisch. Die Beobachtungen wurden anhand einer Digitalkamera, direkt nach der Laserapplikation sowie eine Woche später, dokumentiert.

3.1.4 Versuchsaufbau

Im Versuchsaufbau (Abb. 8) ist zu sehen, dass dem Laser ein Shutter vorgeschaltet ist, der das Laserlicht mittels Knopfdruck passieren lässt. Anschließend trifft der Laserstrahl auf einen dielektrischen Spiegel, der diesen in Richtung der Blende umleitet. Hinter dem Spiegel sitzt eine Lichtquelle, dessen Licht sich über das des Laserstrahls legt und diesen auf der Pflanze sichtbar macht. Anschließend geht der Strahl durch eine Linse, um den gewünschten Fokus zu erreichen und trifft nach der Lochblende auf das Pflanzenblatt.

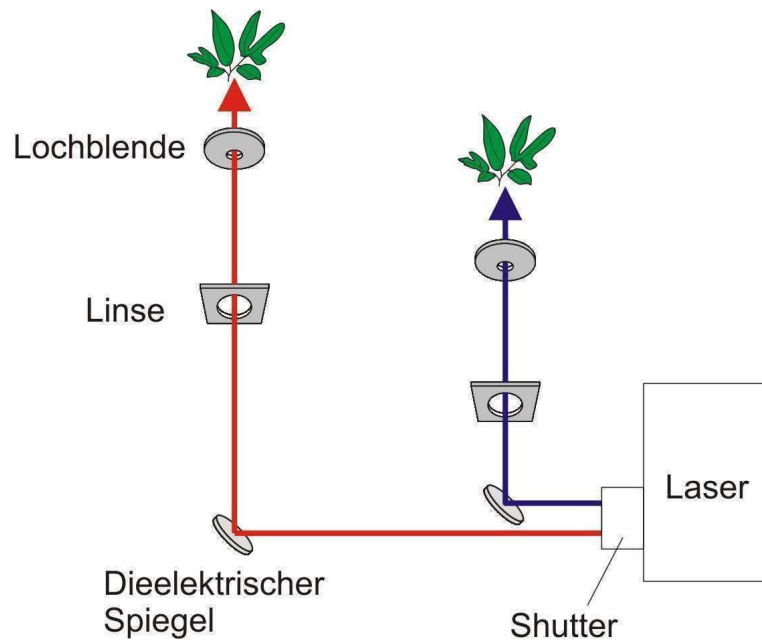


Abb. 8: Versuchsaufbau beider Versuchsreihen mit dem Nd-YAG-Laser im Institut für angewandte Physik in Bonn; blau: Fokus 100 μm , Pulsenergie 10 mJ; rot: Fokus 200 μm , Pulsenergie 20 mJ

3.2 Versuche am Laserzentrum Hannover

Die Versuche in Kooperation mit der Leibniz Universität fanden im Laserzentrum Hannover statt. Ziel der Versuche war es, die Auswirkungen der Laserapplikation auf eine größere Bandbreite von Unkräutern mikroskopisch untersuchen zu können.

3.2.1 Pflanzenmaterial

3.2.1.1 Dikotyledone: *Amaranthus retroflexus*, *Galium aparine*, *Matricaria camomilla* *Senecio vulgaris*

Amaranthus retroflexus ist der zurück gebogene oder zurück gekrümmte Amaranth und gehört zur Familie der Fuchsschwanzgewächse (*Amaranthaceae*). Dieser ist ein im Spätfrühjahr bis Sommer keimendes einjähriges Samenunkraut, das eine Höhe von 30- 40 cm aufweisen kann.

Das Klettenlabkraut (*Galium aparine*) ist ein ganzjährig keimendes ein- bis mehrjähriges Samenunkraut. Es gehört zur Familie der Rötengewächse (*Rubiaceae*) und wird bis zu 150 cm hoch.

Die echte Kamille (*Matricaria chamomilla*) gehört zu den Korbblütlern (*Asteraceae*) und ist ein fast ganzjährig keimendes einjähriges Samenunkraut mit spindelartiger Wurzel. Die Kamille erreicht eine Wuchshöhe von 15- 50 cm.

Senecio vulgaris ist das gemeine Kreuzkraut und gehört zur Familie der Korbblütler (*Asteraceae*). Es ist ein fast ganzjährig keimendes ein- oder zweijähriges Unkraut mit zapfenförmiger Wurzel. Das Kreuzkraut erreicht eine Höhe zwischen 10 und 30 cm.

3.2.1.2 Monokotyledone: *Poa annua*

Das einjährige Rispengras (*Poa annua*) gehört zur Familie der Süßgräser (*Poaceae*) und ist ein fast ganzjährig keimendes, einjährig überwintendes, horstbildendes Rispengras. Es erreicht eine Wuchshöhe von meist 10- 15 cm.

3.2.1.3 Anzucht und Wachstumsstadium

Die Versuchspflanzen für die Versuche am Laser Zentrum Hannover in Kooperation mit der Leibnitz Universität Hannover wurden im Gewächshaus angezogen. Diese wurden nicht in Saatschalen, sondern direkt in einzelne kleine Anzuchttöpfe (2*2*3 cm) ausgesät und bis zum gewünschten Wachstumsstadium kultiviert.

Alle Unkräuter, die für die Versuche im Laserzentrum Hannover verwendet wurden, befanden sich im Vier- bis Sechsstadium (BBCH 14- 16) (Tab. 2).

Tab. 2: Übersicht der verwendeten Unkräuter und Wachstumsstadien am Laserzentrum Hannover

	Unkraut	Wachstumsstadium (BBCH)
<i>Amaranthus retrolexus</i>	Zurückgebogener Amaranth	14
<i>Galium aparine</i>	Klettenlabkraut	14
<i>Matricaria camomilla</i>	Echte Kamille	16
<i>Senecio vulgaris</i>	Gemeines Kreuzkraut	16
<i>Poa annua</i>	Einjähriges Rispengras	14

3.2.2 Laser

Für die Untersuchungen im Laserzentrum Hannover standen ein Diodenlaser, Laserline, mit 940 nm Wellenlänge und 240 W Leistung, sowie ein CO₂-Laser, Coherent K500, mit einer Wellenlänge von 10600 nm und einer Leistung von 500 W zur Verfügung. In den unterschiedlichen Versuchsreihen wurden sowohl die Spotgröße, 3 oder 6 mm, als auch die Energie pro Flächeneinheit (J/mm²) verändert (Tab. 3).

Tab. 3: Übersicht über die verwendeten Laser, Spotgrößen und Energiedosen am Laserzentrum Hannover

Laser	Diodenlaser, Laserline, 240 W	CO ₂ -Laser, Coherent K 500, 500 W
Wellenlänge [nm]	940	10600
Spot [mm]	3; 6	3; 6
Dosis [J/mm ²]	0,00; 0,63; 1,25; 2,50; 5,00; 10,00	0,00; 0,31; 0,63; 1,25; 2,50; 5,00

3.2.3 Versuchsdurchführung und –auswertung

Es wurden verschiedene Versuchsreihen mit den oben genannten Parametern durchgeführt. Die Applikationszeit lag hier bei einigen Sekunden, was einer relativ langen Haltezeit entspricht. Diese war allerdings notwendig, um bei so geringen Leistungen das Gewebe überhaupt sichtbar zu schädigen. Angriffspunkt bei allen Versuchsreihen war das Sprossapikalmeristem der Pflanzen. Dieses konnte relativ problemlos durch einen eingebauten Pilotlaser mit dem Laserstrahl anvisiert werden. Nach den Applikationsversuchen wurden die Pflanzen zur mikroskopischen Auswertung nach Bonn gebracht.

Die Aufnahmen wurden mit einem Stereolichtmikroskop und einem Rasterelektronenmikroskop gemacht. Ziel war es, die veränderten Oberflächeneigenschaften der unterschiedlichen Unkräuter anhand mikroskopischen Aufnahmen nach der Laserapplikation zu vergleichen und Schlüsse auf ein eventuelles Absterben oder veränderte Wuchsbedingungen der Pflanzen ziehen zu können.

3.3 Versuche am Fraunhofer Institut für Lasertechnik in Aachen

Nach den gewonnenen Erkenntnissen aus den Vorversuchen war es bei den Versuchen am Fraunhofer Institut für Lasertechnik in Aachen das Ziel, die biologischen und technischen Parameter für eine erfolgreiche Unkrautkontrolle mittels Laser genauer zu bestimmen und zu differenzieren.

3.3.1 Pflanzenmaterial

Die Unkrautsamen stammten von der Saatgutfirma Rieger-Hofmann GmbH mit Sitz in Blaufelden-Raboldshausen.

3.3.1.1 Dikotyledone: *Anthemis arvensis*

Anthemis arvensis (*A. arvensis*), Ackerhundskamille, ist eine dikotyle Pflanze, d. h. sie bildet zwei Keimblätter aus und gehört zur Familie der Korbblütler (*Asteraceae*). Die Kamille ist ein im Herbst und Frühjahr keimendes ein- bis überjähriges Samenunkraut mit spindelartiger Wurzel. Sie erreicht eine Wuchshöhe von 10- 15 cm. Die Keimblätter sind klein und rundlich bis oval, die Laubblätter sind abgeflacht mit schmalen Seitenfiedern, zunächst einfach, später doppelt gefiedert. Hauptsächlich kommt die Ackerhundskamille in Getreide, Hackfrüchten, Mais und Raps vor.

3.3.1.2 Monokotyledone: *Aleopecurus myosuroides*

Aleopecurus myosuroides (*A. myosuroides*), Ackfuchsschwanz, ist ein monokotyledones Gras, d. h. es wird nur ein Keimblatt ausgebildet. Dieser gehört zur Familie der Süßgräser (*Poaceae*) und ist ein im Herbst oder Frühjahr keimendes einjähriges Samenungras, dessen Halme 15- 80 cm hoch werden können. Das Keimblatt ist zart mit unbehaarter Spreite, am Grund rötlich und gewunden. Die Laubblätter sind schmal und scharfrandig. Der Ackerfuchsschwanz kommt hauptsächlich in Getreide, vor allem Wintergetreide, Hack-, Hülsen- und Ölfrüchten vor.

3.3.1.3 Anzucht

Da sowohl *A. arvensis* als auch *A. myosuroides* Lichtkeimer sind, wurden diese im Gewächshaus angezogen. Zusätzlich zum Tageslicht wurden die Saatschalen unter Gewächshauslampen aufgestellt, um einen bestmöglichen und zügigen Auflauf der Unkrautsamen zu gewährleisten. Ausgesät wurde in Saatschalen auf einer speziellen Saaterde (Gemisch aus Erde, Sand und Perlite). Nach zwei Wochen in den Saatschalen befanden sich die gekeimten Unkräuter im Keimblattstadium (BBCH 10) und wurden einzeln in Anzuchttöpfe (7*7*9 cm) pikiert. Eine Vereinzelung der Unkräuter fand statt, um diese bei den folgenden Versuchen besser handhaben und flexibel in Gruppen einteilen zu können. Je nachdem, welches Wachstumsstadium der Unkräuter für die Versuche vorgesehen war, wurden diese unmittelbar nach dem Pikieren oder wahlweise drei, vier oder sechs Wochen später als Versuchspflanzen eingesetzt.

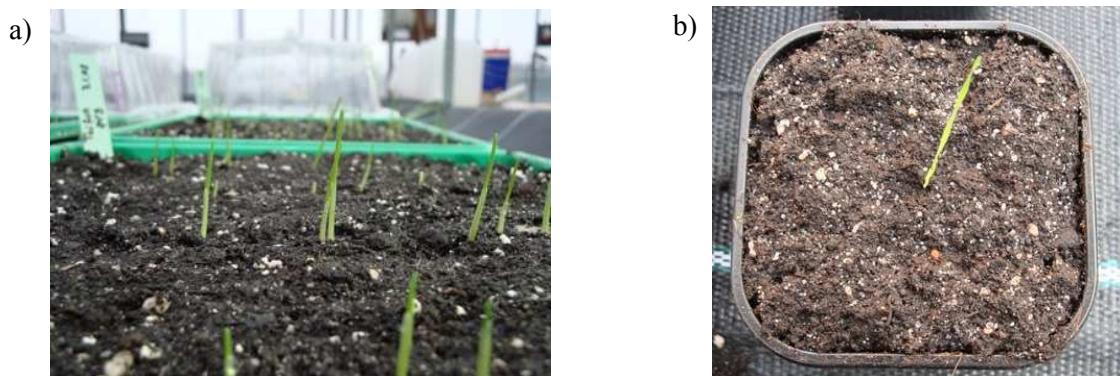


Abb. 9 a-b: a) Keimblattstadium von *Aleopecurus myosuroides* in Saatschalen
b) pikiertes Unkraut im Anzuchttopf

3.3.1.4 Wachstumsstadien (BBCH)

Um eine möglichst umfassende Beschreibung der Unkrautbekämpfung durch Laserstrahlen abzugeben, wurden verschiedene Wachstumsstadien mit unterschiedlichen Versuchsparametern getestet. Hierbei sollte eine reelle Einschätzung des benötigten Zeit- und Energieeinsatzes gegeben werden. Um diese unterschiedlichen Wachstumsstadien zu gewährleisten, wurde die Unkräuter nach dem pikieren unterschiedlich lange im Gewächshaus kultiviert. Sollten die Pflanzen das Keimblattstadium für die Versuche noch nicht überschritten haben, wurden sie unmittelbar nach dem Pikieren für die Versuchsreihen eingesetzt. Pflanzen, die ein höheres Wachstumsstadium für die Versuche aufweisen sollten,

wurden ebenfalls im Keimblattstadium pikiert, allerdings anschließend noch weitere Zeit im Gewächshaus kultiviert.

Tab. 4: Wachstumsstadien der Unkräuter

Unkraut	Wachstumsstadium (BBCH)
<i>Anthemis arvensis</i>	10; 13; 14; 16
<i>Alopecurus myosuroides</i>	10; 13; 14; 16

3.3.1.5 Spektroskopie

Die spektroskopischen Untersuchungen fanden ebenfalls im Fraunhofer Institut für Lasertechnik in Aachen statt. Jede Pflanze hat ein gewisses Absorptionsspektrum, auf dem zu erkennen ist, welche Wellenlängen vom Pflanzenmaterial besonders gut absorbiert werden, welche reflektiert werden und welche durch das Gewebe transmittieren. Es sollte hierbei verglichen werden, ob die Spektren für Reflexion, Absorption und Transmission der Versuchspflanzen mit denen aus der Literatur annähernd übereinstimmen und sich dadurch eventuelle Rückschlüsse auf die Wirksamkeit der unterschiedlichen Laser und deren Wellenlänge ziehen lassen.

Die Untersuchungen wurden mit einem High Performance Lambda Spektrometer (Lambda 1050) durchgeführt. Dieses misst die Transmission und Reflexion in einem Bereich von ca. 400- 2000 nm. Um das Spektroskop vorzubereiten wurde mit einem Referenzobjekt ein Autozero durchgeführt, ein so genannter Weißabgleich. Ebenfalls wurde die Referenz für 0 bzw. 100 % Reflexion ermittelt, wobei im ersten Fall ein schwarzes Papier und im zweiten Fall ein Spiegel vor das Spektroskop geschoben wurde. Anschließend wurden je drei Proben der beiden Unkräuter *A. arvensis* und *A. myosuroides* im Keim- und Vierblattstadium spektroskopisch untersucht. Dazu wurde aus einem Blatt jeder Pflanze ein Stückchen herausgeschnitten und dieses vor einer 2 mm Lochblende eingespannt. Alle 5 nm wurden die Werte zu Transmission und Reflexion zwischen 200 und 4000 nm im UV, VIS und NIR gemessen (s. Abb. 10, roter Kasten) gemessen. Das Absorptionsspektrum der Pflanzenblätter wurde rechnerisch ermittelt. Die Einstellung der Messung erfolgte anhand der Software UV WinLab (Abb. 10)

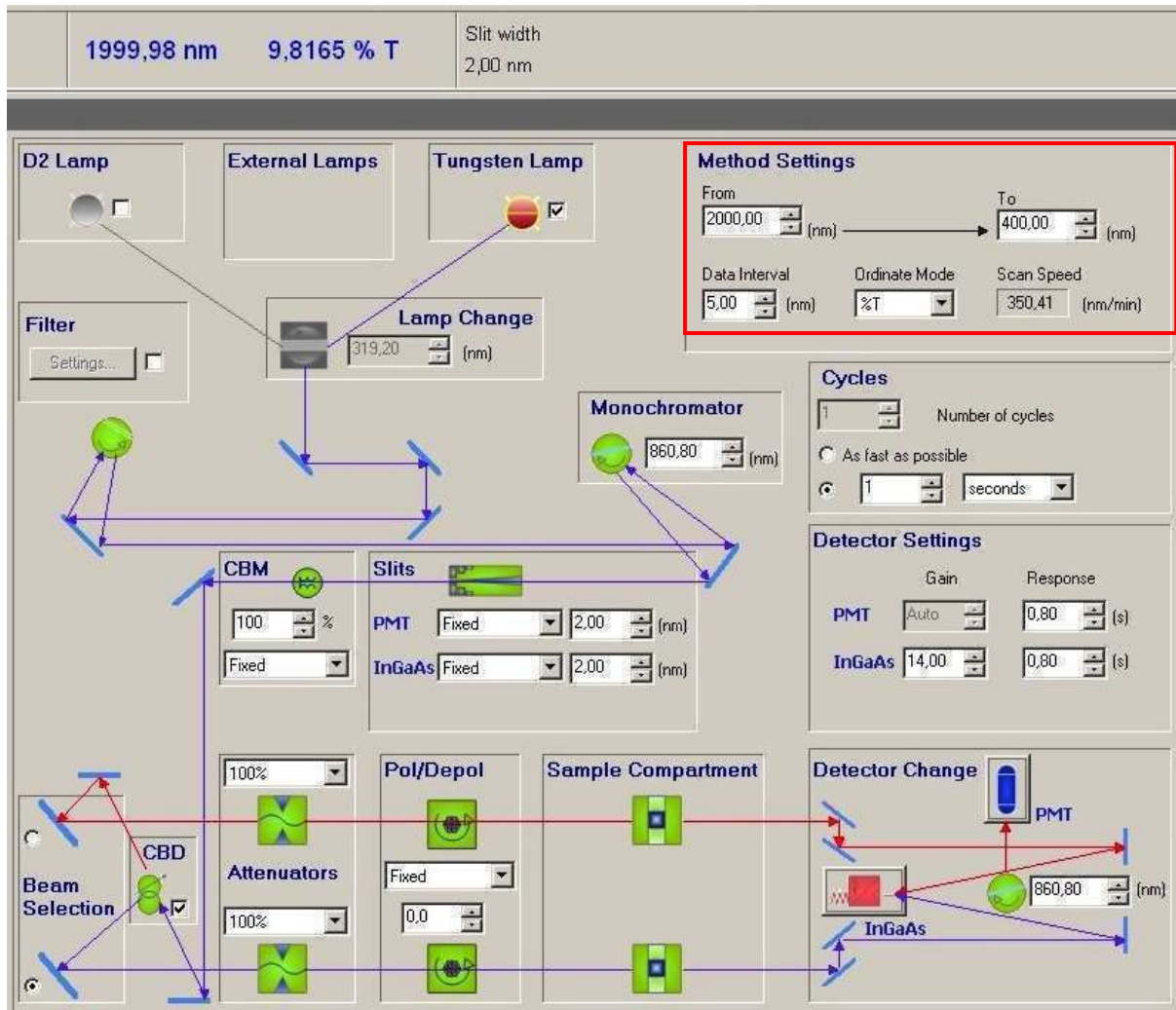


Abb. 10: Screenshot Spektroskopsoftware UV WinLab, roter Kasten: Messeinstellungen

3.3.2 Laser

Die Hauptversuche zur laserbasierten Unkrautbekämpfung fanden in Kooperation mit dem Fraunhofer Institut für Lasertechnik in Aachen statt. In der Abteilung für Trenn- und Fügeverfahren wurden die Versuchsreihen an zwei unterschiedlichen Dauerstrichlasern durchgeführt. Genauso wie die Pflanzen einige verschiedene Versuchsparameter lieferten, waren unterschiedliche technische Parameter bei der Einstellung der Laser zu testen (Tab. 5).

Tab. 5: Übersicht über die verwendeten Laser und deren technische Parameter

Lasertyp	Wellenlänge [nm]	Max. Leistung [kW]
Ytterbium Faserlaser, YLR-400	1070 (NIR)	4
CO2-Laser, SM600	10600 (LWIR)	0,6

3.3.2.1 Sicherheitsanforderungen

Laser werden in unterschiedliche Klassen eingeteilt, um Sicherheitsanforderungen, die durch die Arbeit mit Lasern entstehen, einordnen und bestimmen zu können. Diese Klassen richten sich hauptsächlich nach Leistung und Wellenlänge des Lasers. Alle Laser, mit denen in den Versuchen gearbeitet wurde, mit Ausnahme der Laser in Hannover, waren Laser der Klasse 4. Es bestand also die Pflicht, eine Schutzbrille zu tragen und sich vor Durchführung der Laserapplikation zu vergewissern, dass von allen Beteiligten ein ausreichender Sicherheitsabstand zum Laserstrahl eingehalten wurde.

3.3.2.2 Bauart des Systems

Die unterschiedlichen Versuchslaser sind komplex aufgebaute Systeme gewesen, an denen keine baulichen Veränderungen vorgenommen werden mussten, da sich entweder der Kopf des Lasers oder ein darunter befindlicher Tisch jeweils in x-, y-, z-Richtung verstellen ließen. Die Versuchspflanzen konnten dadurch direkt unter dem Laser positioniert werden. Lediglich der Abstand des Lasers zur Pflanze, der Angriffspunkt, der Winkel des auftreffenden Laserstrahls und die Treffergenauigkeit des Lasers mussten durch zusätzliche Hilfsmittel unterstützt und angepasst werden.

3.3.2.3 Versuchsaufbau

Der Grundaufbau für die Versuche gestaltete sich sehr simpel. Unter dem Laserkopf wurde manuell die Pflanze auf einem Tisch positioniert. Diese stand je nach Versuchsreihe entweder aufrecht oder der Topf wurde in einem Winkel von ca. 60° mit Hilfe eines gestuften Winkels gekippt.

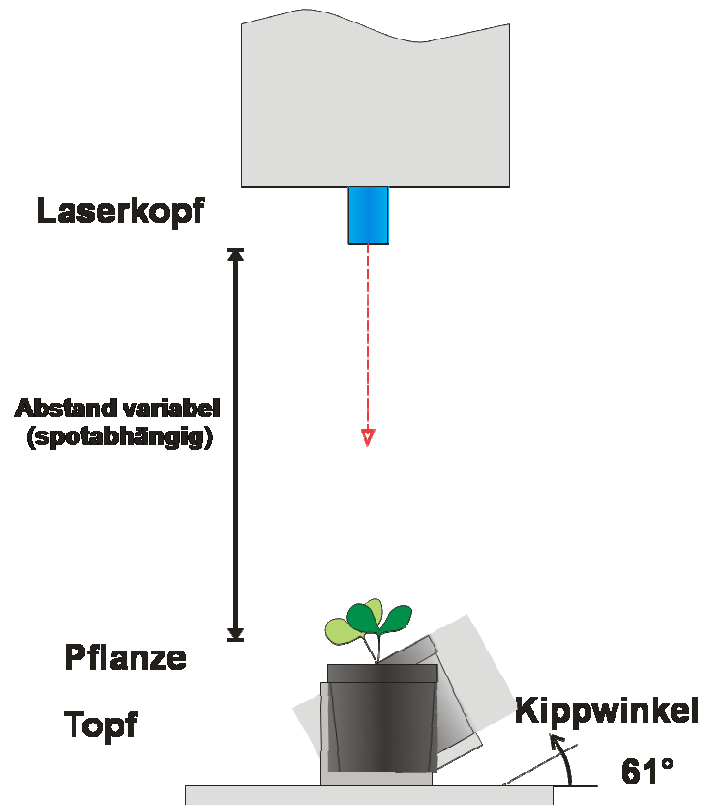


Abb. 11: Schematische Darstellung des Versuchsaufbaus

3.3.3 Applikationsverfahren

Das Applikationsverfahren setzte sich aus mehreren Teilschritten zusammen, die zuvor genau bestimmt und deren Parameter vor der Applikation eingestellt werden mussten. Zuerst musste der Angriffspunkt am Unkraut in der jeweiligen Versuchsreihe festgelegt werden. Anschließend folgte eine genaue Überprüfung, in welchem Abstand zum Laserkopf das Unkraut zu positionieren war, um die gewünschte Spotgröße auf der Pflanze abzubilden. Im Zusammenhang damit wurde auch festgelegt, ob die Pflanze gerade oder leicht schräg unter dem Laser positioniert wurde. Die Dauer der Applikation und die Leistung des Lasers wurden manuell am Laser- Computer eingestellt und konnten jederzeit variiert werden. Mehrfache Applikationen an der selben Pflanze mussten ebenfalls manuell durch ein- und Ausschalten des Laserstrahls durchgeführt werden. Alle Schritte des Applikationsverfahrens dienten dazu, eine Übersicht über die geeigneten technischen Parameter des Lasersystems geben zu können.

3.3.3.1 Angriffspunkt des Lasers

Es wurden verschiedene Angriffspunkte des Lasers an den Pflanzen getestet, um eine gute Einschätzung geben zu können, an welchem Punkt der Unkräuter eine Laserapplikation wirksam ist und Erfolge zeigt.

Wie schon in den Tastversuchen im Institut für angewandte Physik in Bonn, wurde der Fokus erst einmal darauf gelegt, einzelne Blätter der Unkräuter zu schädigen. Da es sich um Pflanzen im Keimblattstadium handelte, war das zu treffende Blatt wesentlich kleiner. Auf die Keimpflanzen von *A. arvensis* wurden hierbei gerade von oben appliziert, *A. myosuroides* wurde leicht angekippt, um das gerade nach oben wachsende Keimblatt zu treffen. In folgenden Versuchsreihen, auch mit größeren Wachstumsstadien, wurde der Angriffspunkt erst auf das Apikalmeristem der Pflanzen verlagert und später auf die Stielbasis der Unkräuter. Anvisiert wurde der Fokus entweder gerade von oben oder schräg von der Seite. In den meisten Versuchen wurde der Laserstrahl von oben senkrecht auf die Pflanzen gelenkt. Lediglich in einigen ersten Versuchen wurden die Pflanzen schräg unter dem Laser positioniert, um einen geeigneten Winkel zu schaffen, der es dem Laserstrahl ermöglichte, ohne vorherige Barrieren durch Blätter direkt die Stielbasis oder das Keimblatt zu treffen.

3.3.3.2 Abstand des Lasers zur Pflanze

Der Abstand des Lasers zur Pflanze ergab sich zwangsläufig daraus, wie groß der Strahldurchmesser sein sollte, mit dem man den Laserstrahl applizierte. Erst wurde auf einem Papier durch Verstellung des Abstandes zwischen Papier und Laser der Fokus bestimmt. Mit dem Abstand von Papier und Laser im Fokus konnte anschließend rechnerisch anhand der Kaustik des Lasers der Abstand für die einzelnen Spotgrößen bestimmt werden.

3.3.3.2.1 Strahldiagnose

Die Strahlqualität beschreibt die Fokussierbarkeit des Laserstrahls und wird beschrieben durch das Strahlparameterprodukt (SPP). Die Strahlqualität K ergibt sich dabei aus der Beugungszahl M^2 :

$$K = 1/M^2 \quad \text{und wird in mm*mrad angegeben.}$$

Bei einem idealen Laserstrahl sind K und $M^2 = 1$, in der Realität sieht es meist so aus, dass $K < 1$ und $M^2 > 1$ sind. Der Fokus eines Laser ergibt sich, wenn man den Laserstrahl durch eine Linse oder ähnliches fokussiert, dadurch bildet sich ein Brennpunkt aus, der ein Minimum in einer bestimmten Entfernung erreicht. Dabei ist die auftretende Leistung an der Stelle des Brennpunktes nicht an allen Stellen gleich stark, sondern nimmt zum Rand des Laserstrahls hin ab (Abb. 12). Das folgt daraus, dass der fokussierte Strahlquerschnitt durch eine Kaustik beschrieben wird, die eine nach außen gewölbte Oberfläche in Richtung des zu bearbeitenden Objektes aufweist (Abb. 13).

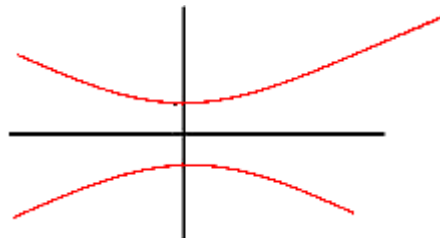


Abb. 12: Schematische Darstellung des Strahlenverlaufs eines Laserstrahls (rot) durch den Fokus

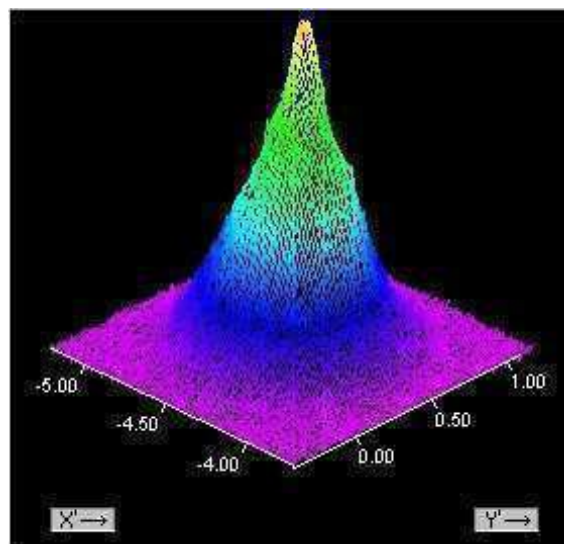


Abb. 13: Kaustik des Laserstrahls, deutliche Abnahme der Leistung zum Rand des Laserstrahls (violette Flächendarstellung); Zentrum des Laserstrahls gelb dargestellt

Die Strahlqualität des Faserlasers YLR-4000 beträgt $1,8 \text{ mm} \cdot \text{mrad}$, die des CO_2 -Lasers $> 0,8 \text{ mm} \cdot \text{mrad}$.

3.3.3.3 Applikationszeit und Strahldurchmesser

Es wurde jeweils nur eine Applikation pro Pflanze durchgeführt, je nach Versuchsreihe variierte diese allerdings in der Dauer. Die Zeiten reichten von 5 ms bis zu 250 ms abhängig von Versuchsaufbau, Größe der Versuchspflanzen, Strahldurchmesser und eingestellter Leistung des Lasers. Ebenso gestaltete es sich für den Strahldurchmesser des Laserstrahls. Dieser war wiederum abhängig von der Applikationszeit, der Größe der Versuchspflanzen und der Leistung des Lasers und bewegte sich zwischen 1 und 5 mm.

Tab. 6: Bandbreite der Applikationszeiten und Spotdurchmesser der unterschiedlichen Versuchsreihen

Applikationszeiten [ms]	Spotdurchmesser [mm]
5; 10; 15; 25; 50; 75; 100; 150; 200; 250	1; 2; 5

3.3.4 Versuchsparameter

Der Versuchsplan setzte sich zusammen aus allen biologischen und technischen Parametern, die im Vorfeld gesammelt wurden und die die erfolgreiche Laserapplikation beeinflussen können. In der folgenden Tabelle 7 sind alle Parameter dargestellt, die bei den Versuchen getestet wurden. Allerdings stellte sich teilweise schon bei der Versuchsdurchführung, spätestens bei der Auswertung heraus, dass nicht alle Parameter geeignet waren, um eine effiziente Unkrautkontrolle zu gewährleisten. Diese wurden dann nach und nach separiert und nur die vielversprechenden Ansätze weiterverfolgt.

Tab. 7: Übersicht über alle getesteten biologischen und technische-physikalischen Versuchsparameter

	Pflanzenart	Monokotyledone; Dikotyledone
Pflanze	Morphologie	Dünne Pflanzenteile, kaum behaart
	Wachstumsstadium [BBCH]	10; 13; 14; 16
	Angriffspunkt	Keimblatt; Meristem, Stielbasis
	Lasertyp	Faserlaser; CO ₂ -Laser
Laser	Wellenlänge [nm]	1070; 10600
	Leistung [kW]	0,125; 0,25; 0,5; 1; 2; 3; 4
	Applikationszeit [ms]	5; 10; 15; 25; 50; 75; 100; 150; 200; 250
	Strahldurchmesser [mm]	1; 2; 5

3.3.5 Versuchsdurchführung

Die Versuche wurden an unterschiedlichen Tagen im Fraunhofer Institut für Lasertechnik in Aachen durchgeführt. Vorab wurden Versuchspläne für die zur Verfügung stehenden Laser aufgestellt. Je nachdem welche Versuchsreihen anstanden, wurden die Pflanzen auf die gewünschten Wachstumsstadien kultiviert. Diese wurden dann in Kisten nach Aachen transportiert, dort den jeweiligen Behandlungen unterzogen und zur weiteren Beobachtung und Auswertung wieder im Gewächshaus aufgestellt. Die Versuchspläne zu den einzelnen Behandlungen befinden sich im Anhang.

3.3.6 Versuchsauswertung

Die Auswertung der Versuche erfolgte anhand von Boniturdaten und Frischmassebestimmungen der einzelnen Versuchspflanzen, mikroskopischen Aufnahmen mit dem REM und LM und einer High-Speed- sowie Thermokamera. Alle Methoden eigneten sich, um den Vitalitätszustand der Unkräuter zu erfassen und die Auswirkungen der Laserapplikation auf das Pflanzengewebe zu beschreiben.

3.3.6.1 Bonitur

Die Erhebung der Boniturdaten fand im Gewächshaus über einen Zeitraum von vier Wochen nach dem Tag der Laserapplikation statt. Bonitiert wurde im Wochenrhythmus, so dass jede Woche der Vitalitätszustand anhand einer einfachen Klassifizierung stattfand: 0 = abgestorben, 1 = nicht abgestorben, 2 = wieder ausgetrieben. Um Unterschieden bei den einzelnen Versuchsreihen vorzubeugen, wurde jeweils von der gleichen Person bonitiert.

3.3.6.2 Frischmassebestimmungen

Um die Frischmasse der Unkräuter bis zu vier Wochen nach der Laserapplikation zu bestimmen, wurden jeweils zehn zufällig ausgewählte Pflanzen aus einem Pool gleichbehandelter Pflanzen ausgewählt und das Gewicht dieser anhand einer Waage bis auf Zehntel Gramm genau bestimmt.

3.3.6.3 Mikroskopische Auswertungen (REM und LM)

Die Untersuchungen mittels des Rasterelektronenmikroskops (REM) sollten einen Aufschluss darüber geben, in welcher Weise das Gewebe der Pflanzen durch den Laser geschädigt wird und ob Unterschiede bei Leistungssteigerung des Lasers oder Verwendung unterschiedlicher Lasertypen ausgemacht werden können. Hierzu wurden die behandelten Blätter oder Pflanzenstiele spätestens einen Tag nach der Applikation im REM betrachtet und Aufnahmen der geschädigten Pflanzenteile, zum späteren Vergleich, gemacht.

Auf gleiche Weise wurde auch bei den Untersuchungen mit dem Stereolichtmikroskop (LM) verfahren. Auch hier wurden von behandelten Pflanzenteilen Aufnahmen gemacht, um später eventuelle Vergleiche zwischen den unterschiedlichen Versuchsreihen ziehen zu können.

3.3.6.4 High-Speed-Kamera und Thermokamera

Die Aufnahmen mit der High-Speed-Kamera wurden direkt während der Laserapplikation durchgeführt und sollten verdeutlichen, was in dem Moment des Auftreffens des Lasers mit der Pflanze passiert und ob sich direkt im Anschluss erste Rückschlüsse auf den Vitalitätszustand der Pflanze ziehen lassen. Aufgenommen wurde mit einer Geschwindigkeit von 50 Bildern pro Sekunde.

Die Thermokamera diente dazu, eine Vorstellung davon zu bekommen, wie die Wärmeverteilung in der Pflanze im Moment der Laserapplikation aussieht.

3.3.6.5 Programme zur mathematischen und statistischen Auswertung der Ergebnisse

Die Auswertung der Versuche fand vor allem durch die makroskopischen und mikroskopischen Erfassungen statt. Diese wurden mit einander verglichen und eventuell auftretende Unterschiede dokumentiert. Alle erhaltenen Bonitur- und Frischmassedaten wurden mit der Statistik- und Analysesoftware SigmaPlot auf statistisch signifikante Unterschiede untersucht.

4 Versuchsergebnisse

4.1 Tastversuche im Institut für angewandte Physik

Das Ziel der Tastversuche bestand darin, durch makroskopische Beobachtungen der behandelten Pflanzen einen Eindruck davon zu gewinnen, wie das pflanzliche Gewebe auf Laserstrahlung reagiert. Im Folgenden werden die dokumentierten Beobachtungen dargestellt.

4.1.1 Makroskopische Veränderungen der Pflanzen

4.1.1.1 Einmalige Applikation (1 Puls; 7 ms)

Eine Dokumentation der Gewebeschädigung der Pflanzen fand anhand von Digitalaufnahmen statt. Diese wurden zum einen direkt nach der Laserapplikation, sowie einige Tage später durchgeführt.

Direkt nach der Laserapplikation ist zu sehen, dass dort, wo der Laser auftraf, ein Loch, in etwa von der Größe des Strahldurchmessers (0,5 mm), im Pflanzengewebe zu finden ist. An dieser Stelle ist das Pflanzengewebe aufgrund der hohen Temperaturen, die der Laserstrahl entwickelt, sofort verdampft. Etwa eine Stunde nach der Laserapplikation hatte sich um das Loch ein Ring gebildet. Auf Abbildung 14 ist zu sehen, dass dieser Ring durch zusammengefallenes Gewebe entsteht. Diese Nachbarzellen sind durch den Laser ebenfalls zerstört worden, und das Wasser ist aus ihnen ausgetreten. Durch Abnahme des osmotischen Druckes fallen die Zellen in sich zusammen. Der Strahldurchmesser des gepulsten Laserstrahls betrug 1- 2 mm.



Abb. 14: Nahaufnahme des geschädigten Pflanzengewebes von *Phaseolus vulgaris* ca. eine Stunde nach der Laserapplikation (1 Puls; 7 ms); deutlich zu sehen ist ein Loch im Pflanzengewebe, wo der Laserstrahl aufgetroffen ist, und zusammengefallene Zellen in direkter Umgebung des Loches

Nach einer Woche im Gewächshaus wurde dokumentiert, ob und wie sich das behandelte Pflanzengewebe verändert hat. Schon auf den ersten Blick war zu erkennen, dass sich das Gewebe um die Löcher farblich verändert hatte. Waren diese anfangs nur etwas heller gewesen als das umgebende Gewebe, hoben sie sich nun deutlich gelb vom restlichen Pflanzenblatt ab. Die gelbliche Färbung resultierte daraus, dass das betroffene Pflanzengewebe ausgetrocknet war. Berührte man die Blätter, brach das ausgetrocknete Gewebe sofort aus. An den behandelten Stellen lagen deutliche Welkeerscheinungen vor.



Abb. 15: Aufnahme des behandelten Pflanzenblattes von *Solanum lycopersicum* nach einer Woche im Gewächshaus; deutlich heben sich die gelben, ausgetrockneten Zellen vom restlichen Blattgewebe ab (1 Puls; 7 s)

Ebenso wie die Blattmitte wurden auch die Blattspitze und der Blattansatz mit dem Laser bestrahlt. Hierbei wurden die gleichen Symptome beobachtet, die auch schon bei Applikation des Lasers in der Blattmitte deutlich wurden. An der Blattspitze zeigten sich hierbei die selben Symptome auf den Blättern, wie auch in der Mitte des Blattes, um den bestrahlten Punkt welkte das Blattgewebe sichtbar. Die Bestrahlung des Blattansatzes mit dem Laser zeigte keine Auswirkungen auf das Wuchsverhalten der Blätter, selbst wenn diese leicht abknickten. Ebenfalls waren keine Welkeerscheinungen des Blattstiels zu erkennen.

4.1.1.2 Mehrfache Applikation (Applikationszeit 1,5 s; 15 Pulse)

Die schon zuvor bei der einmaligen Applikation beschriebenen Symptome, zeigten sich auch bei mehrfachen Pulsen auf Blattmitte, -ansatz und -spitze, allerdings in größerem Ausmaße. Die betroffenen Stellen wurden gelblich-braun und zeigten deutliche Welkeerscheinungen, allerdings ohne Auswirkungen auf den Vitalitätszustand der einzelnen Versuchspflanzen.



Abb. 16: mehrfach gepulste Laserapplikation in die Blattmitte (links) und an der Blattspitze (rechts)

Zwischen den unterschiedlichen Pulsenergien und Fokusslängen waren makroskopische keine Unterschiede zu erkennen. Genauso wenig wie zwischen den einmal und zweimal gepulsten Blättern. Die Reaktionen des Pflanzengewebes ließen erkennen, dass dieses auf eine Laserapplikation reagiert, in welchem Maße und wie die Erfolgsbedingungen

verbessert und die Versuchsparameter genauer bestimmt werden konnten, wurde in folgenden Testverfahren untersucht.

4.2 Unterschiedliche Reaktion von Monokotyledonen und Dikotyledonen auf die Applikation von Laserstrahlung

Ein wichtiger Teil der Untersuchungen war, ob und in welchem Maße monokotyle und dikotyle Pflanzen unterschiedlich auf die Laserapplikation reagieren. Es wurde anhand einer Bonitur festgestellt, wie viel Prozent der Pflanzen in den unterschiedlichen Wachstumsstadien absterben, nicht absterben oder wieder austreiben.

4.2.1 Boniturdaten

Die Boniturdaten wurden über vier Wochen aufgenommen, beginnend mit dem Tag unmittelbar nach der Laserapplikation. Um die Monokotyledonen und Dikotyledonen miteinander zu vergleichen, wurden sowohl das Keimblattstadium, als auch das Vierblattstadium herangezogen. Diese wurden mit unterschiedlichen Leistungen und Applikationszeiten behandelt.

4.2.1.1 Keimblattstadium

Sowohl für den Faser-, als auch den CO₂-Laser wurde in ersten Versuchen bestimmt, in wie weit sich der Bekämpfungserfolg der Unkräuter durch eine Veränderung der Leistung beeinflussen lässt. Diese sogenannte Zerstörschwelle für *A. arvensis* und *A. myosuroides* im Keimblattstadium wurde mit dem Faserlaser anhand unterschiedlicher Leistungen (1, 2, 3, 4 kW) bei einer Applikationszeit von 10 ms und unterschiedlicher Applikationszeiten (10, 15, 25 ms) bei gleichbleibender Leistung von 4 kW bestimmt. Angriffspunkt war zum einen ein einzelnes Keimblatt, zum anderen das Wachstumszentrum der Versuchspflanzen. Der Spotdurchmesser betrug konstant 1 mm.

In Abbildung 17 ist die zerstörte Blattfläche von *A. arvensis* als Welkeerscheinungen in Prozent bei unterschiedlichen Leistungen aufgetragen. Wie anzunehmen, nahm die Prozentzahl der Welkeerscheinungen mit zunehmender Leistung ebenfalls zu. Bei 4 kW Leistung wurden fast 50 % des Keimblattes zerstört, bei 1 kW waren es unter 10 %. Das

fürte zu dem Schluss, dass in den folgenden Versuchen konstant mit einer Laserleistung von 4 kW weitergearbeitet wurde, um eine möglichst hohe Schädigung des Pflanzengewebes zu erreichen.

Ebenfalls in Abbildung 17 ist die Anzahl abgeknickter Halme (Welkeerscheinungen in %) von *A. myosuroides* bei unterschiedlichen Leistungen (1, 2, 3, 4 kW) und einer Applikationszeit von 10 ms dargestellt. Die Anzahl der abgestorbenen Pflanzen bewegt sich konstant, trotz variierender Leistung, um die 20 %.

Auf Grund der Erfahrungen und Ergebnisse, die im Bezug auf die Zerstörschwelle von *A. arvensis* gemacht wurden, wurden die Versuchsparameter für die monokotylen Pflanzen von *A. myosuroides* eingeschränkt. Es wurde nur mit der minimalen Applikationszeit von 10 ms gearbeitet, die Leistung wurde, wie auch schon zuvor, bei beiden Lasern variiert. Angriffspunkt war jeweils die Blattscheide der Keimblätter, bonitiert wurden hierbei abgeknickte und nicht abgeknickte Halme. Der Spotdurchmesser betrug weiterhin konstant 1 mm.

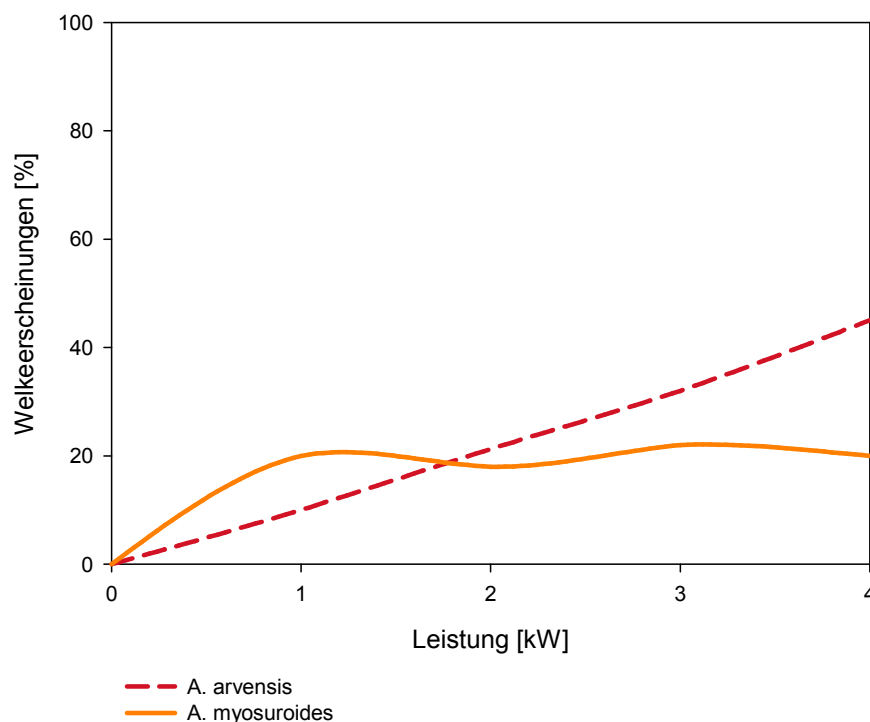


Abb. 17: Welkeerscheinungen der Keimblätter von *A. arvensis* (rot) und *A. myosuroides* (orange) in % gewelte Blattfläche gegenüber der Leistung des Faserlasers von 1- 4 kW; Applikationszeit 10 ms; Strahldurchmesser 1 mm

Gleichzeitig wurde untersucht, welche Applikationszeiten annähernd ausreichen, um die Versuchspflanzen wirkungsvoll zu schädigen. In Abbildung 18 a ist der Wirkungsgrad der Laserapplikation auf das Wachstumszentrum von *A. arvensis* (BBCH 10) bei verschiedenen Applikationszeiten und einer konstanten Leistung von 4 kW abgebildet. Auf der x-Achse aufgetragen sind die Tage nach der Laserapplikation. Bei der höchsten Applikationszeit von 25 ms ist schon sieben Tage nach der Applikation deutlich zu sehen, dass 80 % der Versuchspflanzen wirkungsvoll geschädigt wurden und bereits nach zwei Wochen 100 % der Pflanzen abgestorben waren. Aber auch die niedrigste Applikationszeit von nur 10 ms zeigte nach drei Wochen einen Wirkungsgrad (= abgestorbene Pflanzen) von ganzen 100 % auf.

Auf Grund der guten Ergebnisse mit dem Faserlaser wurde der Wirkungsgrad des CO₂-Lasers bei höchst möglicher Leistung (0,5 kW) aber nur bei 10 ms für die Versuchspflanzen von *A. myosuroides* bestimmt. Abbildung 18 b zeigt, dass auch bei den Monokotyledonen geringe Leistung und niedrige Applikationszeit ausreichen, um 100 % der Versuchspflanzen bis zu drei Wochen nach der Applikation nachhaltig zu schädigen.

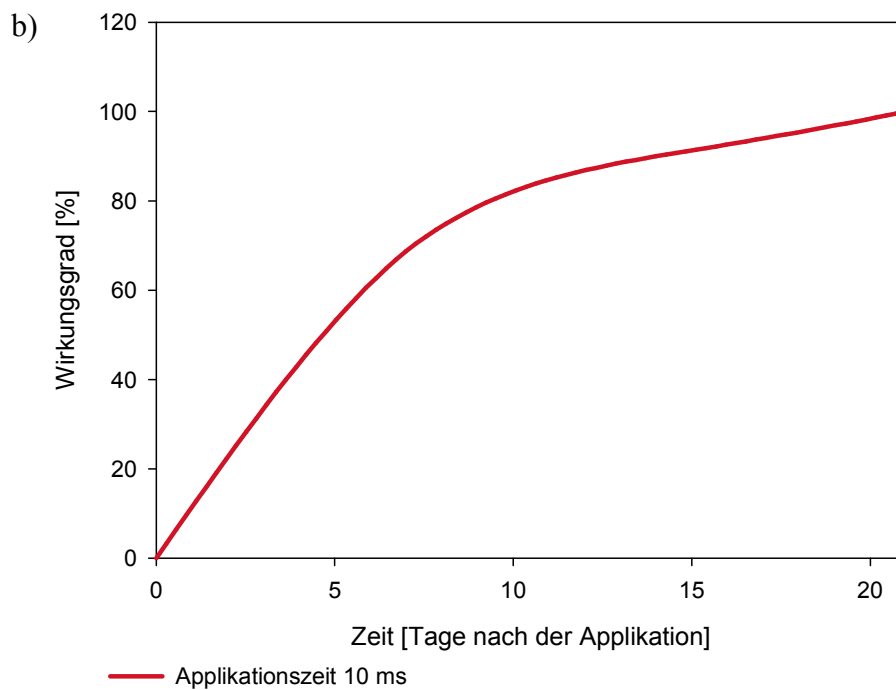
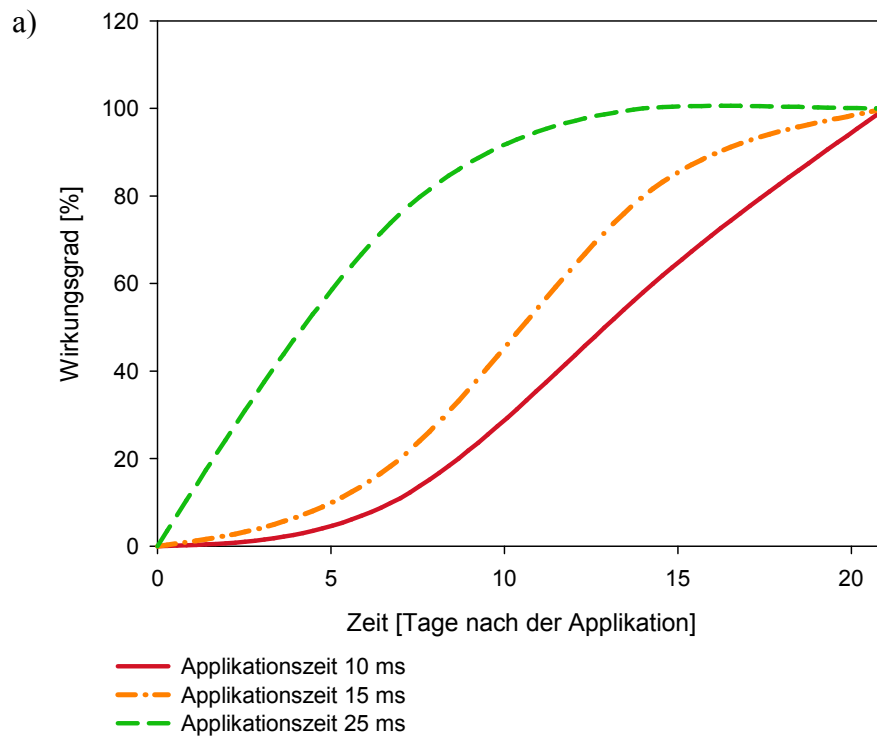


Abb. 18: Wirkungsgrad der Laserapplikation; a) Faserlaser 4 kW auf das Wachstumszentrum von *A. arvensis* bei drei unterschiedlichen Applikationszeiten; b) CO₂-Laser 0,5 kW auf das Wachstumszentrum von *A. myosuroides* bei gleicher Applikationszeit; Strahldurchmesser konstant 1 mm

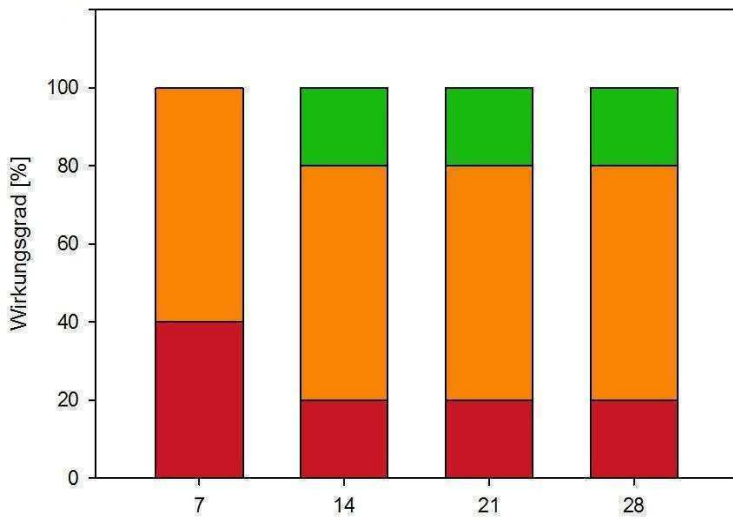
4.2.1.2 Vierblattstadium

Entsprechend den Versuchen mit Unkräutern im Keimblattstadium sahen auch die Versuche mit Pflanzen im Vierblattstadium aus. Es wurde eine bestimmte Anzahl monokotyler und dikotyler Versuchspflanzen mit einer konstanten Leistung von 4 kW, einem gleichbleibenden Spot von 1 mm bei unterschiedlichen Applikationszeiten, 25, 50, 75 und 100 ms, bestrahlt.

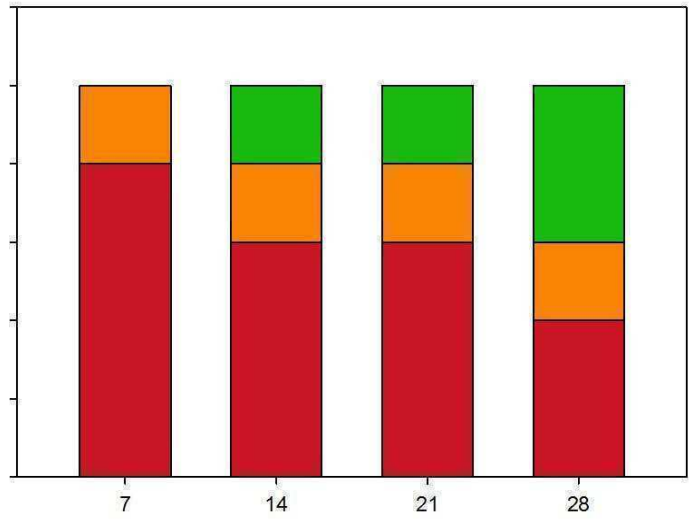
Bonitiert wurden die Versuchspflanzen nach dem Schema abgestorben, nicht abgestorben und wieder ausgetrieben bis zu vier Wochen nach der Laserapplikation, beginnend unmittelbar nach der Versuchsdurchführung. Exemplarisch dargestellt sind hier die Ergebnisse für eine Behandlung mit dem Faserlaser, die Ergebnisse für den CO₂-Laser waren äquivalent zu denen des Faserlasers.

In Abbildung 19 a- d ist zu erkennen, dass mit zunehmender Applikationszeit auch die Anzahl der abgestorbenen Pflanzen zunimmt, dies ist für monokotyle und dikotyle Pflanzen der Fall. Bei einer Applikationszeit von 25 ms ist bei beiden Versuchspflanzenarten kein Bekämpfungserfolg zu erkennen, ein großer Teil der Pflanzen von *A. arvensis* ist nach der Laserapplikation nicht abgestorben (60 %). Eine Woche später beträgt der Anteil der nicht abgestorbenen und wiederausgetriebenen Pflanzen sogar 80 %. Bei *A. myosuroides* sieht es ähnlich aus, hier beträgt der Anteil der nicht abgestorbenen und wieder ausgetriebenen Pflanzen immerhin 60 %. Kleine Unterschiede zwischen den monokotylen und dikotylen Pflanzen lassen sich am ehesten in der Anzahl der wiederausgetriebenen Pflanzen herauskristallisieren, z. B. bei einer Applikationszeit von 50 ms. Hier beträgt der Anteil der wiederausgetriebenen Pflanzen bei *A. myosuroides* schon nach zwei Wochen im Gewächshaus wieder 60 %, bei *A. arvensis* sind es hingegen nach 4 Wochen erst 20 %. Ein ähnliches Bild spiegelt sich auch bei einer Applikationszeit von 75 ms wieder. Während hier ein kleiner Teil der Versuchspflanzen bei *A. arvensis* nicht abgestorben ist, aber auch keine behandelte Pflanze wieder neu austreibt, sind bei *A. myosuroides* alle Pflanzen bei der Laserapplikation stark geschädigt worden, ein kleiner Prozentsatz treibt allerdings immer noch wieder aus. Erst bei einer Applikationszeit von 100 ms sind sowohl die dikotylen als auch die monokotylen Pflanzen so stark geschädigt, dass keine der behandelten Pflanzen wieder austreibt.

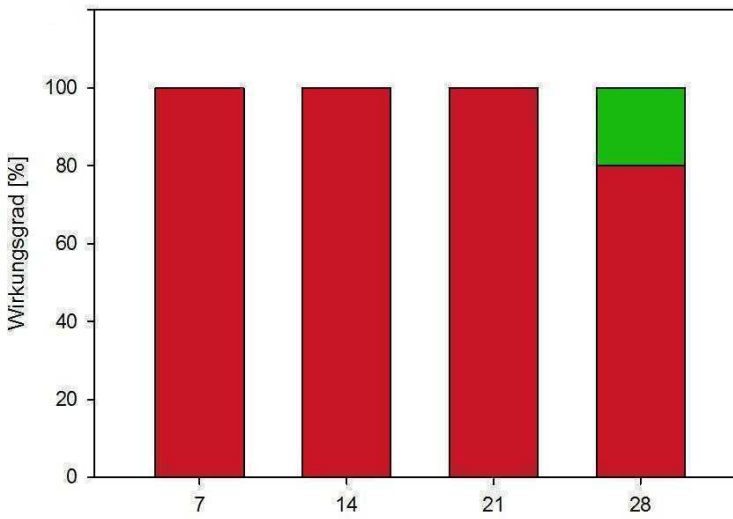
a 1)



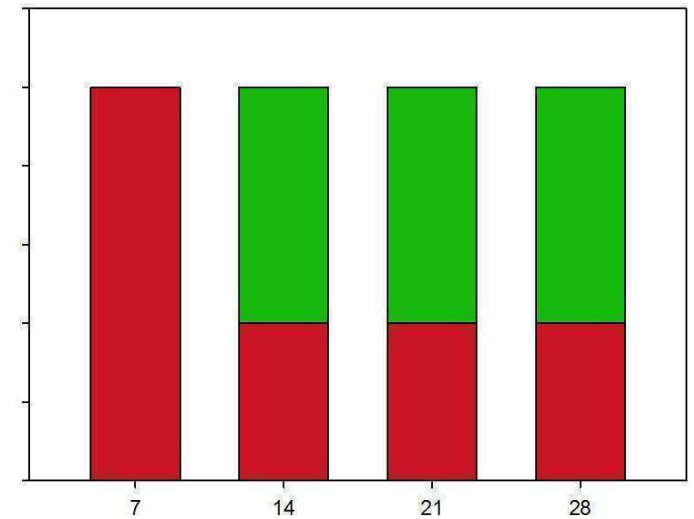
a 2)



b 1)



b 2)



Zeit [Tage nach der Applikation]

Zeit [Tage nach der Applikation]

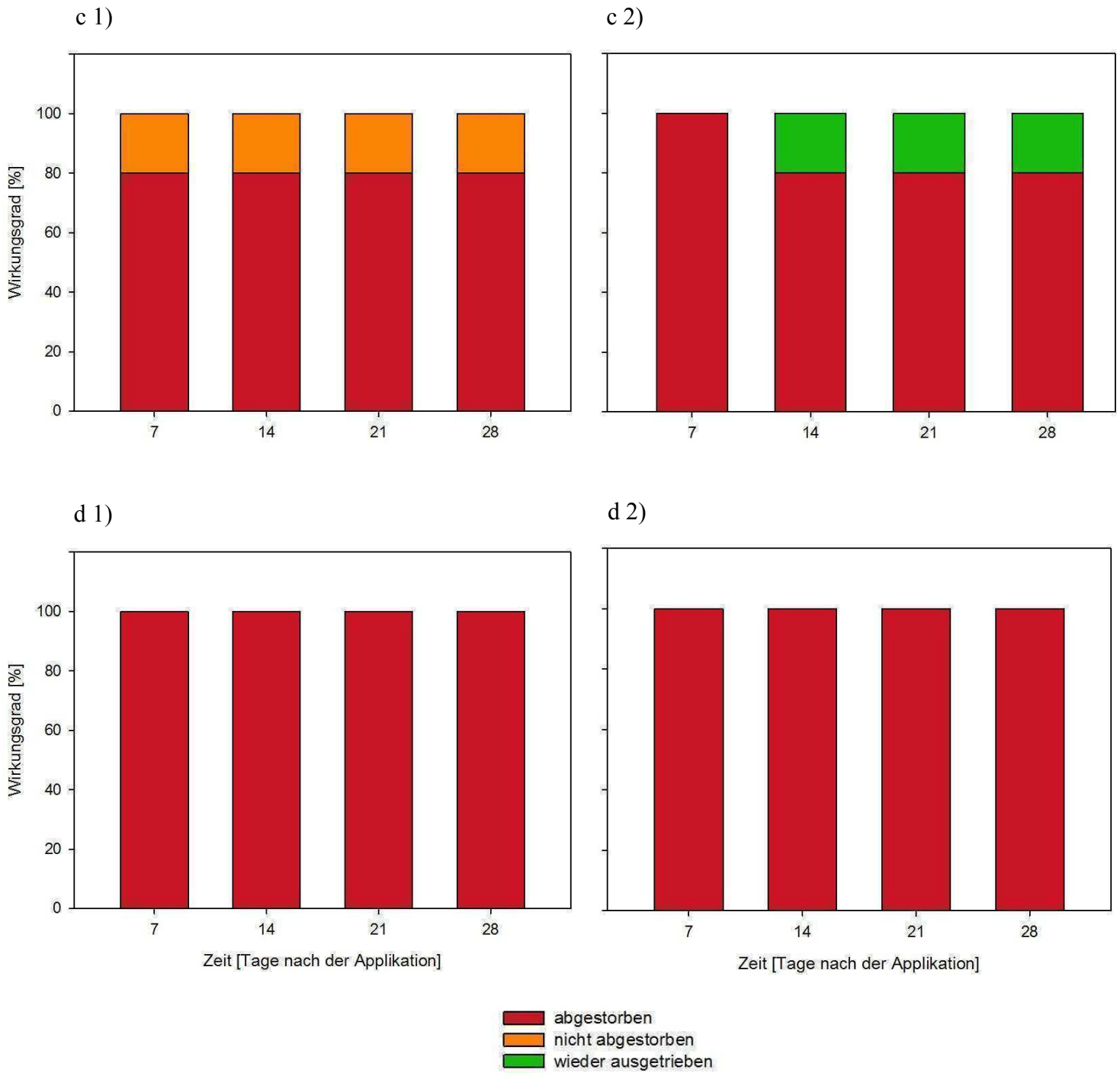


Abb. 19 a- d: Wirkungsgrad der Laserapplikation bei verschiedenen Applikationszeiten (a 1+2: 25 ms, b 1+2: 50 ms, c 1+2: 75 ms, d 1+2: 100 ms); Vergleich von Dikotyledonen (1) und Monokotyledonen (2) im Vierblattstadium; Faserlaser, Leistung 4 kW; Strahldurchmesser 2 mm; bonitiert über vier Wochen

4.3 Auswertung der Boniturdaten anhand der technisch-physikalischen und biologischen Versuchsparameter

Die Boniturdaten waren das wichtigste Mittel, um eine nähere Bestimmung der Versuchsparameter für eine erfolgreiche Laserapplikation geben zu können. Untersucht wurden hierbei vor allem der Einfluss der Leistung, der Applikationszeit, des Angriffspunktes und des Wachstumsstadiums, da dies die gewichtigsten Parameter bei der Begrenzung der Laserapplikation waren. Unterschiedliche Versuche wurden im Bezug auf die Leistung mit monokotylen und dikotylen Versuchspflanzen im Keimblattstadium durchgeführt. Der Angriffspunkt des Lasers wurde an Pflanzen im Keim- und Vierblattstadium genauer bestimmt. Den Einfluss von Applikationszeit und Wachstumsstadium wurden mit Pflanzen im Keim-, Drei-, Vier- und Sechsbblattstadium untersucht.

4.3.1 Einfluss der Leistung

Der Einfluss, den die Leistung auf eine erfolgreiche Laserapplikation hat, wurde sowohl für den CO₂-, als auch für den Faserlaser ermittelt. Dies geschah ausschließlich an monokotylen und dikotylen Pflanzen im Keimblattstadium, bei einer Applikationszeit von 10 ms und einer Spotgröße von 1 mm.

4.3.1.1 CO₂-Laser

4.3.1.1.1 *Anthemis arvensis*

Wie in Abbildung 20 dargestellt, wurde beim CO₂-Laser mit drei unterschiedlichen Leistungen gearbeitet. Die maximale Leistung des CO₂-Lasers betrug 0,5 kW, desweiteren wurde eine Leistung von 0,125 und 0,25 kW auf die Keimblätter von *A. arvensis* appliziert.

Den größten Erfolg zeigte auch die größte Leistung, bei applizierten 0,5 kW wurden direkt über 60 % der Blattfläche der Keimblätter zerstört (Welkeerscheinungen). Aber auch bei geringeren Leistungen waren mindestens 50 % der Blattfläche direkt zerstört. Drei Wochen nach der Laserbehandlung waren es 65- 90 %.

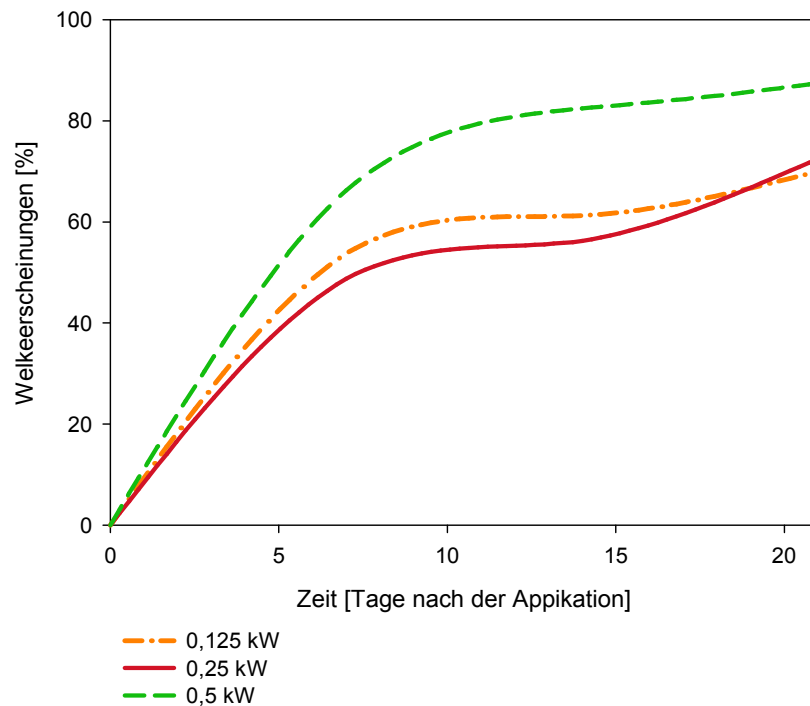


Abb. 20: auftretende Welkeerscheinungen [%] von *A. arvensis* bei unterschiedlichen Leistungen des CO₂-Lasers, bonitiert über drei Wochen; Applikationszeit 10 ms, Strahldurchmesser 1 mm

4.3.1.1.2 *Aleopecurus myosuroides*

Für die monokotylen Versuchspflanzen von *A. myosuroides* ergab sich ein ähnliches Bild wie für die Dikotyledonen. Da bei der Bonitur nur zwischen abgeknickten und nicht abgeknickten Keimblätter unterschieden wurde, ergeben sich in Abbildung 21 drei ähnliche Kurven für die aufgetretenen Welkeerscheinungen. Die eine liegt bei 75 % abgeknickter Pflanzen bei einer Leistung von 0,125 kW. Leistungen von 0,25 und 0,5 kW ergaben einen Erfolg von 90- 100 % abgeknickter Halme bei den Versuchspflanzen. Dies änderte sich auch in den anschließenden drei Wochen Bonitur nicht.

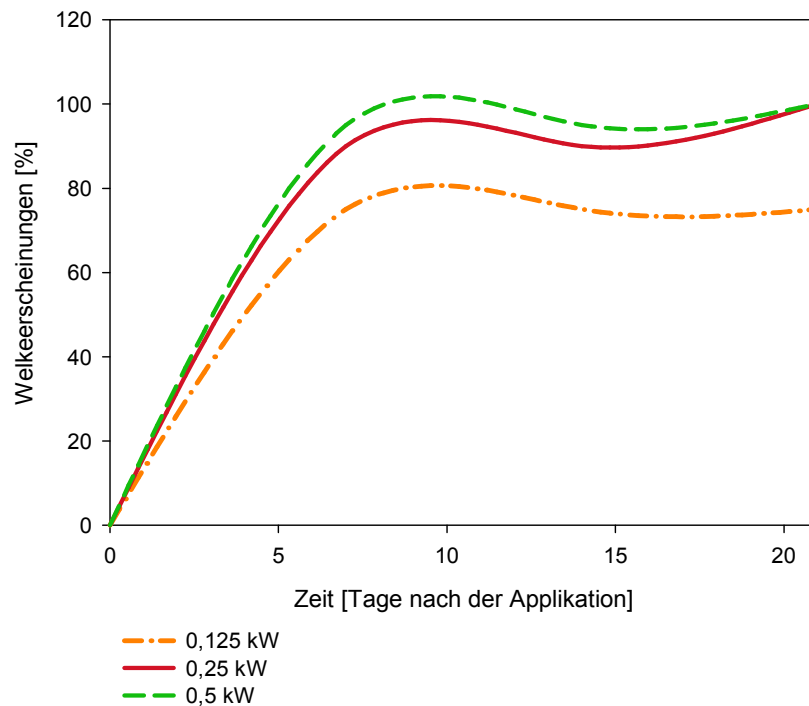


Abb. 21: Welkeerscheinungen [%] von *A. myosuroides* bei unterschiedlichen Leistungen des CO₂-Lasers bis zu drei Wochen nach Applikation; Applikationszeit 10 ms; Strahldurchmesser 1 mm

4.3.1.2 Faserlaser

4.3.1.2.1 *Anthemis arvensis*

Wie schon für den CO₂-Laser, wurden auch für den Faserlaser die Welkeerscheinungen der Keimblätter für *A. arvensis* bei unterschiedlichen Leistungen bestimmt. Die Leistungen waren höher als beim CO₂-Laser (1, 2, 3, 4 kW), zeigten aber ein ähnliches Bild, denn mit zunehmender Leistung nahm auch der Anteil der zerstörten Blattfläche zu. Bei 4 kW Leistung wurden fast 50 % des Keimblattes zerstört, bei 1 kW waren es lediglich weniger als 10 %. Das führte zu dem Schluss, dass in den folgenden Versuchen konstant mit einer Laserleistung von 4 kW gearbeitet wurde, um eine möglichst hohe Schädigung des Pflanzengewebes zu erreichen.

4.3.1.2.2 *Aleopecurus myosuroides*

Anders sahen die Auswirkungen einer Erhöhung der Leistung des Faserlasers auf die Versuchspflanzen von *A. myosuroides* aus. Trotz ansteigender Leistung von 1 auf 4 kW blieb die Anzahl der abgeknickten Halme weitestgehend konstant.

4.3.2 Einfluss der Applikationszeit

Nachdem sich die Applikationszeiten für die Pflanzen im Keimblattstadium mit 10 ms sehr kurz gestalteten, war die Frage, in wie weit man die Applikationszeit heraufsetzen muss, um größere Unkräuter bei gleichbleibender Leistung von 0,5 kW (CO₂-Laser) und 4 kW (Faserlaser) erfolgreich zu schädigen. Dazu wurden dikotyle und monokotyle Versuchspflanzen im Vierblattstadium bei vier unterschiedlichen Applikationszeiten (25, 50, 75 und 100 ms), gleichbleibender Leistung und konstantem Strahldurchmesser (2 mm) geschädigt und anschließend im Gewächshaus bonitiert.

4.3.2.1 CO₂-Laser

Der CO₂-Laser arbeitet zwar mit einer wesentlich geringeren maximalen Leistung (0,5 kW) als der Faserlaser (4 kW), trotzdem wurden in beiden Versuchsreihen die selben Applikationszeiten gewählt, um auch die Wirkungserfolg der Lasertypen miteinander vergleichen zu können.

4.3.2.1.1 *Anthemis arvensis*

Die dikotylen Versuchspflanzen von *A. arvensis* im Vierblattstadium wurden mit einer maximalen Leistung des CO₂-Lasers von 0,5 kW und einem Spotdurchmesser von 1 mm, bei Applikationszeiten von 25, 50, 75 und 100 ms behandelt. In Abbildung 22 a- d ist der Anteil abgestorbener, nicht abgestorbener und wieder ausgetriebener Pflanzen bei unterschiedlichen Applikationszeiten dargestellt. Deutlich zu erkennen ist, dass sich das Mengenverhältnis von nicht abgestorbenen hin zu abgestorbenen Pflanzen mit zunehmender Applikationszeit ändert. Bei 25 ms sind lediglich 20 % der Versuchspflanzen soweit geschädigt worden, dass diese nach der Laserapplikation abgestorben sind. Wie sich nach vier Wochen Bonitur herausstellte war diese Schädigung allerdings nicht wirklich nachhaltig, so dass die Pflanzen

wieder austrieben. 80 % der Versuchspflanzen sind bei einer Applikationszeit von 25 ms nicht geschädigt worden.

Bei einer Applikationszeit von 50 oder 75 ms war der Behandlungserfolg schon wesentlich größer, richtige Fortschritte wurden allerdings erst bei 100 ms Applikationszeit gemacht, hierbei waren 80 % der Versuchspflanzen mit dem Zeitpunkt der Laserbehandlung abgestorben und trieben auch nicht erneut aus. Lediglich 20 % waren weiterhin vital.

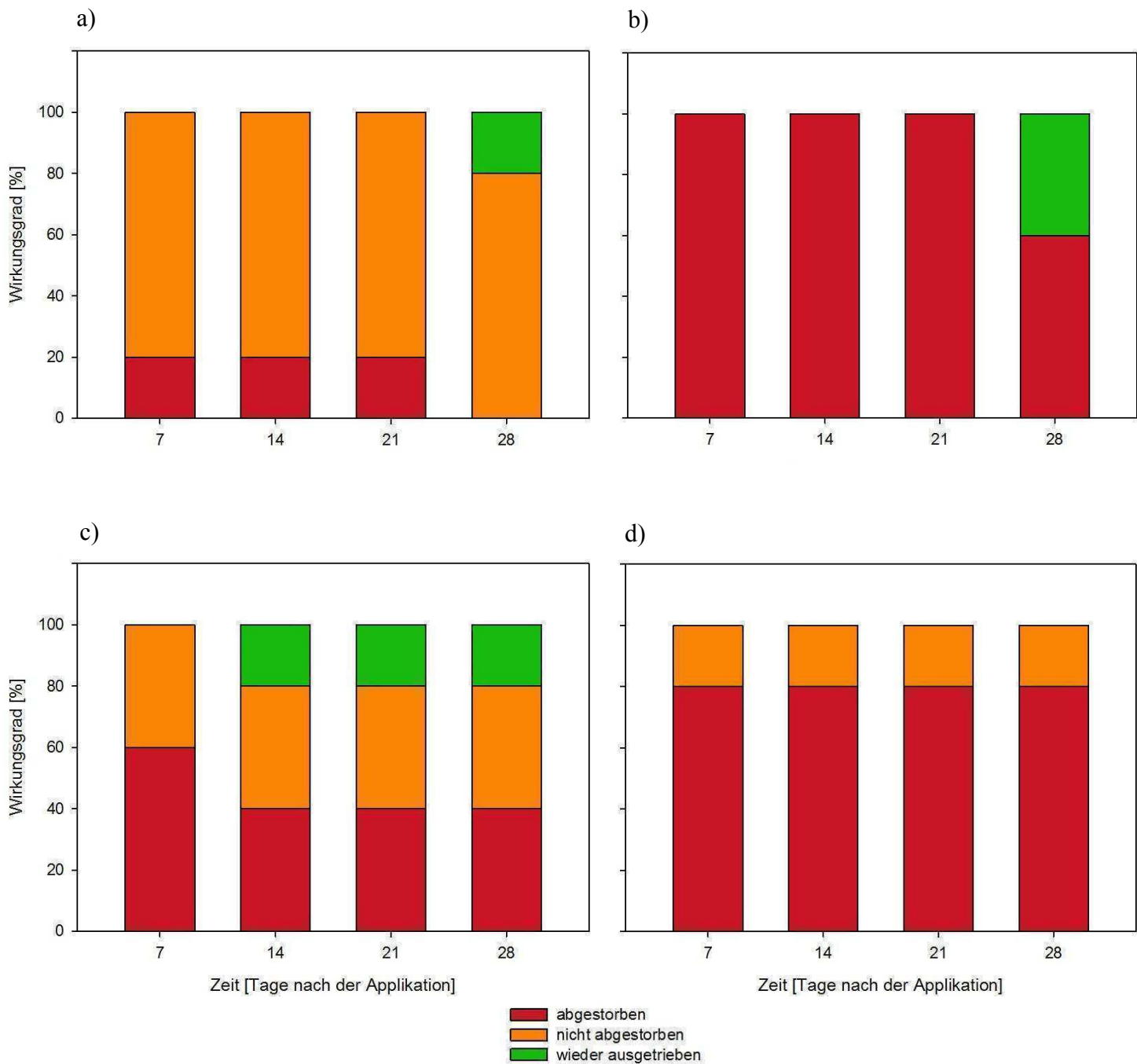


Abb. 22 a-d: Übersicht über den Bekämpfungserfolg dikotyler Pflanzen von *A. arvensis* im Vierblattstadium bei unterschiedlichen Applikationszeiten des CO₂-Lasers: a: 25, b: 50, c: 75 und d: 100 ms; Leistung 0,5 kW; Strahldurchmesser 2 mm

4.3.2.1.2 *Aleopecurus myosuroides*

Für die monokotylen Versuchspflanzen von *A. myosuroides* ergab sich ein ähnliches Bild bei der Variation der Applikationszeiten des CO₂-Lasers, wie bei *A. arvensis*, allerdings war der Gesamtbekämpfungserfolg um einiges geringer, als bei den dikotylen Pflanzen.

Bei einer Applikationszeit von 25 ms zeigte keine der dikotylen Pflanzen eine Veränderung in ihrer Vitalität, 100 % der Pflanzen sind nicht abgestorben. Bei 50 und 75 ms Applikationszeit sind immerhin 60 % der Versuchspflanzen nach der Laserapplikation abgestorben, allerdings waren es vier Wochen später nur noch 20 %, da ein großer Teil der geschädigten Pflanzen schon nach zwei bis drei Wochen erneut austrieb. Auch bei einer Applikationszeit von 100 ms war kein großer Bekämpfungserfolg zu verbuchen, lediglich 40 % der Pflanzen waren auch nach vier Wochen Bonitur noch dauerhaft geschädigt (Abb. 23 a- d).

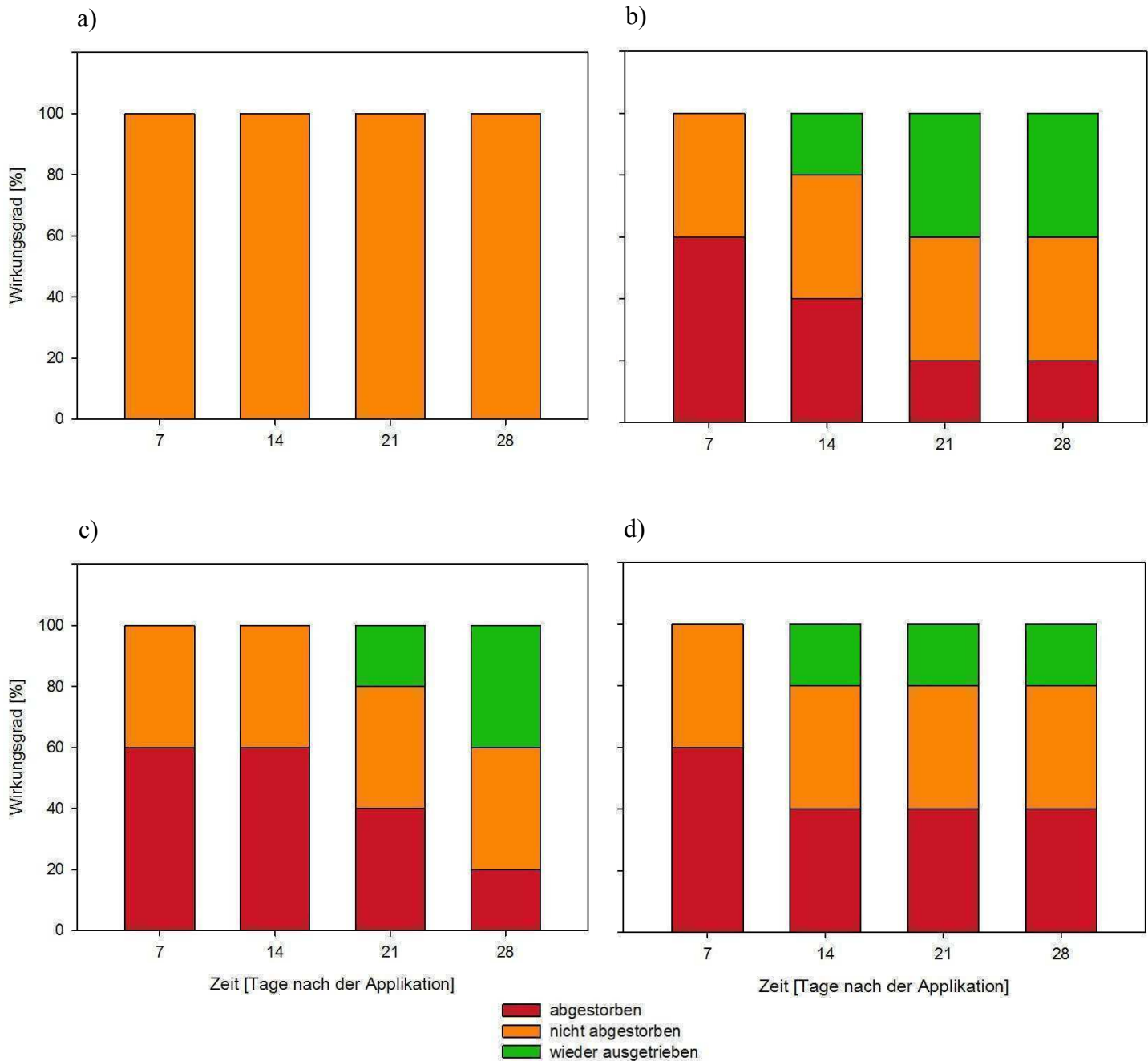


Abb. 23 a-d: Übersicht über den Bekämpfungserfolg monokotyler Pflanzen von *A. myosuroides* bei unterschiedlichen Applikationszeiten des CO₂-Lasers; 25, 50, 75 und 100 ms; Leistung 0,5 kW; Strahldurchmesser 2 mm

4.3.2.2 Faserlaser

Der Faserlaser arbeitete mit einer Leistung von 4 kW und einem Spotdurchmesser von 2 mm. Die Applikationszeiten entsprachen denen der vorherigen Versuche mit dem CO₂-Laser, 25, 50, 75 und 100 ms.

4.3.2.2.1 *Anthemis arvensis*

Die Ergebnisse für die unterschiedlichen Applikationszeiten beim Faserlaser für die monokotylen Versuchspflanzen entsprachen denen des CO₂-Lasers.

Bei einer Applikationszeit von 25 ms war kein nennenswerter Bekämpfungserfolg der Versuchspflanzen aufgetreten, lediglich 20 % der Pflanzen zeigten nach zwei Wochen Bonitur keine Vitalität. Ab 50 ms stieg der Bekämpfungserfolg stark an, nur ein kleiner Teil der Pflanzen trieb nach vier Wochen erneut aus. Bei 75 ms Applikationszeit waren 20 % der Pflanzen direkt nach der Laserbehandlung noch vital, bei 100 ms lag die Letalität über den kompletten Zeitraum der Bonitur bei 100 % (Abb. 24 a-d).

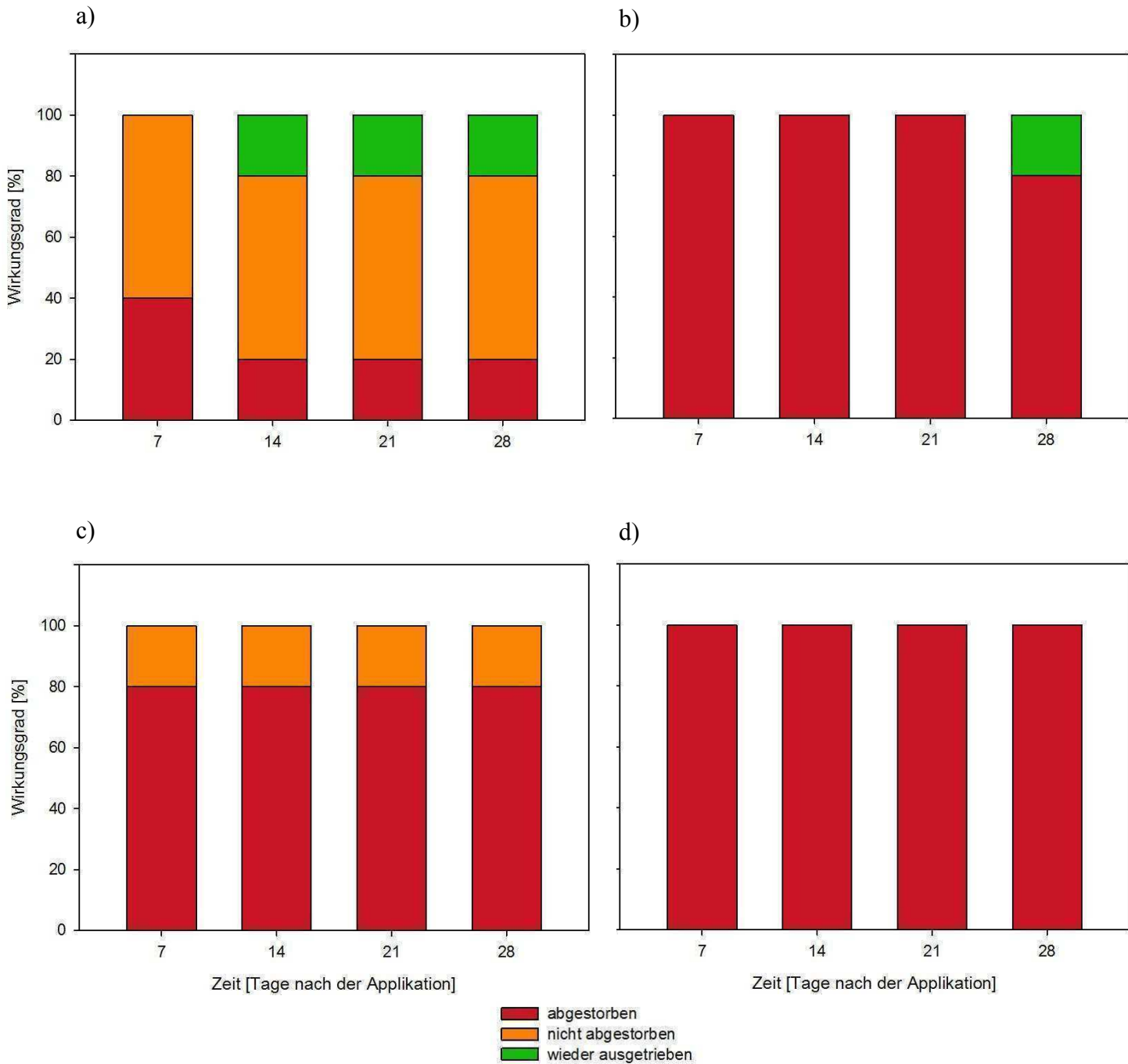


Abb. 24 a- d: Übersicht über den Bekämpfungserfolg dikotyler Pflanzen von *A. arvensis* bei unterschiedlichen Applikationszeiten des Faserlasers: 25, 50, 75 und 100 ms; Leistung 4 kW; Strahldurchmesser 2 mm

4.3.2.2.2 *Aleopecurus myosuroides*

Der Bekämpfungserfolg der monokotylen Versuchspflanzen bei unterschiedlichen Applikationszeiten des CO₂-Lasers war nicht befriedigend. Mit dem Faserlaser wurde eine äquivalente Versuchsreihe mit den entsprechenden Applikationszeiten durchgeführt, mit weitaus besseren Bekämpfungserfolgen.

Bei 25 ms war der Wirkungsgrad der Laserbehandlung noch relativ gering, mit lediglich 20 % letaler Pflanzen nach vier Wochen Bonitur, allerdings höher, als bei gleicher Applikationszeit des CO₂-Lasers. Bei 50 ms Applikationszeit waren direkt nach der Laserapplikation zwar 100 % der Versuchspflanzen abgestorben, allerdings trieben 60 % der Pflanzen schon nach einer Woche wieder aus. 75 ms Applikationszeit schränkten die Pflanzen schon so weit in ihrer Vitalität ein, dass nur noch 20 % der behandelten Pflanzen nach einer Woche im Gewächshaus erneut austrieben, bei 100 ms lag die Letalität auch nach vier Wochen noch bei 100 % (Abb. 25 a- d).

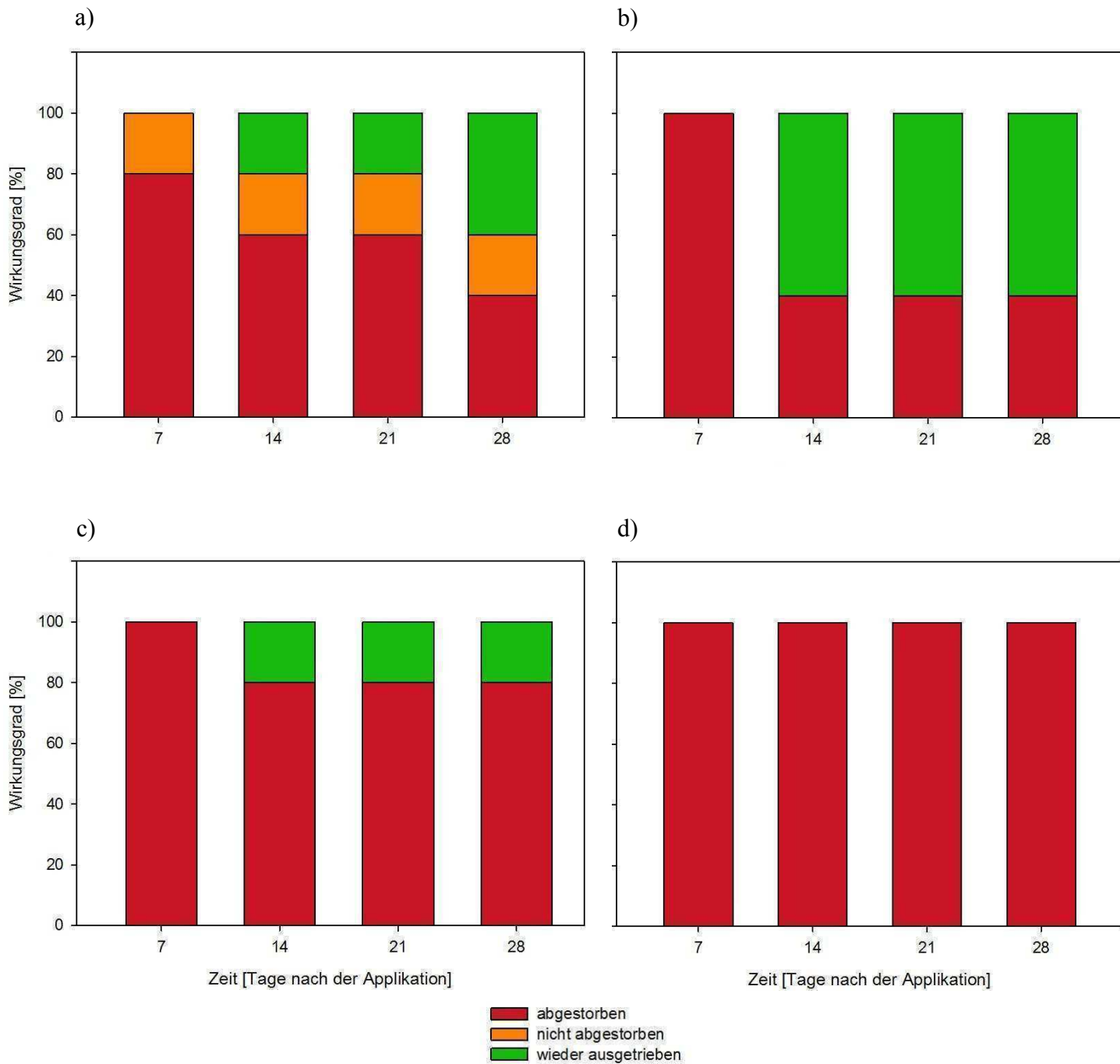


Abb. 25 a- d: Übersicht über den Bekämpfungserfolg monokotyler Pflanzen von *A. myosuroides* bei unterschiedlichen Applikationszeiten des Faserlasers: 25, 50, 75 und 100 ms; Leistung 4 kW, Strahldurchmesser 2 mm

4.3.3 Einfluss des Lasertyps in Zusammenhang mit der Wellenlänge

Bei den Untersuchungen die verschiedenen Applikationszeiten betreffend, kam der Gedanke auf, dass eventuell auch die unterschiedlichen Lasertypen einen Einfluss auf den Bekämpfungserfolg der Unkräuter haben könnten, da teilweise starke Abweichungen beim Wirkungsgrad auftraten.

Bei den dikotylen Versuchspflanzen von *A. arvensis* zeigten sich hierbei kleinere Unterschiede, bei einer Applikationszeit von 100 ms betrug der Wirkungsgrad des CO₂-Lasers 80 % der des Faserlasers 100 %.

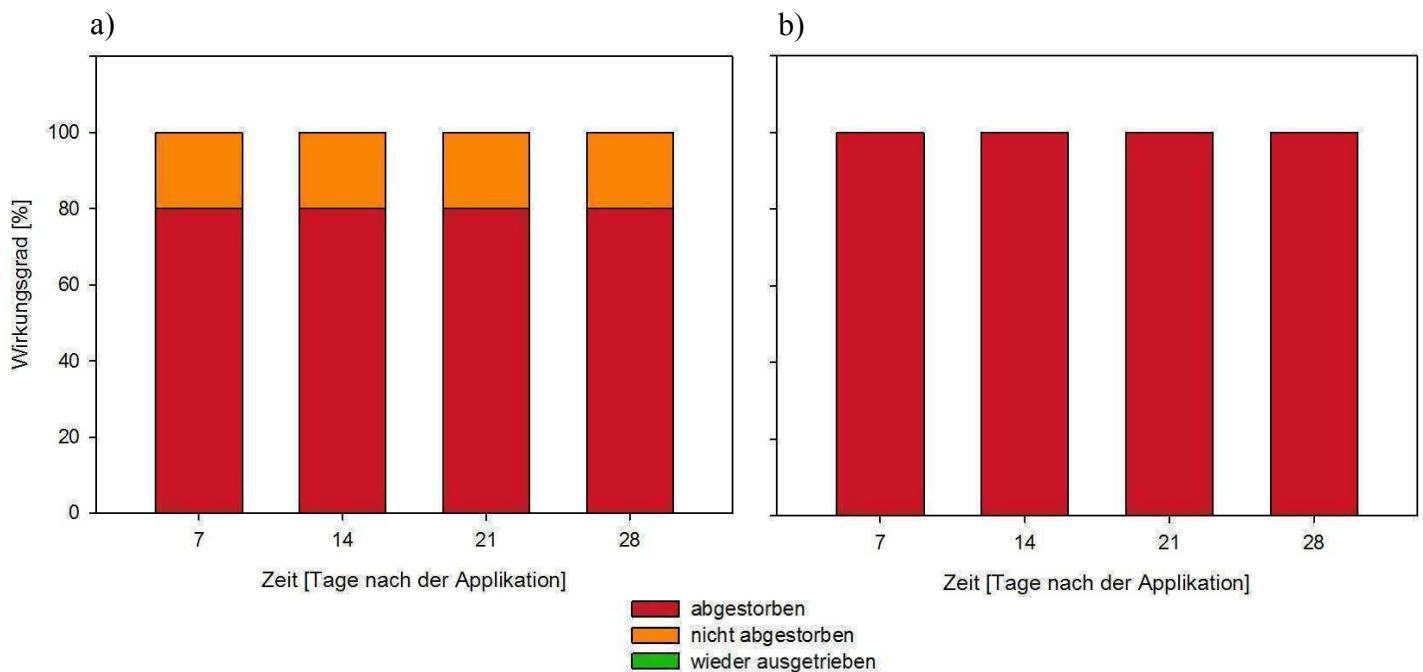


Abb. 26: Unterschiede zwischen dem Wirkungsgrad des CO₂-Lasers (a) und des Faserlasers (b) auf *A. arvensis* bei einer Applikationszeit von 100 ms, Angriffspunkt Stielbasis; Leistung 0,5 kW; Strahldurchmesser 2 mm

Deutlicher wurden die Unterschiede zwischen den Lasertypen bei den Versuchen mit den monokotylen Unkräutern. Bei einer Applikationszeit von 100 ms des CO₂-Lasers waren lediglich 40 % der behandelten Pflanzen auch nach zwei Wochen noch letal, die restlichen 60 % waren entweder auch nach der Laserapplikation noch vital oder trieben nach zwei Wochen schon erneut aus. Der Faserlaser hatte bei der selben Applikationszeit direkt nach der Laserapplikation, als auch vier Wochen später einen Wirkungsgrad von 100 %.

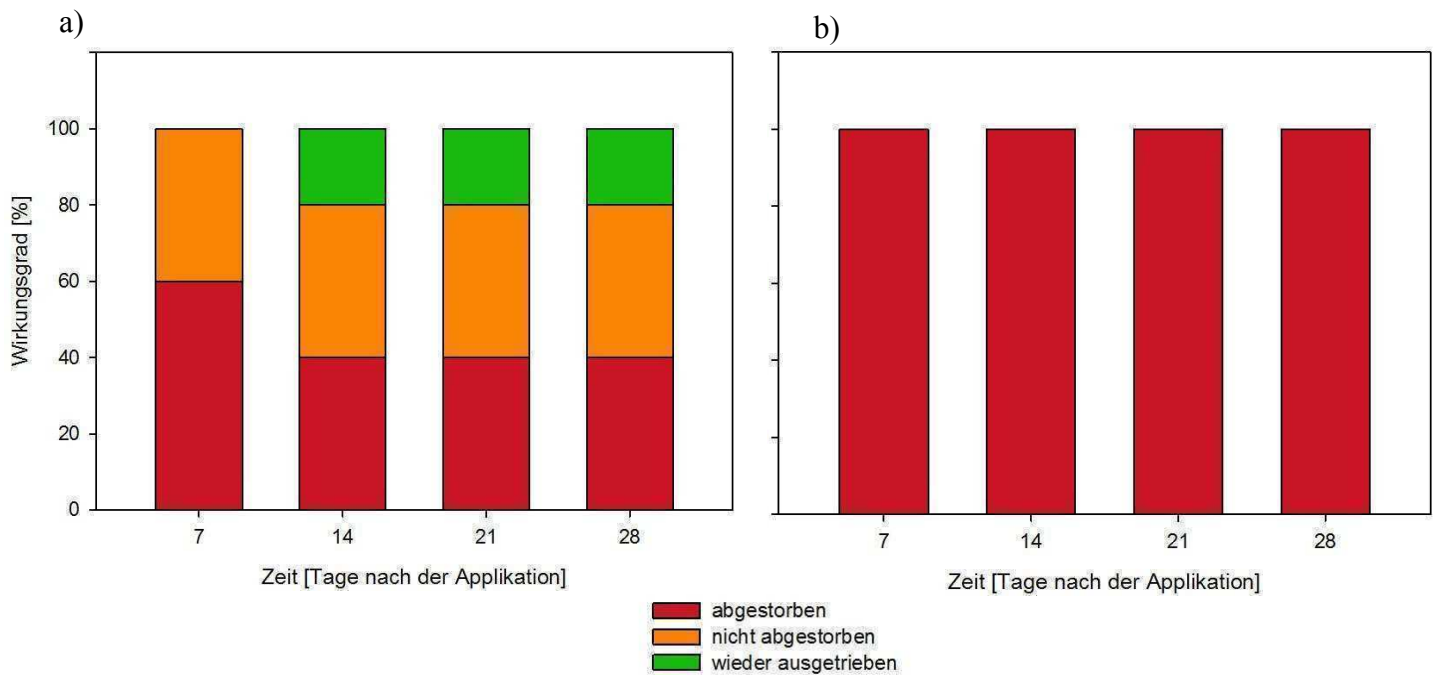


Abb. 27: Unterschiede zwischen dem Wirkungsgrad des CO₂-Lasers (a) und des Faserlasers (b) auf *A. myosuroides* bei einer Applikationszeit von 100 ms, Angriffspunkt Stielbasis; Leistung 0,5 kW; Strahldurchmesser 2 mm

4.3.3.1 Spektroskopie der Versuchspflanzen

Die Spektroskopie der monotylen und dikotylen Versuchspflanzen fand statt, um durch das Absorptions- und Reflexionsspektrum der beiden Unkräuter eventuell Rückschlüsse auf eine bessere Wirkung des CO₂- oder Faserlasers bei der Applikation geben zu können. Die Spektren für Absorption und Reflexion zeigten im sichtbaren Bereich zwischen 400 und 700 nm das typische Spektrum für ein Laubblatt. Die Reflexion ist im grünen bis gelben Bereich zwischen 450 und 600 nm am höchsten, hingegen liegt eine hohe Absorption im blauen (400- 450 nm) und roten (600- 700 nm) Bereich vor. Im Infrarotbereich ab 700 nm ist zwischen 750 und 1400 nm die Reflexion wesentlich höher als die Absorption. Dann steigt die Absorption zwischen 1440 und 1600 nm kurz an, fällt wieder ab und nimmt erst ab 1900 nm wieder stark zu. Die Spektren für dikotyle (Abb. 28 a) und monokotyle (Abb. 28 b) Pflanzen ergeben ein vergleichbares Bild. Allerdings ist der Unterscheid zwischen Reflexion und Absorption bei *A. myosuroides* minimal größer, als der bei *A. arvensis*.

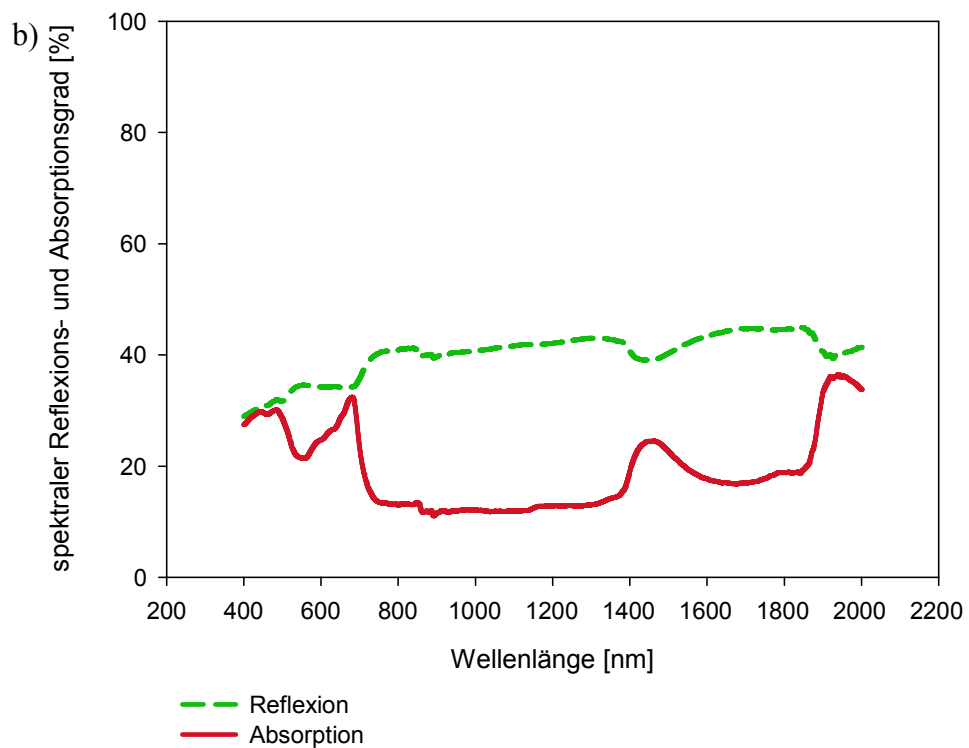
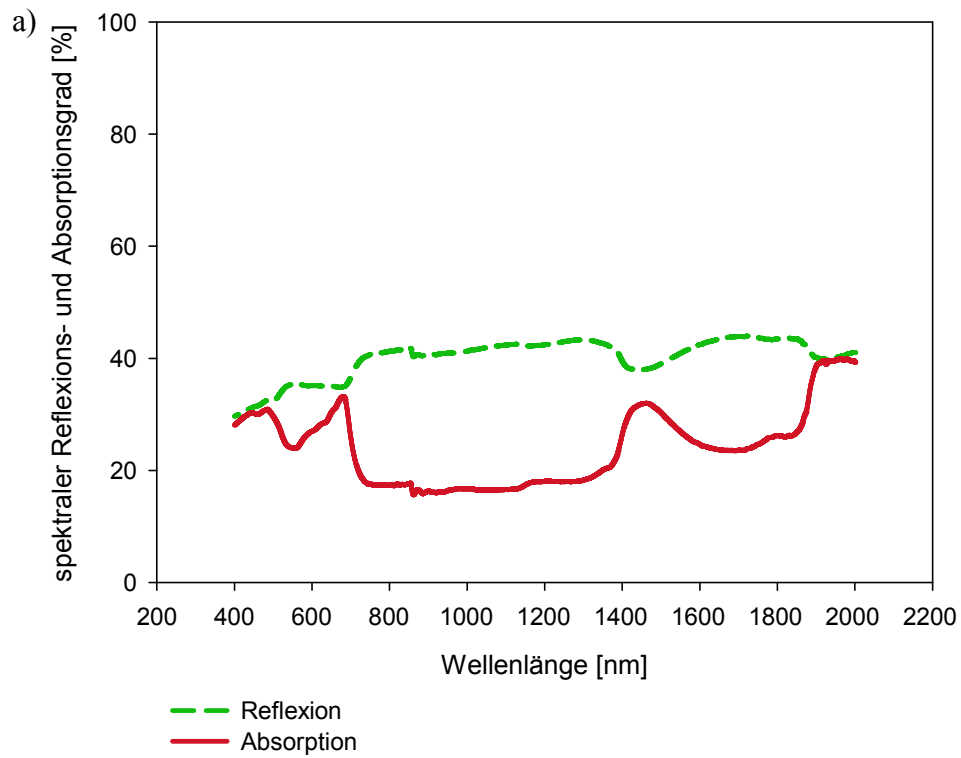


Abb. 28 a- b: spektrale Reflexion und spektrale Absorption (berechnet) der Keimblätter von *A. arvensis* (a) und *A. myosuroides* (b) im sichtbaren und IR-Bereich

4.3.4 Einfluss des Angriffspunktes

Ebenfalls wurde gleichzeitig mit dem Einfluss der Applikationszeit auf die Unkräuter auch der Einfluss des Angriffspunktes am Unkraut untersucht. In den Tastversuchen hatte sich dabei schon herausgestellt, dass eine einzelne Applikation auf ein Blatt der Pflanze nicht den selben Erfolg bringt, wie die Applikation auf das Wachstumszentrum. In weiterführenden Versuchen wurde anschließend untersucht, ob auch eine Applikation auf die Stielbasis eine gute Wirkung zeigte. Hierbei wurde noch unterschieden, ob auf die Stielbasis gerade von oben oder schräg von der Seite appliziert wurde. Im ersten Fall musste der Laser erst das über der Stielbasis liegende Pflanzengewebe durchdringen, der Fokus lag allerdings am Stängelansatz direkt über der Pflanze. Reststrahlung des Lasers konnte in Erde und Wurzel eindringen. Im zweiten Fall wurden die Pflanzen schräg zum Laser ausgerichtet, so dass dieser vorher kein anderes Pflanzengewebe durchdringen musste, der Fokus lag wiederum am Stängelansatz. Reststrahlung wurde nur vom dahinterliegenden Boden absorbiert.

Vergleicht man die beiden Angriffspunkte beim CO₂-Laser bei einer Applikationszeit von 100 ms auf *A. arvensis* (Vierblattstadium), scheinen kleine Unterschiede sichtbar zu werden, da der Wirkungsgrad bei der Laserapplikation senkrecht von oben höher liegt, als der bei der Applikation schräg von der Seite (Abb. 29). Allerdings konnten diese Unterschiede nicht bei jeder Applikationszeit festgestellt werden und auch bei der Applikation auf *A. myosuroides* (Vierblattstadium) waren keine markanten Unterschiede sichtbar.

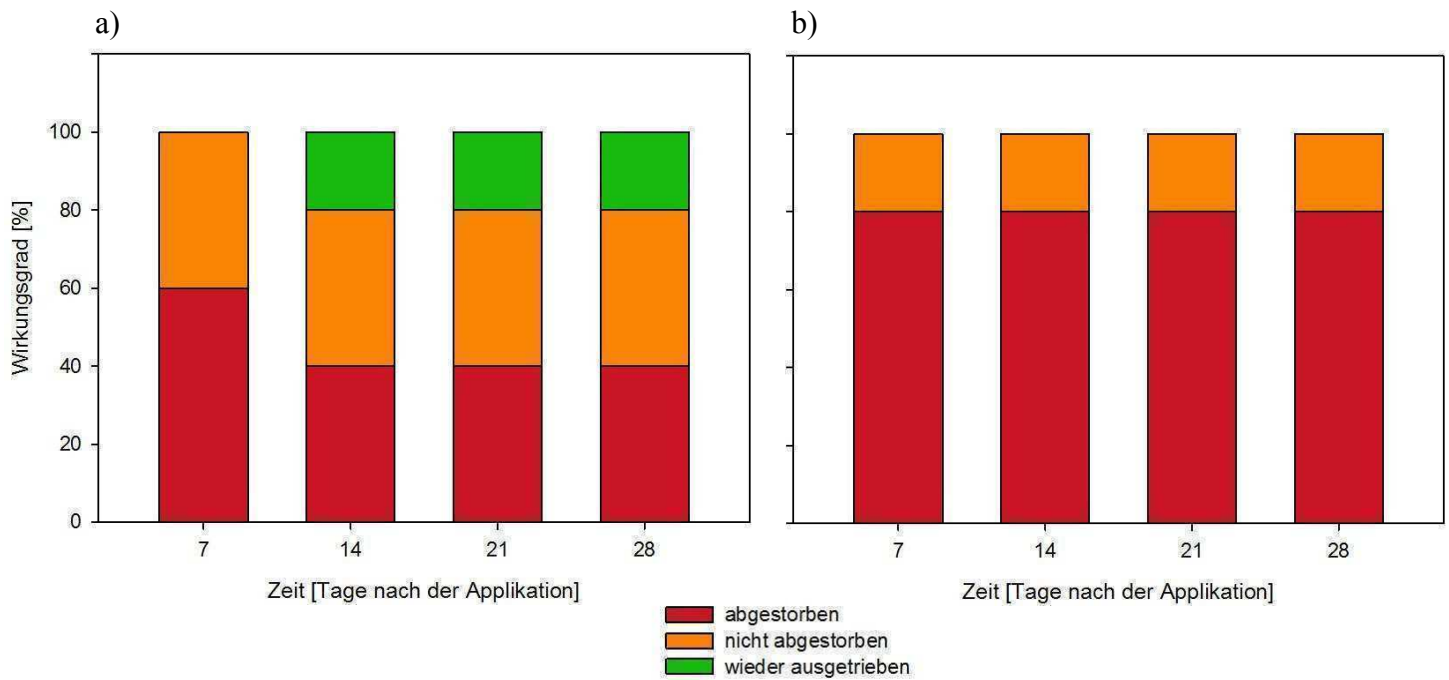


Abb. 29: Wirkungsgrad des CO₂-Lasers bei unterschiedlichen Angriffspunkten: schräg (a) und senkrecht (b) von oben auf *A. arvensis*; Vierblattstadium; Applikationszeit 100 ms, Leistung 0,5 kW, Spotdurchmesser 2 mm

Bei der Untersuchung der unterschiedlichen Angriffspunkte mit dem Faserlaser ließen sich keine Unterschiede feststellen. Vergleicht man den Wirkungsgrad der beiden Versuchsvarianten bei einer Applikationszeit von 100 ms liegt dieser in beiden Fällen auch nach vier Wochen bei 100 %.

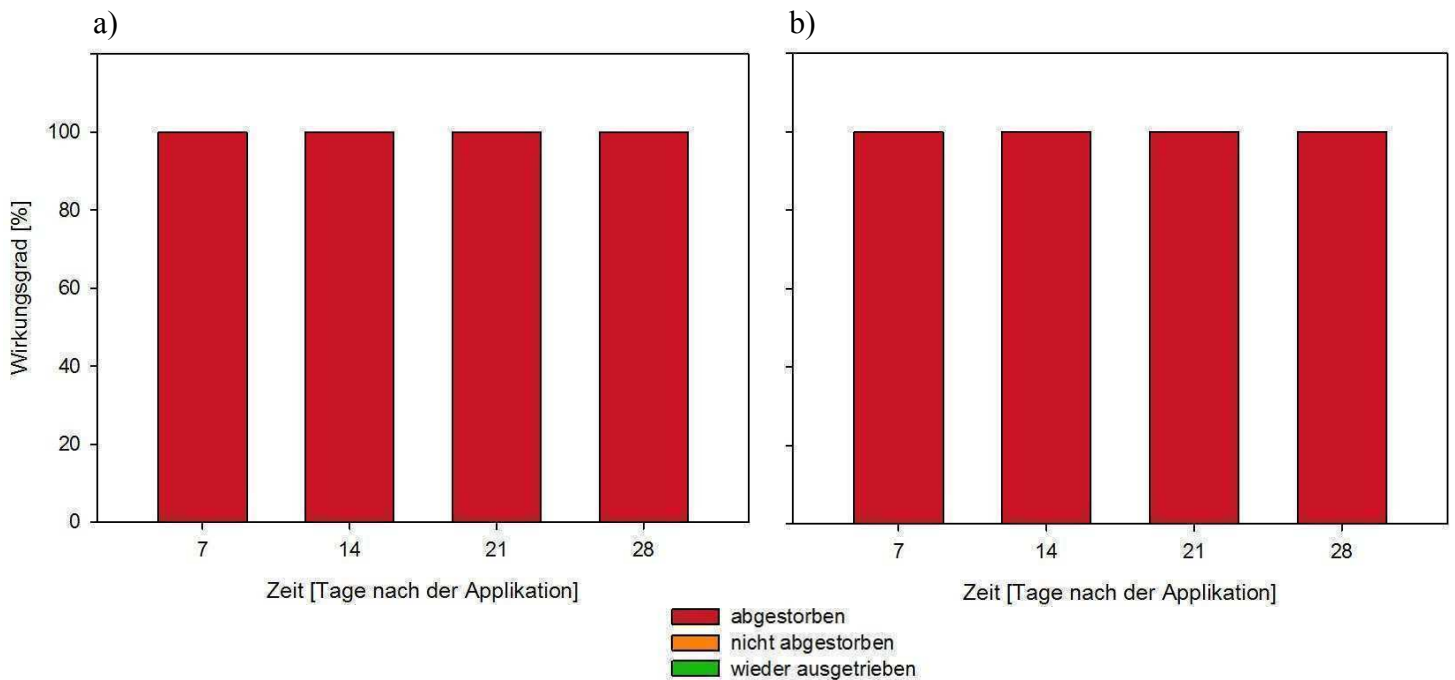


Abb. 30: Wirkungsgrad des Faserlasers bei unterschiedlichen Angriffspunkten: schräg (a) und senkrecht (b) von oben auf *A. arvensis*; Vierblattstadium; Applikationszeit 100 ms, Leistung 4 kW, Spotdurchmesser 1 mm

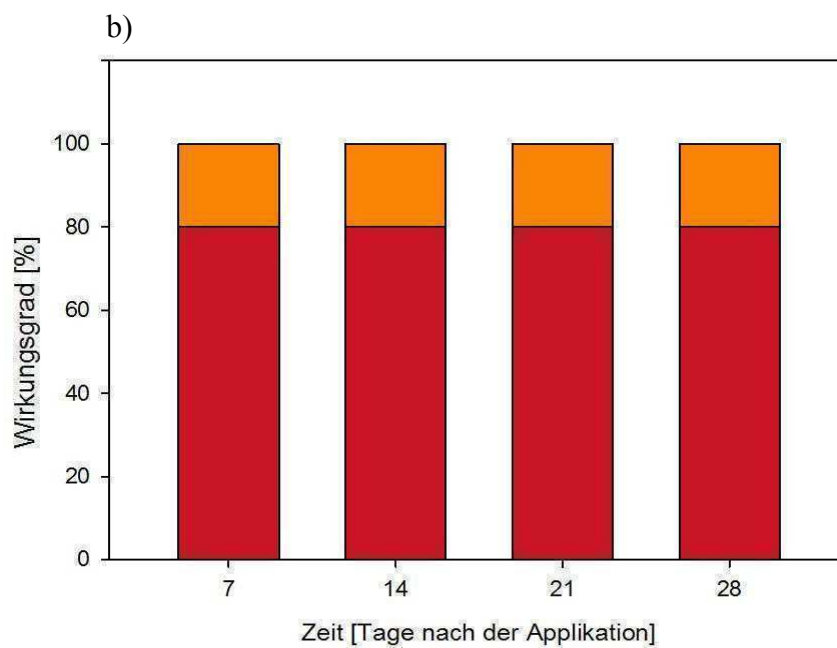
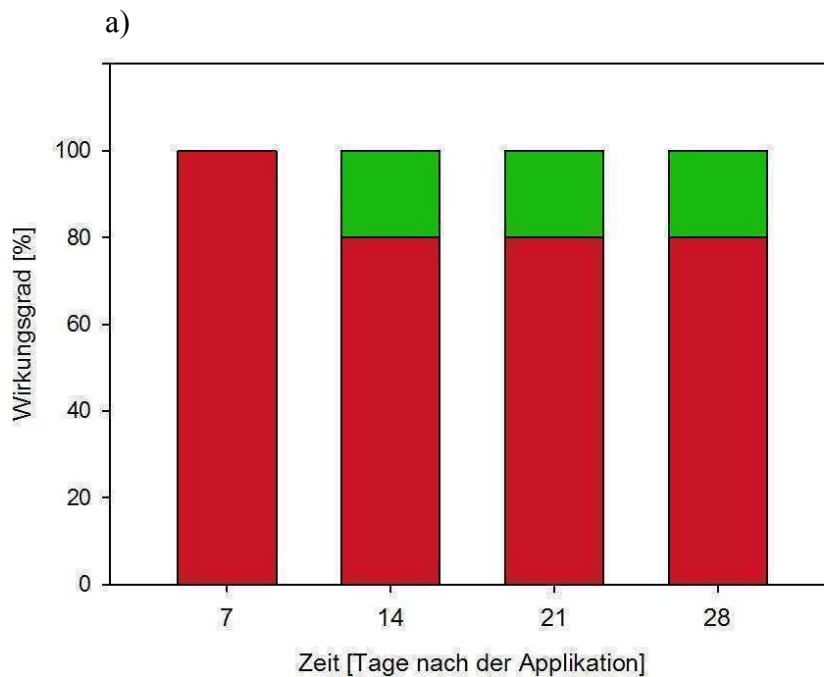
4.3.5 Einfluss des Wachstumsstadiums

Neben den vorher besprochenen technischen Parametern, sind auch die biologischen Versuchsparameter, wie das Wachstumsstadium, ein nicht zu vernachlässigender Faktor. Einsatz von Leistung und Applikationszeit müssen an die Pflanzengröße angepasst werden. Genauso kann der Spotdurchmesser verändert werden, um eine höhere Letalitätsrate zu erreichen. Um die unterschiedlichen Wachstumsstadien Drei-, Vier- und Sechsstadium miteinander vergleichen zu können, wurden alle mit konstanter Leistung des CO₂- bzw. Faserlasers und gleichbleibender Applikationszeit von 100 ms behandelt. Lediglich der Spotdurchmesser wurde bei den Versuchspflanzen im Sechsstadium auf 5 mm heraufgesetzt, um eine ausreichende Anzahl Pflanzengewebe schädigen zu können.

Beispielhaft für alle Versuchsreihen sind in den folgenden Abbildungen die Versuchsergebnisse für die dikotylen Pflanzen in unterschiedlichen Wachstumsstadien und nach der Behandlung mit dem CO₂- und dem Faserlaser dargestellt. Die Versuchsergebnisse für die monokotylen Versuchspflanzen entsprachen im Verhältnis denen der Dikotyledonen.

Die folgende Abbildung 31 a- c zeigt den Wirkungsgrad des CO₂-Lasers auf die unterschiedlichen Wachstumsstadien bei einer Applikationszeit von 100 ms. Deutlich ist zu

sehen, dass der Wirkungsgrad der Laserapplikation bei Pflanzen im Drei- und Vierblattstadium bei 80 % liegt. Bei Unkräutern im Sechsstadium liegt der Wirkungsgrad direkt nach der Laserapplikation ebenfalls bei 80 %, nimmt aber nach einer Woche rapide ab, da ein Großteil der Versuchspflanzen (60 %) erneut ausgetrieben ist, trotz einer Erhöhung der Trefferfläche durch einen Spottedurchmesser von 5 mm.



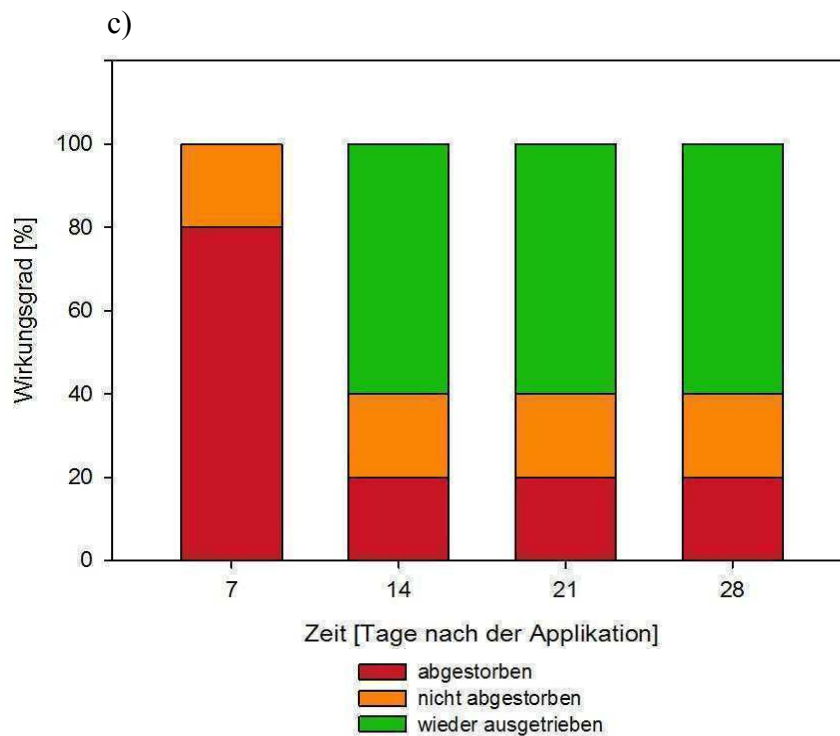
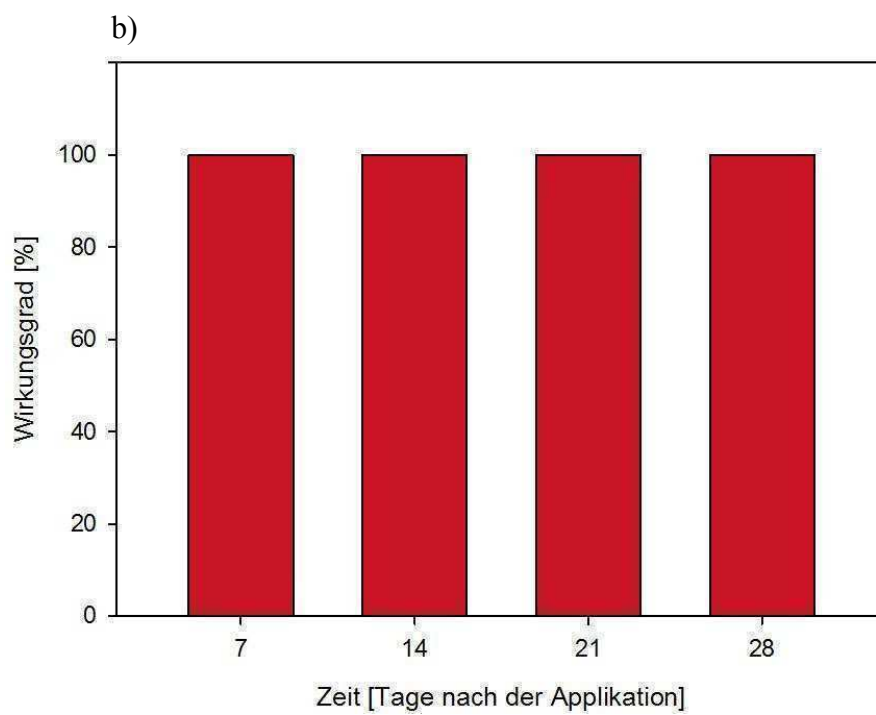
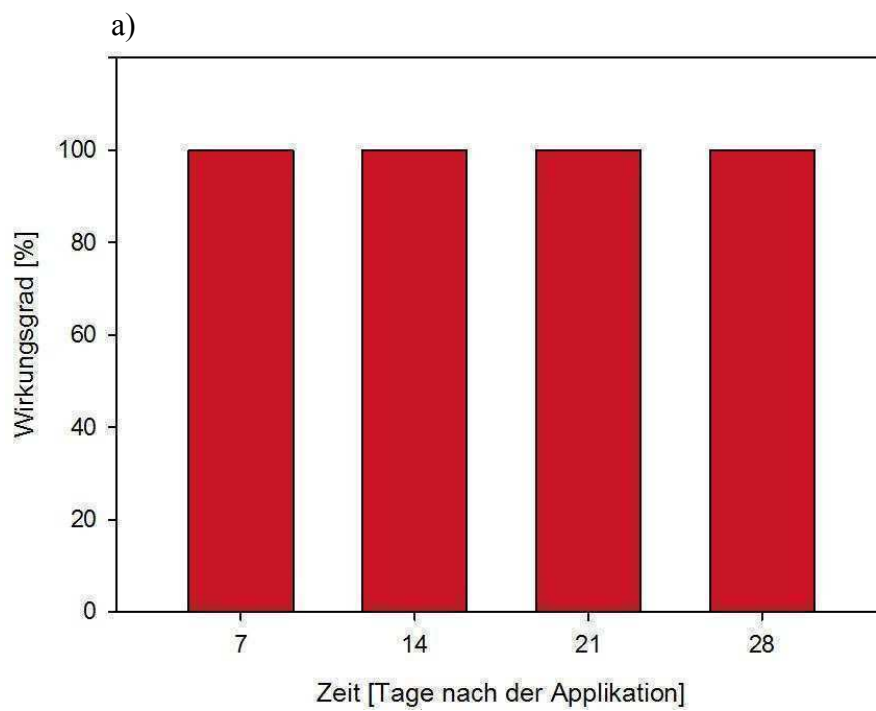


Abb. 31 a- c: Vergleich des Wirkungsgrades des CO₂-Lasers bei unterschiedlichen Wachstumsstadien von *A. arvensis* (Drei- (a), Vier- (b) und Sechsstadium (c)); Leistung 0,5 kW, Applikationszeit 100 ms, Spotdurchmesser 1, 2 und 5 mm, Angriffspunkt Stielbasis

In den Versuchsreihen zur Wirkungsweise des Faserlasers auf die unterschiedlichen Entwicklungsstadien der Unkräuter schnitt dieser zwar besser ab, aber auch hier war eine deutliche Tendenz zu sehen, in welchem Wachstumsstadium sich eine Bekämpfung mittels Laser erfolgreich durchführen lässt.

Im Drei- und Vierblattstadium liegt die Letalität der Versuchspflanzen bei 100 %. Im Sechsstadium werden zwar durch die Laserapplikation auch vorerst alle Versuchspflanzen abgetötet, aber schon nach einer Woche ist ein Wiederaustrieb von 60 % der Unkräuter zu verzeichnen.



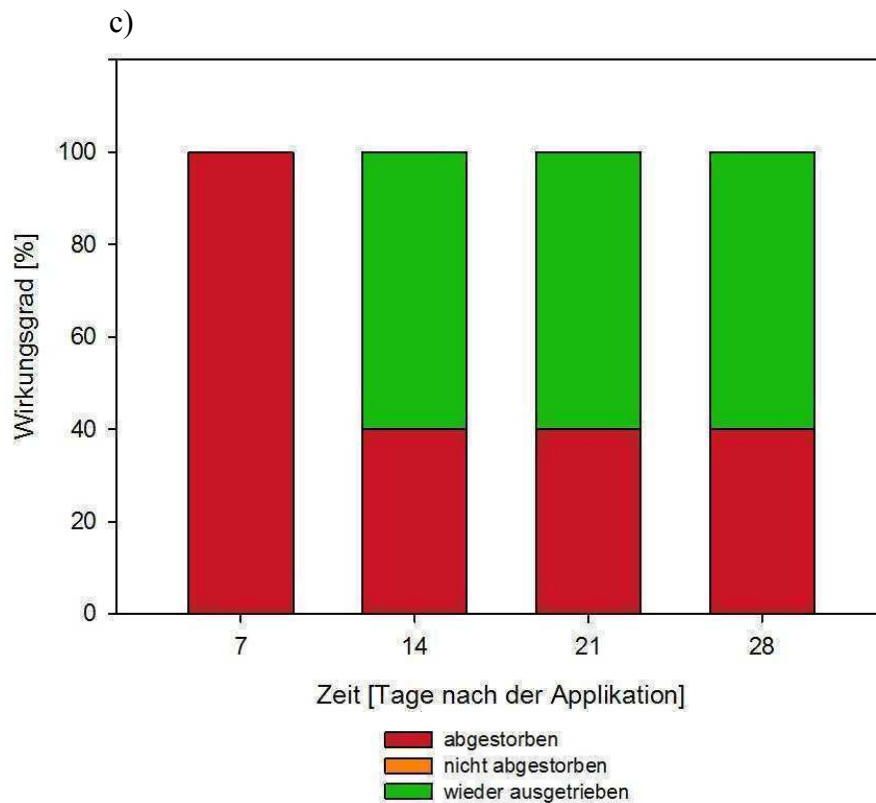


Abb. 32 a- c: Vergleich des Wirkungsgrades des Faserlasers bei unterschiedlichen Wachstumsstadien von *A. arvensis* (Drei- (a), Vier- (b) und Sechsstadium (c)); Leistung 0,5 kW, Applikationszeit 100 ms, Spotdurchmesser 1, 2 und 5 mm, Angriffspunkt Stielbasis

4.4 Frischmasseentwicklung nach der Laserapplikation

Um die Anzahl der abgestorbenen Pflanzen im Gegensatz zu sich normal entwickelnden Unkräutern näher beziffern zu können, wurde in einer letzten Versuchsreihe die Frischmasseentwicklung behandelter Pflanzen mit denen der Kontrollpflanzen verglichen. Hierzu wurden dikotyle und monokotyle Versuchspflanzen im Keim- und Vierblattstadium bei konstanter Leistung, Applikationszeit und Spotdurchmesser der Laserapplikation unterzogen. Ausgewählt wurden diejenigen Parameter, die in den vorhergegangenen Versuchen die besten Ergebnisse hinsichtlich des Wirkungsgrades erzielt hatten.

4.4.1 *Anthemis arvensis*

4.4.1.1 Keimblattstadium: Vergleich von Faser- und CO₂-Laser

Die Keimpflanzen von *A. arvensis* wurden mit dem CO₂-Laser bei einer Leistung von 0,5 kW, einer Applikationszeit von 25 ms und einem Spotdurchmesser von 1 mm behandelt. Bei den Versuchen mit dem Faserlaser waren Applikationszeit und Spotdurchmesser identisch zu den Versuchen mit dem CO₂-Laser, lediglich die Leistung war wesentlich höher mit 4 kW. Bis zu vier Wochen nach der Laserapplikation fanden Messungen der Frischmasse anhand einer Waage statt. Diese zeigten deutliche Unterschiede zwischen den Kontrollpflanzen, den CO₂-Laser behandelten Pflanzen und den Faserlaser behandelten Pflanzen (Abb. 33). Während die Kontrollpflanzen ein stark ansteigendes Wachstum, vor allem ab der dritten Woche im Gewächshaus, aufwiesen, stieg das Wachstum der Pflanzen, die mit dem CO₂-Laser behandelt wurden, nur mäßig an. Die Unkräuter, die mittels Faserlaser behandelt worden waren zeigten nur sehr geringe Frischmassezunahme, unter 1 g, auf.

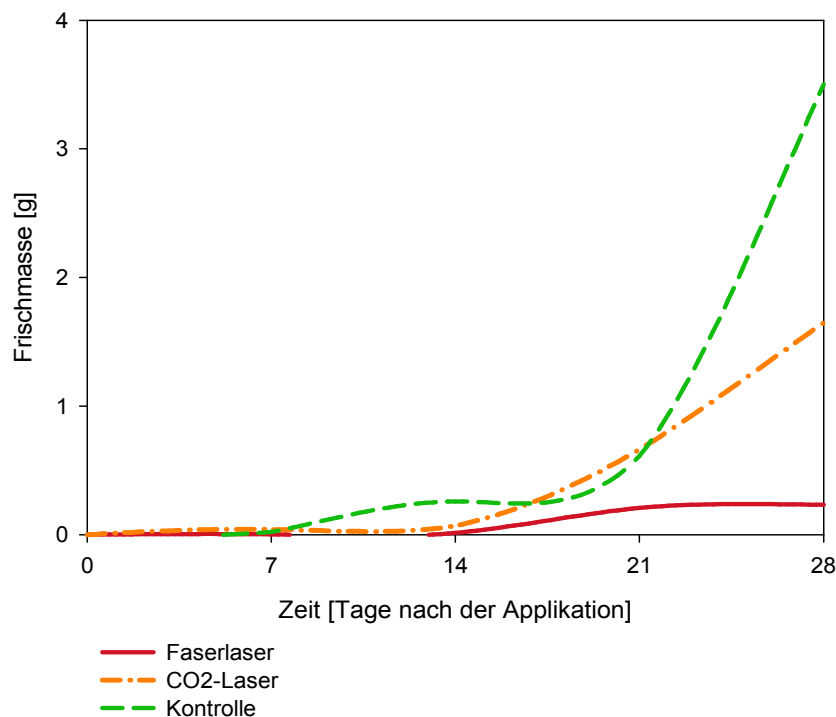


Abb. 33: Vergleich der Frischmasseentwicklung von *A. arvensis* im Keimblattstadium zwischen Kontrollpflanzen, CO₂-Laser (0,5 kW) behandelt oder Faserlaser (4 kW) behandelt bis zu vier Wochen nach der Laserapplikation; Applikationszeit 10 ms; Strahldurchmesser 1 mm

4.4.1.2 Vierblattstadium: Vergleich von Faser- und CO₂-Laser

Für die dikotylen Pflanzen im Vierblattstadium blieb die Leistung der beiden Laser gleich (0,5 und 4 kW), aber die Applikationszeit wurde auf 50 ms heraufgesetzt, der Spotdurchmesser auf 2 mm.

Auch hier zeigten die behandelten Pflanzen eine deutlich geringere Frischmassezunahme, als die Kontrollpflanzen. Während diese nach vier Wochen ein durchschnittliches Gewicht von über 8 g erreichten, lag das Gewicht der Pflanzen, die mit dem CO₂-Lase behandelt wurden bei unter 4 g, das der Pflanzen nach der Behandlung mit dem Faserlaser sogar bei unter 2 g (Abb. 34).

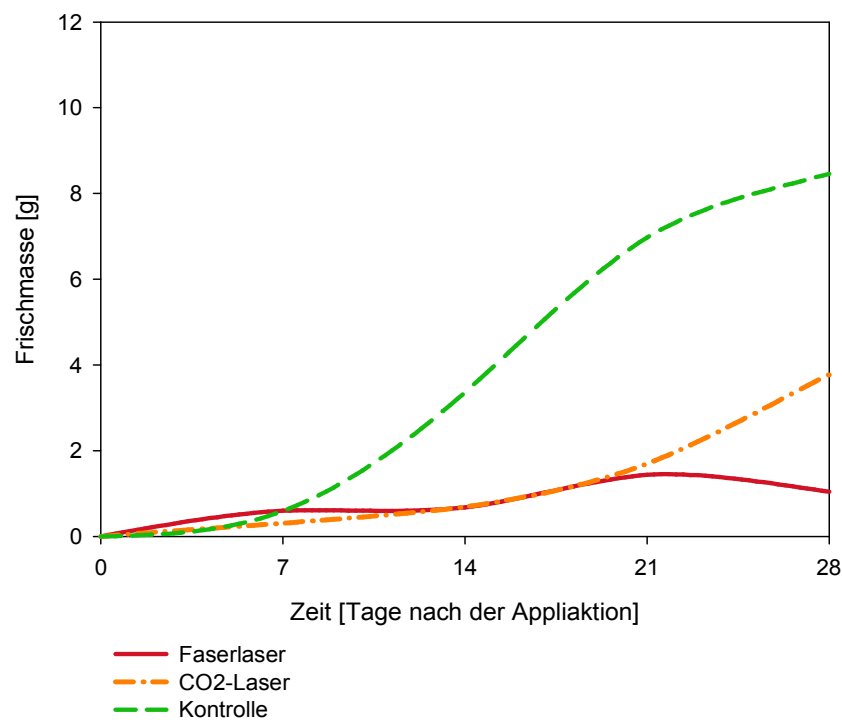


Abb. 34: Vergleich der Frischmasseentwicklung von *A. arvensis* im Vierblattstadium zwischen Kontrollpflanzen, CO₂-Laser (0,5 kW) oder Faserlaser (4 kW) behandelt bis zu vier Wochen nach der Laserapplikation; Applikationszeit 50 ms; Strahldurchmesser 2 mm

4.4.2 *Aleopecurus myosuroides*

4.4.2.1 Keimblattstadium: Vergleich von Faser- und CO₂-Laser

Die Bestimmung der Frischmasseentwicklung der monokotylen Versuchspflanzen erfolgte auf dem gleichen Weg, wie die der dikotylen Pflanzen. Die Leistung lag wiederum bei 0,5 bzw. 4 kW, die Applikationszeit bei 25 ms und der Spotdurchmesser bei 1 mm.

Es zeigte sich ein ähnliches Bild wie schon zuvor. Die Kontrollpflanzen nehmen nach zwei Wochen im Gewächshaus schnell an Masse zu, die behandelten Versuchspflanzen bleiben stark dahinter zurück. Die Pflanzen, die mit dem Faserlaser behandelt wurden, hatten einen Massezuwachs von fast 0 g in vier Wochen.

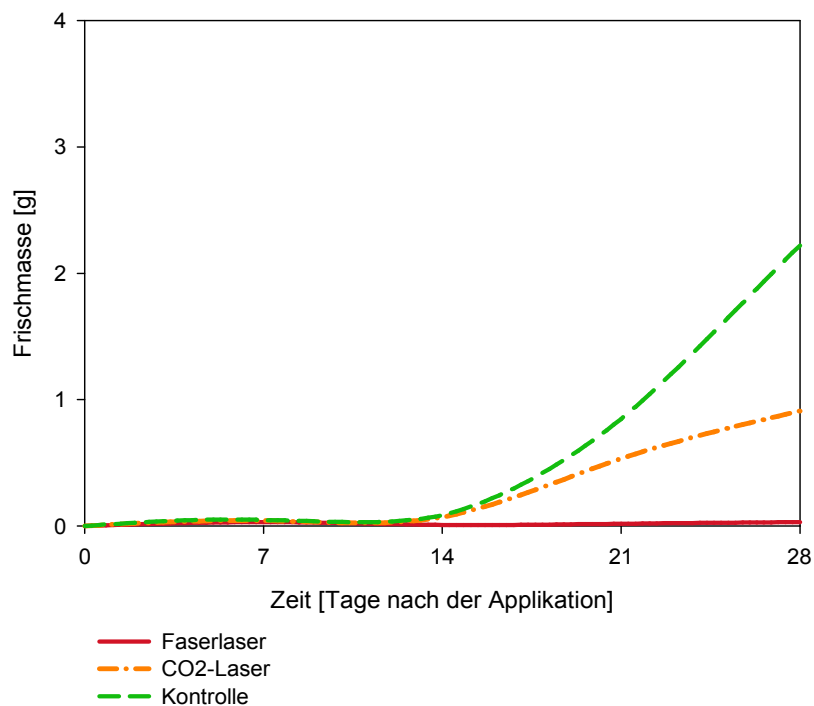


Abb. 35: Vergleich der Frischmasseentwicklung von *A. myosuroides* im Keimblattstadium zwischen Kontrollpflanzen, CO₂-Laser (0,5 kW) behandelt oder Faserlaser (4 kW) behandelt bis zu vier Wochen nach der Laserapplikation; Applikationszeit 10 ms; Strahldurchmesser 1 mm

4.4.2.2 Vierblattstadium: Vergleich von Faser- und CO₂-Laser

Die monokotylen Pflanzen im Vierblattstadium wurden ebenfalls äquivalent zu den dikotylen Pflanzen im Vierblattstadium behandelt, Leistung 0,5 bzw. 4 kW, Applikationszeit 50 ms und Spotdurchmesser 2 mm.

In Abbildung 36 zeigt sich ein noch deutlicherer Unterschied zwischen den monokotylen Kontrollpflanzen und den behandelten Pflanzen. Während die Kontrollpflanzen nach zwei Wochen in ihrer Frischmassezunahme steil anstiegen, auf über 10 g, schafften die behandelten Pflanzen gerade 2 g, oder blieben, wie nach der Behandlung mit dem CO₂-Laser sogar unter 1 g Frischmasse.

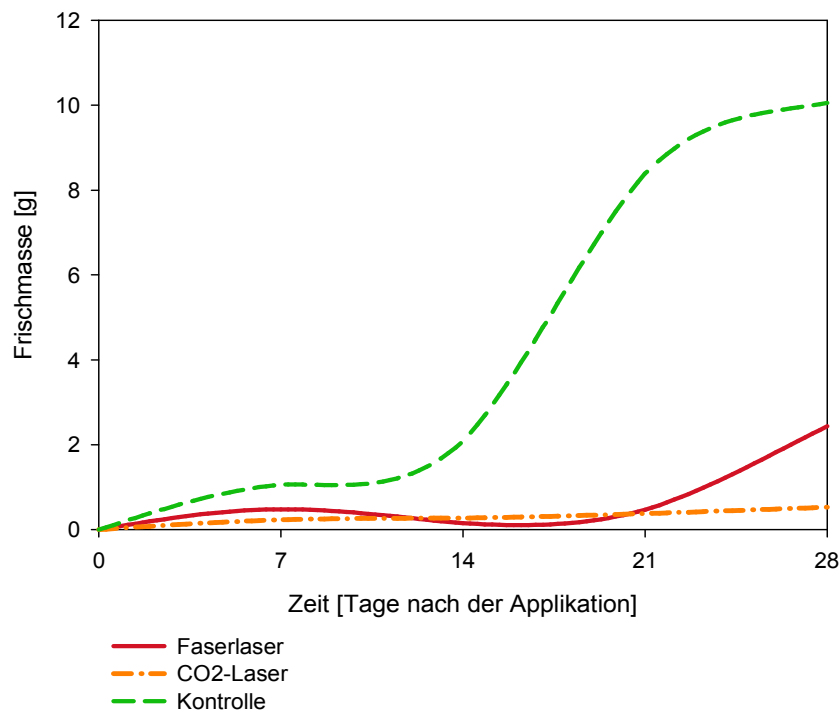


Abb. 36: Vergleich der Frischmasseentwicklung von *A. myosuroides* im Vierblattstadium zwischen Kontrollpflanzen, CO₂-Laser (0,5 kW) behandelt oder Faserlaser (4 kW) behandelt bis zu vier Wochen nach der Laserapplikation; Applikationszeit 50 ms; Strahldurchmesser 2 mm

4.5 Veränderungen des Pflanzengewebes durch die Laserbehandlung

Um zu verstehen, warum durch die Laserbehandlung ein großer Anteil von Versuchspflanzen abstirbt, und diese in Ihrer Frischmasse nicht so zunehmen, wie es sich bei den unbehandelten Pflanzen zeigte, wurden die Veränderungen des Pflanzengewebes auf verschiedene Weise untersucht. Zum einen wurden diese Veränderungen makroskopisch erfasst und mit Hilfe einer Digitalkamera festgehalten, zum anderen wurden behandelte Pflanzenteile unter einem Lichtmikroskop und einem Rasterelektronenmikroskop untersucht. Die mikroskopischen Untersuchungen ließen Rückschlüsse darauf zu, was mit den einzelnen

Zellen des Pflanzengewebes durch Applikation von Laserstrahlen passiert. Desweiteren wurden Aufnahmen mit einer High-Speed-Kamera und einer Thermokamera im Moment der Laserapplikation durchgeführt. Erstere sollten dazu dienen, den Habitus der Versuchspflanze direkt vor und unmittelbar nach der Laserapplikation zu bewerten, letztere, um eine Beurteilung der Wärmeverteilung in der Pflanze zu ermöglichen.

4.5.1 Makroskopische Veränderungen

Makroskopische Veränderungen an den Versuchspflanzen konnten sehr leicht, schon während der Bonitur, festgestellt werden. In Abbildung 37 a- c sind Pflanzen aus unterschiedlichen Versuchsreihen während der Bonitur im Gewächshaus dargestellt, a) Dreiblattstadium, b) Vierblattstadium und c) Sechsbblattstadium. In allen drei Fällen sind die erfolgreich behandelten Versuchspflanzen deutlich von den noch vitalen Pflanzen zu unterscheiden. Während im ersten Bild die erfolgreich behandelten Pflanzen kaum noch als solche in den Anzuchttopfen zu erkennen sind, sind im mittleren Bild noch Überreste dieser Pflanzen hellbraun erkennbar. In Bild c sind vitale, grüne Pflanzen und abgetrocknete, braune Pflanzenreste gut von einander zu differenzieren.

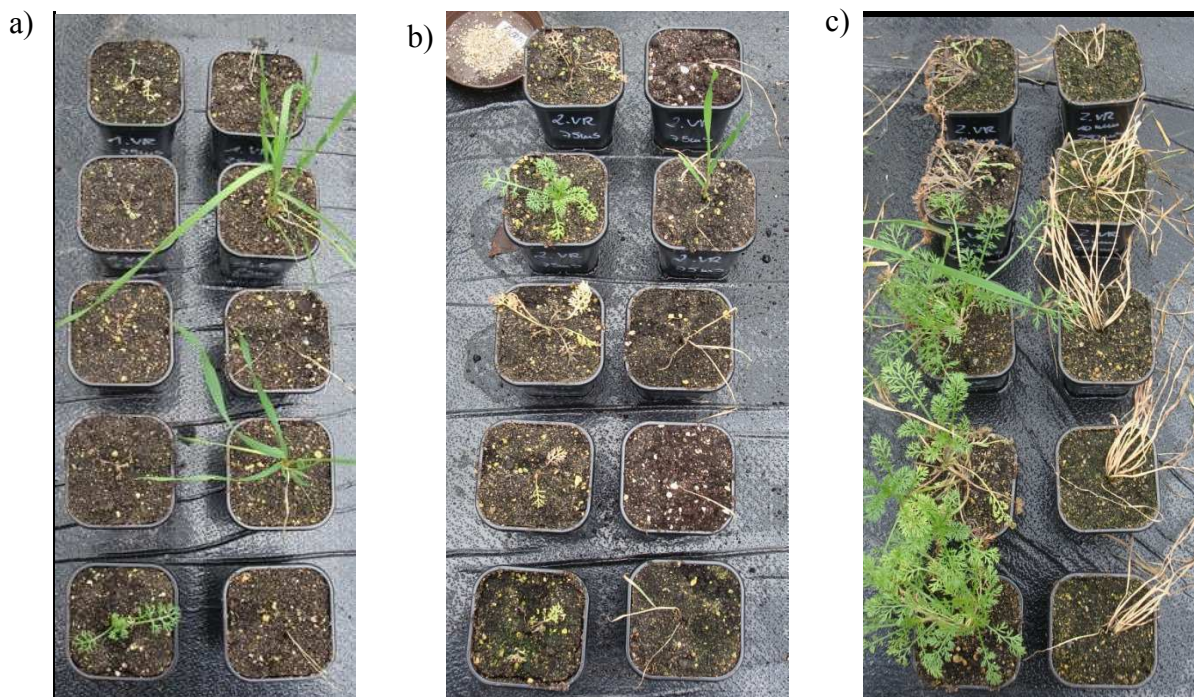


Abb. 37 a- c: Unterschiede zwischen abgestorbenen und vitalen Pflanzen (*A. arvensis* und *A. myosuroides*) nach der Laserbehandlung;
a: Dreiblattstadium, b: Vierblattstadium, c: Sechsbblattstadium

4.5.2 Mikroskopische Veränderungen

Durch die mikroskopischen Untersuchungen wurde anschließend untersucht, ob der Zustand der Pflanzenoberfläche und einzelnen Zellen Aufschluss darüber gibt, warum die erfolgreich behandelten Pflanzen austrocknen. Das Lichtmikroskop arbeitete hier mehr auf Ebene der Pflanzenoberfläche und des kompletten Zellverbandes, während hingegen das Rasterelektronenmikroskop Aufschluss über den Zustand der Einzelzellen geben konnte. Hier spielten auch die Versuche aus Hannover eine Rolle, da ein breites Spektrum dikotyler und monokotyler Pflanzen verglichen werden konnte.

4.5.2.1 Stereolichtmikroskopische Aufnahmen

Mit dem Lichtmikroskop (LM) war es möglich die Schädigung an der Pflanzen- bzw. Blattoberfläche durch den Laser zu beobachten. Dort wo der Laser seinen Angriffspunkt hatte, veränderte das Pflanzengewebe seine Farbe von einem vitalen grün hin zu einem graubraun. Diese Beobachtung ließ sich sowohl für behandelte dikotyle als auch monokotyle Pflanzen machen (Abb. 38)



Abb. 38: Geschädigte Blattoberfläche durch Laserapplikation von *Amaranthus retroflexus*

Bei monokotylen Pflanzen trat gleichzeitig noch die Beobachtung auf, dass sich das behandelte Blatt schnell an der getroffenen Stelle zusammenzog und krümmte, ähnlich geschmolzenem Kunststoff (Abb. 39).



Abb. 39: Geschädigte Blattoberfläche durch Laserapplikation von *Poa annua*

4.5.2.2 Rasterelektronenmikroskopische Aufnahmen

Anhand der Aufnahmen des Rasterelektronenmikroskops (REM) konnten schließlich konkrete Hinweise dafür gefunden werden, was mit den Pflanzenzellen durch die Laserapplikation passiert, und wie sich das auf das gesamte betroffene Pflanzengewebe auswirkt.

Unter dem REM sind deutliche Abgrenzungen zwischen gesundem Gewebe (Abb. 40 rechte Bildhälfte) und behandeltem Gewebe (Abb. 40 linke Bildhälfte) zu erkennen. Während die gesunden Zellen der dikotylen Pflanze *Galium aparine* wie Puzzelteile ineinandergreifen, ist von dieser Ordnung im Bereich des behandelten Gewebes nicht mehr viel zu erkennen. Die behandelten Zellen wirken zusammengefallen und liegen nur noch als dünne Schicht auf dem sich darunter befindlichen Pflanzengewebe.

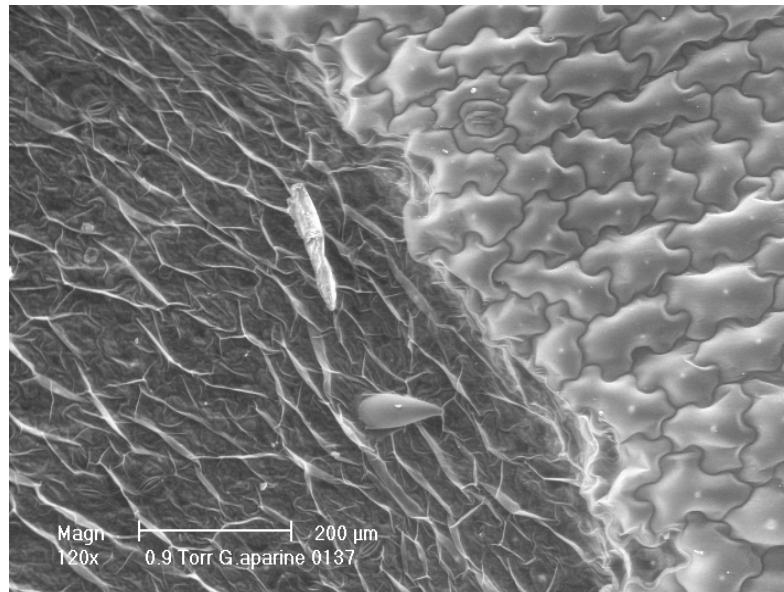


Abb. 40: Aufnahme eines Blattes von *Galium aparine*: Übergang zwischen gesundem Pflanzengewebe (rechts) hin zu geschädigtem Pflanzengewebe durch die Laserapplikation (links)

Auch in der Nahaufnahme sind keine einzelnen Zellen der dikotylen Pflanze mehr zu erkennen. Zu sehen ist lediglich eine Schicht aus höher und tiefer liegendem Gewebe.

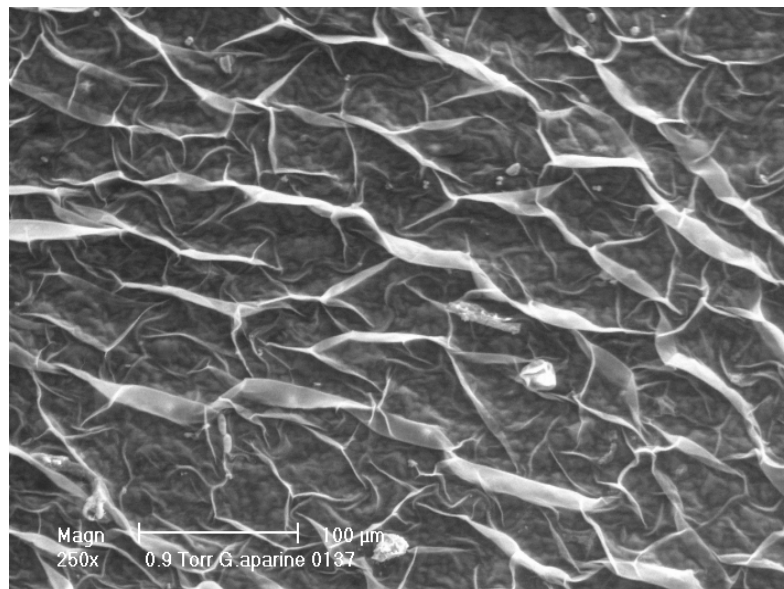


Abb. 41: Nahaufnahme des geschädigten Gewebes von *Galium aparine* nach Laserapplikation

Für die geschädigten Zellen monokotyledoner Pflanzen sah es im REM ähnlich aus, zwar stellt der Zellverband generell ein anderes Bild dar, die Zellen von Gräsern sind eher länglich und oval, allerdings war auch dieses zelltypische Aussehen nach der Laserapplikation nicht mehr gegeben. Wie schon bei den dikotylen Pflanzen wirken die Zellen auch hier zusammengefallen, sie sind kaum noch als solche zu erkennen und liegen nur noch als Schicht ohne erkennbares Muster auf dem darunter liegenden Gewebe (Abb. 42).

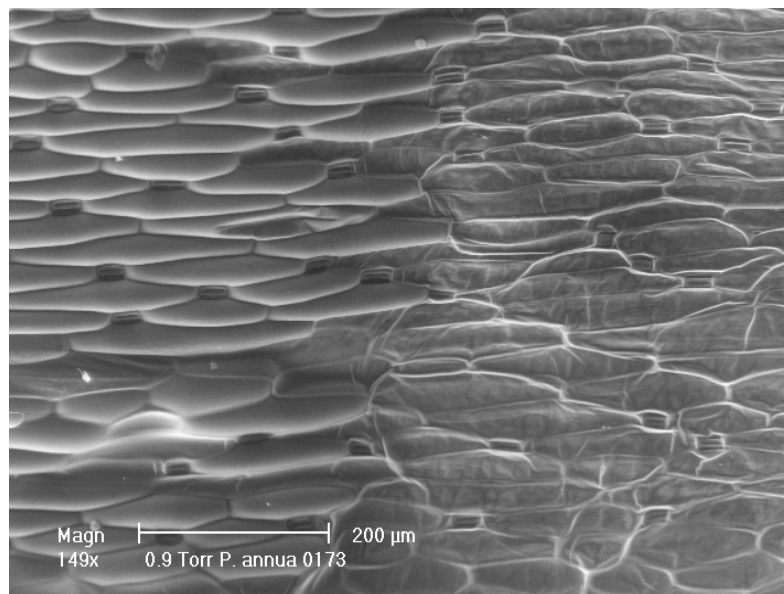


Abb. 42: Aufnahme eines Blattes von *Poa annua*: Übergang zwischen gesundem Pflanzengewebe (links) hin zu geschädigtem Pflanzengewebe durch die Laserapplikation (rechts)

4.5.3 Aufnahmen mit der High-Speed-Kamera und Thermokamera

Die Aufnahmen der Thermokamera zeigten, wie der Laserstrahl an der Pflanzenbasis auftrifft, und die Wärme sich bis in die einzeln verzweigten Pflanzenstängel ausweitet. Abbildung 43 zeigt genau diese Momentaufnahme des Wärmeeintrages in die Pflanze, während der Bestrahlung mit dem Faserlaser bei 4 kW, Applikationszeit 250 ms und einem Strahldurchmesser von 10 mm.

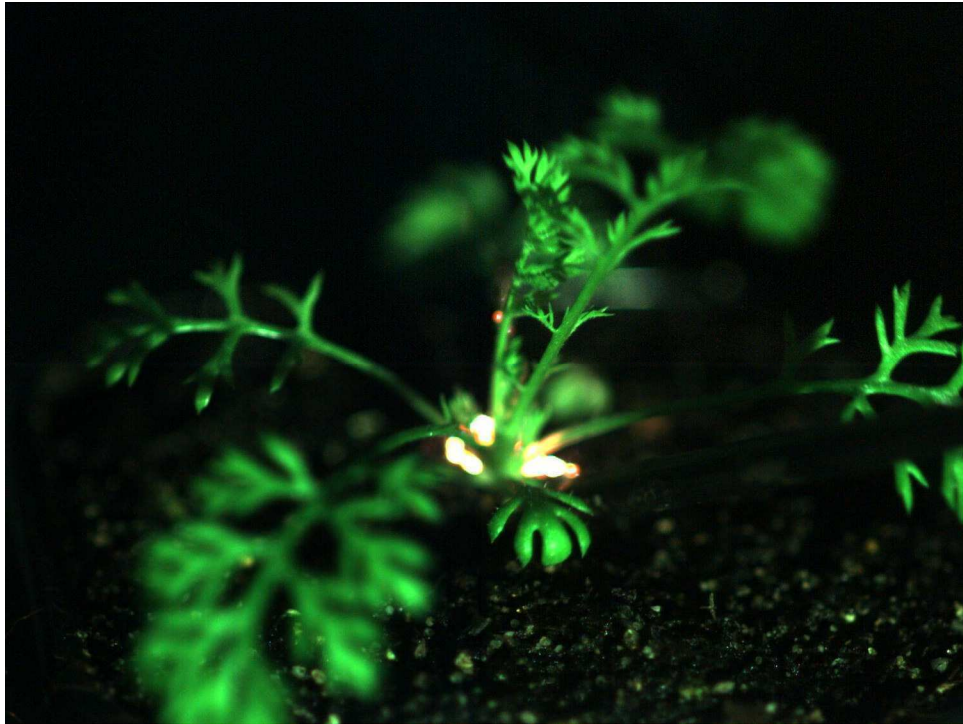


Abb. 43: Momentaufnahme mit der Thermokamera bei einer Applikationszeit von 250 ms und einem Strahldurchmesser von 10 mm, *A. arvensis* im Sechsstadium; Leistung 4 kW

Durch die High-Speed-Kamera ist ein Unterschied vor und nach der Laserbehandlung zu erkennen. Bei der unbehandelten Pflanze stehen die einzelnen Pflanzenstängel aufrechter (Abb. 44 a). Während der Laserapplikation wird das Unkraut durch den auftreffenden Laserstrahl nach unten gedrückt. Die Endaufnahme nach der Behandlung zeigt, dass die Stängel von *A. arvensis* deutlich abwärts geneigt sind (Abb. 44 b).

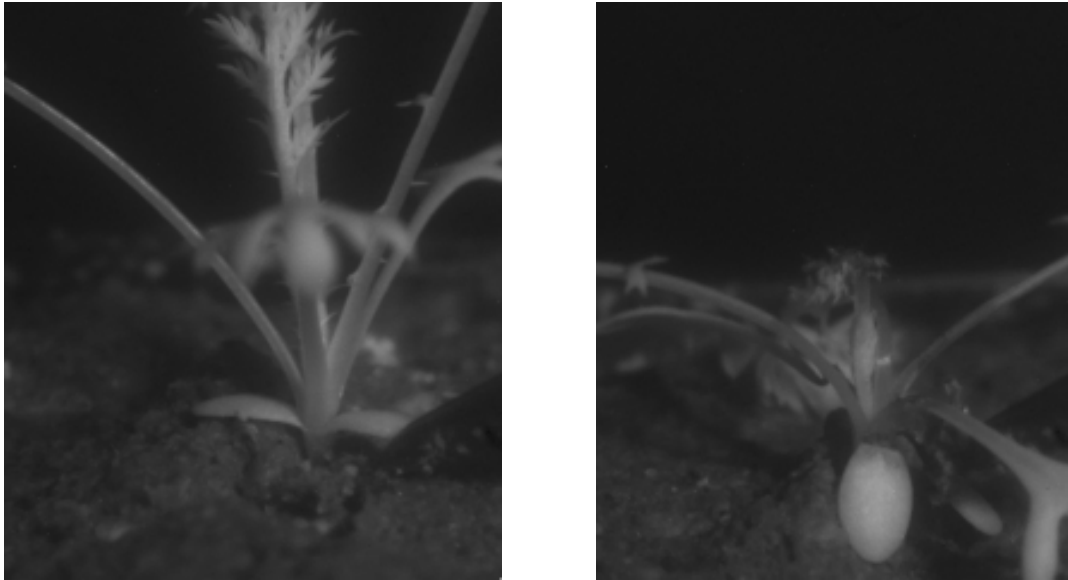


Abb. 44 a- b: *A. arvensis* im Vierblattstadium unmittelbar vor (a) und nach (b) der Behandlung mit dem Faserlaser; Leistung 4 kW; Applikationszeit 50 ms; Strahldurchmesser 2 mm

5 Diskussion

5.1 Vorversuche

Die Vorversuche im Institut für angewandte Physik in Bonn waren ein wichtiger Schritt, um Informationen zu erhalten, welche Parameter bei der Laserapplikation bedacht werden müssen, und erste Erfahrungen für die Folgeversuche im Fraunhofer Institut für Lasertechnik in Aachen zu sammeln.

Es hat sich schnell herausgestellt, dass die einzelnen Blätter der behandelten Tomaten- und Bohnenpflanzen im Dreiblattstadium in ihrem Wachstum schon zu weit fortgeschritten waren, um diese nachhaltig mit dem Laser schädigen zu können. Außerdem handelte es sich bei den Pflanzen in den Vorversuchen um Kulturpflanzen, nicht um die später verwendeten Unkrautpflanzen. Für die folgenden Untersuchungen durften die Unkräuter somit einige Zentimeter nicht überschreiten. Die Folgeversuche wurden mit den Unkräutern Ackerfuchsschwanz (*A. myosuroides*) und Ackerhundskamille (*A. arvensis*) im Keimblatt- bis Sechsbblattstadium (BBCH 10- 16) durchgeführt.

Des weiteren hat sich gezeigt, dass die Laserbehandlung nur sehr punktuell durchgeführt werden konnte. Von Vorteil ist hierbei, dass es dem eigentlichen Ziel des Präzisionspflanzenschutzes entgegen kommt, dessen Bestreben es ist möglichst gezielt und mit geringstem Aufwand, Material und Energie zu arbeiten. Nachteil ist allerdings, dass eine so punktuelle Behandlung der Pflanzen eine sehr genaue Zielführung zur Seite haben muss, und ein genauer Angriffspunkt an der Pflanze vorher definiert werden muss, von dem man sich erhofft, dass hier die größtmögliche Schädigung zu erzielen ist.

Ein weiterer Aspekt der Untersuchungen wird sein, die geeignete Energiemenge zur Behandlung der Pflanzen zu bestimmen. In den durchgeführten Vorversuchen war die eingesetzte Energiemenge deutlich höher als es nötig gewesen wäre. Ziel sollte es nicht sein, ganze Löcher in die Pflanzen zu dampfen, Pflanzen zu schneiden oder durch Überhitzung zu verbrennen, denn alle diese Vorgänge benötigen deutlich mehr Energie, als es später, wenn es zu einem Feldeinsatz mit einem autonomen System kommen sollte, praktikabel wäre. Ergebnis der Untersuchungen soll die thermische Erhitzung der Pflanzen in wenigen Millisekunden bei vertretbarem Energieeinsatz sein, durch die Wachstumshemmungen bei den Unkräutern entstehen. Die vorrangig zu untersuchenden

Parameter waren die Pflanzenart, das Wachstumsstadium, der Angriffspunkt, die Energiemenge, die Einwirkzeit und die Laserart.

5.2 Wirkung auf das biologische Material

Durch die Untersuchungen der Unkräuter nach der Laserapplikation mit Hilfe des Licht- und Rasterelektronenmikroskops konnte ziemlich genau bestimmt werden, wie Laserlicht auf das Pflanzenmaterial wirkt, und wodurch die aufgetretenen Welkeerscheinungen verursacht werden.

Im Lichtmikroskop ist hierbei deutlich zu erkennen, dass sich das behandelte Pflanzengewebe braun bis gelblich verfärbt und trocken wird. Im ersten Moment nach der Behandlung wirkte die Stelle nur etwas dunkler und glänzte ein wenig. Diese Reaktion des Gewebes tritt insbesondere an der behandelten Stelle des Blattes oder Stiels auf und breitete sich nach ein paar Tagen weiter aus. Allerdings konnte durch die Aufnahmen des Lichtmikroskops nicht eindeutig geklärt werden, warum das Gewebe an der behandelten Stelle austrocknet. Die Aufnahmen mit dem Rasterelektronenmikroskop lieferten dazu detailliertere Aufnahmen des Pflanzengewebes. Die Bilder der behandelten Blätter zeigten einen deutlichen Unterschied in ihrer Struktur und Oberfläche im Gegensatz zu unbehandelten Stellen. Gut zu erkennen waren die puzzelförmigen Kutikulazellen der Oberfläche der dikotylen Blätter in unbehandeltem Zustand. Die Zellen sind mit Wasser gefüllt, dadurch ist der Turgordruck hoch und hält die Stabilität der Zellen aufrecht. Diese war bei den behandelten Zellen nicht mehr gegeben. Die oberste Zellschicht der Blätter lag nur noch wie eine dünne, ausgetrocknete Haut auf dem darunter befindlichen Palisadenparenchym. Teilweise waren die Parenchymzellen durch die Kutikula zu erkennen. Die gleichen Beobachtungen wurden bei monokotylen Pflanzen gemacht.

Es gibt zwei Gründe, weshalb die beobachteten Welkeerscheinung durch die Laserapplikation auftreten. Zum einen denaturieren die Proteine der pflanzlichen Zellwand, zum anderen ist das Wasser in den Zellen verdampft. Beides bedingt durch den hohen Wärmeeintrag des Lasers in das pflanzliche Gewebe. Die pflanzlichen Zellen verlieren ihren inneren Druck und fallen in sich zusammen. Es tritt ein Effekt wie beim natürlichen Verwelken ein, wenn durch Wassermangel die grünen Pflanzenteile bräunlich und trocken werden. Alle thermischen Unkrautbekämpfungsmethoden schädigen die Unkräuter, indem eine kritische Anzahl Zellen auf lethale Temperaturen erhitzt wird (Rahkonen und Jokela,

2003). Dieser Effekt konnte nur zum Teil durch die Aufnahmen mit der High-Speed- und der Thermokamera bestätigt werden. Im Fall der High-Speed-Kamera ist deutlich zu sehen, wie sich die Pflanzenstängel nach der Laserapplikation weiter nach unten neigen, als noch vor der Applikation. Der selbe Effekt wird nach der Behandlung mit einem Abflamngerät an den Pflanzen festgestellt, die von der Flamme geschädigten Pflanzen machen sofort einen schlaffen Eindruck und bekommen eine etwas dunklere Färbung (Dierhauer, 2000). Zu verdeutlichen ist dieser Effekt mit den Aufnahmen der Thermokamera, die zeigen, dass eine Ausbreitung der Wärme im pflanzlichen Gewebe stattfindet, und dadurch mehr Gewebe geschädigt wird, als ursprünglich durch den doch recht kleinen Spotdurchmesser von 1- 2 mm anvisiert war. Ähnliche Beobachtungen machten auch Wöltjen et al. (2008), die an verschiedenen Messpunkten am Blatt über die Dauer der Bestrahlungszeit die Temperatur erfassten und gleichzeitig Thermographie-Aufnahmen machten, um die Ausdehnung der Wärme im pflanzlichen Gewebe zu erfassen. Die Tastversuche im Physikinstitut der Universität Bonn ließen noch eine andere Hypothese aufkommen, warum ein Loch im Pflanzengewebe entsteht, und sich geschädigtes Gewebe bildet. Der Zeitpunkt, an dem der Laserstrahl das Pflanzengewebe trifft, könnte eine Art Schockwelle durch das Gewebe schicken, wodurch direkt angrenzende Zellen in sich zusammenfallen. Für diese Theorie würde sprechen, dass Aufnahmen mit der High-Speed-Kamera zeigten, dass sich die Pflanze im Moment der Laserapplikation deutlich unter dem auftreffenden Laserstrahl nach unten neigt. Welche Wirkung genau durch den Energieeintrag der unterschiedlichen Laser in die Pflanze erzielt wird, konnte anhand der Versuche und späteren visuellen Auswertungen nicht vollständig geklärt werden. Der CO₂-Laser ist mit 10 µm durchaus im Bereich der Wärmeenergie anzusiedeln, der Faserlaser hingegen arbeitet bei 1 µm im Nah-Infrarot-Bereich.

Wichtig war bei den rein visuell auswertbaren Untersuchungen ein breiteres Spektrum von Pflanzen zu untersuchen. Dazu wurden am Laserforschungszentrum in Hannover mehrere verschiedenen dikotyle und monokotyle Pflanzen mit einem Dioden- und einem CO₂-Laser behandelt. Darunter waren typische Ackerunkräuter wie *Amaranthus retroflexus* (zurückgebogener Amaranth) oder *Poa annua* (Einjährige Rispel). Es stellte sich allerdings heraus, dass die Wirkung des Lasers immer das gleiche Schadensbild auf dem Pflanzengewebe hervorruft.

Auch bei den unterschiedlichen getesteten Angriffspunkten stellten sich immer die selben visuell wahrnehmbaren Veränderungen des Pflanzengewebes ein. Wurde das

Apikalmeristem der jungen Pflanzen getroffen, sind wahrscheinlich die sich entwickelnden und für das Wachstum verantwortlichen Zellschichten geschädigt worden, so dass erst eine Regeneration des Bildungsgewebes und anschließend die Wiederaufnahme des Wachstums erfolgte. Ebenfalls wurde der Laserstrahl auf die Stielbasis der Pflanze fokussiert. Durch die hohe Wärmeenergie ist es wahrscheinlich, dass die Zellen platzen oder zusammenfallen, und somit der Nährstoff- und Wassertransport eingeschränkt wird. Dies ist sowohl bei monokotylen als auch dikotylen Unkräutern der Fall, obwohl die Leitbündel der dikotylen Pflanzen radiär um das Mark herumliegen, im Gegensatz zur willkürlichen Verteilung der Leitbündel in den Monokotyledonen. Die Monokotyledonen sind dadurch nicht unbedingt als thermisch-toleranter einzustufen. Untersuchungen der Vitalität behandelter Pflanzen nach der Laserapplikation mittels Chlorophyllfluoreszenzanalyse durch Wöltjen et al. (2008) bestätigen, dass die mit Laserstrahlung behandelten Stellen eine geringere bis keine Fluoreszenz und somit auch keine Vitalität aufweisen.

Es stellt sich die Frage, inwieweit dieser beobachtete Effekt sich positiv auf eine Unkrautkontrolle durch Laserapplikation auswirkt. Das Wachstum der Unkräuter sollte durch den Lasereinsatz deutlich vermindert werden. Durch die auftretenden Welkeerscheinungen ist dieser Fakt gegeben. Bei gezieltem Einsatz des Lasers z. B. auf die Sprossachse ließe sich in wichtigen Bereichen des Nährstofftransportes ein Versorgungsdefizit erzielen. Die Pflanze hätte somit ein Nährstoff- und Wasserdefizit und müsste dieses durch einen Wiederaufbau des Transportgewebes kompensieren, bevor weitere Anstrengungen im Längen- und Breitenwachstum möglich wären. Bereits 1974 untersuchten Couch und Gangstad die Wirkung von Laserstrahlung auf Wasserhyazinthen und stellten Wachstumsdepressionen an den behandelten Pflanzen fest. Durch den Wachstumsvorsprung liegen die Kulturpflanzen in der Konkurrenz um Wasser und Nährstoffe vorne. Nach Reihenschluss findet eine weitere Unterdrückung der Unkräuter durch das Blattmaterial der Kulturpflanzen statt. Koch (1967) untersuchte, dass eine direkte Konkurrenzbeziehung zwischen Unkraut und Kulturpflanze besteht, und diese sich negativ auf den Ertrag auswirken kann. Die Wachstumsminderung der Gerste in den durchgeführten Versuchen betrug bis zu 15 %.

5.3 Einfluss der biologischen Parameter

In allen durchgeführten Versuchen wurde deutlich, dass die biologischen Parameter Pflanzenart, Wachstumsstadium und Angriffspunkt bei der Unkrautbekämpfung mit Laserstrahlung eine wichtige und limitierende Rolle spielen. Alle drei biologisch wichtigen Parameter wurden variiert, um mögliche Szenarien der Unkrautpopulation im Feld zu berücksichtigen. Es wurden sowohl monokotyle als auch dikotyle Pflanzen untersucht, das Wachstumsstadium ging von Keim- bis Sechsstadium, und es wurden zwei verschiedene Angriffspunkte an der Pflanze getestet. Schnell wurde in den Versuchsreihen deutlich, dass das Wachstumsstadium der limitierende Faktor bei der Unkrautkontrolle ist, und der Angriffspunkt des Laserstrahls hauptsächlich die Effizienz der Kontrolle beeinflussen kann. Die geringsten Auswirkungen auf den Behandlungserfolg hatte die Pflanzenart, da sowohl monokotyle als auch dikotyle Pflanzen bei geeigneten Parametern erfolgversprechend behandelt werden konnten.

5.3.1 Pflanzenart

Die unterschiedlichen Pflanzenarten hatten während der Untersuchungen die geringsten Auswirkungen auf den Erfolg der Unkrautkontrolle. Sowohl bei monokotylen als auch dikotylen Pflanzen zeigten sich Erfolge in der Kontrolle. Allerdings kann ein Unterschied im Behandlungserfolg auftreten, wenn man die behandelten Pflanzen nach einigen Wochen erneut betrachtet. Bei den monokotylen Pflanzen kann es zu einem stärkeren Wiederaustrieb kommen, als bei den Dikotyledonen, da an dem tiefer und geschützter sitzenden Vegetationspunkt in Wurzelnähe die Schädigung durch den Laser wesentlich geringer ist, als an dem höher und offen liegenden Apikalmeristem zweikeimblättriger Pflanzen. Bei den durchgeführten Versuchen ist bisweilen nur ein geringer bis gar kein Unterschied zwischen den Pflanzenarten zu erkennen. Dies wird durch Ergebnisse von Mathiassen et al. (2007) untermauert, da ebenfalls keine Beziehung zwischen Bekämpfungserfolg und Pflanzenart in den Untersuchungen festgestellt wurden. Bei den Untersuchungen dieser Arbeit war die aufgewendete Energiemenge für die Versuche relativ hoch angesetzt, und somit auch eine Schädigung der geschützten Pflanzenteile durchaus zu erreichen. Des Weiteren wurde der Angriffspunkt an den Pflanzen an die Stielbasis verlagert, so dass es nicht vorrangig um eine Schädigung des Wachstumszentrums, sondern der Leitungsbahnen für Wasser und Nährstoffe ging. Wöltjen et al. (2008) hatten einen Unterschied zwischen den Pflanzenarten ausgemacht, allerdings wurden die Versuche mit geringeren Leistungen, bei gleichem

Energieaufwand und mit Fokus auf das Wachstumszentrum durchgeführt. Außerdem verfügte der bei den Versuchen benutzte Diodenlaser über einen geringeren Absorptionskoeffizienten, geringer, als der in dieser Arbeit untersuchte Faserlaser. Im Hinblick auf eine Nutzung der laserbasierten Unkrautbekämpfung im Ackerbau besteht hier mit Sicherheit das größte Verbesserungspotential, da eine Verringerung der Energiemenge eine deutliche Einsparung auf Seiten der Geräteabmessung und der Kosten für ein solches Gerät bedeuten würde. Allerdings ist dieser Punkt stark abhängig von der Zielführung des Lasers. Ist der Angriffspunkt optimal anvisiert, wird auch der Großteil der aufgewendeten Energie von der Pflanze absorbiert. Bei höherem Energieeintrag am genauen Zielpunkt, lässt sich die aufgewendete Gesamtenergie deutlich minimieren. Die Pflanzenart ist kein limitierender Faktor und spielt bei der Auswahl des Lasers und der Konzipierung eines Gerätetyps eine untergeordnete Rolle.

5.3.2 Wachstumsstadium

Das Wachstumsstadium der Pflanzen ist ein sehr wichtiger Faktor, wenn eine erfolgreiche Unkrautbekämpfung durchgeführt werden soll, egal ob diese chemisch, mechanisch oder thermisch erfolgt.

In den Versuchen zeigte sich, dass eine Bekämpfung im Keim- bis Vierblattstadium (BBCH 10- 14) am erfolgversprechendsten ist. In dieser Phase reagieren die relativ kleinen Unkrautpflanzen noch wesentlich sensibler auf Wärme, als in späteren Wachstumsstadien. Des Weiteren sind die Pflanzen noch nicht so weit verzweigt, und durch eine gezielte Schädigung lassen sich Auswirkungen auf alle angrenzenden Pflanzenteile erzielen. Ähnliche Ergebnisse wurden auch von Mathiassen et al. (2006) erzielt. Bis zum Vierblattstadium war es möglich bis zu 100 % der Versuchspflanzen dauerhaft mit dem Laser zu schädigen, und diese konkurrenzunfähig zu machen. Bei den getesteten Unkräutern im Sechsstadium zeigte ich anfangs eine ähnliche Entwicklung, bei der im Durchschnitt ca. 80 % der Unkräuter abstarben oder deutliche Wachstumsdepressionen aufzeigten. Allerdings waren diese nur von kurzer Dauer, und knapp drei Wochen später waren diese Pflanzen durch einen extremen Wiederaustrieb auf dem Niveau der unbehandelten Kontrollpflanzen, es waren keine signifikanten Unterschiede zwischen behandelten und unbehandelten Pflanzen mehr festzustellen. Eine thermische Behandlung durch Laserapplikation ist in diesem Wachstumsstadium folglich mit einem zu hohen Energieeintrag und zu langen Applikationszeiten verbunden.

Diese Untersuchungen decken sich mit anderen Studien, die besagen, dass das Wachstumsstadium zum Zeitpunkt der thermischen Unkrautkontrolle eine wichtige Rolle spielt (Parish, 1989, 1990; Casini et al. 1993; Ascard, 1994, 1998; Daar, 1994; Hansson und Ascard, 2002). Hansson et al. (2002) führte eine Studie zur Wirksamkeit des Einsatzes von Heißwasser auf Unkrautpflanzen durch und stellte fest, dass dreimal mehr Energie nötig war, um Pflanzen im Sechsstadium zu schädigen, im Gegensatz zu denen im Zweiblattstadium.

Im Praxiseinsatz gibt das Wachstumsstadium das Limit der Unkrautkontrolle mittels Lasern vor. Unkräuter, die das Vierblattstadium überschritten haben, sind auch mit der maximal aufzubringenden Energie nicht wirkungsvoll zu schädigen.

5.3.3 Angriffspunkt

Der Angriffspunkt des Lasers an der Pflanze ist der am schwersten zu kontrollierende Punkt der biologischen Parameter. Hierbei spielen nicht nur die Möglichkeiten der Positionierung des Lasers eine Rolle, sondern auch Habitus und Wuchsform der verschiedenen Unkräuter.

Die Bestrahlung einzelner Blätter am Anfang der Versuchsreihen brachte nicht den gewünschten Erfolg und ließ sich somit ziemlich schnell als möglichen Angriffspunkt aussortieren. Die Blätter reagierten zwar auf die Bestrahlung mit dem Laser und zeigten auch deutliche Veränderungen ihrer Oberfläche auf, allerdings hatte die gezielte Eliminierung einzelner Blätter keine Auswirkungen auf das Wuchsverhalten der kompletten Pflanze. Selbst kleinste Pflanzen im Keimblattstadium wuchsen unbeeinträchtigt und ebenso schnell weiter, wie nicht behandelte Kontrollpflanzen.

Den Fokus auf das Sprossapikalmeristem zu legen zeigt schon deutlichere Erfolge, allerdings war es auf Grund der unterschiedlichen Wuchshöhen der Pflanzen schwierig immer exakt an der Stelle der Wachstumszentrum der Dikotyledonen anzusetzen. Da das Vegetationszentrum der Monokotyledonen an der Stielbasis liegt, wurde in einer erneuten Versuchsreihe getestet, wie hoch der Bekämpfungserfolg ist, wenn der Fokus des Laserstrahls auf der Stielbasis liegt. Hierbei wurde unterschieden zwischen der Applikation senkrecht von oben oder schräg von der Seite. Durch die Applikation senkrecht von oben wird der Laserstrahl durch den gesamten Pflanzenstiel geschickt, während die höchste Energiemenge knapp über der Wurzel auftrifft, dadurch wird die der Großteil der Energie von der Pflanze absorbiert. Durch das Pflanzengewebe transmittierte Energie kann noch von

der Wurzel absorbiert werden. Bei der Applikation schräg von der Seite geht Energie dadurch verloren, dass ein Teil der Laserstrahlung durch das Pflanzengewebe am Fokus transmittiert und nur vom danach folgenden Boden absorbiert wird. Die Wurzel der Pflanze kann durch den Laserstrahl nicht weiter geschädigt werden. Auch wenn zwischen den Versuchsergebnissen der getesteten Varianten keine signifikanten Unterschiede festzustellen waren, lässt sich doch argumentieren, dass die erste Variante der Laserapplikation senkrecht von oben die geeignetere Variante ist, da hierbei der größtmögliche Anteil der abgegebenen Energie vom Laser auf die Pflanze übertragen wird. Denn schon bei Mathiassen et al. (2006) zeigten sich Schwierigkeiten das Meristem mancher Pflanzen (*Stellaria media*) genau anzuvisieren, da dieses geschützt liegt und deutlich kleiner ist als das anderer Versuchspflanzen (*T. inodorum*, *Brassica napus*). Außerdem kann das Wachstumszentrum der Pflanzen unterschiedlich hoch gelegen sein, denn die Unkräuter auf dem Acker befinden sich in den seltensten Fällen im gleichen Wachstumsstadium, während hingegen das Saatbett der Kulturpflanzen relativ homogen gehalten wird, und der Austritt der Pflanzen aus dem Boden in ungefähr gleicher Höhe stattfindet. Es müsste folglich nicht ständig der Abstand zwischen Pflanze und Laserkopf ermittelt und angepasst werden. Ebenfalls hätte es ein Bilderkennungsprogramm einfacher den Pflanzenstiel vom umgebenden Ackerboden zu unterscheiden, als das doch recht kleine Meristem an der Sprossspitze von den restlichen Pflanzenteilen. Die Pflanzenbasis bietet sich als gut anzuvisierender Angriffspunkt mit erfolgversprechenden Aussichten in der Unkrautbekämpfung an.

5.4 Einfluss der technisch-physikalischen Parameter auf den Behandlungserfolg

5.4.1 Lasertyp im Zusammenhang mit der Wellenlänge

In den Versuchen zeigte sich deutlich, dass die Art des Lasers, Faser, CO₂- oder Diodenlaser, eher eine untergeordnete Rolle für die erfolgreiche Wirkung auf die Unkräuter spielte. In allen Versuchsdurchgängen wurden sowohl ein CO₂- als auch ein Faserlaser mit unterschiedlichen, weiteren Versuchsparametern getestet. Teilweise zeigten sich zwar Unterschiede im Behandlungserfolg, allerdings waren diese wohl weniger den Lasertypen und deren Wellenlänge, als eher den variierenden Leistungen zuzuschreiben. Der Faserlaser zeigte in mehreren Versuchen mit Pflanzen im Drei- bis Sechsblattstadium eine bessere

Wirkung auf die Unkräuter, als der CO₂-Laser. Allerdings waren diese Unterschiede statistisch nicht nachweisbar und waren wohl hauptsächlich auf die weitaus höhere Leistung des Faserlasers mit 4 kW im Gegensatz zum CO₂-Laser mit nur 0,5 kW zurückzuführen.

Versuche im Laserzentrum Hannover, die mit dem Diodenlaser und einer Leistung von 0,25 kW durchgeführt wurden, zeigten bei späteren mikroskopischen Untersuchungen die gleichen Schadbilder, wie nach der Behandlung mit anderen Lasertypen.

Auch die unterschiedlichen Wellenlängen der Laser (10600 nm für den CO₂-Laser und 1060 nm für den Faserlaser) konnten nicht mit einem guten oder schlechten Behandlungserfolg in Verbindung gebracht werden. Obwohl durch vorherige Aufnahme des Absorptionsspektrum der Versuchspflanzen im Vorfeld mögliche Rückschlüsse auf eine gute Wirkung der ausgewählten Laser, auf Grund einer hohen Absorption im entsprechenden Wellenlängenbereich, vermutet wurden. Denn auch Griepentrog et al. (2006) verwendete in seiner ersten Versuchen zur thermischen Unkrautkontrolle einen CO₂-Laser mit einer Wellenlänge von 10600 nm, da der Absorptionskoeffizient von Wasser, aus dem das pflanzliche Gewebe zu 90 % besteht, bei dieser Wellenlänge besonders hoch ist. Bei den Versuchsreihen dieser Arbeit ließen sich allerdings keine Rückschlüsse auf einen Zusammenhang zwischen Wellenlänge und Behandlungserfolg ziehen, ebenso wie bei Mathiassen et al. (2006). Es wurde vermutet, dass durch die unterschiedlichen Leistungen die entsprechenden Ergebnisse erzielt wurden. Diese Ergebnisse stehen im Gegensatz zu Ergebnissen von Wöltjen et al. (2008), die einen deutlichen Unterschied in der Wirksamkeit des CO₂-Lasers (10600 nm) im Vergleich zum Diodenlaser mit 940 nm festgestellt haben, was sicherlich mit einem höheren Wirkungsgrad des CO₂-Lasers (> 20 %) gegenüber dem des Diodenlasers zusammenhängt.

Am Ende hat die Wahl des Lasers geringe Auswirkungen auf den Behandlungserfolg, aber große auf den Energieeinsatz und die technischen Möglichkeiten der Einstellung von Leistung, Zeit und Strahldurchmesser.

5.4.2 Leistung

Der Bekämpfungserfolg lässt sich mit der Leistung des Lasers sehr stark beeinflussen. Der Faserlaser mit der höheren Leistung von 4 kW gegenüber dem CO₂-Laser mit einer eingestellten Leistung von 0,5 kW zeigte im Schnitt deutlich bessere Bekämpfungserfolge. Ein Test zu Anfang der Versuchsreihen zeigte, dass bei zunehmender Leistung des

Faserlasers auch die Anzahl der abgestorbenen Pflanzen ansteigt. Daraufhin wurde entschieden in den Versuchen immer mit der höchsten verfügbaren Leistung des Lasers zu verfahren, da in diesem Fall die größtmöglichen Schädigungen zu erzielen waren. Mathiassen et al. (2006) sieht ebenfalls die größtmöglichen Auswirkungen des Lasers auf die Unkräuter durch entsprechende Leistung gegeben. Auch wenn der Faserlaser bessere Erfolge zeigte als der CO₂-Laser, ist das nicht nur auf die Leistung des Lasers zurückzuführen, sondern eventuell auch eine bessere Trefferquote, da der Faserlaser zusätzlich mit einem Pilotlaser ausgestattet war, der die Treffergenauigkeit deutlich erhöhte. Es ließe sich auch mit geringeren Leistungen ein deutliches Schadbild erzielen, wie es sich auch in Versuchen von Wöltjen et al. (2008) zeigt. Allerdings muss für die entsprechenden Ergebnisse auch die Haltezeit des Lasers deutlich nach oben korrigiert werden. Dadurch steigt allerdings auch die Arbeit [J], die das System aufbringen muss, deutlich an. Nach der Formel „Arbeit [J] = Leistung [W]*Zeit [s]“ steigt die aufgebrachte Arbeit bei der Laserapplikation mit einem CO₂-Laser mit 500 W bei einem Anstieg der Applikationszeit von 10 ms auf 1 s, von 0,5 J auf 500 J an.

Die Leistung kann variabel gewählt werden, sollte aber während des Applikationsvorgangs nicht weiter geändert werden. Eine Anpassung der technischen an die biologischen Parameter sollte rein über Haltezeit und Strahldurchmesser erfolgen.

5.4.3 Applikationszeit

Die Applikationszeit wurde bewusst sehr kurz gewählt. Zu Anfang des Projektes wurde ein kurzes Brainstorming gemacht, welche Zeiten später einen realistischen Einsatz des Lasers im Ackerbau zulassen würden. Bei einer Unkrautzahl von 100 Pflanzen pro m² und einer Applikationszeit von 10 ms pro Pflanzen, ergibt sich eine Haltezeit von ca. 3 Stunden pro Hektar. Bei einer Applikationszeit von 1 s braucht man fast 280 Stunden für einen Hektar. Natürlich immer abhängig vom Grad der Verunkrautung.

Desweiteren wurden relativ lange Applikationszeiten von 1- 2 s schon in mehreren Versuchen von Wöltjen et al. (2008) getestet. Diese zeigten ebenfalls gute Erfolge in der Unkrautbekämpfung, allerdings ist ein Einsatz in der Praxis durch solche langen Haltezeiten unrentabel. Außerdem ist nicht auszuschließen, dass sich die Pflanze während der Applikation bewegt. Ist dies der Fall, wird der Bekämpfungserfolg reduziert. Haltezeiten von mehr als 1 s können somit einen nicht zu vernachlässigenden Nachteil mit sich bringen.

Mathiassen et al. (2006) hatten schon mit anderen Applikationszeiten gearbeitet, allerdings lagen auch diese mit 70 ms bis hin zu 3000 ms über den praxistauglichen Zeiten. Darüber hinaus sagt Mathiassen et al. aber, dass durch eine angepasste Applikationszeit ein größtmöglicher Bekämpfungserfolg der Unkräuter erreicht werden kann.

In der folgenden Abbildung 45 ist beispielhaft die aufzuwendende Gesamtzeit (reine Applikationszeit) der Laserapplikation bei 100 ms und 1 s logarithmisch dargestellt. Schon bei einer geringen Verunkrautung von unter zehn Pflanzen pro m² steigt die reine Applikationszeit, ohne Nebenzeiten wie Anvisieren, Fokussieren, Fahrten etc. auf über 10 Stunden, bei einer Zeit von 1 s pro Pflanze, an. Bei 0,1 s (100 ms) Applikationszeit liegt diese schon deutlich niedriger.

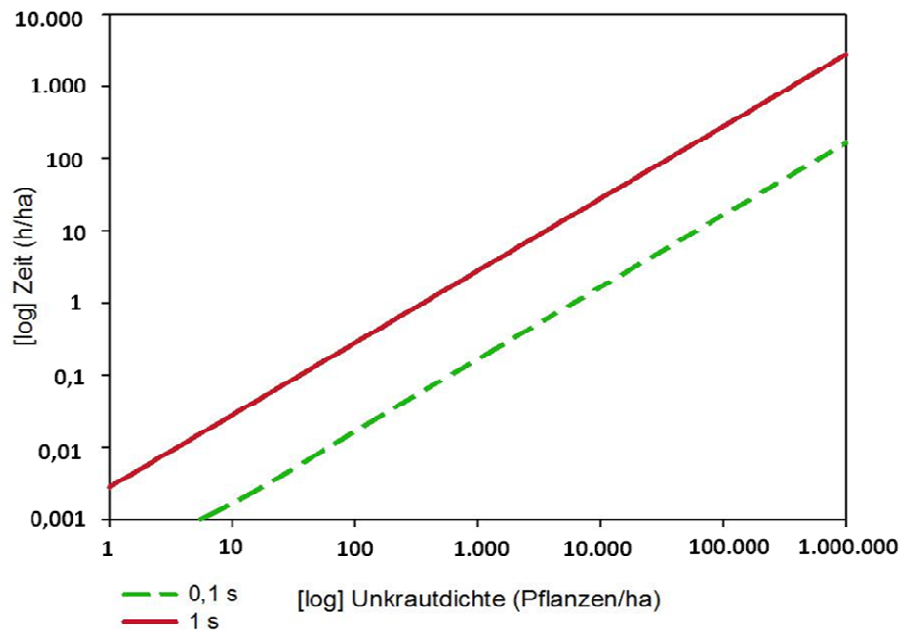


Abb. 45: Logarithmische Darstellung des Zeitaufwandes der Unkrautbekämpfung bei unterschiedlichen Applikationszeiten: 0,1 s und 1 s.

Es wurde sehr schnell deutlich, dass die Applikationszeiten an die biologischen Gegebenheiten der Pflanzen angepasst werden mussten. Unkräuter im Keimblattstadium lassen sich schon mit einer Applikationszeit von 10 ms bei entsprechender Leistung dauerhaft schädigen. Bei größeren Pflanzen, bis hin zum Vierblattstadium, musste die Applikationszeit auf mindestens 50 ms heraufgesetzt werden. Dadurch konnten noch größere Pflanzen als nicht mehr bekämpfbar eingestuft werden.

5.4.4 Strahldurchmesser

Der Strahldurchmesser ist ebenfalls von allen anderen technischen und biologischen Parametern abhängig, und genauso beeinflusst er wiederum diese. In den durchgeführten Versuchsreihen blieb der Spot fast immer konstant bei 1 oder 2 mm, nur im Fall der Pflanzen im Sechsstadium wurde dieser auf 5 mm erhöht, damit ein genügend großer Anteil Pflanzenmaterial sichtbar durch die Laserapplikation geschädigt wurde. Allerdings musste durch die Vergrößerung des Strahldurchmessers auch die Applikationszeit deutlich nach oben auf 100 bis 250 ms erhöht werden, da mit einer Vergrößerung des Spots die aufgebrachte Energie pro Fläche rapide abnimmt.

Ansonsten kommt dem Strahldurchmesser eine eher untergeordnete Rolle innerhalb der technischen Parameter zu, da der Ansatz dieser Arbeit war, möglichst zielgenau und sehr selektiv zu arbeiten. Außerdem hat schon Mathiassen et al. (2006) untersucht, dass die Änderung des Strahldurchmessers keine relevante Beziehung zum Bekämpfungserfolg des Unkrautes bei gleichbleibendem Energieeintrag darstellt, dieser allerdings nach geeigneten Gesichtspunkten, wie z. B. Größe und Alter der Pflanzen gewählt werden sollte.

5.5 Energieaufwand

5.5.1 Wie viel Energie ist für eine erfolgreiche Bekämpfung der Unkräuter durch den Laser notwendig?

Die Frage nach dem benötigten Energieaufwand ist nicht einfach zu beantworten, da die auf einer Fläche auftreffende Bestrahlungsstärke sich aus der Leistung des Lasers, der Applikationszeit und dem Strahldurchmesser zusammensetzt.

Die Bestrahlungsstärke in J/mm^2 ergibt sich aus folgender Berechnung:

$$\text{Energie} = (\text{Leistung} / \text{Fläche}) * \text{Zeit}.$$

Im folgenden Diagramm (Abb. 46) ist dargestellt, wie die unterschiedlichen Strahldurchmesser die ausgebrachte Energie beeinflussen. Erhöht sich der Strahldurchmesser um das 2,5-fache, verringert sich die aufgebrachte Energie um das Sechsfache.

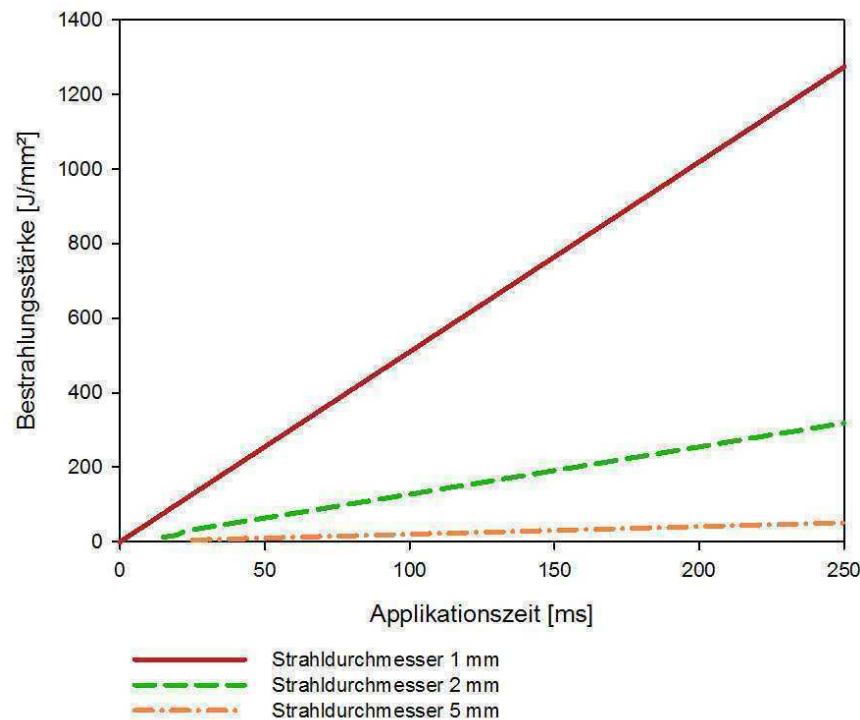


Abb. 46: Entwicklung der Bestrahlungsstärke [J/mm^2] in Abhängigkeit von Zeit [ms] und Strahldurchmesser [mm] bei gleichbleibender Leistung von 4 kW

Auch Wöltjen et al. (2008) bringen bei ihren Versuchen in etwa die gleiche Bestrahlungsstärke auf das Pflanzengewebe auf, obwohl sie mit wesentlich geringeren Leistungen arbeiten. Die Applikationszeit in den Versuchen ist mit 1- 2 s allerdings so hoch angesetzt, dass die gleiche Bestrahlungsstärke auftritt, wie in den hier vorgestellten Versuchen mit höherer Leistung und wesentlich kürzeren Haltezeiten. Und auch Versuche in Dänemark von Mathiasen et al. (2006) zeigten mit anderen Applikationszeiten und wesentlich geringeren Leistungen von nur 5 und 90 W ähnliche Bestrahlungsstärken auf, wie sie im obigen Diagramm gezeigt werden, bei Bestrahlungszeiten bis zu 3 s.

Es stellt sich hier zum wiederholten Mal die Frage der Parameterverteilung und -gewichtung, um eine erfolgreiche Laserapplikation zu gewährleisten. Unterschiedliche Wellenlängen, Leistungen, Applikationszeiten und Spotgrößen können zu der selben Bestrahlungsstärke führen, die durch den Laser in das Pflanzenmaterial eingebracht wird. Je nachdem, welchem Zweck der Laser zur Unkrautkontrolle zugeführt werden soll, also im Gewächshaus, auf dem Feld oder im Versuchswesen, lassen sich die unterschiedlichen Parameter zusammenstellen. Unerlässlich ist allerdings die Berücksichtigung der biologischen Parameter, denn je früher die Unkräuter behandelt werden, desto mehr

reduzieren sich der Energieinput und somit die Kosten (Rask und Kristoffersen, 2007). Hansson et al. (2002) stellte fest, dass Pflanzen im Sechsstadium einen dreifach höheren Energieeintrag zur erfolgreichen Bekämpfung mittels Heißwasser benötigen, als das selbe Unkraut im Zweiblattstadium.

5.5.2 Beispielrechnung: Energieaufwand des Lasers im Vergleich zum konventionellen Abflammgerät

Da sich schon Bertram und Meyer (1998) mit den Möglichkeiten zur Kostenreduktion bei der thermischen Unkrautbekämpfung beschäftigten, soll im Folgenden der benötigte Energieaufwand des Lasers mit einem konventionellen Abflammgerät verglichen werden. Die aufzubringende Energie steht in direkter Relation zu den benötigten Kosten für Laser und Abflammgerät, je mehr Energie, desto höher der Verbrauch und somit die Nutzungskosten pro Hektar. Die im vorherigen Kapitel genannte Bestrahlungsstärke oder Energiedichte, die auf die Pflanzen aufgebracht wird, erscheint im Zusammenhang mit der Leistung von 4 kW relativ viel. Aus diesem Grunde ist in der folgenden Abbildung 47 die Bestrahlungsstärke in Abhängigkeit von der Unkrautdichte logarithmisch dargestellt. Und zwar zum einen für ein konventionelles Abflammgerät und zum anderen für die in den Versuchen verwendeten Laser mit den entsprechenden Leistungen von 0,5 und 4 kW. Berechnet wurde die Bestrahlungsstärke für eine Applikationszeit von 10 ms und einem Strahldurchmesser von 1 mm. Die Daten des Abflammgerätes wurden aus dem Forschungsbericht für biologischen Landbau (Dierhauer, 2002) entnommen. Hierbei handelte es sich um eine Angabe Energie pro Hektar, die in das Diagramm übernommen wurde, da die ausgebrachte Energie eines Abflammgerätes immer auf demselben Niveau liegt, unabhängig von der Anzahl der Pflanzen auf der Ackerfläche. Das ist der Vorteil der Unkrautkontrolle mit Lasern. Bei einer geringen Verunkrautung liegt die aufgebrachte Energiemenge deutlich unterhalb der des Abflammgerätes. Entsprechende Ergebnisse wurden auch von Wöltjen et al. (2008) erzielt, die den Energiebedarf der Laserapplikation mit 565 MJ/ha im Vergleich zum Abflammgerät mit 1800 MJ/ha angeben, allerdings ohne den Verweis auf die Abhängigkeit der notwendigen Energie von der Unkrautzahl. Denn die Energiemenge steigt mit zunehmender Anzahl der Pflanzen auf der Fläche exponentiell an. Die Bestrahlungsstärke des Faserlasers liegt dabei nur geringfügig oberhalb der des CO₂-Lasers, obwohl die Leistungen von 4 kW und 0,5 kW sich deutlich unterscheiden. Die Unkrautbekämpfung mittels Lasern lohnt sich energetische also in dem Fall, dass eine geringfügige Verunkrautung der Fläche vorliegt.

Liegt die Verunkrautung bei über 5.000.000 Pflanzen pro Hektar ist ein Abflammgerät die bessere Lösung, da bei extremer Verunkrautung die benötigte Energie des Lasers deutlich über die des Abflammgerätes hinausgehen kann. Allerdings ist auch eine solche Verunkrautung nicht mehr wirtschaftlich und kommt im Ackerbau bei der heutigen, modernen Bewirtschaftung nicht vor.

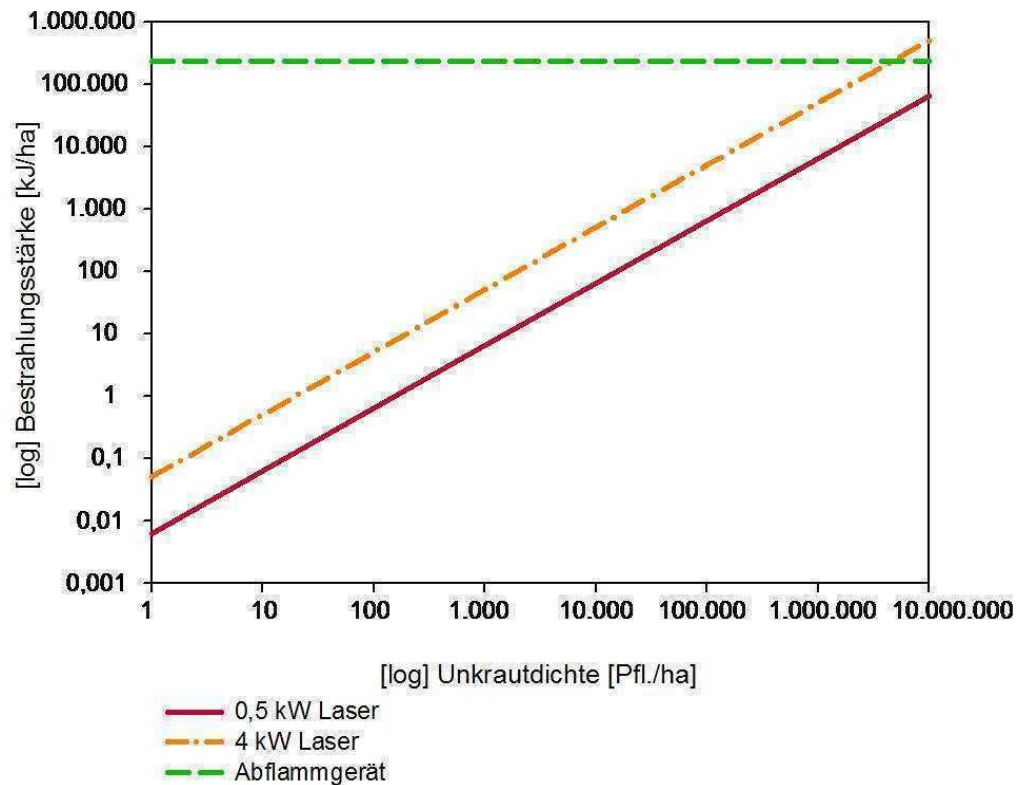


Abb. 47: Unterschied der aufgebrauchten Bestrahlungsstärke in kJ/ha von Abflammgerät und Lasern in Abhängigkeit von der Unkrautdichte [Pflanzen/ha], logarithmische Darstellung

Außerdem soll nicht die vollständige Eliminierung der Unkräuter im Vordergrund stehen. Ziel der Unkrautbekämpfung mittels Lasern ist es das Pflanzengewebe zu schädigen und einen deutlichen Wachstumsrückgang gegenüber den Kulturpflanzen zu erwirken. Eine Reduzierung der Frischmasse ist deutlich energiesparender als die Reduzierung der Pflanzenzahl (Hansson et al., 2002).

5.6 Ausblick: Möglichkeiten des Lasereinsatzes in der Praxis

Um einen Lasereinsatz in der Praxis zu ermöglichen, bedarf es sicherlich noch einiger Tests und Entwicklungen auf baulicher Ebene. Wie in der vorliegenden Arbeit erläutert, stellt sich vorrangig die Frage, wann der Einsatz eines Lasers zur Unkrautbekämpfung von Vorteil ist. Ein selbstfahrendes Gerät wäre von großem Nutzen, da selbsttätig über mehrere Stunden die Unkräuter erfasst und bekämpft werden könnten. Im Gewächshaus oder Gemüsebau ist der Einsatz eines solchen Gerätes auf jeden Fall denkbar und auch in angemessener Zeit zu realisieren. Was den Einsatz auf dem Feld auf großen Ackerschlägen mit Reihenkulturen wie Mais oder Zuckerrüben betrifft, ist eine alleinige Unkrautbekämpfung mittels Laser in diesem Maße wahrscheinlich nicht zu realisieren, da der Energieaufwand schnell den der konventionellen Verfahren übersteigen würde. Um aber die Kulturpflanzen durch das Herbizid weniger zu belasten, wäre zum Beispiel eine Kombination aus chemischer und lasertechnischer Unkrautbekämpfung denkbar. Hierbei würde eine chemische Kontrolle im Voraufbau erfolgen und trotzdem aufgelaufene oder resistente Unkräuter könnten mit Hilfe eines selbstfahrenden Lasergerätes eliminiert werden. Ebenso könnte eine Kombination mit der mechanischen Unkrautkontrolle erfolgen, indem im Voraufbau in den Reihen gehackt wird und im Nachaufbau, wenn auch die Kulturpflanzen durch die Werkzeuge geschädigt werden könnten, Restunkräuter zwischen oder innerhalb der Reihen beseitigt würden. Ein Abflammen als thermische Maßnahme im Nachaufbau hätte Qualitätsverluste und Wachstumsrückschläge für die Kulturpflanzen zur Folge (Dierhauer, 2000).

Ein weiterer Vorteil des Lasers gegenüber konventionellem Abflammen oder Herbizideinsatz ist die geringere negative Beeinflussung von Nützlingen und Kleinlebewesen. Die Wahrscheinlichkeit, dass ein Bodenlebewesen bei der Laserapplikation getroffen wird, ist bei einem Strahldurchmesser von 1 mm als minimal einzustufen.

Nachteil ist ein hohes Maß an Sicherheitsvorkehrungen, die der Einsatz eines Lasers mit sich bringt, denn alle getesteten Laser entsprachen Klasse 4. Ein direkter Kontakt mit der Haut oder dem Auge muss somit auf jeden Fall vermieden werden.

Fazit der umfangreichen Untersuchungen dieser Arbeit ist, dass der Einsatz der laserbasierten Unkrautkontrolle Potential hat weiterentwickelt zu werden. Ein wesentlicher Punkt ist in diesem Fall allerdings noch die Zuverlässigkeit der Bilderkennung und Unterscheidung von Unkräutern und Kulturpflanzen. Forschungen in Hohenheim (Weis und Gerhards, 2007) und auch an der Universität Bonn (Gebhardt et al., 2006; Gebhardt und Kühbauch, 2007; Rumpf et al. 2011) tasten sich langsam an die Möglichkeit heran,

Unkräuter in einem Online-Verfahren von den Kulturpflanzen zu unterscheiden und im selben Arbeitsschritt zu bekämpfen. An einem solchen selbstfahrenden System, das Abschnitte auf dem Feld mit Laserstrahlen scannt, Unkräuter erkennt und diese mit einem gezielten Photonenstoß zum Welken bringt, wird zur Zeit schon in Amerika, an der Landwirtschaftlichen Fakultät der Universität von Illinois, gearbeitet (Grift, 2007). Professor Tony Grift ist Robotik- Experte und plant zusammen mit Kollegen vom nationalen Agrarforschungszentrum Japans den Bau von sogenannten „FlockBlots“, die rund um die Uhr im Einsatz sind, gesteuert über RTK- GPS und verbunden mit dem Internet. Grift betont, dass Laser relativ preiswert und extrem präzise sind. Seiner Vorstellung nach soll ein Roboter mit mehreren Laserbeamern ausgestattet werden, die nur die Maisstängel erkennen, alles andere wäre dann Unkraut (Reichenberger, 2007; Maché, 2007).

6 Zusammenfassung

Die gesetzten Ziele, die Reaktionen des biologischen Pflanzenmaterials auf die Laserapplikation zu testen, wurden mit dieser Arbeit umfassend erfüllt und beschrieben.

Der Einsatz eines Lasers im Pflanzenschutz kann durch seine thermische Wirkung auf die Unkräuter durchaus umgesetzt werden. Allerdings gilt es die verschiedenen biologischen und technisch-physikalischen Parameter zu berücksichtigen, die den Erfolg der Unkrautkontrolle stark beeinflussen können.

Pflanzenart

Die unterschiedlichen Pflanzenarten hatten während der Untersuchungen die geringsten Auswirkungen auf den Erfolg der Unkrautkontrolle. Sowohl bei den monokotylen, als auch den dikotylen Pflanzen zeigten sich deutliche Erfolge.

Wachstumsstadium

Im Praxiseinsatz gibt das Wachstumsstadium der zu behandelnden Pflanzen das Limit für eine erfolgreiche Unkrautkontrolle mittels Laser vor. Unkräuter, die das Vierblattstadium überschritten haben, sind mit der maximal aufzubringenden Energie nicht wirkungsvoll zu schädigen.

Angriffspunkt

Die Pflanzenbasis bietet sich als gut anzuvisierender Angriffspunkt mit erfolgversprechenden Aussichten in der Unkrautbekämpfung an.

Lasertyp im Zusammenhang mit der Wellenlänge

In den Versuchen zeigte sich deutlich, dass die Art des Lasers, Faser, CO₂- oder Diodenlaser, eher eine untergeordnete Rolle für die erfolgreiche Wirkung auf das biologische Material spielte. Teilweise zeigten sich zwar Unterschiede im Behandlungserfolg, allerdings waren diese wohl weniger den Lasertypen und deren Wellenlängen als eher den variierenden Leistungen zuzuschreiben.

Leistung

Der Bekämpfungserfolg lässt sich mit der Leistung des Lasers sehr stark beeinflussen. Die Leistung kann variabel gewählt werden, sollte aber während des Applikationsvorgangs nicht weiter verändert werden.

Applikationszeit

Es wurde sehr schnell deutlich, dass die Applikationszeiten an die biologischen Gegebenheiten der Pflanzen angepasst werden mussten. Unkräuter im Keimblattstadium lassen sich schon mit einer Applikationszeit von 10 ms, bei entsprechender Leistung, dauerhaft schädigen. Bei größeren Pflanzen, bis hin zum Vierblattstadium, musste die Applikationszeit auf mindestens 50 ms heraufgesetzt werden. Dadurch konnten noch größere Pflanzen als nicht mehr bekämpfbar eingestuft werden.

Strahldurchmesser

Der Strahldurchmesser ist ebenfalls von allen anderen technischen und biologischen Parametern abhängig, und genauso beeinflusst er wiederum diese. Dem Strahldurchmesser kommt eine eher untergeordnete Rolle innerhalb der technischen Parameter zu, da der Ansatz dieser Arbeit war, möglichst zielgenau und sehr selektiv zu arbeiten.

Fazit

Um einen Lasereinsatz in der Praxis zu ermöglichen, bedarf es sicherlich noch einiger Tests und Entwicklungen auf baulicher Ebene. Wie in der vorliegenden Arbeit erläutert stellt sich vorrangig die Frage, wann der Einsatz eines Lasers zur Unkrautbekämpfung von Vorteil ist. Ein selbstfahrendes Gerät wäre von großem Nutzen, da selbsttätig über mehrere Stunden die Unkräuter erfasst und bekämpft werden könnten. Im Gewächshaus oder Gemüsebau ist der Einsatz eines solchen Gerätes auf jeden Fall denkbar und auch in angemessener Zeit zu realisieren.

7 Literaturverzeichnis

ANONYMOUS (2008): Begriffsbestimmung Unkraut aus Wikipedia der freien Enzyklopädie

ANONYMOUS (2011): Begriffsbestimmung Wärme als physikalische Größe aus Wikipedia der freien Enzyklopädie

ASCARD, J. (1994): Dose-response models for flame weeding in relation to plant size and density, *Weed Research*, 34, 377-358

ASCARD, J. (1995): Effects of flame weeding on weed species at different developmental stages, *Weed Research*, 35, 397-411

ASCARD, J. (1997): Flame Weeding: effects of fuel pressure and tandem burners, *Weed Research*, 37, 77-86

ASCARD, J. (1998): Comparison of flaming and infrared radiation techniques for thermal weed control. *Weed Research*, 38, 69-76

ASCARD, J (2007): Why are some non-chemical weed control methods adopted in practice and others not, and what can we learn from this? Proceedings: 7th EW R Workshop on Physical Weed Control, Salem, Germany, 103-104

BECK, A.; HECHT, H. (2007): CO₂-Laser Used in Minimally Invasive Laryngeal Surgery, *Biophotonics International*, 42

BERTRAM, A. (1994): Measurement of heat transfer in thermal weed control, *Acta Horticulturae*, 372, 187-192

BERTRAM, A. (1996): Geräte- und verfahrenstechnische Optimierung der thermischen Unkrautbekämpfung, Dissertation Weihenstephan

BERTRAM, A., MEYER, J. (1998): Möglichkeiten zur Kostenreduktion bei der thermischen Unkrautbekämpfung. *Zeitschrift für Pflanzenkrankheiten und Pflanzenschutz* XVI, 309 - 315.

BERTRAM, A. (2001): Mit Flammen gegen Quecke & Co.. *Neue Landwirtschaft*, Sonderheft 2001 - Mais, 78-79

BODE, L. E.; BRETHAUER, S. M. (2007): Agricultural Chemical Application Technology: A Remarkable Past And An Amazing Future, *Transactions of the ASABE*, 50 (6), 391-395

BÖCKH, P. (2004): Wärmeübertragung-Grundlagen und Praxis. Springer Verlag Berlin Heidelberg

BOHNE, B.; HENSEL, O. (2010): Entwicklung eines Kontrollsystems zur Messung des Abflammerfolges bei der thermischen Unkrautregulierung. *Landtechnik*, 1, 48-50

- CARDINA, J; NORQUAY, H.M. (1997): Seed production and seedbank dynamics in subthreshold velvetleaf (*Abutilon theophrasti*) populations. *Weed Science*, 45, 85-90
- CASINI, P; CALAMAI, P.; VECCHIO, V. (1993): Flame weeding research in Italy. *Communications 4th International Conference IFOAM, Non-chemical Weed Control*, 119-125, Association Colleque IFOAM, Dijon, France
- COOK, G.D.; DIXON, J.R.; LEOPOLD, A.C. (1964): Transpiration: Its effect on plant temperature. *Science*, 144, 546-547
- COUCH, R.; GANGSTAD, E.O. (1974): Response of water-hyacinth to laser radiation. *Weed Science*, 22 (5), 450-453
- DAAR, S. (1994): New technology harnesses hot water to kill weeds, *The IPM Practioner*, 16, 1-5
- DANIELL, J. W.; CHAPPELL, W. E., COUCH, H. B. (1969): Effect of Sublethal and Lethal Temperatures on Plant Cells, *Plant Physiology*, 44, 1684-1689
- DICKE, D.; GERHARDS, R.; BUCHSE, A.; HURLE, K. (2007): Modeling spatial and temporal dynamics of *Chenopodium album* L. under the influence of site-specific weed control. *Crop Protection*, 26 (3), 206-211
- DIERAUER, H. (2000): Merkblatt Abflammen. *Forschungsinstitut für biologischen Landbau (FiBL)*, 1-4
- DILLON, C.R.; SHEARER, S.; FULTON, J.; PITLA, S. (2007): Improved profitability via enhanced resolution of variable rate application management in grain crop production. J.V. Stafford (Ed.): *Precision Agriculture 2007*. Wageningen Academic Publishers, Wageningen
- DIVER, S. (2002): *Flame Weeding for Vegetable Crops. Appropriate Technology Transfer for Rural Areas (ATTRA)*, 1-16
- EAMES, A.J. (1936): *Morphology of Vascular Plants. Lower Groups*, McGraw-Hill, New York, In: *Esau's Pflanzenanatomie, Kapitel 1: Struktur und Entwicklung des Pflanzenkörpers- Ein Überblick*, 1-13
- EICHLER, J.; EICHLER, H.J. (2006): *Laser Bauformen, Strahlführung, Anwendungen* 6. Auflage, Springer Verlag
- ELLIOTT, B.R.; LUMB, J.M.; REEVES, T.G.; TELFORD, T.E: (1975): Yield losses in weed-free wheat and barley due to post-emergence herbicides. *Weed Research*, 15, 107-111
- EVERT, R.F. (2006): *Esau's Pflanzenanatomie- Meristeme, Zellen und Gewebe der Pflanzen- ihre Struktur, Funktion und Entwicklung*, De Gruyter
- FAO (2001): *The state of food and agriculture 2001*. *FAO Agriculture Series (SOFA)*, 33, 35

- FISCHER, A.L. (2007): Medical Laser Market on the Rise. *Biophotonics International*, 40
- FRAUNHOFER INSTITUT FÜR LASERTECHNIK (ILT) (2009): Laser in Medizintechnik und Biotechnologie, Aachen
- GATES, D.M. (1964): Leaf temperature and transpiration. *Agronomy Journal*, 56, 273-277
- GEBHARDT, S.; SCHELLBERG, J.; LOCK, R.; KÜHBAU, W. (2006): Identification of broad-leaved dock (*Rumex obtusifolius* L.) on grassland by means of digital image processing. *Precision Agriculture*, 7 (3), 165-178
- GEBHARDT, S.; KÜHBAUCH, W., (2007): Continuous mapping of *Rumex obtusifolius* during different growing periods based on automatic image classification and spatial object-relationships - the optimal time window for application. 6th Conference on Precision Agriculture
- GERHARDS, R.; OEBEL, H. (2006): Practical experiences with a system of site-specific weed control in arable crops using real-time image analysis and GPS-controlled patch spraying. *Weed Research*, 46 (3), 185-193
- GILES, D. K.; AKESSON, N. B.; YATES, W. E. (2008): Pesticide Application Technology: Research and Development and The Growth Of The Industry, *Transactions of the ASABE*, 51 (1), 397-403
- GOBOR, Z.; SCHULZE LAMMERS, P. (2007): Robotic Weed Control of the Intra-Row Area in Row Crops. 2nd Conference on Precision Crop Protection, Bonn, Germany
- GRIEPENTROG, H; NORREMARK, M; SORIANO, J.F. (2006): Close-to-crop thermal weed control using a CO₂-Laser. *Proceedings: CIGR World Congress, Agricultural Engineering for a Better World*, Bonn, Germany
- GRIFT, T. (2007): Hatch funds proposal, Advanced Machinery for Biosystems Applications, University of Illinois at Urbana-Champaign, Department of Agricultural Engineering
- HABEL, W. (1957): Über die Wirkungsweise der Egge gegen Samenunkräuter sowie die Empfindlichkeit der Unkrautarten in ihren Altersstadien gegen den Eggvorgang. *Zeitung Acker- und Pflanzenbau*, 104, 39-70
- HALLMANN, J; QUADT-HALLMANN, A.; TIEDEMANN, A. (2007): *Phytomedizin-Grundwissen Bachelor*, Stuttgart
- HANSSON, D. (2002): Hot water weed control on hard surface areas. PhD thesis, Swedish University of Agricultural Sciences, Department of Agricultural Engineering, Uppsala, Sweden
- HANSSON, D.; ASCARD, J. (2002): Influence of developmental stage and time of assessment on hot water weed control, *Weed Research*, 42, 307-316
- HANSSON, D.; MATTSSON, J. E. (2002): Effect of drop size, water flow, wetting agent and water temperature on hot-water weed control, *Crop Protection*, 21, 773-781

- HANSSON, D.; MATTSSON, J. E. (2003): Effect of air temperature, rain and drought on hot water weed control, *Weed Research*, 43, 245-251
- HEISEL, T.; SCHOU, J.; ANDREASEN, C.; CHRISTENSEN, S. (2000): Cutting weeds with a CO₂ laser, *Weed Research*, 41, 19-29
- HEISEL, T.; SCHOU, J.; ANDREASEN, C.; CHRISTENSEN, S. (2002): Using laser to measure stem thickness and cut weed stems, *Weed Research*, 42, 242-248
- HERWIG, H.; MOSCHALLSKI, A. (2009): Wärmeübertragung- Physikalische Grundlagen, Vieweg und Teubner Verlag, Wiesbaden
- HOCK, B.; FEDTKE, C.; SCHMIDT, R.R.; (1995): Herbizide- Entwicklung, Anwendung, Wirkungen, Nebenwirkungen, Georg Thieme Verlag Stuttgart/New York
- KLASSEN, H; FREITAG, J. (2004): Ackerunkräuter und Ackergräser - rechtzeitig erkennen. Landwirtschaftsverlag
- KOCH, W (1960): Untersuchungen zur Unkrautbekämpfung durch Saatpflege und Stoppelbearbeitungsmaßnahmen, Dissertation, Hohenheim
- KOCH, W.; RADEMACHER, B. (1966): Einfluß verschiedenartiger Stoppelbearbeitung auf die Verunkrautung. *Zeitschrift für Acker- und Pflanzenbau*, 123, 395-409
- KOCH, W. (1967): Untersuchungen zur Konkurrenzwirkung von Kulturpflanzen und Unkräutern aufeinander, *Weed Research*, 7, 22-28
- KUBACKI, F. (2007): Compact High-Power Diode Lasers in Dental Surgery. *Biophotonics International*, 41
- KURFESS, W. (1998): Unkrautregulierung mit Heißwasser im Obst- und Weinbau. *Landtechnik*, 53, 392-393
- KURFESS, W.; GUTBERLETT, B.; KLEISINGER, S. (1999): Heißwasser auf Unkrautpflanzen. *Landtechnik*, 54, 148-149
- METZLER, J.B. (1988): *Linder Biologie*. J.B. Metzlersche Verlagsbuchhandlung Stuttgart
- MACHE, Rainer (2007): Es werde Licht, *Flur und Furche*, 4, Ackerbau, S. 6-8
- MASTERS, A. (2007): Yellow Lasers target Macular Degeneration. *Biophotonics International*, 34-35
- MATHIASSEN, S. K.; BAK, T.; CHRISTENSEN, S.; KUDSK, P. (2006): The Effect of Laser Treatment as a Weed Control Method, *Biosystems Engineering*, 95 (4), 497-505
- MERKELBACH, H.; HEYLAND, K.U. (1988): Unkrautunterdrückung durch Untersaaten im Winterweizen und deren Auswirkung auf Ertrag und Verunkrautung der Folgekulturen

Wintergerste und Zuckerrüben. Z. Pflanzenkrankheiten und Pflanzenschutz, Sonderheft XI, 313-321

MERTENS, F.M. (2008): Räumliche Variabilität von Bodeneigenschaften mit Relevanz für das Verhalten von Herbiziden – ein Optimierungsansatz für den Präzisionspflanzenschutz. Bonner Bodenkundliche Abhandlung, 47, 137 S.

MUES, A.C.; KNUDSEN, B.E. (2007): Holmium: YAG Laser in Clinical Urology, Biophotonics International, 44

NITSCH, H.; OSTERBURG, B. (2004): Cross compliance as instrument for agri environmental policy. Landbauforschung Völk., 54 (3), 171-185

PARISH, S (1989): Investigations into thermal techniques for weed control. Proceedings of the 11th International Congress on Agricultural Engineering, Dublin, Ireland

PARISH, S. (1990): A Review of Non-Chemical Weed Control Techniques. Biological Agriculture and Horticulture, 7, 117-137

PÄTZOLD, S.; MERTENS, F.M.; BORNEMANN, L.C.; KOLECZEK, B.; FRANKE, J.; FEILHAUER, H.; WELP, G. (2008): Soil heterogeneity at the field scale: a challenge for precision crop protection. Precision Agriculture, 9 (6), 367 - 390

PINTHUS, M.J.; NATHOWITZ, Y. (1967): Response of spring wheat to application of 2,4-D at various growth stages. Weed Research, 7, 95-101

RADEMACHER, B.; OZOLINS, J. (1952): Einfluß der Getreidekonkurrenz und des Nährstoffgehalts im Keimsubstrat auf Keimung und Jugendentwicklung verschiedener Unkräuter. Angewandte Botanik, 26, 69-93

RAHKONEN, J.; JOKELA, H. (2003): Infrared Radiometry for Measuring Plant Leaf Temperature during Thermal Weed Control Treatment, Biosystems Engineering, 86 (3), 257-266

RASK, A. M.; KRISTOFFERSEN, P. (2007): A review of non-chemical weed control on hard surfaces, Weed Research, 47, 370-380

RASMUSSEN, J.; BIBBY, B. M.; SCHOU, A. P. (2008): Investigating the selectivity of weed harrowing with new methods, Weed Research, 48, 523-532

REICHENBERGER, L. (2007): Space-age war on weeds, The Furrow (Magazin) Summer

RUMPF, T.; RÖMER, C.; WEIS, M.; SÖKEFELD, M.; GERHARDS, R.; PLÜMER, L. (2011): Sequential Support Vector Machine classification for small-grain weed species discrimination with special regard to *Cirsium arvense* and *Galium aparine*. Computers and Electronics in Agriculture, 80, 89-96

TANNER, C.B. (1963): Plant temperatures. Agronomy Journal Notes, 55, 210-211

TOTAL, R. (2003): Abflammen im Lauchanbau: Unkrautbekämpfung in der Reihe. Der Gemüsebau/ Le Maraîcher, 8, 16-18

WALGENBACH, M.; DÖRPMUND, M.; XIANG, X.; VONDRICKA, J.; LUTZ, R.; SCHULZE LAMMERS, P. (2010): Construction and investigation of a field sprayer with direct nozzle injection of plant protection products. 3rd Conference on Precision Crop Protection, Bonn, Germany

WEIS, M.; GERHARDS, R. (2007): Qualitative und quantitative Messung der Verunkrautung in Kulturpflanzenbeständen mittels Bildanalyse. Bornimer Agrartechnische Berichte, 60, 67-74

WERNER, A. (2004) Was ist Precision Farming? Precision Farming-Analyse, Planung und Umsetzung in die Praxis. KTBL-Schrift, Darmstadt, 1-5

WÖLTJEN, C.; HAFERKAMP, H.; RATH, T.; HERZOG, D. (2008): Plant growth depression by selective irradiation of the meristem with CO₂ and diode lasers, Biosystems Engineering, 101, 316-324

Danksagung

Mein besonderer Dank gilt Herrn Dr. Damerow für die ständige Unterstützung und den regen Ideenaustausch, besonders bei verfahrenstechnischen Problemen.

Bei Herrn Prof. Schulze Lammers bedanke ich mich ganz besonders für die Bereitstellung des Themas und die Übernahme der Doktorvaterschaft.

Herrn Prof. Noga danke ich sehr für die Übernahme des Korreferats und die gute Zusammenarbeit.

Des weiteren bin ich sehr dankbar, daß Herr Dr. Petring mir die Möglichkeit gab meine Versuche am Fraunhofer Institut für Lasertechnik durchführen zu können. In diesem Zusammenhang gebührt mein allergrößter Dank Frank Schneider und Vahid Nazery, ohne deren Hilfe die Realisierung dieser Dissertation nicht möglich gewesen wäre.

Frau Dr. Lankes und Birgitta Kitten danke ich für die Möglichkeit im Institut für Obst- und Gemüsebau in Bonn meine Unkräuter zu kultivieren und die Unterstützung bei der Realisierung.

Herr Knut Wichterich ist für die fantastischen Aufnahmen der Unkräuter durch das Rasterelektronenmikroskop zu danken.

Bei Frau Monika Förster möchte ich mich ganz herzlich für die graphische Unterstützung bedanken und dafür, daß sie mir stets mit Rat und Tat zur Seite gestanden hat.

Meinem Kollegen Christian Peveling-Oberhag danke ich ganz besonders für die ständige und bedingungslose Unterstützung, die sehr zum Gelingen der Versuche beigetragen hat.

Herrn Prof. Dr. Rath und Herrn Christian Marx danke ich für die konstruktive Zusammenarbeit und den erfolgreichen Ideenaustausch.

Ebenso danke ich allen Mitgliedern des Graduiertenkollegs „Use of Information Technologies for Precision Crop Protection“ (GK722) für die Unterstützung während der Promotion.

Ein großes „Danke“ an meine Eltern und Geschwister, die immer für aufmunternde Worte und Durchhalteparolen verantwortlich waren.

Zuletzt möchte ich mich bei meinem Freund André bedanken, der nie die Geduld mit mir verloren, mich unterstützt und aufgemuntert hat.