

Inhaltsverzeichnis

1	Pflanzenbau und Pflanzenschutz	1
1.1	Anteil von Herbiziden an Pflanzenschutzmitteln	1
1.2	Was sind Unkräuter?	4
1.2.1	Definition des Begriffs „Unkraut“	4
1.2.2	Ursprung der Unkräuter	5
1.2.3	Unkrautgruppen	5
1.2.4	Keimungsanforderungen	6
1.2.5	Lebensdauer von Unkrautsamen und Unkräutern	8
1.2.6	Gibt es eine Klasse der Ackerunkräuter?	8
1.2.7	Sigmoides Wachstum von Unkrautgesellschaften	9
1.2.8	Konkurrenz mit Kulturpflanzen	10
1.2.9	Ertragsverluste durch Unkräuter	11
1.2.10	Schadwirkungen	12
1.2.11	Nützliche Effekte	13
1.2.12	Bekämpfung und Schadensschwelle	13
1.2.13	Kulturpflanzen als Schadpflanzen	14
1.3	Wie bekämpft man Unkräuter?	14
1.3.1	Hacken und Jäten	14
1.3.2	Präventive Verfahren im integrierten Pflanzenbau	15
1.3.3	Mechanische Unkrautbekämpfung	15
1.3.4	Physikalische Methoden	16
1.3.5	Biologische Bekämpfung	17
1.3.6	Chemische Verfahren	17
1.3.7	Unkrautmanagementsysteme	20
2	Entwicklung und Anwendung von Herbiziden	22
2.1	Die Anfänge der chemischen Unkrautbekämpfung	22
2.2	Verschiedene Möglichkeiten zur Klassifizierung von Herbiziden	23
2.2.1	Wirkung über den Boden	24
2.2.2	Aufnahme über das Blatt	26
2.2.3	Selektive Wirkung	26
2.3	Selektive Einsatzmöglichkeiten von Herbiziden	28
2.3.1	Getreideherbizide	28
2.3.2	Herbizidanwendungen bei Ölsaaten	34

2.3.3	Herbizide für Knollen- und Wurzelfrüchte	36
2.3.4	Baumwollherbizide	38
2.3.5	Herbizide für den Gemüsebau	39
2.3.6	Herbizide im Obst- und Weinbau	39
2.3.7	Herbizide in Plantagen	40
2.3.8	Herbizide in Grünland und auf Grünflächen	41
2.3.9	Herbizide im Forst	41
2.4	Entwicklung neuer Herbizide	41
2.4.1	Entwicklungsdauer und Entwicklungskosten	41
2.4.2	Braucht man neue Herbizide?	43
2.4.3	Entdeckung und Synthese neuer Herbizide	43
2.4.4	Gewächshaustests zum Auffinden neuer Herbizide	50
2.4.5	Labortests und Gewächshausscreening	54
2.4.6	Tests in Klimazellen	55
2.4.7	Die Vegetationshalle als Versuchsort zwischen Gewächshaus und Freiland	55
2.4.8	Erste Freilandversuche in Kleinparzellen	56
2.4.9	Großversuche zur Registrierung und Praxiseinführung	56
2.5	Auf die richtige Formulierung kommt es an	57
2.6	Nachweis von Herbiziden	58
2.6.1	Rückstände	60
2.6.2	Biotests zum Nachweis von Herbiziden	67
2.6.3	Die Rolle der Immunassays	68
3	Aufnahme und Transport	72
3.1	Zusammenhang zwischen pflanzlicher Bauweise und Herbizidaufnahme	72
3.2	Aufnahme über die Wurzel	74
3.2.1	Eintritt in den Apoplasten	75
3.2.2	Eintritt in den Symplasten	76
3.2.3	Weitertransport in den Xylembahnen	77
3.3	Aufnahme über das Blatt	79
3.3.1	Die Cuticula als Hauptbarriere für die Aufnahme von Herbiziden	80
3.3.2	Physikalische Grundlagen der Herbizidaufnahme durch die Cuticula	80
3.3.3	Der Konzentrationsgradient als treibende Kraft für den Durchtritt der Herbizide durch die Cuticula	81
3.3.4	Cuticulastruktur: hoher Widerstand für den Durchtritt polarer Substanzen	81
3.3.5	Voraussetzungen für den Durchtritt von Herbiziden durch die Cuticula	82
3.3.6	Warum Stomata nicht als Eintrittspforten für gelöste Herbizide genutzt werden können	84
3.4	Translokation im Phloem	84
3.4.1	Richtung des Phloemtransports: Quellen-Senken-Beziehungen	85
3.4.2	Merkmale der Phloemmobilität von Herbiziden	85

4	Wirkursachen und Wirkorte in Zell-Kompartimenten, Zellen und Geweben	92
4.1	Molekulare Aspekte der Herbizidwirkung	92
4.2	Vom Wirkmechanismus zur Wirkung: primäre, sekundäre und tertiäre Wirkungen	93
4.3	Wirkungen, Nebenwirkungen und Folgewirkungen	96
4.4	Herbizid-Wirkorte im Chloroplast	101
4.5	Direkte und indirekte Membran-Wirkungen	102
4.6	Wirkungen auf Mitose und Zellteilung in Gräsern	102
4.7	Morphologische und morphogenetische Wirkungen	106
4.8	Wirkungen von Herbiziden auf Luftabschlußgewebe und Verdunstungsschutz	106
5	Struktur und Funktion von Elektronentransport-Systemen	110
5.1	Plastochinon-Antagonisten im Photosystem II	110
5.1.1	Photosystem II und photosynthetischer Elektronentransport: eine kurze Einführung	110
5.1.2	Strukturgruppen und Herbizide	115
5.1.3	Der herbizidbindende D1/D2-Proteinkomplex	126
5.1.4	D1-Mutationen in Algen und Cyanobakterien	127
5.1.5	Triazinresistente Unkräuter mit verringerter Vitalität	128
5.1.6	Schädigungsmechanismen und Schadbilder nach Blockierung des photosynthetischen Elektronentransports	129
5.1.7	Folgewirkungen subletaler Photosynthesehemmung in Kulturpflanzen	131
5.2	Elektronenübertragung von Photosystem I auf autoxidable Redox-Verbindungen	131
5.2.1	Verfügbarkeit von „Low Potential Elektronen“ im Pflanzenstoffwechsel	131
5.2.2	Bedingungen für herbizide Redoxkatalysatoren	134
5.2.3	Bipyridin-Herbizide und endogene Mechanismen zur Vermeidung von Photooxidationen	135
5.2.4	Ursachen der Paraquat-Resistenz	138
5.3	Hemmung der Porphyrinsynthese	140
5.3.1	Das Paradox der Protoporphyrinogen-Oxidase-Hemmung	140
5.3.2	Hemmstoffe der Protoporphyrinogen-Oxidase (PPGO)	142
5.3.3	Auffindung des PPGO-Wirkortes	147
5.3.4	PPGO-Hemmstoff-Wirkung durch Sauerstoff-Aktivierung	148
5.4	Chlorose: Störung der Mechanismen des Überstrahlungsschutzes	151
5.4.1	Synthese und Funktion von Carotinoiden in Chloroplasten	151
5.4.2	Herbizide mit Chlorose-Wirkung	151
5.4.3	Photosynthese, Chloroplastenentwicklung und Carotine	157
5.4.4	Beziehungen zur Biosynthese von Abscisinsäure	158
5.5	Störungen mitochondrialer Energiegewinnung	158
5.5.1	Chemiosmotische ATP-Synthesen	158
5.5.2	Biozide als Entkoppler des Elektronentransports	159
5.5.3	Folgen einer zellulären Energiekrise	161

6	Herbizid-Wirkungen auf Aminosäure-Synthesen	167
6.1	Vom Nitrat zum Ammoniak: der Weg zu den Aminosäuren	167
6.1.1	Natriumchlorat: ein Analog für Nitrat	168
6.1.2	Die Einschleusung von Ammonium in den Stoffwechsel	169
6.1.3	Hemmung der Glutamin-Synthetase durch Glufosinate und analoge Strukturen	170
6.1.4	Ammoniak-Vergiftung durch Glufosinate?	170
6.2	Acetolactat-Synthase: ein ideales Herbizid-Target?	174
6.2.1	Herbizide Hemmstoffe der Acetolactat-Synthase (ALS)	174
6.2.2	Die Herbizid-Bindenische der ALS: ein Relikt der Evolution?	181
6.2.3	Folgen einer ALS-Hemmung durch Herbizide für die behandelten Pflanzen	183
6.2.4	Resistenz-Mutationen in der Acetolactat-Synthase	186
6.3	Ein herbizider Hemmstoff der Ketolsäure-Reduktoisomerase	188
6.4	Das Erfolgsherbizid Glyphosat	189
6.4.1	Die Synthese der aromatischen Aminosäuren: kurzer Überblick	190
6.4.2	Hemmung der Enolpyruvylshikimat-3-phosphat-Synthase (EPSPS) durch Glyphosat	190
6.4.3	Reaktion der Pflanze auf den Ausfall der Neusynthese aromatischer Aminosäuren	193
6.4.4	Künstlich erzeugte Resistenzmutationen gegen Glyphosat	194
6.5	Hemmung der Histidin-Biosynthese durch Amitrol	195
7	Herbizide, die überwiegend oder ausschließlich außerhalb der Chloroplasten wirken	200
7.1	Das Mikrotubuli-System: Angriffsort für Herbizide	200
7.1.1	Reversible Polymerisation des Tubulin im Zellzyklus	200
7.1.2	Strukturgruppen, Herbizide und ihre Wirkungen	202
7.1.3	Mögliche Herbizid-Wirkorte im Mikrotubuli-System	208
7.1.4	Wachstumsstörungen nach Verlust der Mikrotubuli-Funktionen	209
7.1.5	Resistenzmechanismen	209
7.2	Hemmung der Cellulose-Synthese	211
7.2.1	Herbizide Hemmstoffe der Cellulose-Synthese	211
7.2.2	Hemmung der Cellulose-Synthese in vivo und Probleme bei der In-vitro-Messung	211
7.2.3	Folgewirkungen und Nebenwirkungen	212
7.3	Fettsäuresynthese und Membranfunktion	213
7.3.1	Hemmstoffe der Acetyl-CoA-Carboxylase	215
7.3.2	Chloracetamide und Oxyacetamide	224
7.3.3	Hemmung der Synthese sehr langkettiger Fettsäuren (VLCFA) durch Thiolcarbamate	229
7.3.4	Ethofumesate, Dalapon und ihre Verwandten	233
7.3.5	Gemeinsames und Trennendes beim Vergleich von Chlor- und Oxyacetamiden mit Thiolcarbamaten	234

7.4	Herbizide mit Auxin-Wirkung	235
7.4.1	Zur Wirkungsweise der Auxine	235
7.4.2	Strukturen von Auxin-Herbiziden	236
7.4.3	Reversible und irreversible Metabolisierungen bei natürlichen und künstlichen Auxinen	239
7.4.4	Auxin-Herbizide wirken in drei Phasen	240
7.5	Einige herbizide Spezialitäten	240
7.5.1	Ein herbizider Hemmstoff der Steroid-Biosynthese	241
7.5.2	Cinmethylin: ein neuartiger Mitose-Hemmstoff	241
7.5.3	Chinoide Algizide	241
7.5.4	Dimethylbenzylamide gegen Gräser in Reis	244
7.5.5	Asulam: ein Hemmstoff der 7,8-Dihydropteroatsynthase	244
8	Metabolismus, Toleranz und Resistenz	250
8.1	Mechanismen der Selektivität: Kulturpflanzen-Toleranz und Unkraut-Resistenz	250
8.2	Toleranzmechanismen in Kulturpflanzen: natürlich vorhandene und künstlich eingeführte	251
8.3	Herbizid-Entgiftung in Pflanzen: ein Vorgang in drei Stufen	252
8.3.1	Herbizid-Aktivierung und -Inaktivierung durch Hydrolysen	252
8.3.2	Hydroxylierung, Oxygenierung, Oxidation und Reduktion	255
8.3.3	Konjugation mit Zuckern	255
8.3.4	Konjugation mit Glutathion	257
8.3.5	Konjugation mit Aminosäuren	257
8.3.6	Metabolisierung und Verbleib von Konjugaten	257
9	Safener, Synergisten und Additive	262
9.1	Verbesserung der Kulturpflanzenverträglichkeit durch Safener	262
9.1.1	Evolution des Safener-Konzepts	262
9.1.2	Dichloracetamid-Safener und ihre Verwandten	263
9.1.3	Safener zur Saatgutbehandlung	264
9.1.4	Safener der dritten Generation	264
9.1.5	Beschleunigung der Herbizid-Entgiftung in den Kulturpflanzen durch Safener	266
9.1.6	Das Rätsel der primären Safener-Wirkung	269
9.2	Synergisten zur Verbesserung der Unkraut-Wirkung oder als Resistenz-Brecher	270
9.3	Formulierungs-Additive zur Förderung der Penetration durch die Blattoberfläche	273
10	Verbleib in der Umwelt	279
10.1	Verhalten im Boden	279
10.1.1	Persistenz	279
10.1.2	Transportvorgänge im Boden	281
10.1.3	Umwandlungsprozesse	292
10.1.4	Gebundene Rückstände	298

10.1.5	Simulationsmodelle	300
10.1.6	Auflagen hinsichtlich des Verbleibs von Herbiziden im Boden	302
10.2	Verbreitung in Luft und Wasser	303
10.2.1	Verbreitung über die Luft	303
10.2.2	Verhalten in Gewässern	307
11	Wirkungen in der Umwelt	311
11.1	Wird der Boden durch Herbizide geschädigt?	312
11.1.1	Bodenmikroflora und Herbizide	312
11.1.2	Einfluß von Herbiziden auf spezielle Bodenbakterien und -pilze	317
11.1.3	Bedeutung der Regenwürmer für die Bodenfruchtbarkeit	317
11.1.4	Herbizidnebeneffekte auf weitere Organismen der Bodenfauna	318
11.1.5	Schutz von Bienen	320
11.1.6	Nebenwirkungen auf Vögel und Säugetiere	321
11.1.7	Herbizide und ihre Nebenwirkungen auf Nützlinge	322
11.2	Herbizide und der aquatische Lebensbereich	324
11.2.1	Herbizideffekte bei Algen	325
11.2.2	Nebeneffekte bei Daphnien	325
11.2.3	Nebeneffekte von Herbiziden bei Fischen	326
11.3	Modellökosysteme – ein Ersatz für Freilandtests?	327
11.3.1	Laborökosysteme	327
11.3.2	Freilandökosysteme	327
11.4	Toxikologische Tests; Abwendung von Gefahren für Mensch und Tier	328
11.4.1	Akute Giftigkeit für Anwender wichtig	329
11.4.2	Chronische Toxizität	330
11.4.3	Abklärung eines Gesundheitsrisikos durch zusätzliche toxikologische Tests	334
11.4.4	Sind Tierversuche auf den Menschen übertragbar und ethisch vertretbar?	334
11.4.5	Maßnahmen bei Vergiftungen mit Herbiziden	335
12	Gesetzliche Auflagen, Registrieranforderungen und Richtlinien	338
12.1	Gesetzliche Anforderungen	338
12.2	Richtlinien	343
13	Ausblick	344
13.1	Zukunft der Herbizide und künftige Strategien in der Unkrautbekämpfung	344
13.2	Akzeptanz und Akzeptabilität der Herbizidanwendung	347
Sachverzeichnis		350