

**Institut für Betriebslehre der Agrar- und Ernährungswirtschaft
der Justus-Liebig-Universität Gießen
Lehrstuhl für landwirtschaftliche Betriebslehre
Prof. Dr. Dr. h. c. F. Kuhlmann**

Ökonomik teilflächenorientierter Unkrautbekämpfung

Dissertation
zur Erlangung des Doktorgrades
der Justus-Liebig-Universität
Gießen

Dipl.-Ing. agr. Thore Toews

vorgelegt am 18.07.2005

Tag der mündlichen Prüfung: 23. September 2005

Prüfungsvorsitzender: Prof. Dr. A. Evers

1. Berichterstatter: Prof. Dr. Dr. h. c. F. Kuhlmann

2. Berichterstatter: Prof. Dr. B. Honermeier

1. Prüfer: Prof. Dr. M. Schmitz

2. Prüfer: Prof. Dr. S. Bauer

DANKSAGUNG

Besonderer Dank gilt der Volkswagen-Stiftung für die finanzielle Unterstützung des Forschungsprojekts. Darüber hinaus bedanke ich mich bei Herrn Prof. Kuhlmann für die fachliche Unterstützung und die konstruktiven Anregungen. Aus zahlreichen Diskussionen mit Kollegen, Mitarbeitern der Biologischen Bundesanstalt vom Institut für Unkrautforschung, Herrn Prof. Zwerger und Herrn Dr. Nordmeyer, meiner Familie und Freunden entstanden viele hilfreiche Anregungen und neue Ideen, ohne die diese Arbeit in der jetzigen Form nicht zustande gekommen wäre.

Für die Durchsicht und Korrektur bedanke ich mich bei meiner Schwester Dagmar Toews. Für ihre Geduld und dafür, dass sie einen erheblichen Anteil zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen hat, indem sie sich um unsere drei Kinder gekümmert hat, bedanke ich mich bei meiner Frau Daniela Toews.

ABSTRACT

This study aims to evaluate the profitability of precision farming as a means of spatially variable weed control. This is based on the theory that a uniform application of pesticides as practiced in conventional farming leads to over- and under -applications because weeds are spread unevenly across fields. Decisions on small scale spatial variation of applied pesticides are based on thresholds of weed levels. Experimental studies conducted in the past were unable to assess the economic potential of site specific weed control, because the time scales were usually too small and the assessment of the spatial distribution of weeds were often insufficiently precise. In addition, empirical experiments only describe results realised under specific locational and climatic conditions.

This study developed the computer-based simulation model „Weed Control“ in order to evaluate the economic potential of variable weed control in grains. The model takes into account the current academic knowledge of crop production concerning competition and population behaviour of weeds. Since current knowledge does not allow an unequivocal value for many model parameters, those interested can use the model to run their own simulation experiments. The program first numerically simulates the threshold for pesticide application over time only. Then, the calculation can be performed over both area and time, using a cellular automata. All model simulations can be run stochastically as well as deterministically.

A large number of simulation experiments were undertaken and are described. Depending on the reference of conventional whole field application and the precision of the variable pesticide application, savings of between –25 and + 40 €/ha can be made. To use the threshold concept for the decision to apply pesticides, competitiveness effect and the population dynamics of weed have to be projected. This projection is uncertain and the stochastic simulations show that the variance of the results and therefore the risk associated with the variable pesticide application is higher than with a prophylactic application strategy for the whole field. The increased cost for precision farming technology is 10 – 20 €/ha with optimistic assumptions, so that under present conditions and current scientific understanding the economic potential for variable pesticide application is estimated to be small. The thesis also describes farm experiments by the BBA (Biologische Bundesanstalt) on variable herbicide application. The experiments support the conclusions of the model simulations.

INHALTSVERZEICHNIS

1	EINLEITUNG	1
1.1	Problemstellung.....	1
1.2	Zielsetzung	3
1.3	Vorgehensweise.....	3
2	PFLANZENBAU – UNKRAUTMANAGEMENT	5
2.1	Ökonomische Einführung.....	5
2.2	Ökologie der Unkräuter.....	7
2.3	Integrierte Unkrautbekämpfung	8
2.3.1	Fruchtfolge	9
2.3.2	Aspekte zur Aussaat	10
2.3.3	Unkrautunterdrückungsvermögen des Getreides	12
2.3.4	Grundbodenbearbeitung	12
2.3.5	Stoppelbearbeitung	14
2.3.6	Düngung	15
2.4	Chemische Unkrautkontrolle	15
2.5	„Factor-adjusted doses-Strategie“	16
2.5.1	Untersuchung zur Wirksamkeit von Herbiziden	17
2.5.2	Umsetzung der <i>factor-adjusted doses</i> Strategie	18
3	SCHADSCHWELLEN	20
3.1	Statische Schadschwellen.....	20
3.1.1	Bestimmung des optimalen Herbizidaufwandes	22
3.1.2	Berücksichtigung von Risiko	26
3.2	Dynamische Schadschwellen	27

3.2.1	Einfaches dynamische Schadschwellenmodell nach WALLINGA (1998)	30
3.3	Fehlende praktische Anwendung des ganzflächigen Schadschwellenkonzeptes..	33
4	TEILFLÄCHENUNKRAUTBEKÄMPFUNG.....	35
4.1	Räumliche Verteilung von Unkräutern.....	35
4.2	Erstellung von Unkrautverteilungskarten	37
4.3	Automatische Unkrauterfassung	39
4.4	Teilflächenspezifische Wirkstoffapplikation	41
4.5	Ergebnisse anderer Arbeiten zur Teilflächenunkrautbekämpfung	43
5	MODELLKONSTRUKTION.....	47
5.1	Populationsdynamisches Modell.....	50
5.1.1	Keimung und Auflaufen.....	52
5.1.2	Bodenwendung durch den Pflug	55
5.1.3	Überlebenswahrscheinlichkeit der Keimlinge	55
5.1.4	Samenbildung	60
5.1.5	Überlebensrate der Samen im Boden	64
5.1.6	Herbizidauswahl.....	66
5.2	Negative Effekte durch Unkräuter	68
5.2.1	Funktionen zur Beschreibung von Konkurrenzeffekten	69
5.2.2	Quantifizierung der Ertragsminderungen durch Unkräuter	73
5.2.3	Empirische Untersuchungen zu Qualitätsminderungen durch Unkräuter.....	79
5.2.4	Trocknungskosten	82
5.2.5	Fremdbesatz	84
5.2.6	Erntebehinderung	85
5.2.7	Zwischenfazit zu negativen Effekten durch Unkräuter.....	86
5.3	Monte-Carlo-Simulation; Wahrscheinlichkeiten, Korrelationen.....	87
5.4	Berechnung von dynamischen Schadschwellen.....	89
5.4.1	Deterministisches Modell.....	89

5.4.2	Stochastisches Modell	95
5.4.3	Erweiterung der Fruchtfolge um Zuckerrüben	99
5.5	Räumliche Erweiterung des Modells	105
5.5.1	Zellulärer Automat	105
5.5.2	Randbedingungen	107
5.5.3	Ausbreitung von Unkrautsamen	108
5.5.4	Ausgangsverteilung	111
5.5.5	Unkrautbekämpfungsstrategien	119
5.5.6	Teilflächenspezifische Unkrautbekämpfungsstrategien	121
5.5.7	Reihenfolge der Herbizidentscheidung	124
5.6	Darstellung der Kosten	124
6	SIMULATIONSSTUDIEN – ERGEBNISSE	126
6.1	Dynamische Schadschwellen	126
6.2	Simulationsstudien – räumliches Modell	128
6.2.1	Ergebnisse für eine WW-Monokultur	129
6.2.2	Modellergebnisse für die Fruchtfolge WW, WW, WW, ZR	143
6.2.3	Besteuerung von Herbiziden bzw. höhere Mittelpreise	145
6.3	Zusammenfassung: Leistungen der TFU	146
7	KOSTEN DER ZUSÄTZLICHEN <i>PRECISION FARMING</i> TECHNIK	147
7.1	Anschaffungs-, Versicherungs und Reparaturkosten	147
7.2	Notwendiger Wasseraufwand, Nachfüllzeiten	147
7.3	Kostenkalkulation	148
8	VERSUCHE ZUR TEILFLÄCHENSPEZIFISCHEN UNKRAUTBEKÄMPFUNG AUF EINEM PRAXISBETRIEB	152
8.1	Winterweizen	153
8.1.1	Winterweizenerträge	153
8.1.2	Herbizidaufwand im Winterweizen	155

8.2	Wintergerste	155
8.2.1	Wintergerstenerträge	155
8.2.2	Herbizidaufwand in Wintergerste	156
8.3	Zuckerrüben	157
8.4	Zusammenfassung der Betriebsdatenauswertung	159
9	DISKUSSION	160
10	PROGRAMMBESCHREIBUNG (GO THROUGH)	167
10.1	„Weed Control (zeitliche Modellumgebung)“	168
10.2	„Parameteranpassung“ (Abbildung 51)	170
10.3	„Weed Control (räumliche Modellumgebung)“	171
10.4	Systematischer Vergleich zwischen unterschiedlichen Unkrautbekämpfungsstrategien	173
11	ZUSAMMENFASSUNG	175
12	SUMMARY	177
13	QUELLENVERZEICHNIS	179

VERZEICHNIS DER ABBILDUNGEN

ABBILDUNG 1: ENTWICKLUNG DES HERBIZIDVERBRAUCHES IN DÄNEMARK, DEUTSCHLAND UND DER EU-15	19
ABBILDUNG 2: STATISCHE SCHADSCHWELLE.....	21
ABBILDUNG 3: STANDARD DOSE-RESPONSE-KURVE: WIRKSAMKEIT EINES HERBIZIDES IN ABHÄNGIGKEIT VON DER DOSIS BEI UNTERSCHIEDLICHEN ANWENDUNGSBEDINGUNGEN	23
ABBILDUNG 4: LEISTUNGEN UND KOSTEN EINER HERBIZIDMAßNAHME IN ABHÄNGIGKEIT VON DER UNKRAUTDICHTEN UND DER HERBIZIDDOSIS	25
ABBILDUNG 5: WAHRSCHEINLICHSCHWELLEN NOTWENDIGER HERBIZIDDOSIS ZUR ERREICHUNG EINER 90%-WIRKUNG BEI UNTERSCHIEDLICHER INFORMATIONSBASIS	27
ABBILDUNG 6: POPULATIONSDYNAMIK (FRÜHJAHRSAUFLAUF) IN ABHÄNGIGKEIT VON 4 UNTERSCHIEDLICHEN BEKÄMPFUNGSSCHWELLEN	29
ABBILDUNG 7: POPULATIONSDYNAMIK DES EXPONENTIELLEN WACHSTUMSMODELLS	31
ABBILDUNG 8: ERMITTELTE UNKRAUTDICHTEN (SUMME DIKOTYLER UNKRÄUTER OHNE <i>GALIUM APARINE</i>) AUF DEM SCHLAG B244 IN DEN JAHREN 1999, 2001 UND 2003	34
ABBILDUNG 9: DIFFERENZBILD AUS DEM INFRAROT- UND DEM BLAU-KANAL ZUR ABGRENZUNG LEBENDER PFLANZEN VOM BODEN	41
ABBILDUNG 10: MERKMALE EINES SYSTEMMODELLS.....	47
ABBILDUNG 11: POPULATIONSMODELL.....	51
ABBILDUNG 12: ÜBERLEBENSWAHRSCHEINLICHKEIT VON <i>GALIUM APARINE</i> KEIMLINGEN IN ABHÄNGIGKEIT VON DER DICHTEN UND UNTERSCHIEDLICHEN UMWELTBEDINGUNGEN	60
ABBILDUNG 13: DICHTENABHÄNGIGKEIT DER SAMENPRODUKTION VON <i>POLYGONUM CONVOLVULUS</i>	61
ABBILDUNG 14: HYPERBOLISCHE ERTRAGSVERLUSTFUNKTION NACH COUSENS (1985)	71
ABBILDUNG 15: BEZIEHUNG ZWISCHEN ABSOLUTEM WINTERGERSTENERTRAG [DT/HA] UND DER DICHTEN VON <i>VIOLA ARVENSIS</i>	72
ABBILDUNG 16: GRENZERTRAGSVERLUSTE UNTERSCHIEDLICH KONKURRENZSTARKER UNKRÄUTER.....	78
ABBILDUNG 17: TROCKNUNGSKOSTEN NACH LANDWIRTSCHAFTSKAMMER HANNOVER	83
ABBILDUNG 18: GESAMTKOSTEN UNTERSCHIEDLICHER BEKÄMPFUNGSSCHWELLEN BEI EINER STARTVERUNKRAUTUNG VON 20 UNKRÄUTERN JE M ²	92
ABBILDUNG 19: JÄHRLICHE GESAMTKOSTEN UNTERSCHIEDLICHER BEKÄMPFUNGSSCHWELLEN UND UNTERSCHIEDLICHEN STARTVERUNKRAUTUNGEN	92

ABBILDUNG 20: MITTLERE JÄHRLICHE GESAMTKOSTEN, DIE SICH IM DURCHSCHNITT BEI EINER AUSGANGSVERUNKRAUTUNG ZWISCHEN 5 UND 50 UNKRÄUTERN/M ² ERGEBEN.	94
ABBILDUNG 21: KOSTEN UNTERSCHIEDLICHER BEKÄMPFUNGSSCHWELLEN FÜR DIKOTS IM STOCHASTISCHEN MODELL	97
ABBILDUNG 22: ZUSÄTZLICHE KOSTEN DURCH DIKOTS IN ZUCKERRÜBEN	103
ABBILDUNG 23: BEISPIELE FÜR UNTERSCHIEDLICHE NACHBARSCHAFTSBEZIEHUNGEN.....	106
ABBILDUNG 24: NACHBARSCHAFTSUMGEBUNG IM VERWENDETEN SIMULATIONSMODELL	107
ABBILDUNG 25: BEISPIELE FÜR UNTERSCHIEDLICHE RANDBEDINGUNGEN BEI EINEM 1-DIMENSIONALEN ZELLULÄREN AUTOMATEN	108
ABBILDUNG 26: ERMITTELTE UNKRAUTDICHTEN (FRÜHJAHRSAUFNAHMEN) AUF DEM SCHLAG SPORTPLATZ WEST IN DEN JAHREN 2000 - 02	113
ABBILDUNG 27: GRÖÖE DER UNKRAUTNESTER	116
ABBILDUNG 28: BEISPIEL EINER AUSGANGSVERUNKRAUTUNG: UNKRAUTDICHTEN (KEIMPFLANZEN/M ²) ENTSPRECHEND VERTEILUNG 2A; GRÖÖE DER UNKRAUTNESTER 267 ZELLEN (C).....	118
ABBILDUNG 29: UNKRAUTKARTE UND DIE DARAUS RESULTIERENDEN BEHANDLUNGSKARTEN BEI UNTERSCHIEDLICHEN STARTPUNKTEN	123
ABBILDUNG 30: HERBIZIDAUFWENDUNGEN BEI UNTERSCHIEDLICH GROÖEN UNKRAUTNESTERN (IN T=0) IN ABHÄNGIGKEIT VOM PRÄZISIONSNIVEAU DER TFU	132
ABBILDUNG 31: KONKURRENZEFFEKTE BEI UNTERSCHIEDLICH GROÖEN UNKRAUTNESTERN (IN T=0) IN ABHÄNGIGKEIT VOM PRÄZISIONSNIVEAU DER TFU	133
ABBILDUNG 32: GESAMTKOSTEN BEI UNTERSCHIEDLICH STARK AGGREGIERTEN ANFANGSVERUNKRAUTUNGEN (GRÖÖE DER UNKRAUTNESTER) IN ABHÄNGIGKEIT VON DER UNKRAUTBEKÄMPFUNGSSTRATEGIE	134
ABBILDUNG 33: HERBIZIDAUFWAND UND KONKURRENZEFFEKTE BEI UNTERSCHIEDLICHEN BEKÄMPFUNGSSTRATEGIEN	135
ABBILDUNG 34: GESAMTKOSTEN FÜR UNTERSCHIEDLICHE HÄUFIGKEITSVERTEILUNGEN DER UNKRÄUTER.....	137
ABBILDUNG 35: HÄUFIGKEITSVERTEILUNGEN DER DURCHSCHNITTlichen GESAMTKOSTEN (12 JAHRE) FÜR DIE AUSGANGSVERTEILUNG 1A MIT EINER UNKRAUTNESTERGRÖÖE VON 267 ZELLEN	138
ABBILDUNG 36: GEGENÜBERSTELLUNG VON HERBIZIDAUFWAND UND KONKURRENZEFFEKTEN BEI „NORMALER“ UNKRAUTSAMENPRODUKTION UND VERDOPPELTER SAMENPRODUKTION IN ABH. VON DER UNKRAUTBEKÄMPFUNGSSTRATEGIE	139

ABBILDUNG 37: GESAMTKOSTEN BEI ANNAHME EINER VERDOPPELTEN SAMENPRODUKTION UND VERDOPPELTER KONKURRENZEFFEKTE FÜR DIE AUSGANGSVERTEILUNG 1A	140
ABBILDUNG 38: HÄUFIGKEITSVERTEILUNGEN DER DURCHSCHNITTlichen GESAMTKOSTEN (12 JAHRE) FÜR DIE AUSGANGSVERTEILUNG 1A MIT EINER UNKRAUTNESTERGRÖÖE VON 267 ZELLEN BEI ANNAHME EINER VERDOPPELTEN UNKRAUTSAMENPRODUKTION UND VERDOPPELTER KONKURRENZINDIZES	141
ABBILDUNG 39: KOSTENDIFFERENZEN DER DURCHSCHNITTlichen JÄHRLICHEN GESAMTKOSTEN BEI ANNAHME VERMINDERter HERBIZIDER WIRKUNGSGRADe.....	143
ABBILDUNG 40: HERBIZIDAUFWAND, KONKURRENZEFFEKTE IM GETREIDE UND ZUSÄTZLICHE HERBIZIDAUFWENDUNGEN IN ZUCKERRÜBEN BEI UNTERSCHIEDLICHEN BEKÄMPFUNGSSTRATEGIEN	144
ABBILDUNG 41: HÄUFIGKEITSVERTEILUNGEN DER DURCHSCHNITTlichen GESAMTKOSTEN (12 JAHRE) FÜR DIE AUSGANGSVERTEILUNG 1A MIT EINER UNKRAUTNESTERGRÖÖE VON 267 ZELLEN, FÜR DIE FRUCHTFOLGE WW, WW, WW, ZR IN ABH. VON DREI UNTERSCHIEDLICHEN UNKRAUTBEKÄMPFUNGSSTRATEGIEN	145
ABBILDUNG 42: WW-ERTRÄGE VON 1996 – 2003	154
ABBILDUNG 43: WW-ERTRÄGE 2003 IN ABHÄNGIGKEIT VOM AUSSAATDATUM.....	154
ABBILDUNG 44: HERBIZIDAUFWAND IM WINTERWEIZEN VON 1996 – 2003.....	155
ABBILDUNG 45: WG-ERTRÄGE VON 1996 – 2003	156
ABBILDUNG 46: HERBIZIDAUFWAND IN WINTERGERSTE VON 1996 – 2003	157
ABBILDUNG 47: ZUCKERRÜBENERTRÄGE VON 1995 – 2003	157
ABBILDUNG 48: HERBIZIDAUFWAND UND ERTRÄGE IN ZUCKERRÜBEN	158
ABBILDUNG 49: INFOFENSTER.....	167
ABBILDUNG 50: WEED CONTROL, ZEITLICHE MODELLUMGEBUNG.....	169
ABBILDUNG 51: PARAMETERANPASSUNG	171
ABBILDUNG 52: WEED CONTROL (RÄUMLICHE MODELLUMGEBUNG)	173
ABBILDUNG 53: KALKULATION FÜR UNTERSCHIEDLICHE UK-VERTEILUNGEN UND BEH.- STRATEGIEN	174

VERZEICHNIS DER TABELLEN

TABELLE 1: BEHANDLUNGSHÄUFIGKEITEN UND GESAMTKOSTEN UNTERSCHIEDLICHER BEKÄMPFUNGSSCHWELLEN.....	30
TABELLE 2: AUFLAUFWAHRSCHEINLICHKEITEN	54
TABELLE 3: ÜBERLEBENSWAHRSCHEINLICHKEITEN VON UNKRÄUTERN.....	58
TABELLE 4: HYPOTHESEN ZUR ÜBERLEBENSWAHRSCHEINLICHKEIT.....	59
TABELLE 5: SAMENBILDUNG PRO UNKRAUTPFLANZE IN WINTERWEIZEN.....	63
TABELLE 6: MODELLANNAHMEN ZUR SAMENPRODUKTION	64
TABELLE 7: SAMENABBAU	65
TABELLE 8: WIRKSAMKEIT UND PREISE DER IM PROGRAMM VERWENDETEN HERBIZIDE.....	67
TABELLE 9: KORNERTRAGSVERLUSTE IN KG/HA JE UNKRAUTPFLANZE/M ² NACH PALLUTT UND FLATTER.....	74
TABELLE 10: KORNERTRAGSVERLUSTE IN KG/HA JE UNKRAUTPFLANZE/M ² NACH THOLE.....	75
TABELLE 11: TATSÄCHLICHE UND PROGNOTIZIERTE ERTRAGSVERLUSTE; MITTELWERT, STANDARDABWEICHUNG (S) UND VARIATIONSKOEFFIZIENT DES PROGNOSEFEHLERS	75
TABELLE 12: SCHWANKUNGSBREITEN DER KONKURRENZINDIZES, ANGABEN IN KG/HA JE UNKRAUTPFLANZE/M ²	76
TABELLE 13: ERNTEPARAMETER (MITTELWERTE) VON WINTERGERSTE 1985 – 1987	80
TABELLE 14: MITTLERE UNKRAUTDICHTEN DER KONTROLLPARZELLEN IN WINTERGERSTE....	80
TABELLE 15: ERNTEPARAMETER VON WINTERWEIZEN 1985 – 1987.....	81
TABELLE 16: MITTLERE UNKRAUTDICHTEN DER KONTROLLPARZELLEN IN WINTERWEIZEN....	81
TABELLE 17: TROCKNUNGSKOSTEN BEZOGEN AUF 1 DT GETREIDE MIT 14% RESTFEUCHTE.....	83
TABELLE 18: MATRIX DER KORRELATIONSKOEFFIZIENTEN	88
TABELLE 19: DETERMINISTISCHES POPULATIONSMODELL (STANDARDWERTE: DIKOTS)	91
TABELLE 20: SCHADSCHWELLEN BEI UNTERSCHIEDLICH LANGEN PLANUNGSZEITRÄUMEN BEI EINEM ZINSSATZ VON 0%, DETERMINISTISCHES MODELL	94
TABELLE 21: SCHADSCHWELLEN BEI UNTERSCHIEDLICH LANGEN PLANUNGSZEITRÄUMEN BEI EINEM ZINSSATZ VON 5%, DETERMINISTISCHES MODELL	95
TABELLE 22: SCHADSCHWELLE (DIKOTS) FÜR PLANUNGSZEITRAUM VON 10 JAHREN, ZINSSATZ: 5%	96
TABELLE 23: MODELLANNAHMEN ZUM HERBIZIDAUFWAND IN ZUCKERRÜBEN	102
TABELLE 24: HERBIZIDSTRATEGIEN IN ZUCKERRÜBEN IN ABHÄNGIGKEIT VOM UNKRAUTSPEKTRUM	103

TABELLE 25: EINTRITTSWAHRSCHEINLICHKEITEN DER MITTLEREN UNKRAUTDICHTEN (PFL./M ²) DER UNKRAUTNESTER.....	115
TABELLE 26: UMRECHNUNG JÄHRLICH UNTERSCHIEDLICHER KOSTENBETRÄGE IN JÄHRLICHE DURCHSCHNITTSKOSTEN (ZINSSATZ: 5%)	125
TABELLE 27: SCHADSCHWELLEN FÜR DIE FRÜHJAHRSBEBANDLUNG IN WINTERWEIZEN FÜR EINE ANGENOMMENE WW-MONOKULTUR (ANGABEN IN PFL./M ²)	126
TABELLE 28: SCHADSCHWELLEN FÜR DIE FRÜHJAHRSBEBANDLUNG IN WINTERWEIZEN FÜR EINE FRUCHTFOLGE: WW, WW, WW, ZR (ANGABEN IN PFL./M ²)	126
TABELLE 29: VERGLEICH DER IM DYNAMISCHEN MODELL ERRECHNETEN SCHADSCHWELLEN MIT LITERATURANGABEN.....	128
TABELLE 30: DURCHSCHNITTICHE HERBIZIDKOSTEN UND KONKURRENZEFFEKTE UNTERSCHIEDLICHER UNKRAUTBEKÄMPFUNGSSTRATEGIEN	130
TABELLE 31: HERBIZIDPARAMETER FÜR SIMULATIONSRECHNUNGEN MIT REDUZIERTEN WIRKUNGSGRADEN.....	142
TABELLE 32: AUSBRINGUNGSKOSTEN FÜR PSM.....	150
TABELLE 33: ARBEITSZEITBEDARF (PFLANZENSCHUTZ VOM FELDRAND) UND ARBEITSERLEDIGUNGSKOSTEN PFLANZENSCHUTZ.....	151
TABELLE 34: FRUCHTFOLGEANTEILE VON 1999 BIS 2003	152
TABELLE 35: AUSSCHNITT AUS DER ERGEBNISTABELLE	174

VERZEICHNIS DER ABKÜRZUNGEN

AHL	Ammonium-Harnstoff-Lösung
ALOMY	<i>Alopecurus myosuroides</i> (Ackerfuchsschwanz)
APESV	<i>Apera-spica venti</i> (Windhalm)
BZE	bereinigter Zuckerertrag
DIKOTS	dikotyle Unkräuter
GALAP	<i>Galium aparine</i> (Klettenlabkraut)
GFU	Ganzflächenunkrautbekämpfung
IPU	Isoproturon (Herbizid)
MOKOTS	monokotyle Unkräuter
NAF	Nachauflaufanwendung im Frühjahr
NAH	Nachauflaufanwendung im Herbst
NAK	Nachauflaufanwendung im Keimblattstadium der Unkräuter
nFK	nutzbare Feldkapazität
POLAV	<i>Polygonum aviculare</i> (Vogelknöterich)
PSM	Pflanzenschutzmittel
s	Standardabweichung
TFM	Teilflächenmanagement
TFU	Teilflächenunkrautbekämpfung

1 Einleitung

1.1 Problemstellung

Der chemische Pflanzenschutz zählt zu den wesentlichen Elementen des technischen Fortschritts des zwanzigsten Jahrhunderts in der Landwirtschaft. Ohne chemischen Pflanzenschutz wären die erzielten Produktionssteigerungen in der landwirtschaftlichen Produktion nicht möglich gewesen und Nahrungsmittel wären heute nicht zu den gewohnt günstigen Preisen verfügbar. Auf der anderen Seite stellen Pflanzenschutzmittel (PSM) potenzielle und tatsächliche Risiken für die Umwelt, Natur und die Gesundheit des Menschen dar, die sich beispielsweise in erhöhten Rückständen in Lebens- und Futtermitteln oder Belastungen von Wasser und Boden niederschlagen. In vielen Ländern wurden und werden deshalb politische Bemühungen unternommen, um den mengenmäßigen Einsatz und die potenziellen Risiken zu reduzieren. Vor allem in Europa sind die diesbezüglichen Zielvorgaben besonders hoch.

Zur Minderung der Risiken durch PSM stehen grundsätzlich drei Möglichkeiten zur Verfügung:

- (1) Durch die gesetzliche Zulassung von PSM können Mittel mit erhöhtem Risikopotenzial vom Markt genommen werden. Ferner werden bei der Zulassung die Anwendungsgebiete -bestimmungen und Auflagen bestimmt.
- (2) Die Reduktion bzw. Anpassung des PSM-Aufwandes auf das notwendige Maß sorgt durch eine mengenmäßige Reduktion direkt für eine Minderung der potenziellen Risiken. Reduktionen sind möglich, indem beispielsweise alternative Möglichkeiten des vorbeugenden Pflanzenschutzes (z. B. Fruchtfolgeplanung) genutzt werden, die Applikationsgenauigkeit durch technischen Fortschritt (z. B. abdriftmindernde Düsen, *precision farming*) verbessert wird und der Einsatzzeitpunkt, die Mittelauswahl und -menge weiter optimiert werden.
- (3) Darüber hinaus bietet die konsequente Nichtanwendung von PSM im Rahmen des biologischen Landbaus eine Risikovermeidungsstrategie.

In dieser Arbeit wird untersucht, ob und inwieweit es möglich ist, durch eine räumliche Anpassung des Herbizidaufwandes an das tatsächliche Auftreten von Unkräutern auf Ackerflächen (*precision farming*) den Herbizidaufwand zu reduzieren (Punkt 2). Herbizide

stellen – gemessen in Gewichtsanteilen – in Deutschland die wichtigste Gruppe an Pestiziden dar. Im Jahr 1999 wurden nach Angaben von EUROSTAT (2002, S. 13) in Deutschland 12.000 t Herbizide, 7.800 t Fungizide, 410 t Insektizide und 1.800 t Wachstumsregulatoren angewendet. Herbizide sind die am häufigsten im Grund- und Oberflächenwasser nachgewiesenen Pflanzenschutzmittel (CARTER, 2000).

Derzeit ist es üblich, bei der Unkrautbekämpfung und anderen Pflanzenschutzmaßnahmen einzelne Ackerflächen bzw. eine Mehrzahl von Flächen – im Extremfall sogar die gesamte Betriebsfläche – einheitlich zu behandeln, obwohl das Auftreten von Schadorganismen innerhalb von Ackerflächen und noch stärker ausgeprägt zwischen unterschiedlichen Schlägen eine hohe räumliche Variabilität aufweist. Durch moderne Techniken des *precision farming*, wie GPS-Ortung, automatisierte Unkrauterkenner und Pflanzenschutzspritzen mit der Möglichkeit einer teilflächenspezifischen Wirkstoffapplikation, wird es in Zukunft möglich sein, Unkräuter teilflächenspezifisch zu kontrollieren. Die Frage ist jedoch, ob die hierdurch erzielten Einsparungen an Herbiziden gegenüber einer konventionellen Herbizidapplikation (Leistungen der Teilflächenapplikation) zuzüglich möglicher staatlicher Zuwendungen für die Minderungen negativer externer Kosten ausreichen, um die Kosten des zusätzlichen technischen Aufwandes und des potenziellen Risikos von Ertragsminderungen, Erntebehinderungen, Folgeverunkrautungen etc. zu decken. Zur Überprüfung dieser Fragestellung oder vielmehr zur Abschätzung der möglichen Herbizideinsparungen durch Teilflächenunkrautbekämpfung wurden umfangreiche pflanzenbauliche Versuche durchgeführt, bei denen zunächst versucht wurde, die Unkrautverteilung auf Ackerflächen zu erfassen und anschließend eine ortsangepasste Herbizidapplikation durchzuführen. Diese Versuche wurden in der Regel nicht über längere Zeiträume als 3 bis 5 Jahre durchgeführt, so dass dynamische Effekte nur unzureichend erfasst wurden. Darüber hinaus liefern die pflanzenbaulichen Versuche zwar einen Erklärungsbeitrag für die konkreten Bedingungen des Versuchsstandortes und die eingetretenen Jahreswitterungen während des Versuches, sie sind für eine betriebliche Entscheidungsunterstützung jedoch nur bedingt zu verwenden. Die Versuchsergebnisse liefern nur im Nachhinein (ex-post) eine Aussage über die relative Vorzüglichkeit der realisierten Handlungsalternativen. Für eine ex-ante-Entscheidung liefern die Feldversuchsergebnisse in der Regel keine Wahrscheinlichkeitsverteilungen für die zu erwartenden Ergebnisse, sondern lediglich deterministische Prognosen. Unsicherheiten und Risiken können deshalb bei der Entscheidungsfindung nicht berücksichtigt werden. Auf Grund fehlender Informationen zu den Eintrittswahrscheinlichkeiten muss bei der

Entscheidungsfindung in der Praxis deshalb häufig von der Gültigkeit der in der Vergangenheit realisierten Ergebnisse für die Zukunft ausgegangen werden. Diese primitive Prognose kann jedoch in vielen Fällen zu Fehlentscheidungen führen (vgl. SCHMIDT und BLÖNNINGEN, 1987, S. 565f.).

Alternativ zu empirischen Experimenten besteht die Möglichkeit – sofern die realen Systemzusammenhänge ausreichend bekannt sind –, durch ein Computersimulationsmodell die realen biologischen Zusammenhänge in abstrahierter Form nachzubilden und hierauf aufbauend durch „Experimente im Modell“ unterschiedliche Fragestellungen zu beantworten. Durch eine Berücksichtigung von Umweltvariablen, die sich in unterschiedlichen Ausprägungen der Modellparameter auswirken, kann aus der Verteilung der Modellvariablen auf die Wahrscheinlichkeitsverteilung des Outputs geschlossen werden, so dass letztlich Unsicherheiten bei der Entscheidungsfindung berücksichtigt werden können.

1.2 Zielsetzung

Das Hauptziel der vorliegenden Arbeit ist die ganzheitliche ökonomische Bewertung von Teilflächenunkrautbekämpfung, wobei der dynamische Charakter des Problems und Unsicherheiten explizit berücksichtigt werden. Dieses Ziel lässt sich in zwei Unterziele gliedern: (i) Das methodische Ziel, die Erstellung eines Unkrautsimulationsmodells, mit dessen Hilfe die Konsequenzen unterschiedlicher Unkrautbekämpfungsstrategien vorhergesagt werden können. Zur Konstruktion und Parametrisierung des Modells wurden keine eigenen empirischen Versuche durchgeführt, sondern auf Literaturangaben und auf zum Teil bereits bestehende Modellansätze zurückgegriffen.

(ii) Und das sachliche Ziel, welches unter Zuhilfenahme des zuvor konstruierten Modells erreicht wird. Dieses beinhaltet eine ganzheitliche ökonomische Bewertung von Teilflächenunkrautbekämpfung. Darüber hinaus werden Versuche zur Teilflächenunkrautbekämpfung, die die Biologische Bundesanstalt (BBA) auf einem Marktfruchtbetrieb in der Hildesheimer Börde durchgeführt hat, ökonomisch analysiert.

1.3 Vorgehensweise

Für ein allgemeines Verständnis der Entscheidungsprobleme, die mit dem Unkraut- bzw. Pflanzenbaumanagement zusammenhängen, werden in Kapitel 2 zunächst pflanzenbauliche

Grundlagen zum Unkrautmanagement dargestellt. In Kapitel 3 wird das Prinzip der Schadschwelle und die hiermit verbundenen Probleme thematisiert und in Kapitel 4 mit dem Ansatz, den technischen Voraussetzungen und den Ergebnisse bisheriger Arbeiten zur Teilflächenunkrautbekämpfung fortgefahren. In Kapitel 5 wird die Entwicklung und Parametrisierung des Unkrautsimulationsmodells detailliert vorgestellt. Zum Teil werden hier Daten verwendet, die die BBA in Versuchen zur Teilflächenunkrautbekämpfung auf der Domäne St. Ludgeri erhoben hat. In der Regel geht das Modell jedoch auf Literaturangaben zurück. Die Modellergebnisse werden in Kapitel 6 berechnet. Eine Abschätzung der Kosten der zusätzlichen *precision farming* Technik erfolgt in Kapitel 7. Die empirischen Versuche der BBA auf der Domäne St. Ludgerie werden in Kapitel 8 dargestellt und ökonomisch bewertet. Die Diskussion befindet sich in Kapitel 9. In Kapitel 10 erfolgt eine kurze Programmbeschreibung (*Go through*), die die Verwendung der beigefügten CD erleichtert. Die Arbeit endet mit der Zusammenfassung bzw. *Summary* in Kapitel 11 bzw. 12.

2 Pflanzenbau – Unkrautmanagement

2.1 Ökonomische Einführung

In der Ökonomie wird in der Regel davon ausgegangen, dass das primäre ökonomische Ziel eines Wirtschaftssubjektes (Landwirt) die Gewinnmaximierung, also die Maximierung der Differenz aus den Erlösen der Verkaufsprodukte – zuzüglich möglicher produktionsabhängiger Subventionen – und den Kosten ist. Vereinfachend wird von anderen Zielen, wie Freizeitanspruch, Prestige etc. abstrahiert bzw. diese Ziele werden als Mindestrestriktionen berücksichtigt. Das zu maximierende Extremalziel ist der Gewinn. Landwirtschaftliche Märkte und Produkte sind im Allgemeinen so strukturiert, dass der Landwirt als Preisnehmer fungiert. Kostenführerschaft ist deshalb die notwendige Bedingung zur Gewinnmaximierung. Produktionstheoretische Grundvoraussetzungen zur Minimierung der Kosten sind die optimale spezielle Intensität (optimale Faktoreinsatzmenge) und die Minimalkostenkombination (optimale Faktorzusammensetzung) (STEINHAUSER et al. 1992, S. 77). Für den Pflanzenbau bedeutet dies, dass alle pflanzenbaulichen Entscheidungen zur Fruchtfolge, Düngung, Aussaat, Bodenbearbeitung, zum Pflanzenschutz etc. so getroffen werden sollten, dass die Produktion sowohl technisch als auch allokativ effizient ist. Eine Entscheidungsunterstützung im Pflanzenbau setzt voraus, dass die Systemzusammenhänge der Pflanzenproduktion bzw. des Gesamtbetriebes, also das Wirkungsgefüge zwischen den steuerbaren Systeminputs und den nicht beeinflussbaren Einflussfaktoren (z. B. Witterung) auf das Betriebsergebnis bekannt sind. Die Quantifizierung dieser Zusammenhänge ist jedoch aufgrund der Multikausalität und des dynamischen Charakters des Systems – vor allem da den landwirtschaftlichen Produktionsverfahren biologische Wachstumsprozesse zugrundeliegen – schwierig (BERG und KUHLMANN, 1993; BRODERSEN, 1995, S. 7f.; ODENING und BOKELMANN, 2000, S. 175).

Schadorganismen (Unkräuter, Insekten, Pilze, Viren) stellen Risiken für den Ertrag und die Qualität der Ernteprodukte dar. Unkräuter, die als Pflanzen definiert werden können, die unerwünschterweise auf dem Kulturland wachsen und dort mehr Schaden als Nutzen verursachen (ZWERGER und AMMON, 2002, S. 10), vermindern durch Konkurrenz um Standraum, Licht, Wasser und Nährstoffe den Ertrag der Nutzpflanzen. Die Qualität des Getreides kann durch erhöhten Feuchtigkeitsgehalt und erhöhten Fremdbesatz vermindert sein (KAISER, 1989, S. 42). Als potenzieller Nutzen von Unkräutern sind positive Wirkungen auf

das Agrar-Ökosystem, wie eine Verminderung der Bodenerosion, eine verminderte Nährstoffauswaschung und die Förderung von Nützlingen zu nennen (ZWERGER und AMMON, 2002, S. 12). Für Landwirte überwiegen die zumeist kurzfristigen negativen Effekte von Unkräutern die in der Regel längerfristigen und zum Teil externen positiven Effekte bei weitem. Nur bei Betrachtung des gesamten Anbausystems können die möglichen positiven Effekte von Unkräutern erfasst werden (GEROWITT, 2002, S. 86). Weiterhin fehlt bisher die empirische Datengrundlage, um die positiven Wirkungen von Unkräutern auf die landwirtschaftliche Produktion quantifizieren zu können, so dass in dieser Arbeit nur die möglichen Schadwirkungen von Unkräutern betrachtet werden. Eine darüber hinausgehende gesamtwirtschaftliche Beurteilung des Nutzens von Unkräutern, wie des Erhalts gefährdeter Arten, des Bodenschutzes, einer verminderten Wasserbelastung durch reduzierte Nährstoffauswaschungen, der Bedeutung von Unkräutern für Insekten und Vögel (EUROPÄISCHE KOMMISSION, 2002, S. 14) oder des möglichen Nutzens durch Unkräuter als genetische Ressource würde bei weitem den Rahmen dieser Arbeit sprengen.

Durch hygienischen bzw. vorbeugenden Pflanzenschutz wie Fruchtfolge, Aussaatzeitpunkt etc. (vgl. Abschnitt 2.3) und kurativen Pflanzenschutz (direkte mechanische und chemische Maßnahmen) werden die Risiken, die von Unkräutern auf die landwirtschaftliche Produktion ausgehen, vermindert. Aufgrund von Samenvorräten im Boden haben Pflanzenbau- und Pflanzenschutzentscheidungen, die das Unkrautwachstum und die Samenproduktion beeinflussen, in der Regel längerfristige Auswirkungen. Insbesondere Kenntnisse über die zu erwartenden Konkurrenzeffekte, die Samenproduktion der Unkräuter und die Dynamik der Samen im Bodenvorrat (räumlich und zeitlich) sind elementar für die Verbesserung der Entscheidungsgrundlage für die Unkrautkontrolle. Für ein umfassendes Unkrautmanagement und die Beurteilung von teilflächenspezifischen Unkrautbekämpfungskonzepten müssen darüber hinaus die betrieblichen Bedingungen (Absatzmöglichkeiten, Lieferverträge, bisherige Fruchtfolge, Faktorausstattung) und die natürlichen Standortvoraussetzungen berücksichtigt werden. Theoretisch bedeutet dies, dass alle pflanzenbaulichen und betrieblichen Entscheidungen simultan so aufeinander abgestimmt werden müssten, dass das Systemoutput, der Gewinn, maximiert wird (vgl. VAN DER WEIDE und GROENENDAEL, 1990). Da dies aus Komplexitätsgründen jedoch nur eingeschränkt möglich ist, werden in den Modellstudien dieser Arbeit zunächst Produktionsprogramme festgelegt, um anschließend für diese Produktionsprogramme eine teilflächenspezifische Unkrautbekämpfung bewerten zu können.

2.2 Ökologie der Unkräuter

Ackerunkräuter haben sich parallel zur Entstehung und Veränderung des Ackerbaues vor etwa 7000 Jahren entwickelt. Ackerunkräuter sind speziell an das Biotop Ackerland mit den wiederkehrenden Störungen wie Bodenbearbeitung und Ernte angepasst (MAHN, 2002 b, S. 21). Ein typisches Beispiel für die Anpassung von Unkräutern an die vom Menschen geschaffenen Kulturbedingungen ist die Kornrade (*Agrostemma githago*). Die Samen der Kornrade wurden mit der Getreideernte geerntet und auf Grund fehlender Getreidereinigung im nächsten Jahr bei der Getreideaussaat wieder in eine günstige Keimposition gebracht. Da die Samen, die auf natürliche Weise von der Mutterpflanze direkt auf den Boden fallen, meist nicht in der Lage sind, neue Pflanzen zu bilden, wurde der Lebenszyklus der Kornrade stark von diesem Zyklus beeinflusst. Heute ist die Kornrade durch effiziente Getreidereinigung nur noch selten zu finden (GEHRING, 2003, S. 2).

Mit der erstmals 775 n. Chr. erwähnten Dreifelderwirtschaft und der damit verbundenen Verkürzung der Brachezeiten wurden ausdauernde Arten (mehrjährige Unkräuter: Perenne) zurückgedrängt. Diese Entwicklung wurde weiter gefördert durch den Einsatz des Pfluges (um ca. 700 n. Chr.) und durch die Einführung des Mineraldüngers um 1850 n. Chr., so dass der Anteil einjähriger (annueller) Unkräuter in der Segetalvegetation bis heute stetig zugenommen hat (MAHN, 2002 b, S. 22 f.).

In der Mitte des zwanzigsten Jahrhunderts wurde die landwirtschaftliche Pflanzenproduktion weiter intensiviert. Der Einsatz chemischen Düngers wurde verstärkt, chemische Pflanzenschutzmittel, insbesondere Herbizide, wurden eingeführt und der Getreideanbau wurde ausgedehnt, so dass weitere Anpassungen der Unkrautvegetation erfolgten (ebenda, S. 23). Insbesondere schwer durch Herbizide kontrollierbare Arten mit dem Übergang zu herbizidtoleranten bzw. -resistenten Biotypen und Ungräser stellen heute den Fokus der Unkrautbekämpfungsbemühungen bzw. der Herbizidneuentwicklungen dar (MAHN, 2002 a, S. 14; KUDSK, STREIBIG, 2003, S. 91). Das Artenspektrum der Ackerunkräuter ist im Zeitablauf deutlich enger geworden. Nur die Arten, die sich trotz hoher Düngergaben und des Einsatzes von Herbiziden vermehren können, überleben unter den Bedingungen der konventionellen Landwirtschaft. Dies hat dazu geführt, dass die hauptsächlich vorkommenden Ackerunkräuter heute eine weite ökologische Amplitude besitzen, also in Regionen mit unterschiedlichen klimatischen und standörtlichen Bedingungen vorkommen (MAHN, 2002 b, S. 70 ff.; ZWGERGER, 2004, o. S.).

2.3 Integrierte Unkrautbekämpfung

Unkräuter werden von Landwirten seit jeher kontrolliert. Vor der Entwicklung von Herbiziden musste neben einer direkten mechanischen Unkrautkontrolle der gesamte Pflanzenbau so ausgerichtet sein, dass durch vorbeugende indirekte Maßnahmen (hygienischer Pflanzenschutz) eine starke Vermehrung von Unkräutern verhindert wurde (CLAUPEIN, BAEUMER, 1992, S. 243; KUDSK, STREIBIG, 2003, S. 91). Ab der Mitte des zwanzigsten Jahrhunderts konnten pflanzenbauliche Maßnahmen der Unkrautunterdrückung in zunehmendem Maße durch die direkte chemische Unkrautkontrolle ersetzt werden. Da von Herbiziden jedoch eine potenzielle Umweltbelastung und Gesundheitsbelastung für den Menschen ausgeht, gibt es seit den fünfziger Jahren wachsende Bestrebungen, den Einsatz von Herbiziden auf das notwendige Maß zu reduzieren (BBA, 2004). Heute sind die Zulassungsbedingungen für Herbizide deutlich strenger geworden und es gibt politische Anstrengungen, den Einsatz von Herbiziden weiter zu reduzieren (EUROPÄISCHE KOMMISSION, 2002; KUDSK, STREIBIG, 2003, S. 91; BMVEL, 2004).

Der Begriff des integrierten Pflanzenschutzes gilt heute als weltweites Leitbild für einen umweltverträglichen praktischen Pflanzenschutz (siehe AGENDA 21). Nach Angaben der BBA (2004) wird integrierter Pflanzenschutz definiert als:

- ein systemarerer Ansatz,
- mit Ausnutzung ökologischer Wirkungen und unter Beachtung der Forderungen des Naturschutzes und
- mit vielen Instrumenten bei Ausschöpfung aller nichtchemischen Methoden und bei weitgehender Reduzierung der Anwendung chemischer Pflanzenschutzmittel.

Ziel der integrierten Unkrautbekämpfung ist es, durch pflanzenbauliche Maßnahmen ein möglichst niedriges Gleichgewichtsniveau der Unkrautpopulation und eine Reduktion der Fitness der Unkräuter zu erreichen (MORTENSEN et al. 1998, S. 51), den Pflanzenschutzmittelaufwand zu minimieren (Optimierung des Anwendungszeitpunktes, *factor-adjusted doses*, etc.) und Herbizide nur dann einzusetzen, wenn Leistungen und Kosten der Maßnahme mindestens gleich sind (Schadschwellen).

Die Möglichkeiten der integrierten Unkrautkontrolle werden in der Praxis nicht im vollen Umfang umgesetzt. Pflanzenbauliche Entscheidungen werden mehr oder weniger unabhängig von möglichen Unkrautproblemen getroffen und die Unkrautbekämpfung erfolgt mit den notwendigen Herbiziden (AMMON, 2002, S. 240; EUROPÄISCHE KOMMISSION, 2002, S. 22; KUDSK und STREIBIG, 2003, S. 93). Die Nichtanwendung integrierter Maßnahmen kann im wesentlichen auf zwei Ursachen zurückgeführt werden:

- (i) Zum einen ist es schwierig, für Mischverunkrautungen, die aus unterschiedlichen Unkrautarten mit unterschiedlichen Lebenszyklen bestehen, eine passende Unkrautmanagementstrategie zu entwickeln (MORTENSEN et al., 2000, S. 49).
- (ii) Und zum anderen existieren im Pflanzenbau – wie in anderen Entscheidungsfeldern auch – Konfliktsituationen zwischen einzelnen Teilzielen (trade-offs). Beispielsweise ist eine Erhöhung der Bodenbearbeitungsintensität zur Unkrautregulation mit einer erhöhten Erosionsgefährdung verbunden oder eine Erweiterung der Fruchtfolge zur Senkung des Unkrautdruckes kann mit einer Reduktion des Gesamtdeckungsbeitrages und damit des Gewinns einhergehen.

Im Folgenden werden die Möglichkeiten und Grenzen einer integrierten Unkrautkontrolle dargestellt und diskutiert.

2.3.1 Fruchtfolge

Die Fruchtfolge ist die wichtigste acker- und pflanzenbauliche Maßnahme zur nachhaltigen Begrenzung des Unkrautwachstums (FRYER, 1979; PALLUTT 2002 a, S. 26; ALBRECHT, 2004, S. 101 f.). Vor allem bei herbizidresistenten Unkrautpopulationen bietet die Wahl der Fruchtfolge eine wichtige Möglichkeit, um Resistenzprobleme zu entschärfen (HOPPE, KRÜSSEL, 2004), wofür von PALLUTT (2002a, S. 26) folgende wesentliche Einflüsse genannt werden:

- Durch den Wechsel von Winter- und Sommergetreide bzw. Blattfrüchten werden jeweils Herbst- und Frühlingskeimer begünstigt, womit einer einseitigen Förderung bestimmter Unkräuter entgegengewirkt wird.
- Durch eine günstige Vorfrucht kann die Konkurrenzwirkung der angebauten Kultur erhöht werden.

- Ein höherer Anteil konkurrenzstarker oder infolge ihrer Anbautechnik unkrautarmer Kulturen reduziert den Unkrautdruck und
- eine standortgerechte Kulturartenauswahl führt zu besserer Unkrautunterdrückung.

Außerdem bietet der Wechsel der Kulturpflanzen innerhalb der Fruchtfolge gegenüber der Monokultur die Möglichkeit unterschiedliche Bekämpfungsverfahren zu nutzen. So lassen sich beispielsweise einige Unkräuter in Zuckerrüben (z. B. Disteln, Vogelknöterich) nicht oder nur teuer bekämpfen, so dass ihre Kontrolle aus populationsdynamischen Gründen zweckmäßigerweise in Getreide erfolgt (SFZ, 2000, S. 3; vgl. auch MORTENSEN et al. 2000, S. 59).

Die Fruchtfolgeplanung wird häufig durch andere Kriterien, wie Preise, Ertragspotenziale, Produktionsquoten, Flächenprämien, Pfadabhängigkeiten, Absatzmöglichkeiten etc. dominiert, so dass die Aspekte der integrierten Unkrautbekämpfung mit Ausnahme des ökologischen Landbaus oder bei Vorhandensein von Herbizidresistenzen in der Regel nicht bzw. nur in geringem Maße berücksichtigt werden (vgl. PALLUTT, 2002 c, S. 228; KUDSK, STREIBIG, 2003, S. 93).

2.3.2 Aspekte zur Aussaat

Die Unkrautkonkurrenz hängt in starkem Maße davon ab, wann die Unkräuter im Verhältnis zur Kulturpflanze auflaufen. Im günstigsten Fall läuft ein Großteil der sich im Keimhorizont befindenden Unkrautsamen bereits vor der Aussaat auf, so dass diese mit der abschließenden Saatbettbereitung mechanisch erfasst werden können. Es besteht die Möglichkeit, nach der Grundbodenbearbeitung bereits eine erste Saatbettbereitung (z. B. Einsatz eines Packers hinter dem Pflug oder Einsatz einer Kreiselegge) durchzuführen und anschließend die Aussaat über eine gewisse Zeitspanne hinauszuzögern. In dieser Zeit kann eine erste „Unkrautwelle“ auflaufen, die dann mit der Aussaat mechanisch erfasst wird, so dass der Unkrautdruck in der folgenden Kultur deutlich reduziert ist (PALLUTT, 2002 c, S. 110). In der Praxis wird auf diese Möglichkeit der Unkrautregulation in der Regel aus Witterungsrisiken verzichtet. Denn stärkere Niederschläge auf den für die Saat vorbereiteten feinkrümeligen Boden können zu erheblichen Behinderungen und Bodenverdichtungen bei einer verspäteten Aussaat führen.

Findet die Hauptaufwelle direkt nach der Aussaat statt, so wachsen die Unkräuter parallel mit den Kulturpflanzen und die Unkrautkonkurrenz ist entsprechend ausgeprägt. Keimen die Unkräuter jedoch deutlich später als die Kulturpflanze, so werden sie stark durch die Kulturpflanze unterdrückt und die Unkrautkonkurrenz und die Unkrautsamenproduktion sind in der Regel gering (HÅKASSON, 1986; COUSENS und MORTIMER, 1995, S. 179).

Die Wahl des Aussaattermins von Wintergetreide hat einen Einfluss auf die Zusammensetzung der Unkrautflora. Bei früher Aussaat kann sich das Getreide vor der Vegetationsruhe im Winter weiter entwickeln, so dass die Bestände im Frühjahr dichter und konkurrenzstärker sind. Sommerannuelle Unkrautarten, die im Frühjahr auflaufen, wie beispielsweise *Chenopodium album* (weißer Gänsefuß) und *Polygonum*-Arten (Knötericharten) werden deshalb bei früher Aussaat durch einen dichteren Getreidebestand so stark unterdrückt, dass sie nur noch vereinzelt auftreten. Umgekehrt verhält es sich bei Spätsaaten, bei denen die Getreidebestände im Frühjahr lichter sind, so dass sich sommerannuelle Unkräuter besser entwickeln können.

Unkrautarten, die im Herbst zusammen mit dem Getreide auflaufen (z. B. *Apera spica-venti* (Windhalm), *Alopecurus myosuroides* (Ackerfuchschwanz) und *Galium aparine* (Klettenlabkraut)), werden in der Regel durch eine frühe Aussaat gefördert, da deutlich mehr Pflanzen auflaufen können und somit die Dichte dieser Unkräuter erhöht ist. Die Einzelpflanzenentwicklung dieser Unkräuter kann durch die ebenfalls dichteren Getreidebestände bei früher Aussaat jedoch vermindert sein (PALLUTT, 2002 c, S. 112 f.). Umgekehrt gilt auch, dass der Vorteil einer verspäteten Aussaat, die Reduktion des Unkrautauflaufes um 20 bis 30%, durch ein vermindertes Konkurrenzvermögen des Getreides und eine damit verbundene verbesserte Einzelpflanzenentwicklung der Unkräuter zum Teil kompensiert wird (FLATTER, 1999, S. 80).

In Abhängigkeit von den Standortbedingungen (Unkrautpopulation, Boden, Fruchtfolge etc.) kann die Wahl des Aussaatzeitpunktes einen Beitrag zur Entschärfung bestimmter Unkrautprobleme leisten. Frühsaaten mit reduzierten Aussaatstärken, die auf Standorten mit begrenzter Wasserversorgung erstrebenswert sind, oder Frühsaaten, die auf schwer zu bearbeitenden Böden (insbesondere Marschböden) vorteilhaft sind, begünstigen hingegen tendenziell das Unkrautwachstum.

2.3.3 Unkrautunterdrückungsvermögen des Getreides

Da ein ausgeprägtes Unkrautunterdrückungsvermögen durch das Getreide nur dann gegeben ist, wenn die Getreidebestände ausreichend dicht und geschlossen sind, bezeichnete RADEMACHER (1960) lückenlose, geschlossene Bestände als das Geheimnis der Unkrautfreiheit. Deshalb sollte in ausgewinterten und lückigen Getreidebeständen nicht auf eine Herbizidbehandlung verzichtet werden. Dies bedeutet im Umkehrschluss, dass nur konkurrenzstarke und stark beschattende Getreidebestände bzw. Kulturpflanzenbestände eine geringere Intensität direkter Bekämpfungsmaßnahmen (z. B. Teilflächenunkrautbekämpfung) erlauben.

Das Unkrautunterdrückungsvermögen von Winterweizensorten variiert von Sorte zu Sorte. Konkurrenzstarke Sorten können das Unkrautwachstum gegenüber konkurrenzschwachen um ca. 50% reduzieren (RICHARDS und WHYTOCK, 1993; PALLUTT, 2002 c, S. 115). Da die Wuchslänge mit dem Beschattungsvermögen eines Getreidebestandes und somit mit der Konkurrenzkraft des Getreides korreliert, führen die Züchtungsbemühungen zu kurzstrohigeren Getreidesorten und der Einsatz von Wachstumsregulatoren (z. B. CCC) zu einer tendenziellen Abnahme des Unkrautunterdrückungsvermögens des modernen Getreidebaues (MELANDER, 1995, S. 163; LEMERLE et al. 1996, S. 510; PALLUTT, 2002 c, S. 115). Dennoch werden in der Praxis kurzstrohige Sorten bevorzugt und Wachstumsregulatoren eingesetzt, da solche Getreidebestände weniger lageranfällig sind bzw. die verwendeten Sorten ein höheres Ertragspotenzial und/ oder andere erwünschte Qualitätseigenschaften aufweisen.

Durch die Aussaatstärke kann die Konkurrenzkraft der Kulturpflanze beeinflusst werden (LEMERLE et al. 1996). Da Aussaatstärken mit höherer Unkrautunterdrückung jedoch zu hoch für eine optimale Bestandes- und Ertragsbildung sind, sind dieser Möglichkeit der Unkrautunterdrückung ebenfalls Grenzen gesetzt (MEDD et al. 1985; PALLUTT, 2002 b, S. 27).

2.3.4 Grundbodenbearbeitung

Die Grundbodenbearbeitung kann in eine wendende und nichtwendende Bodenbearbeitung unterteilt werden. In Abhängigkeit von der Grundbodenbearbeitung variieren die Keimbedingungen durch unterschiedliche Temperatur- und Feuchtigkeitsverhältnisse im Keimhorizont. Die horizontale Verteilung der Unkrautsamen und der organischen Substanz

wird durch die Grundbodenbearbeitung bestimmt. Durch die wendende Arbeit des Pfluges werden zum einen ein Großteil der oberflächennahen Unkrautsamen in so tiefe Bodenschichten (tiefer als 20 cm) verlagert, dass diese nicht bis zur Oberfläche durchwachsen können, während zum anderen in geringerem Ausmaße Unkrautsamen aus tieferen Bodenschichten an die Oberfläche gebracht werden. Die Reaktion der Populationsdynamik von Samenunkräutern auf die Grundbodenbearbeitung wird durch eine Reihe weiterer Faktoren modifiziert, so dass allgemeingültige Aussagen nur eingeschränkt möglich sind. Zum Teil sind die Daten auch inkonsistent (STREIT et al. 2000, S. 20). So berichteten DERKSEN et al. (1991) beispielsweise, dass die Reaktion der untersuchten Unkräuter auf die Bodenbearbeitung von Jahr zu Jahr und Feld zu Feld variierte.

ZWERGER (1993, 26) und COUSENS und MORTIMER (1995, S. 172) gehen davon aus, dass dem Dormanz- und Keimverhalten der Samen eine entscheidende Bedeutung zukommt. Ist die primäre Dormanz der „untergepflügten“ Samen gering, was beispielsweise für die *Bromus sterilis* und viele andere Gräser zutrifft, so keimen die Samen auch aus größeren Tiefen, erreichen dann jedoch nicht die Oberfläche und sterben ab (fatale Keimung). Diese Arten können durch den Pflug effektiv reduziert werden. Andere Arten besitzen im jungen Alter eine stärker ausgeprägte primäre Dormanz. Werden diese Samen untergepflügt, so können sie über einige Jahre im Boden konserviert werden und dann auflaufen, wenn sie durch die Bodenbearbeitung in eine günstige Keimposition gebracht werden und durch Keimreize (Licht, wechselnde Temperaturen etc.) zur Keimung angeregt werden (vgl. ZWERGER, 1993, S. 26 f.).

Die biologische Aktivität der Mikroorganismen und damit die Abbauraten von Unkrautsamen sind in der obersten Bodenschicht deutlich höher (ROBERTS und FEAST, 1972), so dass der Samenabbau bei pflugloser Bodenbearbeitung höher sein kann. Dieses Phänomen konnten auch LUTMAN et al. (2001, S. 238) in ihren Versuchen nachweisen. In den gepflügten Parzellen war der Samenabbau verlangsamt. Samen, die an der Erdoberfläche blieben, waren stärkeren Keimreizen durch wechselnde Temperaturen und Licht ausgesetzt, so dass der Samenabbau in den Nicht-Pflug-Varianten tendenziell größer war.

Nach PALLUTT (2002 a, S. 27 und 2002 c, S. 108) reagieren *Lamium* spp. (Taubnessel), *Viola arvensis* (Ackerstiefmütterchen) und *Veronica* spp. (Ehrenpreis) bei Pflugverzicht mit einem Rückgang, während *Apera spica-venti*, *Alopecurus myosuroides*, *Matricaria* spp. (Kamille)

und *Galium aparine* durch pfluglose Bodenbearbeitung gefördert werden. Gegenteilige Ergebnisse zu *Veronica* spp. publizierten ALBRECHT (2004, S. 101) und ROBERTS und STOKES (1965).

Die überjährigen Unkräuter, wie Distel, Ampfer, Rotklee und Quecke werden durch den Pflug reduziert (ALBRECHT, 2004, 101). Dies liegt wahrscheinlich daran, dass die Wurzeln durch das Pflügen an die Erdoberfläche gebracht werden und dort austrocknen bzw. abfrieren (COUSENS und MORTIMER, 1995, S. 174) bzw. nach erfolgter Stoppelbearbeitung (Zerschneiden der Rhizome) die Wurzeln ausreichend tief eingepflügt werden, so dass die Triebkraft nicht mehr für das Durchwachsen bis zur Oberfläche ausreicht (PALLUTT, 2002 a, S. 27). Problemlos in Bezug auf die Verunkrautung der Folgekultur ist häufig der Verzicht auf den Pflug nach unkrautarmen Vorfrüchten, wie Mais, Kartoffeln, Zuckerrüben und Raps (PALLUTT, 2002 c, S. 108; STREIT et al. 2003, S. 30). Nach anderen Kulturen muss tendenziell bei einem Pflugverzicht mit einem steigenden Unkrautdruck und einem dementsprechend erhöhten Herbizideinsatz gerechnet werden (ebenda, S. 107 ff.; COUSENS und MORTIMER, 1995, S. 173; ALBRECHT, 2004, S. 98). Darüber hinaus kann vor allem bei Bodenherbiziden die Wirksamkeit bei verminderter Bodenbearbeitungsintensität durch einen erhöhten Humusgehalt in der obersten Bodenschicht herabgesetzt sein (SADEGHI et al. 1998).

Die Entscheidung darüber, welche Grundbodenbearbeitung durchgeführt wird, wird nicht allein durch die Auswirkungen auf die Unkrautentwicklung bestimmt. Energie-, Zeit- und Kosteneinsparungen, eine Erosionsminderung, die derzeitige politische Förderung von Mulchsaatverfahren im Rahmen der Modulation, eine mögliche Verbesserung der Bodenstruktur – insbesondere durch eine Förderung des Bodenlebens – und eine verminderte Nährstoffauswaschung sind die Motivationsgründe für Landwirte, auf den Pflug zu verzichten (vgl. TEBRÜGGE, 2001). Jedoch ist die pfluglose Bodenbearbeitung nicht auf allen Standorten (insbesondere Sandböden) und bei allen Fruchtfolgen (hoher Getreideanteil mit stärkerer Verungrasung) durchführbar.

2.3.5 Stoppelbearbeitung

Nach der Getreide- und Rapsernte kann durch eine ein- bis mehrmalige, meist flache Bodenbearbeitung, die Stoppelbearbeitung, eine nicht unerhebliche Unkrautregulation erreicht werden. Vor allem ausdauernde Wurzelunkräuter (*Agropyron repens* (Quecke), *Cirsium*

arvense (Ackerkratzdistel)) werden durch die Stoppelbearbeitung nachhaltig geschädigt. Der Unkrautauflauf der einjährigen Unkräuter (Samenunkräuter) wird nach PALLUTT (2002 c, S. 109) durch die Stoppelbearbeitung um 20% vermindert. Ähnliche Ergebnisse publizierten ROBERTS und FEAST (1972), die in einem Parzellenversuch in der Variante mit Bodenbearbeitung einen durchschnittlichen Samenabbau von 32% und in der ohne Bodenbearbeitung von 12% ermittelt haben. Die Reduktion der Samenunkräuter durch die Stoppelbearbeitung basiert zum einen auf der Verbesserung der Auflaufbedingungen der Samen und zum anderen auf der Erhöhung der biologischen Aktivität, wodurch ein höherer Samenabbau erfolgt. Die nicht unerhebliche Bedeutung des mikrobiellen Abbaus der Unkrautsamen belegt ein Versuch, wonach in einem zuvor sterilisierten Boden der Samenabbau von Flughafersamen so stark verlangsamt wurde, dass nach einem Jahr noch viermal mehr lebensfähige Samen enthalten waren als in der Kontrolle (COUSENS und MORTIMER, 1995, S. 103).

2.3.6 Düngung

Obwohl COUSENS und MORTIMER (1995, S. 181 f.) vermuten, dass die Düngung langfristig einen größeren Einfluss auf die Zusammensetzung der Unkrautpopulation gehabt haben kann als der Herbizideinsatz, ist es dennoch schwierig vorherzusagen, wie sich das Konkurrenzgeschehen innerhalb eines Jahres durch die Düngung verändert. Die Wirkungen können durch eine Vielzahl weiterer Faktoren modifiziert werden, so dass beispielsweise die Reaktion einer Unkrautart auf die Düngung innerhalb eines Feldes von Jahr zu Jahr gegensätzlich sein kann.

2.4 Chemische Unkrautkontrolle

Neben möglichen negativen externen Effekten bieten Herbizide generell die effizienteste Möglichkeit der Unkrautkontrolle (MORTENSEN et al. 2000, S. 51), da der Einsatz von Herbiziden relativ kostengünstig und einfach und die Wirkung relativ hoch und sicher ist. MORTENSEN et al. (2000, S. 50) bezeichnen die Zeit nach dem zweiten Weltkrieg bis in die späten siebziger Jahre als die „herbicide era“, denn in dieser Zeit wurde allgemein davon ausgegangen, dass durch Herbizide die endgültige Lösung für das Problem der Unkrautkontrolle gefunden worden sei. Obwohl heutzutage die Unkrautkontrolle immer noch im wesentlichen durch Herbizide erfolgt, wurden oder werden Landwirte durch politische

Ziele und Resistenzprobleme gezwungen, die Unkrautkontrolle nicht mehr nur allein auf Herbizide zu stützen (MATTESON, 1995; PAICE et al. 1998, S. 373). Auch durch die Entwicklung herbizidresistenter Nutzpflanzen mit Hilfe der Gentechnik wird sich an dieser prinzipiellen Problematik nichts ändern (SHANER, 2000; MORTENSEN et al., 2000, S. 50; SYNGENTA, 2002; KUDSK und STREIBIG, 2003, S. 97).

Ein Landwirt kann den Einsatz von Herbiziden reduzieren, indem der Einsatz weiter optimiert wird. Diese Möglichkeiten sind Bestandteil des „kurativen Pflanzenschutzes“. Dieser Begriff beschreibt die Bekämpfung bereits vorhandener Schaderreger durch direkte Maßnahmen (chemisch, mechanisch). Möglichkeiten, im Rahmen des kurativen Pflanzenschutzes den Herbizideinsatz bzw. die hiervon ausgehenden Umweltbelastungen zu reduzieren, bieten sich, indem Schadschwellen angewendet werden (Kapitel 3), Teilflächenunkrautbekämpfung durchgeführt wird (Kapitel 4, 5 und 6), die Herbiziddosen reduziert bzw. optimiert werden (Abschnitt 2.4.1) oder Herbizide mit geringerer Umweltbelastung entwickelt werden (MORTENSEN et al. 2000, S. 51). Andererseits kann durch die Integration von pflanzenbaulichen Maßnahmen die generelle Abhängigkeit der pflanzlichen Produktion von Herbiziden reduziert werden (präventiver bzw. hygienischer Pflanzenschutz, siehe Abschnitt 2.3).

2.5 „Factor-adjusted doses-Strategie“

Die Hersteller von Herbiziden geben für ihre Mittel Aufwandmengenempfehlungen. Diese sind in der Regel so hoch bemessen, dass die Wirkung auch unter ungünstigen Bedingungen noch ausreichend ist, so dass die Hersteller eine Mindestleistung garantieren können (KUDSK und STREIBIG, 2003, S. 92). Die Wirksamkeit von Herbiziden wird durch eine Reihe von Faktoren bestimmt. Zu nennen sind hier beispielsweise das Entwicklungsstadium der Unkräuter, die Wachstumsbedingen vor und nach der Herbizidapplikation (Temperatur, Niederschlag, Lichtintensität), die Bodeneigenschaften (Ton- und Humusgehalt), die Bodenfeuchte und das Unkrautunterdrückungsvermögen der Kultur. Unter günstigen Bedingungen ist es möglich, ohne signifikante Minderwirkungen den Wirkstoffaufwand zu reduzieren (KUDSK, 1989; KRÜGER et al. 1992; PEDERSEN et al., 1993; PALLUTT, 1993; PALLUTT, 2002 c, S. 226), so dass umfangreiche Forschungen durchgeführt wurden und werden, um die Einflussfaktoren auf die Wirksamkeit von Herbiziden zu ermitteln und

entsprechend die Herbiziddosen anpassen bzw. optimieren zu können. Diese Strategie wird mit dem Begriff *factor-adjusted doses* beschrieben.

Das Unkrautspektrum ist nach KUDSK und STREIBIG (2003, S. 93) die wichtigste Variable zur Optimierung des Wirkstoffaufwandes. Aber auch das Entwicklungsstadium kann einen großen Effekt auf die Wirksamkeit haben. In der Regel ist die Empfindlichkeit von Unkräutern gegenüber Herbiziden in frühen Entwicklungsstadien höher. Ausnahmen bilden Gräser, deren Aufnahme von blattaktiven Substanzen in späteren Entwicklungsstadien wegen der dann größeren Blattfläche höher sein kann. Wird die Herbizidapplikation so früh durchgeführt, dass anschließend noch weitere Unkrautaufläufe folgen können, so kann – bei Betrachtung der gesamten Anbauperiode – die Effektivität früherer Anwendungstermine vermindert sein. Letztlich wird der Landwirt stets versuchen, seine Pflanzenschutzmaßnahmen zum optimalen Zeitpunkt durchzuführen. Dies ist jedoch nicht immer möglich, da die zukünftige Witterung nicht vorhergesagt werden kann, nicht alle Wechselwirkungen und Bedingungen zwischen dem Anwendungszeitpunkt und der Wirksamkeit der Maßnahme bekannt sind und alle Pflanzenschutzmaßnahmen nicht zu einem einzigen Zeitpunkt, sondern über eine längere Zeitperiode hinweg durchgeführt werden. Der Landwirt wird deshalb idealer Weise zu Beginn der Unkrautbekämpfungsperiode solche Herbizide auswählen, die besonders für frühe Anwendungen geeignet sind und zu späteren Zeitpunkten die HerbizidAuswahl entsprechend anpassen. Gleichzeitig wird er den Aufwand den weiteren Anwendungsbedingungen (Witterung, Bodenart, Entwicklungsstadium, Kulturpflanzenentwicklung, etc.) anpassen.

2.5.1 Untersuchung zur Wirksamkeit von Herbiziden

COLLINGS et al. (2003) untersuchten in den Jahren 1998 bis 2000 die Wirksamkeit zweier unterschiedlicher Herbizide: Arelon (Isoproturon) und Topik (Clodinafop-Propargyl) auf Ackerfuchsschwanz an unterschiedlichen – jeweils geeigneten und praxisüblichen – Anwendungstagen zwischen Oktober und April mit unterschiedlichen Aufwandmengen (0%, 25%, 50% und 100% der empfohlenen Aufwandmenge). Es wurde untersucht, inwieweit die Witterung 14 Tage vor und nach der Herbizidapplikation die Wirksamkeit der Herbizide beeinflusst. Die Mortalitätsrate der Unkräuter schwankte bei voller Aufwandmenge je nach Witterung innerhalb weiter Grenzen (20 – 98% für Isoproturon; 42 – 100% für Clodinafop). Zum Teil variierte die Wirksamkeit zwischen zwei aufeinanderfolgenden Anwendungstagen

sogar erheblich (20%-Punkte) (ebenda, S. 149). Herbizidanwendungen waren in der Regel am Morgen wirkungsvoller als am Abend. Das Entwicklungsstadium des Ackerfuchsschwanzes hatte im Vergleich zur Witterung nur einen geringen Einfluss auf die Wirksamkeit. Die Wirksamkeiten von Clodinafop waren tendenziell zu späteren Zeitpunkten höher; für Isoproturon war hier kein klarer Zusammenhang erkennbar. Isoproturon wird hauptsächlich über die Wurzeln aufgenommen, so dass Bodenfeuchtigkeit und wüchsige Bedingungen (erhöhte Verdunstung) die Aufnahme verbessert haben. Sehr hohe Niederschläge führten jedoch zu Auswaschungen und somit verminderten Wirkungen (siehe auch LANDWIRTSCHAFTSKAMMER WESTFALEN-LIPPE, 2002). Für Clodinafop (Aufnahme über das Blatt) war es kaum möglich, konsistente Zusammenhänge zwischen der Witterung und Wirksamkeit zu isolieren. Tendenziell führten eine erhöhte potenzielle Evapotranspiration und Windgeschwindigkeit vor der Applikation zu verbesserten Wirkungen.

Abschließend kann anhand des vorgestellten Beispiels festgehalten werden, dass die Zusammenhänge zwischen Witterung, Anwendungszeitpunkt und Herbizidwirksamkeit noch nicht vollständig geklärt sind. Bei Kenntnis dieser Zusammenhänge sind jedoch deutliche Wirkstoffeinsparungen möglich. CUSSANS (1992) argumentiert jedoch, dass das Risiko von Minderwirkungen bei der *factor-adjusted doses*-Strategie erhöht sein kann. Dennoch werden *factor-adjusted doses* in der Praxis erfolgreich praktiziert und leisten einen wichtigen Beitrag zur Verminderung der Umweltbelastung durch Herbizide (MORTENSEN et al. 2000, S. 53).

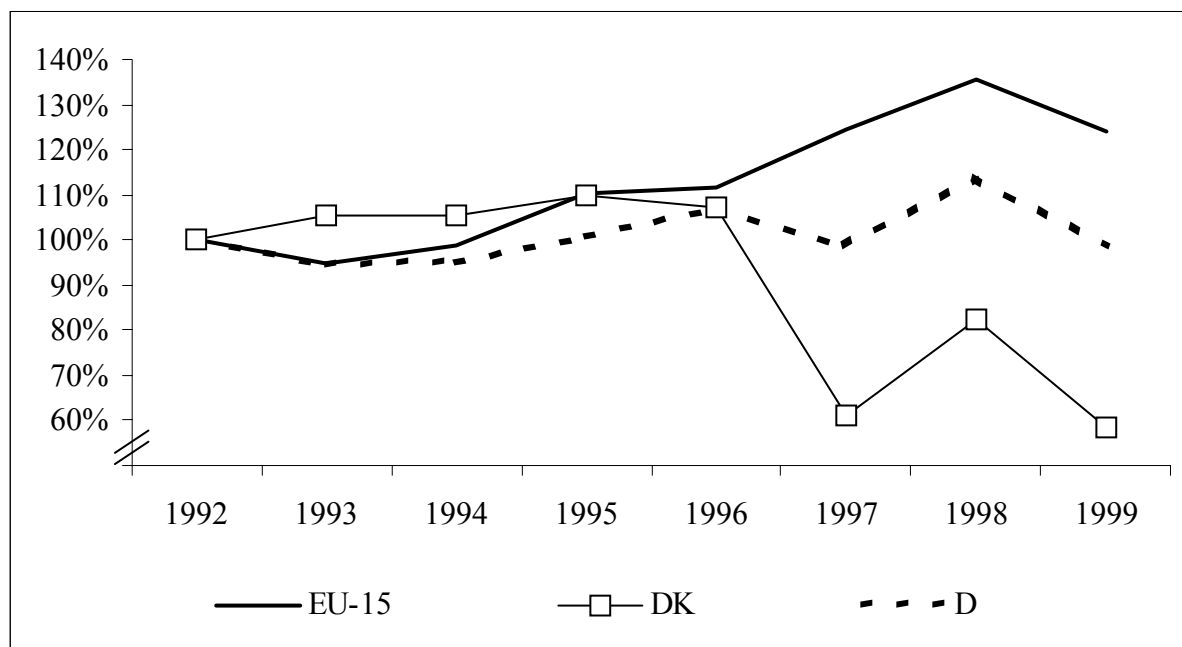
2.5.2 Umsetzung der *factor-adjusted doses* Strategie

Häufig verfügen größere und erfolgreichere Pflanzenbauer bzw. Pflanzenbauberater über sehr viel Erfahrungswissen bezüglich des Pflanzenschutzmitteleinsatzes und können so effizientere Entscheidungen im Pflanzenschutz treffen als andere Entscheidungsträger, die über dieses Wissen nicht verfügen. Die Multiplikation des Erfahrungswissens (z. B. Beratung) kann deshalb einen deutlichen Beitrag zur Steigerung der Effizienz des Pflanzenschutzmitteleinsatzes leisten. In Dänemark wurde zu diesem Zweck – gefördert von der dänischen Regierung – das web-basierte Entscheidungsunterstützungsprogramm PC Plant Protection entwickelt. Dieses Programm ermittelt aus einer umfangreichen Datenbank, die jährlich durch neue Versuchsergebnisse aktualisiert wird, entsprechend der Angaben des Nutzers zum Unkrautspektrum und weiteren Einflussfaktoren eine optimierte Herbizidwahl und eine angepasste Aufwandmengenempfehlung (KUDSK, 1999). Das

Programm wird nach Angaben von MURALI et. al. (1999, S. 109) in größerem Umfang von Landwirten und Beratern erfolgreich eingesetzt.

In Abbildung 1 ist die Entwicklung der Herbizidverbräuche in Dänemark, Deutschland und der EU-15 dargestellt. Während in der europäischen Union der Herbizidverbrauch im betrachteten Zeitabschnitt tendenziell angestiegen ist und in Deutschland in etwa konstant blieb, war es in Dänemark möglich, mit Hilfe der politisch unterstützten Strategie der *factor-adjusted doses* und weiterer politischer Maßnahmen, wie der Intensivierung der Beratung und der Besteuerung von Pflanzenschutzmitteln, die Herbizidverbräuche deutlich zu senken.

Abbildung 1: Entwicklung des Herbizidverbrauches in Dänemark, Deutschland und der EU-15



Quelle: eigene Darstellung nach EUROSTAT, 2002, S. 19; Basisjahr 1992

Da in Dänemark gleichzeitig mehrere Maßnahmen ergriffen wurden, ist nicht klar, welchen Beitrag jede einzelne Maßnahme geleistet hat (EUROPÄISCHE KOMMISSION, 2002, S. 39).

3 Schadschwellen

3.1 Statische Schadschwellen

Die Grundlage der Schadschwellentheorie wurde bereits 1934 durch PIERCE mit folgender Aussage gelegt: „Is all insect attack to be computed as assessable damage. If not, at what point does it become assessable? Is control work warranted when damage is below that point?“.

Diese erste Definition von Schadschwellen, die nur danach fragt, bei welcher Befallshöhe ein Schaden feststellbar ist, wurde von DIERCKS und HEYE (1970) um die Kosten der Behandlungsmaßnahmen erweitert: Eine Bekämpfungsmaßnahme ist demnach nur dann ökonomisch sinnvoll, wenn die Kosten einer Behandlung kleiner oder höchstens gleich den erwarteten Leistungen der Maßnahme sind (siehe Gleichung 1). Die Leistung einer Behandlungsmaßnahme ergibt sich aus dem Produkt des erwarteten Ertragsrückgangs bei unterlassener Behandlung und der Wirksamkeit der Maßnahme. Die Behandlungskosten setzen sich aus den Ausbringungskosten (Maschinen- und Lohnkosten) und den Mittelkosten zusammen und sind unabhängig von der Befallshöhe.

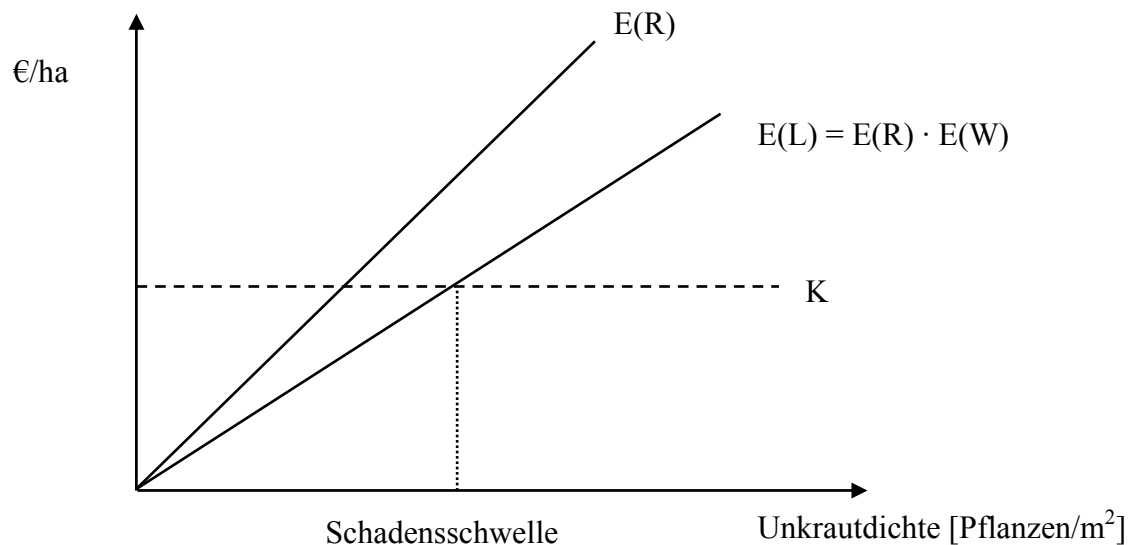
Gleichung 1: $K \leq E(L)$

K: Kosten der Behandlungsmaßnahme

L: Leistungen

E(...): Erwartungswert

In Abbildung 2 ist ein linearer Zusammenhang zwischen der Unkrautdicke und der erwarteten Ertragsreduktion (E(R)) der Nutzpflanzen unterstellt. Mit steigender Unkrautdicke (Abzisse) steigt die erwartete Leistung einer Unkrautbekämpfungsmaßnahme: Das Produkt aus dem erwarteten Schaden bei Nichtbehandlung (E(R)) und dem erwarteten Wirkungsgrad E(W). Die Schadschwelle ist die Unkrautdicke bei der die Kosten und die erwarteten Leistungen der Behandlung gleich sind (vgl. Abbildung 2).

Abbildung 2: Statische Schadschwelle

Quelle: AULD et al., 1987, S. 57

R: Ertragsreduktion

W: Wirkungsgrad

Ist die Unkrautdichte unterhalb der Schadensschwelle, so lassen sich durch den Verzicht auf eine Pflanzenschutzmaßnahme Kosten in Höhe der Differenz zwischen der Geraden K und $E(L)$ einsparen. Liegt die Unkrautdichte nur geringfügig unter der Schadschwelle, so werden die möglichen Einsparungen an Behandlungskosten weitestgehend durch Konkurrenzeffekte kompensiert.

Das Schadschwellenkonzept ist unmittelbar einleuchtend, erweist sich bei der Umsetzung jedoch als schwierig. Denn die Ertragseinbußen sowie eventuelle Mehrkosten für Trocknung oder Reinigung des Erntegutes hängen nicht nur von der Dichte der Schadorganismen, sondern von vielen weiteren Einflussgrößen (Witterung, Kulturentwicklung etc.) ab, so dass eine praktische Umsetzung des Schadschwellenkonzeptes zum Teil problematisch ist (siehe Abschnitt 5.2).

3.1.1 Bestimmung des optimalen Herbizidaufwandes

Nach der obigen Darstellung der Schadschwelle wird die Dosierungsmenge als fix angenommen und es wird nach der Befallshöhe gesucht, bei der eine Behandlung ökonomisch sinnvoll ist. Das Entscheidungsproblem wird somit auf eine ja/ nein-Entscheidung reduziert. Nach Meinung einiger Autoren ist dies zu ungenau (vgl. KIM et al. 2002; CHRISTENSEN et al. 2003). Sie fordern, dass der Herbizidaufwand in Abhängigkeit von der Unkrautdicke angepasst werden sollte. Theoretisch kann die optimale Einsatzmenge von Pflanzenschutzmitteln bestimmt werden, indem man nach derjenigen Dosis sucht, bei der die Grenzleistungen der Pflanzenschutzmaßnahme den Grenzkosten entsprechen. Dieser Ansatz setzt jedoch voraus, dass die Wirksamkeit einer Herbizidmaßnahme in Abhängigkeit von der Dosis mit hinreichender Genauigkeit abgebildet werden kann. Durch eine Fülle nicht vorhersagbarer Einflussfaktoren, ist dies jedoch nicht möglich (siehe Abschnitt 2.5.1). Doch selbst wenn die zukünftigen Umweltbedingungen und auch die Wirkungsfunktion bekannt wären, brächte eine Anpassung der Herbiziddosis an die Unkrautdicke nur marginale Vorteile. Dies wird im folgenden dargestellt, um zu zeigen, dass eine ja/ nein-Entscheidung bei der Unkrautbekämpfung sinnvoller ist.

In Abbildung 3 sind unterschiedliche standard-dose-response-Kurven entsprechend Gleichung 2 dargestellt (vgl. STREIBIG, 1980), die nach KIM et al. (2002, S. 2) geeignet sind, um die Biomasse der Unkräuter bzw. das Konkurrenzpotenzial der Unkräuter in Abhängigkeit von der Herbiziddosis zu beschreiben. Je nachdem wie die Witterungsbedingungen und die weiteren Einflussfaktoren ausgeprägt sind, werden die Funktionen nach links oder rechts verschoben sein (siehe Abbildung 3).

Gleichung 2:
$$W = 1 - 1 / \left(1 + \left(\frac{Dosis}{e^{LD50}} \right)^B \right)$$

W: Wirksamkeit

e: Eulersche Zahl

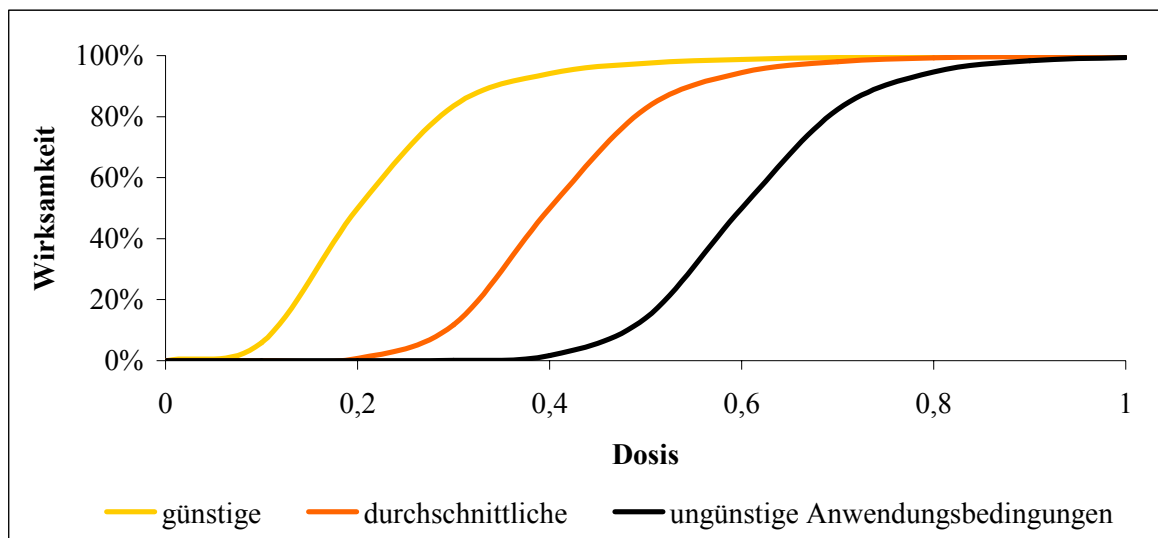
LD50: natürlicher Logarithmus der notwendigen Dosis um 50% der Unkräuter abzutöten.

B: Parameter zur Anpassung der Funktion

Dosis: Herbiziddosis (Anteil der empfohlenen Aufwandmenge)

Die sigmoiden Kurvenverläufe zeigen bei sehr niedrigen Dosierungen zunächst eine Nullwirkung, um dann ab einem bestimmten Herbizidaufwand rasch anzusteigen. Nach diesem raschen Anstieg nähern sich die Kurvenverläufe asymptotisch dem maximalen Wirkungsgrad (hier 100%) und die jeweiligen Grenzwirkungsgrade sind nahe Null. Betrachtet man in Abbildung 3 beispielsweise den mittleren Kurvenverlauf (durchschnittliche Anwendungsbedingungen), so wird deutlich, dass für eine Optimierung des Herbizidaufwandes in einer Grenzleistungsbetrachtung nur ein sehr enger Dosisbereich relevant ist. Denn nur zwischen der 0,2-fachen und der 0,7-fachen Dosis ist der Grenzwirkungsgrad größer als Null (siehe Abbildung 3).

Abbildung 3: Standard dose-response-Kurve: Wirksamkeit eines Herbizides in Abhängigkeit von der Dosis bei unterschiedlichen Anwendungsbedingungen



Quelle: Eigene Darstellung

Dass auf Grund des Kurvenverlaufes der standard dose response Funktion nur eine geringe Anpassung des Herbizidaufwandes in Abhängigkeit von der Unkrautdicke erwartet werden kann, soll am folgenden Beispiel verdeutlicht werden:

Geht man, wie in Abbildung 2 dargestellt, von einer linearen Ertragsverlustbeziehung aus, so können die Leistungen einer Herbizidmaßnahme in Abhängigkeit von der Unkrautdicke und der Herbiziddosis durch Gleichung 3 dargestellt werden.

Gleichung 3:
$$L(UK, Dosis) = UK \times K_Index \times \left(1 - 1 / \left(1 + \left(\frac{Dosis}{e^{LD50}} \right)^B \right) \right)$$

L(...): Leistung der Unkrautbekämpfungsmaßnahme

UK: Unkrautdichte [Pflanzen/m²]

Die Kosten einer Bekämpfungsmaßnahme hängen, wie gesagt, nur von der Dosis und nicht von der Unkrautdichte ab.

Gleichung 4:
$$H(Dosis) = A + Dosis \times P$$

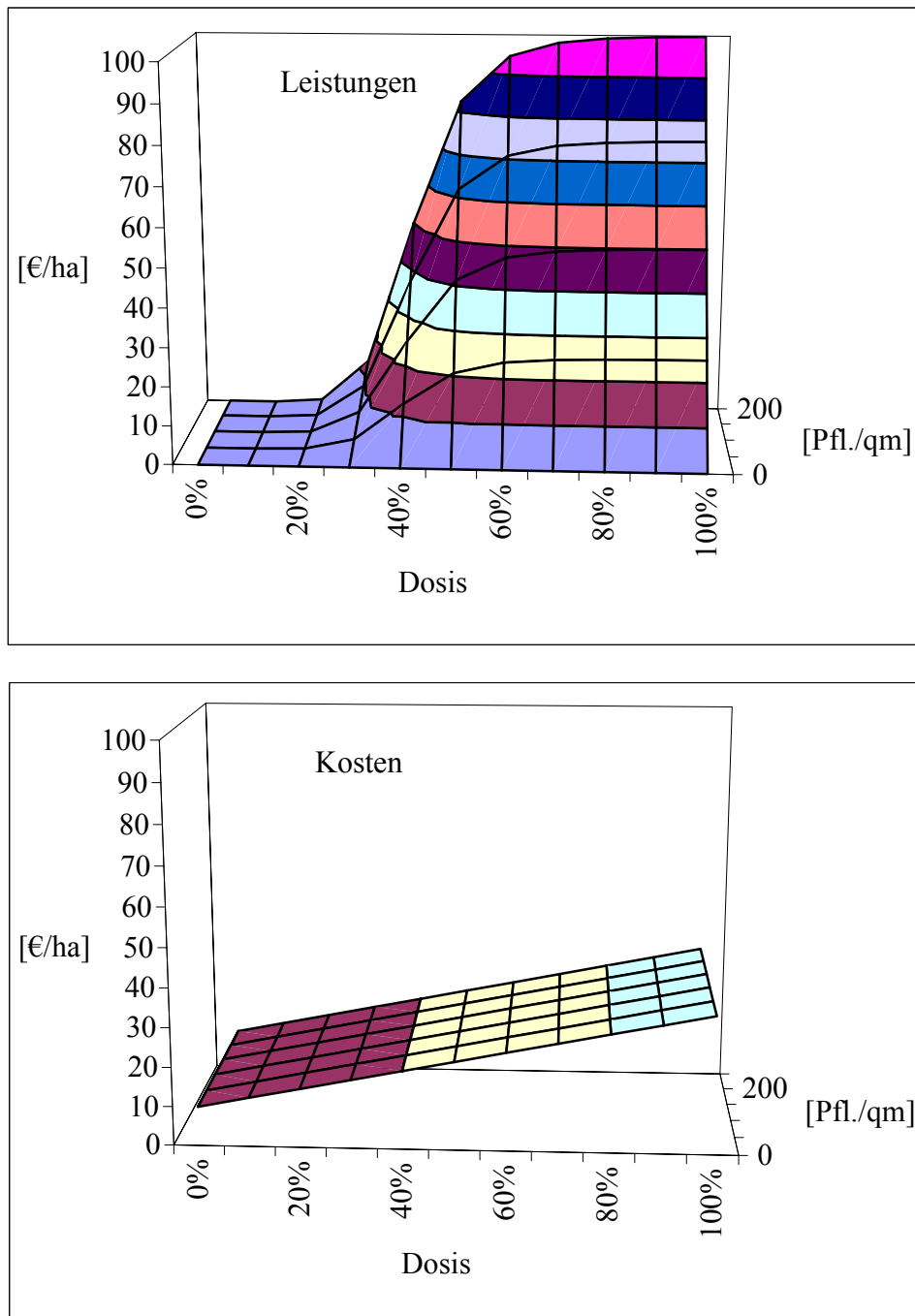
H(...): Kosten

A: Ausbringungskosten

P: Herbizidkosten bei vollem Aufwand

In Abbildung 4 sind die Zusammenhänge der Gleichungen 3 und 4 graphisch dargestellt. (K_Index: 5 kg/ha je Unkrautpflanze/m²; A: 10 €/ha; P: 25 €/ha; LD50: 0,4; B: 7). Für die gewählten Modellparameter sind bis 53 Unkräuter/m² die Kosten einer Unkrautbekämpfungsmaßnahme höher als die Leistungen. Von 54 bis 139 Unkräutern ist die 0,6-fache Dosis ökonomisch optimal. Zwischen 140 und 425 Unkräutern ist eine Aufwandmengenerhöhung um 10 %-Punkte auf die 0,7-fache Dosis sinnvoll. Die optimale Herbiziddosis ist also nahezu vollkommen unabhängig von der Unkrautdichte.

Abbildung 4: Leistungen und Kosten einer Herbizidmaßnahme in Abhängigkeit von der Unkrautdicke und der Herbiziddosis



Quelle: Eigene Darstellung

In der Praxis unterliegt die Dosis-Wirkung-Funktion je nach Umweltbedingungen erheblichen Schwankungen (siehe Abbildung 3), so dass die Auswirkungen dieser Umweltfaktoren auf die Höhe des optimalen Herbizidaufwandes von größerer Bedeutung sind als die Auswirkungen unterschiedlicher Unkrautdichten. Vereinfachend kann man davon ausgehen, dass bei den

vorherrschenden Randbedingungen einer Herbizidmaßnahme (Konkurrenzkraft des Getreides, Witterung, Nährstoffversorgung etc.) eine bestimmte Dosis für die Unkräuter letal ist und sie deshalb absterben. Wird diese Dosis unterschritten, so überleben die Unkräuter und können unter Umständen ähnlich starke Konkurrenzeffekte entfalten wie unbehandelte Unkräuter. Wird die letale Dosis überschritten, so resultiert hieraus kein zusätzlicher Nutzen (PANNELL, 1990). Deshalb scheint es sinnvoller zu sein, die letale Herbiziddosis und die Herbizidauswahl entsprechend der *factor-adjusted doses*-Strategie anhand qualitativer Kriterien und unabhängig von der Unkrautdicke zu bestimmen.

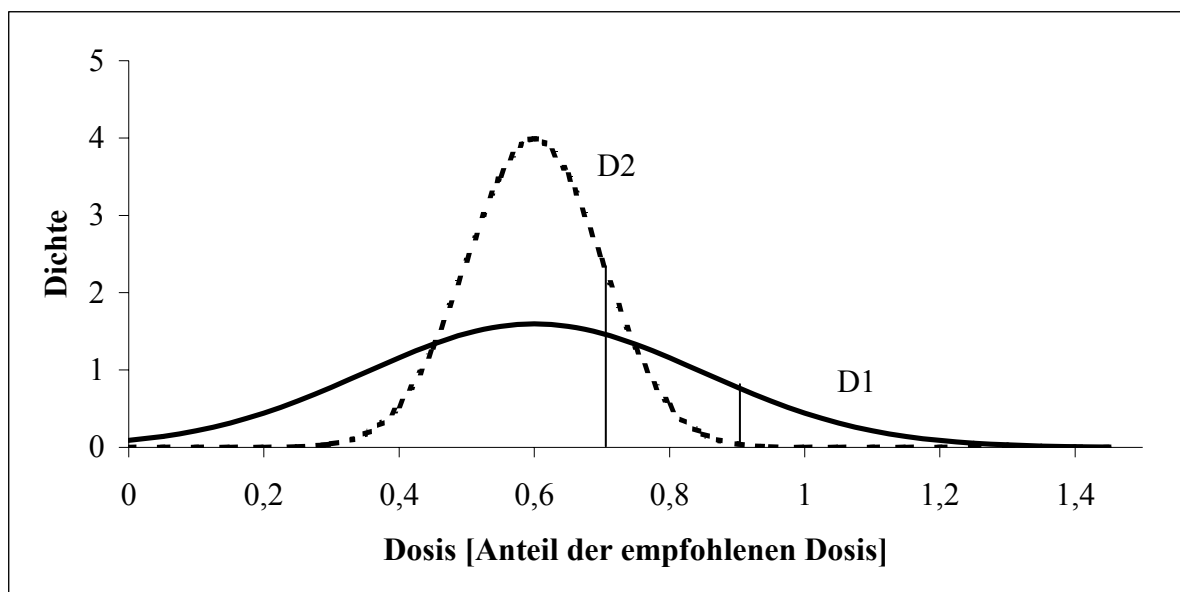
3.1.2 Berücksichtigung von Risiko

Pflanzenschutzmaßnahmen sind ertragsabsichernde Maßnahmen – vergleichbar mit Versicherungen – (MUMFORD und NORTON, 1984; ROBINSON und BARRY, 1987), so dass mit zunehmendem Risiko mit einem erhöhten Einsatz zu rechnen ist (ODENING und BOKELMANN, 2000, S. 186). Dies soll im Folgenden gezeigt werden.

A priori kann der Wirkungsgrad einer Pflanzenschutzmaßnahme nicht exakt vorhergesagt werden. Misst man die relativen Herbiziddosen in Bezug auf den empfohlenen Herbizidaufwand, die notwendig sind, um 90% der Unkräuter abzutöten, so werden je nach Anwendungsbedingungen unterschiedlich hohe Dosen erforderlich sein (vgl. COLLINGS et al. 2003, S. 148). In Abbildung 5 ist für diesen Zusammenhang eine Normalverteilung unterstellt. Die Erwartungswerte der beiden Dichtefunktionen D1 und D2 betragen jeweils 0,6. Mit anderen Worten ist im Durchschnitt der Jahre die 0,6-fache Dosis notwendig, um 90% der Unkräuter wirkungsvoll zu bekämpfen. Ein risikoaverser Entscheidungsträger kann die Herbiziddosis entsprechend seinem Risikoverhalten höher als die 0,6-fache Dosis wählen, damit er auch unter ungünstigen Voraussetzung noch die gewünschte Wirkung erzielt. Eine mögliche Risikoeinstellung könnte so lauten, dass der Landwirt mit einer 90% Wahrscheinlichkeit mindestens eine 90%ige Herbizidwirkung erzielen will. Kennt der Landwirt die Dichtefunktion D1 ($\mu=0,6$; $\sigma=0,25$), so würde die 0,92-fache Dosis ($0,92 = \mu + 1,28 \sigma$) diese Bedingung erfüllen. Verfügt der Landwirt über eine größere Informationsbasis (z. B. PC Plant Protection) und kann er die vorherrschenden Umweltbedingungen bei seiner Entscheidung mitberücksichtigen, so kann er mit höherer Wahrscheinlichkeit die Wirkung einer bestimmten Herbiziddosis prognostizieren. Mit anderen Worten reduziert sich die Varianz der Dichtefunktion. In Abbildung 5 ist dies graphisch durch den Übergang von D1

auf D2 ($\mu=0,6$; $\sigma=0,1$) gekennzeichnet. Soll ebenfalls, wie im ersten Beispiel, eine 90%ige Herbizidwirkung nur in 10% der Fälle unterschritten werden, so ist nun nur das 0,72-fachen des empfohlenen Herbizidaufwand im Gegensatz zum 0,92-fachen des ersten Beispiels notwendig. Je unsicherer die Wirkung eines Pestizides vorhergesagt werden kann, desto höher wird die Dosierung zur Risikovermeidung gewählt werden. Eine Verbesserung der Wirkungssicherheit kann somit zu einer Verminderung des Pestizideinsatzes führen (FEDER, 1979, S. 101).

Abbildung 5: Wahrscheinlichkeitsdichten notwendiger Herbiziddosen zur Erreichung einer 90%-Wirkung bei unterschiedlicher Informationsbasis



Quelle: Eigene Darstellung

3.2 Dynamische Schadschwellen

Durch die Samenproduktion nicht behandelter bzw. nicht abgetöteter Unkrautpflanzen wird der Samenvorrat des Bodens ergänzt, so dass die Unkrautdichte in den Folgekulturen erhöht ist (BLUMENBERG, 1987, S. 46; KAISER, 1989, S. 46; NIEMANN et al., 2000, S. 281). FROUD-WILLIAMS (1987) beschrieb diesen Zusammenhang plakativ: „One year’s seeding – seven years weeding!“ Deshalb müssen bei Unkrautbekämpfungsentscheidungen neben den Auswirkungen im unmittelbaren Anbaujahr auch die dynamischen Aspekte berücksichtigt werden (SCHMITZ, 1984; KAUL und HEYLAND, 1992, S. 179; HEITEFUSS et al., 1994, S. 214). Ein dynamisches Modell liegt dann vor, wenn die abgebildeten Zusammenhänge durch einen

Zeitindex gekennzeichnet sind und das Modell zumindest eine Verknüpfung zweier zeitlich gegeneinander verzögerter Ereignisse aufweist (BERG und KUHLMANN, 1993, S. 22). Bei Kenntnis der Populationsdynamik (Siehe Abschnitt 5.1) kann diese Verknüpfung der aufeinander folgenden Jahre berücksichtigt werden, indem für einen vorgegebenen Planungszeitraum die Bekämpfungsschwelle ermittelt wird, die die Gesamtkosten für die gesamte Planungsperiode minimiert (siehe Gleichung 5).

Gleichung 5:

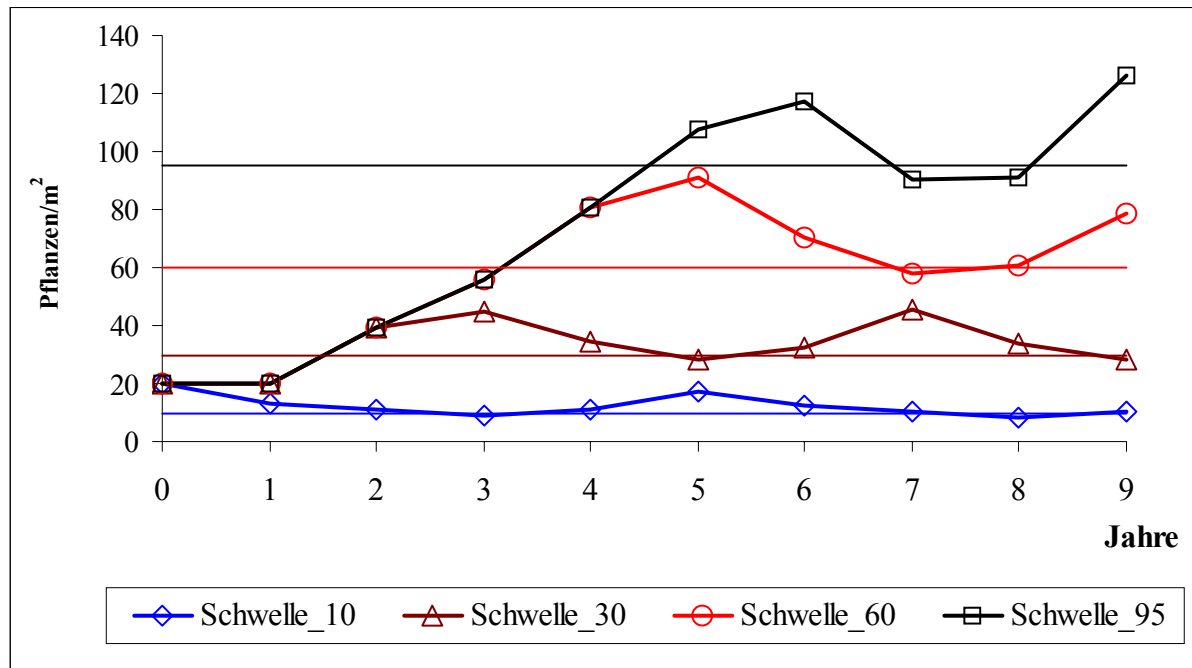
$$GK = \sum_{j=0}^n (H_j + R(UK_j)) \times q^{-j}$$

- GK: kapitalisierte Gesamtkosten
- H_j : Kosten der Unkrautbekämpfung im Jahr j
- $R()$: Ertragsreduktion in Abhängigkeit von der Unkrautdichte
- UK_j : Unkrautdichte im Jahr j
- q: Zinsfaktor
- n: Dauer der Planungsperiode

In Abbildung 6 sind für eine Ausgangsverunkrautung von 20 Keimpflanzen/m² Entwicklungspfade der Unkrautdichten vor der Herbizidapplikation dargestellt, wenn bei jeweils unterschiedlichen Unkrautdichten Bekämpfungen ausgelöst werden. Die in dieser Grafik verwendeten Modellgleichungen und Modellparameter werden in Kapitel 5 eingehend erklärt, in Abschnitt 5.4.1 wird das verwendete Beispiel der Abbildung 6 noch einmal im Detail aufgegriffen.

Eine Bekämpfungsschwelle von 10 Unkrautkeimlingen/m² wird während des betrachteten Gesamtzeitraums nur in zwei Jahren (3 und 8) unterschritten. Bei einer Bekämpfungsschwelle von 30 Pflanzen/m² wird in den Jahren 0, 1, 5 und 9, bei einer Schwelle von 60 in den Jahren 0, 1, 2, 3 und 7 und bei einer Schwelle von 95 Pflanzen/m² in den Jahren 0, 1, 2, 3, 4, 7 und 8 auf eine Unkrautbekämpfung verzichtet (vgl. Abbildung 6). Je höher die Bekämpfungsschwellen sind, desto größer sind die Herbizideinsparungen. Die Konkurrenzeffekte verhalten sich umgekehrt.

Abbildung 6: Populationsdynamik (Frühjahrsauflauf) in Abhängigkeit von 4 unterschiedlichen Bekämpfungsschwellen



Quelle: Eigene Berechnungen; Startverunkrautung: 20 Pfl./m²

Betrachtet man die Behandlungshäufigkeit bei unterschiedlich hohen Bekämpfungsschwellen für den gewählten Planungszeitraum von 10 Jahren, so hat der Anfangsverlauf der Unkrautentwicklung einen recht großen Einfluss. Ist die Ausgangsverunkrautung niedrig und die Bekämpfungsschwelle hoch, so können in den ersten Jahren Unkrautbehandlungen zu Lasten einer sich aufbauenden Unkrautpopulation eingespart werden. Bei umgekehrter Ausgangslage verhält es sich entsprechend gegensätzlich. Nach dieser Anpassungsphase schwankt die Unkrautdichte um die Schadschwelle, da entsprechend einem Regelkreis ein Überschreiten der Unkrautdichte eine Behandlung auslöst und bei Unterschreiten der Schwelle die Unkrautbehandlung ausgesetzt wird. In Tabelle 1 sind die Behandlungshäufigkeiten für den Planungszeitraum von 10 Jahren dargestellt. Darüber hinaus wurden nachhaltigen Behandlungshäufigkeiten errechnet, indem die Simulationszeit auf 100 Jahre erhöht wurde und somit die Anpassungsphase, also die Entwicklung der Unkrautdichte von der Ausgangshöhe bis zur Schadschwelle einen geringeren Einfluss auf die Behandlungshäufigkeit nimmt. Durch eine Erhöhung der Bekämpfungsschadschwelle von 10 auf 95 Unkräuter/m² kann die Behandlungsfrequenz langfristig von 79% auf 55% reduziert werden. Im Verhältnis zur Erhöhung der Bekämpfungsschwellen wirkt das langfristig realisierbare Einsparpotenzial an Unkrautbehandlungen geringer.

Tabelle 1: Behandlungshäufigkeiten und Gesamtkosten unterschiedlicher Bekämpfungsschwellen

Bekämpfungsschwelle [Pfl./m ²]	0	10	30	60	95
Behandlungshäufigkeit (Jahr 0 – 9)	100%	80%	60%	50%	30%
nachhaltige Behandlungshäufigkeit (Jahr 0 – 99)	100%	79%	74%	65%	55%
Durchschnittskosten der ersten 10 Jahre [€/ (ha x Jahr)]	21,11	17,41	15,35	15,60	15,65

Quelle: Eigene Berechnungen; Zins: 0%; Startverunkrautung: 20 Pfl./m², Modellparameter entsprechend der Klasse der dikotylen Unkräuter (s. u.)

Werden die durchschnittlichen jährlichen Kosten (Zinssatz: 0%) für unterschiedliche Bekämpfungsschwellen für den gewählten Zeitraum von 10 Jahren und die Anfangsverunkrautung von 20 Unkrautkeimlingen je Quadratmeter durchkalkuliert, so ergeben sich bei einer Bekämpfungsschwelle von 56 – 57 Unkräutern/m² mit 14,40 €/ha die niedrigsten jährlichen Durchschnittskosten. Nach den Modellergebnissen sind somit im Vergleich zu einer alljährlichen Unkrautbekämpfung Kosteneinsparungen in Höhe von 6,75 €/ha bzw. ca. 30% realisierbar (siehe auch Abschnitt 5.4).

3.2.1 Einfaches dynamische Schadschwellenmodell nach WALLINGA (1998)

WALLINGA (1998) zeigt, dass sich bei Annahme eines einfachen exponentiellen Unkrautpopulationsmodells (die Unkrautdichte im Jahr $t+1$ verhält sich proportional zu der des Jahres t , siehe Gleichung 6) die Behandlungsfrequenz vollkommen unabhängig von der Höhe der Bekämpfungsschwelle verhält. Die Annahme, dass die Unkrautdichte ohne Unkrautbekämpfung einem exponentiellen Wachstum und mit Unkrautbekämpfung einer exponentiellen Abnahme folgt, wird durch die Thesen unterstützt, dass bei geringen Unkrautdichten, wie sie auf intensiv genutzten Ackerflächen anzutreffen sind, inter- und intraspezifische Konkurrenzeffekte zwischen den Unkräutern gering sind (WALLINGA, 1998, S. 65) und die Samenverluste im Boden häufig proportional zur Samendichte verlaufen (ROBERTS und DAWKINS, 1967; WILSON und LAWSON, 1992).

Gleichung 6:

$$N_{t+1} = \begin{cases} aN_t & \text{wenn } N_t > S \Rightarrow \text{mit Unkrautbekämpfung} \\ bN_t & \text{wenn } N_t \leq S \Rightarrow \text{ohne Unkrautbekämpfung} \end{cases}$$

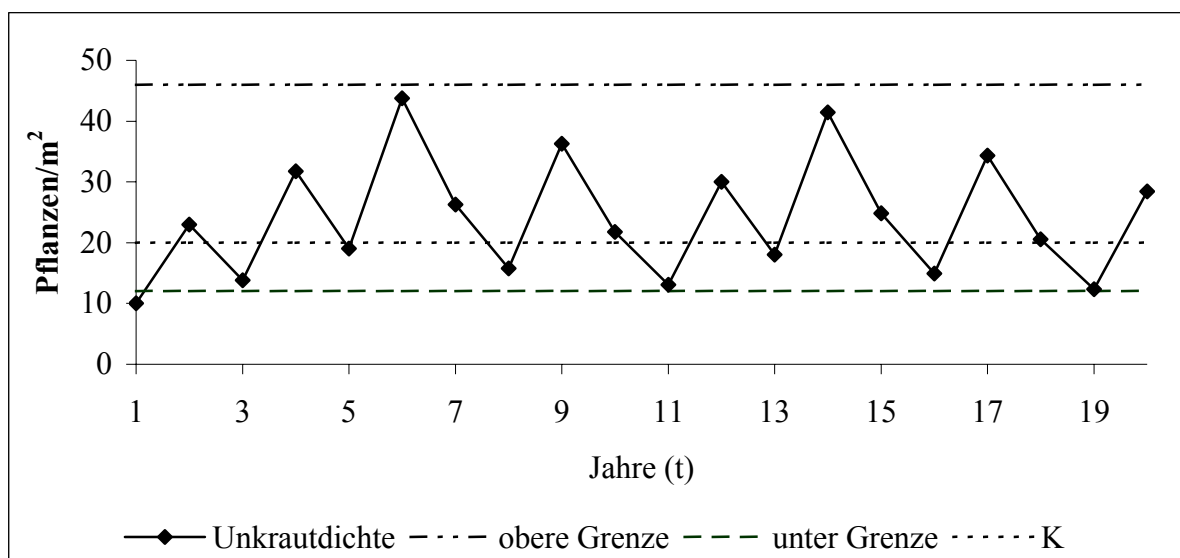
S: Bekämpfungsschwelle [Unkräuter/m²]

N_t: Unkrautdichte im Jahr t [Unkräuter/m²]

a, b: Parameter

In Abbildung 8 ist der Verlauf der Populationsdynamik bei Anwendung des Schadschwellenprinzips entsprechend Gleichung 6 dargestellt (a=0,6, b=2,3, S=20 und N₁=10). Die maximale Unkrautdichte ergibt sich, wenn die Unkrautdichte (N) mit S übereinstimmt und keine Behandlung durchgeführt wird. Sie ist das Produkt aus der Bekämpfungsschwelle S und Wachstumsparemeter b (Nichtbehandlung). Die untere Grenze wird erreicht, wenn die Unkrautdichte die Schwelle S marginal überschreitet. Sie ergibt sich aus dem Produkt von S und dem Parameter a. Innerhalb dieser Grenzen bewegt sich die Unkrautdichte. Wird die Schwelle K überschritten, so werden Unkrautbehandlungen durchgeführt und die Unkrautdichte sinkt solange, bis die Schadschwelle wieder unterschritten ist.

Abbildung 7: Populationsdynamik des exponentiellen Wachstumsmodells



Quelle: Eigene Darstellung, nach WALLINGA (1998)

WALLINGA (1998) zeigt mathematisch, dass die Behandlungsfrequenz, die als der Anteil der Jahre definiert wird, in denen behandelt wird (Y_a) bezogen auf den gesamten Betrachtungsraum ($Y_a + Y_b$), langfristig unabhängig von der gewählten Schwelle S ist (siehe Gleichung 7). Die langfristige Behandlungsfrequenz wird allein durch die Populationsparameter a und b bestimmt.

Gleichung 7:
$$\frac{Y_a}{Y_a + Y_b} = \frac{\log b}{\log b - \log a}$$

Y_a : Jahre mit Unkrautbehandlung

Y_b : Jahre ohne Unkrautbehandlung

Dieses Ergebnis bedeutet, dass mit der Wahl einer bestimmten Bekämpfungsschwelle die Behandlungshäufigkeit nicht reduziert und somit auch keine Herbizide eingespart werden können. Da mit höheren Bekämpfungsschwellen auf der anderen Seite aber höhere Konkurrenzeffekte verbunden sind, bedeutet dies, dass bei langfristiger Betrachtung die ökonomischen Schadschwellen gegen Null tendieren und somit das Schadschwellenkonzept ökonomisch und ökologisch nicht zielführend ist. Fraglich ist jedoch, ob die Annahme exponentieller Populationsverläufe zutreffend ist. Geht man davon aus, dass dichteabhängige Regulierungsmechanismen bereits innerhalb der relevanten Dichtebereiche vorliegen, also beispielsweise die Samenbildung einer einzelnen Unkrautpflanze mit zunehmender Unkrautdichte sinkt, der Auflauf bei hohen Samengehalten niedriger ist als bei geringen oder die Konkurrenzeffekte je Einzelpflanze ebenfalls mit höheren Dichten abnehmen, so sind die Schadschwellen größer als Null und ihre Anwendung führt zu einer Reduktion des Herbizideinsatzes. Im folgenden wird davon ausgegangen, dass die Populationsdynamik von Unkräutern bereits bei geringen Unkrautdichten dichteabhängig verläuft (siehe Kapitel 5). Diese Hypothese wird durch eine Reihe wissenschaftlicher Ergebnisse gestützt (SCHEER, 1983; HOFSTETTER, 1986; DOYLE et al. 1986; HOLZMANN, 1987; ZWERGER, 1987; KAUL und HEYLAND, 1992, S. 171; MAHN, 2002, S. 66).

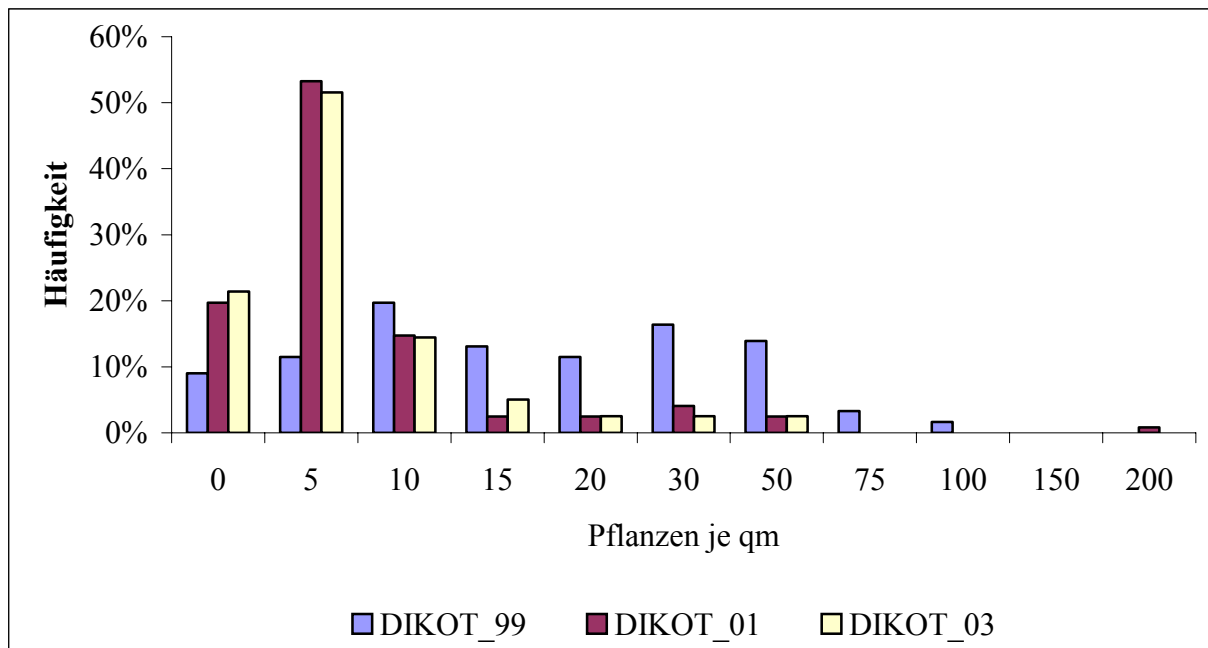
3.3 Fehlende praktische Anwendung des ganzflächigen Schadschwellenkonzeptes

Obwohl die Anwendung des Schadschwellenkonzeptes in Getreide (und Raps) in vielen wissenschaftlichen Arbeiten als ökonomisch sinnvoll erachtet wird (BEER und SCHMITZ, 1981; KRÖCHERT, 1982; WAHMHOF und HEITEFUSS, 1984; GEROWITT und HEITEFUSS, 1990, WERNER und HEITEFUSS, 1997), wird es in der Praxis im allgemeinen nicht angewendet (GEROWITT und HEITEFUSS, 1989; FLATTER, 1999, S. 1; ODENING und BOKELMANN, 2000, S. 180). Gründe für die Nichtanwendung sind zum einen Befürchtungen der Landwirte, dass durch einen Verzicht auf Unkrautbekämpfungsmaßnahmen nennenswerte Ertragsverluste entstehen und der Unkrautdruck in den Folgekulturen übermäßig zunehmen kann. Zum anderen haben Unkrautbekämpfungen zu einem frühen Zeitpunkt häufig höhere Wirksamkeiten bzw. bieten die Möglichkeit einer Aufwandsmengenreduktion, so dass plausibel wird, warum in der Praxis Pflanzenschutzmaßnahmen häufig prophylaktisch durchgeführt werden und nicht bis zum Überschreiten der ökonomischen Schadschwelle gewartet wird. Darüber hinaus sind Unkräuter auf Ackerflächen nicht gleichmäßig verteilt, sondern treten aggregiert in Nestern oder Streifen unterschiedlicher Größe auf, während andere Teile des Feldes nur gering verunkrautet bis unkrautfrei sind (HAGEMEISTER, 1986; BLUMENBERG, 1987, S. 89; MARSHALL, 1988; DENT et al., 1989; GERHARDS et al. 1997; CHRISTENSEN und HEISEL, 1998; NORDMEYER und ZUK, 2002; BACKES und PLÜMER, 2003, S. 261; DAMMER und WARTENBERG, 2004, S. 408), so dass die Umsetzung eines ganzflächigen Schadschwellenkonzeptes auf größeren Schlägen nicht unproblematisch ist. Denn zum einen sind durch die heterogene Unkrautverteilung zur Ermittlung der durchschnittlichen Unkrautdichte einer Ackerfläche sehr viele Zählstellen (hoher Aufwand an Zeit und Kosten) notwendig und zum anderen ist mit einer Unkrautbekämpfungsentscheidung, die sich an der durchschnittlichen Verunkrautung einer Gesamtfläche orientiert, stets die Gefahr von Fehlentscheidungen auf Teilflächen verbunden, die eine andere Verunkrautung aufweisen als die durchschnittliche.

In Abbildung 9 sind beispielhaft die Unkrautzählergebnisse der BBA für die Summe aller dikotylen Unkräuter ohne *Galium aparine* auf dem Untersuchungsschlag B244 mit einer Gesamtfläche von 11,85 ha wiedergegeben. In den Jahren 1999 und 2001 wurden an 122 Punkten und im Jahr 2003 an 159 Punkten Unkrautzahlungen mit Hilfe des Göttinger Zählrahmens (Fläche: 0,1 m²) durchgeführt. Die mittlere Unkrautdichte betrug 1999 20, 2001

7 und 2003 6 Unkräuter/m². Aus der Abbildung lässt sich bereits erkennen, dass durchschnittliche Unkrautdichten nur begrenzt als Entscheidungsgrundlage für ganzflächige Unkrautbekämpfungsmaßnahmen geeignet sind.

Abbildung 8: Ermittelte Unkrautdichten (Summe dikotyler Unkräuter ohne *Galium aparine*) auf dem Schlag B244 in den Jahren 1999, 2001 und 2003



Quelle: Eigene Darstellung, nach NORDMEYER, 2004

Precision farming-Technik, welche die Unkrautbekämpfung auf Teilflächenbasis ermöglicht, eröffnet neue Horizonte des Unkrautmanagements, indem sie das grundlegende Ziel des integrierten Pflanzenschutzes, nämlich eine Bekämpfung nur dann und dort durchzuführen, wo sie nötig ist, erreichbar macht (ZANIN et al. 1998, S. 108).

4 Teilflächenunkrautbekämpfung

Die räumliche Verteilung von Unkräutern wurde in den letzten Jahren in vielen wissenschaftlichen Arbeiten untersucht. Diese Arbeiten bestätigen, dass auf Ackerflächen regelmäßig Teilbereiche vorkommen, die stark mit bestimmten Unkräutern besiedelt sind, während andere Teilbereiche nahe zu unkrautfrei sind (COUSENS und CROFT, 2000, S. 68). Darüber hinaus kommen viele Arbeiten zu dem Ergebnis, dass durch eine räumlich angepasste Herbizidapplikation deutliche Einsparungen an Herbiziden möglich sind (FELTON et al. 1991; AHRENS, 1994; JOHNSON et al. 1995; BLACKSHAW, 1996; REW et al. 1996 a; GERHARDS et al. 2002, NORDMEYER und ZUK, 2002).

Nach Meinung von REW und COUSENS (2000, S. 2) sind in vielen wissenschaftlichen Arbeiten zur Teilflächenunkrautbekämpfung die verwendeten Unkrauterhebungsmethoden jedoch zu ungenau und die Erkenntnisse zur räumlichen Ausbreitungsdynamik von Unkräutern sind noch nicht ausreichend, um eindeutig von der Vorteilhaftigkeit einer teilflächenspezifischen Unkrautbekämpfung auszugehen. Allein die Tatsache, dass Unkräuter ungleichmäßig auf Ackerflächen verteilt sind, ist nicht hinreichend, um daraus schlussfolgern zu können, dass Teilflächenunkrautbekämpfung ökonomisch und ökologisch vorteilhaft gegenüber einer Ganzflächenbehandlung ist. Inwieweit durch Teilflächenunkrautbekämpfung bei unterschiedlichen Ausgangsverunkrautungen Einsparungen an Herbiziden und Kosten möglich sind, wird in dieser Arbeit anhand des derzeitigen Kenntnisstands zur Populationsdynamik und den Konkurrenzeffekten durch Unkräuter in einem Simulationsmodell untersucht (Kapitel 5 und 6). Zunächst werden jedoch die Gründe für das ungleichmäßige Auftreten von Unkräutern erläutert und anschließend die technischen Voraussetzungen für eine praktische Anwendung dargestellt. Des weiteren werden die Ergebnisse anderer Studien zur Teilflächenunkrautbekämpfung diskutiert.

4.1 Räumliche Verteilung von Unkräutern

Die Ursachen für die kleinräumigen Variationen der Unkrautdichten sind vielfältig. Sie können in drei Bereiche gruppiert werden:

Zunächst führen Bearbeitungsmaßnahmen bzw. Bearbeitungsfehler häufig zu einem längs zur Bearbeitungsrichtung streifenförmig erhöhten Sameneintrag. Zu nennen sind hier

beispielsweise Fehler bei der Aussaat (z. B. verstopfte Säschare, fehlender Anschluss), die in den Bestandeslücken ein vermehrtes Unkrautwachstum ermöglichen; fehlender Anschluss bei der Herbizidapplikation (z. B. Abdrift durch Wind, zu weiter Abstand zwischen den Fahrgassen), hohe Variation bei der Applikationsgenauigkeit von PSM mit Variationskoeffizienten von bis zu 40% (DORR und PANNELL, 1992, S. 385); Fehler bei der Bodenbearbeitung (z. B. zu flaches Pflügen, Bearbeitungslücken); die Akkumulation von Unkrautsamen, die beim Mähdrusch auf der gesamten Breite des Schneidwerks erfasst und verstärkt auf der Breite der Siebe den Mähdrescher wieder verlassen (COUSENS und CROFT, 2000, S. 71; BLANCO-MORENO et al., 2003, S. 375); die Ausbringung von organischen Düngern, in denen Unkrautsamen enthalten sind, und die Bodenbearbeitung, die primär in Bearbeitungsrichtung Unkrautsamen verfrachtet (REW und CUSSANS, 1997; MARSHALL und BRAIN, 1999).

Bodeneigenschaften bzw. kleinräumige Standortunterschiede stellen die zweite wichtige Gruppe der möglichen Ursachen für ein heterogenes Unkrautauftreten dar. Je nach Wasserhaltevermögen, Nährstoffhaushalt, Tiefgründigkeit, pH-Wert, Exposition, Tongehalt etc. einer Teilfläche eines Ackers werden bestimmte Unkrautarten in ihrer Entwicklung gefördert und andere zurückgedrängt (HARPER, 1977; GROENENDAEL VAN, 1988; HÄUSLER und NORDMEYER, 1995; DIELEMANN et al. 2000). Auch Randeffekte durch Gräben, Feldraine, Hecken u. a. haben einen direkten Einfluss auf die Unkrautpopulation.

Zur dritten und letzten Ursachengruppe für ein ungleichmäßiges Unkrautauftreten sind zufällige Ereignisse zu zählen. Dies sind in der Regel Sameneinträge von anderen Schlägen durch verunreinigte Bodenbearbeitungsgeräte, durch den Mähdrescher, durch Insekten, Vögel, den Wind oder verunreinigtes Saatgut. Als weitere mögliche Ursache ist in diesem Zusammenhang die Schlaghistorie zu nennen. So kann beispielsweise eine Schlagzusammenlegung und anschließend einheitliche Bewirtschaftung zweier vorher unterschiedlich genutzter Flächen noch nach vielen Jahren durch jeweils unterschiedliche Unkrautpopulationen erkennbar sein.

Um den Aufwand für die Unkrauterkenntnis zu reduzieren wurden Untersuchungen durchgeführt um Korrelationen zwischen Bodeneigenschaften (Nährstoffgehalte, pH-Wert, nFK etc.) und dem Auftreten bestimmter Unkrautarten zu isolieren (ANDREASEN et al., 1991; NORDMEYER und NIEMANN, 1992; NORDMEYER und DUNKER, 1999). Da das Unkrautauftreten

jedoch nicht allein von bestimmten ortsstabilen Bodeneigenschaften abhängt (s. o.), fanden WALTER et al. (2001, S. 36), dass die statistischen Korrelationen zwischen Bodeneigenschaften und dem Unkrautauftreten häufig schlagspezifisch und im Zeitablauf nicht stabil waren. Auf Grund der Widersprüchlichkeit der Ergebnisse kommen die Autoren zu dem Schluss, dass Bodeneigenschaften nur eingeschränkt herangezogen werden können, um den Aufwand für die Unkrautkartierung zu reduzieren. Die Schwierigkeit, Abhängigkeiten zwischen bestimmten Bodeneigenschaften und dem Auftreten bestimmter Unkrautarten isolieren zu können (siehe auch REW und COUSENS, 2001, S. 10), liegt auch daran, dass Unkrautpopulationen heute durch hohe Düngergaben und den Herbizideinsatz stark vereinheitlicht wurden (MAHN, 2002 b, S. 71), so dass auf unterschiedlichen Standorten in Deutschland häufig dieselben Unkrautarten („Allerweltsarten“) vorkommen. Innerhalb von einer Ackerfläche ist es deshalb in der Regel nicht bzw. nur sehr eingeschränkt möglich, Abhängigkeiten zu finden (ZWERGER, 2004, o. S.). WALTER et al. (2002, S. 31) konnten beispielsweise keinerlei Abhängigkeiten zwischen den Häufigkeiten von *Galium aparine* und den untersuchten Bodeneigenschaften finden.

4.2 Erstellung von Unkrautverteilungskarten

Für jede *precision farming* Anwendung, die darauf abzielt, innerhalb von Schlägen Düngemittel, Saatgut oder Pflanzenschutzmittel räumlich differenziert auszubringen, sind räumlich explizite Informationen notwendig, die in der Regel in digitalen Karten abgespeichert werden. Häufig werden diese Karten so erzeugt, dass in einem regelmäßigen Gitter diskrete Punktinformationen erhoben werden und diese Punktinformationen anschließend in die Fläche interpoliert werden. Bei der Unkrauterfassung hängt die Genauigkeit der Unkrautkarte erheblich von der Größe der Aufnahme­fläche (Zählrahmen, Kameraausschnitt) und von der Maschenweite des Gitternetzes ab. Sind die Abstände zwischen den Aufnahmepunkten größer als die räumlichen Zusammenhänge der Unkrautverteilung, so ist es auch mit sehr aufwendigen Interpolationsverfahren, wie linearer Triangulation oder Kriging (vgl. ISAAKS und SRIVASTAVA, 1989), nicht möglich, ein realistisches Abbild der Unkrautverteilung zu erhalten (REW und COUSENS, 2000, S. 3), da Unkräuter im Gegensatz zu Bodenschätzen, wie beispielsweise Gold, keinem natürlichen Gradienten folgen und nicht normal verteilt sind. Dies wird jedoch bei der Geostatistik vorausgesetzt (REW et al. 2001, S. 246). GERHARDS et al. (1997) stellten bei einem

Erhebungsraster von $7 \times 7 \text{ m}^2$ fest, dass einige kleinere Unkrautnester zwischen den Aufnahmepunkten lagen, die nicht erkannt wurden.

Nach REW und COUSENS (2000, S. 5) gibt es keinen Beweis für eine Mindestauflösung eines Beprobungsrasters, bei der sich die Fehler einer Unkrautkarte stabilisieren, so dass keine eindeutige Empfehlung für eine bestimmte Mindestbeprobungsdichte abgeleitet werden kann.

ZANIN et al. (1998) versuchten die Fehler, die durch die Interpolation entstehen, zu quantifizieren. Auf einer Fläche von $28 \times 100 \text{ m}^2$ wurden im Raster von $2 \times 2 \text{ m}^2$ Unkrautbonituren (765 Rasterpunkte) durchgeführt. Anschließend wurde untersucht, wie groß die Fehler des Kriging-Interpolationsverfahrens bei reduzierter Anzahl von Messpunkten (50 Messpunkte) sind. Die interpolierte Karte, die auf der gesamten Datenbasis aufbaute, wies für die Gesamtfläche für die Unkrautart *Portulaca oleracea* (POROL) eine Frequenz von 35% aus. Aus der verminderten Datenzahl ergab die Schätzung nahezu einen vollständigen Befall (99,5%) der Fläche (ebenda, S. 115). Der verminderte Datensatz entspricht in etwa einem Raster von $9 \times 9 \text{ m}^2$. Dieses Raster ist, verglichen mit vielen anderen Rastern, die zur flächigen Erfassung von Unkräutern verwendet wurden, vergleichsweise fein. Und dennoch sind die Fehler so groß, dass zur Verbesserung von Bekämpfungsentscheidungen deutlich feinere Raster gefordert werden müssen.

BACKES und PLÜMER (2003) verglichen die Ergebnisse einer Kamerabonitur im Raster $2 \times 3 \text{ m}^2$ mit einer manuellen Bonitur im Raster $7,5 \times 15 \text{ m}^2$. Von dem vollständigen Datensatz blieben bei Interpolationsschätzungen systematisch Datenpunkte unberücksichtigt, um größere Erhebungsraster zu simulieren. Das Ergebnis dieser Untersuchungen war, dass es, obwohl Unkräuter in Nestern aufzutreten scheinen, auf Grund der sehr heterogenen Verteilungsmuster schwierig ist, über Punktinformationen auf die Verteilung von Unkräutern auf dem Feld rückzuschließen. Nach Meinung der Autoren ist die Genauigkeit von den üblicherweise in pflanzenbaulichen Versuchen erstellten Unkrautkarten zweifelhaft (S. 266).

Um die Fehler, die bei der Interpolationen der Primärdaten entstehen, noch genauer abschätzen zu können, kann eine Totalerhebung der Unkräuter auf einer Fläche durchgeführt werden. BACKES et al. (2004 a und 2004 b) taten dies durch flächige Videoaufnahmen und anschließende Bildanalysen zur Unkrauterkenennung, so dass die Lagekoordinaten jedes Unkrautes auf den untersuchten Flächen bekannt waren. Anschließend simulierten die

Autoren unterschiedliche Unkrauterhebungen mit unterschiedlichen Genauigkeiten (Dimensionierung des Zählrahmens, Zählstellendichte) und darauf aufbauenden Interpolationen im Computer, so dass die Fehler unterschiedlich genauer Erhebungsverfahren quantifiziert werden konnten. Nach den Ergebnissen sind manuelle Verfahren der Unkrauterhebung grundsätzlich zu ungenau und nur automatische Unkrautererkennungssysteme mit einer sehr hohen Auflösungsgüte in der Lage, ausreichend genaue Karten zu liefern (BACKES et al., 2004b, S. 283). Das Ergebnis, dass manuelle Zählverfahren auf Grund des hohen Zeitbedarfes entweder zu ungenau oder zu teuer sind und damit für die praktische Erfassung von Unkrautverteilungen nicht geeignet, bestätigen auch WALTER et al. (2001, S. 26) und DAMMER und WARTENBERG (2004, S. 406). COUSENS und CROFT (2000, S. 68) formulierten die Problematik zur Unkrauterhebung deutlich: "It ist now common to see papers describing weed populations using geostatistical methods. In these, an arbitrary size of quadrat is placed at points on a grid of arbitrary spacing, and maps are produced from these observations of local density, usually using kriging. Although such maps may look impressive, high-quality computer graphics can easily mislead us into assuming a spurious level of scientific quality".

Diese ernüchternden Ergebnisse sollen jedoch nicht darüber hinwegtäuschen, dass in der Vergangenheit deutliche Fortschritte in der Entwicklung automatischer Erhebungsmethoden realisiert werden konnten. Geht man von einer Fortschreibung dieser Entwicklung aus, so kann erwartet werden, dass diese Verfahren in Zukunft so leistungsfähig sind, dass sehr hoch aufgelöste Unkrautkarten bis hin zu Totalaufnahmen mit ausreichender Genauigkeit möglich sein werden.

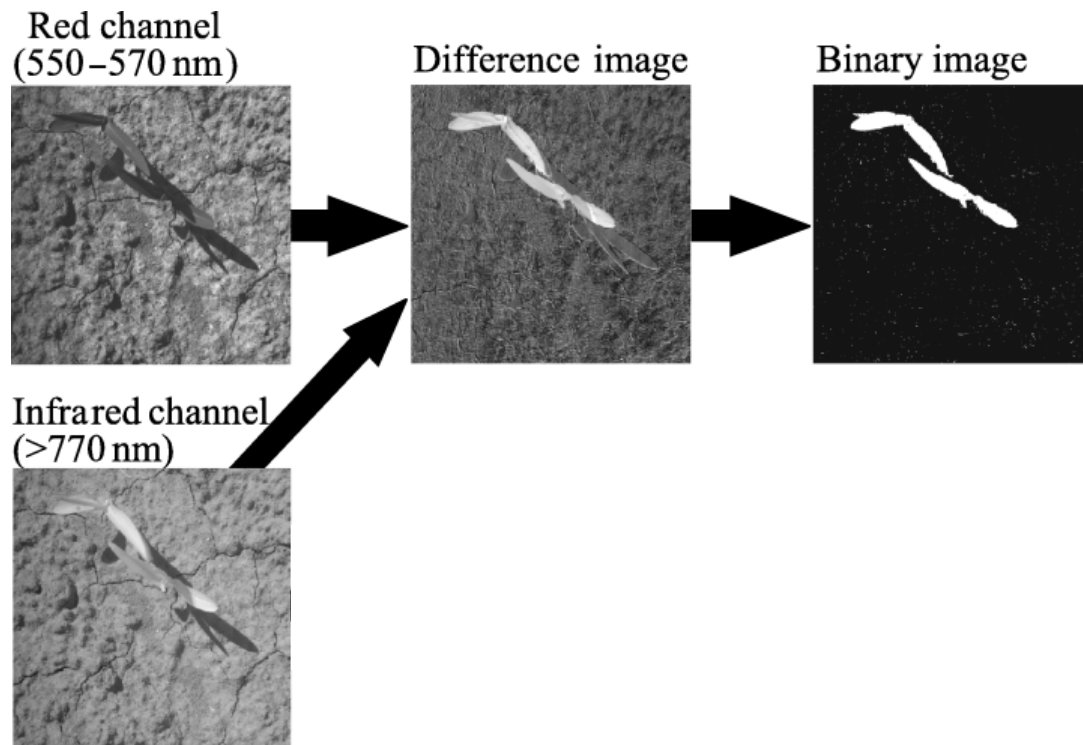
4.3 Automatische Unkrauterfassung

Automatische Verfahren der Unkrautererkennung befinden sich noch im Entwicklungsstadium. Problematisch ist zunächst die Differenzierung zwischen Unkrautpflanzen und Kulturpflanzen. Dieses Problem umgehen WARTENBERG und DAMMER (2002, 2004) dadurch, dass sie die Unkräuter – ohne Artendifferenzierung – in den kulturpflanzenfreien Fahrgassen (vor dem Vorderrad des Schleppers) mit Hilfe eines optoelektronischen Sensors detektieren. Der optoelektronische Sensor kann grünes Pflanzenmaterial vom Boden differenzieren, jedoch zwischen lebenden Pflanzen keine Differenzierungen vornehmen, also weder Unkrautarten bzw. Unkrautgruppen identifizieren noch zwischen Unkräutern und

Kulturpflanzen unterscheiden. Ein Einsatz innerhalb von Getreidebeständen ist deshalb nicht möglich, so dass das schmale Detektionsband des Sensors innerhalb einer Fahrspur als Steuersignal für den gesamten Spritzbalken (15 – 36 m) herangezogen werden muss (WARTENBERG und DAMMER, 2002, S. 444 ff.). Diese weite Interpolation der Messwerte zwischen den Fahrgassen muss nach den Ergebnissen von REW und COUSENS (2000) und BACKES et al. (2004b) zur räumlichen Verteilung von Unkräutern als problematisch angesehen werden, da die Unkrautverteilung sich häufig nicht stetig ändert, sondern sich innerhalb kurzer Distanzen sprunghaft ändern kann (vgl. auch WARTENBERG und DAMMER, 2002, S. 444).

Nach SÖKEFELD et al. (2000) sollte der maximale Detektionsabstand bei der Unkrautbonitur 3 m nicht überschreiten, so dass SÖKEFELD eine automatische Unkrauterkennerung entwickelte, die in den Getreidebeständen eingesetzt werden kann. Das Kamerasystem differenziert grüne Pflanzen vom Boden, indem von einem Bildausschnitt zwei digitale Aufnahmen in unterschiedlichen Wellenbereichen (blauer Kanal, infraroter Kanal) so miteinander verrechnet werden, dass hieraus ein Binärbild entsteht in dem die grüne Pflanze weiß und der Boden schwarz dargestellt wird (siehe Abbildung 9). Dieses Verfahren ist bei unterschiedlichen Lichtverhältnissen – insbesondere auch bei direkter Sonneneinstrahlung – und damit auch unter praktischen Freilandbedingungen einsetzbar (SÖKEFELD et al., 2002). Anschließend können die geometrischen Formmerkmale der Aufnahme mit den charakteristischen Formmerkmalen der Unkrautarten, die in einer Datenbank abgespeichert sind, verglichen werden und so Unkräuter identifiziert werden (vgl. auch GUYER, 1986; PÉREZ et al., 2000). Problematisch bei der Artendifferenzierung ist die Überlappung von Unkräutern durch andere Unkräuter oder durch Kulturpflanzen, so dass die Formparameter nicht richtig erfasst werden können und so die Erkennungsrate sinkt. Trotzdem konnten mit Hilfe des automatischen Erkennungssystems durchschnittliche Erkennungsraten von ca. 80% erreicht werden, wenn die Unkräuter Unkrautklassen zugeordnet wurden (SÖKEFELD et al. 2000).

Abbildung 9: Differenzbild aus dem Infrarot- und dem Blau-Kanal zur Abgrenzung lebender Pflanzen vom Boden



Quelle: SÖKEFELD et al. 2002, S. 440

Alternativ zu der oben beschriebenen Pflanzendifferenzierung nach Formmerkmalen besteht die Möglichkeit, Unterschiede in der spektralen Reflexion zwischen Pflanzen zu nutzen. Die spektralen Charakteristika verändern sich jedoch mit dem Entwicklungsstadium der Pflanzen stark, so dass das Erkennungssystem vor der Unkrauterkennerung geeicht werden muss, indem die lokalen Unkräuter zunächst untersucht und anschließend die Daten statistisch ausgewertet werden (PÉREZ et al., 2000, S. 198). Die Hauptschwierigkeiten bei der automatischen Unkrauterkennerung sind das natürliche Licht, Überlappungen der Blätter, die kleine Größe und die Variabilität der Unkräuter (ebenda, S. 209).

4.4 Teilflächenspezifische Wirkstoffapplikation

Aus arbeitswirtschaftlichen Gründen werden im Allgemeinen bei traditionellen (ganzflächigen) Pflanzenschutzmaßnahmen Tankmischungen mit unterschiedlichen Mitteln angewendet, um die Anzahl der Überfahrten zu reduzieren. Die Unkrautbekämpfung im Frühjahr lässt sich beispielsweise mit einer AHL-Düngung oder einem Wachstumsreglereinsatz kombinieren. Durch das AHL erhöht sich in der Regel die Herbizid-

Aufnahmerate der Pflanze, so dass durch die kombinierte Ausbringung – neben einer eingesparten Überfahrt – der Herbizidaufwand ohne Wirkungsverluste um 25 – 30% gesenkt werden kann (HDLGN, 2002, S. 4). Eine Mischung unterschiedlicher herbizider Wirkstoffe hat den Vorteil, dass das Wirkungsspektrum der Tankmischung entsprechend der Unkrautpopulation angepasst werden kann und so die jeweiligen „Stärken“ der Herbizide genutzt werden (KUDSK und STREIBIG, 2003, S. 94). Diese Strategie gilt in besonderem Maße auch für die teilflächenspezifische Unkrautbekämpfung, indem entsprechend der räumlichen Verteilung der unterschiedlichen Unkräuter bzw. Unkrautgruppen teilflächenspezifisch die effizientesten Spezialherbizide appliziert werden. Teilflächenunkrautbekämpfung darf jedoch nicht bedeuten, dass für eine örtlich differenzierte Anwendung von Herbiziden und eine möglicherweise notwendige Ganzflächenapplikationen (z. B. Wachstumsregulatoren, AHL) jeweils separate Überfahrten notwendig werden. Denn dies würde zu einer zusätzlichen Arbeitsbelastung in der sehr arbeitsintensiven Frühjahrszeit (hohe Opportunitätskosten der Arbeit) und damit zu deutlich erhöhten Kosten führen.

Grundvoraussetzung für eine praktische Umsetzung von Teilflächenunkrautbekämpfung ist deshalb die Möglichkeit, unterschiedliche Wirkstoffe (in unterschiedlichen Mengen) in einem Arbeitsgang zu variieren. Als technische Lösungen kommen hierfür Mehrkammerspritzen oder Pflanzenschutzspritzen mit einer Direkteinspeisung in Frage. Mehrkammerspritzen bestehen aus mehreren unabhängigen Spritzsystemen (Tank, Leitungen, Pumpen, Regelung und Düsen), die auf demselben Trägerfahrzeug montiert sind. Der Prototyp einer solchen Pflanzenschutzspritze wird bereits erfolgreich eingesetzt (DICKE et al., 2004, S. 415). Eine Mehrkammerspritze hat den Vorteil, dass die Wirkstoffauswahl und die Wirkstoffmenge innerhalb sehr kurzer Zeiten verändert werden kann. Zu den Hauptnachteilen zählt das hohe Gewicht der Maschine, eine mögliche Restmengenproblematik und ein häufiger notwendiges Nachfüllen – immer dann, wenn der erste Tank leer ist – und eine damit verbundene verringerte Flächenleistung.

Direkteinspeisungssysteme stellen die alternative technische Lösung für eine Variation der Wirkstoffe und der Menge während einer Überfahrt ohne die oben genannten Nachteile der Mehrkammerspritze dar. Hier werden die Wirkstoffe in hoher Konzentration mitgeführt und erst bei Bedarf über Spezialpumpen in den Flüssigkeitsstrom eingemischt. Problematisch sind nach den von SÖKELFELD et al. (2004) publizierten Versuchsergebnisse zu dem von ihnen entwickelten Direkteinspeisungssystem noch feste Herbizidformulierungen, die bisher nicht

über die Dosiereinheit in den Flüssigkeitsstrom eingemischt werden können, unterschiedliche Viskositäten der flüssigen Formulierungen, eine große Variationsbreite der zuzumischenden Volumina (3 bis 300 ml/min) und die Zeit, bis die gewünschte Wirkstoffkonzentration auch tatsächlich an der Düse erreicht wird. Darüber hinaus können durch die zusätzlichen herbizidführenden Leitungen und Behälter mit hochkonzentrierten Wirkstoffen zusätzliche Risiken entstehen. Direkteinspeisungssysteme, die elegantere Möglichkeit der variablen Wirkstoffapplikation, bereiten demnach noch einige technische Umsetzungsprobleme, so dass Mehrkammerspritzen derzeit die einzige Möglichkeit der variablen Wirkstoffapplikation bieten.

4.5 Ergebnisse anderer Arbeiten zur Teilflächenunkrautbekämpfung

LETTNER et al. (2001) führten eine betriebswirtschaftliche Bewertung von Teilflächenunkrautbekämpfung durch, indem sie aus Literaturangaben zu pflanzenbaulichen Versuchen zur Teilflächenunkrautbekämpfung Größenordnungen für das zu erwartende Einsparpotenzial von Herbiziden in Höhe von 30 bis 70% ableiteten. Diese Prozentwerte multiplizierten die Autoren mit regional üblichen Herbizidaufwendungen bei Ganzflächenapplikationen und setzten diesen Wert mit den Leistungen einer Teilflächenunkrautbekämpfung gleich. Dieser Vergleich greift jedoch zu kurz, da bei einer Teilflächenapplikation in der Regel andere Herbizide eingesetzt und höhere Aufwandmengen gewählt werden müssen, um den meist etwas verzögerten Anwendungsterminen gerecht zu werden. Demnach führt der von LETTNER et al. durchgeführte Vergleich tendenziell zu einer Überschätzung der möglichen Einsparungen. Unberücksichtigt blieben auch mögliche Konkurrenzeffekte, Erntehinderungen oder sonstige potenzielle Risiken eines verminderten Herbizideinsatzes. Unabhängig von der Auflösungsgüte der Unkrautkarte und der Präzision der Teilflächenapplikation wurde davon ausgegangen, dass eine Teilflächenapplikation genauso effektiv ist wie eine Ganzflächenbehandlung (S. 117ff.). Diese Vereinfachung ignoriert das Kernproblem jeder *precision farming* Anwendung: die kleinräumige und sprunghafte Variabilität der relevanten Merkmale auf der Fläche (Nährstoffgehalte, Unkrautdichten etc.) und die Schwierigkeit, diese Heterogenität mit ausreichender Genauigkeit zu erfassen. Nach BULLOCK und BULLOCK (2000, S. 92) hängt deshalb der ökonomische Wert von *precision farming* komplementär von der vorhandenen Information ab. Je weniger Information ein Landwirt über seine Flächen besitzt, desto geringer ist der Wert von *precision farming*. Darüber hinaus wurde nicht bedacht, dass eine örtlich angepasste

Unkrautbekämpfung tendenziell zu einer Angleichung der Unkrautdichten auf der Ackerfläche im Zeitablauf führt und damit die potenziellen Vorteile einer Teilflächenapplikation im Zeitablauf abnehmen können.

AUDSLEY (1993) führte Simulationsstudien zum Schadschwellenkonzept am Beispiel von *Avena fatua* (Flughäfer) durch. Er verwendete ein exponentielles Wachstumsmodell und ermittelte bei einer Ausgangsverunkrautung von 6 Samen/m² über einen Zeitraum von 10 Jahren Kosteneinsparungen um ca. 5%. Bei einer Ausgangsverunkrautung von 20 Samen/m² waren keine Einsparungen möglich (S. 115 ff.). Diese Ergebnisse zeigen im Grunde, dass unter den Annahmen von AUDSLEY das Schadschwellenkonzept keine nachhaltigen Kosteneinsparmöglichkeiten bietet (siehe auch Abschnitt 3.2.1), denn nur durch eine Erhöhung einer niedrigen Ausgangsverunkrautung im Zeitablauf können Kosten eingespart werden. Es wird quasi das Gegenteil von einer Sanierung einer stark mit Unkrautsamen „verseuchten“ Ackerfläche durchgeführt. Denn genauso wie die Reduktion der Unkrautsamendichte vergleichbar ist mit einer Investition in eine kostengünstigere Pflanzenproduktion in den Folgejahren, bedeutet eine Erhöhung der Unkrautsamendichte eine Desinvestition, also die Umwandlung von Kapital, hier die Herabsetzung des Produktionswertes des Bodens durch eine Erhöhung des Samenpotenzials, in liquide Mittel.

TIMMERMAN et al. (2003) führten über 4 Jahre in Winterweizen, Wintergerste, Zuckerrüben und Mais empirische Versuche zur Teilflächenunkrautbekämpfung durch. Die Unkräuter wurden im Raster von 7,5 x 15 m² erfasst. In Mais und Zuckerrüben wurde nur auf den Teilflächen auf eine Unkrautbekämpfung verzichtet, welche frei von den jeweiligen Unkräutern waren. In Getreide blieben Unkrautdichten unterhalb von 15 Gräsern/m², 20 Dikotyledonen/m² und 0,1 GALAP-Pflanzen/m² unbehandelt. Bei höheren als den genannten Unkrautdichten wurden in Getreide und bei Vorhandensein von Unkräutern in Mais und Zuckerrüben diese Teilflächen mit der 0,6-fachen bis zur vollen empfohlenen Aufwandmenge – je nach Unkrautdichte – behandelt. Mais wurde darüber hinaus 2 mal und Zuckerrüben wurden 2 bis 3 mal im Jahr maschinell gehackt. Die Kosten für diese mechanischen Pflegemaßnahmen blieben bei der Kalkulation der Kosteneinsparpotenziale jedoch unberücksichtigt. Im Durchschnitt konnten in Mais bzw. Zuckerrüben 42 €/ha bzw. 32 €/ha an Herbiziden eingespart werden. Diese Einsparungen werden jedoch weitestgehend durch die Kosten der zusätzlichen mechanischen Pflegemaßnahmen kompensiert. In Winterweizen wurden 32 €/ha in Wintergerste 27 €/ha an Herbizidkosten eingespart. Potenzielle Risiken der

Teilflächenunkrautbekämpfung, die beispielsweise aus einer notwendigen Verzögerung der Unkrautbekämpfung durch die zuvor erforderliche Unkrauterkennung resultieren, oder Ertragseffekte auf unbehandelten Teilflächen wurden nicht erfasst. Auf Grund der kurzen Versuchsdauer wurden die dynamischen Effekte der Samenproduktion nur unzureichend erfasst.

CHRISTENSEN et al. (2002) führten über 5 Jahre Parzellenversuche zur Bewertung von Teilflächenunkrautbekämpfung durch. In jeder Parzelle von 12 x 12 m² wurden an einer zufälligen Stelle auf einer Fläche von 0,25 m² die vorhandenen Unkräuter gezählt. Anschließend wurden in 2 ganzflächigen und einer teilflächigen Unkrautbekämpfungsstrategie unterschiedliche Herbiziddosen appliziert. Bei den ganzflächigen Strategien wurden alle 10 x 6 Wiederholungen einheitlich behandelt. Bei der teilflächenspezifischen Strategie wurde in jeder 12 x 12 m² großen Parzelle die Herbiziddosis in Abhängigkeit von der Unkrautdicke variiert. Im Ergebnis haben sich die Erträge aller Behandlungsvarianten in keinem Jahr signifikant voneinander unterschieden, so dass kein Vorteil durch eine örtlich differenzierte Applikation erkennbar war. Ein Anwachsen der Unkrautpopulation bei vermindertem Herbizidaufwand konnte ebenfalls nicht festgestellt werden. Als möglichen Grund für diese Ergebnisse sehen die Autoren, dass alle Herbiziddosen – auch die niedrigsten – auf Grund optimaler Anwendungsbedingungen ausreichend gewirkt haben (letale Dosis). Auf eine Vorteilhaftigkeit von Teilflächenunkrautbekämpfung kann also auf Grund dieses Versuchsergebnisses nicht geschlossen werden. Eher scheint es sinnvoll, die Vorhersagegenauigkeit der Wirksamkeit von Herbiziden in Abhängigkeit von den vorherrschenden Anwendungsbedingungen zu verbessern.

Mit Hilfe eines optoelektronischen Sensors detektierten WARTENBERG und DAMMER Unkräuter in der Fahrgasse vor dem Schlepperrad. Bei niedrigen Unkrautdichten in der Spur – und damit niedrigem Sensorwert – wurde die Ausbringungsmenge von Husar um bis auf 50% auf minimal 100 g/ha reduziert, so dass insgesamt im Durchschnitt 140 g/ha Husar appliziert wurden. Diese Einsparung kann jedoch auch bei ganzflächig einheitlicher Unkrautbekämpfung durch einen verminderten Aufwand erreicht werden. Denn in der Praxis ist unter günstigen Verhältnissen eine Reduktion auf bis zu 125 g/ha ohne Wirkungsverluste möglich (BEHLE-SCHALK, 2001, o. S.). ENGQVIST et al. (1997) konnten ebenfalls mit sehr

niedrigen Herbiziddosen von 15% des empfohlenen Aufwandes maximale Weizenerträge realisieren, ohne dass Aufwanderhöhungen zu Mehrerträgen geführt hätten.

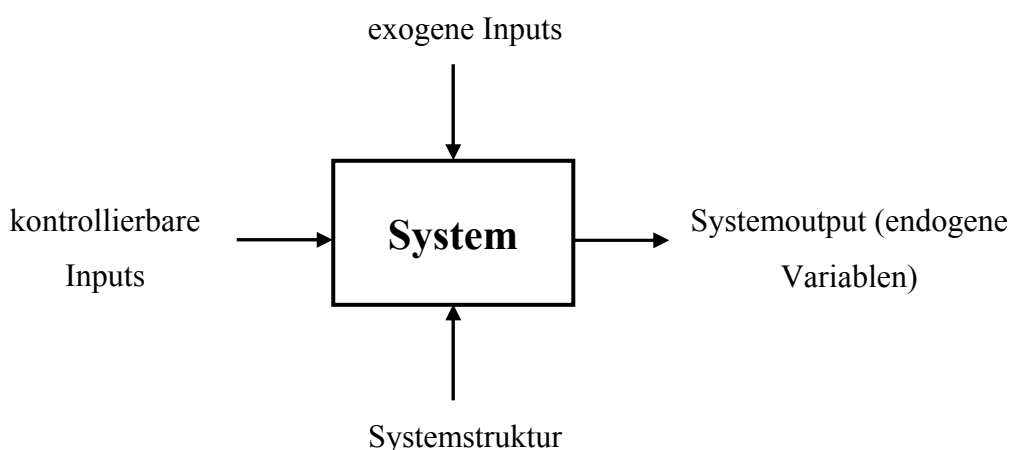
NORDMEYER und ZUK (2002, S. 460) führten über 5 Jahre Versuche zur Teilflächenunkrautbekämpfung durch. Vor dem Frühjahrstermin zur Unkrautbekämpfung wurden im Raster von 25 x 36 m² manuell Unkrautbonituren durchgeführt, die als Datengrundlage zur Interpolation von „flächigen“ Unkrautkarten dienten. Anschließend erfolgte die Unkrautbekämpfung teilflächenspezifisch. Die Autoren gehen auf Grund ihrer Ergebnisse davon aus, dass im Mittel Herbizidreduktion von 30 – 50% realistisch sind. Sie räumen dabei jedoch ein, dass die Einsparung schlag- und jahresabhängig stark schwanken können. Eine Veränderung der Populationsdichten über die Versuchsjahre in Abhängigkeit von der Behandlungsintensität bzw. eine Gegenüberstellung der Erträge und der Restverunkrautung wurde nicht durchgeführt.

Die oben beispielhaft angeführten empirischen und theoretischen Arbeiten zur Teilflächenunkrautbekämpfung zeigen ein grundsätzliches Problem. In allen Arbeiten wurden Teilaspekte behandelt und wesentliche Probleme und Fragen, die sich für eine praktische Bewertung der ökonomischen Sinnhaftigkeit von Teilflächenunkrautbekämpfung ergeben, wie Witterungsrisiken, Unsicherheiten, Applikationsfehler, das gleichzeitige Auftreten mehrerer Unkräuter, die Folgeverunkrautung etc. entweder nicht in der erforderlichen Tiefe behandelt oder gänzlich ausgeblendet.

5 Modellkonstruktion

Einem System, ob real oder in Form eines Modells, liegt ein Transformationsprozess von Inputs in Outputs zugrunde. Die Inputs können in steuerbare und nicht kontrollierbare Einflussfaktoren differenziert werden. Aufgabe der Modellbildung ist es, die wesentlichen Transformationsprozesse, die dem realen System zugrunde liegen, zu identifizieren und zu quantifizieren und durch die Systemstruktur des Modells abzubilden. Das heißt, es wird der Einfluss der kontrollierbaren und der nicht kontrollierbaren Inputs auf das Systemoutput dargestellt (BERG et al. 1988, S. 1).

Abbildung 10: Merkmale eines Systemmodells



Quelle: BERG et al. 1988, S. 1

Das Ziel des zu entwickelnden Unkrautsimulationsmodells ist es, die Kosten und den Herbizideinsatz als endogene Größen in Abhängigkeit unterschiedlicher Unkrautmanagementstrategien zu prognostizieren. Prinzipiell könnte dies in einem „Black-Box-Ansatz“ geschehen. In einem solchen Modellansatz muss die Modellstruktur im Gegensatz zu einem strukturierten Modell nicht mit der Realität übereinstimmen; es kommt lediglich auf das korrekte Zeitverhalten des Modells an. Für einen Black-Box-Ansatz sind umfangreiche Zeitreihen von Versuchen notwendig, in denen verschiedene Herbizidstrategien unter unterschiedlichen Umweltbedingungen für einen ausreichend langen Zeitraum angewendet worden sind, um Regressionsanalysen durchführen zu können. Da eine solche

Datenbasis jedoch nicht verfügbar ist, muss ein strukturierter Ansatz gewählt werden, d. h. die einzelnen Modellgleichungen müssen auf Hypothesen aufbauen, denen biologische Gesetzmäßigkeiten zugrunde liegen. Durch diesen Ansatz können Informationen aus unterschiedlichen Versuchen (zum Samenabbau, zur Samenproduktion, zur Samenverfrachtung etc.) genutzt werden.

Es wurde bereits in Kapitel 2 dargelegt, dass es aufgrund der vielfältigen Wechselwirkungen der unabhängigen Variablen theoretisch erforderlich ist, alle Entscheidungsmöglichkeiten im System Pflanzenbau simultan zu optimieren. Da das reale System jedoch durch ein hohes Maß an Komplexität und Unsicherheit gekennzeichnet ist, ist eine systemtheoretische Modellbildung ohne eine Komplexitätsreduktion nicht möglich. Das Simulationsmodell wurde deshalb zunächst für eine Winterweizenmonokultur konstruiert. In einem zweiten Schritt wurde das Produktionsprogramm um Zuckerrüben (siehe Abschnitt 5.4.3) erweitert.

Das ökonomische Wahlproblem zwischen Teilflächenunkrautbekämpfung und Ganzflächenunkrautbekämpfung stellt einerseits ein strategisches Problem in Form einer Technologieentscheidung dar. Auf der anderen Seite müssen für die jeweilige Unkrautbekämpfungsstrategie zuvor die optimalen Intensitäten (HerbizidAuswahl, Aufwand) bestimmt, bzw. eine Prozessoptimierung durchgeführt werden, bevor ein solcher Vergleich möglich ist (vgl. auch ODENING und BOKELMANN, 2000, S. 174 ff.). Optimale Pflanzenschutzintensitäten können im Simulationsmodell bestimmt werden, indem unter Berücksichtigung der Populationsdynamik und der Konkurrenzeffekte die Bekämpfungsschwellen bzw. Schadschwellen ermittelt werden, die für eine vorgegebene Anfangsverunkrautung und einen vorgegebenen Planungszeitraum die Summe aus den monetär bewerteten Konkurrenzeffekten und dem Herbizidaufwand minimieren. Diese ermittelten Bekämpfungsschwellen werden anschließend in einem zweiten Schritt, in einer räumlichen Simulationsumgebung genutzt, um den ökonomischen Vorteil einer räumlich differenzierten Herbizidapplikation gegenüber einer ganzflächigen für unterschiedliche räumliche Unkrautverteilungen ermitteln zu können. Anschließend, nachdem die realisierbaren Leistungen teilflächenspezifischer Unkrautbekämpfungsverfahren kalkuliert wurden, werden die zusätzlichen Kosten des *precision farming* Ansatzes berücksichtigt, so dass eine abschließende Bewertung über die ökonomische Sinnhaftigkeit von Teilflächenunkrautbekämpfung möglich wird.

Die Differenzierung zwischen den Unkrautarten wurde auf vier unterschiedliche Unkrautklassen begrenzt. Alle dikotylen Samenunkräuter (DIKOTS) mit Ausnahme von *Galium aparine* und *Polygonum aviculare* bilden eine Unkrautklasse. Auf intensiv genutzten Ackerflächen dominieren unter den monokotylen Samenunkräuter – sofern gepflügt wird – in der Regel *Alopecurus myosuroides* (ALOMY) und *Apera spica-venti* (APESV). Häufig bestimmt sogar nur eine dieser beiden Arten die Verungrasung, so dass häufig von „Windhalm-“ oder „Ackerfuchsschwanz-Standorten“ gesprochen wird. Bei der Konstruktion des Simulationsprogramms wurden beide Arten berücksichtigt, die Berechnungen wurden jedoch nur für eine Windhalmverungrasung durchgeführt. Die beiden „Problemunkräuter“ *Galium aparine* (GALAP) und *Polygonum aviculare* (POLAV) bilden zwei weitere Unkrautklassen. *Galium aparine* kann im Getreidebau und Zuckerrübenanbau zu größeren Ertragsreduktionen und Erntebehinderungen führen. *Polygonum aviculare* wurde deshalb gesondert betrachtet, da es in Zuckerrüben nur mit einem teuren Spezialherbizid (Debut, Wirkstoff: Triflursulfuron) behandelt werden kann und bei Nichtbehandlung hier ebenfalls zu starken Ertragsreduktionen und Erntebehinderungen führen kann (DREYER, 2004. o. S.). Die Gefahr, dass mögliche Herbizideinsparungen in den Getreidegliedern durch Mehrkosten in Zuckerrüben kompensiert werden müssen, kann durch die explizite Berücksichtigung von *Polygonum aviculare* erfasst werden. Mehrjährige Unkrautarten, wie beispielsweise *Agropyron repens* oder *Cirsium arvense* wurden aus Vereinfachungsgründen nicht explizit berücksichtigt. Indirekt sind sie mit Einschränkungen in den Klassen der di- und monokotylen Unkräuter enthalten. Eine grundsätzliche Änderung der Modellergebnisse wird durch eine explizite Hinzunahme von *Agropyron repens* und *Cirsium arvense* nicht erwartet.

Das entwickelte Simulationsprogramm berücksichtigt bisher als einziges mehrere Unkräuter bzw. Unkrautklassen simultan. Wechselseitige Konkurrenzeffekte unter den Unkräutern und das gesamte Wirkungsspektrum der eingesetzten Herbizide, also nicht nur die Hauptwirkungen gegen die Unkräuter, gegen die sie speziell eingesetzt werden, sondern auch die Nebenwirkungen gegen andere Unkräuter werden im Programm berücksichtigt.

In Abschnitt 5.1 wird das verwendete Populationsmodell zunächst kurz beschrieben, um dann im Detail die Modellgleichungen zu erklären, die biologischen Hintergründe zu beschreiben und die Modellparameter zu bestimmen. Mögliche negative Effekte durch Unkräuter, wie Konkurrenzeffekte und Qualitätsminderungen, werden in Abschnitt 5.2 diskutiert und es wird gezeigt, wie diese Zusammenhänge letztlich im Modell berücksichtigt werden. In Abschnitt

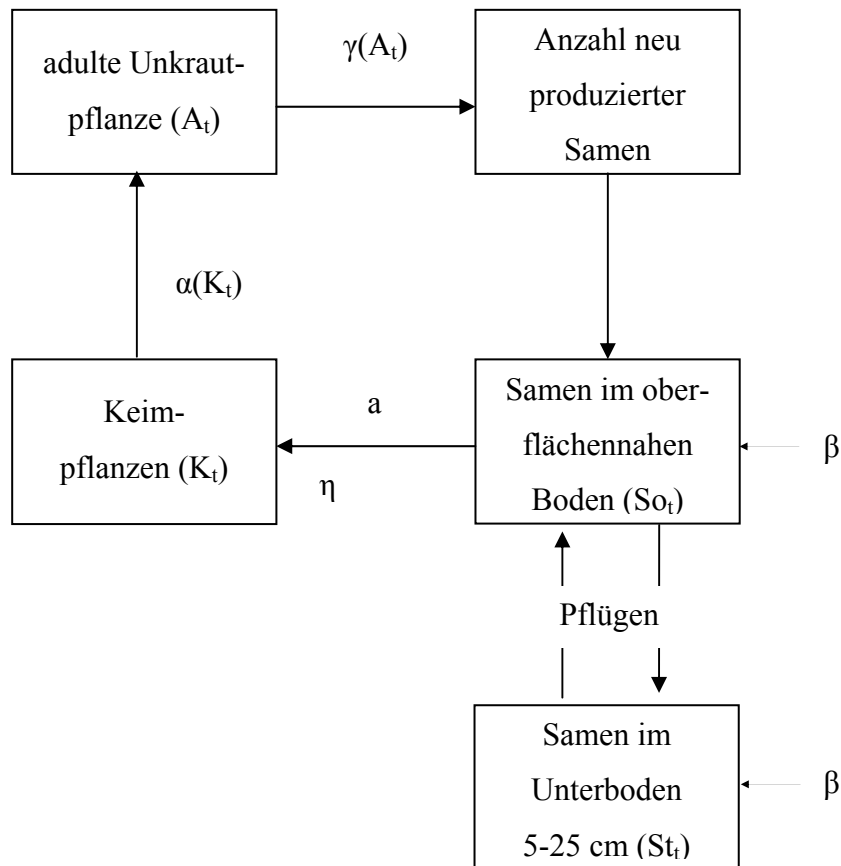
5.3 wird gezeigt, wie sich innerhalb der Simulationsumgebung optimale Bekämpfungsschwellen oder Schadschwellen berechnen lassen. In Abschnitt 5.4 wird die rein zeitliche Ebene erweitert und es wird beschrieben, wie das räumliche Modell entwickelt wurde.

5.1 Populationsdynamisches Modell

Die Populationsdynamik der unterschiedlichen Samenunkräuter wird durch ein zeitdiskretes Modell (siehe Abbildung 11) mit fünf Zuständen dargestellt. Die Entwicklung des Modells erfolgt in Zeitschritten von einem Jahr in Form von Differenzgleichungen. Diese Darstellungsform wurde in gleicher oder ähnlicher Form in vielen Arbeiten zur Unkrautdynamik verwendet (vgl. COUSENS 1986; MOSS, 1990; ZWERTGER 1993; COUSENS und MORTIMER 1995; MUNIER-JOLAIN et al., 2000 und DUNKER, 2002). Simulationsbeginn und Ausgangszustand des Systems ist der Samengehalt innerhalb der Bodenkruke, der unterteilt wird in einen oberflächennahen (0 – 5 cm Bodentiefe) und einen tieferen (5 – 25 cm Bodentiefe) Samengehalt. Die weiteren Zustände sind die Anzahl der Keimpflanzen, die Anzahl adulter Pflanzen und die Anzahl neu gebildeter Samen. Da mit zunehmender Bodentiefe die Keimbereitschaft der Samen in der Regel abnimmt (KOCH, 1969) und die Wahrscheinlichkeit, dass die Pflanzen erfolgreich bis zur Oberfläche durchwachsen können, vermindert ist, wird davon ausgegangen, dass nur die Samen aus den oberen 5 cm Keimpflanzen bilden. Die Auflaufwahrscheinlichkeiten werden als unabhängig vom Samengehalt angenommen und beziehen sich nur auf den Samengehalt der oberen 5 cm. Durch einen jährlichen Pflugeinsatz kommt es zum Austausch der Samen zwischen den beiden Bodenschichten.

Die Überlebenswahrscheinlichkeit der Unkräuter nimmt in der Regel mit der Unkrautdichte ab (RÖTTELE, 1980; DEKKER und MERGITT 1983; HOFSTETTER 1986; ZWERTGER 1993), so dass die Keimlingsmortalität in Abhängigkeit von der Unkrautdichte mit Hilfe einer hyperbolischen Funktion: $\alpha(K_t)$ (nach COUSENS und MORTIMER, 1995) beschrieben wurde. Da ebenfalls ein negativer Zusammenhang zwischen der Samenproduktion der Einzelpflanze und der Unkrautdichte besteht (KOCH 1969; COUSENS 1986; ZWERTGER 1993; MUNIER-JOLAIN et al., 2000), wurde auch zwischen Unkrautdichte und Samenproduktion ein hyperbolischer Zusammenhang angenommen: $\gamma(A_t)$. Die Überlebensrate der Samen im Boden wurde als Konstante festgelegt ($1-\beta$).

Abbildung 11: Populationsmodell



a : Auflaufwahrscheinlichkeit (Parameter)

η : Pflanzenverluste durch Herbizidspritzung (Parameter)

$\alpha(K_t)$: Funktion, die die Überlebenswahrscheinlichkeit in Abhängigkeit von intraspezifischer Unkrautkonkurrenz abbildet

$\gamma(A_t)$: Funktion, die die Samenbildung der adulten Pflanzen in Abhängigkeit von der intraspezifischen Unkrautkonkurrenz abbildet

β : Samenverluste im Boden (Parameter)

Quelle: Eigene Darstellung, verändert nach COUSENS, 1986

5.1.1 Keimung und Auflaufen

Der Zusammenhang zwischen dem Samenvorrat und dem Auflauf wird durch weitere Randbedingungen, wie Art und Zeitpunkt der Bodenbearbeitung, Saatzeitpunkt, Konkurrenzkraft der Kulturpflanze, Witterung, Standorteigenschaften, Fruchtfolge etc. modifiziert (ZWERGER, 1987, S. 37ff.; CLAUPEIN und BAEUMER, 1992, S. 249; ZWERGER, 1993, S. 23). Die Angaben der Literatur zu den Auflaufwahrscheinlichkeiten sind deshalb nicht einheitlich. In einem Versuch von NIEMANN et al. (2000, S. 289) fluktuierte der Unkrautauflauf von *Alopecurus myosuroides* in der intensiv mit Herbiziden behandelten Variante, in der es zu fast keinem neuen Sameneintrag kam, allein durch Umwelteinflüsse um den Faktor 10.

GRUNDY et al. (2003) untersuchten das Keim- und Auflaufverhalten von unterschiedlichen dikotylen Unkräutern in Abhängigkeit von der Samendichte und davon, wie tief die Samen unter der Bodenoberfläche abgelegt wurden. Es konnte ein schwacher, aber signifikant negativer Zusammenhang zwischen der Unkrautdicke und der Auflaufwahrscheinlichkeit nachgewiesen werden (S. 761). Auch ZWERGER (1993, S. 28) konnte in seinen Untersuchungen einen signifikanten Zusammenhang zwischen der Auflaufdicke und dem Samenpotenzial messen, berücksichtigte dies in seinen Simulationsstudien jedoch nicht, da die Auflaufwahrscheinlichkeiten mit steigendem Samenpotenzial nur sehr langsam abnahmen. Eine Verminderung der Auflaufwahrscheinlichkeit bei höheren Samengehalten führt zu einer Selbstregulation der Unkrautpopulation. Da dieser Sachverhalt jedoch erst bei sehr hohen Unkrautsamendichten deutlich hervortritt, die Datengrundlage zur Quantifizierung dieses Zusammenhangs sehr gering ist und davon ausgegangen werden kann, dass inter- und intraspezifische Konkurrenzeffekte bei der Überlebenswahrscheinlichkeit der Keimpflanzen und bei der Samenbildung einen größeren Einfluss auf das Populationsgeschehen haben, wurde in dem Modell vereinfachend von konstanten Auflaufwahrscheinlichkeiten ausgegangen.

Für alle von GRUNDY et al. (2003, S. 767) untersuchten Arten nahm die Wahrscheinlichkeit, dass gekeimte Samen erfolgreich bis zur Bodenoberfläche wachsen und Keimpflanzen etablieren konnten, mit zunehmender Bodentiefe ab. Obwohl dieser Zusammenhang artspezifisch war, konnten die meisten Arten aus einer 5 cm überschreitenden Bodentiefe keine Keimlinge mehr hervorbringen. Auch nach KOCH (1969, S. 102) können von Samen aus

einer Bodentiefe unterhalb von 5 cm nahezu keine Keimlinge mehr gefunden werden. Für *Galium aparine* konnte RÖTTELE (1980, S. 43) zeigen, dass 92% der aufgelaufenen Pflanzen aus der Bodenschicht von 0 – 5 cm stammten. Im Simulationsprogramm wurde deshalb, wie in den Modellen von COUSENS (1986) und MUNIER-JOLAIN et al. (2000), unterstellt, dass nur Samen aus der oberen Bodenschicht (0 – 5 cm) keimen und auflaufen (vgl. auch KAISER, 1989, S. 148). Die Anzahl der Unkrautkeimlinge (K_t) errechnet sich demnach zunächst aus dem Produkt der oberflächennahen Samen nach dem Pflügen (So_n_t) und der Auflaufwahrscheinlichkeit (a). Anschließend erfolgt die Herbizidmaßnahme, so dass in Abhängigkeit von der Wirksamkeit der angewendeten Herbizide (η) die Keimlingsdichte durch Gleichung 8 gegeben ist:

Gleichung 8:
$$K_t = So_n_t \times a \times \eta.$$

Im Modell wird die Populationsreduktion durch Herbizide unmittelbar nach dem Auflauf der Unkräuter berücksichtigt. Konkurrenzeffekte innerhalb der Unkrautpopulation bei der Überlebenswahrscheinlichkeit und der Samenproduktion werden also anhand der verbleibenden Unkräuter nach der Herbizidapplikation berechnet. Diese Vorgehensweise wird durch die These von KOCH (1969, S. 14) gestützt, wonach die überlebenden Unkrautpflanzen nach einer Herbizidbehandlung aufgrund der verminderten Konkurrenz durch die abgetöteten Unkrautpflanzen häufig ein erhöhtes Samenbildungspotenzial besitzen. Es wird davon ausgegangen, dass die Unkräuter, die eine Herbizidmaßnahme überleben, genau so vital sind wie unbehandelte.

Aus den Arbeiten von COUSENS (1986), ZWERGER (1987), KAISER (1989), ZWERGER (1993) und GRUNDY et al. (2003) konnten Auflaufraten entnommen werden. Da bei ZWERGER und KAISER die Auflaufraten auf den Samengehalt der gesamten Krume (0-25 cm) bezogen werden, wurden die Auflaufwahrscheinlichkeiten dieser Arbeiten mit 5 multipliziert.

Um für die kumulierte Unkrautklassen der dikotylen Unkräuter Auflaufwahrscheinlichkeiten angeben zu können, muss zuvor bestimmt werden, zu welchen Anteilen die jeweiligen Unkräuter vorkommen. Als Orientierung wurde hierfür das Unkrautspektrum der Domäne St. Ludgeri herangezogen. In Tabelle 2 sind die wichtigsten Samenunkräuter auf den Versuchsflächen der Domäne St. Ludgeri, wie sie von DUNKER (2002, S. 44) erhoben wurden,

wiedergegeben. Nicht zu allen der 15 in Tabelle 2 aufgeführten Unkrautarten waren in den oben zitierten Quellen Auflaufzahlen vorhanden. Existierten auf der anderen Seite zu einzelnen Unkrautarten in mehreren Arbeiten Zahlen, so wurden Mittelwerte gebildet. Die Auflaufwahrscheinlichkeit für die Klasse der dikotylen Unkräuter wurden errechnet, indem in Abhängigkeit von den jeweiligen Häufigkeiten gewichtete Mittelwerte gebildet wurden.

KAISER (1989) gibt neben Standardwerten auch Extremwerte an. ZWERGER (1987, 1993) hat Auflaufwahrscheinlichkeiten über mehrere Jahre gemessen, so dass auch aus diesen Arbeiten neben den mittleren Auflaufwahrscheinlichkeiten minimale und maximale Auflaufwahrscheinlichkeiten entnommen werden konnten.

Tabelle 2: Auflaufwahrscheinlichkeiten

Arten bzw. Unkrautklassen	mittlere Häufigkeit [%]	Auflauf- wahrscheinlichkeit		
		Min	Max	Mittel
<i>Alopecurus myosuroides</i> (Ackerfuchsschwanz)	31	2%	16%	15%
<i>Apera spica-venti</i> (Windhalm)	54	3%	30%	15%
Dikotyle Unkräuter		2%	18%	11%
<i>Capsella bursa pastoris</i> (Hirtentäschel-Kraut)	33	1%	18%	6%
<i>Chenopodium album</i> (Gänsefuß)	38			15%
<i>Lamium ssp.</i> (Taubnesselarten)	17	4%	18%	10%
<i>Matricaria ssp.</i> (Kamillearten)	31			10%
<i>Myosotis arvensis</i> (Vergissmeinnicht)	28	2%	10%	5%
<i>Stellaria media</i> (Vogelmiere)	33	2%	26%	12%
<i>Thlaspi arvense</i> (Ackerhellerkraut)	12	4%	19%	18%
<i>Veronica arvensis</i> (Feld-Ehrenpreis)	18	3%	18%	11%
<i>Viola arvensis</i> (Stiefmütterchen)	59			
<i>Galium aparine</i> (Klettenlabkraut)	23	6%	50%	27%
<i>Polygonum aviculare</i> (Vogelknöterich)	39	0%	17%	7%

Quelle: DUNKER, 2002, S. 44; Auflaufwahrscheinlichkeiten: siehe Text

5.1.2 Bodenwendung durch den Pflug

Die Parameter für die vertikale Bewegung der Samen im Boden durch den Pflug wurden von COUSENS (1986) übernommen. Folgende Annahmen werden hierbei zugrunde gelegt:

Durch den Pflug werden 20% der Samen aus der tiefen Bodenschicht vor dem Pflügen (Stv_t) in die oberflächennahe Schicht befördert. 5% der oberflächennahen Samen vor dem Pflügen (Sov_t) verbleiben im Keimhorizont. Der Anteil der oberflächennahen Samen nach dem Pflügen (Son_t) ergibt sich somit aus folgender Gleichung:

Gleichung 9:
$$Son_t = Stv_t \times 0,2 + Sov_t \times (1 - 0,95).$$

80% der tiefen Samen vor dem Pflügen (Stv_t) befinden sich auch nach dem Pflügen noch in der tiefen Bodenschicht und 95% der oberflächennahen Samen werden untergepflügt, so dass der Samengehalt unterhalb von 5 cm Bodentiefe (Stn_t) nach dem Pflugeinsatz durch

Gleichung 10:
$$Stn_t = Stv_t \times (1 - 0,2) + Sov_t \times 0,95$$

gegeben ist.

Von weiteren vertikalen Bewegungen der Samen durch andere Bodenbearbeitungsschritte, durch Tiere wie Mäuse und Regenwürmer, durch Frostrisse etc. wird aus Vereinfachungsgründen abstrahiert. Durch die modellierte Bodenwendung schlägt sich eine erhöhte Samenproduktion in einem Jahr erst im zweiten darauf folgenden Jahr deutlich nieder. Dieses Phänomen wurde in einigen empirischen Arbeiten bestätigt (vgl. KAISER, 1989, S. 106; LUTMAN et al. 2001, S. 232).

5.1.3 Überlebenswahrscheinlichkeit der Keimlinge

Unter der Überlebenswahrscheinlichkeit der Keimpflanzen soll der Anteil der Pflanzen verstanden werden, der zur Samenreife gelangt, bezogen auf die Gesamtzahl der aufgelaufenen Pflanzen. Die Überlebenswahrscheinlichkeit wird durch unterschiedliche Faktoren bestimmt. Zu nennen sind die extrinsischen Faktoren wie beispielsweise die Witterung, die Nährstoffversorgung und die Konkurrenz durch den Kulturpflanzenbestand, sowie die intrinsischen Faktoren, worunter Selbstregulationsmechanismen und hier

insbesondere intraspezifische¹ Konkurrenz innerhalb der Unkrautpopulation verstanden werden.

In vielen Arbeiten konnte ein negativer Zusammenhang zwischen der Überlebenswahrscheinlichkeit der Unkrautkeimlinge und der Unkrautdicke gefunden werden (MOSS, 1980; RÖTTELE, 1980; DEKKER und MERGITT, 1983; HOFSTETTER, 1986; ZWERGER, 1993 S. 37). RÖTTELE (1980, S. 51) zeigte in seinen Versuchen für *Galium aparine*, dass die Sterblichkeit der früh aufgelaufenen Keimlinge in Winterroggen mit Unkrautkonkurrenz signifikant verschieden war von der Sterblichkeit ohne Unkrautkonkurrenz. Die Verlustraten der Klettenlabkrautkeimpflanzen betrug mit Unkrautkonkurrenz 75% und ohne Unkrautkonkurrenz 62%. Auch ZWERGER (1987, S. 48) fand, dass die Sterblichkeit von spät auflaufenden Unkräutern in den Versuchsgliedern geringer war, in denen vorher eine Herbizidspritzung erfolgte, und somit die Konkurrenz um Wachstumsfaktoren mit älteren Unkräutern vermindert war. Vor allem bei einer hohen Verunkrautung nehmen die Wechselwirkungen unter den Unkräutern zu, so dass die relativen Häufigkeiten der Unkräuter je nach ihren Herbizidempfindlichkeiten zu- oder abnehmen können. So stieg in einem 12-jährigen Versuch *Galium aparine* beispielsweise um den Faktor 500 in den Parzellen, die mit dem Wirkstoff 2,4-D behandelt wurden an, obwohl Klettenlabkraut sensibel auf den Wirkstoff 2,4-D reagiert. Der Populationsanstieg wurde auf eine Verminderung der restlichen Unkrautkonkurrenz zurückgeführt (COUSENS und MORTIMER, 1995, S. 191).

In dem ComputermodeLL wird ein dichteabhängiger Zusammenhang zwischen der Keimlingsdicke und der Dichte der zur Samenbildung gelangenden Pflanzen angenommen. Als funktioneller Zusammenhang wurde eine hyperbolische Funktion (vgl. COUSENS und MORTIMER, 1995, S. 155) gewählt, die so oder in abgewandelter Form in vielen Arbeiten zur Unkrautdynamik verwendet wurde (COUSENS, 1986; DUNKER, 2002, S. 95). Abweichend von den anderen Arbeiten wurde Gleichung 11 um einen Witterungsfaktor W erweitert.

¹ Abweichend von der botanischen Definition bezeichnet interspezifische Konkurrenz hier alle Wechselwirkungen innerhalb der Unkrautpopulation, also die Summe aus den Konkurrenzeffekten zwischen den Individuen einer Art und den Unkrautpflanzen, die unterschiedlichen Arten angehören.

Gleichung 11

$$A_t = \left(r \times K_t / \left(1 + \frac{r}{\max_UK} (K_t + \omega \times A_K_t) \right) \right) \times W$$

r: Überlebensrate der Keimpflanzen ohne intraspezifische Konkurrenz

K_t : **K**eimlinge ($K_t = SoN_t * a * \eta$)

$\max_UK$: maximal mögliche Anzahl adulter Unkräuter je m²

A_K_t : Unkraut**k**eimlinge der **a**nderen Unkrautklassen

ω : relative Konkurrenzwirkung der anderen Unkräuter

W: Witterungseinfluss

In dieser Gleichung wird zwischen der Unkrautkonkurrenz durch artverwandte Unkräuter aus derselben Unkrautklasse und solchen aus anderen Klassen differenziert. Es wird unterstellt, dass die Konkurrenzwirkung innerhalb einer Unkrautklasse auf Grund gleichgerichteter Wachstumsansprüche stärker ist als die zwischen den unterschiedlichen Unkrautklassen ($\omega=0,5$), da hier die Ansprüchen an Wachstumsfaktoren zum Teil divergieren und somit den „ökologischen Nischen“ entsprechend geringere Konkurrenzeffekte zu erwarten sind.

Durch den Faktor W werden in Gleichung 11 neben den intrinsischen Faktoren auch die extrinsischen Witterungseinflüsse berücksichtigt. Es wird unterstellt, dass W mit einer Wahrscheinlichkeit von 50% den Wert 1 annimmt und mit einer Wahrscheinlichkeit von jeweils 25% größer bzw. kleiner als 1 (siehe Tabelle 4) ist und somit günstige bzw. ungünstige Witterungsbedingungen für die Unkrautentwicklung abbildet.

Schwierig ist es, die dichteabhängige Reaktion der Überlebenswahrscheinlichkeit quantitativ zu erfassen und damit die Parametrisierung von Gleichung 11, da häufig in empirischen Versuchen dichteunabhängige Mortalitätsursachen die Ergebnisse mitbeeinflussen (ZWERGER, 1993, S. 38). In Tabelle 3 sind dichteunabhängige Überlebenswahrscheinlichkeiten einiger Unkrautarten aus den Arbeiten von KAISER (1989) und ZWERGER (1993) angegeben. Werte über 100% kommen in Versuchen dann zu Stande, wenn nach der Zählung der Keimpflanzen noch weitere Unkräuter auflaufen und sich erfolgreich bis zur Samenbildung entwickeln können.

Tabelle 3: Überlebenswahrscheinlichkeiten von Unkräutern

Umweltbedingungen Arten	ZWERGER, 1993	KAISER, 1989		
	Mittel	Min	Max	Mittel
<i>Alopecurus myosuroides</i>	74%			
<i>Apera spica-venti</i>		18%	208%	71%
<i>Fallopia convolvulus</i>	67%			
<i>Lamium purpureum</i>	48%			
<i>Myosotis arvensis</i>		3%	63%	24%
<i>Stellaria media</i>	75%			
<i>Thlaspi arvense</i>	58%			
<i>Veronica persica</i>	82%			
<i>Galium aparine</i>	67%	24%	134%	48%
<i>Polygonum aviculare</i>	72%			

Quelle: ZWERGER, 1993, S. 37 und S. 55 f.; KAISER, 1989, S. 130

Anhand dieser Daten können die Parameter für das Unkrautsimulationsmodell nicht exakt bestimmt werden, so dass letztlich qualifizierte Arbeitshypothesen formuliert werden müssen. Zur Parametrisierung von Gleichung 11 sind zunächst drei Parameter entscheidend: die Gewichtung der Konkurrenzeffekte durch artfremde Unkräuter (ω), die maximale Unkrautdicke ($\max_UK$) und die Überlebenswahrscheinlichkeit bei sehr geringen Unkrautdichten (r). Der Parameter ω wurde bereits mit 0,5 festgelegt (s. o.). Die Überlebenswahrscheinlichkeiten ohne Konkurrenz (r) wurden in Anlehnung an die empirischen Versuche (siehe Tabelle 3) postuliert, wobei für die Gräser *Alopecurus myosuroides* und *Apera spica-venti* Überlebenswahrscheinlichkeiten von 75% und für die anderen drei Unkrautklassen ein einheitlicher Wert von 60% angenommen wurde. *Galium aparine* reagiert besonders plastisch auf wechselnde Umweltbedingungen (AMMON, 2002), so dass im Modell angenommen wird, dass bei günstigen Witterungsbedingungen dreimal mehr Pflanzen überleben können als bei durchschnittlichen Witterungsbedingungen. Bei ungünstigen Witterungsbedingungen sind es 5 mal weniger Pflanzen. Für die anderen

Unkrautklassen wurden mit maximalen Faktoren von 2 und minimalen Faktoren von 0,25 etwas niedrigere Spannweiten postuliert.

In den Untersuchungen von MOSS (1980) betrug die maximale Anzahl von *Alopecurus myosuroides* 400 Pflanzen/m². Da die Getreidebestände heute deutlich dichter sind als 1980 und somit die Konkurrenzkraft des Getreides höher einzustufen ist, wurde im Modell bei den Ungräsern von einer maximalen Dichte samenbildender Pflanzen von 300 je m² ausgegangen. Bei den anderen Unkrautarten wurde postuliert, dass die maximalen Dichten samenbildender Pflanzen geringer sind als bei den Gräsern. Die maximalen Dichten von 200 Pfl./m² für dikotyle Unkräuter, 100 Pfl./m² für *Galium aparine* und 100 Pfl./m² für *Polygonum aviculare* stellen deshalb realistische Arbeitshypothesen dar.

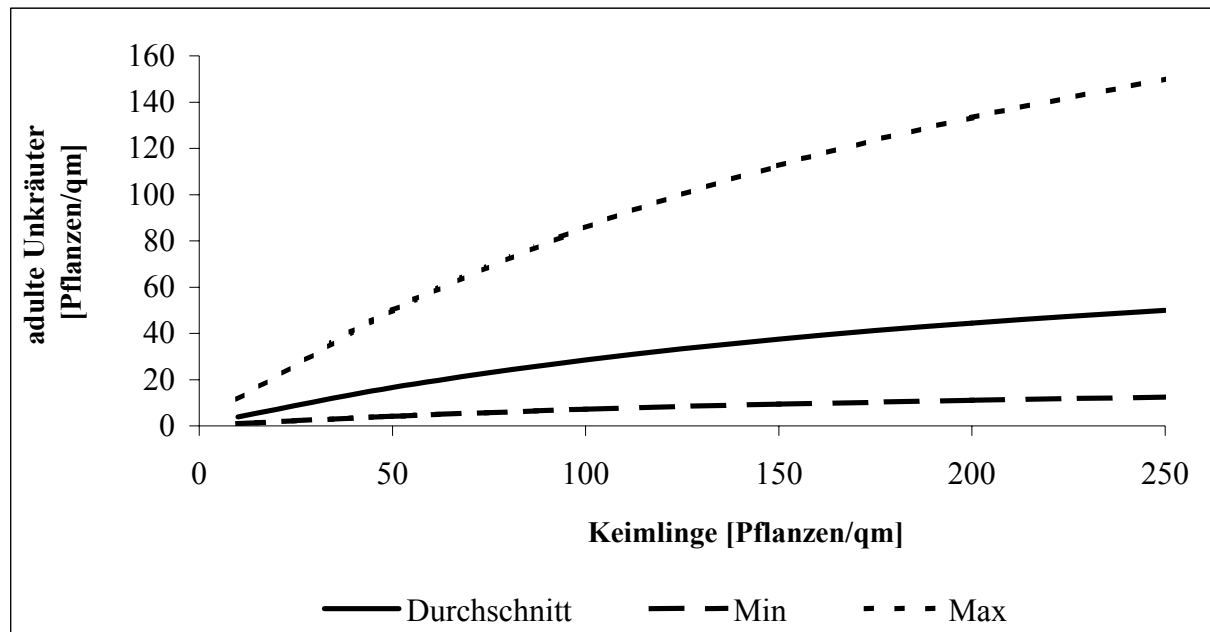
Tabelle 4: Hypothesen zur Überlebenswahrscheinlichkeit

	Maximale Unkrautdichte (max_UK)	Überlebenswahrscheinlichkeit ohne Konkurrenz (r)	Faktoren (Witterungseinfluss)	
			Min	Max
<i>Monokotyle Unkräuter</i>	300 Pfl./m ²	75%	0,25	2
<i>Dikotyle Unkräuter</i>	200 Pfl./m ²	60%	0,25	2
<i>Galium aparine</i>	100 Pfl./m ²	60%	0,2	3
<i>Polygonum aviculare</i>	100 Pfl./m ²	60%	0,25	2

Quelle: Eigene Annahmen (siehe Text)

In Abbildung 12 sind beispielhaft die unterstellten Funktionen für *Galium aparine* dargestellt. Der mittlere Graph (durchgehende Linie) zeigt die Entwicklung der Dichte samenbildender Klettenlabkrautpflanzen in Abhängigkeit von der Keimlingsdichte für durchschnittliche Witterungsbedingungen. Mit steigender Keimlingsdichte nimmt die intraspezifische Konkurrenz und somit der relative Anteil an Keimpflanzen, die nicht zur Samenreife gelangen, zu. Die Funktion nähert sich asymptotisch der maximalen Unkrautdichte von 100 Pflanzen/m². Wechselnde Umweltbedingungen (extrinsische Faktoren) werden durch die Multiplikation der Funktionswerte mit den Faktoren 0,2 und 3 (W) abgebildet.

Abbildung 12: Überlebenswahrscheinlichkeit von *Galium aparine* Keimlingen in Abhängigkeit von der Dichte und unterschiedlichen Umweltbedingungen



Quelle: Eigene Darstellung

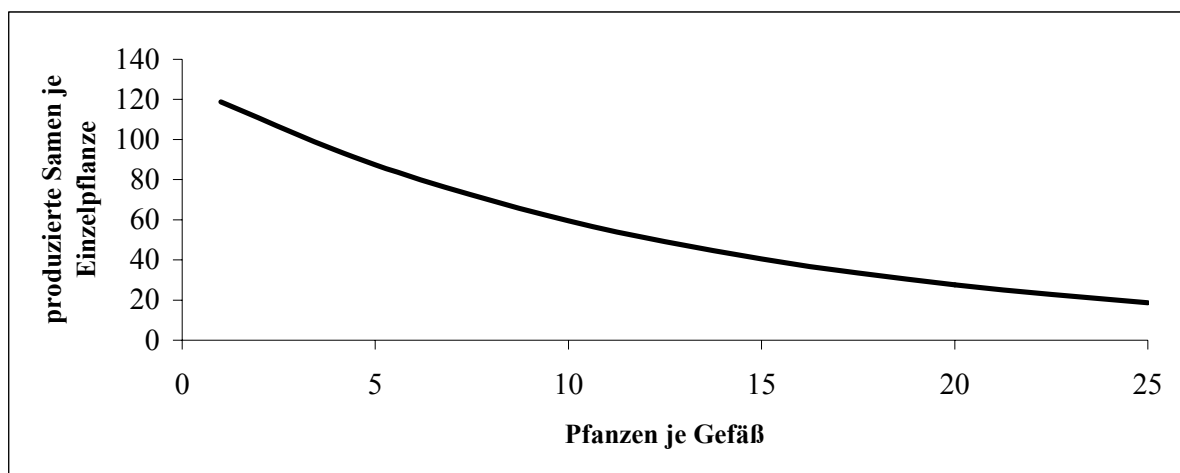
5.1.4 Samenbildung

Durch die Konkurrenzeffekte des Kulturpflanzenbestandes ist die Samenproduktion von Unkräutern im Bestand sehr viel geringer, als unter isolierten Wachstumsbedingungen. In Gewächshausversuchen untersuchte KOCH (1969, S. 10) die Samenbildung von *Sinapis arvensis* (Ackersenf) mit und ohne Konkurrenz durch Getreide. Die allein stehenden Pflanzen hatten eine Samenbildung von 550 Samen/Pflanze, in Konkurrenz mit dem Getreide reduzierte sich die Samenbildung je Pflanze auf 68. Der gleiche Versuch wurde auch mit *Avena fatua* (Flughäfer) durchgeführt. Hier produzierten die Pflanzen allein 103, in Konkurrenz mit Sommergerste 25 und in Konkurrenz mit Winterweizen 11 Karyopsen/Pflanze. Im vorliegenden Simulationsprogramm wird davon ausgegangen, dass der Weizen bei konstanten Aussaatstärken in jedem Jahr die gleichen Konkurrenzwirkungen gegenüber den Unkräutern ausübt. Deshalb wird die Konkurrenzwirkung des Kulturpflanzenbestandes nicht explizit in Gleichung 12 berücksichtigt, sondern wechselnde Umweltbedingungen lediglich durch Korrekturfaktoren abgebildet.

Der variierende Unkrautbestand hingegen muss in den Simulationsstudien berücksichtigt werden, da auch die Unkräuter untereinander um Wachstumsfaktoren konkurrieren (RÖTTELE,

1980; MOSS, 1990; ZWERGER, 1993; COUSENS und MORTIMER, 1995; ACKER VAN, 1997, S. 277). In Versuchen von KOCH (1969, S. 19) war beispielsweise die Samenproduktion von *Matricaria chamomilla* und *Polygonum convolvulus* in der Kontrolle mit Unkrautkonkurrenz deutlich geringer als in den behandelten Varianten. „Die artverschieden vermehrte Samenproduktion je Flächeneinheit erreicht bei den geschonten Arten ein Ausmaß, das auch für praktische Verhältnisse Beachtung verdient“ (ebenda, S. 19). Zur weiteren Verdeutlichung dieses Zusammenhanges ist in Abbildung 13 eine Regressionsfunktion dargestellt, die mit einem R^2 von 98% die Samenbildung pro Einzelpflanze von *Polygonum convolvulus* in Abhängigkeit von der Unkrautdicke abbildet (ZWERGER, 1993, S. 49).

Abbildung 13: Dichteabhängigkeit der Samenproduktion von *Polygonum convolvulus*



Quelle: Eigene Darstellung nach ZWERGER, 1993, S. 49

Zur Modellierung der Samenproduktion wurde dieselbe hyperbolische Funktion herangezogen, die bereits zur Beschreibung der Überlebenswahrscheinlichkeit der Keimpflanzen verwendet wurde. Diese Funktion wurde so oder in leicht veränderter Form (ohne den Witterungsfaktor W) auch in anderen Arbeiten häufig zur Beschreibung der Unkrautsamenproduktion verwendet (vgl. COUSENS, 1986; DOYLE et al., 1986; COUSENS und MORTIMER, 1995; ALLEN et al., 1996, S. 818; MUNIER-JOLAIN et al., 2002).

Gleichung 12:
$$S_t = \left(A_t S_{\max} / \left(1 + \frac{S_{\max}}{S_{\max} - qm} (A_t + \omega \times A_{-A_t}) \right) \right) \times W$$

S_t	Samenproduktion pro m^2
A_t	Anzahl adulter Pflanzen (siehe Gleichung 11)
$S_{\max}$	maximale Samenproduktion einer Einzelpflanze ohne intraspezifische Konkurrenz
$S_{\max_qm}$	maximal mögliche Samenproduktion je m^2 bei sehr hohen Unkrautdichten
A_{-A_t}	adulte Unkräuter der anderen Unkrautklassen
ω :	relative Konkurrenzwirkung der anderen Unkräuter
W :	Witterungsfaktor

In dem Modell wird vereinfachend davon ausgegangen, dass alle Unkräuter mehr oder weniger zum gleichen Zeitpunkt, nämlich mit der Aussaat der Kultur auflaufen. Diese Vereinfachung ist in Ackerkulturen zulässig, da zum einen der Hauptaufbau direkt nach der Aussaat der Kultur stattfindet (COUSENS und MORTIMER, 1995, S. 157) und zum anderen die Unkrautpflanzen, die deutlich später als die Kulturpflanzen auflaufen, einen so großen Entwicklungsnachteil gegenüber dem weiter entwickelten Kulturpflanzenbestand haben, dass ihre Samenproduktion in aller Regel aus populationsdynamischer Sicht nur eine untergeordnete Rolle spielt (ebenda, S. 157; ZWERGER, 1993, S. 45).

Die Parametrisierung der Gleichung 12 ist schwierig und nicht eindeutig. So zeigte sich in den Unkrautversuchen von VAN ACKER et al. (1997, S. 283ff.) beispielsweise eine sehr hohe Variabilität in der Samenproduktion der Unkräuter von Versuch zu Versuch und von Jahr zu Jahr. Die geschätzte Samenproduktion von ca. 800 *Stellaria media*/ m^2 schwankte zwischen 4.000 und 48.000 Samen/ m^2 . Die Autoren betonen deshalb die Schwierigkeit der Parametrisierung von Unkrautpopulationsmodellen. In Tabelle 5 sind Angaben zur Samenbildung aus mehreren Quellen zitiert. COUSENS (1986) benutzt ebenfalls Gleichung 12 (ohne den Faktor W) zur Beschreibung der Samenproduktion und ging von einer maximalen Samenbildung je Ackerfuchsschwanzpflanze ohne Unkrautkonkurrenz von 300 Samen aus. Weiter postulierte er für die maximale Samenproduktion von Ackerfuchsschwanz je m^2 75.000 Samen ($S_{\max_qm}$), ging jedoch davon aus, dass nur 50% der produzierten Samen tatsächlich lebensfähig sind. MOSS (1990) ermittelte für Ackerfuchsschwanz bei geringer

intraspezifischer Konkurrenz eine Samenproduktion pro Einzelpflanze von 213 Samen. Alle anderen Angaben der Tabelle 5 sind nicht nach Unkrautdichten und somit nicht nach Konkurrenzverhältnissen differenziert. In der Arbeit von KAISER (1989, S. 122) wurden, abweichend vom eigenen Modell, weitere Verlustursachen berücksichtigt (unfruchtbare Samen, Tierfraß etc.). Diese Verluste, die KAISER nach der Samenbildung abzieht, wurden in Tabelle 5 bereits durch eine verminderte Samenproduktion berücksichtigt. Die Angaben der Tabelle 5 aus der Arbeit von KAISER beschreiben also die Samenproduktion, die tatsächlich den Samenvorrat des Bodens ergänzt.

Tabelle 5: Samenbildung pro Unkrautpflanze in Winterweizen

Arten	COUSENS, 1986	ZWERGER, 1993	KAISER, 1989		
	ø	ø	Min	Max	ø
<i>Alopecurus myosuroides</i>	300	106			
<i>Apera spica-venti</i>			171	564	361
<i>Fallopia convolvulus</i>		93			
<i>Lamium purpureum</i>		280			
<i>Myosotis arvensis</i>			17	34	32
<i>Thlaspi arvense</i>		165			
<i>Veronica persica</i>		150			
<i>Galium aparine</i>		140	26	55	42

COUSENS, 1986, S. 273; KAISER, 1989, S. 130, ZWERGER, 1993, S. 55

Zur Parameterschätzung von Gleichung 12 müssen Annahmen zur Samenproduktion je Unkrautpflanze ohne Unkrautkonkurrenz ($S_{\max}$) und zur maximal möglichen Samenproduktion je m^2 ($S_{\max_qm}$) getroffen werden. Die Werte für $S_{\max}$ wurden in Anlehnung an Tabelle 5 postuliert. Bei den Gräsern *Alopecurus myosuroides* und *Apera spica-venti* wurde von 300 Samen/Pflanze, bei der Klasse der dikotylen Unkräuter und bei *Galium aparine* von 150 Samen/Pflanze und bei *Polygonum aviculare* von 100 Samen/Pflanze ausgegangen. Für die maximale Samenproduktion je m^2 wurde unterstellt, dass bei maximaler Unkrautdicke (siehe Tabelle 4) die Samenproduktion einer Einzelpflanze nur noch 25% von $S_{\max}$ beträgt, so dass die maximal möglichen Samenproduktion je m^2 ($S_{\max_qm}$) aus Gleichung 13 errechnet werden kann. Die Konkurrenzwirkung der Unkräuter

aus anderen Klassen (ω) wurde wie in Gleichung 11 mit 0,5 veranschlagt. In Tabelle 6 sind die Modellhypothesen wiedergegeben.

Gleichung 13: $S_{\max_qm} = \max_UK \times S_{\max} \times 25\%$

Tabelle 6: Modellannahmen zur Samenproduktion

	Samen je Einzel- pflanze ohne Konkurrenz ($S_{\max}$)	Maximale Anzahl neu gebildeter Samen je m ² ($S_{\max_qm}$)	Faktoren (Umweltbe- dingungen)	
			Min	Max
<i>Alopecurus myosuroides</i>	300	22.500	0,5	2
<i>Apera spica-venti</i>	300	22.500	0,5	2
<i>Dikotyle Unkräuter</i>	150	7.500	0,5	2
<i>Galium aparine</i>	150	3.750	0,5	2
<i>Knötericharten</i>	100	2.500	0,5	2

Quelle: Eigene Annahmen (siehe Text)

5.1.5 Überlebensrate der Samen im Boden

Die Überlebenswahrscheinlichkeit von Unkrautsamen ist artabhängig (ZWERGER, 1993, S. 50). Da sich verwandte Arten in ihrer Lebensdauer aber ähneln, ist es möglich z. B. für Arten innerhalb einer Pflanzenfamilie von ähnlichen Werten auszugehen. Die Lebensdauer der Gräser *Alopecurus myosuroides* und *Apera spica-venti* sind verhältnismäßig kurz, Cruciferen haben eine mittlere bis längere Lebensdauer und *Chenopodiaceen* (Gänsefuß) und *Polygonaceen* (Knöterich) bleiben meist sehr lange lebensfähig (KOCH, 1969, S. 39ff.). Der Samenabbau hängt jedoch stark von agronomischen Bedingungen und von Umweltbedingungen ab, so dass ein Vergleich von unterschiedlichen Studien schwierig ist (LUTMAN et al. 2001, S. 239).

AARTS (1986, S. 279) nennt für *Galium aparine* jährliche Samenverluste von 62%. In ähnlicher Größenordnung werden auch von GEROWITT (1998, S. 97) Samensterblichkeiten für *Galium aparine*-Samen von 42 und 48% genannt. HEITEFUSS et al. (1994) schätzen den Samenabbau von Klettenlabkraut sogar auf 70%. Der durchschnittliche Samenabbau von

Klettenlabkrautsamen vollzog sich in den Versuchen von Lutman et al. (2001, S. 239) mit 59% Jahr ebenfalls sehr schnell. COUSENS (1986, S. 273) verwendet in seinen Modellkalkulationen für *Alopecurus myosuroides* jährliche Samenverluste von 70%. MOSS (1985b) nennt für *Alopecurus myosuroides* sogar Samenverluste in Höhe von 80%. Folgenden Annahmen wurden für die Samenverluste (β) im Boden pro Jahr unterstellt.

Tabelle 7: Samenabbau

	Samenabbau pro Jahr
Monokotyle Unkräuter	60%
Dikotyle Unkräuter	25%
<i>Galium aparine</i>	50%
<i>Polygonum aviculare</i>	15%

Quelle: Eigene Annahmen

Je nachdem wie schnell der Samenabbau erfolgt, können die Unkrautpopulationen um so rascher durch eine erhöhte Bekämpfungsintensität reduziert werden. Klettenlabkraut reagiert somit deutlich schneller auf eine verstärkte Bekämpfung als beispielsweise Ackerstiefmütterchen (KAISER, 1989, S. 50 ff.).

In einigen populationsdynamischen Arbeiten wird berücksichtigt, dass die Überlebenswahrscheinlichkeit von Unkrautsamen altersabhängig ist, so dass beispielsweise bei den neu gebildeten Samen höhere Verluste angenommen werden als bei den Samen, die schon längere Zeit im Boden lagen (CASWELL, 1978; COUSENS et al. 1987; FERNANDEZ-QUINTANILLA, 1988). Aus Vereinfachungsgründen wurden im vorliegenden Modell die Samen nicht nach ihrem Alter unterschieden; unabhängig vom Alter unterliegen die Unkrautsamen den gleichen Abbauraten und folgen somit einer exponentiellen Abnahme. Außerdem wurde ein möglicher negativer Zusammenhang zwischen der Bodentiefe und dem Samenabbau (KOCH, 1969) nicht berücksichtigt, da hierfür die Datengrundlage nicht ausreichend ist und von einem jährlichen Pflugeinsatz ausgegangen wird, der nach ZWERGER (1993, S. 52) die Unterschiede der Samenabbauraten in unterschiedlichen Bodentiefen innerhalb der Bodenkrume nivelliert.

Exponentielle Modelle sind zur Beschreibung des Samenabbaus nicht immer optimal. Dass diese Modelle dennoch häufig verwendet werden, erklären REES und LONG (1993) damit, dass es häufig schwierig ist, andere Funktionen zu bestimmen.

5.1.6 Herbizidauswahl

Für die Modellbildung sind Hypothesen zu Preisen, Wirkungsspektren und Wirkungsgraden von Herbiziden notwendig. Anhand der Empfehlungen der LANDWIRTSCHAFTSKAMMER WESTFALEN LIPPE (2005) wurden aus den unterschiedlichen Wirkstoffen, die zur Unkrautbekämpfung im Getreide zur Verfügung stehen, eine Auswahl getroffen und anhand der „Kreuzchentabellen“, die das Wirkungsspektrum der Präparate angeben, Arbeitshypothesen für die Modellbildung formuliert. In Tabelle 8 sind die im Programm verwendeten Herbizide aufgelistet.

Die Kombination von IPU (Isoproturon) und Stomp (Pendimethalin) ist sehr kostengünstig und hat eine relativ umfangreiche „Breitenwirkung“. Häufig muss jedoch mit einer Nachbehandlung im Frühjahr gegen Klettenlabkraut gerechnet werden (HEIL, 2002, o. S.). IPU und Stomp werden im frühen Nachauflauf im Herbst (NAH) eingesetzt und sind damit für eine Teilflächenunkrautbekämpfung nicht geeignet, da zu diesem Zeitpunkt die Unkräuter sich noch im Auflauf bzw. in einem sehr frühen Entwicklungsstadium befinden und somit eine automatische Unkrauterkenkung nur eingeschränkt möglich ist. Sofern Anwendungsaufgaben² oder Resistenzprobleme den Einsatz von IPU nicht ausschließen, stellen IPU und Stomp bei ganzflächiger Unkrautbekämpfung jedoch eine kostengünstige und häufig in der Praxis verwendete Herbizidkombination dar, so dass diese Mittelauswahl in einem Referenzszenario für eine Ganzflächenstrategie verwendet wird. Ist eine Anwendung von IPU im Herbst nicht möglich, so bieten sich eine Reihe weiterer Herbizide für den Herbsteinsatz an. Im Programm wurde Herold (Diflufenican, Flufenacet) als NAH-Alternative gewählt. Alle anderen in Tabelle 8 aufgezählten Herbizide werden im Frühjahr eingesetzt und sind somit sowohl für eine Ganzflächen- als auch für eine Teilflächenunkrautbekämpfung geeignet. Atlantis WG (Iodosulfuron, Mesosulfuron) ist ein Gräsermittel,

² Die wesentlichen Anwendungsbeschränkungen sind: keine Anwendung auf drainierten Flächen; auf Böden mit über 30% Tongehalt; auf Sandböden mit einem Tongehalt unter 1,75%; in 20 m Abstand zu Oberflächengewässern.

das sowohl gegen *Alopecurus myosuroides* als auch *Apera spica-venti* hochwirksam ist. Husar (Iodosulfuron) hat nur eine geringe Wirkung gegen Ackerfuchsschwanz, gilt aber als Spezialherbizid gegen Windhalm und hat darüber hinaus gewisse Wirkungsgrade gegen dikotyle Unkräuter (inkl. *Galium aparine*). Gegen alle dikotylen Unkräuter (außer *Galium aparine*) inklusive *Polygonum aviculare* stellt eine Kombination von Duplosan DP (Dichlorprop-P) und Gropper (Metsulfuron) eine wirkungsvolle Bekämpfungsmöglichkeit dar. Primus (Flurasulam) wurde als ein Spezialherbizid gegen *Galium aparine* mit einbezogen.

Tabelle 8: Wirksamkeit und Preise der im Programm verwendeten Herbizide

Unkrautklasse Präparat	Ackerfuchsschwanz	Windhalm	dikotyle Unkräuter	Klettenlabkraut	Vogelknöterich	Preis je ha
Atlantis WG 500 g/ha	95%	95%	30%	15%	0%	50,00 €
Duplosan DP 1,0 l/ha + Gropper 15 g	0%	15%	95%	40%	95%	21,00 €
Herold 0,4 kg/ha	70%	95%	70%	30%	70%	37,00 €
Husar 200 g/ha	15%	95%	80%	70%	75%	38,00 €
IPU 1,2 l/ha + Stomp 1,5 l/ha	80%	90%	70%	30%	70%	21,30 €
Primus 0,1 l/ha	0%	0%	70%	95%	30%	26,00 €

Quelle: (verändert nach LANDWIRTSCHAFTSKAMMER WESTFALEN-LIPPE, 2005, S. 118 ff.)

Wie bereits in Abschnitt 2.5.1 beschrieben, sind die Wirkungsgrade von Herbiziden nicht konstant, so dass die Prognosen ebenfalls mit einer gewissen Unsicherheit behaftet sind. Um die Effekte wechselnder Wirkungsgrade auf die Modellergebnisse abschätzen zu können, wurden auch für die Herbizide Schwankungsbereiche definiert. Der Wirkungsgrad aller Herbizide soll in „günstigen“ Jahren 10% höher sein, wobei ein Wirkungsgrad von 100% nicht überschritten wird. Und in „ungünstigen“ Jahren ist der Wirkungsgrad um 10% erniedrigt. Werden mehrere Herbizide gleichzeitig appliziert, so multiplizieren sich die Wirkungsgrade. Werden beispielsweise sowohl Atlantis als auch Primus angewendet, dann ergibt sich der Gesamtwirkungsgrad gegen Klette nach folgender Gleichung:

$$\text{Gesamtwirkungsgrad} = 91,5\% = 1 - (1 - 90\%) \times (1 - 15\%)$$

5.2 Negative Effekte durch Unkräuter

Unkräuter konkurrieren mit den Nutzpflanzen in erster Linie um die knappen Faktoren Licht, Wasser und Nährstoffe:

(i) Lichtkonkurrenz setzt dann ein, wenn Pflanzen sich beschatten. Unkräuter können vor allem dann Lichtkonkurrenz auf Kulturpflanzen ausüben, wenn sie schneller und/ oder höher wachsen können als die Nutzpflanze oder sich durch kletternden Wuchs (*Galium aparine*, *Fallopia convolvulus*) in günstige Positionen bringen können. Schattentolerante, kleinwüchsige Unkrautarten sind deshalb im Allgemeinen „konkurrenzschwach“ (GEROWITT, 2002, S. 82 ff.).

(ii) Die Konkurrenz um Wasser hängt vom Klima und dem Wasserhaushalt des Standortes (arid, humid) und davon ab, wie weit das Bodenvolumen von den Nutz- und Unkrautpflanzen erschlossen ist. Nach AMMON (2002, S. 244) ist Wasserkonkurrenz in den Trockengebieten Deutschlands ein wesentlicher ertragsmindernder Faktor. FLATTER (1999, S. 46 ff.) untersuchte die Auswirkungen unterschiedlicher Niederschlagsmengen auf das Konkurrenzgeschehen auf vergleichsweise trockenen Standorten (durchschnittliche Jahresniederschlagsmenge < 600 mm), konnte aber auf Grund einer zu geringen Datenbasis nur tendenzielle Aussagen ableiten. Demnach erhöhten höhere Niederschlagsmengen in den Monaten März, April und Mai in der Regel die Konkurrenzkraft des Getreides. In schwachen Getreidebeständen profitieren tendenziell die Unkräuter von mehr Niederschlag, während in guten Weizenbeständen der Weizen von einem erhöhten Wasserangebot profitieren konnte (ebenda, S. 51). Der Einfluss des Niederschlages auf das Konkurrenzgeschehen ist auf Böden mit hoher nFK verständlicherweise geringer als auf solchen mit niedriger (ebenda, S. 82).

(iii) Nährstoffkonkurrenz tritt vor allem auf unfruchtbaren und gering gedüngten Standorten auf, während auf gut mit Nährstoffen versorgten Böden Nährstoffkonkurrenz von geringerer Bedeutung sein dürfte (KROPFF und VAN LAAR, 1993). Dennoch kann die Düngung einen wesentlichen Einfluss auf das Wettbewerbsgeschehen ausüben. Denn in Abhängigkeit vom jeweiligen Nährstoffaneignungsvermögen können unterschiedliche Pflanzenarten unterschiedlich stark von einer hohen Nährstoffversorgung profitieren. Innerhalb der

Unkrautpopulation kommt es durch regelmäßig hohe Düngergaben (siehe Abschnitt Ökologie der Unkräuter) zu einer Verschiebung des Artenspektrums zugunsten von den Arten, die durch eine erhöhte Düngung gefördert werden (z. B. *Galium aparine*, *Stellaria media*, *Alopecurus myosuroides*, *Apera spica venti*). Ob nun das Getreide oder die Unkrautpopulation mehr von einer hohen Düngung profitieren können, hängt vom Einzelfall (Niveau der N-Düngung, Witterungsverlauf, Getreidebestand etc.) und der Unkrautzusammensetzung ab. PALLUTT und FLATTER (1998, 336) konnten in Versuchen zeigen, dass bei halbierter N-Düngung die Konkurrenzeffekte durch Unkräuter im Allgemeinen zunahmen, also die Getreidebestände stärker von einer höheren N-Versorgung profitieren können als die Unkrautpopulation (siehe auch THOLE und HEITEFUSS, 1992, S. 139). Gegenteilige Ergebnisse beobachtete NIEMANN (1984) in Roggenbeständen, wo bei gesteigerter Stickstoffdüngung zunehmende Unkrautkonkurrenz auftrat. Für *Galium aparine* fanden FRANZ et al. (1990, S. 127), dass in den ungedüngten Varianten alle Klettenlabkrautpflanzen kleiner als der Weizen blieben. Bei einer N-Düngung von 90 und 150 kg/ha konnten die Klettenlabkrautpflanzen hingegen den Weizen überwachsen.

Weitere mögliche negative ökonomische Auswirkungen durch Unkräuter – neben einer Ertragsreduktion – können ein erhöhter Feuchtigkeitsgehalt des Getreides, ein erhöhter Fremdbesatz mit Unkrautsamen (Schwarzbesatz), eine Übertragung von Krankheiten und Schädlingen und Erntebehinderungen sein. Erntebehinderungen werden vor allem durch kletternde Unkräuter verursacht (z. B. *Galium aparine*). Die empirische Datenbasis zu diesen Effekten ist jedoch gering und heterogen, so dass Prognosen zu diesen Effekten mit großen Unsicherheiten verbunden sind. Eine grobe Einschätzung dieser Effekte wird in den Abschnitten 5.2.3 bis 5.2.6 gegeben.

5.2.1 Funktionen zur Beschreibung von Konkurrenzeffekten

Nach COUSENS (1985) sollte aus theoretischen Überlegungen eine Modellgleichung zur Beschreibung von Ertragsverlusten durch Unkräuter folgende Eigenschaften erfüllen:

1. Die Funktion sollte durch den Ursprung gehen, da null Unkräuter keinen Schaden hervorrufen können.
2. Bei niedrigen Unkrautdichten sind die Verluste proportional zur Unkrautdichte.

Gleichung 14: $R = UK \times d$

R: Ertragsreduktion [kg/ha]

UK: Unkrautdichte [Pflanzen/m²]

d: Konkurrenzindex [(kg/ha)/(Pflanze/m²)]

3. Der Ertragsausfall beträgt maximal 100%. In den meisten Fällen wird jedoch selbst bei der höchsten Unkrautdichte noch ein Restertrag realisiert, so dass sich die Ertragsverlustfunktion asymptotisch einem Maximalverlust (zwischen 0 - 100%) annähert.
4. Die Funktion wächst degressiv an, da mit wachsenden Unkrautdichten die intraspezifische Konkurrenz zunimmt und somit die negativen Effekte einer Einzelpflanze abnehmen.

Aufgrund dieser theoretischer Überlegungen favorisiert COUSENS folgende hyperbolische Funktion zur Beschreibung der Konkurrenzeffekte (R):

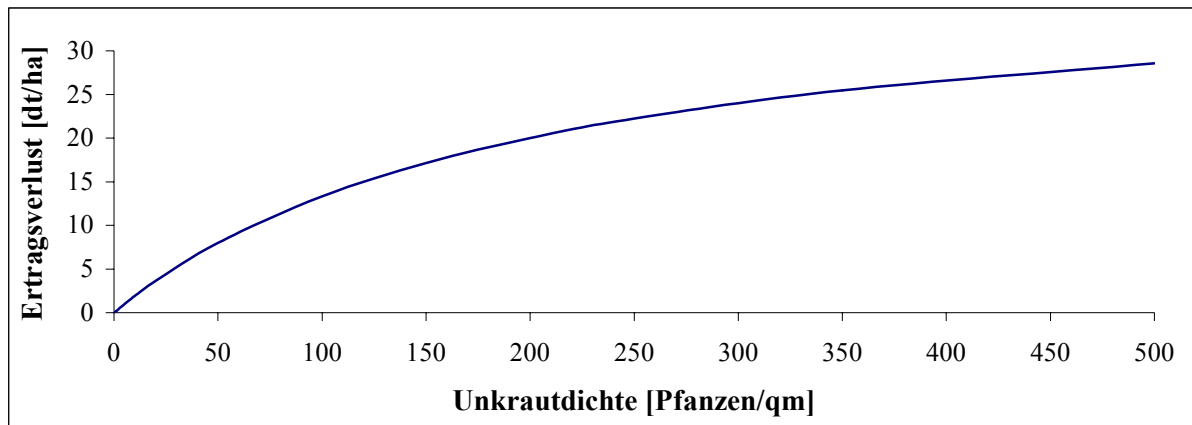
Gleichung 15:
$$R = \frac{UK \times d}{1 + UK \times d / A}$$

d: Ertragsverlust pro Unkrautpflanze bei sehr niedrigen Unkrautdichten

A: maximaler Ertragsverlust durch beliebig viele Unkräuter

UK: Unkrautdichte

Diese Funktion erfüllt alle oben aufgeführten Anforderungen. In Abbildung 14 ist beispielhaft der Funktionsverlauf obiger Ertragsverlustfunktion dargestellt.

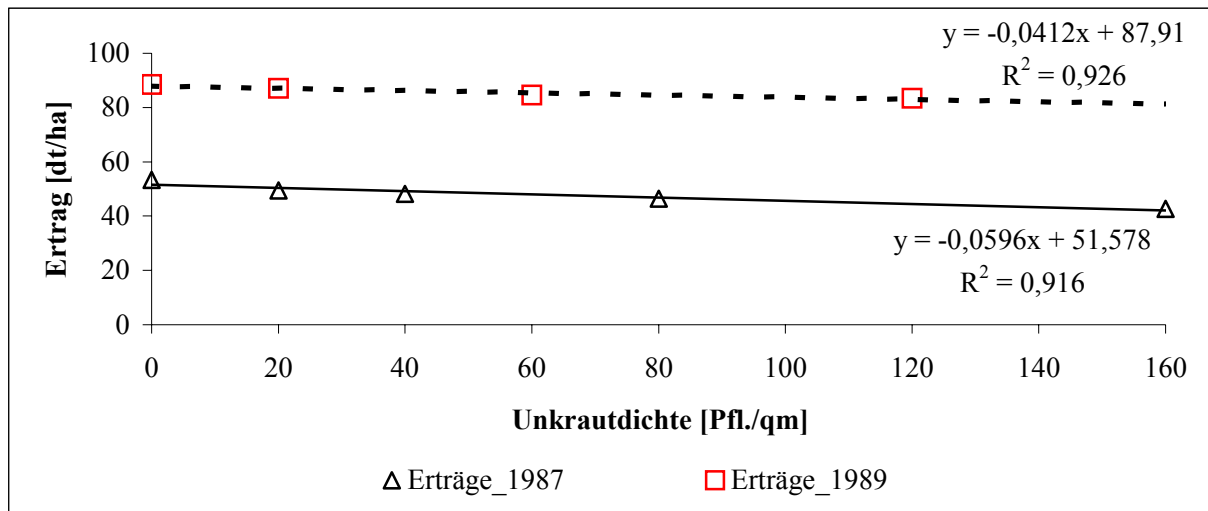
Abbildung 14: Hyperbolische Ertragsverlustfunktion nach COUSENS (1985)

$d=20 \text{ (kg/ha)/(Unkrautpflanze/m}^2\text{)}; A=40 \text{ dt/ha}$

Die Ertragsverlustfunktion nach COUSENS wurde in vielen Arbeiten aufgegriffen. Zum einen wurde der Versuch unternommen, die Parameter empirisch zu schätzen (WILSON und WRIGHT, 1990; THOLE, 1992; KIM et al., 2002), zum anderen wurde die Funktion zur Vorhersage unkrautbedingter Ertragsverluste bei ökonomischen Überlegungen zur Unkrautbekämpfung herangezogen (KIM et al. 2002; CHRISTENSEN et al., 2003).

In Deutschland wurden intensive Arbeiten zu unkrautbedingten Ertragsverlusten in Getreide von THOLE (1992), PALLUTT und RÖDER (1992) und FLATTER (1999) durchgeführt. Alle genannten Arbeiten kommen zu dem Schluss, dass lineare Unkraut-Verlust-Beziehungen innerhalb der relevanten Dichtebereiche ausreichend genau sind und die Verwendung der hyperbolischen Funktion im Allgemeinen keine Verbesserung erbringt (siehe auch GEROWITT, 2002). Additive Konkurrenzeffekte durch Unkräuter wurden auch durch KEES (1975, S. 38), WILSON (1986) und HÅKANSON (1986) bestätigt. KÖTTER (1991) konnte für *Alopecurus myosuroides* in Dichtebereichen von 200 – 900 Pflanzen/m² lineare Konkurrenzeffekte nachweisen. Beispielhaft sind in Abbildung 15 empirischen Ergebnisse von THOLE (1992) dargestellt. Die Ertragsniveaus waren in den beiden Versuchsjahren 1987 (53,3 dt/ha) und 1989 (88,4 dt/ha) sehr unterschiedlich. Trotzdem verlaufen die Ausgleichsgeraden in Abbildung 15 mehr oder weniger parallel. Der Konkurrenzindex (Steigung) betrug 1987 4 (kg/ha)/(Unkraut/m²) und 1989 6 (kg/ha)/(Unkraut/m²) und im Durchschnitt über beide Versuchsjahre 5,4 (kg/ha)/(Unkraut/m²).

Abbildung 15: Beziehung zwischen absolutem Wintergerstenertrag [dt/ha] und der Dichte von *Viola arvensis*



Quelle: THOLE, 1992, S. 36

Für alle von THOLE (1992) untersuchten Unkräuter konnten durch die Versuchsmittelwerte Ausgleichsgraden mit hohen R^2 gelegt werden. Dennoch war es zum Teil auf Grund anderer Variabilitätsfaktoren nicht immer möglich, die jeweils erzielten Erträge bei unterschiedlichen Unkrautdichten signifikant voneinander abzugrenzen. Diese fehlende Signifikanz bedeutet jedoch nicht, dass bei geringen Unkrautdichten von einer Nullkonkurrenz ausgegangen werden kann, wie es KOCH und WALTER (1983) tun, indem sie einen sigmoiden Konkurrenzverlauf annehmen. Die Autoren gehen davon aus, dass bis zu einer bestimmten Dichtegrenze keine Konkurrenz zur Kultur besteht. FLATTER (1999, S. 74) geht im Gegenteil davon aus, dass auch geringe Pflanzendichten von Unkräutern keine Nullkonkurrenz verursachen, da der Getreidebestand bereits so dicht ist, dass unabhängig von der Unkrautdichte eine Situation mit erhöhter Konkurrenz vorliegt. Weiter hinzukommende Unkrautpflanzen verschärfen diese Konkurrenzsituation.

Ein genereller Zusammenhang zwischen dem Ertragsniveau und den Konkurrenzwirkungen konnte nicht festgestellt werden (THOLE und HEITEFUSS, 1992, S. 146), so dass absolute Konkurrenzindizes relativen vorzuziehen sind. PALLUTT (2000, S. 273) fand sogar gegenteilige Zusammenhänge, wonach Bestände mit hohem Ertragsniveau eine stärkere Konkurrenzkraft aufwiesen als jene mit niedrigerem.

5.2.2 Quantifizierung der Ertragsminderungen durch Unkräuter

Zur Quantifizierung der spezifischen Konkurrenzeffekte der wichtigsten Unkräuter werteten PALLUTT und FLATTER (1998) 198 Unkrautkonkurrenzversuche aus, die von 1975 bis 1995 in Ostdeutschland durchgeführt wurden. Die Ergebnisse dieser Studie sind in Tabelle 9 wiedergegeben. Die Autoren gehen dabei davon aus, dass bis zu einer Unkrautdicke von ≤ 80 Pflanzen/m² eine proportionale (lineare) Unkrautverlustbeziehung vorliegt. Oberhalb einer Unkrautdicke von 80 Pflanzen/m² werden durch Korrekturfaktoren die Konkurrenzindizes vermindert, um intraspezifische Konkurrenzeffekte innerhalb der Unkrautpopulation zu berücksichtigen.

Die Konkurrenzeffekte hängen nicht nur von der spezifischen Unkrautdicke ab, sondern werden in hohem Maße auch durch die Bodenart, die Güte des Getreidebestandes und die Witterung beeinflusst (PALLUTT, 2000, S. 269). Der Witterung kommt in diesem Zusammenhang der größte Einfluss zu. PALLUTT und FLATTER (1998, S. 337) geben als Größenordnung an, dass unter ungünstigen Witterungsverhältnissen die Ertragsverluste 4 mal höher sein können als bei günstiger Witterung. In Einzelfällen kann die Variation jedoch noch bedeutend größer sein. So verursachte 1990 (trockener Vorsommer) Klettenlabkraut Ertragsverluste von 2,9 kg/ha je Pflanze/m². Im Vergleich dazu waren es 1988 bei feuchten Bedingungen 23,1 kg/ha pro Unkrautpflanze. Aufgrund der großen möglichen Variabilitäten kommt deshalb MÜLLVERSTEDT (1975, S. 33) zu dem Schluss, „dass aus der Zahl aufgelaufener *Galium*-Pflanzen nicht auf eine bestimmte Ertragsbeeinflussung geschlossen werden kann.“ Auch PALLUTT und FLATTER (1998, S. 341) äußern Bedenken, wenn es um die Prognose unkrautbedingter Ertragsverluste im Einzelfall geht. Im Mittel über mehrer Jahre liefern die Konkurrenzindizes nach Ansicht der Autoren jedoch brauchbare Anhaltswerte.

Tabelle 9: Kornertragsverluste in kg/ha je Unkrautpflanze/m² nach PALLUTT und FLATTER

Unkrautart (wissenschaftlich)	deutsch	Winterweizen	Wintergerste
<i>Alopecurus myosurides</i>	Ackerfuchsschwanz	3 - 6	3 - 6
<i>Apera spica-venti</i>	Windhalm	4 - 8	4 - 8
<i>Capsella bursa-pastoris</i> , <i>Thlaspi arvensis</i>	Hirtentäschel und Ackerhellerkraut	2 - 4	2 - 4
<i>Chenopodium album</i>	Gänsefuß	2 - 4	-
<i>Galeopsis tetrahit</i>	Hohlzahn	10 - 12	10 - 20
<i>Galium aparine</i>	Klettenlabkraut	10 - 30	10 - 30
<i>Lamium spp.</i>	Taubnessel	1 - 2	2 - 3
<i>Matricaria spp.</i>	Kamille	4 - 12	4 - 12
<i>Myosotis arvensis</i>	Acker-Vergissmeinnicht	2 - 4	2 - 4
<i>Polygonum spp.</i>	Knöterich	3 - 6	3 - 6
<i>Sinapis arvensis</i> , <i>Raphanus raphanistrum</i>	Ackersenf, -rettich	2 - 4	-
<i>Stellaria media</i>	Vogelmiere	4 - 8	6 - 8
<i>Veronica spp.</i>	Ehrenpreis	1 - 4	1 - 3
<i>Viola arvensis</i>	Ackerstiefmütterchen	2 - 3	2 - 3

Quelle: PALLUTT und FLATTER, 1998, S. 335

In Tabelle 10 sind die empirischen Ergebnisse von THOLE (1992) dargestellt. In ihrer Größenordnung stimmen die Werte relativ gut überein mit denen von PALLUTT und FLATTER. Es wird jedoch auch deutlich, dass der Genauigkeit von Konkurrenzprognosen Grenzen gesetzt sind und es deshalb nicht möglich ist, die Konkurrenzindizes auf eine Zahl zu reduzieren, sondern dass nur Intervalle angegeben werden können, die mit hoher Wahrscheinlichkeit den wahren Wert enthalten.

Tabelle 10: Kornertragsverluste in kg/ha je Unkrautpflanze/m² nach THOLE

Unkrautart (wissenschaftlich)	deutsch	Winterweizen	Wintergerste
<i>Matricaria chamomilla</i>	Echte Kamille	6,5	1,8
<i>Viola arvensis</i>	Ackerstiefmütterchen	5,4	1,9
<i>Lamium purpureum</i>	Taubnessel	6,2	7,5
<i>Veronica hederifolia</i>	Efeublättriger Ehrenpreis	–	8

Quelle: THOLE, 1992

Zur Beurteilung der Prognosegüte bzw. zur Abschätzung eines Vertrauensbereiches werden die Versuchsergebnisse von FLATTER weiter analysiert (siehe Tabelle 11). FLATTER (1998, S. 55) wies mit Hilfe des χ^2 -Tests, für die Versuchsstandorte Glaubitz und Kötschau nach, dass die Prognosefehler einer Normalverteilung folgten. Für die anderen Standorte wurde dieser Test nicht durchgeführt.

Tabelle 11: Tatsächliche und prognostizierte Ertragsverluste; Mittelwert, Standardabweichung (s) und Variationskoeffizient des Prognosefehlers

Kornertrag	Ertrag behandelt [dt/ha]	Ertrag unbehandelt [dt/ha]	Ertragsverlust [dt/ha]	Prognose [dt/ha]	mittlerer Prognosefehler [dt/ha]	s des Prognosefehlers [dt/ha]	Variationskoeffizient
Glaubitz_1	65,66	62,12	3,54	4,34	0,8	3,77	471%
Glaubitz_2	53,17	42,18	10,99	5,3	-5,69	7,35	129%
Güterfelde_1	77,54	71,47	6,07	4,38	-1,69	1,49	88%
Güterfelde_2	66,84	59,47	7,37	5,48	-1,89	3,63	192%
Güterfelde_3	67,78	58,27	9,51	4,4	-5,11	3,13	61%
Fläming	72,35	69,31	3,04	3,95	0,91	7,49	823%
Kötschau_1	62,89	57,49	5,4	6,01	0,61	5,27	864%
Kötschau_2	64,33	60,09	4,24	4,46	0,22	3,07	1395%
Schafstädt	69,87	60,77	9,1	12,47	3,37	9,26	275%
Börde	72,51	72,91	-0,4	1,69	2,09	4,69	224%
Mittelwert	67,3	61,4	5,9	5,2	-0,6	4,9	452%

Quelle: zusammengestellt aus FLATTER, 1998, Tabellen A 8 – A 12, A15

Anhand der Variationskoeffizienten ist es möglich, ein ungefähres Maß für die Kalkulation eines Vertrauensintervalls für die Konkurrenzprognose abzuschätzen. Der mittlere Variationskoeffizient über alle Versuche (siehe Tabelle 11) beträgt 452%. Geht man davon aus, dass in allen Versuchen die Prognosefehler einer Normalverteilung folgen, so errechnet sich ein Vertrauensintervall mit einer Wahrscheinlichkeit von ca. 68 % ($\pm$ einfache Standardabweichung) bei einem Variationskoeffizienten von 450 %, indem die Verlustprognose um das 4,5-fache nach oben und unten korrigiert wird. Der gemittelte Konkurrenzindex aller in Tabelle 9 und 10 aufgeführten dikotylen Unkräuter (ohne *Galium aparine*) beträgt im Weizen 4,5 kg/ha je Unkrautpflanze/m². Das entsprechende Vertrauensintervall (p=68%) bewegt sich deshalb zwischen -16 und +25 kg/ha. Negative Konkurrenzindizes bedeuten theoretisch eine Ertragssteigerung durch Unkräuter. Sie ergeben sich durch die große Variation in den Ergebnissen (Variationskoeffizient >100%), die durch andere Faktoren, wie Witterung, Herbizidstress etc. verursacht worden sind. Da davon ausgegangen werden kann, dass Unkräuter nicht die Ursache für Ertragserhöhungen sind – obwohl dies in Einzelfällen durch z. B. verminderte Erosion denkbar ist –, werden negative Konkurrenzindizes im folgenden durch 0-Werte ersetzt. Auch bei den so errechneten maximalen Konkurrenzeffekten sind Effekte enthalten, die nicht allein auf die Unkrautdichten zurückgeführt werden können. Dennoch werden diese Werte bei den Berechnungen verwendet, da im Weiteren gezeigt werden kann, dass die Verlustindizes in Einzelfällen durchaus in dieser Größenordnung schwanken können. In Tabelle 12 sind die entsprechenden Vertrauensintervalle für die zusammengefasste Klasse der dikotylen Unkräuter inkl. *Polygonum aviculare*, der Gräser und für „Problemunkraut“ *Galium aparine* wiedergegeben.

Tabelle 12: Schwankungsbreiten der Konkurrenzindizes, Angaben in kg/ha je Unkrautpflanze/m²

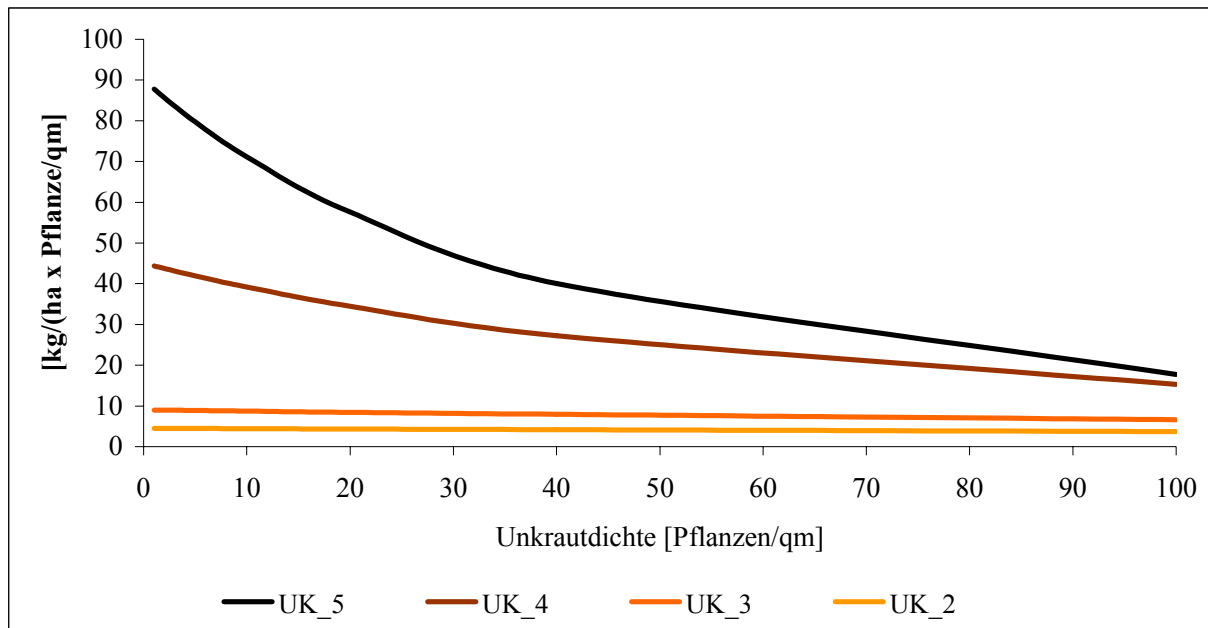
	Winterweizen		
	untere Grenze	Erwartungswert	obere Grenze
DIKOTS + POLAV	0	4,5	25
MOKOTS	0	5,3	29
GALAP	0	20,0	110

Quelle: eigene Berechnungen (siehe Text)

Die Konkurrenzindizes können demnach nur relativ unscharf bestimmt werden. Vor allem bei *Galium aparine* fällt die große Spanne von 0 – 110 kg/ha je Unkrautpflanze/m² auf. Diese Werte sind jedoch nicht unrealistisch, denn die Entwicklung von Klettenlabkraut hängt besonders stark von der Witterung ab, so dass Schadprognosen nur sehr schwierig möglich sind (AMMON, 2002, S. 242). Die Plastizität der Konkurrenzeffekte durch Unkräuter wird auch durch die Angaben von WILSON (1985, nach FLATTER, 1999, S. 83) bestätigt, der Konkurrenzindizes für GALAP zwischen 3,3 und 200 kg/ha je Pflanze/m² angibt. Auf Grund der hohen Variabilität kommen WILSON und WRIGHT (1987) zu dem Schluss, dass das Prinzip der Schadschwelle für *Galium aparine* nicht anwendbar sei.

WAHMHOF und HEITEFUSS (1984) ermittelten von 1979 – 1982 in 39 Versuchen in Wintergerste bei einer durchschnittlich tolerierten Unkrautdicke von 31 Ungräsern und 85 Unkräutern (Dikotyledonen) pro m² Ertragseinbußen von 3,7 dt/ha. Eine Prognose der Kornertragsverluste mit Hilfe der mittleren Konkurrenzindizes der Tabelle 12 ($31 \times 5,3 + 85 \times 4,5 = 5,5 \text{ dt/ha}$) ergibt eine leichte Überschätzung der tatsächlich eingetretenen Verluste. Der Fehler liegt aber klar innerhalb der Fehlertoleranz.

CHRISTENSEN et al. (2003, S. 279) benutzen in ihren Modellüberlegungen einen hyperbolischen Zusammenhang – ähnlich der Modellgleichung von COUSENS (siehe Abschnitt 5.2.1) – zwischen der Unkrautdicke und der prozentualen Ertragsreduktion. Zur Parametrisierung der Modellgleichung teilten sie die Unkrautpopulation in 5 Klassen mit jeweils unterschiedlichem Konkurrenzpotenzial ein. Für eine unkrautfreies Ertragspotenzial von 90 dt/ha sind in Abbildung 16 die Grenzertragsverluste der Unkrautklassen 2 (*Viola arvensis*), 3 (*Capsella bursa-pastoris*, *Lamium purpureum*, *Polygonum spp.*, *Veronica spp.*), 4 (*Chenopodium album*, *Stellaria media*) und 5 (*Galium aparine*) in Abhängigkeit von der Unkrautdicke dargestellt.

Abbildung 16: Grenzertragsverluste unterschiedlich konkurrenzstarker Unkräuter

Quelle: eigene Darstellung verändert nach CHRISTENSEN et al. 2003

Der Vergleich zwischen den in Tabelle 12 ermittelten Werten mit denen der Abbildung 16 zeigt zum einen eine tendenzielle Übereinstimmung der Prognosewerte und rechtfertigt zum anderen die in Tabelle 12 angegebenen weiten Schwankungsbereiche der Konkurrenzindizes. Auf der anderen Seite belegt beispielsweise die Auswertung von 109 Herbizidversuche der Landwirtschaftskammer Westfalen-Lippe über 6 Jahre mit Hilfe multipler Regression noch einmal die Schwierigkeit, anhand eines bestimmten Unkrautbesatzes auf die zu erwartenden Ertragsverluste zu schließen (HEYLAND et al., 1986, S. 295). Denn die ermittelten Ertragsdifferenzen zwischen unbehandelt und behandelt wurden zunächst durch Faktoren bedingt, welche nicht direkt mit dem Unkrautbesatz und dessen Bekämpfung im Zusammenhang standen. Den wichtigsten Einfluss hatte die Sorte, gefolgt vom Bekämpfungstermin.

KAISER (1989, S. 40) stellte in ihren Versuchen fest, dass hohe Unkrautdeckungsgrade im Frühjahr mit hohen Kulturdeckungsgraden korrelierten. Sie schlussfolgerte daraus, dass Kultur und Unkraut gleichermaßen von günstigen und ungünstigen Entwicklungsbedingungen beeinflusst werden und es bis zum Frühjahr zu keiner erkennbaren Ertragskonkurrenz kommt. Im Modell wird deshalb vereinfachend davon ausgegangen, dass Konkurrenzeffekte erst im Frühjahr und Sommer auftreten.

5.2.3 Empirische Untersuchungen zu Qualitätsminderungen durch Unkräuter

Im Vergleich zur Bestimmung der Konkurrenzeffekte in Abhängigkeit von der tolerierten Verunkrautung ist es deutlich schwieriger, potenzielle Qualitätsbeeinflussungen (Fremdbesatz, erhöhter Wassergehalt etc.) des Getreides durch Unkräuter zu quantifizieren. BLUMENBERG (1987, S. 77) ermittelte in seinen Versuchen zwar regelmäßig signifikant erhöhte Verunreinigungen des Erntegutes um den Faktor 2 – 3 in den Schadschwellenvarianten gegenüber den konventionellen Bekämpfungsvarianten, berücksichtigte die hieraus unter Umständen entstehenden zusätzlichen Reinigungskosten des Getreides in den ökonomischen Berechnungen jedoch nicht. In der Arbeit von KAISER (1989), die primär zur Untersuchung der Populationsdynamik von Unkräutern unter Feldbedingungen durchgeführt wurden, wurden neben den Erträgen auch die Feuchtigkeitsgehalte und die Schwarzbesätze (Unkrautsamen und andere Verunreinigungen, wie Spelzen oder Mutterkorn) in Abhängigkeit von der Unkrautbekämpfung gemessen. Die Ergebnisse werden hier aufgegriffen, um die genannten Effekte zumindest in ihrer Größenordnung erfassen zu können.

Wintergerste

Die von KAISER (1989) ermittelten Wintergerstenerträge, Feuchtigkeitsgehalte und Schwarzbesätze der Kontrollparzellen, die nicht mit Herbiziden behandelt wurden, und der Parzellen, die eine ortsübliche Unkrautbekämpfung erfahren haben (siehe Tabelle 13), wurden mit Hilfe eines t-Tests (einseitig) für verbundene Stichproben (Differenzenvergleich innerhalb eines Jahres) untersucht. Alle Ernteparameter weichen für Wintergerste bei einseitigem Test auf dem 5%-Niveau signifikant voneinander ab, wobei die Erträge mit einer Wahrscheinlichkeit von $P=3,9\%$, die Feuchtigkeitsgehalte mit $P=2,9\%$ und der Schwarzbesatz mit $P=1,3\%$ voneinander abgegrenzt werden können.

Tabelle 13: Ernteparameter (Mittelwerte) von Wintergerste 1985 – 1987

Jahr	Erträge [dt/ha]		Feuchtigkeitgeh. [%]		Schwarzbesatz [%]	
	<i>Kontrolle</i> [*]	<i>Maximal</i> ^{**}	<i>Kontrolle</i> [*]	<i>Maximal</i> ^{**}	<i>Kontrolle</i> [*]	<i>Maximal</i> ^{**}
1985	31,7	34,75	16,95	13,35	4	1,4
1986	46,55	47,5	17	15,8	1,05	0,3
1987	38,2	40,3	22,6	19,35	10,8	0,55

^{*} ohne Herbizidbehandlung; ^{**} ortsübliche Unkrautbekämpfung

Quelle: KAISER, 1989, S. 43

Die mittleren Unkrautdichten der Kontrollparzellen sind in Tabelle 14 wiedergegeben. Sie liegen für die dikotylen Unkräuter und *Apera spica venti* in etwa auf dem Niveau der von den Pflanzenschutzämtern empfohlenen Schadschwellen (Gräser: 15 – 25, *Apera spica-venti*: 10 – 20, dikotyle Unkräuter: 40 – 60 Pflanzen/m²). Für *Galium aparine* wird im Allgemeinen eine Schadschwelle von 0,1 – 0,5 Pflanzen/m² empfohlen, so dass die Klettenlabkrautdichte in den Parzellen weit über dieser Schadschwelle liegt. Ein direkter und eindeutiger Zusammenhang zwischen der Unkrautdichte und den Ernteparametern der Gerste ist nicht zu erkennen. Lediglich im Jahr 1987 führte die sehr hohe GALAP-Dichte zu den höchsten Schwarzbesätzen.

Tabelle 14: Mittlere Unkrautdichten der Kontrollparzellen in Wintergerste

	Dikots	GALAP	APESV
1985	31,75	3,1	33,4
1986	45,85	3,85	21,75
1987	62	13,45	33,25

Quelle: KAISER, 1989, S. 47 ff.

Winterweizen (WW)

Die Analyse der Winterweizenergebnisse von KAISER (1989) führte zwischen den Behandlungsvarianten zu keinen signifikanten Differenzen (5%-Niveau) in den Ernteparametern. Im Jahr 1986 ist der Schwarzbesatz trotz höchster GALAP-Dichte in der nicht behandelten Kontrollparzelle sogar niedriger als in der behandelten Variante. Und auch

die Feuchtigkeitsgehalte waren in zwei Jahren in der Kontrolle niedriger als in der behandelten Variante.

In den ersten beiden Versuchsjahren konnten die WW-Erträge durch eine Herbizidbehandlung relativ deutlich angehoben werden (Ertragsdifferenz 1985: +5,8 dt/ha; 1986: +6,7 dt/ha). Da die Erträge im Jahr 1987 (Ertragsdifferenz: -0,2 dt/ha) jedoch unabhängig vom Herbizideinsatz waren, können die Ertragseffekte nicht signifikant nachgewiesen werden ($P=9,9\%$). Da der fehlende Ertragseffekt der Herbizidmaßnahme im Jahr 1987 auf die niedrigen Ausgangsunkrautdichten zurückgeführt werden kann, wird trotz fehlender Signifikanzen dennoch, wie erwartet, eine Abhängigkeit zwischen dem Ernteertrag und der Unkrautdichte durch die Versuchsergebnisse bestätigt.

Tabelle 15: Ernteparameter von Winterweizen 1985 – 1987

Jahr	Erträge [dt/ha]		Feuchtigkeitsgeh. [%]		Schwarzbesatz [%]	
	<i>Kontrolle*</i>	<i>Maximal**</i>	<i>Kontrolle*</i>	<i>Maximal**</i>	<i>Kontrolle*</i>	<i>Maximal**</i>
1985	58,75	64,6	23,5	20,5	0,45	0,35
1986	57,75	64,4	19,75	20,15	0,3	0,95
1987	61,2	61,0	15,85	16,05	0,55	0,3

Kontrolle* : ohne Herbizidbehandlung; Maximal** : ortsübliche Unkrautbekämpfung

Quelle: KAISER, 1989, S. 44

Tabelle 16: Mittlere Unkrautdichten der Kontrollparzellen in Winterweizen

	Dikots	GALAP	APESV
1985	63,55	2,7	44
1986	17,3	3,95	14,2
1987	8,3	0,75	7

Quelle: KAISER, 1989, S. 47 ff.

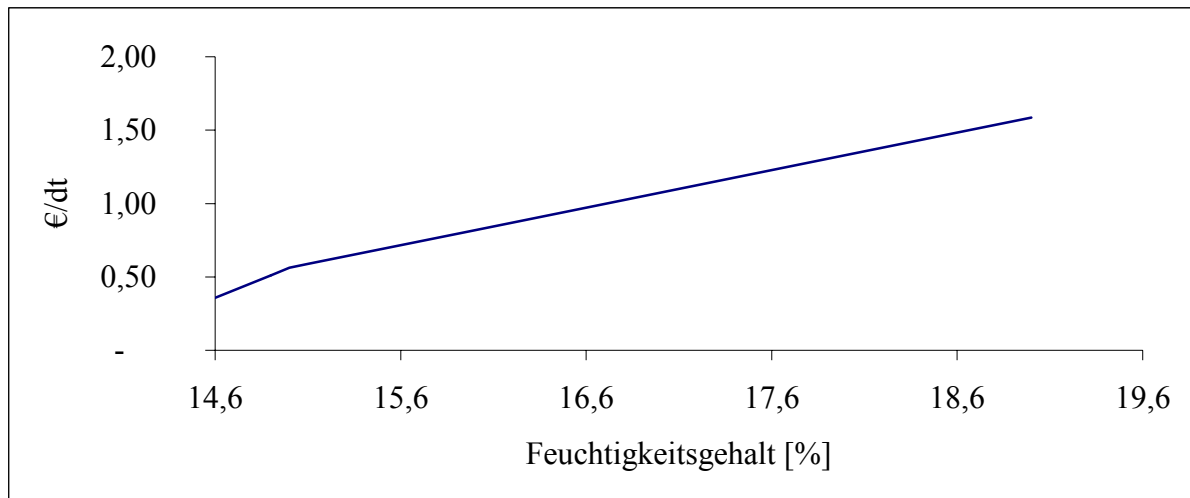
Durch das obige Beispiel wird deutlich, dass von einer tolerierten Restverunkrautung neben verminderten Erträgen potenziell ein Risiko für erhöhte Feuchtigkeitsgehalte und Fremdbesätze ausgeht. Diese Zusammenhänge sind jedoch nicht monokausal, sondern werden durch eine Reihe weiterer Faktoren beeinflusst, so dass ein Rückschluss von der

Unkrautdichte allein auf die zu erwartenden Feuchtigkeitsgehalte und Fremdbesätze nicht möglich ist. Nach KAISER (1989, S. 170) sind die Effekte von *Galium aparine* auf Kornfeuchte und Schwarzbesatz weniger von der Unkrautdichte als vielmehr vom Witterungsgeschehen abhängig (vergleiche auch MÜLLVERSTEDT, 1975, S. 33).

Eine Beeinflussung des Schwarzbesatzes in Wintergerste durch die Restverunkrautung – vor allem durch Klettenlabkraut – wurde auch von WAHMHOF und HEITEFUSS (1984, S. 141) untersucht. Bei Unkrautdichten unterhalb der Schadensschwelle wurden die Schwarzbesätze durch eine Herbizidmaßnahme in 2 von 3 Versuchsjahren signifikant um 0,5 bzw. 1,3 %-Punkte reduziert. Bei Unkrautdichten oberhalb der Schadschwelle war sogar in jedem Jahr eine Reduktion des Schwarzbesatzes durch eine Herbizidmaßnahme um 1,19 %-Punkte möglich. Die Autoren (ebenda, S. 140) stellten bei geringen Unkrautdichten (unterhalb der Schadschwelle) in Wintergerste eine durchschnittliche Feuchtigkeitserhöhung um 0,35 %-Punkte ohne Herbizidbehandlung fest. Bei höheren Unkrautdichten (oberhalb der Schadschwelle) wurde durch die Herbizidanwendung die Restfeuchte um 1,4 %-Punkte vermindert.

5.2.4 Trocknungskosten

Die Restfeuchte des Getreides kann bei unterlassener Herbizidanwendung durch die tolerierten Unkräuter erhöht sein. Der Zusammenhang zwischen den im Frühjahr tolerierten Unkräutern und dem Feuchtigkeitsgehalt bzw. den Trocknungskosten ist jedoch nicht sehr eng, da andere Parameter, wie beispielsweise die Witterung während der verbleibenden Vegetationsperiode bis zur Ernte einen ebenfalls wichtigen – möglicherweise sogar wichtigeren – Einfluss auf die Restfeuchte ausüben (s. o.). Von Abnehmer zu Abnehmer werden für Getreide unterschiedlich hohe Trocknungskosten berechnet. Nach MENNERICH (2001, S. 104) stellen die Kostensätze des niedersächsischen Getreidehandels eine gute Richtlinie dar (siehe Abbildung 17).

Abbildung 17: Trocknungskosten nach Landwirtschaftskammer Hannover

Quelle: MENNERICH, 2001, S. 104

Über einem Feuchtigkeitsgehalt von 14,5% fallen Fixkosten für die Trocknung von 0,31 €-Cent je dt Getreide an. Zwischen 14,6% und 15% steigen die Kosten pro 0,1%-Punkt um 5,1 €-Cent/dt an. Ab 15% Restfeuchte hat die Kostengerade eine Steigung von 2,6 €-Cent/dt je 0,1%-Punkt Feuchte (ebenda, 2001, S. 104).

In Tabelle 17 sind der Heizöl- und der Strombedarf zur Trocknung von Getreide nach Angaben des KTBL (2000, S. 141) wiedergegeben. Mit den aktuellen Energiepreisen multipliziert ergeben sich nach diesen Angaben deutlich höhere Trocknungskosten als nach den Angaben von MENNERICH. Da die Angaben von MENNERICH auf tatsächlich vom Getreidehandel erhobenen Preisen beruhen, werden für die folgenden Überschlagsrechnungen diese Werte verwendet, obwohl die Energiepreise von 2001 gestiegen sind und somit die Angaben von MENNERICH tendenziell zu niedrig sind.

Tabelle 17: Trocknungskosten bezogen auf 1 dt Getreide mit 14% Restfeuchte

Ausgangsfeuchte	%	14	16	18	20
Heizölbedarf	l/dt	0	3	6	9
Strombedarf	kWh/dt	0	2	5	8
Kosten	€/dt	–	1,50	3,15	4,80

Quelle: verändert nach KTBL, 2000, S. 141, Strompreis: 15 €-Cent/kWh, Heizölpreis: 40 €-Cent/l

Für den Gerstenversuch von KAISER (s. o.) ergeben sich im Mittel für die Kontrollparzellen Trocknungskosten von 1,55 €/dt und in den gespritzten Parzellen von 0,81 €/dt. Multipliziert man die Trocknungskostendifferenz von 0,73 €/dt mit dem während des Versuches realisierten (relativ niedrigen) Ertragsniveau von 40 dt/ha, so konnten durch die Herbizidmaßnahme Trocknungskosten in Höhe von 29 €/ha eingespart werden. In Winterweizen beträgt die Trocknungskostendifferenz nur 0,2 €/dt (Kontrolle: 1,76 €/dt; Herbizidvariante: 1,56 €/ha), so dass bei einem durchschnittlichen Ertrag von 61 dt/ha 13 €/ha an zusätzlichen Trocknungskosten in der nicht „gespritzten“ Variante angefallen sind.

Die mögliche Trocknungskostendifferenz kann im Einzelfall bedeutend sein und mögliche Einsparungen bei den Herbiziden überkompensieren. Betrachtet man den Fall, dass ohne chemische Unkrautbekämpfung der Feuchtigkeitsgehalt um 1 bis 2%-Punkte erhöht sein kann, so resultieren hieraus bei einem Ertragsniveau von 80 bis 100 dt/ha zusätzliche Trocknungskosten in Höhe von 20 – 51 €/ha.

5.2.5 Fremdbesatz

Bis zu einem Schwarzbesatz von 2% (manche Abnehmer akzeptieren auch 3%) werden in der Regel keine Reinigungskosten in Rechnung gestellt. Die tatsächlichen Reinigungskosten können von Abnehmer zu Abnehmer variieren, so dass für eine grobe Einschätzung hier beispielhaft die Getreideannahme der Raiffeisen Zentralgenossenschaft Stockach wiedergegeben wird. Nach Angaben von ZIEGLER (2004, o. S.) kommt es nur sehr selten vor, dass das Getreide bei der Anlieferung an die Genossenschaft stärker verunreinigt ist. Als Richtwert für die Getreidereinigung sind die Preise für die Lohnreinigung geeignet. Die Kosten für die Annahme und Wiederausgabe des Getreides kosten je 40 €-Cent/dt und für die Reinigung werden 30 €-Cent/dt in Rechnung gestellt, so dass unabhängig vom tatsächlichen Fremdbesatz 1,10 €/dt an Reinigungskosten anfallen. Bei einem Ertragsniveau von 80 bis 95 dt/ha können bei erhöhtem Fremdbesatz also Mehrkosten in Höhe von 88 bis 105 €/ha entstehen, wenn durch den Verzicht auf eine Unkrautbekämpfungsmaßnahme der Fremdbesatz über 2% bzw. 3% liegt. Geringfügig erhöhte Fremdbesätze – solange der gesamte Fremdbesatz unter 2% bleibt – sind in der Regel bei der Erzeugung von Konsum- bzw. Futtergetreide ohne praktische Bedeutung. Bei der Saatguterzeugung und hier insbesondere beim Anbau von Z-Saatgut müssen die Fremdbesätze auf das technisch geringst

mögliche Maß reduziert werden, so dass hier ein verminderter Herbizideinsatz und damit auch Teilflächenunkrautbekämpfung als problematisch angesehen werden müssen.

5.2.6 Erntebehinderung

Die Datenbasis zur Beurteilung von Erntebehinderungen durch Unkräuter ist ebenfalls sehr gering (RODER, 1989, S. 29). Arten, die besonders zu einer Beeinträchtigung des Ernteprozesses führen können, sind: *Agropyron repens*, *Alopecurus myosuroides*, *Apera spica-venti*, *Matricaria* spp. *Viola arvensis*, *Stellaria media*, *Fallopia convolvulus*, *Cirsium arvense*, *Galium aparine* und *Chenopodium album* (ebenda, S. 28). Ernteerschwernisse sind insbesondere dann gravierend, wenn das Getreide lagert (WAHMHOF und HEITEFUSS, 1984, S. 142).

Die meisten Untersuchungen zu Erntebehinderungen wurden mit Klettenlabkraut durchgeführt. Die Ergebnisse sind – genau wie bei den durch Klette bedingten Ertragsverlusten – durch eine hohe Variabilität gekennzeichnet. In trockenen Jahren stirbt die Klettenlabkraut früh ab und verursacht keine Ernteerschwernisse, wohingegen in nassen Jahren massive Erntebehinderungen auftreten können (AMMON, 2002, S. 242). Nach KOCH und HURLE (1978) kann sich die Druschleistung bei üppigen Klettenlabkrautbeständen um die Hälfte verringern. Nach WAHMHOF und HEITEFUSS (1984, S. 142) reichen bereits 7 bis 9 *Galium aparine*-Pflanzen/m² aus, um die Ernte fast unmöglich zu machen. MÜLLER (1981) nennt sogar um 5% verminderte Druschleistungen bei *Galium aparine* Dichten von 0,2 Pflanzen/m². Sehr viel höhere tolerierbare *Galium*-Dichten ermittelte hingegen SIEBERHEIN (1979) während des Beurteilungszeitraumes 1974 – 1978, wo es erst ab einer Klettenlabkrautdicke von über 40 Pflanzen/m² zu einer deutlich verminderten Mähdruschleistung kam.

Das Ausmaß der Ernteerschwernis hängt auch von der Getreideart ab. Aufgrund der späten Ernte des Weizens – viele Unkräuter sind bereits abgestorben – sind die Erntehinderungen in Winterweizen häufig deutlich geringer ausgeprägt als in Wintergerste (RODER, 1989, S. 29). Geringe Unkrautdichten im Bereich der Schadensschwellen führen – von selteneren Ausnahmen abgesehen – nach Ansicht von WAHMHOF und HEITEFUSS (1984, S. 142) zu keinen nennenswerten Erntebehinderungen. Bleiben höhere Unkrautdichten durch zu hoch gewählte Bekämpfungsschwellen oder durch Fehler bei der Teilflächenunkrautbekämpfung

unbehandelt, so kann dies jedoch zu rasch steigenden Erntekosten führen (ebenda, S. 144; DREYER, 2002. o. S.). Geht man davon aus, dass Teilflächenunkrautbekämpfung ausreichend exakt durchgeführt wird, also Teilflächen mit hohen Unkrautdichten entsprechend behandelt werden, so stellt die Nichtberücksichtigung von Ernteschwernissen bei der Modellkonstruktion keine grobe Vereinfachung dar.

5.2.7 Zwischenfazit zu negativen Effekten durch Unkräuter

Zur Berechnung der negativen Ertragseffekte (R) durch Unkräuter wurden dichteunabhängige Konkurrenzindizes (K_Index) gewählt, da bei niedrigen Unkrautdichten lineare Modelle den Zusammenhang zwischen Unkrautdichte (A_i) und Unkrautkonkurrenz gut beschreiben. Durch eine Erhöhung dieser Konkurrenzindizes ist es theoretisch möglich, weitere negative Effekte durch Unkräuter wie Erntehinderungen und Qualitätsbeeinträchtigungen indirekt zu berücksichtigen. Da hierfür jedoch die Datenbasis fehlt, wird diese Anpassung der Konkurrenzindizes nicht durchgeführt. Diese Vereinfachung ist jedoch nur dann zulässig, wenn von einer hohen Präzision bei der Teilflächenunkrautbekämpfung – Teilflächen mit erhöhten Unkrautbesätzen werden richtig erfasst und richtig mit Herbiziden behandelt – ausgegangen wird. Denn bei fehlender Präzision können die Einsparungen beim Herbizidaufwand durch Mehrkosten durch einen erhöhten Feuchtigkeitsgehalt, einen erhöhten Fremdbesatz und mögliche Erntehinderungen deutlich überkompensiert werden.

Mit Hilfe von Modellkalkulationen soll auch untersucht werden, wie sich eine Verminderung der Präzision der Teilflächenapplikation auf die ökonomischen Ergebnisse auswirkt. Auch in diesen Kalkulationen werden nur die Konkurrenzeffekte berücksichtigt. Diese Vereinfachung führt dazu, dass Fehler bei der Teilflächenunkrautbekämpfung, hervorgerufen durch zu grob aufgelöste Unkrautkarten oder durch eine Vergrößerung der einheitlich behandelten/ nicht behandelten Teilflächen, tendenziell in ihren ökonomischen Auswirkungen unterschätzt werden. Da die Datengrundlagen für eine Erweiterung des Modells um potenzielle Erntehinderungen, Feuchtigkeitserhöhungen etc. jedoch nicht ausreichend bzw. zu heterogen sind, wurde von der grundsätzlichen Einbeziehung dieser Effekte abgesehen.

5.3 Monte-Carlo-Simulation; Wahrscheinlichkeiten, Korrelationen

Bei der Definition der Modellvariablen wurden bei der Auflaufwahrscheinlichkeit, der Überlebenswahrscheinlichkeit der Keimpflanzen, der Samenbildung, den Konkurrenzeffekten und den Wirkungsgraden der Herbizide neben Standardwerten auch Minimal- und Maximalwerte angegeben. In den Modellkalkulationen werden in vielen Wiederholungen von Rechendurchläufen entsprechend einer Dreiecksverteilung den Variablen zufällig Werte zugewiesen, wobei mit einer Wahrscheinlichkeit von 50% der Standardwert und mit jeweils 25%-iger Wahrscheinlichkeit die Extremwerte gewählt werden.

Durch wiederholte Simulationsdurchläufe (Stichproben) ist es möglich, die Verteilung der Modellergebnisse – für die gewählten Schwankungsbereiche der erklärenden Variablen – zu ermitteln und somit Streuungsmaße bzw. ein Maß für das Risiko unterschiedlicher Herbizidstrategien abzuschätzen.

Die einzelnen Modellvariablen sind nicht vollkommen unabhängig voneinander, sondern es existieren wechselseitige Abhängigkeiten (Multikolinearität). Das Ausmaß der Interferenz zweier Variablen kann durch die Korrelationskoeffizienten beschrieben werden. Der Korrelationskoeffizient beschreibt die lineare Abhängigkeit zweier Variablen und kann Werte zwischen -1 und $+1$ annehmen. Bei einem Wert von -1 handelt es sich um eine perfekte negative Assoziation; bei einem Wert von $+1$ um eine perfekte positive Assoziation. Bei einem Korrelationskoeffizienten von 0 sind die Werte unabhängig voneinander (GUJARATI, 1995, S. 767). Aus Vereinfachungsgründen wurden im Modell nur Korrelationskoeffizienten von -1 , 0 und $+1$ gewählt. Diese sind in der folgenden Matrix abgebildet.

Tabelle 18: Matrix der Korrelationskoeffizienten

		Auflauf				Überlebenswahrscheinlichkeit				Samenproduktion				Konkurrenz			
		DIKOTS	MOKOTS	GALAP	POLAV	DIKOTS	MOKOTS	GALAP	POLAV	DIKOTS	MOKOTS	GALAP	POLAV	DIKOTS	MOKOTS	GALAP	POLAV
Auflauf	DIKOTS	1															
	MOKOTS	0	1														
	GALAP	1	0	1													
	POLAV	1	0	1	1												
Überlebenswahrscheinlichkeit	DIKOTS	0	0	0	0	1											
	MOKOTS	0	0	0	0	0	1										
	GALAP	0	0	0	0	1	0	1									
	POLAV	0	0	0	0	1	0	1	1								
Samenproduktion	DIKOTS	0	0	0	0	0	0	0	0	1							
	MOKOTS	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1						
	GALAP	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1					
	POLAV	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	1				
Konkurrenz	DIKOTS	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	1	1			
	MOKOTS	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1		
	GALAP	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	1	1	0	1	
	POLAV	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	1	1	0	1	1

Quelle: Eigene Annahmen

Zwischen der Unkrautsamenproduktion und den Konkurrenzeffekten kann eine starke Abhängigkeit unterstellt werden. Denn zum einen korreliert die Samenproduktion sehr eng mit der gebildeten Unkrauttrockenmasse (MEINLSCHMIDT und KARCH, 1994, S. 379) und zum anderen werden die Konkurrenzeffekte wiederum von der Unkrautentwicklung und somit von der Trockenmasseproduktion der Unkräuter bestimmt (KIM et al. 2002). Im Modell wurde deshalb ein Korrelationskoeffizient von 1 zwischen den Konkurrenzeffekten einer Unkrautart und der Samenproduktion derselben Unkrautart unterstellt. Die Modellparameter der monokotylen Unkräuter wurden aufgrund stärker differierender Wachstumsansprüche als unabhängig von denen der anderen Unkrautklassen definiert. Die Auflaufwahrscheinlichkeit,

die Überlebenswahrscheinlichkeiten, die Konkurrenzparameter und die Samenproduktion der Unkrautklasse der dikotylen Unkräuter, von *Galium aparine* und von *Polygonum aviculare* wurden als vollständig assoziiert angenommen. Die Wirkungsgrade der Herbizide werden unabhängig gewählt. Auch hier gilt für den Standardwert eine Eintrittswahrscheinlichkeit von 50% und für die beiden Extremwerte jeweils eine Eintrittswahrscheinlichkeit von 25%. Die Herbizide IPU+Stomp und Herold werden im Herbst eingesetzt, während Husar, Primus und Duplosan DP+Gropper im Frühjahr angewendet werden. Die Anwendungsbedingungen für Frühjahrs- und Herbstanwendungen werden unabhängig voneinander bestimmt.

5.4 Berechnung von dynamischen Schadschwellen

5.4.1 Deterministisches Modell

In Abschnitt 3.2 wurde kurz darauf eingegangen, wie dynamische Schadschwellen berechnet werden können. Das dort verwendete deterministische Beispiel wird hier noch einmal genauer dargestellt. Schadschwellen, also die Schwellenwerte, die eine Unkrautbekämpfungsmaßnahme auslösen und insgesamt die geringsten Kosten verursachen, können für eine bestimmte Ausgangsverunkrautung und einen vorgegebenen Zeitraum berechnet werden. Wie diese Berechnung erfolgt, soll durch die Beispielskalkulation in Tabelle 19 gezeigt werden. Die Modellparameter entsprechen den jeweiligen Standardwerten der dikotylen Unkräuter. Die Startverunkrautung wurde im Jahr 0 auf 20 Unkrautkeimlinge/m² festgelegt. Die Planungsperiode beträgt 10 Jahre. Durch Division der vorgegebenen Anzahl an Keimpflanzen (20 Pfl./m²) durch die Auflaufwahrscheinlichkeit (hier: 11%) ergibt sich der Samengehalt der oberen Bodenschicht zum Zeitpunkt 0 (S_{00}). Die Samendichte der Bodenschicht 5 – 25 cm Bodentiefe (S_{tn0}) beträgt bei gleichmäßiger Verteilung der Samen in der Bodenkrume das Vierfache der oberen 5 cm. In Abhängigkeit davon, ob der Auflauf an Unkräutern höher oder niedriger als die Bekämpfungsschwelle (hier: 70 Pfl./m²) ist, wird eine Behandlung durchgeführt oder ausgesetzt (Behandlung [ja/nein]). K_t beschreibt die Keimlingsdichte nach der Herbizidmaßnahme (siehe Gleichung 8). Aus den Keimpflanzen entwickeln sich nach Gleichung 11 samenbildende adulte Unkräuter (A_t). Diese produzieren neue Samen (Gleichung 12), die den Bodenvorrat ergänzen (Samenproduktion).

Der Samenvorrat des Folgejahres (S_{01}) ergibt sich aus den verbleibenden oberflächennahen Samen (S_{00}) – nach Abzug der gekeimten Samen – multipliziert mit der Überlebensrate der

Samen im Boden (75%, siehe Tabelle 7), zuzüglich der neu gebildeten Samen:
 $1506 = (182 - 20) \times 0,75 + 1385$.

Die tiefen Samen des Folgejahres (Stv_1) ergeben sich aus den tiefen Samen des Vorjahres (Stn_0) multipliziert mit der Überlebenswahrscheinlichkeit der Samen. Anschließend erfolgt entsprechend der Gleichungen 9 und 10 (siehe S. 55) die Bodenwendung und damit die Samenbewegung zwischen den beiden Bodenschichten:

$$Son_1 = Sov_1 \times (1 - 0,95) + Stv_1 \times 0,2$$

$$Stn_1 = Stv_1 \times (1 - 0,2) + Sov_1 \times 0,95$$

Die Herbizidkosten ergeben sich, sofern behandelt wird, aus dem Preis für die Herbizidmischung in Höhe von 21,- €/ha. Von der Überfahrtskosten wird abstrahiert, da davon auszugehen ist, dass für andere Maßnahmen wie Herbizidmaßnahmen gegen andere Unkräuter, Wachstumsreglereinsätze, Flüssigdüngung (Mangan, Stickstoff) oder Fungizidmaßnahmen in jedem Fall Überfahrten mit der Pflanzenschutzspritze notwendig sind. Die Konkurrenzeffekte ergeben sich durch Multiplikation der Dichte adulter Unkräuter mit dem Konkurrenzindex von 4,5 kg/ha je Unkrautpflanze/m², der bei einem Weizenpreis von 10,- €/dt 45 €-Cent je Unkrautpflanze/m² entspricht.

Entwickelt man das Modell für den gesamten Zeitraum von 10 Jahren in der oben beschriebenen Weise fort, so ergeben sich bei einer Bekämpfungsschwelle von 70 durchschnittliche jährliche Kosten in Höhe von 14,83 €/ha.

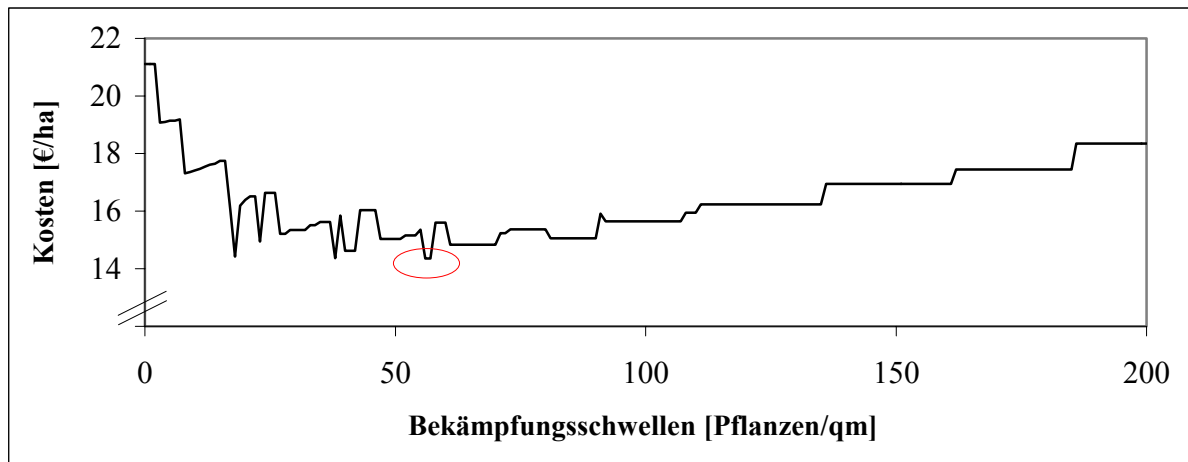
Tabelle 19: Deterministisches Populationsmodell (Standardwerte: DIKOTS)

Jahr	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Sov _t [Samen/m ²]		1507	1524	2460	3076	834	938	726	3134	3233
Son _t [Samen/m ²]	182	185	356	508	736	829	638	525	553	846
Stv _t [Samen/m ²]		546	1401	1927	2909	3937	2957	2442	1983	3423
Stn _t [Samen/m ²]	728	1869	2569	3878	5249	3942	3256	2643	4564	5809
Auflauf [Pflanzen/m ²]	20	20	39	56	81	91	70	58	61	93
K _t [Pflanzen/m ²]	20	20	39	56	4	5	4	58	61	5
A _t [Pflanzen/m ²]	11	11	21	29	2	3	2	30	31	3
Samenproduktion/m ²	1386	1401	2222	2737	343	384	300	2784	2863	392
Behandlung [ja/nein]					1	1	1			1
Herbizidkosten _t [€/ha]	0	0	0	0	21	21	21	0	0	21
Konkurrenz _t [€/ha]	5,10	5,17	9,47	12,93	1,08	1,21	0,94	13,28	13,89	1,24
Gesamtkosten _t [€/ha]	5,10	5,17	9,47	12,93	22,08	22,21	21,94	13,28	13,89	22,24

Quelle: Eigene Berechnungen, Schadschwelle 70 Unkräuter/m², Zinssatz 0%, *Keimpflanzen nach der Herbizidapplikation

Durch einen Vergleich der Modellergebnisse bei unterschiedlichen Bekämpfungsschwellen kann die Bekämpfungsschwelle identifiziert werden, die die Gesamtkosten minimiert. In Abbildung 18 sind die Ergebnisse von Modellkalkulationen für Bekämpfungsschwellen von 0 bis 200 Unkräutern/m² dargestellt. Bei einer Bekämpfungsschwelle von 0 wird in jedem Jahr eine Behandlung durchgeführt und die Kosten betragen etwas über 21,- €/ha. Mit einer zunehmenden Erhöhung der Bekämpfungsschwelle sinken die Kosten zunächst, bis sie ein minimales Niveau erreichen, um anschließend wieder anzusteigen. Der sprunghafte Verlauf der Kurve resultiert aus den ja/ nein-Entscheidungen für die Unkrautbekämpfung. So werden zum Beispiel bei einer Bekämpfungsschwelle von 57 in den Jahren 4, 5, 6, und 7 Unkrautbekämpfungen durchgeführt. Eine Erhöhung der Bekämpfungsschwelle um 1 führt unerwartet zu einer Erhöhung der Behandlungsfrequenz, da im Vergleich zur auslösenden Schwelle 57 im Jahr 7 auf eine Behandlung verzichtet wird, dafür aber in den Jahren 4, 5, 6, 8 und 9 die Schwelle von 58 überschritten wird und somit in 5 statt 4 Jahren Herbizidmaßnahmen durchgeführt werden. Die Bekämpfungsschwelle, die bei einer Startverunkrautung von 20 die Gesamtkosten minimiert, liegt zwischen 56 und 57 Unkräutern/m² (rot umkreist).

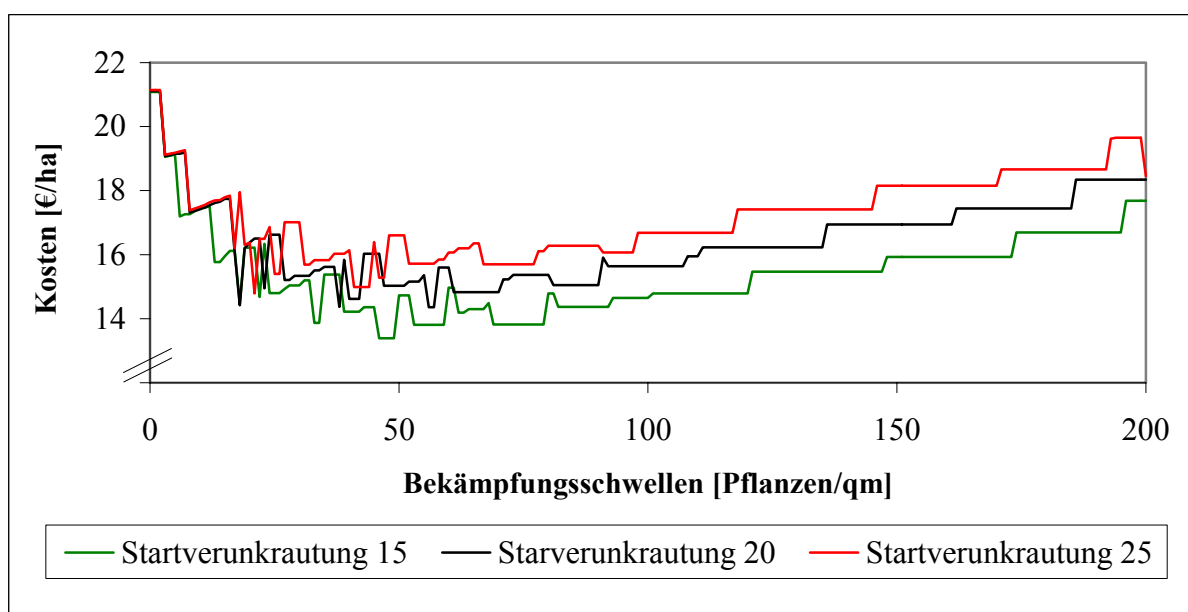
Abbildung 18: Gesamtkosten unterschiedlicher Bekämpfungsschwellen bei einer Startverunkrautung von 20 Unkräutern je m²



Quelle: Eigene Berechnungen, Planungszeitraum: 10 Jahre, Zinssatz 0%

Verändert man die Startverunkrautung, so zeigt sich ein uneinheitliches Bild (siehe Abbildung 19). Bei einer Ausgangsverunkrautung von 15 Unkräutern/m² liegt der optimale Schadschwellenbereich zwischen 46 und 49 Pfl./m²; bei einer Startverunkrautung von 20 sind es zwischen 56 und 57 und bei der Startverunkrautung von 25 Unkräutern/m² beträgt die Schadschwelle 21 Pfl./m².

Abbildung 19: Jährliche Gesamtkosten unterschiedlicher Bekämpfungsschwellen und unterschiedlichen Startverunkrautungen



Quelle: Eigene Berechnungen, Planungszeitraum: 10 Jahre, Zinssatz 0%

Da unter Feldbedingungen die Unkrautdichten nur mit begrenzter Genauigkeit erfasst werden können, die Modellgleichungen eine gewisse Unschärfe besitzen und Schadschwellen für einen weiten Bereich unterschiedlicher Unkrautdichten angewendet werden müssen, muss die Berechnung von Schadschwellen so angepasst werden, dass die Schwellenwerte für einen weiten Bereich von Ausgangsverunkrautungen gültig sind. Dies ist möglich, indem die Kosten, die bei der Anwendung einer bestimmten Bekämpfungsschwelle entstehen, nicht nur für eine Startverunkrautung kalkuliert werden, sondern für eine Vielzahl von Ausgangsverunkrautungen und hieraus anschließend Mittelwerte gebildet werden (siehe Gleichung 16).

Gleichung 16:

$$GK(S) = \frac{1}{(Max - Min)} \times \frac{1}{n} \times \sum_{K_0=Min}^{Max} \sum_{j=0}^{n-1} (H_j(S, K_0) + R(UK_j(S, K_0)))$$

S: Bekämpfungsschwelle

GK(S): durchschnittliche jährliche Kosten in Abhängigkeit von der Schadschwelle S

K₀: Startverunkrautung im Jahr 0

Max, Min: Maximale bzw. minimale Startverunkrautung (K₀)

H_j(S, K_i): Kosten der Unkrautbekämpfung im Jahr j in Abhängigkeit von der Schadschwelle S und Startverunkrautung K₁

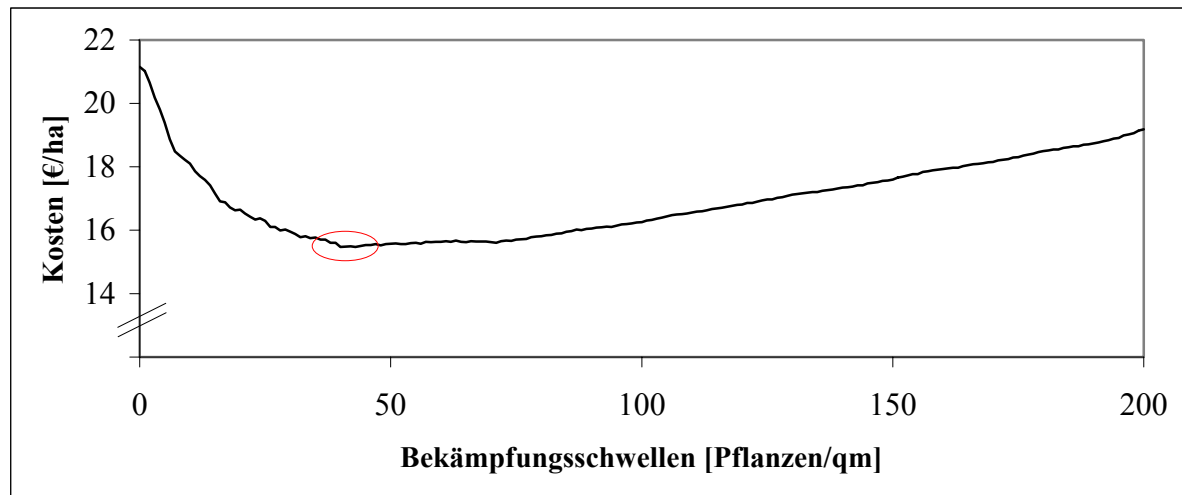
R(): Ertragsreduktion in Abhängigkeit von der Unkrautdichte

UK_j(S, K₀): Unkrautdichte im Jahr j in Abhängigkeit von Startverunkrautung K₀ und der Schadschwelle S

n: Anzahl der Jahre (hier: n=10 Jahre)

In Abbildung 20 sind die durchschnittlichen jährlichen Kosten in Abhängigkeit von unterschiedlichen Bekämpfungsschwellen dargestellt, wenn für jede Bekämpfungsschwelle Kalkulationsdurchläufe für Startverunkrautungen von 5 (Min) bis 50 (Max) Unkräutern/m² durchgeführt und hieraus die Mittelwerte gebildet werden. Durch die Mittelwertbildung wird die Funktion „geglättet“; sie wird somit näherungsweise über den gesamten Bereich differenzierbar.

Abbildung 20: Mittlere jährliche Gesamtkosten, die sich im Durchschnitt bei einer Ausgangsverunkrautung zwischen 5 und 50 Unkräutern/m² ergeben.



Quelle: Eigene Berechnungen, Planungszeitraum: 10 Jahre, Zinssatz: 0%

Im hier angenommenen deterministischen Modell mit einer gleichverteilten Anfangsunkrautdichte zwischen 5 und 50 Unkräutern/m² und einer Planungszeit von 10 Jahren verursachen Bekämpfungsschwellen im Bereich ± 41 Unkräutern/m² die geringsten jährlichen Durchschnittskosten. Die Ausgangsunkrautdichten sind kleiner als die Schadschwellen. In den ersten Jahren können also Behandlungskosten zu Lasten einer sich aufbauenden Verunkrautung eingespart werden. Die Schadschwellen sind also nicht nachhaltig, da die Verunkrautung am Ende der Planungsperiode höher ist als am Anfang. Verlängert man die Simulationszeit, verringern sich, wie erwartet, die Schadschwellen entsprechend. Erst bei sehr langen Planungszeiträumen von deutlich über 100 Jahren stabilisieren sich die Schadschwellen auf dem niedrigen Niveau von 1 – 2 Unkräutern/m² (siehe Tabelle 20). Ein Landwirt wird jedoch kein Interesse daran haben, seine Herbizidstrategie für die nächsten 500 Jahre zu optimieren, so dass dieser Schadschwellenwert ohne praktischen Nutzen ist.

Tabelle 20: Schadschwellen bei unterschiedlich langen Planungszeiträumen bei einem Zinssatz von 0%, deterministisches Modell

Planungszeitraum [a]	5	10	25	50	100	500	5000
Schadschwellen [Pfl./m ²]	120	41	25	25	1 – 25	1	1

Quelle: Eigene Berechnungen, Startverunkrautung 5 – 50 Unkräuter/m²

In den obigen Modellrechnungen wurde kein Diskontierungsfaktor berücksichtigt. Die Kosten zukünftiger Jahre haben also genau das gleiche Gewicht wie die Ergebnisse gegenwärtiger Jahre. In Tabelle 21 wurden die gleichen Kalkulationen durchgeführt; zukünftige Ereignisse wurde jedoch mit einem Zinssatz von 5% abdiskontiert. Die Schadschwellenwerte stabilisieren sich innerhalb deutlich kürzerer Zeitspannen.

Gleichung 17:

$$GK(S) = \frac{1}{(Max - Min)} \times \frac{q^{(n-1)} \times (q - 1)}{q^n - 1} \times \sum_{K_0=Min}^{Max} \sum_{j=0}^{n-1} (H_j(S, K_0) + R(UK_j(S, K_0))) \times q^{-j}$$

q: Diskontierungsfaktor (=1 + Zinssatz)

Tabelle 21: Schadschwellen bei unterschiedlich langen Planungszeiträumen bei einem Zinssatz von 5%, deterministisches Modell

Planungszeitraum [a]	5	10	25	50	100	500	5000
Schadschwellen [Pfl./m ²]	120	71	44	26	26	26	26

Quelle: Eigene Berechnungen, Startverunkrautung 5 – 50 Unkräuter/m²

5.4.2 Stochastisches Modell

Bei der Definition der Modellparameter wurde darauf hingewiesen, dass die Parameter nicht auf eine Zahl begrenzt werden können, sondern dass es sinnvoller ist, eine Verteilungsfunktion anzugeben, die beschreibt, mit welcher Eintrittswahrscheinlichkeit ein Parameter einen bestimmten Wert annimmt. In Anbetracht der verfügbaren Datenbasis wurde eine Dreiecksverteilung gewählt, die die Eintrittswahrscheinlichkeit für einen Minimal-, Standard- und Maximalwert der Parameter beschreibt. In Form einer Monte-Carlo-Simulation können die Kosten für eine bestimmte Bekämpfungsschwelle wie im deterministischen Fall berechnet werden mit dem Unterschied, dass die Parameter zufällig (Zufallsgenerator) – entsprechend der zuvor definierten Verteilungsfunktion – gewählt werden. Ein solches Modellergebnis stellt eine Stichprobe dar. Durch eine Vielzahl von Wiederholungen (200), können aus diesen Stichproben Mittelwerte errechnet werden und hieraus Schadschwellen abgeleitet werden, die auch im stochastischen Fall im Durchschnitt die niedrigsten Gesamtkosten liefern.

5.4.2.1 Wahl der Startverunkrautung

In Tabelle 22 sind die Modellergebnisse für die Klasse der dikotylen Unkräuter für einen Planungszeitraum von 10 Jahren für die stochastische Modellbetrachtung wiedergegeben. Es besteht eine starke Abhängigkeit zwischen der Ausgangsverunkrautung und der Höhe der Schadschwellen. Bei einer niedrigen bzw. einer sehr hohen Ausgangsverunkrautung nähert sich die Unkrautdicke in den ersten Jahren von unten bzw. von oben an die Schadschwelle an. Erst nach dieser Anpassungsphase hat die Höhe der Bekämpfungsschwelle einen Einfluss auf die Bekämpfungsentscheidung. Dadurch verkürzen sich in den Fällen, in denen die Schadschwellen deutlich von der Startverunkrautung abweichen, die Zeiträume, in denen die Bekämpfungsschwellen tatsächlich Auswirkungen auf die Kosten haben. Die Schadschwellen steigen in diesen Fällen tendenziell an. Am Beispiel der Tabelle 22 bedeutet dies, dass es auf gering verunkrauteten Teilflächen ($1 - 10$ Unkräuter/m²) sinnvoll wäre, einen Anstieg der Unkrautdicke bis auf 36 Pfl./m² zu tolerieren und in den verbleibenden der 10 Jahren höhere Konkurrenzeffekte zu akzeptieren. Bei einer hohen Ausgangsverunkrautung ($61 - 70$) macht es umgekehrt keinen Sinn, die Unkrautdicke sehr weit abzusenken, da die Vorteile einer niedrigen Unkrautdicke ebenfalls nur in den verbleibenden Jahren genutzt werden können (siehe Tabelle 22). In den Modellkalkulationen wurde eine durchschnittliche Kontrollwirkung durch das Herbizid von 95% angenommen. Geht man von geringeren Wirkungsgraden aus und verkürzt die Planungsperiode, so werden die gezeigten Effekte noch deutlicher.

Tabelle 22: Schadschwelle (DIKOTS) für Planungszeitraum von 10 Jahren, Zinssatz: 5%

Ausgangsverunkrautung [Pfl./m ²]	1 - 10	11 - 20	21 - 30	31 - 40	41 - 50	51 - 60	61 - 70	10 - 30
Schadschwelle [Pfl./m ²]	36	24	22	22	25	24	30	20

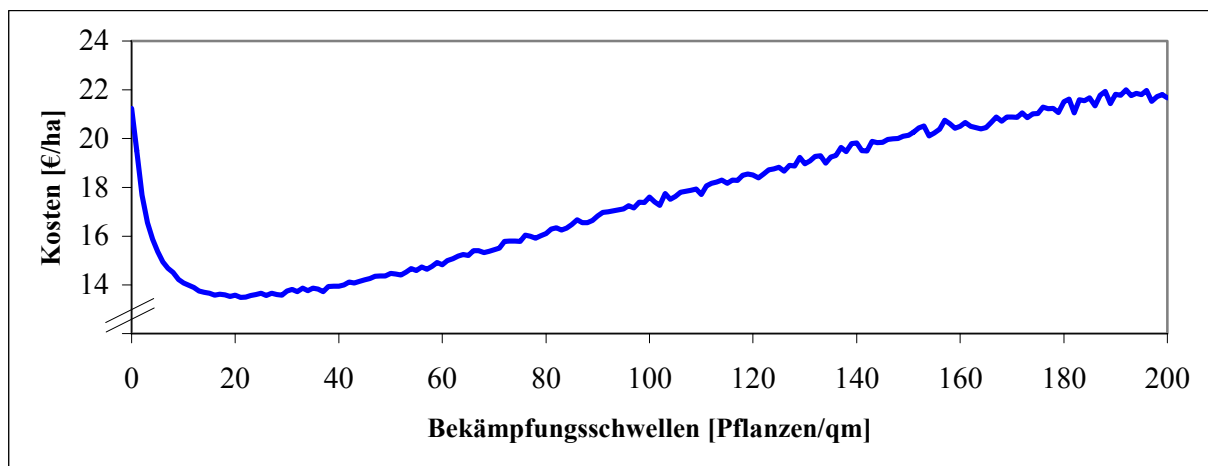
Quelle: Eigene Berechnungen

Auf Grund der oben dargestellten Konfliktsituation ist es nicht möglich, eine einheitliche Schadschwelle anzugeben, die für unterschiedliche Ausgangsverunkrautungen auf einer Fläche die Kosten für den vorgegebenen Zeitraum minimiert. Da jedoch ein einheitlicher Wert benötigt wird, wäre es sinnvoll, folgende Kriterien bei der Auswahl der Anfangsverunkrautung zu berücksichtigen.

- Da die Schadschwellen für einen weiten Bereich von Ausgangsverunkrautungen gültig sein müssen, ist es sinnvoll, einen größeren Bereich für die Startverunkrautung zu verwenden.
- Darüber hinaus sollte die Schadschwelle in etwa auf der Höhe des Mittelwerts der Anfangswerte liegen, damit sowohl Nutzen und Kosten einer Verminderung der Unkrautdichte als auch Nutzen und Kosten einer Erhöhung der Unkrautdichte bei der Berechnung der Schadschwelle berücksichtigt werden.

Für das obige Beispiel der dikotylen Unkräuter für einen Planungszeitraum von 10 Jahren scheint beispielsweise eine Anfangsverunkrautung von 10 – 30 Pfl./m² geeignet zu sein. Hieraus ergibt sich eine Schadschwelle von 20 Pfl./m² (siehe Abbildung 21).

Abbildung 21: Kosten unterschiedlicher Bekämpfungsschwellen für DIKOTS im stochastischen Modell



Quelle: Eigene Berechnungen, Anfangsverunkrautung: 10 – 30 Pflanzen/m², Planungszeitraum 10 Jahre, Zinssatz: 5%

Die Schadschwellen sind niedriger als im deterministischen Modell (vgl. Tabellen 20 und 21), was daran liegt, dass die Extremwerte der Modellparameter zum Teil zu höheren Konkurrenzeffekten führen als die Standardwerte.

Sind die relativen Häufigkeiten der Unkrautdichtewerte einer Fläche bekannt, so kann diese Häufigkeitsverteilung als Startverunkrautung für die Berechnung der dynamischen Schadschwellen herangezogen werden. Dies bedeutet jedoch, dass auf Flächen mit unterschiedlichen Verunkrautungen auch unterschiedliche Schadschwellen zu verwenden

sind. Da in der Realität die Kenntnisse zur Populationsdynamik und den Unkrautsamengehalten des Bodens jedoch nicht in der notwendigen Genauigkeit vorhanden sind, können Schadschwellen nur Richtwerte für eine verbesserte Unkrautbekämpfungsentscheidung darstellen, so dass eine solche Erweiterung unrealistisch ist.

5.4.2.2 Wahl des Planungszeitraumes

Für die Anwendung von Schadschwellen im räumlichen Modell werden die Schadschwellen zunächst in einer rein zeitlichen Modellbetrachtung ermittelt. Die Ergebnisse der räumlichen Kalkulationen dienen zur Abschätzung der Leistungen von Teilflächenunkrautbekämpfung, wobei unterschiedlich lange Planungsperioden (4, 8 und 12 Jahre) durchsimuliert werden. Die hierbei verwendeten Schadschwellen können nun für die Länge der jeweiligen Planungsperioden optimiert werden. Dies bedeutet, dass im räumlichen Modell bei kürzerer Planungszeit tendenziell höhere Schadschwellen verwendet werden als bei längerfristiger Planung. Alternativ kann für die Kalkulation der Schadschwellen ein so langer Zeitraum gewählt werden, dass sich die Werte stabilisieren. Im stochastischen Modell mit einem Zinssatz von 5% ist dies bei etwa 30 – 40 Jahren der Fall. Die Schadschwellen werden dadurch deutlich niedriger. Diese Vorgehensweise würde dem Gedanken der Nachhaltigkeit des Schadschwellenprinzips gerecht werden.

Welche Vorgehensweise die richtige ist, hängt vom Einzelfall ab. Ein Entscheidungsträger, der die landwirtschaftliche Nutzung auf einer Fläche nach einem bestimmten Zeitraum sicher aufgeben wird, wird sich dafür entscheiden, mit einer für diesen Zeitraum optimierten Schadschwelle zu agieren. Ein anderer Landwirt, der die landwirtschaftliche Produktion noch über einen längeren oder unbestimmten Zeitraum fortführen will, wird „nachhaltige“ Bekämpfungsschwellen vorziehen. In den Modellkalkulationen werden langfristig optimierte (nachhaltige) Schadschwellen verwendet.

Es ist denkbar, die Berechnung von Schadschwellen noch weiter zu perfektionieren. So könnte man bei einer vorgegebenen Planungsperiode in den einzelnen Jahren unterschiedliche Schadschwellen zulassen. Im letzten Jahr, in dem nur noch die Konkurrenzeffekte berücksichtigt zu werden brauchen, können die höchsten Unkrautdichten toleriert werden. In allen anderen Jahren können die Schadschwellenwerte genau so hoch gesetzt werden (z. B.

rekursive, dynamischen Programmierung), dass für die konkreten Modellbedingungen die Kosten minimiert werden. Diese Vorgehensweise macht jedoch nur dann Sinn, wenn die Populationsdynamik mit hoher Genauigkeit vorhergesagt werden kann. Da dies jedoch nicht möglich ist, sind diese Überlegungen von rein theoretischer Natur.

5.4.3 Erweiterung der Fruchtfolge um Zuckerrüben

Nach GEHRING (1999, S. 34ff.) bestehen Kosteneinsparungspotenziale bei der Unkrautbekämpfung in einer üblichen Getreide-Rüben-Fruchtfolge nur beim Herbizideinsatz in Getreide, denn Zuckerrüben haben nahezu eine „Nulltoleranz“ gegen Unkrautkonkurrenz. SÖKEFELD (2004, S. 52) führte Versuche zur Teilflächenunkrautbekämpfung in Fruchtfolgen mit Zuckerrüben durch und resümierte: „Insbesondere in Jahren des Zuckerrübenanbaues konnten wegen der starken und langen Konkurrenz zwischen Unkräutern und Zuckerrüben keine Einsparungen erzielt werden.“

Eine verminderte Unkrautbekämpfungsintensität in Getreide zeigte in den Versuchen von GEHRING (1999) jedoch das Problem eines steigenden Unkrautdrucks in Rüben. So reichte bei maximaler Unkrautbekämpfung in Getreide eine Standardherbizidfolge in Rüben aus, um den Bestand unkrautfrei zu halten. Bei leicht verminderter Herbizidintensität im Getreide war es bei unverändertem Herbizideinsatz in Rüben nicht möglich, die Unkräuter vollständig zu regulieren, so dass eine geringe Restverunkrautung vorhanden war, die jedoch als nicht ertragswirksam eingeschätzt wurde. Extrem war der Fall in den Kontrollparzellen, in denen in Getreide keine Unkrautbekämpfung erfolgte. Hier konnten die Unkräuter in Zuckerrüben mit der Standardherbizidstrategie nicht reguliert werden; es kam zu einem dicht geschlossenen Unkrautbestand und somit zu Totalverlusten der Zuckerrübe. Auch in den Versuchen von NIEMANN et. al. (2000, S. 288 ff.) waren die Unkrautdichten in den Nichtgetreidekulturen (Zuckerrüben, Mais und Winterraps) auf den Parzellen, auf denen in den Vorjahren der Herbizidaufwand in Getreide nach Schadensschwellen reduziert wurde, erhöht. In den Blattfrüchten waren jedoch keine höheren Herbizidaufwendungen nötig, um den stärkeren Unkrautdruck ausreichend zu kontrollieren. BRANDES et al. (1998, S. 354ff.) berichteten, dass es auf Versuchsflächen mit hohem Samenpotenzial nicht möglich war, mit 3 NA-Behandlungen einen zu Reihenschluss unkrautfreien Rübenbestand zu etablieren. Bei nur 2 NA-Behandlungen betrugen die Ertragsunterschiede auf diesem Standort weit über 50 dt/ha Rübenenertrag. MITTLER et al. (2002, S. 499) ermittelten bei Unkrautdeckungsgraden von über

10% zum Zeitpunkt des Bestandesschlusses der Zuckerrüben signifikante Ertragsverluste. Als Beziehung zwischen dem Unkrautdeckungsgrad und dem relativen BZE-Verlust fanden die Autoren lineare Beziehungen mit Bestimmtheitsmaßen von über 90% (ebenda, S. 504).

Auf Grund einer sehr langsamen Jugendentwicklung sind Zuckerrüben sehr sensibel gegenüber Unkrautkonkurrenz, so dass eine verminderte Unkrautkontrolle in Getreide zu einer erhöhten Folgeverunkrautung in Zuckerrüben und damit zu einem erhöhten Herbizidaufwand bzw. zu Ertragsverlusten und/ oder zu Erntebehinderungen führen kann. Durch eine theoretische Erweiterung des Modells sollen diese Zusammenhänge berücksichtigt werden. Der Unkrautauflauf hängt nicht allein vom Unkrautsamengehalt, sondern auch von den Auflaufbedingungen ab. Ein erhöhter Samengehalt wird deshalb nicht in jedem Jahr zu einem erhöhten Unkrautauflauf führen. Im Durchschnitt über mehrere Jahre besteht jedoch ein funktionaler Zusammenhang zwischen dem Samengehalt und dem notwendigen Herbizidaufwand in den Zuckerrüben, wobei die Standardherbizidfolgen z. T. noch „Wirkungsreserven“ besitzen, so dass nicht jede Erhöhung des Unkrautauflaufes automatisch einen höheren Herbizidaufwand impliziert (s. o.). Im Folgenden soll durch realistische Annahmen eine Funktion bestimmt werden, die den Zusammenhang zwischen den zu erwartenden Kosten in Zuckerrüben (Herbizidaufwand, Konkurrenzeffekte etc.) in Abhängigkeit vom Samengehalt beschreibt. Es wird davon ausgegangen, dass bis zu einer gewissen Unkrautsamendichte (Basiswert) eine Standardspritzfolge in Zuckerrüben ausreichend ist, also keine zusätzlichen Kosten anfallen. Steigt der Unkrautsamengehalt über diesen Wert, so wird unterstellt, dass zusätzliche Kosten entsprechend einer polynomischen Funktion zweiten Grades entstehen (vgl. Gleichung 18).

Gleichung 18:
$$K(S) = \begin{cases} 0 & \text{wenn } S < \text{Basiswert} \\ b(S - \text{Basiswert}) + c(S - \text{Basiswert})^2 & \text{wenn } S \geq \text{Basiswert} \end{cases}$$

K: zusätzliche Kosten in Zuckerrüben in Abhängigkeit vom Unkrautsamengehalt

S: Samendichte einer Unkrautklasse

Basiswert: Unkrautsamengehalt, bis zu dem eine Standardspritzfolge ausreichend ist.

b, c: Parameter

Alternativ zur oben gewählten Funktion zweiten Grades hätte auch eine lineare Funktion gewählt werden können. Bei einer linearen Funktion steigen die Kosten proportional mit der Unkrautsamendichte an. Mit zunehmendem Unkrautdruck müssen jedoch nicht nur mehr Herbizide eingesetzt werden, sondern die Zuckerrüben können zunehmend empfindlich auf die erhöhten Herbiziddosen reagieren (Herbizidstress) und die Unkrautkonkurrenz wird nicht mehr vollständig unterdrückt, so dass mit Ertragsreduktionen durch Unkrautkonkurrenz und mit Erntebehinderungen zu rechnen ist. Deshalb wurde eine Parabel als Funktion gewählt. Bei einem Unkrautsamengehalt über dem Basiswert steigen die Kosten hier mit zunehmenden Samengehalten zunächst langsam an. Die Steigung der Funktion nimmt jedoch linear zu, so dass die Kosten mit wachsenden Unkrautsamengehalten überproportional ansteigen. Um Gleichung 18 bestimmen zu können, müssen drei Punkte bekannt sein. Es muss bestimmt werden, bis zu welchem Unkrautsamengehalt eine Standardspritzfolge ausreichend ist (Basiswert). Weiterhin müssen zwei Punkte der Funktion für Samengehalte, die größer als der Basiswert sind, determiniert werden, um b und c zu bestimmen.

Die Modellannahmen wurden von praxisüblichen Herbizidempfehlungen, (LANDWIRTSCHAFTKAMMER WESTFALEN-LIPPE, 2002, S. 229 ff.) abgeleitet und in einem Expertengespräch mit einem Pflanzenschutzberater der Officialberatung abgestimmt (KEIL, 2004, o. S.). Darüber hinaus wurde das Modell so „abgestimmt“, dass bei einem regelmäßigen und üblichen Einsatz von Herbiziden in Getreide in der Regel nur geringe oder keine Mehrkosten in Zuckerrüben entstehen. Die Modellhypothesen können wie folgt zusammengefasst werden (siehe auch Tabelle 23 und Tabelle 41 im Anhang):

- Bei einer geringen bis mittleren allgemeinen Verunkrautung (250 dikotyle Samen, 400 monokotyle Samen, 80 Samen von POLAV und 80 Samen von GALAP im Keimhorizont pro m²) stellt eine dreifache Anwendung von Goltix SC (Metamitron) und Betanal Expert (Ethofumesat, Phenmedipham, Desmedipham) bei einem Aufwand von 190 €/ha eine Standardlösung dar.
- Kommt Klettenlabkraut in größeren Mengen vor (200 Samen/m² in den oberen 5 cm), so erhöht sich der Herbizidaufwand durch eine Ergänzung von Rebell (Chloridazon, Quinmerac) um ca. 37,- €/ha.
- Nimmt der Unkrautdruck durch eine dikotyle Allgemeinverunkrautung zu (800 Samen/m² im Keimhorizont), so werden die Aufwandmengen der zweiten und dritten NAK der Standardlösungen erhöht. Die Kosten erhöhen sich hierdurch um etwa 50,- €.

- Stärkeres Vorhandensein von Vogelknöterich (200 Samen/m² im Keimhorizont) erhöht den Herbizidaufwand um 50,- €/ha, da Vogelknöterich nur durch Debut wirksam bekämpft werden kann (DREYER, 2004, o. S.).
- Laufen Gräser in stärkerem Maße auf (1500 Samen/m² im Keimhorizont), so muss ein Graminizid (z. B. Agil) eingesetzt werden. Der Aufwand für die zusätzliche Gräserbehandlung beträgt etwa 30,- €/ha.
- Steigt der Unkrautdruck weiter an, so werden weitere Pflanzenschutzmaßnahmen notwendig. Bei starkem Unkrautauflauf können zusätzliche Herbizidaufwendungen in Höhe von 200,- €/ha notwendig werden (LANDWIRTSCHAFTSKAMMER WESTFALEN-LIPPE, 2005, S. 281).
- Bei sehr hohen Unkrautdichten (2.400 dikotyle Samen, 4.500 monokotyle Samen, 600 Samen von POLAV 600 Samen von GALAP im Keimhorizont pro m²) fallen neben erhöhten Herbizidkosten auch Kosten durch Herbizidstress, Erntebehinderungen und Ertragsreduktionen in einer Gesamthöhe von jeweils insgesamt 300 €/ha an.

Tabelle 23: Modellannahmen zum Herbizidaufwand in Zuckerrüben

	Basiswert [Samen/m ²]	Samengehalt [Samen/m ²]	zusätzl. Kosten [€/ha]	Samengehalt [Samen/m ²]	zusätzl. Kosten [€/ha]
DIKOTS	250	800	50	2400	300
MOKOTS	400	1500	30	4500	300
POLAV	80	200	50	600	300
GALAP	80	200	37	600	300

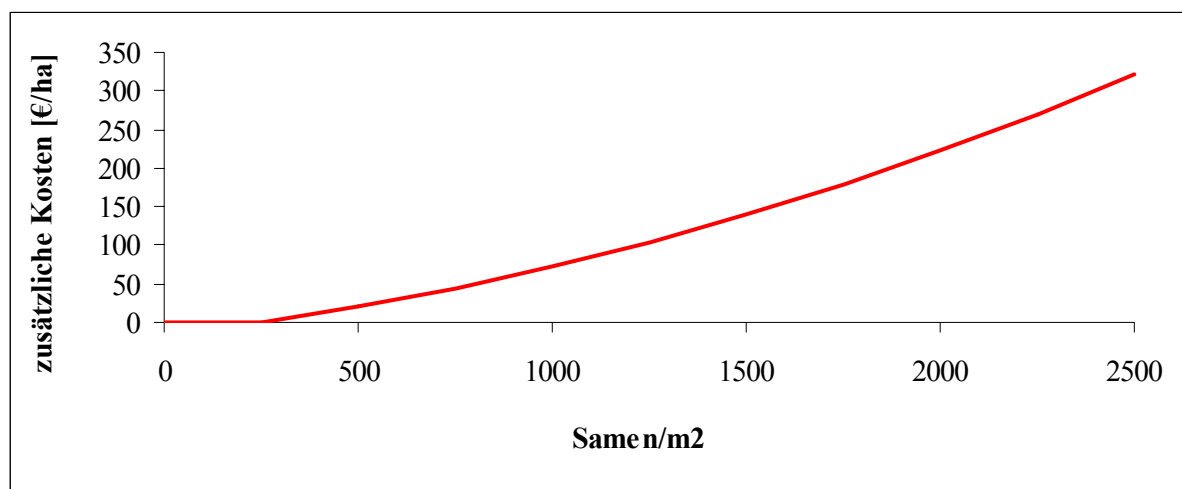
Quelle: Eigene Annahmen

Die Annahmen zu den Herbizidstrategien und den dabei verwendeten Herbiziden sind in Tabelle 24 wiedergegeben. Und in Abbildung 22 ist beispielhaft der Verlauf der Funktion dargestellt, die die zusätzlichen Kosten in Zuckerrüben in Abhängigkeit von unterschiedlichen Samengehalten dikotyler Unkräuter abbildet.

Tabelle 24: Herbizidstrategien in Zuckerrüben in Abhängigkeit vom Unkrautspektrum

1. NAK			2. NAK			3. NAK		
Mittel	Menge l/ha	Kosten €/ha	Mittel	Menge l/ha	Kosten €/ha	Mittel	Menge l/ha	Kosten €/ha
geringe bis mittlere Allgemeinverunkrautung								
Goltix	1	31,90	Goltix	1	31,90	Goltix	1	31,90
Betanal	1	31,32	Betanal	1	31,32	Betanal	1	31,32
Summe	190,- €/ha							
zusätzlich starker Klettenlabkrautdruck								
Rebell	0,5	12,18	Rebell	0,5	12,18	Rebell	0,5	12,18
zuzüglich	+ 37,- €/ha							
hohe Allgemeinverunkrautung (DIKOTS)								
			Goltix	0,5	15,95	Goltix	0,5	15,95
			Betanal	0,25	7,83	Betanal	0,25	7,83
zuzüglich	+ 50,- €/ha							
zusätzlich Vogelknöterich								
			Debut	25	30,00	Debut	25	30,00
zuzüglich	+ 50,- €/ha							
zusätzlich starke Verungrasung								
			Agil	0,5	13,80	Agil	0,5	13,80
Summe	+ 30,- €/ha							

Quelle: verändert nach LANDWIRTSCHAFTSKAMMER WESTFALEN-LIPPE, 2002, 229 ff. und HEIL, 2004, o. S.

Abbildung 22: zusätzliche Kosten durch DIKOTS in Zuckerrüben

Quelle: Eigene Berechnungen

Übersteigen von den Unkrautgruppen der dikotylen Unkräutern, von *Galium aparine* und von *Polygonum aviculare* gleichzeitig mehrere Gruppen den Basiswert, so müssen nicht für jede einzelne Gruppe die Herbizidaufwendungen erhöht werden, da eine Herbizidlösung für die am schwierigsten zu bekämpfende Art in der Regel ausreicht, um auch die anderen Unkrautgruppen ausreichend zu erfassen. Deshalb werden bei diesen drei Unkrautgruppen nur die maximalen zusätzlichen Kosten berücksichtigt, die bei einer der drei Klassen anfallen.

Anders sieht es bei monokotylen Unkräutern aus. Die Graminizide haben nur eine geringe Wirkung gegen dikotyle Unkräuter und die Herbizide, die gegen alle dikotylen Unkräuter eingesetzt werden, wirken nur gering gegen Gräser. Die Kosten für eine Gräserbehandlung werden deshalb unabhängig zu den anderen Kosten addiert (siehe Gleichung 19).

Gleichung 19:

$$GK(K_{GALAP}, K_{DIKOT}, K_{POLAV}, K_{MOKOT}) = \max(K(S_{GALAP}), K(S_{DIKOT}), K(S_{POLAV})) + K(S_{MOKOT})$$

GK: Gesamtkosten, die durch erhöhte Unkrautsamengehalte der unterschiedlichen Unkrautklassen in Zuckerrüben entstehen.

K: zusätzliche Kosten in Zuckerrüben in Abhängigkeit vom Unkrautsamengehalt (siehe Gleichung 18)

S...: Samendichte der unterschiedlichen Unkrautklassen

Wird der Fruchtfolgeanteil von Zuckerrüben gewählt bzw. festgelegt, wie oft Zuckerrüben angebaut werden, können im oben beschriebenen dynamischen Schadschwellenmodell die Schadschwellen für die jeweiligen Unkräuter in Getreide unter Berücksichtigung der Fruchtfolgeeffekte in Zuckerrüben berechnet werden. Vereinfachend wird davon ausgegangen, dass die Unkräuter in Zuckerrüben keine Samen bilden. Der jährliche Samenabbau entspricht dem in den Getreidegliedern. Im Modell bilden Zuckerrüben demnach eine „break crop“ (Kulturen, die keine oder nur eine mäßige Entwicklung der betreffenden Unkrautart zulassen), so dass durch die Modellerweiterung neben dem potenziellen Risiko erhöhter Herbizidaufwendungen in den Rüben auch die positiven Effekte der Erweiterung einer reinen Getreidefruchtfolge um die Blattfrucht Zuckerrüben berücksichtigt werden.

In der räumlichen Modellumgebung wird stets von einer ganzflächigen Unkrautbekämpfung in Zuckerrüben ausgegangen. Wegen eines geringen Flächenanteils, der einen höheren Unkrautdruck aufweist, wird keine ganzflächige Unkrautbekämpfung in Zuckerrüben durchgeführt. Erst wenn ein größerer Flächenanteil höhere Unkrautdichten aufweist, werden nennenswerte zusätzliche Kosten entstehen. Im räumlichen Modell wurden deshalb die zusätzlichen Kosten in Zuckerrüben nicht für jede einzelne Zelle (siehe Abschnitt 5.5) separat berechnet, sondern es wurden von den Unkrautverteilungen die oberen 20% der Dichtewerte herangezogen und von diesen die Mittelwerte berechnet. Diese werden in Gleichung 19 verwendet.

5.5 Räumliche Erweiterung des Modells

5.5.1 Zellulärer Automat

Nachdem die dynamischen Schadschwellen berechnet wurden, können diese in einer räumlichen Modellumgebung angewendet werden. Hierfür bietet sich ein zellulärer Automat an, da in einem solchen Modell neben der rein zeitlichen Populationsdynamik auch Ausbreitungstendenzen von Unkräutern berücksichtigt werden können. Ein zellulärer Automat hat folgende Grundcharakteristika (vgl. GERHARDT und SCHUSTER , 1995 , S. 18 f.):

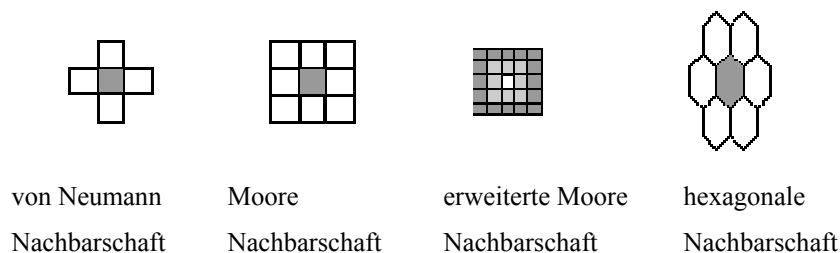
- Die Entwicklung findet in Raum und Zeit statt.
- Der Raum besteht aus einer diskreten Menge von identischen Zellen.
- Jede Zelle kann einen von m möglichen diskreten Zuständen annehmen.
- Die Zustände der Zellen verändern sich in diskreten Zeitschritten.
- Die Entwicklung einer Zelle hängt nur von ihrem Zustand und dem der sie umgebenden Nachbarzellen (begrenzte Anzahl von Zellen, die als Nachbarzellen definiert sind) ab.

Im vorliegenden Modell wird ein zweidimensionaler zellulärer Automat angewendet, indem die Modellfläche von 1 ha in ein regelmäßiges Zellgitter von $1 \times 1 \text{ m}^2$ großen Quadraten aufgeteilt wird. Jede Zelle wird im Zeitpunkt t durch den Samengehalt im Keimhorizont (Sov_t , Son_t) und den Samengehalt in der Bodenschicht von 5 – 25 cm (Stv_t , Stn_t) jeweils vor und nach dem Einsatz des Pfluges beschrieben. Da die Samengehalte zwischen null und einem maximalen Wert unendlich viele reelle Zahlen annehmen können, ist die Anzahl der möglichen Zellzustände unendlich. Somit ist bei dem vorliegenden zellulären Automaten, wie

auch in dem Unkrautsimulationsmodell von DUNKER (2002, S. 97 ff.) und anderen angewandten Modellen, die Grundeigenschaft einer endlichen Anzahl möglicher Zellzustände verletzt. Da es bei dem Unkrautsimulationsmodell jedoch darum geht, einen natürlichen Prozess nachzubilden und nicht darum, die mathematischen Eigenschaften bestimmter Übergangsregeln zu untersuchen, ist diese Abweichung von einem strikten zellulären Automaten zulässig (vgl. PHIPPS, 1990, S. 168). Die Entwicklung des Systems vollzieht sich in Zeitschritten von einem Jahr. Zu Beginn eines Simulationsdurchlaufes wird jeder Zelle ein Anfangszustand zugewiesen (siehe Abschnitt 5.5.4). Anschließend entwickeln sich die Zellen zunächst entsprechend der oben beschriebenen Populationsdynamik in Abhängigkeit von den gewählten Schadschwellen. Nach der Produktion neuer Samen werden nicht alle neuen Samen ausschließlich auf die Zelle fallen, auf der sie produziert wurden, sondern ein bestimmter Anteil der Samen wird durch unterschiedliche Medien (Mähdrescher, Bodenbearbeitung) in Nachbarzellen verfrachtet.

Je nachdem, welche benachbarten Zellen den neuen Zustand mitbestimmen, werden unterschiedliche Umgebungen von zellulären Automaten unterschieden. In Abbildung 23 sind einige häufig verwendete Nachbarschaftsbeziehungen dargestellt.

Abbildung 23: Beispiele für unterschiedliche Nachbarschaftsbeziehungen



In der von-Neumann-Umgebung errechnet sich der Zustand einer Zelle im Zeitpunkt $t+1$ aus den Zuständen der vier benachbarten Zellen, die mit der betrachteten Zelle eine gemeinsame Kante besitzen und dem Zustand der betrachteten Zelle im Zeitpunkt t (vgl. BALZTER et al., 1998, S. 114, siehe Gleichung 20):

Gleichung 20:
$$a_{x,y}^{t+1} = f(a_{x-1,y}^t, a_{x+1,y}^t, a_{x,y-1}^t, a_{x,y+1}^t, a_{x,y}^t)$$

a: Zustand einer Zelle

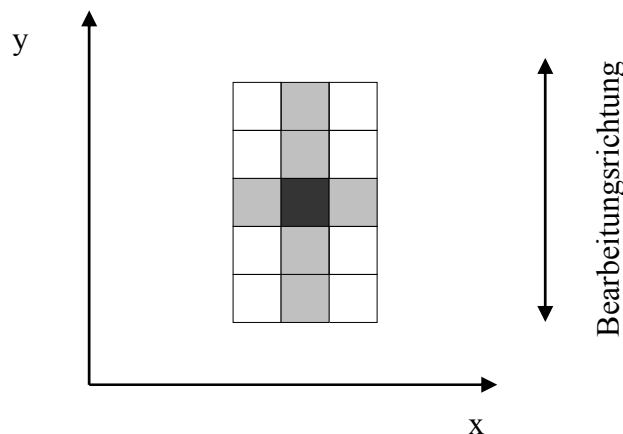
t: Zeitpunkt

x, y: Lagekoordinaten

Da Unkrautsamen in Bearbeitungsrichtung weiter bewegt werden als senkrecht hierzu, wurde als Nachbarschaftsbeziehung die in Abbildung 24 gezeigte gewählt. Der Zustand einer Zelle zum Zeitpunkt $t+1$ wird durch die vier Nachbarzellen der von-Neumann-Umgebung und durch die beiden Zellen, die in der Bearbeitungsrichtung um 2 Zellen oberhalb und unterhalb der betrachteten Zelle liegen, bestimmt (siehe Gleichung 21).

Gleichung 21:
$$a_{x,y}^{t+1} = f(a_{x-1,y}^t, a_{x+1,y}^t, a_{x,y-1}^t, a_{x,y+1}^t, a_{x,y-2}^t, a_{x,y+2}^t, a_{x,y}^t)$$

Abbildung 24: Nachbarschaftsumgebung im verwendeten Simulationsmodell



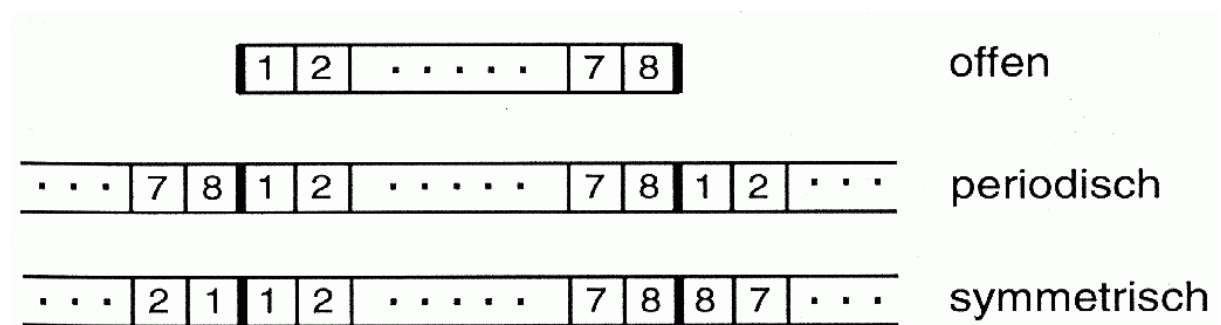
Quelle: Eigene Darstellung

5.5.2 Randbedingungen

Es existieren unterschiedliche Möglichkeiten auf die Begrenzung des zellulären Automaten, den Rand, zu reagieren. Entweder wird der Rand akzeptiert mit der Konsequenz, dass die Entwicklung der Randzellen auf Grund einer verringerten Anzahl von Nachbarzellen anders

ist als innerhalb des Gitters (offener Rand) oder der Zellraum wird „künstlich“ über den Rand hinaus vergrößert. Bei periodischen Randbedingungen werden die sich gegenüberliegenden Randzellen miteinander verbunden („verklebt“), so dass im Falle eines eindimensionalen Automaten aus einem Streifen ein geschlossener Ring wird. Im zweidimensionalen Raum wird aus einem Quadrat ein Torus (Schlauchreifen). Bei der symmetrischen Randbedingung wird der zelluläre Automat ebenfalls „künstlich“ über den Rand hinaus vergrößert, indem der Rand als Spiegelachse verwendet wird.

Abbildung 25: Beispiele für unterschiedliche Randbedingungen bei einem 1-dimensionalen zellulären Automaten



Quelle: GERHARDT und SCHUSTER, 1995, S. 25

Im vorliegenden Modell wurden periodische Randbedingungen gewählt, um mögliche störenden Randeffekte ausschließen zu können. Das Modell spiegelt somit, obwohl es nur eine Fläche von 1 ha abbildet, eine große Ackerfläche wider, in der Randeffekte vernachlässigt werden können. Im Unkrautsimulationsmodell von PAICE et al. (1998, S. 376) wurden ebenfalls periodische Randbedingungen verwendet.

5.5.3 Ausbreitung von Unkrautsamen

Der Nutzen eines räumlichen Modells, wie eines zellulären Automaten, zur Untersuchung der Ausbreitungsdynamik von Unkräutern hängt wesentlich von der Güte der gewählten Parameter ab. Da es jedoch nur wenige Studien zur Ausbreitungsdynamik von Unkräutern gibt, existieren auf diesem Gebiet noch viele Kenntnisslücken. Generell ist bekannt, dass die meisten Samen in der Nähe der Mutterpflanze auf den Boden fallen. Durch den Mähdrescher können sich Samen z. B. aber auch einige 10 Meter von der Mutterpflanze entfernen und ein

sehr kleiner Anteil der Samen kann noch größere Distanzen überwinden, so dass von diesen Samen neue Populationen ausgehen können (COUSENS und CROFT, 2000, S. 72).

Im Folgenden werden die unterschiedlichen Vektoren, die zu einem Samentransport in Ackerflächen und zwischen Ackerflächen führen, thematisiert und es wird beschrieben, von welchen Annahmen letztlich im Modell ausgegangen wurde. Durch Tiere, wie Mäuse und Vögel, oder Samen, die auf landwirtschaftlichen Maschinen liegen, können Unkrautsamen in geringem Umfang über sehr weite Distanzen verfrachtet werden. REW und COUSENS (1997, S. 255) nennen eine solche unvorhersehbare und deshalb schwer zu quantifizierende Ausbreitungsstrategie „guerilla spread“. Der Anteil der Samen, die lebensfähig innerhalb von Feldern durch „guerilla spread“ transportiert wird, ist jedoch sehr gering. Dennoch können durch den weiten Transport neue Unkrautnester in größerer Distanz etabliert werden.

Mähdrescher mit Strohhäcksler verbreiten Unkrautsamen tendenziell weiter als solche ohne Häcksler (BLANCO-MORENO et al., 2003, S. 381). Die meisten Unkrautsamen werden durch den Mähdrescher jedoch nur gering verfrachtet (BALLARÉ et al. 1987; MCCANNY, CAVERS, 1988; HOWARD et al. 1991; REW und CUSSANS, 1995; REW et al. 1996b; REW und CUSSANS, 1997; BLANCO-MORENO, 2004). Dies gilt vor allem für den Winterweizen, da dieser relativ spät geerntet wird und deshalb viele Unkräuter ihre Samen bereits vor der Getreideernte verloren haben und deshalb nicht vom Mähdrescher aufgenommen werden können.

FOGELFORS (1985) und HOWARD et al. (1991) untersuchten die horizontale Bewegung von Unkrautsamen durch die Bodenbearbeitung. Nach ihren Untersuchungen wurde der Großteil der Samen durch eine Kreiselegge weniger als 1 m vom Ursprung bewegt. Zu ähnlichen Ergebnissen kamen auch REW und CUSSANS (1997, S. 251 ff.), wonach mehr als 84% der Samen weniger als 1 m vom Ursprung bewegt wurden. Weiter zeigten REW und COUSENS, dass in den Boden eingearbeitete Samen deutlich geringer (weniger als halb so weit) bewegt werden als diejenigen, die oben auf der Bodenoberfläche liegen, so dass der erste Bearbeitungsgang, nachdem die neu produzierten Samen auf den Boden gefallen sind, den größten Effekt auf den Samentransport ausübt (ebenda, S. 254). Quer zur Bearbeitungsrichtung ist die Verfrachtung von Samen durch die Bodenbearbeitung (Pflug, Egge, Drillmaschine) gering (MARSHALL und BRAIN, 1999, S. 448).

Die Samenbewegung durch die Bodenbearbeitung hängt von der

- Größe der Samen (je kleiner desto weiter),
- der Lagerungstiefe der Samen (je flacher desto weiter)
- der Bodenart, und –struktur (je gröber desto weiter)
- der Hangneigung,
- dem Feuchtigkeitsgehalt des Bodens und
- der Art und der Geschwindigkeit der Bodenbearbeitung ab (vergleiche REW und COUSSENS, 1997, S. 254 f.).

Da eine Samenbewegung durch Wind im geschlossenen Getreidebestand stark vermindert ist (REW et al. 1996b), wird sie im Weiteren nicht explizit betrachtet. In Abhängigkeit von den Bodenbearbeitungsgeräten, der Anzahl der gleichgerichteten Bearbeitungsmaßnahmen und davon, ob sich die Samen auf der Bodenoberfläche oder im Boden befinden, gehen REW und COUSSENS davon aus, dass die 2,5% der Samen, die am weitesten transportiert werden, Strecken von 1,2 bis 3,3 m in Bearbeitungsrichtung überwinden (1997, S. 251). Die maximal festgestellte Distanz der Samenbewegung durch die Bodenbearbeitung betrug 4,8 m. Die Autoren schlussfolgerten aus ihren Ergebnissen, dass unter praktischen Bedingungen die meisten Unkrautsamen wahrscheinlich weniger als 1 m vom Ursprung verlagert werden (ebenda, S. 254).

Besitzen alle Bodenbearbeitungsgeräte die gleiche Arbeitsbreite, wird immer an der gleichen Seite des Feldes mit der Bodenbearbeitung begonnen und das Feld bei jedem Arbeitsgang gleich aufgeteilt, so kann es zu additiven Effekten der Samenbewegung durch die Bodenbearbeitung kommen. Da in der Praxis in der Regel nicht alle Bedingungen gleichzeitig erfüllt sind und nach den Ergebnissen von REW und COUSSENS in den Boden eingearbeitete Samen nur noch geringfügig im Boden transportiert werden (1997, S. 252), werden Fahrtrichtungen bei der Bodenbearbeitung im Modell nicht berücksichtigt. Es wird lediglich zwischen einem Samentransport parallel zur Bearbeitungsrichtung und senkrecht hierzu unterschieden (siehe Abschnitt 5.5.1).

Es wird davon ausgegangen, dass durch den Mähdrescher und die Bodenbearbeitung zusammen 20% der neu produzierten Unkrautsamen in die vier direkten Nachbarzellen (von-Neumann-Nachbarschaft) gleichmäßig (5% in jede Zelle) verfrachtet werden. Jeweils 1% der neu produzierten Samen werden um 2 Zellen in Bearbeitungsrichtung vor und hinter die

Ursprungszelle transportiert (siehe Abbildung 25). Zwischen den Unkrautklassen wird nicht differenziert. Ältere Samen, die bereits im Boden eingemischt sind, werden im Modell nicht in andere Zellen verfrachtet. Eine zufällige Verschleppung im Feld über weite Distanzen bzw. ein Neueintrag von Samen von anderen Feldern (guerilla spread) wird auf Grund fehlender Daten nicht berücksichtigt.

5.5.4 Ausgangsverteilung

In vielen herbologischen Arbeiten wurde, wie in Abschnitt 4.1 dargelegt, ermittelt, dass Unkräuter räumlich heterogen verteilt sind und in Aggregationen bzw. in Nestern auftreten. Dieses heterogene Unkrautauftreten ist die Motivation für die Durchführung einer räumlich differenzierten Herbizidapplikation. Es liegt auf der Hand, dass die „Startverunkrautung“ eines Simulationsdurchlaufs einen entscheidenden Einfluss darauf hat, ob bzw. in welchem Ausmaß eine Teilflächenunkrautbekämpfung ökonomische Vorteile gegenüber einer Ganzflächenbebehandlung aufweist.

Die Größe und die Unkrautdichte der auf Ackerflächen vorkommenden Unkrautnester hängt vom Standort (HÄUSLER und NORDMEYER, 1995; DIELEMAN et al., 2000), der Bodenbearbeitung (MARSHALL und BRAIN, 1999; COLBACH et al. 2000), dem Unkrautspektrum, der Fruchtfolge und der Wirksamkeit der Herbizide (DIELEMAN et al., 2000) ab. In der Literatur sind jedoch keine eindeutigen Antworten darüber zu finden, mit welchen Unkrautverteilungen unter bestimmten Voraussetzungen zu rechnen ist. Dies liegt neben den vielfältigen Ursachen, die die Unkrautverteilungen beeinflussen, auch daran, dass in den herbologischen Arbeiten mit sehr unterschiedlichen Beprobungsrastern von $1,8 \times 1,8 \text{ m}^2$ bis $50 \times 50 \text{ m}^2$ und unterschiedlich großen Zählrahmen ($0,0025 \text{ m}^2$ – $1,46 \text{ m}^2$) gearbeitet wurde (REW und COUSENS, 2001), so dass die Daten nur eingeschränkt vergleichbar sind. Bei größeren Beprobungsrastern können nur entsprechend große Unkrautaggregationen detektiert werden. Außerdem besteht die Gefahr, dass bei zu groben Rastern die tatsächliche Unkrautverteilung nur unzureichend erfasst wird und somit die ermittelten Unkrautkarten nicht mit der Realität übereinstimmen (siehe Abschnitt 4.2).

In den Simulationsstudien sollen unterschiedliche Ausgangsverteilungen von Unkräutern untersucht werden. Da hochaufgelöste Unkrautkarten (Beprobungsraster von $1 \times 1 \text{ m}^2$ oder $2 \times 2 \text{ m}^2$) nicht zur Verfügung standen und eine Vielzahl solcher Ausgangsverteilungen benötigt

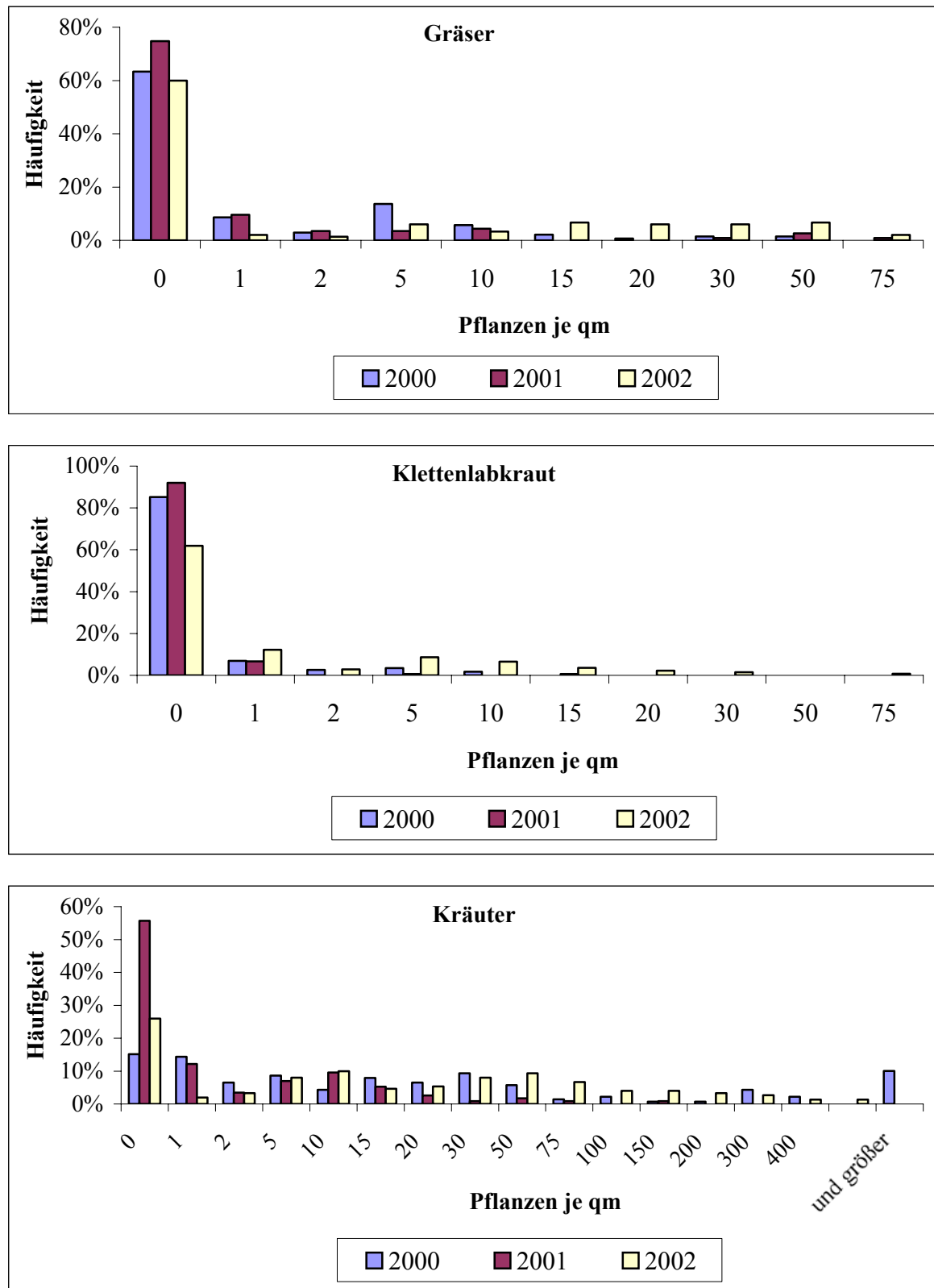
werden, um die Auswirkungen unterschiedlich aggregierter Unkrautverteilungen auf die Modellergebnisse untersuchen zu können, wurden unter plausiblen Annahmen Unkrautverteilungskarten zufällig generiert. Die künstliche Erzeugung von Unkrautkarten hat den Vorteil, dass systematisch die Effekte unterschiedlicher Ausgangsverteilungen untersucht werden können. Durch diese Vorgehensweise kann, von der These ausgehend, dass Unkräuter mehr oder weniger aggregiert vorkommen, das ökonomische Kosteneinsparungspotenzial einer räumlich angepassten Herbizidapplikation untersucht werden. Zur Generierung einer Unkrautkarte müssen zum einen die Form und die Größe der Zellaggregationen bestimmt werden, die eine in sich mehr oder weniger homogene Unkrautpopulation, ein „Unkrautnest“³, einschließen (Abschnitt 5.5.4.2). Zum anderen müssen die Unkrautdichten innerhalb eines solchen Zellverbandes festgelegt werden (Abschnitt 5.5.4.1).

5.5.4.1 Unkrautdichten

Die Unkrautzahlungen, die die BBA auf der Domäne St. Ludgeri mit Hilfe des Göttinger Zählrahmens (0,1 m²-Fläche) durchgeführt hat, dienen als Richtwerte für die Startverunkrautungen. In Abbildung 26 sind beispielhaft die Histogramme für die ermittelten Unkrautdichten auf dem Schlag Sportplatz West dargestellt. Mehr als 60% aller Zählstellen weisen keine monokotylen Unkräuter und kein Klettenlabkraut auf. Die Stetigkeit der Klasse dikotyler Unkräuter ist höher; im Mittel über die drei Untersuchungsjahre waren nur etwa 30% der Zählstellen frei von dikotylen Unkräutern. Darüber hinaus weisen alle drei Unkrautklassen Zählstellen auf, die durch hohe Unkrautdichten gekennzeichnet sind.

³ Unter Unkrautnest wird im Folgenden auch ein räumlicher Verbund von Zellen verstanden, die frei von Unkräutern sind.

Abbildung 26: Ermittelte Unkrautdichten (Frühjahrsaufnahmen) auf dem Schlag Sportplatz West in den Jahren 2000 - 02



Quelle: eigene Darstellung, nach NORDMEYER 2004, o. S.

Diese Ergebnisse sind nur für die Größe des verwendeten Zählrahmens gültig (REW und COUSENS, 2000, S. 6 f.). Je kleiner ein verwendeter Zählrahmen ist, desto heterogener sind die Zählergebnisse; die Stetigkeit der Unkräuter nimmt ab und die Variabilität der gemessenen Verteilung nimmt zu. Bei einer Vergrößerung der Zählfläche ist es umgekehrt. Im Extremfall, wenn der Zählrahmen die Größe der Gesamtfläche einnimmt, ist das Ergebnis eine homogene Unkrautverteilung, die den Durchschnittswerten entspricht.

Bei der zufälligen Erzeugung eines Unkrautnestes wird zunächst die mittlere Unkrautdicke eines neuen Unkrautnestes bestimmt. Die von der BBA ermittelten Häufigkeiten von Unkrautdichten wurden als Richtwerte genutzt, um Eintrittswahrscheinlichkeiten für bestimmte Unkrautdichten zu postulieren. Bei dieser Vorgehensweise besteht tendenziell die Gefahr, dass die Heterogenität der Unkrautverteilung überschätzt wird, da die Unkrautnester deutlich größer sind als der verwendete Göttinger Zählrahmen ($0,1 \text{ m}^2$).

Es wurden vier unterschiedliche Unkrautverteilungen, die sich in ihrer Heterogenität und damit in ihrer Eignung für eine Teilflächenunkrautbekämpfung unterscheiden, postuliert. Die Eintrittswahrscheinlichkeiten der Verteilung 1a repräsentieren eine sehr heterogene Unkrautverteilung, die vor allem durch einen hohen Anteil von Unkrautnestern gekennzeichnet ist, die frei von den jeweiligen Unkrautarten sind. Bei der Verteilung 2a ist der Anteil der unkrautfreien Zellen im Vergleich zu Verteilung 1a deutlich zugunsten von Unkrautnestern mit geringen und mittleren Unkrautdichten reduziert worden. Die maximalen Unkrautdichtewerte sind bei beiden Verteilungen gleich.

Die Unkrautkarten mit den Bezeichnungen 1b bzw. 2b wurden von den bereits erzeugten Unkrautkarten 1a und 2a abgeleitet. Mit Hilfe der Ausgangsverteilungen 1b und 2b soll geprüft werden, inwieweit unkrautfreie Zellen die Ergebnisse beeinflusst haben. Bei der Unkrautkarte 1b bzw. 2b wurde deshalb die Unkrautkarte 1a bzw. 2a übernommen. Lediglich die Zellen mit Nullwerten wurden durch geringe Samengehaltswerte bzw. Unkrautdichtewerte ausgetauscht. Anstelle von Nullwerten wurden bei den Monokotyledonen 2 Pflanzen/ m^2 (33 oberflächennahe Samen/ m^2), bei den Dikotyledonen ebenfalls 2 Pflanzen/ m^2 (18 oberflächennahe Samen/ m^2), bei *Galium aparine* 0,2 Pflanzen/ m^2 (1 oberflächennaher Same/ m^2) und bei *Polygonum aviculare* 0,07 Pflanzen/ m^2 (1 oberflächennaher Same/ m^2) angenommen. In Tabelle 25 sind die zu erwartenden Pflanzendichten für die unterschiedlichen Wahrscheinlichkeitsverteilungen der Samengehalte wiedergegeben.

Tabelle 25: Eintrittswahrscheinlichkeiten der mittleren Unkrautdichten (Pfl./m²) der Unkrautnester

	Verteilung 1a					Verteilung 1b				
MOKOT	60%	15%	15%	5%	5%	60%	15%	15%	5%	5%
Pflanzen	0	5	15	75	200	2	5	15	75	200
GALAP	75%	10%	5%	5%	5%	75%	10%	5%	5%	5%
Pflanzen	0	5	10	30	80	0,2	5	10	30	80
DIKOT	40%	20%	20%	15%	5%	40%	20%	20%	15%	5%
Pflanzen	0	10	20	100	300	2	10	20	100	300
POLAV	70%	10%	10%	5%	5%	70%	10%	10%	5%	5%
Pflanzen	0	5	10	20	30	0,07	5	10	20	30
	Verteilung 2a					Verteilung 2b				
MOKOT	20%	45%	15%	15%	5%	20%	45%	15%	15%	5%
Pflanzen	0	5	15	75	200	2	5	15	75	200
GALAP	30%	35%	15%	15%	5%	30%	35%	15%	15%	5%
Pflanzen	0,0	5	10	30	80	0,2	5	10	30	80
DIKOT	15%	25%	40%	15%	5%	15%	25%	40%	15%	5%
Pflanzen	0	10	20	100	300	2	10	20	100	300
POLAV	30%	30%	20%	15%	5%	30%	30%	20%	15%	5%
Pflanzen	0	5	10	20	30	0,07	5	10	20	30

Quelle: Eigene Annahmen

Nachdem die Mittelwerte der Unkrautdichten in den Unkrautnestern bestimmt worden sind, müssen den einzelnen Zellen eines Unkrautnestes konkrete Werte zugewiesen werden. Hierbei wird davon ausgegangen, dass die Dichtewerte der Zellen eines Unkrautnestes räumlich unabhängig einer Normalverteilung mit einem Variationskoeffizienten von 25% folgen.

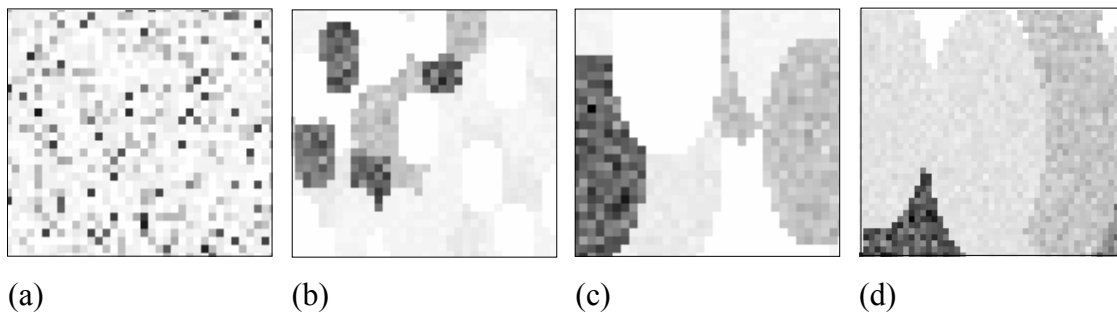
5.5.4.2 Form und Größe von Unkrautnestern

Da die Arbeitsgänge in der Regel entlang der gleichen Achse durchgeführt werden und somit die Verbreitung von Unkrautsamen durch die Bodenbearbeitung und die Ernte hierzu parallel verläuft, sind Unkrautnester in Bearbeitungsrichtung länger als senkrecht hierzu (JOHNSON et al., 1995; ZANIN et al., 1998). Auch Bearbeitungsfehler, wie Aussaatfehler durch verstopfte Säschare, ungespritzte Streifen durch defekte Düsen etc. können zu den genannten Anisotropismen führen (REW und COUSENS, 2000, S. 8).

Entscheidend für die Modellergebnisse, also die Herbizidverbräuche und die Konkurrenzeffekte, ist, wie hoch die räumliche Auflösungsgüte der Unkrauterkennungs- und Applikationstechnik im Verhältnis zur Größe der Unkrautnester ist. Um diese Wechselwirkungen analysieren zu können, wurden unterschiedlich große Unkrautnester vorgegeben (siehe Abbildung 27):

- a) Länge: 1 m, Breite: 1 m (1 Zelle),
- b) Länge: 9 m, Breite: 5 m (41 Zellen),
- c) Länge: 25 m, Breite: 13 m (267 Zellen) und
- d) Länge: 41 m, Breite: 21 m (733 Zellen).

Abbildung 27: Größe der Unkrautnester



Quelle: Eigene Annahmen

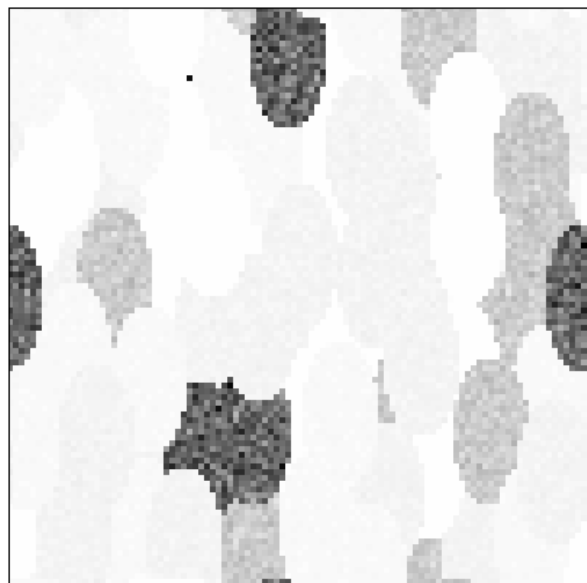
5.5.4.3 Zufällige Erzeugung von Unkrautkarten

Bei der Erzeugung der Ausgangsverteilungen wird so vorgegangen, dass auf einer „weißen“ Fläche zufällig ein Mittelpunkt für ein Unkrautnest gewählt wird. Anschließend werden alle Zellen, die sich innerhalb der vorgegebenen Radien (jeweils längs und quer zur Bearbeitungsrichtung) um den gewählten Mittelpunkt befinden, dem Unkrautnest zugewiesen. Die mittlere Unkrautdichte eines Unkrautnestes wird nach den oben beschriebenen Verteilungsfunktionen zufällig bestimmt, so dass anschließend die Unkrautdichten aller Zellen eines Unkrautnestes entsprechend einer Normalverteilung mit einem Variationskoeffizienten von 0,25 bestimmt werden können. Beträgt der Mittelwert der Unkrautdichte eines Unkrautnestes null Unkräuter, dann haben alle Zellen dieses Unkrautnestes eine Unkrautdichte von null. Bei den Unkrautkarten 1b und 2b werden keine

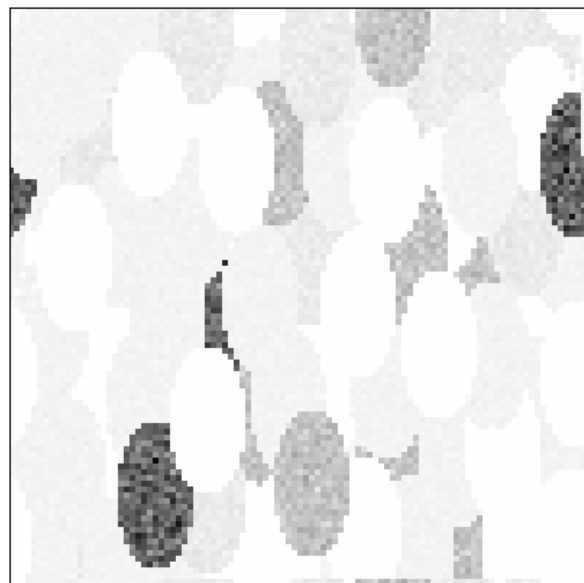
Unkrautkarten neu erzeugt, sondern es werden die Zellen der Karten 1a und 2a mit Nullwerten einheitlich durch geringe Unkrautdichten ausgetauscht (s. o.).

Da jede Zelle nur einem Unkrautnest zugewiesen werden kann, sind später erzeugte Unkrautnester zum Teil nicht vollständig. Es bilden sich halbmondähnliche und andere Formen heraus. Die später erzeugten Unkrautnester werden kleiner und bestehen zum Teil nur noch aus wenigen oder einzelnen Zellen. Zur Veranschaulichung ist in Abbildung 28 eine „Startverunkrautung“ dargestellt. Die Ausgangsverteilung wird für alle vier Unkrautklassen unabhängig voneinander erzeugt. Zum Teil sind die räumlichen Verbünde von Zellen, die eine ähnliche Unkrautdichte aufweisen, deutlich größer als die ursprünglich erzeugten ovalen Unkrautnester, da Unkrautnester mit gleichen Unkrautmittelwerten miteinander quasi verschmelzen.

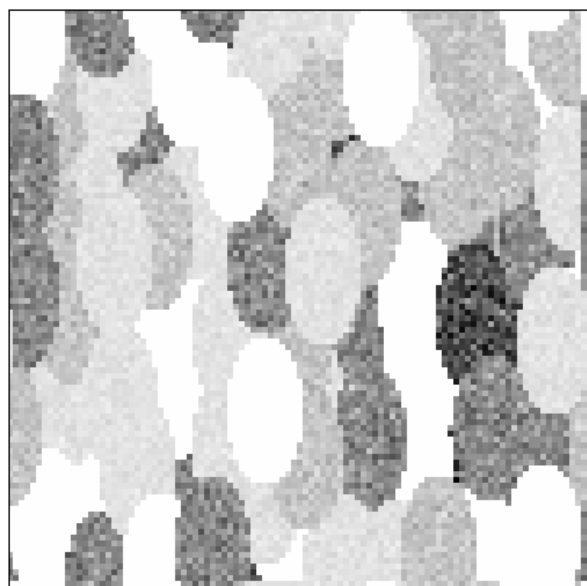
Abbildung 28: Beispiel einer Ausgangsverunkrautung: Unkrautdichten (Keimpflanzen/m²) entsprechend Verteilung 2a; Größe der Unkrautnester 267 Zellen (c)



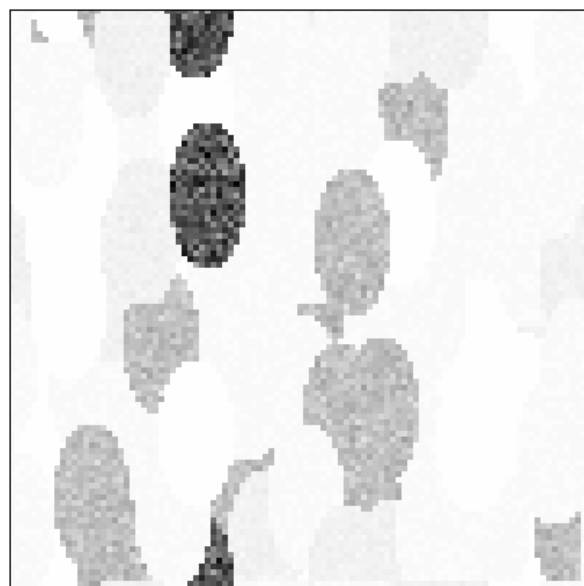
Dikots 0  506



GALAP 0  47



POLAV 0  69



MOKOTS 0  563

Quelle: Eigene Darstellung

5.5.5 Unkrautbekämpfungsstrategien

5.5.5.1 Ganzflächenunkrautbekämpfung (GFU)

Eine Ganzflächenunkrautbekämpfung stellt die Referenz zur Teilflächenunkrautbekämpfung dar. Bei einer herkömmlichen ganzflächigen Pflanzenschutzstrategie gibt es unterschiedliche Vorgehensweisen. In Lohnarbeitsbetrieben mit großer Flächenausstattung sind häufig die Möglichkeiten für eine detaillierte und angepasste Pflanzenschutzstrategie aus folgenden Gründen begrenzt:

- Hohe Lohnkosten,
- hohe Opportunitätskosten der Arbeit in den Zeitspannen, in denen Pflanzenschutzarbeiten durchgeführt werden, und
- hohe Kontrollkosten, die sich ergeben
 - durch große Schläge,
 - durch hohe Flächenausstattung,
 - durch kurze Bewirtschaftungszeiten der Flächen (Flächenneuzupachtung oder wechselndes Personal) mit der Folge eines geringen Erfahrungswissens und
 - dadurch, dass die ausführenden Feldarbeiten in der Regel nicht vom Betriebsleiter selbst durchgeführt werden und deshalb Kontrollarbeiten in der Regel immer mit einem zusätzlichen Arbeitsbedarf verbunden sind.

Diese Betriebe bevorzugen Standardanwendungen, bei denen weitere Kontrollen bzw. Nachbehandlungen nicht erforderlich sind. Auf mögliche Einsparpotenziale an Pflanzenschutzmitteln oder tendenziell höhere Erträge bei einer angepassten Pflanzenschutzstrategie wird bewusst verzichtet.

In Betrieben, in denen die oben genannte Kriterien nicht zutreffen, also beispielsweise in Familienbetrieben, deren Betriebsleiter die Flächen gut kennen und die die Möglichkeit haben, alle Flächen regelmäßig zu kontrollieren und eventuell notwendige Nachbehandlungen durchzuführen, kann es ökonomisch sinnvoll sein, den Pflanzenschutzmitteleinsatz durch eine schlag- und jahresspezifische Individualisierung der Behandlungen weiter zu optimieren. In den Pflanzenschutzempfehlungen des LANDESPFLANZENSCHUTZAMTES MECKLENBURG-VORPOMMERN (2002, S. 22) heißt es beispielsweise: „Eine hundertprozentige Herbstlösung ist nicht unbedingt sinnvoll. Wirtschaftlicher ist es oft, eine reduzierte Herbstvorlage mit einem

Nachputzen im Frühjahr (Kornblume, Klettenlabkraut u. a.) zu verbinden.“ Eine solche Unkrautbekämpfungsstrategie bietet den weiteren Vorteil, dass je nach Witterung auf die zeitliche Variabilität der Unkrautentwicklung reagiert werden kann. Dies setzt jedoch voraus, dass die Schläge im Frühjahr kontrolliert werden müssen, um über die Frühjahrsbehandlung entscheiden zu können. Landwirte, die sich die Zeit nehmen, ihre Flächen intensiv zu kontrollieren, kennen in der Regel die Felder bzw. die Zonen auf einzelnen Schlägen, die tendenziell höher verunkrautet sind. Diese Flächen bzw. Teilflächen können als „Weiserflächen“ genutzt werden. Wird der „Unkrautdruck“ subjektiv – diese Einschätzung erfolgt ohne Zählrahmen – als hoch eingestuft, so werden entsprechende Herbizide ausgebracht (DREYER, 2002, o. S.). Beide oben diskutierten Herbizidstrategien werden im Programm umgesetzt.

Isoproturon (IPU) ist ein sehr kostengünstiger Wirkstoff und wird deshalb in großem Umfang genutzt. Die Anwendung kann nicht auf allen Flächen erfolgen. Denn zum einen existieren resistente Unkrautpopulationen, so dass eine weitere Behandlung dieser Populationen nicht sinnvoll ist und zum anderen gibt es Anwendungsaufgaben, die eine Behandlung nicht auf allen Flächen erlauben, so dass zwei standardisierte Ganzflächenunkrautbekämpfungen (mit und ohne IPU) simuliert werden (GFU IPU und GFU Herold). Darüber hinaus wird ein Einsatz mit dem Gräserherbizid Husar, welches auch bei der Teilflächenunkrautbekämpfung angewendet wird, ganzflächig simuliert (GFU Husar).

GFU IPU: Die Herbizidkombination IPU (Isoproturon) mit 1,2 l/ha und Stomp SC (Pendimethalin) mit 1,5 l/ha wird in jedem Jahr im Herbst appliziert. Im Frühjahr wird ebenfalls unabhängig von der tatsächlichen Unkrautdicke eine Klettenbehandlung mit Primus (Florasulam) (0,1 l/ha) durchgeführt.

GFU Herold: Alternativ zu IPU wird in der zweiten Standardstrategie Herold (Flufenacet, Diflufenikan) mit 0,4 kg/ha zur Gräserbekämpfung im Herbst eingesetzt. Eine prophylaktische Klettenbehandlung erfolgt wie in Strategie „GFU IPU“ mit Primus (0,1 l/ha).

GFU Husar: Sowohl die Regulierung der dikotylen als auch der monokotylen Unkräuter erfolgt in dieser Strategie im Frühjahr. Die Gräser (und Klettenlabkraut) werden mit 200 g/ha Husar, „breitblättrige“ Unkräuter werden Duplosan DP (1,0 l/ha) + Gropper (15 g/ha) behandelt.

Bei einer an das jeweilige Unkrautauftreten angepassten Unkrautbekämpfungsstrategie (GFU angepasst) wird davon ausgegangen, dass der Landwirt weiß, an welchen Stellen seines Feldes die Verunkrautung am höchsten ist, so dass er vor einer Unkrautbekämpfungsmaßnahme diese Stellen kontrollieren und eine Bekämpfungsentscheidung ableiten kann. Auch PLUSCHKE und PALLUTT (1996, S. 145) empfehlen bei Ganzflächenbehandlungen eine Bonitur in den „Problemzonen“ des Schlages, um bei geringem Aufwand die Bekämpfungsentscheidung zu verbessern. Die modellseitige Umsetzung dieser Pflanzenschutzstrategie erfolgt so, dass als „Weiserflächen“ die 20% der Zellen herangezogen, die die höchsten Unkrautdichten aufweisen. Von diesen Zellen wird die durchschnittliche Unkrautdichte berechnet und als Entscheidungsgrundlage für die Unkrautbekämpfung herangezogen. Da ein Landwirt unter praktischen Bedingungen jedoch nicht in der Lage sein wird, die Unkrautdichten exakt zu erfassen, müssen Fehler bei seiner subjektiven Einschätzung berücksichtigt werden. Im Mittel über viele Jahre ist zu erwarten, dass sich die Über- und Unterschätzungen der Unkrautdichten nivellieren werden und im Durchschnitt über viele Jahre somit der wahre Wert getroffen wird. Es wird deshalb unterstellt, dass die Einschätzung des Landwirtes entsprechend einer Normalverteilung mit einem Variationskoeffizienten von 50% um den wahren Wert schwankt und im Einzeljahr zufällig ein Wert entsprechend dieser Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion bestimmt wird. Überschreitet dieser Wert den doppelten Schadschwellenwert, der bei der Teilflächenstrategie angewendet wird, so wird eine Ganzflächenbehandlung mit denselben Herbiziden durchgeführt, die auch bei der Teilflächenunkrautbekämpfung verwendet werden.

5.5.6 Teilflächenspezifische Unkrautbekämpfungsstrategien

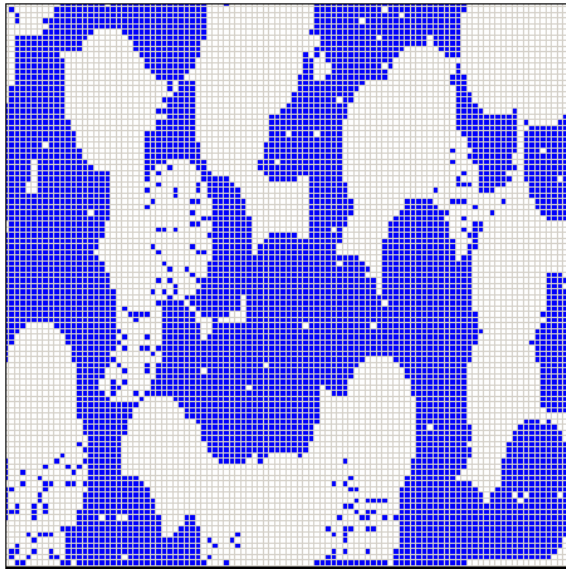
Bei teilflächenspezifischer Unkrautbekämpfung werden Unkräuter erst im Frühjahr behandelt, da die Erstellung einer Unkrautkarte im Frühjahr in der Regel einfacher und genauer ist. Es wird davon ausgegangen, dass in der Pflanzenschutzspritze drei unterschiedliche Wirkstoffe getrennt voneinander mitgeführt und ausgebracht werden können. Gegen dikotyle Unkräuter und *Polygonum aviculare* wird die Herbizidmischung Duplosan DP (1,0 l/ha) + Gropper (15 g/ha), gegen Windhalm Husar (200 g/ha) und gegen Klette Primus (0,1 l/ha) verwendet.

Es werden unterschiedliche Präzisionsgerade bei der Teilflächenunkrautbekämpfung simuliert, indem unterschiedlich große Behandlungsflächen von Quadraten mit den Kantenlängen 1 m, 3 m, 5 m, 10 m und 20 m vorgegeben werden. Jeweils in der Mitte einer

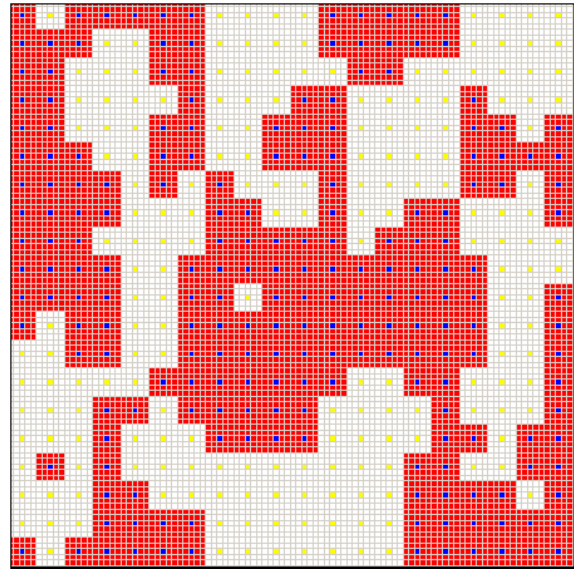
Behandlungsfläche wird die Unkrautdicke in einer Zelle (1 m^2) von allen vier Unkrautklassen „gemessen“. Die Unkrautbekämpfungsentscheidung für die gesamte Behandlungsfläche wird in Abhängigkeit von der ermittelten Unkrautdicke der mittleren Zelle getroffen.

In der Praxis haben die Fahrgassen keine absolute Ortstreue von Jahr zu Jahr und beim Einschalten der Pflanzenschutzspritze wird in der Regel nicht an der gleichen Position begonnen, so dass die Stellen, an denen die Verunkrautung bei der Teilflächenapplikation gemessen werden, ebenfalls von Jahr zu Jahr stets eine gewisse Ortsvariabilität aufweisen. Diesem Sachverhalt wurde im Modell dadurch Rechnung getragen, dass in jedem Jahr das gesamte Behandlungsflächenraster zufällig um einen Wert in X- und Y-Richtung verschoben ist (siehe Abbildung 29). Würde dieser Zusammenhang nicht berücksichtigt werden und sich die Behandlungsquadrate in jedem Jahr immer exakt auf derselben Stelle befinden, so käme es im Laufe der Zeit durch die stets einheitliche Behandlung in den Behandlungsquadraten zu einer unrealistischen Anpassung der Verunkrautung. Abbildung 29 (a) zeigt eine beispielhafte Ausgangsverunkrautung. Die blauen Zellen kennzeichnen Quadrate, deren Unkrautdichten oberhalb der Schadschwelle liegen. Die Unkrautdichten der weißen Zellen unterschreiten den Schwellenwert. Die Karten 29 (b) bis (d) zeigen die aus dieser Ausgangsverteilung resultierenden Behandlungskarten bei unterschiedlichen Verschiebungen des Behandlungsrasters in X- und Y-Richtung. Die Entscheidung, ob eine Unkrautbehandlung auf den Behandlungsflächen mit einer Größe von $5 \times 5 \text{ m}^2$ erfolgt, hängt von der Unkrautdicke in der Mitte der Behandlungsfläche ab. Überschreitet die Unkrautdicke dieser Zelle den Schwellenwert (blau), so erfolgt eine Behandlung und die Zellen der dazugehörigen Behandlungsfläche sind rot dargestellt. Ist die Unkrautdicke auf der beprobten Zelle niedriger als die Schadschwelle – durch gelbe Färbung gekennzeichnet – so wird auf der gesamten Fläche von $5 \times 5 \text{ m}^2$ keine Behandlung – weiße Einfärbung – durchgeführt.

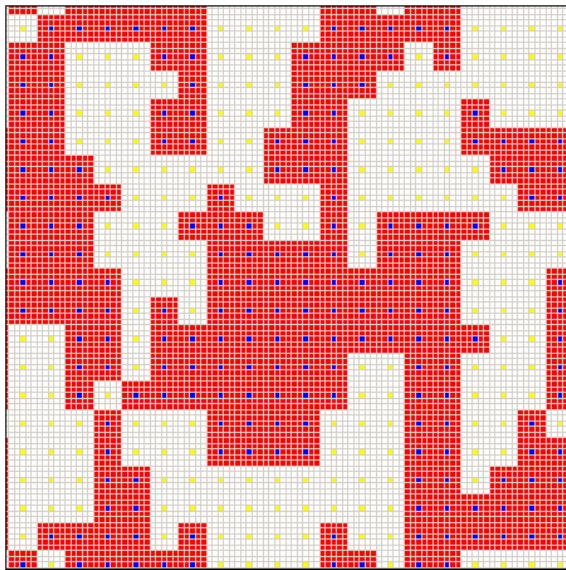
Abbildung 29: Unkrautkarte und die daraus resultierenden Behandlungskarten bei unterschiedlichen Startpunkten



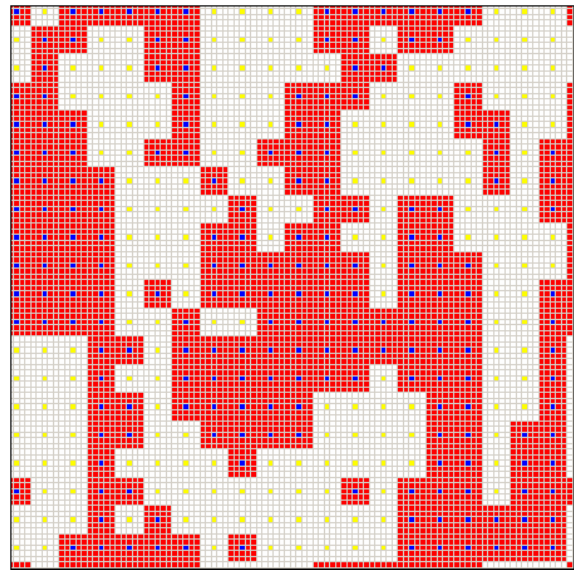
(a) Schadschwellenüberschreitungen (blau)



(b) Behandlungen: bei Startpunkt: x: 0, y: 0



(c) Behandlungen: bei Startpunkt: x: 1, y: 2



(d) Behandlungen: bei Startpunkt: x: 4, y: 4

Quellen: Eigene Darstellung, Erläuterungen siehe Text

Ein Vergleich der Karten (b) bis (d) zeigt, dass jede Teilflächenapplikation, die nicht auf einer Totalerhebung der Unkrautverteilung und einer Einzeldüsensteuerung aufbaut, unvermeidlich mit Applikationsfehlern verbunden ist.

5.5.7 Reihenfolge der Herbizidentscheidung

Bei der ganzflächig angepassten Unkrautbekämpfungsstrategie und der Teilflächenunkrautbekämpfung muss die Unkrautbekämpfung für mehrere Unkräuter simultan getroffen werden. Um die Entscheidungsfindung im Computerprogramm automatisieren zu können, wurde eine Entscheidungssequenz festgelegt. Zunächst wird geprüft, ob die monokotylen Unkräuter die Schadschwelle überschreiten. Hieran schließt sich die Entscheidung zur *Galium aparine*-Bekämpfung an. Wird eine Gräserbehandlung durchgeführt, so wird nur dann eine *Galium aparine*-Bekämpfung durchgeführt, wenn nach Berücksichtigung der durchschnittlichen Wirkung des Gräsermittels (Husar) auf Kletten die zu erwartende GALAP-Dichte den Schwellenwert überschreitet. Wird keine Gräserbekämpfung durchgeführt, so wird die Klettenlabkrautdichte direkt als Entscheidungsgrundlage verwendet. Anschließend wird in Abhängigkeit von den Unkrautdichten der dikotylen Unkräuter und *Polygonum aviculare* unter Berücksichtigung der zu erwartenden Wirkungen der Gräser- und Klettenlabkrautbekämpfungen – sofern diese durchgeführt werden – entschieden, ob die Mittelkombination: Duplosan DP + Gropper angewendet wird oder nicht.

5.6 Darstellung der Kosten

Um die Ergebnisse besser vergleichen zu können, werden die realisierten Ergebnisse eines Modellexperimentes in jährlich gleichmäßige Kostenbeträge umgerechnet. Für eine Winterweizenmonokultur werden hierfür die kapitalisierten Kosten in eine entsprechende Annuität umgerechnet. Es wird davon ausgegangen, dass die Kosten jeweils am Anfang einer Periode anfallen.

Bei einer Fruchtfolge, in der in einem festen Abstand Zuckerrüben den Weizen ersetzen, werden bei der Berechnung der jährlich konstanten Kostenbeiträge nur die Jahre berücksichtigt, in denen Weizen angebaut wird. Erhöhte Kosten in Zuckerrüben durch Unkräuter, die im Programm als die Kosten definiert sind, die über die Standardanwendung hinausgehen, werden der Unkrautbekämpfung im Weizen angelastet. Dies soll am Beispiel der Tabelle 26 gezeigt werden. In jedem vierten Jahr werden Zuckerrüben angebaut. Der Kapitalwert der im Modellexperiment realisierten Kosten der Winterweizenglieder beträgt 299 €. In den beiden Anbaujahren, in denen Zuckerrüben angebaut werden, entstehen zusätzliche Kosten von 21 und 12 €/ha. Diese Beträge entsprechen einem Barwert von 27 €.

In den Zeilen 4 und 5 sind die durchschnittlichen Kostenbeträge dargestellt, die bei Fälligkeit in den Jahren mit Winterweizen die gleichen Kapitalwerte ergeben.

Tabelle 26: Umrechnung jährlich unterschiedlicher Kostenbeträge in jährliche Durchschnittskosten (Zinssatz: 5%)

Jahr	Kapitalwert	0	1	2	3	4	5	6	7
Kosten Getreide	299	60	65	62		54	52	48	
Kosten ZR	27				21				12
durchschnittl. Kosten Getreide	299	57,4	57,4	57,4		57,4	57,4	57,4	
durchschnittl. Kosten ZR	27	5,1	5,1	5,1		5,1	5,1	5,1	

Quelle: Eigene Berechnungen

Simulationsstudien – Ergebnisse

6.1 Dynamische Schadschwellen

In den Tabellen 27 und 28 sind die Modellergebnisse der Schadschwellenkalkulationen für eine WW-Monokultur (Tabelle 27) und für eine Fruchtfolge bestehend aus 3 Winterweizengliedern und Zuckerrüben in jedem vierten Jahr (Tabelle 28) wiedergegeben. Die Ergebnisse sind nach der Länge der Simulationszeiträume differenziert.

Tabelle 27: Schadschwellen für die Frühjahrsbehandlung in Winterweizen für eine angenommene WW-Monokultur (Angaben in Pfl./m²)

Planungsdauer	4 Jahre	8 Jahre	12 Jahre	40 Jahre
DIKOTS	26	22	16	10
MOKOTS	20	14	10	5
POLAV	40	35	30	20
GALAP	5	3	2	1

Quelle: Eigene Berechnungen (Zinssatz 5%)

Tabelle 28: Schadschwellen für die Frühjahrsbehandlung in Winterweizen für eine Fruchtfolge: WW, WW, WW, ZR (Angaben in Pfl./m²)

Planungsdauer	4 Jahre	8 Jahre	12 Jahre	40 Jahre
DIKOTS	18	16	16	10
MOKOTS	26	18	14	8
POLAV	8	5	5	4
GALAP	5	3	3	1

Quelle: Eigene Berechnungen (Zinssatz 5%)

In der Fruchtfolge mit Zuckerrüben sind die Schadschwellen für MOKOTS geringfügig höher als in der WW-Monokultur. Dieses Ergebnis ist plausibel, da eine Fruchtfolge mit Zuckerrüben gegenüber einer Getreidemonokultur einen tendenziell geringeren „Ungrasdruck“ aufweist. Die Schadschwellen für GALAP und DIKOTS – abgesehen von

geringen Differenzen bei kurzfristiger Betrachtung – sind in beiden Produktionsprogrammen identisch. Das potenzielle Risiko für erhöhte Herbizidaufwendungen in Zuckerrüben und der positive Fruchtfolgeeffekt durch die Annahme, dass Zuckerrüben eine „break crop“ darstellen, neutralisieren sich im Modell demnach für diese Unkrautgruppen.

Die Schadschwellenwerte von POLAV sind in der Fruchtfolge mit Zuckerrüben deutlich niedriger als in der reinen Getreidefruchtfolge. In Getreide ist Vogelknöterich problemlos zu bekämpfen und die potenziellen Konkurrenzeffekte sind gering. In Zuckerrüben ergibt sich ein anderes Bild. Vogelknöterich ist hier nur schwer zu bekämpfen und eine Nichtbehandlung führt in Zuckerrüben zu deutlichen Ertragseinbußen und Erntebehinderungen. Deshalb ist es in Fruchtfolgen mit Zuckerrüben wichtig, auch im Getreide Vogelknöterich intensiv zu bekämpfen. Die Schadschwellen sind deshalb in diesem Fall deutlich niedriger.

Im Vergleich zu den Modellergebnissen sind in Tabelle 29 Schadschwellenwerte aus der Literatur wiedergegeben. GEROWITT und HEITEFUSS (1990) geben an, dass die Werte mit Sicherheitszuschlägen versehen sind, um das Risiko einer sich aufbauenden Populationsdynamik zu minimieren. GEHRING (2003, S. 2) schreibt, dass die Anwendung der unten zitierten Schwellenwerte (siehe Tabelle 29) zwar zu einem Anstieg des Bodensamenvorrates führt, jedoch Bekämpfungsprobleme oder erhöhte Herbizidaufwendungen in Zuckerrüben nicht zu erwarten sind. Die Angaben in den zitierten Literaturquellen können also am ehesten mit den Modellkalkulationen für nachhaltige Schadschwellen (Planungszeitraum: 40 Jahre) verglichen werden. Die eigenen Modellergebnisse sind, abgesehen von *Galium aparine*, deutlich niedriger. Offenbar hat die Berücksichtigung der Samenproduktion der tolerierten Unkräuter bei langfristiger Betrachtung einen deutlich größeren Einfluss auf die optimale Bekämpfungsentscheidung als vielerorts angenommen (vgl. auch GHERSA, 2000).

Tabelle 29: Vergleich der im dynamischen Modell errechneten Schadschwellen mit Literaturangaben

	GEHRING, 2003	GEROWITT und HEITEFUSS, 1990	Modellergebnisse, 40 Jahre, inkl. ZR
Unkräuter/Ungräser	Pflanzen/m²	Pflanzen/m²	Pflanzen/m²
Flughäfer	4 – 10		
Windhalm	10 – 20		
Ackerfuchsschwanz	20 – 30		
einjährige Risp	≥50		
MOKOTS gesamt	15 – 25	20 – 30	8
GALAP	0,1 – 0,5	0,1 – 0,5	1
Windenknöterich	2		
Unkrautwicken	2		
Ackerhohlzahn	3 – 5		
Geruchlose Kamille	3 – 5		
Ackerstiefmütterchen	5 – 20		
Vogelmiere	≥40		
DIKOTS gesamt	40 - 60	40 - 50	10

Quelle: siehe Text

6.2 Simulationsstudien – räumliches Modell

Als Basis für die räumlichen Simulationsstudien werden Unkrautkarten zufällig erzeugt, indem 4 Häufigkeitsverteilungen (1a, 1b, 2a, 2b) und 4 unterschiedliche Aggregationsniveaus der Unkrautverteilungen (Größe der Unkrautnester) vorgegeben werden (siehe Abschnitt 5.5.4). Hieraus ergeben sich 16 unterschiedliche Ausgangsverteilungen. Ausgehend von diesen Ausgangsverteilungen werden jeweils unterschiedlich präzise Teilflächenunkrautbekämpfungen (1 x 1 m², 3 x 3 m², 5 x 5 m², 10 x 10 m² und 20 x 20 m²) und vier unterschiedliche Ganzflächenstrategien simuliert. Eine teilflächenorientierte Unkrautbekämpfung im Raster 1 x 1 m² stellt das hypothetisch maximal erreichbare Präzisionsniveau und damit das maximal mögliche Kosteneinsparungspotenzial dar, wenn keine Fehler entstehen, Unkrautdichte, Unkrauterkenkung und Behandlung also in allen Fällen vollkommen übereinstimmen. Anhand der weiteren Raster kann abgelesen werden, wie

sich eine Verminderung der Präzision auswirkt. Die ganzflächige Unkrautbekämpfung „GFU angepasst“ ist an das jährliche Unkrautauflkommen angepasst. Diese Strategie stellt eine kostengünstige Ganzflächenunkrautbekämpfung dar. Unberücksichtigt blieb hier jedoch, dass diese Strategie mit Kontrollkosten behaftet sein kann (siehe Abschnitt 5.5.5). Die drei Ganzflächenunkrautbekämpfungen „GFU IPU“, „GFU Herold“ bzw. „GFU Husar“ repräsentieren prophylaktische Unkrautkontrollen mit IPU, Herold bzw. Husar (siehe Abschnitt 5.5.5.1). Als Schadschwellen werden die oben als nachhaltig bezeichneten Schadschwellenwerte (siehe Tabelle 27 und 28) verwendet. Die Berechnungen wurden differenziert für eine WW-Monokultur und eine Fruchtfolge mit 3 Winterweizengliedern und Zuckerrüben in jedem 4.ten Jahr durchgeführt. Darüber hinaus werden 3 unterschiedlich lange Simulationszeiträume durchkalkuliert (4, 8, 12 Jahre), so dass sich 864 Kombinationen bzw. Varianten ergeben. Da es sich um ein stochastisches Modell handelt, müssen für jede Variante mehrere Wiederholungen durchgerechnet werden. Die vorliegenden Ergebnisse basieren auf je 500 Wiederholungen.

6.2.1 Ergebnisse für eine WW-Monokultur

Im Folgenden werden zunächst die Simulationsergebnisse für eine Getreidemonokultur betrachtet. Eine Fruchtfolge mit Zuckerrüben wird in Abschnitt 6.2.2 thematisiert.

In Tabelle 30 ist gezeigt, welche durchschnittlichen jährlichen Herbizidaufwendungen, Konkurrenzeffekte und Gesamtkosten (Summe der beiden erstgenannten) sich bei unterschiedlichen Unkrautbekämpfungsstrategien und unterschiedlich langen Planungszeiträumen ergeben, wenn nicht nach unterschiedlichen Ausgangsverteilungen differenziert wird, sondern die Simulationsergebnisse aller Ausgangsverteilungen gemittelt werden. Betrachtet man zunächst in Tabelle 30 die Entwicklung der Kosten bei einer Verlängerung der Planungsperiode, so zeigt sich, dass sowohl der Herbizidaufwand als auch die Konkurrenzeffekte bei allen Strategien mit Ausnahme der Variante „GFU angepasst“ mehr oder weniger unabhängig von der Simulationszeit sind. Für die gegebene Modellkonfiguration ist das Prinzip der Nachhaltigkeit also bewahrt. Bei der ganzflächigen Unkrautbekämpfungsstrategie, bei der eine Anpassung an die zeitliche Variabilität der Unkrautdynamik erfolgt („GFU angepasst“), betragen die jährlichen Herbizidkosten bei 4-jähriger Betrachtung durchschnittlich $51 \text{ € ha}^{-1} \text{ Jahr}^{-1}$. Bei einer Verlängerung der Simulationszeit auf 8 bzw. 12 Jahre sinken die Herbizidkosten bei gleich bleibenden

Konkurrenzeffekten auf 44 bzw. 41 € ha⁻¹ Jahr⁻¹. Allein durch eine Anpassung an die zeitliche Variabilität ist es nach den Modellergebnissen also möglich, den „Unkrautdruck“ im Zeitablauf soweit abzusenken, dass im Vergleich zu den ganzflächigen Unkrautbekämpfungsstrategien „GFU Herold“ und „GFU Husar“ 32% der Gesamtkosten (20 € ha⁻¹ Jahr⁻¹) eingespart werden können. Alternativ zu einer an die zeitliche Unkrautdynamik angepassten Unkrautbekämpfung bietet die Verwendung des Gräserherbizides IPU ebenfalls deutliche Kosteneinsparungsmöglichkeiten im Vergleich zu den Ganzflächenvarianten „GFU Herold“ und „GFU Husar“. Da IPU jedoch nicht auf allen Flächen eingesetzt werden kann (s. o.), ist diese Alternative einer kostengünstigen Ganzflächenunkrautbekämpfung nicht in allen Fällen möglich. Je nachdem, welche ganzflächige Referenz und welche Genauigkeit zur ökonomischen Beurteilung von TFM gewählt werden, sind die Kosteneinsparmöglichkeiten unterschiedlich. Sie schwanken zwischen 2 und 30 € ha⁻¹ Jahr⁻¹.

Tabelle 30: Durchschnittliche Herbizidkosten und Konkurrenzeffekte unterschiedlicher Unkrautbekämpfungsstrategien

	Zeit	TFM 1 x 1 m ²	TFM 3 x 3 m ²	TFM 5 x 5 m ²	TFM 10 x 10 m ²	TFM 20 x 20 m ²	GFU angepasst	GFU Herold	GFU Husar	GFU IPU
Einheit	[Jahre]	€ ha ⁻¹ a ⁻¹	€ ha ⁻¹ a ⁻¹	€ ha ⁻¹ a ⁻¹	€ ha ⁻¹ a ⁻¹	€ ha ⁻¹ a ⁻¹	€ ha ⁻¹ a ⁻¹	€ ha ⁻¹ a ⁻¹	€ ha ⁻¹ a ⁻¹	€ ha ⁻¹ a ⁻¹
Herbizid- aufwand	4	32	32	33	32	33	51	63	59	47
	8	31	32	32	33	32	44	63	59	47
	12	31	32	32	32	32	41	63	59	47
Kon- kurrenz- effekte	4	3	6	6	8	9	2	2	4	3
	8	3	5	6	7	9	2	2	3	2
	12	3	5	5	7	9	2	1	3	2
Gesamt- Kosten	4	35	38	39	40	42	54	65	63	50
	8	34	37	38	40	41	46	65	62	49
	12	34	37	38	39	41	43	64	62	49

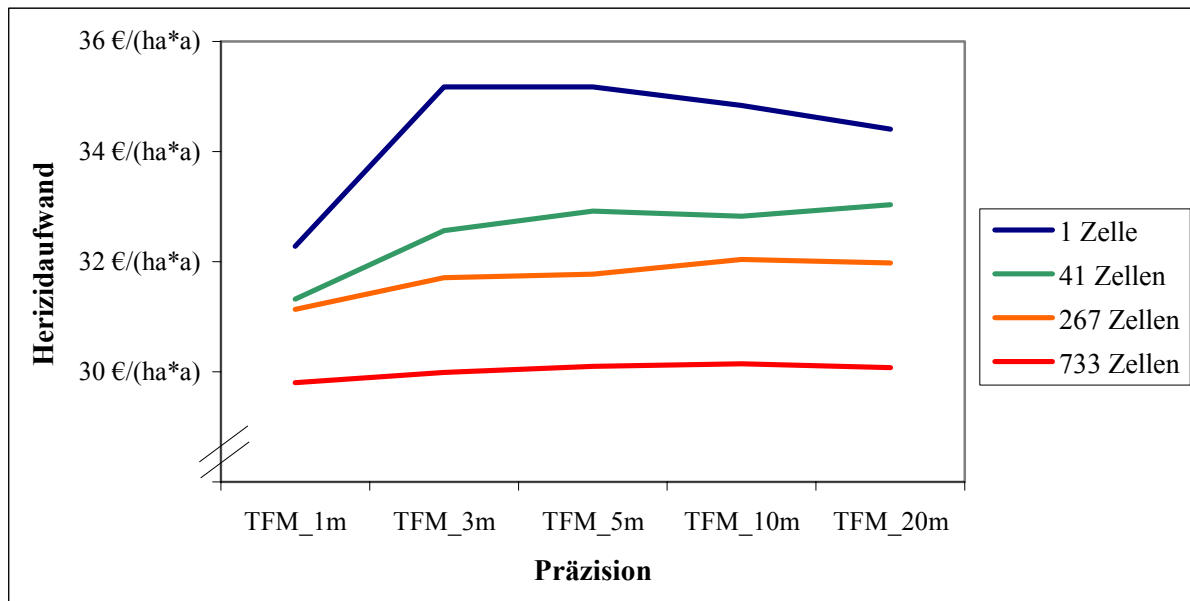
Quelle: Eigene Berechnungen

Die Konkurrenzeffekte steigen bei einer Verminderung der räumlichen Differenzierung der Teilflächenunkrautbekämpfung erwartungsgemäß deutlich an. Die Herbizidkosten (siehe Tabelle 30) verhalten sich im Gegensatz zu den Konkurrenzeffekten mehr oder weniger

unabhängig von der Präzision der TFU. Bei allen Beprobungsrastern existieren ausreichend viele Messpunkte um – zumindest im Durchschnitt über die große Anzahl von Wiederholungen – die Unkrautverteilung repräsentativ zu erfassen. Auf der anderen Seite führen Behandlungsfehler, die tendenziell umso häufiger vorkommen, je gröber die Auflösungsgüte der TFU ist, zu einer Neubesiedlung zuvor unbefallener Feldbereiche, so dass zu erwarten ist, dass die Herbizidaufwendungen im Zeitablauf ansteigen. Dieser Zusammenhang wird in Tabelle 30 jedoch nicht bestätigt.

Betrachtet man die Herbizidaufwendungen ebenfalls in Abhängigkeit von der Präzision der Teilflächenunkrautbekämpfung, jedoch danach differenziert, wie groß die Unkrautnester der Anfangsverunkrautung ($t=0$) sind (siehe Abbildung 30), so zeigt sich gleichfalls nur eine geringe Abhängigkeit zwischen den Herbizidaufwendungen und der Präzision der TFU. In der Tendenz ist jedoch ein leichter Anstieg der Herbizidkosten mit abnehmender Präzision zu erkennen. Wie zu erwarten, ist dieser Zusammenhang umso geringer ausgeprägt, je stärker die Unkrautverteilungen aggregiert sind. Die disaggregierte Ausgangsverteilung mit einer Unkrautnestergröße von $1 \times 1 \text{ m}^2$ stellt in sofern eine Ausnahme dar, als die Herbizidkosten bei einer Verminderung der Präzision der TFU von $1 \times 1 \text{ m}^2$ auf $3 \times 3 \text{ m}^2$ deutlich ansteigen, um dann jedoch bei einer weiteren Verminderung der räumlichen Auflösung der teilflächenspezifischen Unkrautbekämpfung wieder abzunehmen. Dieser zunächst unerwartete Zusammenhang lässt sich dadurch erklären, dass eine räumlichen Angleichung in den Unkrautdichten je schneller erfolgt desto disaggregierter die Ausgangsverteilung ist und desto gröber die räumliche Auflösung der teilflächenspezifischen Unkrautbekämpfung ist. Diese Homogenisierung der Unkrautverteilung führt im Zeitablauf zu sinkenden Herbizidkosten.

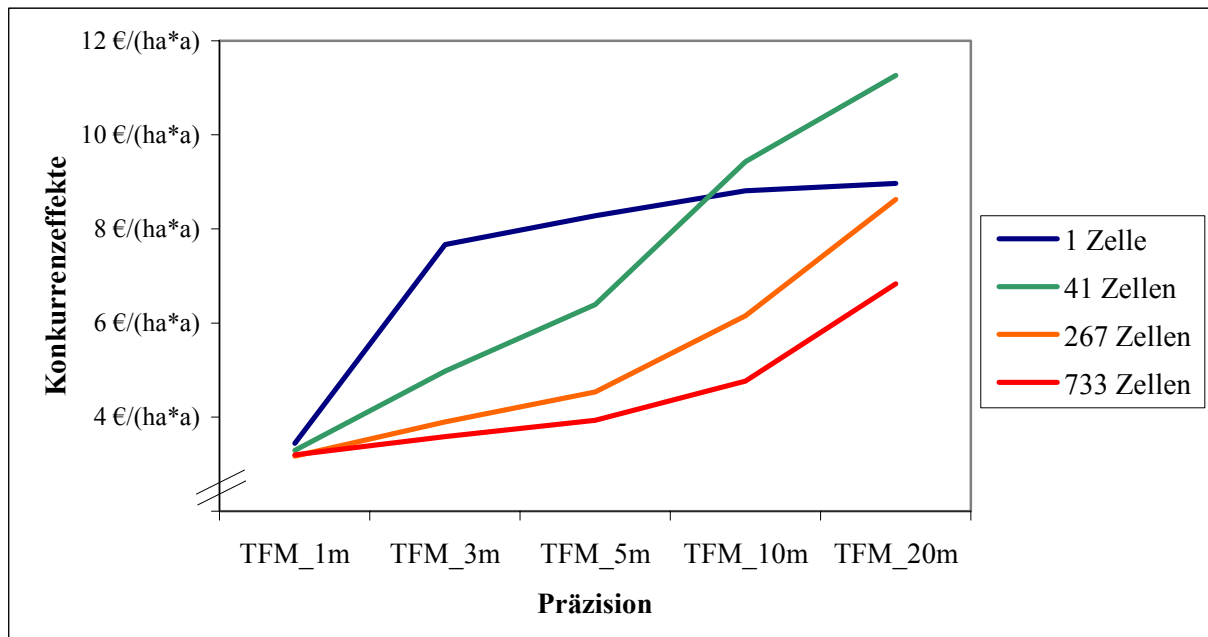
Abbildung 30: Herbizidaufwendungen bei unterschiedlich großen Unkrautnestern (in $t=0$) in Abhängigkeit vom Präzisionsniveau der TFU



Quelle: Eigene Berechnungen

Werden auch die Konkurrenzeffekte differenziert nach der Unkrautnestergröße der Unkrautverteilungen dargestellt (siehe Abbildung 31), so steigen die Konkurrenzeffekte mit einer Abnahme der Präzision der teilflächenspezifischen Unkrautbekämpfung deutlich an. Grundsätzlich gilt, dass je kleiner die Unkrautnester sind, desto höher die Ansprüche an die Präzision der variablen Ratentechnik sind, denn je weniger aggregiert die Ausgangsverteilungen sind, desto schneller steigen die Konkurrenzeffekte mit abnehmender Präzision. Eine gewisse Ausnahme bildet, wie im Falle der Herbizidaufwendungen, die Ausgangsverteilung, die keine deutlichen Unkrautaggregationen aufweist (Unkrautnestergröße: 1 Zelle). Hier steigen die Konkurrenzeffekte beim Übergang von einer Auflösung der TFU von $1 \times 1 \text{ m}^2$ auf $3 \times 3 \text{ m}^2$ deutlich an. Bei einer weiteren Reduktion der Auflösungsgüte der *precision farming*-Anwendung steigen die Konkurrenzeffekte jedoch langsamer an als bei den anderen Ausgangsverteilungen. Auch dieses Phänomen kann wie bei den Herbizidkosten damit erklärt werden, dass die disaggregierte Ausgangsverteilung sich bei grober Teilflächenunkrautbekämpfung schnell homogenisiert, so dass die Konkurrenzeffekte nur noch in geringem Maße ansteigen.

Abbildung 31: Konkurrenzeffekte bei unterschiedlich großen Unkrautnestern (in $t=0$) in Abhängigkeit vom Präzisionsniveau der TFU

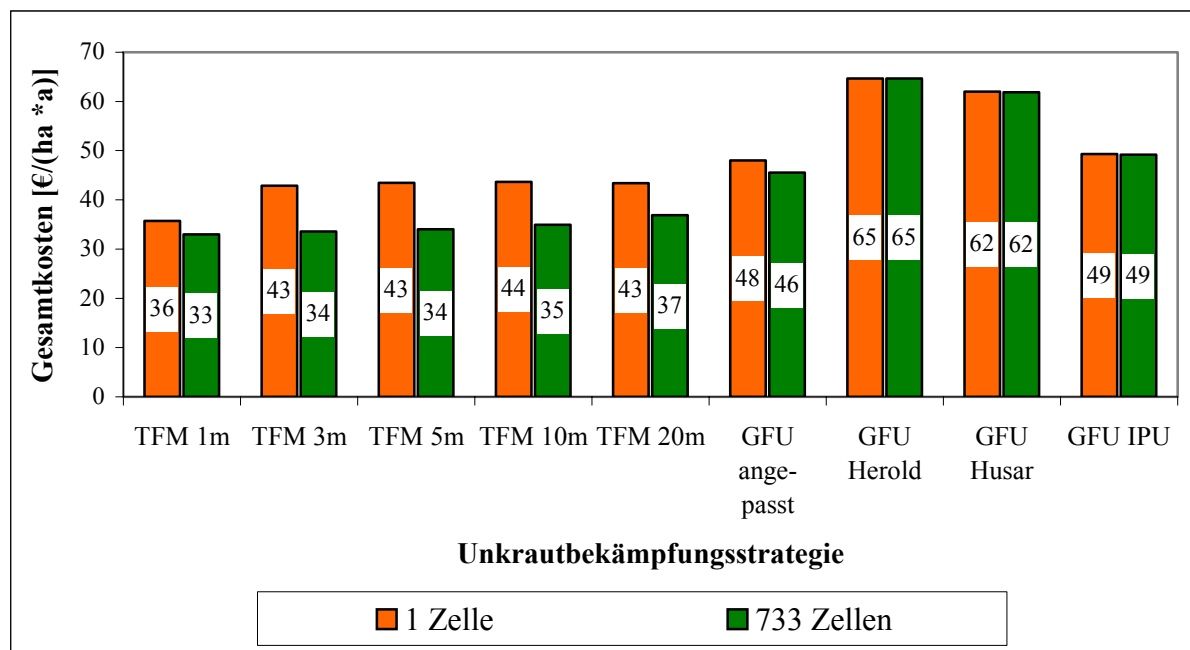


Quelle: Eigene Berechnungen

Auf Grund des Gesagten kann man vermuten, dass bei stark disaggregierten Ausgangsverunkrautungen geringere Ansprüche an die Präzision der Teilflächenunkrautbekämpfung gestellt werden können, da sich die Herbizidkosten und die Konkurrenzeffekte bei den unterschiedlichen Auflösungsgüten aneinander angleichen. Um diese Frage zu beantworten, sind in Abbildung 32 die Simulationsergebnisse für die beiden Extreme: disaggregierte Unkrautverteilung (Unkrautnestergröße 1 Zelle) und stark aggregierte Unkrautverteilung (Unkrautnestergröße 733 Zellen) dargestellt. Im ersten Fall (orangene Balken) betragen die Gesamtkosten der TFU im Raster $1 \times 1 \text{ m}^2$ $36 \text{ € ha}^{-1} \text{ Jahr}^{-1}$; bei allen anderen *precision farming*-Varianten schwanken die Kosten zwischen 43 und $44 \text{ € ha}^{-1} \text{ Jahr}^{-1}$ und liegen damit in etwa auf dem Niveau einer Ganzflächenunkrautbekämpfung, bei der die zeitliche Variabilität der Unkrautdynamik berücksichtigt wird (GFU angepasst: $48 \text{ € ha}^{-1} \text{ Jahr}^{-1}$). Mit anderen Worten führt eine Teilflächenunkrautbekämpfung, die in ihrer räumlichen Auflösung deutlich grobmaschiger als die tatsächliche Ausdehnung der Unkrautnester ist, im Vergleich zu angepassten Ganzflächenstrategien zu keinen Kosteneinsparungen. Betrachtet man beispielsweise für die disaggregierten Ausgangsverteilung (Nestergröße: 1 m^2) eine Verkleinerung der Behandlungsraster von beispielsweise $20 \times 20 \text{ m}^2$ auf $10 \times 10 \text{ m}^2$, so resultieren hieraus keine Kosteneinsparungen, da alle Raster $\geq 3 \times 3 \text{ m}^2$ zu grob sind und der räumlichen Unkrautverteilung der Unkräuter nicht gerecht werden.

Anders sieht es bei der stark aggregierten Ausgangsverteilung aus (Nestergröße: 733 Zellen). Hier steigen die Kosten mit abnehmender Präzision der TFU langsam an und selbst im Raster $20 \times 20 \text{ m}^2$ können durch TFU noch Kosteneinsparungen in Höhe von $9 \text{ € ha}^{-1} \text{ Jahr}^{-1}$ realisiert werden. Zusammenfassend bedeutet dieses Ergebnis, dass bei sehr heterogener Unkrautverteilung *precision farming* räumlich stark differenziert erfolgen muss, während bei stärker aggregierten Unkrautverteilungen die räumliche Auflösung von *precision farming* ebenfalls reduziert werden kann.

Abbildung 32: Gesamtkosten bei unterschiedlich stark aggregierten Anfangsverunkrautungen (Größe der Unkrautnester) in Abhängigkeit von der Unkrautbekämpfungsstrategie



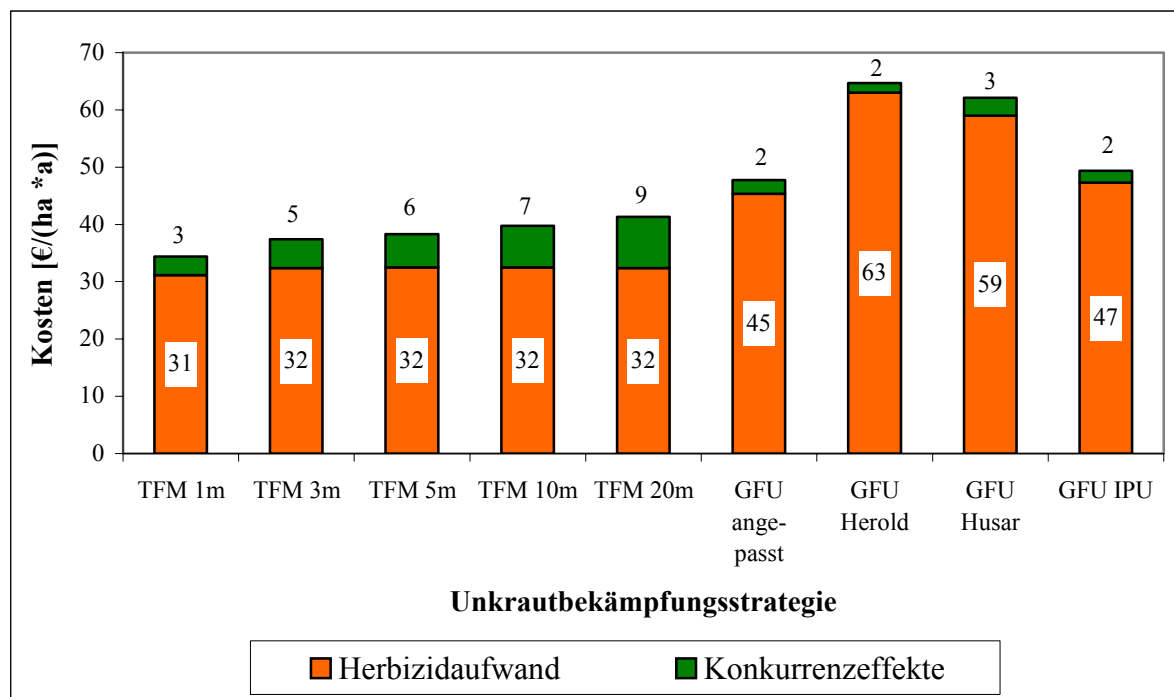
Quelle: Eigene Berechnungen

Wählt man als Referenz zur Beurteilung von *precision farming* in der Unkrautkontrolle anstelle von „GFU angepasst“ die Standardvarianten „GFU Herold“ und „GFU Husar“, so sind die Einsparungseffekte deutlich höher. Die Frage ist jedoch, ob für Landwirte, die relativ teure Herbizide prophylaktisch applizieren, nicht die Möglichkeit besteht, bevor sie in teure *precision farming* Technik investieren, ihre Unkrautkontrolle an die zeitliche Variabilität der Unkrautdynamik anzupassen. Ein Großteil der möglichen Kosteneinsparungen wäre durch diese Maßnahme bereits erzielbar. Bei den obigen Betrachtungen wurden die zusätzlichen Kosten der *precision farming* Technik noch nicht berücksichtigt. Diese werden in Kapitel 7

berechnet und betragen zwischen 10 und 20 €/ha, so dass aus den bisherigen Ergebnissen deutlich wird, dass Teilflächenunkrautbekämpfung nur dann mit einem ökonomischen Vorteil verbunden ist, wenn tatsächlich prophylaktische Ganzflächenbehandlungsstrategien ohne IPU („GFU Herold“ oder „GFU Husar“) die Referenz bilden.

Anders sieht es bei den Herbizidaufwendungen aus. Im Mittel können über alle Modellexperimente ca. 13 € ha⁻¹ Jahr⁻¹ an Herbiziden im Vergleich zu „GFU angepasst“ (second best) eingespart werden. Dies entspricht in etwa 30 Prozent. Wie gesagt werden diese Herbizidkosteneinsparungen jedoch durch erhöhte Konkurrenzeffekte kompensiert, so dass die Kosteneinsparungseffekte niedriger ausfallen als die Umwelteffekte. Werden diese Umwelteffekte von der Politik höher gewichtet und entsprechend honoriert (z. B. durch Ausgleichszahlungen), so könnten sich die Ergebnisse zugunsten von *precision farming* verschieben.

Abbildung 33: Herbizidaufwand und Konkurrenzeffekte bei unterschiedlichen Bekämpfungsstrategien

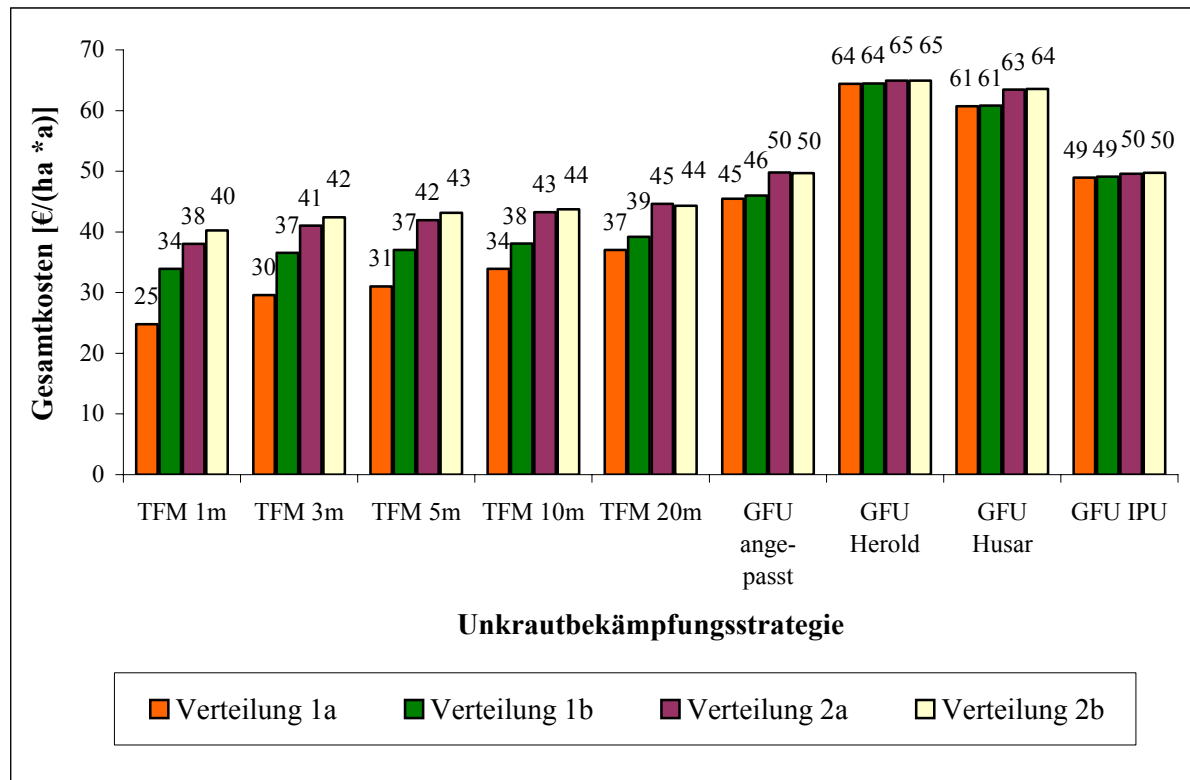


Quelle: Eigene Berechnungen

6.2.1.1 Bedeutung der Anfangsverunkrautung auf das Modellergebnis

Die Startverunkrautungen unterscheiden sich hinsichtlich der Wahrscheinlichkeiten, mit denen bestimmte Unkrautdichtewerte vorkommen und darin, dass im einen Fall angenommen wurde, dass Unkrautzellen tatsächlich frei von bestimmten Unkrautsamen sind und im anderen Fall diesen Zellen geringe Samengehaltswerte zugewiesen wurden. Die 4 Unkrautkarten (4 unterschiedlich große Unkrautnester), die jeweils die Bezeichnung 1a bzw. 2a besitzen, wurden mit Hilfe der Wahrscheinlichkeitsverteilungen 1a und 2a erzeugt. Diese Anfangsunkrautverteilungen besitzen unkrautsamenfreie Zellen, wobei die Karten, die auf die Wahrscheinlichkeitsverteilung 2a zurückgehen, homogener sind und durch einen geringeren Anteil an unkrautsamenfreien Zellen gekennzeichnet sind. Die Unkrautkarten mit der Bezeichnung 1b bzw. 2b wurde von den Unkrautkarten 1a bzw. 2a abgeleitet, indem 0-Werte durch niedrige Samengehalte substituiert wurden (siehe Abschnitt 5.5.4). In Abbildung 34 wird gezeigt, wie hoch die Gesamtkosten in Abhängigkeit von der Unkrautbekämpfungsstrategie für die unterschiedlichen Startverunkrautungen sind. Es zeigt sich, dass bei allen teilflächenspezifischen Unkrautbekämpfungsstrategien – insbesondere bei denen mit hoher Präzision – die Häufigkeitsverteilung der Startverunkrautung große Auswirkungen auf die Gesamtkosten hat. Bei den prophylaktischen GFU-Varianten sind die Effekte hingegen marginal bzw. nicht nachweisbar. Die Variante „GFU angepasst“ nimmt eine Mittelstellung ein. Für die Frage, ob TFU ökonomisch vorteilhaft ist oder nicht, kommt also der Häufigkeitsverteilung der Unkräuter eine hohe Bedeutung zu. Teilflächenunkrautbekämpfung ist umso vorzüglicher

- je höher der Anteil an Feldbereichen ist, die unkrautfrei sind und
- je heterogener die Unkrautverteilung ist.

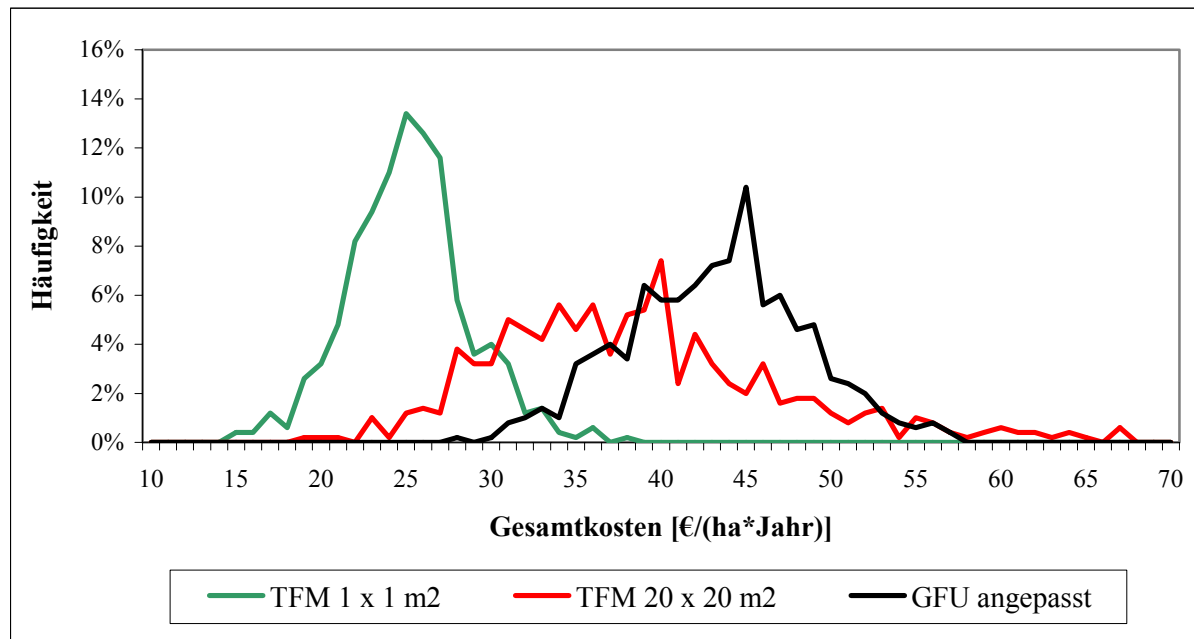
Abbildung 34: Gesamtkosten für unterschiedliche Häufigkeitsverteilungen der Unkräuter

Quelle: Eigene Berechnungen

6.2.1.2 Häufigkeitsverteilung der Modellergebnisse

Im Folgenden soll anhand eines Beispiels die Frage untersucht werden, wie groß die Streuung der Modellergebnisse ist und ob Teilflächenunkrautbekämpfung mit einem erhöhten Produktionsrisiko verbunden ist. In Abbildung 35 sind die Gesamtkosten für die Verteilung 1a mit einer Nestergröße von 267 Zellen für einen 12-jährigen Simulationszeitraum für 3 unterschiedliche Bekämpfungsstrategien dargestellt. Eine teilflächenspezifische Unkrautbekämpfung im Raster 1 x 1 m² hat durchschnittliche Gesamtkosten in Höhe von 25 € ha⁻¹ Jahr⁻¹ zur Folge. Erfolgt die Teilflächenunkrautbekämpfung im Raster 20 x 20 m², so steigen die Kosten auf 38 € ha⁻¹ Jahr⁻¹. Die Strategie „GFU angepasst“ verursacht durchschnittliche Kosten in Höhe von 43 € ha⁻¹ Jahr⁻¹. Aus diesen Ergebnissen kann man zunächst ableiten, dass TFU auch im Raster 20 x 20 m² positive Leistungen (5 € ha⁻¹ Jahr⁻¹) zur Folge hat. Im Einzelfall bzw. in einzelnen Jahren können diese Leistungen aber auch negativ sein. Dies wird in Abbildung 35 gezeigt. In etwa 10 % der Fälle liegen die Kosten von TFU über denen der angepassten Ganzflächenunkrautbekämpfung.

Abbildung 35: Häufigkeitsverteilungen der durchschnittlichen Gesamtkosten (12 Jahre) für die Ausgangsverteilung 1a mit einer Unkrautnestergröße von 267 Zellen



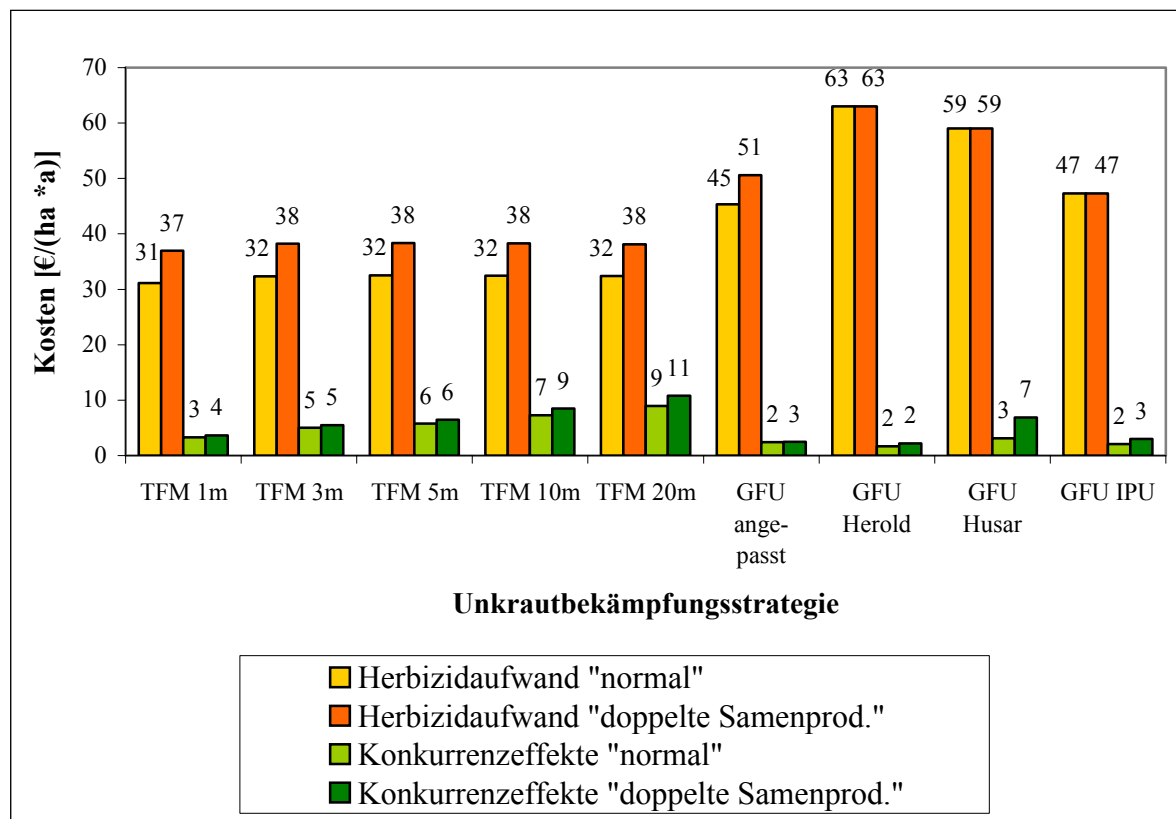
Quelle: Eigene Berechnungen

6.2.1.3 Auswirkungen einer erhöhten Samenproduktion

Durch einen weiteren Modelldurchlauf wird gezeigt, wie sich die Konkurrenzeffekte und die Herbizidaufwendungen verändern, wenn davon ausgegangen wird, dass die Unkrautsamenproduktion für alle Unkrautklassen verdoppelt wird (siehe Abbildung 36). Bei allen teilflächenspezifischen Varianten und bei der Ganzflächenvariante „GFU angepasst“ steigen die Herbizidaufwendungen einheitlich um $6 \text{ € ha}^{-1} \text{ Jahr}^{-1}$. Die Konkurrenzeffekte werden durch die erhöhte Samenproduktion ebenfalls leicht erhöht; sie steigen bei den Teilflächenvarianten mit niedrigerer Präzision erwartungsgemäß etwas stärker als bei Teilflächenunkrautbekämpfung mit hoher Genauigkeit. Bei den prophylaktischen ganzflächigen Unkrautbekämpfungsstrategien bleiben die Herbizidkosten annahmengemäß konstant. Die Konkurrenzeffekte erhöhen sich bei den Varianten „GFU Herold“ und „GFU IPU“ nur gering. Bei der Variante „GFU Husar“ steigen die Konkurrenzeffekte hingegen um einen größeren Betrag, was dadurch zu erklären ist, dass bei den Varianten „GFU Herold“ und „GFU IPU“ die Gräserbekämpfung im Herbst und die Bekämpfung dikotyler Unkräuter im Frühjahr erfolgt. Diese Unkrautbekämpfung an zwei unterschiedlichen Terminen hat den Vorteil, dass beispielsweise „ungünstige“ Witterungsbedingungen im Herbst mit „günstigen“ Anwendungsbedingungen im Frühjahr zusammenfallen können und vice versa, so dass es zu

einem Risikoausgleich kommt. Dieser Ausgleich kann bei der Variante „GFU Husar“ nicht stattfinden, da hier die Unkrautbekämpfung ausschließlich im Frühjahr erfolgt. Die Konkurrenzeffekte steigen in dieser Variante deshalb bei einer Erhöhung der Unkrautsamenproduktion stärker als in den Varianten „GFU Herold“ und „GFU IPU“. Die absoluten Differenzen zwischen Teilflächenunkrautbekämpfung und „GFU angepasst“ ändern sich durch die erhöhte Samenproduktion nicht. Die Kostendifferenzen zwischen Teilflächenunkrautbekämpfung und den prophylaktischen Ganzflächenvarianten verringern sich bei erhöhter Samenproduktion.

Abbildung 36: Gegenüberstellung von Herbizidaufwand und Konkurrenzeffekten bei „normaler“ Unkrautsamenproduktion und verdoppelter Samenproduktion in Abh. von der Unkrautbekämpfungsstrategie



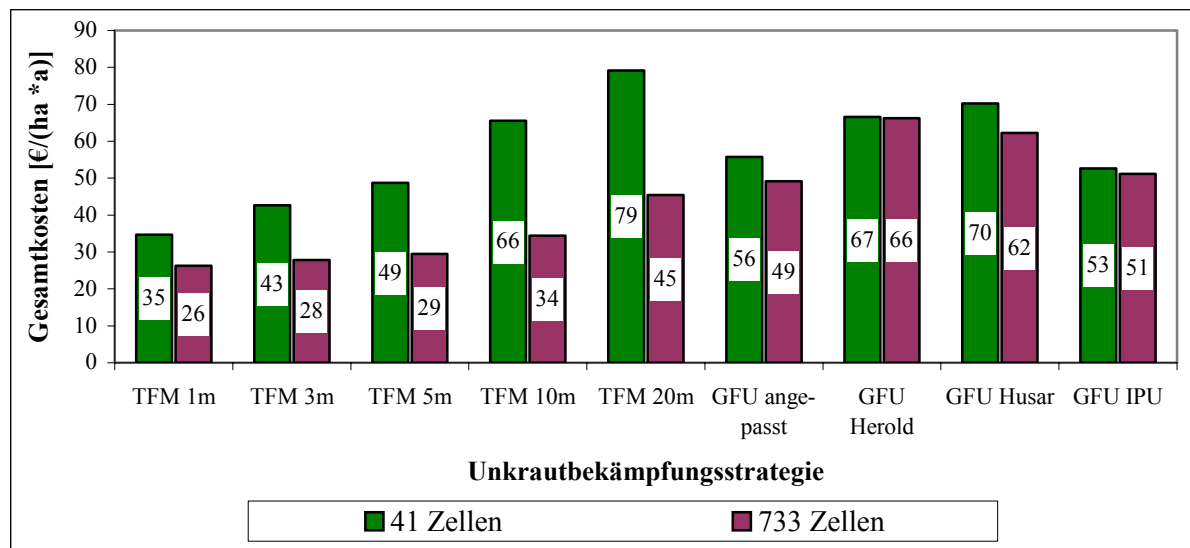
Quelle: Eigene Berechnungen

6.2.1.4 Weitere negative Effekte durch Unkräuter

Neben Konkurrenzeffekten sind im Programm keine weiteren negativen Effekte durch Unkräuter (erhöhte Trocknungskosten, Erntebehinderungen etc. siehe Abschnitt 5.2)

berücksichtigt worden. Im folgenden Szenario wird deshalb untersucht, wie sich die Modellergebnisse verändern, wenn neben einer verdoppelten Unkrautsamenproduktion weiteren negativen Effekte berücksichtigt werden. Da davon auszugehen ist, dass das Risiko für erhöhte Trocknungs- und Reinigungskosten und Erntebehinderungen zumindest tendenziell von der Unkrautdicke abhängt, werden für die folgenden Berechnungen die Konkurrenzindizes verdoppelt. In Abbildung 37 sind die Ergebnisse für die Ausgangsverteilung 1a für eine gering aggregierte (Nestergröße: 41 Zellen) und eine stark aggregierte (Nestergröße: 733 Zellen) Ausgangsverteilung dargestellt. Ist die Unkrautverteilung stark aggregiert (lila Balken) und die *precision farming*-Anwendung räumlich hoch aufgelöst, so lassen sich auch bei Berücksichtigung möglicher weiterer negativer Effekte und einer vermehrten Samenproduktion noch Kosteneinsparungen realisieren. Liegen diese Voraussetzungen jedoch nicht vor – die Unkrautnester haben nur eine durchschnittliche Größe von 41 Zellen (grüne Balken) und die Unkrautbekämpfung erfolgt mit einer räumlichen Auflösung $\geq 5 \times 5 \text{ m}^2$ – so führt Teilflächenunkrautbekämpfung im Vergleich zu „GFU angepasst“ zu höheren Kosten. Eine Teilflächenunkrautbekämpfung im Raster $20 \times 20 \text{ m}^2$ führt bei diesen Modellannahmen zu den höchsten Kosten.

Abbildung 37: Gesamtkosten bei Annahme einer verdoppelten Samenproduktion und verdoppelter Konkurrenzeffekte für die Ausgangsverteilung 1a

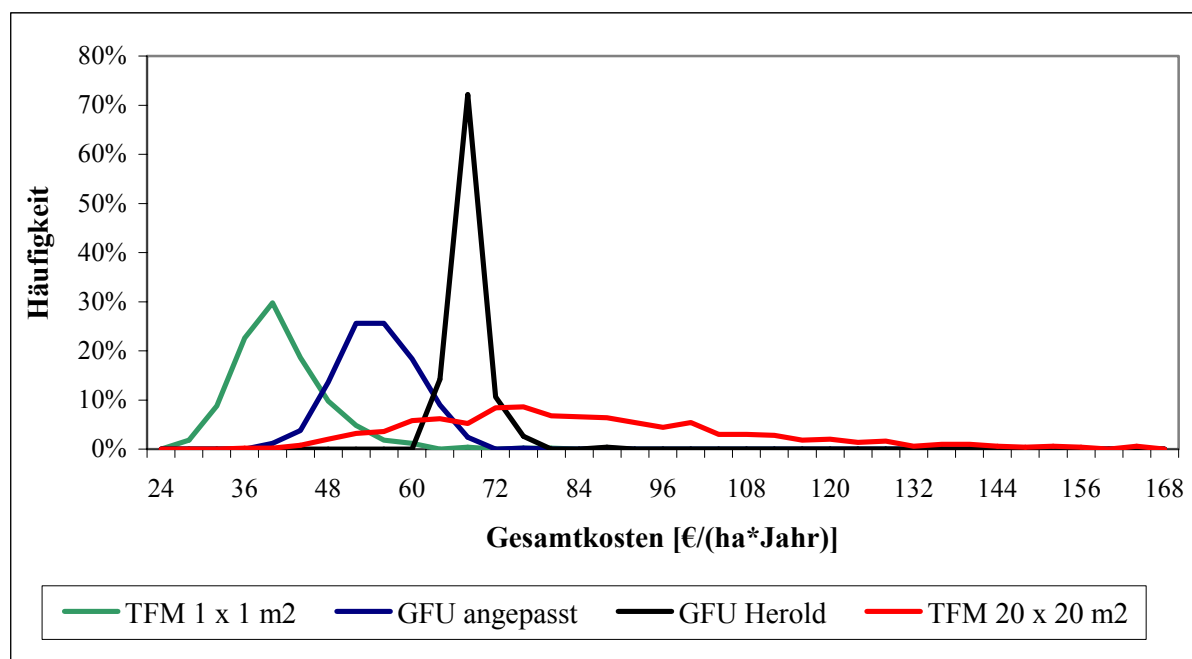


Quelle: Eigene Berechnungen

Betrachtet man darüber hinaus die Verteilung der Ergebnisse (siehe Abbildung 38) für unterschiedliche Unkrautbekämpfungsstrategien, so zeigen die Gesamtkosten bei einer

prophylaktischen Unkrautbekämpfung (GFU Herold) die geringste Streuung. Die Varianten „TFU 1 x 1 m²“ und „GFU angepasst“ zeigen im Vergleich zwar eine etwas höhere Standardabweichung, liegen jedoch deutlich unter den Kosten von „GFU Herold“, so dass diese Strategien trotz der leicht vergrößerten Standardabweichung überlegen sind. Anders sieht es bei einer Teilflächenunkrautbekämpfung im Raster 20 x 20 m² aus. Zum einen sind die durchschnittlichen Kosten deutlich höher als die bei flächeneinheitlichen Unkrautbekämpfungen (siehe Abbildung 37), zum anderen ist das Risiko im Vergleich zu den anderen Verfahren deutlich größer. Mit einer Wahrscheinlichkeit von 20 % liegen die jährlichen Kosten bei der Variante „TFU 20 x 20 m²“ bei über 100 € ha⁻¹ Jahr⁻¹. Hierbei handelt es sich, wie gesagt, um die verrenteten Kosten für die gesamte Planungsperiode (siehe Abschnitt 5.6). In Einzeljahren können die Kosten noch um größere Beträge schwanken.

Abbildung 38: Häufigkeitsverteilungen der durchschnittlichen Gesamtkosten (12 Jahre) für die Ausgangsverteilung 1a mit einer Unkrautnestergröße von 267 Zellen bei Annahme einer verdoppelten Unkrautsamenproduktion und verdoppelter Konkurrenzindizes



Quelle: Eigene Berechnungen

6.2.1.5 Verminderte Herbizidwirkung

Im Folgenden soll gezeigt werden, welche Auswirkungen von einer verminderten Herbizidwirkung ausgehen. Die mittleren Herbizidwirkungen aller Herbizide wurden gegen

alle Unkräuter um 10%-Punkte reduziert (siehe Tabelle 31), alle anderen Parameter bezüglich der Samenproduktion und der Konkurrenzeffekte entsprechen den Standardwerten.

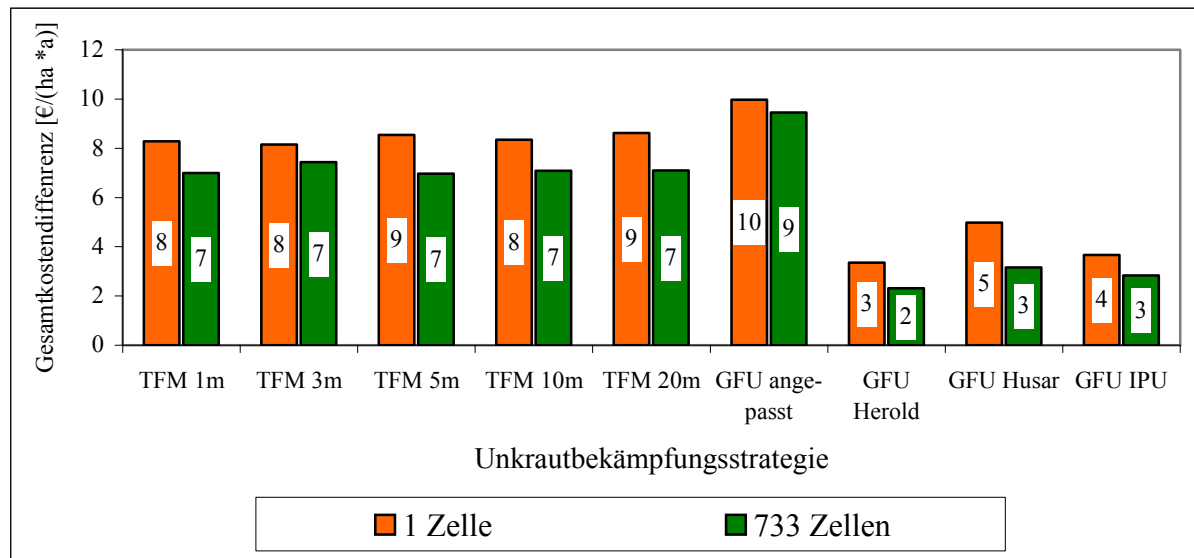
Tabelle 31: Herbizidparameter für Simulationsrechnungen mit reduzierten Wirkungsgraden

Unkrautklasse Herbizid	Windhalm	dikotyle Unkräuter	Kletten- labkraut	Vogel- knöterich
Husar	85%	70%	60%	65%
Duplosan + Gropper	5%	85%	30%	85%
Primus	0%	60%	85%	20%
IPU + Stomp	80%	60%	20%	60%
Herold	85%	60%	20%	60%

Quelle: Eigene Annahmen

In Abbildung 39 wird gezeigt, welche Effekte von dieser Annahme ausgehen. Verminderte Herbizidwirkungen führen vor allem bei den teilflächenspezifischen Unkrautbekämpfungsstrategien und der Strategie „GFU angepasst“ zu erhöhten Kosten. Bei den prophylaktischen Ganzflächenstrategien steigen die Kosten bei geringeren Wirkungsgraden der Herbizide deutlich schwächer an. Mit anderen Worten sind Unkrautbekämpfungsstrategien, die sich nach dem tatsächlichen Unkrautauflauf richten, nur bei hohen Bekämpfungsraten der Herbizide ökonomisch sinnvoll.

Abbildung 39: Kostendifferenzen der durchschnittlichen jährlichen Gesamtkosten bei Annahme verminderter herbizider Wirkungsgrade



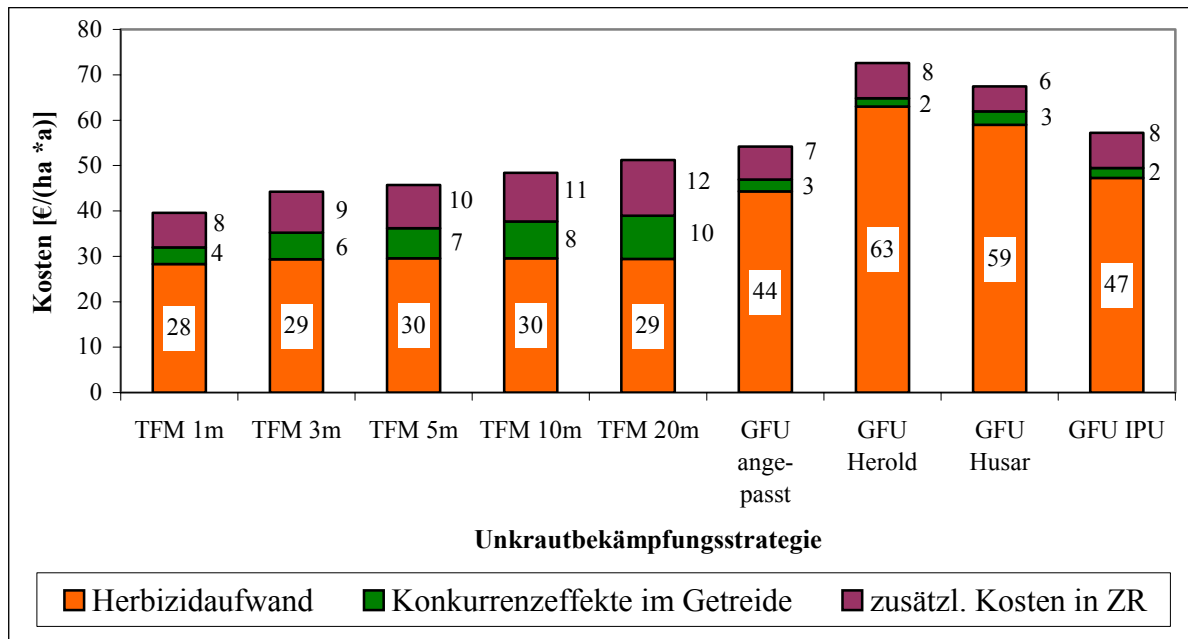
Quelle: Eigene Berechnungen

6.2.2 Modellergebnisse für die Fruchtfolge WW, WW, WW, ZR

In Abbildung 40 sind die Modellergebnisse für eine Fruchtfolge dargestellt, in der in jedem vierten Jahr Winterweizen durch Zuckerrüben ersetzt wird. Vor allem bei den Teilflächenstrategien mit verminderter Präzision muss der Herbizidaufwand in den Zuckerrüben deutlich erhöht werden, so dass der teilflächenspezifischen Unkrautbekämpfung im Getreide bis zu $12 \text{ € ha}^{-1} \text{ Jahr}^{-1}$ (TFM $20 \times 20 \text{ m}^2$) angelastet werden müssen. Auch bei flächeneinheitlicher Unkrautbekämpfung im Getreide ist nach den Modellberechnungen eine Unkrautbekämpfung in Zuckerrüben mit einer Standardlösung nicht in jedem Jahr zu realisieren, so dass auch hier der Unkrautbekämpfung im Getreide zusätzliche Kosten, die durch die notwendige Unkrautbekämpfung in Zuckerrüben entstehen, angelastet werden müssen. Die Beträge fallen bei den Ganzflächenvarianten jedoch geringer aus, so dass sich die Kostendifferenzen zwischen teilflächenorientierter und flächeneinheitlicher Unkrautbekämpfung bei Berücksichtigung von Zuckerrüben verringern. Dies ist vor allem bei den Teilflächenvarianten mit geringer Präzision der Fall, so dass bei Fruchtfolgen mit unkrautempfindlichen Kulturen (hier: Zuckerrüben) höhere Ansprüche an die Auflösungsgüte einer räumlich differenzierten Unkrautbekämpfung gestellt werden müssen. In den flächeneinheitlichen Varianten „GFU Herold“ und „GFU IPU“ zeigen sich größere Effekte bei den zusätzlichen Herbizidverbräuchen in Zuckerrüben als bei der Variante „GFU Husar“.

Dies liegt daran, dass die Bekämpfungsleistung gegen die dikotyle Verunkrautung und gegen Vogelknöterich in den beiden erstgenannten Strategien geringer ausfällt.

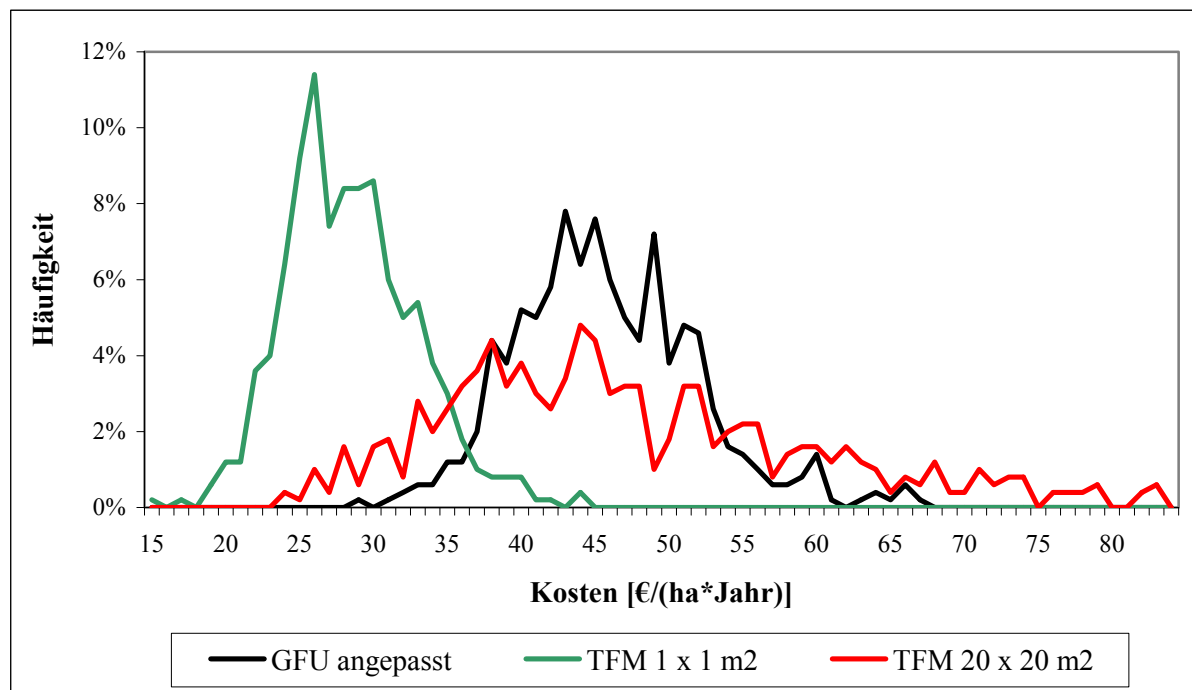
Abbildung 40: Herbizidaufwand, Konkurrenzeffekte im Getreide und zusätzliche Herbizidaufwendungen in Zuckerrüben bei unterschiedlichen Bekämpfungsstrategien



Quelle: Eigene Berechnungen

In Abbildung 41 sollen die Häufigkeitsverteilungen der Modellergebnisse ebenfalls an einem Beispiel (Verteilung 1a, Unkrautnestergröße: 267 Zellen, Simulationszeit 12 Jahre) betrachtet werden. Die Variante „TFU 1 x 1 m²“ verursacht Kosten in Höhe von 28 € ha⁻¹ Jahr⁻¹, so dass im Vergleich zur günstigsten flächeneinheitlichen Unkrautbekämpfung (GFU angepasst) 17 € ha⁻¹ Jahr⁻¹ eingespart werden können. Wird die TFU jedoch räumlich zu grob aufgelöst durchgeführt („TFM 20 x 20 m²“), so betragen die durchschnittlichen Kosten 47 € ha⁻¹ Jahr⁻¹ und liegen damit bereits über denen von „GFU angepasst“. Betrachtet man die Häufigkeitsverteilungen der Ergebnisse, so wird darüber hinaus deutlich, dass die Streuung der Ergebnisse der grob aufgelösten TFU deutlich größer ist als die der angepassten Ganzflächenstrategie. Mit anderen Worten steigen bei einer Verminderung der räumlichen Auflösung der TFU nicht nur die durchschnittlichen Kosten, sondern auch das Risiko.

Abbildung 41: Häufigkeitsverteilungen der durchschnittlichen Gesamtkosten (12 Jahre) für die Ausgangsverteilung 1a mit einer Unkrautnestergröße von 267 Zellen, für die Fruchtfolge WW, WW, WW, ZR in Abh. von drei unterschiedlichen Unkrautbekämpfungsstrategien



Quelle: Eigene Berechnungen

6.2.3 Besteuerung von Herbiziden bzw. höhere Mittelpreise

In allen Simulationsexperimenten ohne Zuckerrüben war es möglich, durch Teilflächenunkrautbekämpfung Herbizidaufwendungen einzusparen, so dass durch höhere Herbizidpreise TFU deutlich vorzüglicher werden würde. Diese These dürfte auch bei Fruchtfolgen mit Zuckerrüben Gültigkeit haben, solange von einer hohen Präzision der TFU ausgegangen wird. Bei verminderter Präzision führt TFU zu einer erhöhten Unkrautbekämpfungsintensität in Zuckerrüben. Da in Zuckerrüben ein deutlich höherer Aufwand an Herbiziden notwendig ist, würden sich Preiserhöhungen bzw. Pflanzenschutzsteuern hier deutlich stärker niederschlagen, so dass damit zu rechnen ist, dass durch höhere Mittelpreise in einem solchen Fall mit einer Schlechterstellung von TFU zu rechnen ist.

Sollte es in Zukunft jedoch möglich sein, TFU mit hoher Präzision durchführen zu können und auch in Zuckerrüben Unkräuter teilflächenorientiert zu regulieren, so würden höhere Pflanzenschutzmittelpreise eindeutig die Vorzüglichkeit von TFU erhöhen.

6.3 Zusammenfassung: Leistungen der TFU

Das Leistungspotenzial von TFU, definiert als die Kostendifferenz zwischen TFU und GFU, hängt stark von der räumlichen Präzision der Unkrauterkennung und Herbizidapplikation ab. Nennenswerte Kosteneinsparungen können nur dann realisiert werden, wenn größere Anteile des Feldes frei von Unkrautsamen sind und die Teilflächen mit unterschiedlichen Unkrautdichten (Unkrautnester) so groß sind, dass hierauf reagiert werden kann. Je höher die Wirkungsgrade der Herbizide sind, desto vorzüglicher sind angepasste Unkrautbekämpfungsstrategien. Diese Aussage trifft sowohl für *precision farming* als auch für Ganzflächenapplikationen mit einer Berücksichtigung der zeitlichen Variabilität der Unkrautdynamik zu. Die Annahme einer erhöhten Unkrautsamenproduktion und erhöhter Konkurrenzeffekte führt zu einer deutlichen Schlechterstellung von TFU. Beinhaltet die Fruchtfolge unkrautempfindlicher Kulturen (z. B.: Zuckerrüben), so steigen die Anforderungen an die Präzision einer räumlich differenzierten Unkrautbehandlung.

Sind die Unkrautverteilungen stark aggregiert und sind die Unkrauthäufigkeiten sehr heterogen (hohe Anteile unkrautfreier Teilbereiche), so ist eine teilflächenspezifische Unkrautbekämpfung im Raster 3 x 3 m² oder 5 x 5 m² möglich. Wie hoch die Kosteneinsparungen und Herbizidreduktionen letztlich sind, hängt von der gewählten Referenz der GFU ab. Ein Landwirt wird stets die günstigste mögliche Alternative für einen Vergleich wählen. Besteht beispielsweise die Möglichkeit, IPU im Herbst ganzflächig zu applizieren, so sind die potenziellen Einspareffekte durch TFU deutlich geringer als wenn teurere Vergleichsprodukte verwendet werden müssen. Die Herbizidkostenreduktionen sind in allen Fällen höher als die Gesamtkostenreduktionen, so dass der durch TFU ausgelöste Umwelteffekt den Kosteneinspareffekt übertrifft. In den Modellkalkulationen konnten durch TFU im Getreide längerfristig zwischen –25 und +40 €/ha eingespart werden. Die Herbizidkostenreduktionen lagen zwischen 20 und 50 %. Ob diese realisierten Leistungen ausreichen, um die zusätzlichen Kosten der variablen Ratentechnik zu decken, hängt davon ab, zu welchen Preisen diese Techniken einmal verfügbar sein werden.

7 Kosten der zusätzlichen *precision farming* Technik

Die Kosten für die teil- und ganzflächige Applikation von Pflanzenschutzmitteln werden durch die Maschinen- und Lohnkosten bestimmt. Diese hängen in starkem Maße von der Flächenleistung ab, welche neben der Maschinenkonfiguration, den Befüll- und Wegezeiten durch die Schlaggröße und Schlagform beeinflusst wird. Eine Dreikammerspritze und ein automatisches Unkrauterkennungssystem existieren nur als Prototypen für Versuchszwecke. Aktuell werden keine praxistauglichen Verfahren zur teilschlagspezifischen Unkrautkontrolle auf dem Markt angeboten (SÖKEFELD, 2004, S. 50). Im Folgenden kann deshalb nur eine Schätzung der zu erwartenden Kosten bei Serienproduktion durchgeführt werden.

7.1 Anschaffungs-, Versicherungs und Reparaturkosten

Einige Bauteile einer Dreikammerspritze, wie Rahmen, Bereifung, Druckluftbremse etc. entsprechen denen einer üblichen Anhängerspritze. Das Gestänge der Dreikammerspritze wird aufgrund des höheren Gewichtes durch das 3-fache Leitungssystem ebenso wie der Behälter, der aufgrund der Unterteilung in mehrere Kammern einen aufwendigeren Aufbau besitzt, teurer ausfallen. Andere Bauteile, wie das Leitungs-, Pumpen-, Düsen und Steuersystem, liegen bei der Mehrkammerspritze in dreifacher Form vor, so dass entsprechend dreimal höhere Kosten entstehen. Insgesamt kann davon ausgegangen werden, dass eine Dreikammerspritze grob doppelt so teuer ist wie eine herkömmliche Anhängerspritze. Da die Versicherung und auch die Reparaturkosten mehr oder weniger proportional zum Anschaffungswert sind, sind diese Kostenpositionen im Vergleich zu einer herkömmlichen Anhängerspritze ebenfalls zu verdoppeln.

Es wird davon ausgegangen, dass die Dreikammerspritze durch ein Umpumpen zwischen den einzelnen Kammern problemlos für eine ganzflächige PSM-Applikation verwendet werden kann.

7.2 Notwendiger Wasseraufwand, Nachfüllzeiten

Bei der Teilflächenapplikation kann durch hohe Flächenanteile, die nicht behandelt werden müssen, die Flächenleistung erhöht sein, da die Pflanzenschutzspritze seltener nachgefüllt werden muss. Auf der anderen Seite müssen alle Herbizidbrühen in jedem Einzeltank mit

soviel Wasser angemischt sein, dass die Benetzung der Zielfläche ausreichend ist. Dies bedeutet, dass Teilflächen, die mit mehreren Wirkstoffen behandelt werden müssen, auch ein entsprechend Vielfaches des sonst üblichen Wasservolumens erhalten. Je nachdem, ob der zuerst oder der zuletzt geschilderte Fall überwiegt, wird der Wasseraufwand bei einer Teilflächenapplikation höher oder niedriger sein als bei einer Ganzflächenapplikation. Tendenziell ist jedoch zu erwarten, dass die Nachfüllhäufigkeit bei der Mehrkammerspritze zunimmt, da immer dann, wenn der erste Tank leer ist, die Pflanzenschutzspritze neu befüllt werden muss. Um aufzuzeigen, mit welchen Mehrkosten zu rechnen ist, wenn der Arbeitszeitbedarf bei der Teilflächenapplikation durch vermehrte Befüllzeiten erhöht ist, wird bei den Kostenkalkulationen einmal von konstantem und einmal von einem geringfügig erhöhten Arbeitsbedarf ausgegangen. Bei einer Herbizidmaßnahme im Frühjahr im Getreide werden in der Regel 200 l/ha Wasser verwendet, so dass anhand von KTBL-Angaben die notwendigen Arbeitszeiten/ha bestimmt werden können. Um die potenziell verminderte Flächenleistung einer Teilflächenapplikation ebenfalls anhand von KTBL-Angaben abbilden zu können, wird unterstellt, dass eine Teilflächenapplikation vergleichbar ist mit einer Ganzflächenapplikation mit einem Wasseraufwand von 400 l. In allen Fällen wird davon ausgegangen, dass die Befüllung der Pflanzenschutzspritze am Feldrand erfolgt. Anderenfalls wären die Mehrkosten durch häufigeres Befüllen deutlich höher, da bei jedem Befüllen weitere Wegezeiten berücksichtigt werden müssten.

7.3 Kostenkalkulation

Anhand der Daten der Tabelle 32 werden die Ausbringungskosten kalkuliert. Die Daten für den Schlepper und die Anhängespritze wurden dem Maschinenkostenkalkulationsprogramm Makost 3.0 entnommen. In Makost werden die Kosten für die Pflanzenschutzspritze auf die behandelte Fläche umgelegt. Die maximale Flächenleistung/Jahr hängt von der maximal für diese Arbeit zur Verfügung stehenden Arbeitszeit und der Flächenleistung ab. Da die Flächenleistung neben der Maschinenkonfiguration von der Größe (und Form) der Flächen abhängt und dies bei den weiteren Überlegungen berücksichtigt werden soll, werden die Kosten nicht auf die Fläche, sondern auf die Zeit (h) umgelegt. Es wird unterstellt, dass insgesamt ein Arbeitsvolumen für Pflanzenschutzarbeiten in Höhe von 350 h/Jahr (35 Tage à 10 h) zur Verfügung steht. Bei leistungsabhängiger Abschreibung sind die Abschreibungsbeträge zu den variablen und damit entscheidungsrelevanten Kosten zu zählen.

Die Ausbringungskosten bei herkömmlicher Ganzflächenapplikation betragen demnach für die gewählte Maschinenkonfiguration und Lohnkosten von 15 €/h:

$$17,92 \text{ €/h} + 18,30 \text{ €/h} + 15,00 \text{ €/h} = 51,22 \text{ €/h.}$$

Vor der Investitionsentscheidung, die Unkrautbekämpfung in Zukunft nicht mehr einheitlich sondern teilflächenspezifisch durchzuführen, sind die gesamten zusätzlichen Kosten der *precision farming* Technik entscheidungsrelevant. Da die Anschaffungskosten einer Dreikammerspritze annahmengenmäßig doppelt so hoch sind wie die der konventionellen Anhängespritze, werden zur Berechnung der Kostendifferenz die Anschaffungs-, die Reparatur- und die Versicherungskosten der herkömmlichen Pflanzenschutzspritze herangezogen (siehe Tabelle 32). Es wird unterstellt, dass an 150 h/Jahr (10 Tage à 10 h) eine Teilflächenunkrautbekämpfung möglich ist. Da von einem *online*-System (Unkrauterkenner und Herbizidapplikation in einem Arbeitsgang) ausgegangen wird, beträgt die jährliche Auslastung der automatischen Unkrauterkenner ebenfalls 150 h/Jahr. Die Anschaffungskosten für die automatische Unkrauterkenner wurden mit 20.000 € und die Versicherungskosten mit 70 €/Jahr geschätzt. Von Reparaturkosten für die elektronische Unkrauterfassung wurde abstrahiert. Auf Grund des im elektronischen Bereich schnell voranschreitenden technischen Fortschritts wurde jedoch von einer Nutzungsdauer von lediglich 5 Jahren und einem Restwert von 0 € ausgegangen.

Geht man weiter davon aus, dass das Befüllen der Pflanzenschutzspritze bei einer Mehrkammerspritze genauso lange dauert, wie bei einer mit nur einem Behälter und dass keine zusätzliche Arbeitszeit anfällt zur Erstellung von Unkrautkarten, da dies vollautomatisch und *online* stattfindet, so betragen die zusätzlichen und damit entscheidungsrelevanten Kosten für eine teilflächenspezifische Unkrautbekämpfung: $43,40 \text{ €/h} + 30,50 \text{ €/h} = 73,90 \text{ €/h.}$

Tabelle 32: Ausbringungskosten für PSM

		Allradtraktor 75- 92 kW	Anhänge- spritze 4000 l, 36 m	Zusatz- investition Dreikammer- spritze	Auto- matische Unkraut- erkennung
Anschaffungspreis	[€]	56840	44080	44080	20000
Restwert	[€]	1098	1	1	0
Versicherung	[€/Jahr]	400	144	144	77
Betriebsstoffe	[€/h]	6,35	0	0	0
Reparaturen	[€/h]	6	5,7	5,7	0
Nutzungsdauer	[Jahre]	10	10	10	5
jährliche Nutzung	[h/Jahr]	1000	350	150	150
Jahreskosten					
Abschreibung	[€/Jahr]	5574	4408	4408	4000
Zinsansatz	[€/Jahr]	1448	1102	1102	500
Versicherung	[€/Jahr]	400	144	144	77
Reparaturen	[€/Jahr]	6000	2000	855	0
Betriebsstoffe	[€/Jahr]	6350			
Gesamtkosten	[€/Jahr]	19772	7654	6509	4577
Kosten je h					
Abschreibung	[€/h]	5,57	12,6	29,4	26,7
Zinsansatz	[€/h]	1,45	3,1	7,3	3,3
Versicherung	[€/h]	0,4	0,4	1,0	0,5
Reparaturen	[€/h]	6	5,7	5,7	0,0
Betriebsstoffe	[€/h]	6,35	0,0	0,0	0,0
Gesamtkosten	[€/h]	19,77	21,9	43,4	30,5
entscheidungsrelevante Kosten					
	[€/h]	17,92	18,3	43,4	30,5

Quelle: verändert nach Makost 3.0

In Tabelle 33 ist der Arbeitszeitbedarf für ganzflächige Pflanzenschutzanwendungen (Wasseraufwand 200 l/ha und 400 l/ha) mit der gewählten Maschinenkonfiguration nach Angaben vom KTBL (2001, S. 208, 2002, S. 322) wiedergegeben. Die Befüllung der Spritze erfolgt am Feldrand. Werden nun die oben ermittelten Kostensätze je h mit den Arbeitszeitbedarfzahlen multipliziert, so ergeben sich in Abhängigkeit von der Flächengröße zusätzliche und damit entscheidungsrelevante Kosten für eine Teilflächenunkrautbekämpfung zwischen 6 und 20 €/ha (siehe Tabelle 39).

Tabelle 33: Arbeitszeitbedarf (Pflanzenschutz vom Feldrand) und Arbeiterledigungskosten Pflanzenschutz

Flächengröße [ha]	1	2	5	10	20	40	80
Zeitbedarf, 200 l [h/ha]*	0,23	0,16	0,11	0,10	0,08	0,08	0,08
Zeitbedarf, 400 l [h/ha]*	0,25	0,18	0,13	0,12	0,11	0,11	0,11
Ganzflächig 200 l [€/ha]	12	8	6	5	4	4	4
Ausbringungskosten, teilflächig, konstante Befüllzeiten [€/ha]	29	20	14	13	10	10	10
Ausbringungskosten, teilflächig erhöhte Befüllzeiten [€/ha]	31	23	16	15	14	14	14
Kostendifferenz gleiche Befüllzeiten [€/ha]	17	12	8	7	6	6	6
Kostendifferenz erhöhte Befüllzeiten [€/ha]	20	14	11	10	10	10	10

Quelle: Eigene Berechnungen; * KTBL, 2001, S. 208 und 2002, S. 322

Diese Kostenabschätzungen hängen natürlich stark von den getroffenen Annahmen ab. Vor allem die hohe Auslastung der *precision farming* Technik führt zu relativ geringen Kosten. Da, wie oben bereits geschildert, tendenziell mit ansteigenden Befüllzeiten bei TFU zu rechnen ist, stellen die Kostendifferenzen in der letzten Zeile realistischere Einschätzungen dar, so dass je nach Flächengröße mit Mehrkosten zwischen 10 und 20 €/ha gerechnet werden muss.

8 Versuche zur teilflächenspezifischen Unkrautbekämpfung auf einem Praxisbetrieb

NORDMEYER führte im Auftrag der BBA von 1999 bis 2003 Versuche zur praktischen Umsetzung von Teilflächenunkrautbekämpfung auf einem Marktfruchtbetrieb mit einer Ackerfläche von 450 ha in der Hildesheimer Börde (Domäne St. Ludgeri) durch. Für die folgende Analyse werden die Betriebsaufzeichnungen von insgesamt 361 ha von 1995 bis 2003 erfasst und ausgewertet. Von den Betriebsflächen wurden 258 ha von 1995 bis 2003 durchgehend konventionell bewirtschaftet. Diese Flächen dienen als Referenz zur Beurteilung der teilflächenspezifischen Unkrautbekämpfung und werden im Folgenden als Vergleichsflächen bezeichnet. 1999 wurde auf 7 Schlägen mit insgesamt 94 ha mit den Praxisversuchen zur teilflächenspezifischen Unkrautbekämpfung begonnen. Im Jahr 2000 wurde ein weiteres Feld mit in den Versuch integriert, so dass ab dem Jahr 2000 103 ha Ackerfläche die Versuchsflächen bilden. Auf den Versuchsflächen wurde in Getreide eine Unkrauterhebung im Raster 25 x 36 m² durchgeführt. Die Punktinformationen wurden mit Hilfe des Kriging-Verfahrens in die Fläche interpoliert und die anschließende Herbizidapplikation erfolgte nur auf den Teilflächen, auf denen Schadschwellen überschritten waren. Da die in der Auswertung berücksichtigten 361 ha zu den besseren Flächen des Betriebes zählen, lag der Flächenstilllegungsanteil auf den Vergleichsflächen bei nur 1% und auf den Versuchsflächen bei 0%. Die betriebsnotwendige Flächenstilllegung erfolgte zu einem großen Teil in Dauerbrache auf schlecht zu erreichenden bzw. zu bewirtschaftenden und/ oder weniger ertragreichen Flächen. Das Anbauprogramm auf den Versuchs- und Vergleichsflächen stimmt weitestgehend überein (siehe Tabelle 34).

Tabelle 34: Fruchtfolgeanteile von 1999 bis 2003

	Vergleichsflächen	Versuchsflächen
Winterweizen	54%	58%
Wintergerste	10%	11%
Zuckerrüben	29%	29%
Brache	1%	–
Kartoffeln	6%	2%

Quelle: eigene Betriebsdatenauswertung

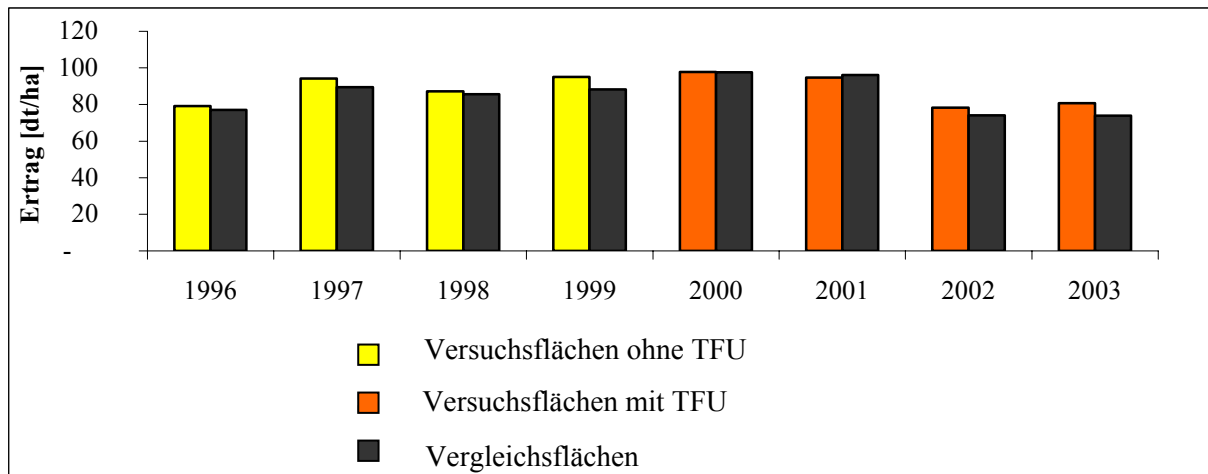
Unterschiedliche Unkrautbekämpfungsstrategien in den Getreidegliedern können durch die Samenproduktion von Unkräutern zu einer Erhöhung der Samenbank des Bodens und damit zu einem Anstieg der Unkrautdichte in den Folgekulturen führen. Da Zuckerrüben sehr ertragssensibel auf Unkrautkonkurrenz reagieren, werden Zuckerrüben mit in die Analyse einbezogen, obwohl in Zuckerrüben keine Teilflächenunkrautbekämpfung erfolgte. In jedem Versuchsjahr erfolgte auf mindestens vier Schlägen eine Teilflächenunkrautbekämpfung in Winterweizen, so dass die Datenbasis in jedem Auswertungsjahr relativ breit ist. Wintergerste hingegen wurde von 1996 bis 2003 auf den Versuchsflächen nur im Jahr 1996, 2000 und 2002 auf einem und im Jahr 1998 auf 2 Versuchsschlägen angebaut. Die Datenbasis ist deshalb für Gerste deutlich geringer als für Weizen. Zuckerrüben wurden ab 1997 in jedem Jahr auf mindestens 2 Versuchsschlägen angebaut, so dass auch hier ebenfalls von einer relativ stabilen Datenbasis ausgegangen werden kann.

8.1 Winterweizen

8.1.1 Winterweizenerträge

Die Entwicklung der Winterweizenerträge ist in Abbildung 42 dargestellt. Die gelben Balken zeigen die Erträge auf den Versuchsflächen, bevor mit der Teilflächenunkrautbekämpfung begonnen wurde. Ab 1999 erfolgte die Unkrautbekämpfung auf den Versuchsflächen teilflächenorientiert, was durch die orangen Balken gekennzeichnet ist. Nach Angaben des Betriebsleiters zählen die Versuchsflächen zu den besseren Flächen des Betriebes (DREYER, 2002, o. S.). Diese Aussage wird durch die Auswertung der Weizenerträge insofern bestätigt, als im gesamten Untersuchungszeitraum in jedem Jahr mit Ausnahme des Jahres 2001 die Erträge auf den Versuchsflächen mehr oder weniger über denen der Vergleichsflächen lagen. Mögliche negative oder positive Ertragseffekte durch das Teilflächenmanagement können aus den gemittelten Weizenerträgen nicht erkannt werden.

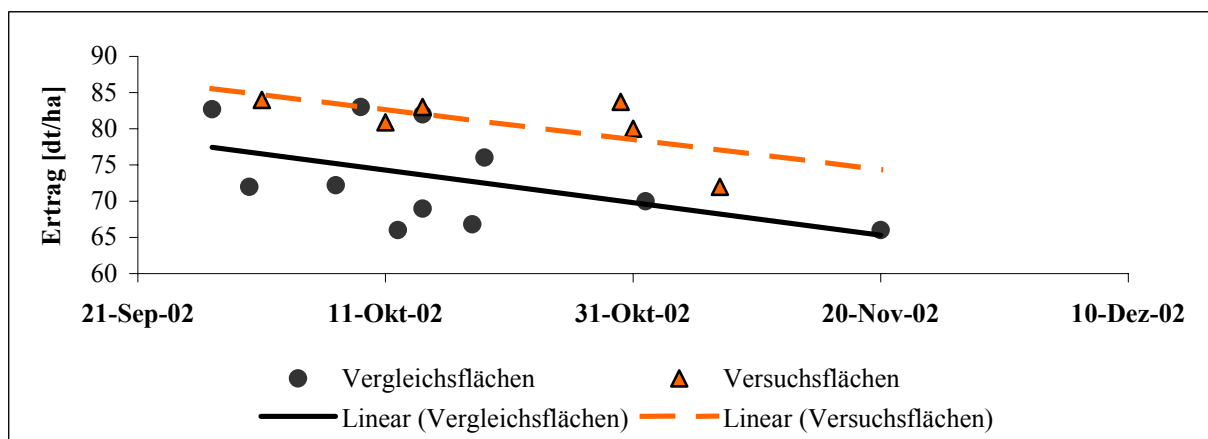
Abbildung 42: WW-Erträge von 1996 – 2003



Quelle: Betriebsdatenauswertung

Betrachtet man die Erträge auf den Versuchs- und den Vergleichsflächen separat für das Jahr 2003 (siehe Abbildung 43), so zeigt sich ein relativ deutlicher Zusammenhang zwischen dem Aussaatdatum und dem Ertrag, der sich dadurch erklären lässt, dass die Weizenpflanzen, die im Herbst ausreichend Zeit zur vorwinterlichen Entwicklung hatten, ein größeres Wurzelvolumen ausbilden konnten, so dass diese Pflanzen während der lang andauernden Frühjahrstrockenheit 2003 weniger stark unter Wassermangel litten. Darüber hinaus zeigt Abbildung 43, dass die Erträge auf den Versuchsflächen im Jahre 2003 relativ deutlich über denen der Vergleichsflächen lagen, womit die Annahme, dass das Ertragspotential auf den Versuchsflächen über dem der Vergleichsflächen liegt, unterstützt wird.

Abbildung 43: WW-Erträge 2003 in Abhängigkeit vom Aussaatdatum

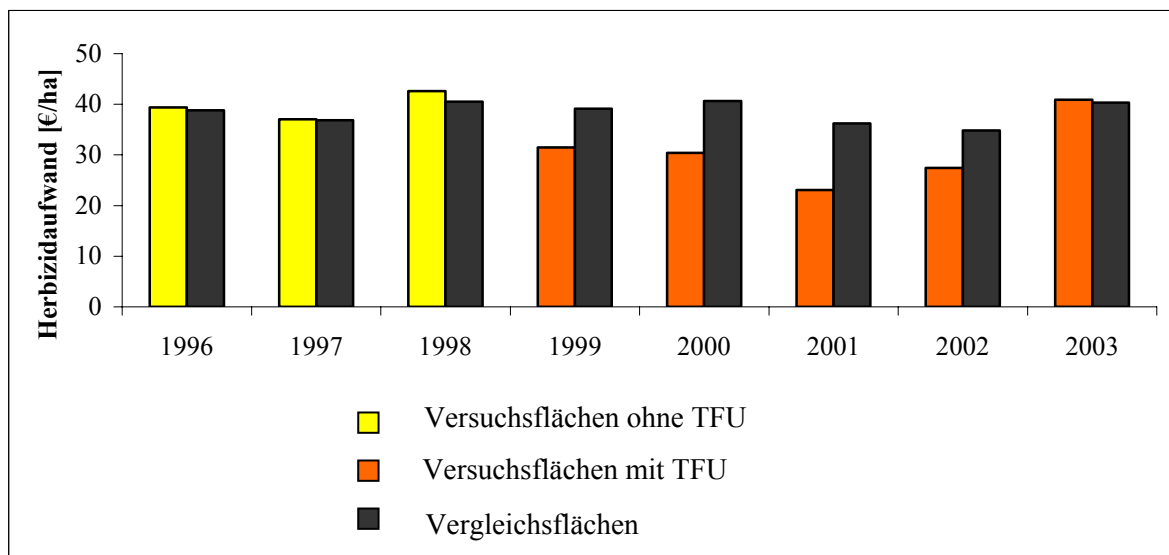


Quelle: Betriebsdatenauswertung

8.1.2 Herbizidaufwand im Winterweizen

Von 1999 bis 2003 konnten durch Teilflächenunkrautbekämpfung ca. 10,- €/ha Herbizidkosten im Winterweizen eingespart werden (siehe Abbildung 44). Im Jahr 2003 lag der Herbizidaufwand auf den Vergleichs- und den Versuchsflächen auf etwa gleichem Niveau. Dieser Wiederanstieg des Herbizidaufwandes auf den Versuchsflächen kann auf zwei Ursachen zurückgeführt werden. Zum einen war das Frühjahr 2003 außergewöhnlich trocken, so dass die Herbizide eine deutlich verminderte Wirkung zeigten, zum anderen hat die Verunkrautung nach mehreren Jahren Teilflächenunkrautbekämpfung deutlich zugenommen (DREYER, 2004, o. S.), so dass wieder größere Flächenanteile behandelt werden mussten.

Abbildung 44: Herbizidaufwand im Winterweizen von 1996 – 2003



Quelle: Betriebsdatenauswertung

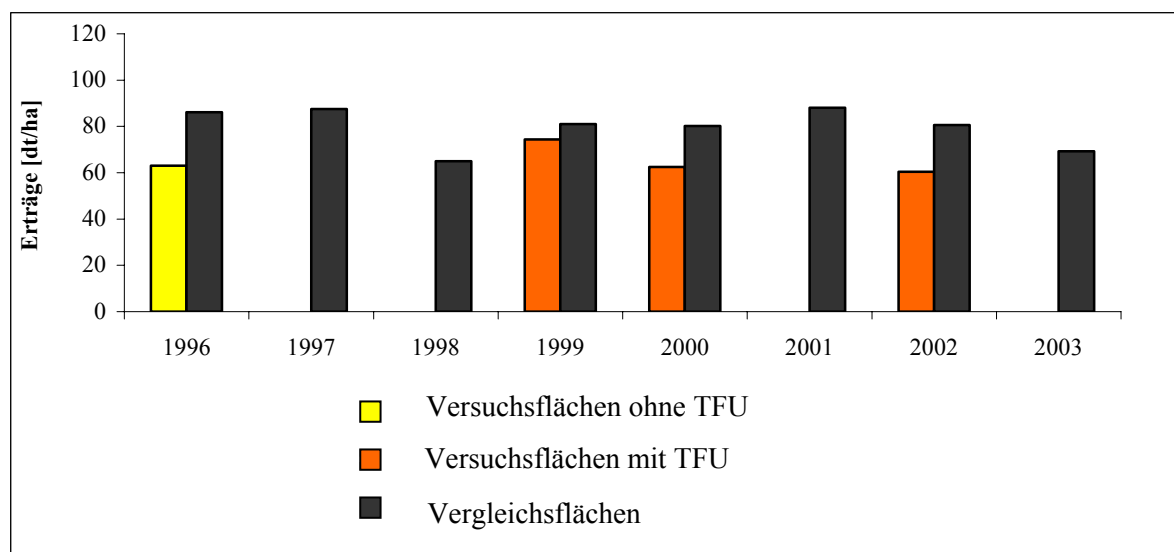
8.2 Wintergerste

8.2.1 Wintergerstenerträge

Die Erträge auf den Versuchsflächen lagen sowohl im Jahre 1996 (–27 %) bei ganzflächiger Unkrautbekämpfung als auch während der Versuchsphase bei teilflächenspezifischer Unkrautbekämpfung in jedem Jahr unter denen der Vergleichsflächen (1999: –8 %; 2000: –20 %; 2002: –25 %). Die Ertragsdifferenzen können auf unterschiedliche Ursachen zurückgehen. Auf Grund der Auswertungen der Winterweizenerträge kann ein geringeres Ertragspotential der Versuchsflächen jedoch als unwahrscheinlich angenommen werden, so

dass sich aus diesen Ergebnissen Ertragseffekte bei einer TFU in Wintergerste andeuten. Durch den frühen Aussattermin von Wintergerste ist in Gerste eine Herbstbehandlung gegen Unkräuter notwendig. Eine teilflächenspezifische Unkrautbekämpfung ist im Herbst jedoch schwierig durchführbar, da die Unkräuter zum Herbstapplikationstermin aufgrund des frühen Entwicklungsstadiums nur ungenau bonitiert werden können. Erfolgt die Unkrautbekämpfung bei der TFU jedoch erst im Frühjahr, so sind die Unkräuter häufig schon so weit entwickelt, dass die Wirksamkeit der Herbizide vermindert ist.

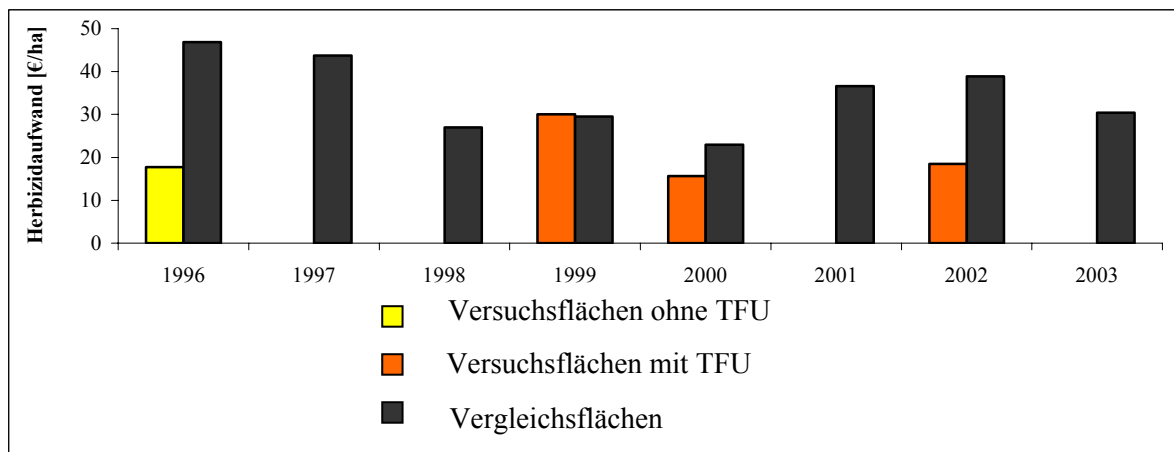
Abbildung 45: WG-Erträge von 1996 – 2003



Quelle: Betriebsdatenauswertung

8.2.2 Herbizidaufwand in Wintergerste

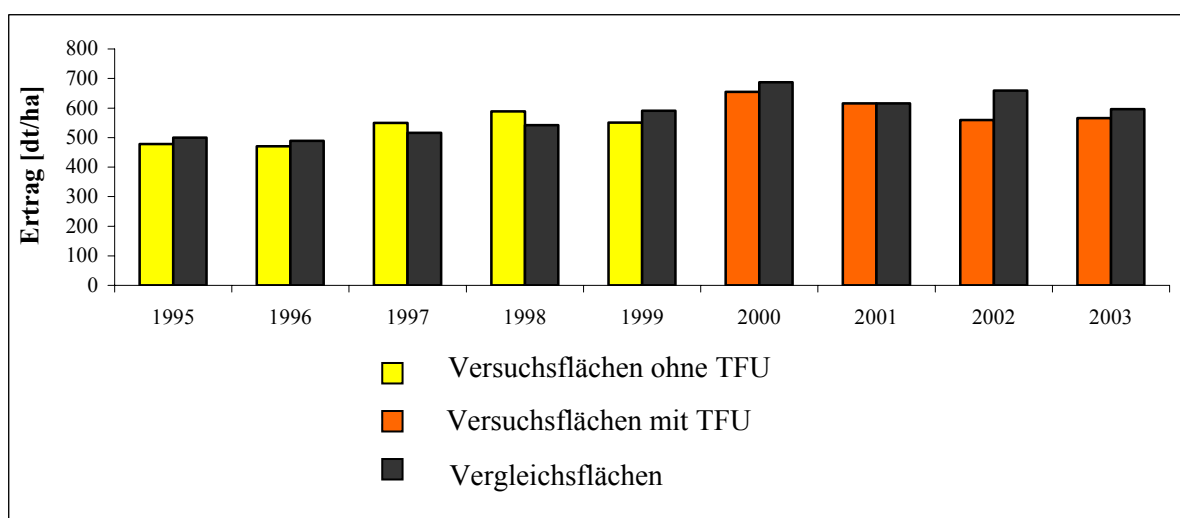
In den drei Versuchsjahren, in denen in Gerste Unkräuter teilflächenorientiert behandelt wurden, konnten in den Jahren 2000 bzw. 2002 7,- bzw. 20,- €/ha an Herbizidaufwendungen eingespart werden. Im Jahre 1999 war der Herbizidaufwand im Vergleich zu den Referenzflächen leicht (1,- €/ha) erhöht (siehe Abbildung 46). Die mittlere Ertragsdifferenz betrug in den drei Versuchsjahren (1999, 2000 und 2002) 15 dt/ha. Mit einem Gerstenpreis von 9,- €/dt entspricht dies einem Mindererlös von 135 €/ha. Dies bedeutet, dass selbst wenn die verminderten Erträge nur zu einem geringen Anteil auf Unkrautkonkurrenz zurückzuführen sind, die durchschnittlichen Herbizideinsparungen von 9,- €/ha wahrscheinlich durch die Erlösrückgänge überkompensiert wurden.

Abbildung 46: Herbizidaufwand in Wintergerste von 1996 – 2003

Quelle: Betriebsdatenauswertung

8.3 Zuckerrüben

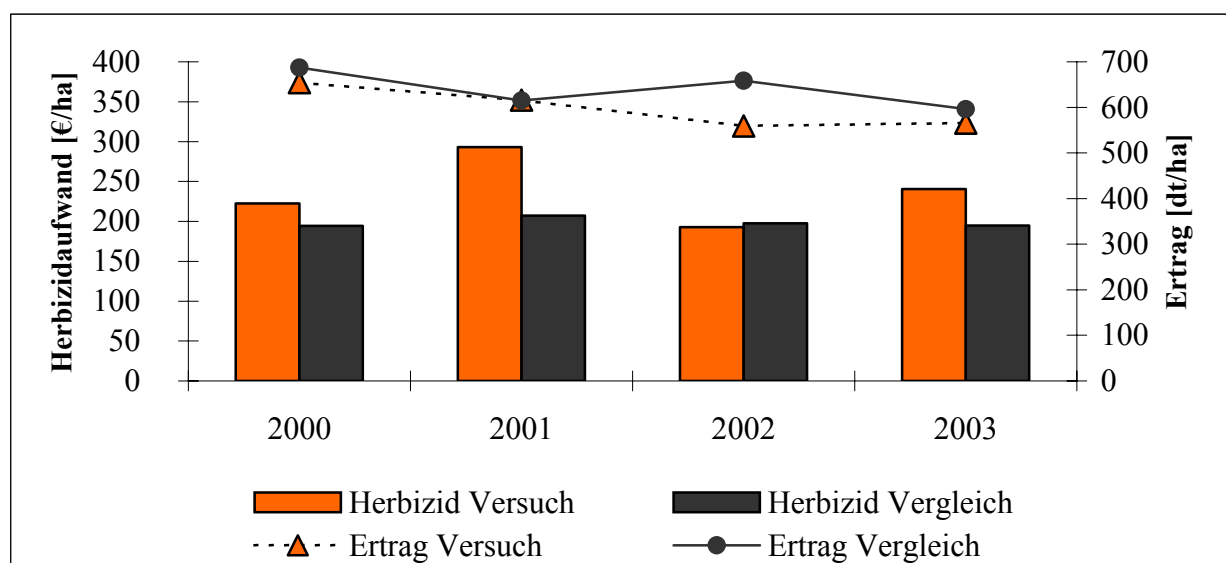
In Abbildung 47 sind die Zuckerrübenenerträge für den gesamten Untersuchungszeitraum dargestellt. Die orangenen Säulen kennzeichnen die Erträge auf den Versuchsflächen, bei denen in mindestens einer Getreidevorfrucht die Unkrautbekämpfung nach dem Schadensschwellenprinzip teilflächenorientiert erfolgte. Dies war auf den Versuchsflächen ab dem Jahr 2000 der Fall.

Abbildung 47: Zuckerrübenenerträge von 1995 – 2003

Quelle: Betriebsdatenauswertung

Von 1995 bis 1999 waren die Durchschnittserträge auf den Versuchs- und den Vergleichsflächen mit 528 dt/ha identisch. Von 2000 bis 2003 waren die Erträge auf den Versuchsflächen im Durchschnitt um 6% niedriger als auf den Flächen, auf denen die Unkrautbekämpfung im Getreide konventionell erfolgte. Nach Angaben von DREYER (2004, o. S.) hat die Verunkrautung auf den Versuchsflächen in den Zuckerrüben deutlich zugenommen, so dass der Herbizidaufwand deutlich erhöht werden musste. In Abbildung 48 sind die Herbizidaufwendungen der Jahre 2000 bis 2003 in Balkenform zusammen mit den Erträgen als Graphen abgebildet. Das Jahr 2002 ist das einzige Jahr, in dem der Herbizidaufwand auf den Versuchsflächen im Vergleich zu den Referenzflächen nicht erhöht war. Die Erträge lagen in diesem Jahr jedoch 100 dt/ha (– 15 %) unter denen der Vergleichsflächen. In den anderen Jahren waren bei erhöhtem Herbizideinsatz die Ertragsdifferenzen zwischen den Vergleichs- und den Versuchsflächen geringer. Durch eine vermehrte Samenproduktion der tolerierten Unkräuter auf den Versuchsflächen kam es offenbar zu einer Erhöhung der Unkrautsamenbank und damit zu einer Erhöhung des Unkrautdruckes in den Zuckerrüben. Nur durch eine Erhöhung des Herbizidaufwandes um durchschnittlich 53,- €/ha konnte der Betriebsleiter größere Minderungen der Zuckerrüben-erträge in den Jahren 2000, 2001 und 2003 verhindern. Ohne diese Erhöhung des Herbizidaufwandes kam es im Jahre 2002 zu einer deutlichen Ertragsdepression durch Unkrautkonkurrenz.

Abbildung 48: Herbizidaufwand und Erträge in Zuckerrüben



Quelle: Betriebsdatenauswertung

8.4 Zusammenfassung der Betriebsdatenauswertung

Anhand der Auswertung der Betriebsdaten wird deutlich, dass Teilflächenunkrautbekämpfung im Raster 25 x 36 m² zu ungenau ist. In Winterweizen konnten ohne erkennbare Ertragseffekte geringe Herbizidreduktionen realisiert werden. In Gerste waren die Erträge bei teilflächenorientierter Unkrautbekämpfung deutlich niedriger als bei konventioneller, so dass vermutet werden muss, dass die geringen Herbizidkosteneinsparungen in Gerste durch Konkurrenzeffekte überkompensiert wurden. In Zuckerrüben kam es auf den zuvor im Getreide nach dem Schadschwellenprinzip behandelten Flächen zu einem deutlich ansteigenden Unkrautdruck, der sich in einem erhöhten Herbizidaufwand oder verminderten Erträgen niedergeschlagen hat.

9 Diskussion

Dreh- und Angelpunkt der vorliegenden Arbeit ist die Entwicklung und Anwendung eines Computerprogramms zur Simulation unterschiedlicher Unkrautbekämpfungsstrategien. Der Wert eines solchen Modells wird wesentlich durch die verwendeten Gleichungen, deren Parametrisierung und den damit verbundenen Realitätsbezug bestimmt. Bei der Entwicklung der Gleichungen und der Bestimmung der Parameter aus empirischen Versuchen wurde bereits deutlich, dass die bisherigen Kenntnisse zur Unkrautdynamik nicht vollständig sind und in vielen Bereichen noch Unkenntnisse bestehen. Diese Problematik trifft jedoch nicht allein für das entwickelte Unkrautsimulationsmodell zu, sondern generell für alle pflanzenbaulichen Modelle. Denn trotz jahrzehntelanger Forschung existieren nach wie vor Widersprüche und Unwissen bezüglich der Ertragsbildung in Abhängigkeit von den kontrollierbaren Managementinputs und den nichtkontrollierbaren Einflussfaktoren (BULLOCK und BULLOCK, 2000, S. 96). Die Auswirkungen des Schadschwellenkonzeptes auf die Folgeverunkrautung sind nach Meinung von NIEMANN et. al. (2000, S. 281) beispielsweise noch nicht ausreichend untersucht. KROHMANN (2003, S. 89) geht auf Grund der unvorhersehbaren Einflüsse deshalb davon aus, dass es nahezu unmöglich ist, ein Modell zu entwickeln, das die komplexen Vorgänge innerhalb einer Unkrautpopulation hinreichend berücksichtigt. Doch auch wenn auf Grund dieser Unzulänglichkeiten die entwickelten Modelle noch nicht gänzlich ausgereift sind, so erfüllen sie dennoch einen wichtigen Zweck: Sie induzieren ein verstärktes Nachdenken über das bearbeitete Problem und fördern die Entwicklung umfassenderer und realitätsnäherer Modelle (MÖLLER, 1995, S. 162).

In dem entwickelten Unkrautsimulationsprogramm dieser Arbeit wurde der aktuelle herbologische Wissensstand verwendet und es wurden die hieraus abgeleiteten Modellhypothesen explizit benannt, um anschließend sachliche Ergebnisse zu ermitteln. Diese Vorgehensweise trägt zu einer Versachlichung der Diskussion bei, indem die Konsequenzen der getroffenen Annahmen gezeigt werden. Sollten neue pflanzenbauliche Kenntnisse hinzukommen, oder nach Einschätzung pflanzenbaulicher Experten bestimmte Zusammenhänge im Modell nicht realitätsgetreu abgebildet werden, so ist es problemlos möglich, das Modell weiter zu entwickeln, wobei in jedem Fall die Ursachen und Wirkungen der veränderten Hypothesen untersucht werden können.

Im Folgenden werden die wichtigsten Modellannahmen und die hieraus entstehenden Effekte diskutiert.

Im Modell wird davon ausgegangen, dass die neu produzierten Samen nicht nur auf die „Mutterzelle“ fallen, sondern auch in Nachbarzellen verfrachtet werden. Dadurch kommt es zu einer Anpassung der Unkrautdichten auf der Fläche im Zeitablauf. In Abschnitt 4.1 wurden jedoch Ursachen dargelegt, die eine räumliche Heterogenität in der Unkrautverteilung hervorrufen und erhalten. Von diesen Faktoren wird im Programm abstrahiert. Es wird lediglich von einer heterogenen Ausgangsverteilung ausgegangen, um anschließend, jeweils von diesen Anfangsverteilungen ausgehend, die Entwicklung der Populationsdynamik in allen Zellen nach den gleichen Gesetzmäßigkeiten ablaufen zu lassen. Weitere, die Heterogenität erhaltende oder hervorrufende Effekte, wie beispielsweise fehlender Anschluss bei der Herbizidapplikation oder Aussaatfehler und demzufolge erhöhtes Unkrautwachstum auf diesen Zellen etc. werden nicht berücksichtigt. Durch diese räumliche Angleichung der Unkrautverteilung mit jedem Zeitschritt nehmen die Applikationsfehler bei den grob aufgelösten teilflächenspezifischen Unkrautbekämpfungsstrategien ab, so dass sich die Unterschiede zwischen den Auflösungsgraden reduzieren. Eine theoretische Modellerweiterung beispielsweise in der Form, dass auf Grund von Bodeneigenschaften einigen Zellen ein höheres Unkrautwachstum zugewiesen wird oder dass bei der Herbizidapplikation zufällig Streifen von Zellen nicht behandelt werden etc., wäre denkbar, um zu verdeutlichen, dass die Unterschiede zwischen den unterschiedlichen Präzisionsgraden der Teilflächenunkrautbekämpfung in der Praxis größer sein dürften als im vorgestellten Modell. Da für diese Modellerweiterung jedoch die empirische Basis fehlt, wurde sie nicht durchgeführt.

Im Modell wird davon ausgegangen, dass Zuckerrüben eine „break crop“ darstellen; in Zuckerrüben also keine neuen Sameneinträge stattfinden. BLUMENBERG (1987, S. 65) ermittelte in seinen Versuchen zum Teil jedoch eine erhebliche Samenbildung der Restverunkrautung in Zuckerrüben und schlussfolgerte hieraus, dass es notwendig ist, die Unkrautbekämpfung in Zuckerrüben zu intensivieren, um in Getreide Herbizideinsparungen realisieren zu können. Da eine Intensivierung der Unkrautbekämpfung in Zuckerrüben sehr kostenintensiv ist (Herbizidstress, teure Mittel) und im Gegenzug eine Unkrautbekämpfung in Getreide sehr günstig ist und demzufolge

auch das Einsparungspotenzial niedrig ist, macht eine solche Strategie keinen Sinn. Es dürfen umgekehrt in Getreide nur so große Herbizideinsparungen durchgeführt werden, dass es in Zuckerrüben zu keinen nennenswerten Mehrkosten kommt. Diese Effekte werden im Programm berücksichtigt. Unberücksichtigt bleibt, wie gesagt, die potenzielle Samenproduktion der Restverunkrautung in Zuckerrüben. Auf Grund der höheren Restverunkrautung in den niedrig aufgelösten Teilflächenvarianten kommt es deshalb im Modell vor allem in diesen Varianten zu einer tendenziellen Unterschätzung der Kosten. Da mögliche zusätzliche Kosten durch erhöhte Trocknungs- oder Reinigungskosten im Programm ebenfalls nicht mitberücksichtigt werden, geht auch von dieser Vereinfachung eine zu optimistische Einschätzung der gering aufgelösten TFU aus.

Eine weitere wesentliche Grundhypothese des Modells sind die gewählten Ausgangsverteilungen. In vielen pflanzenbaulichen Arbeiten wird die Existenz von räumlichen Unkrautaggregationen und unkrautfreien Bereichen bestätigt (siehe Abschnitt 4.1). Genaue Angaben zu der zu erwartenden Nestergröße, zu den Unkrautdichtewerten innerhalb eines Unkrautnestes, zur Stabilität der Unkrautnester im Zeitablauf und zur Dynamik der Unkrautnester bei teilflächenspezifischer Unkrautbekämpfung sind jedoch nicht vorhanden (WILLIAMS II et al., 2000, S. 248). Nach BACKES und PLÜMER (2003, S. 261) existieren sehr heterogene Verbreitungsmuster von Unkräutern. KROHMANN (2003, S. 96) konnte beispielsweise durch visuelle Beurteilung von Unkrautkarten für *Galium aparine* keine stabilen und abgrenzbaren Nester feststellen. Diese fehlenden detaillierten Kenntnisse zur räumlichen Verbreitung von Unkräutern kommen auch dadurch zustande, dass häufig unterschiedlich präzise Erhebungsmethoden verwendet wurden. Da exakte Unkrautbonituren sehr teuer sind, wurden sie bisher nur selten und nur auf kleiner Fläche durchgeführt. Wenn in Zukunft automatische Unkrauterkenennungssysteme zur Verfügung stehen, so können diese Fragestellungen deutlich kostengünstiger ermittelt werden. Sollte sich bei diesen Erhebungen zeigen, dass Unkräuter deutlich ungleichmäßiger verteilt sind, also am ehesten durch die Ausgangsverteilung des Modells mit einer Nesterausdehnung von $1 \times 1 \text{ m}^2$ beschrieben werden können, so ist Teilflächenunkrautbekämpfung nur mit sehr hoher Auflösungsgüte möglich (z. B. Einzeldüsensteuerung). Dass Unkrautverteilungen in manchen Fällen dieses Heterogenitätsniveau besitzen, wurde beispielsweise durch RAHMAN et al. (2001, S. 92) gezeigt. In diesen Untersuchungen waren die Samengehalte von Bodenproben, die mindestens einen Meter voneinander entfernt

waren, statistisch unabhängig voneinander. Dies kann, wie oben erwähnt, jedoch von Schlag zu Schlag sehr unterschiedlich sein (REW et al., 1997, S. 49).

In den Versuchen von FLATTER (1999, S. 33) führten Herbizidbehandlungen bei sehr niedrigen Unkrautdichten zu tendenziellen Mindererträgen. Als Ursache vermutet FLATTER phytotoxische Effekte durch Herbizide. Diese Effekte, die die Vorteile einer räumlich angepassten Herbizidapplikation erhöhen würden, sind im Programm wegen fehlender Daten nicht berücksichtigt.

Im Modell werden hyperbolische Populationsverläufe angenommen. Es wird also davon ausgegangen, dass die Unkrautvermehrung bei höheren Dichten verlangsamt ist. Diese These kann durch eine Reihe von Publikationen belegt werden. FRECKLETON und WATKINSON (1998, S. 703) führten eine statistische Analyse von zwölfjährigen Unkrautversuchsdaten durch. Sie konnten nur für 3 der 12 untersuchten Unkrautarten starke Dichteabhängigkeiten nachweisen. In Abschnitt 3.2.1 wurde gezeigt, dass die Annahme von Dichteabhängigkeiten essentiell ist, um mit Hilfe des Schadschwellenprinzips tatsächlich Kosten langfristig einsparen zu können.

Gleiche Dichten von *Stellaria media* im Herbst verursachten in den Versuchen von LUTMAN et al. (2000, S. 261) im Raps sehr unterschiedliche Ertragsreaktionen. So wurde eine 5%-ige Ertragsreduktion im Winterraps beispielsweise von Unkrautdichten zwischen 1,2 und 328 Unkräutern/m² verursacht. Die geringe Korrelation zwischen der Unkrautdichte im Herbst und der Ertragsreaktion von Raps und die daraus folgende ungenügende Vorhersagegüte der Unkrautkonkurrenz wird im Wesentlichen durch die lange Zeit zwischen der Schätzung und der Ernte begründet (ebenda, S. 266). Auch wenn die zitierte Quelle ein Extrem darstellt, so bereitet auch im Getreide eine unkrautbedingte Ertragsverlustprognose – unabhängig davon, ob sie nun von der Anzahl oder dem Deckungsgrad der Unkräuter abgeleitet wird – auf Grund der Unsicherheiten erhebliche Schwierigkeiten. Die Akzeptanz des Schadschwellenkonzeptes kann hierdurch stark gemindert sein.

Auf Grund der großen Anzahl von Annahmen und der begrenzten Verfügbarkeit von Daten zur Populationsdynamik, der Ausbreitungsdynamik, dem Konkurrenzgeschehen und den weiteren negativen Effekten durch Unkräuter ist es schwierig, die richtigen

Schlussfolgerungen aus den Modellergebnissen zu ziehen. Dennoch zeigen die Ergebnisse, dass durch TFU vor allem Herbizidkosteneinsparungen möglich sind. Diese Herbizidkosteneinsparungen bewegen sich in Abhängigkeit von der Auflösungsgüte, der ganzflächigen Referenz und der räumlichen Aggregation der Unkrautnester zwischen 20 und 50%. Die Einsparungen werden jedoch durch erhöhte Konkurrenzeffekte bzw. Mehrkosten in Zuckerrüben zum Teil kompensiert. Unter der Annahme einer sehr hohen Auslastung der Dreikammerspritze und größerer Schläge (10 ha) betragen die zusätzlichen Kosten für die variable Ratentechnik ca. 10 €/ha. Im Mittel heben sich die Leistungen und Kosten also mehr oder weniger auf, so dass vor dem Hintergrund eines höheren Risikos von TFU und der im Modell enthaltenen Unsicherheiten derzeit das ökonomische Potenzial von Teilflächenunkrautbekämpfung als gering einzustufen ist. Dieses Ergebnis wird vor dem Hintergrund weiterer qualitativer Aspekte zusätzlich bestärkt.

Nach LETTNER et al. (2001, S. 122) bietet eine getrennte Unkrauterfassung und Herbizidapplikation, also eine *offline* Anwendung der TFU, generell den Vorteil, dass jeweils das optimale Zeitfenster für jeden Arbeitsgang genutzt werden kann. Diese Aussage ist jedoch in all denen Situationen falsch, in denen es günstig ist, die Herbizidapplikation früher als die Unkrautererkennung durchzuführen. In Wintergetreide ist dieser Fall eher die Regel als die Ausnahme, denn solange sich Unkräuter im Auflauf befinden, ist es vorteilhaft, mit der Kartierung zu warten, um die Genauigkeit der Unkrautkarte zu erhöhen. KROHMANN (2003, S. 67) stellte beispielsweise bei seinen Unkrauterhebungen fest, dass auf Unkrautzahlstellen, die frei von Klettenlabkraut waren und demzufolge keine Behandlung erhielten, zum Teil noch später Klettenlabkrautpflanzen aufliefen. Vor allem in Spätsaaten kann dies ein Problem sein, da Klettenlabkraut hier noch über einen langen Zeitraum erfolgreich auflaufen kann (LANDWIRTSCHAFTSKAMMER WESTFALEN-LIPPE, 2002, S. 102). Viele Herbizide zeigen aber gerade während der Auflaufphase und damit bei früher Anwendung eine besonders hohe Wirkung.

Aus dem bereits Gesagten wird deutlich, dass eine praktische Umsetzung von Teilflächenunkrautbekämpfung davon abhängt, ob die notwendigen Techniken in Zukunft entwickelt werden können. Neben der automatischen Unkrautererkennung ist dies die räumlich differenzierte Wirkstoffapplikation. Da eine Dreikammerspritze oder ein Direkteinspeisungssystem deutlich komplizierter aufgebaut ist als eine herkömmliche Pflanzenschutzspritze, ist zu erwarten, dass die Fehleranfälligkeit dieser Maschinen erhöht

sein wird. Derzeit müssen Feldspritzen alle zwei Jahre auf ihre ordnungsgemäße Funktionstüchtigkeit im Rahmen einer Pflichtkontrolle untersucht werden. Auswertungen dieser Kontrollen ergaben für Mecklenburg-Vorpommern einen im Vergleich zum Bundesdurchschnitt überdurchschnittlich hohen Verschleiß an allen untersuchten Baugruppen, so dass bei ca. 50% der untersuchten Geräte eine bestimmungsgemäße und sachgerechte Anwendung von Pflanzenschutzmitteln nicht mehr gewährleistet war. Grund für den hohen Verschleiß ist die hohe Auslastung der Geräte. Aber auch im Bundesdurchschnitt zeigten die Pflanzenschutzspritzen Mängel (LANDESPFLANZENSCHUTZAMT MECKLENBURG-VORPOMMERN, 2002, S. 10). Hieran werden die Herausforderungen an die Entwicklung der neuen Technologien deutlich, denn nur dann, wenn eine Mehrkammerspritze bzw. eine Direkteinspeisung die gleiche Zuverlässigkeit erreicht wie derzeitige Pflanzenschutzspritzen, werden sie zu einer Verbesserung der Pflanzenschutzmittelapplikation beitragen.

Nach GEHRING (2003b, S. 1) stellt die Entwicklung herbizidresistenter Unkräuter eine erhebliche Bedrohung für den Getreidebau dar. Der Entwicklung von Resistenzen kann durch alle nicht-chemischen, also pflanzenbaulichen Methoden (z. B. Fruchtfolgen) und durch einen häufigen Wechsel der biochemischen Wirkmechanismen der Herbizide entgegengewirkt werden. Da bei teilflächenspezifischer Unkrautbekämpfung Frühjahrsanwendungen auf Grund der dann sicheren Unkrautbonitur geeigneter sind, kann es bei teilflächenspezifischer Unkrautbekämpfung tendenziell zu einer Verringerung der möglichen Herbizide und damit zu einer engeren Abfolge derselben biochemischen Wirkmechanismen mit dem Risiko erhöhter Resistenzbildungen kommen.

In Wintergerste stehen zurzeit neben IPU keine Mittel für einen Ungrasbekämpfungstermin im Frühjahr zur Verfügung (HOFFMANN, S. 40, 2004). Deshalb muss die Ungrasbekämpfung in Wintergerste auf nicht „IPU-fähigen“ Standorten im Herbst erfolgen. Einer teilflächenspezifischen Ungrasbekämpfung im Herbst sind jedoch Grenzen gesetzt, da auf ungrasfreien Teilflächen, die bei der Herbstbehandlung nicht behandelt werden, später Ungräser auflaufen können und auf diesen Standorten eine Nachbehandlung im Frühjahr nicht mehr möglich ist.

Eradikationsstrategien von Unkräutern (Schadschwelle von 0 Pfl./m²) sind nicht möglich, da eine Neubildung und ein Import von neuen Unkrautsamen nicht verhindert werden kann

(WALLINGA et al. 1999; S. 312, WILLIAMS II, 2000, S. 247). Darüber hinaus steigen die Grenzkosten umso mehr an, je niedriger die gewünschte Unkrautdicke ist. Der Grenznutzen einer solchen Intensivierung der Unkrautbekämpfung wird jedoch gegen Null tendieren oder negativ sein (z. B. Herbizidstress, Fahrschäden etc.), so dass eine solche Strategie nicht sinnvoll ist. Eine angepasste Unkrautbekämpfungsintensität ist deshalb anzuraten. Da es neben der in dieser Arbeit hauptsächlich betrachteten räumlichen Heterogenität auch eine starke zeitliche Heterogenität gibt, stellt sich jedoch die Frage, welcher dieser beiden Heterogenitätsursachen die größere Bedeutung zukommt. WHELAN und MCBRATNEY (2000, S. 271) berechneten räumliche Variabilitäten, indem sie Ertragsmessungen auf einer Fläche in einem Jahr verglichen. Diese Variation wurde mit der zeitlichen Variation, der Ertragsvarianz an einzelnen Messpunkten von unterschiedlichen Jahren, verglichen. Das Ergebnis war, dass die zeitliche Variation auf den untersuchten Flächen in Australien in der Regel deutlich größer war als die räumliche. Im Modell wurde die zeitliche Variabilität durch die zufällig variierenden Modellparameter berücksichtigt. In empirischen Versuchen sollte diesem Sachverhalt jedoch mehr Bedeutung geschenkt werden, denn nur wenn *precision farming* auch unter Berücksichtigung der zeitlichen Variabilität und den damit verbundenen Risiken gegenüber einer ganzflächig einheitlichen Bewirtschaftung vorteilhaft ist, wird es in der Praxis umgesetzt werden.

Die Modellergebnisse, die Versuchsergebnisse der BBA auf der Domäne St. Ludgeri und qualitative Argumente zeigen derzeit ein eher geringes ökonomische Leistungspotenzial von Teilflächenunkrautbekämpfung auf. Dennoch können weitere Forschungen, vor allem im Bereich der *precision farming* Technik und im Bereich der Populationsdynamik und dem Konkurrenzgeschehen der Unkräuter zu neuen Ergebnissen führen. Dies gilt vor allem vor dem Hintergrund, dass Landwirte immer umfangreichere Nachweispflichten für ihre durchgeführten Arbeiten erfüllen müssen. Automatisch erstellte Applikationskarten hätten in diesem Zusammenhang eine größere Beweiskraft. Es wäre deshalb denkbar, dass die derzeitige Vorhersage über den Einsatz von *precision farming* durch die tatsächlich in Zukunft stattfindende Entwicklung auf ähnliche Weise widerlegt werden wird, wie die der Wissenschaftler, die Anfang des zwanzigsten Jahrhunderts nicht in der Lage waren, die enormen Auswirkungen der Motorisierung und Einführung von Traktoren in der Landwirtschaft vorherzusagen (LOEWENBERG-DEBOER, 1996, S. 1282).

10 Programmbeschreibung (Go through)

Auf der CD befindet sich der Ordner CD_Weed_Control. In diesem Ordner befindet sich die Installationsdatei „Weed Control.msi“. Wenn Sie der Installationsroutine folgen, wird das Programm installiert. Bei abgeschlossener Installation befinden sich die Ordner „Datenbanken“ und „Karten“ und die ausführbare Datei von „Weed Control“ auf Ihrem Desktop. Wenn Sie das Programm wieder entfernen wollen, so gehen Sie bitte über Start/Einstellungen/Systemsteuerung/Software auf das Programm „Weed Control“ und entfernen es.

Nachdem Sie die Installationsroutine durchlaufen haben, befindet sich eine lauffähige Version von Weed Control auf dem Desktop Ihres Rechners. Damit Weed Control vollständig lauffähig ist, müssen sich auf Ihrem Rechner Microsoft Excel und Microsoft Access befinden. Wenn Sie das Programm starten, erscheint zunächst ein Info-Fenster.

Abbildung 49: Infofenster



Nachdem Sie auf dem Informationsfenster den WEITER-Button betätigt haben, befinden Sie sich in der zeitlichen Modellumgebung von Weed Control. Das Programm ist so organisiert,

dass alle gelb hinterlegten Felder und Checkboxen vom Anwender verändert werden können. Weiß hinterlegte Zellen stellen Ausgabezellen dar. Zur Anwendungsbeschreibung werden im Folgenden in jedem Programmfenster die einzelnen Anwendungsmöglichkeiten nummeriert. Die Beschreibung erfolgt entsprechend der Nummerierung.

10.1 „Weed Control (zeitliche Modellumgebung)“

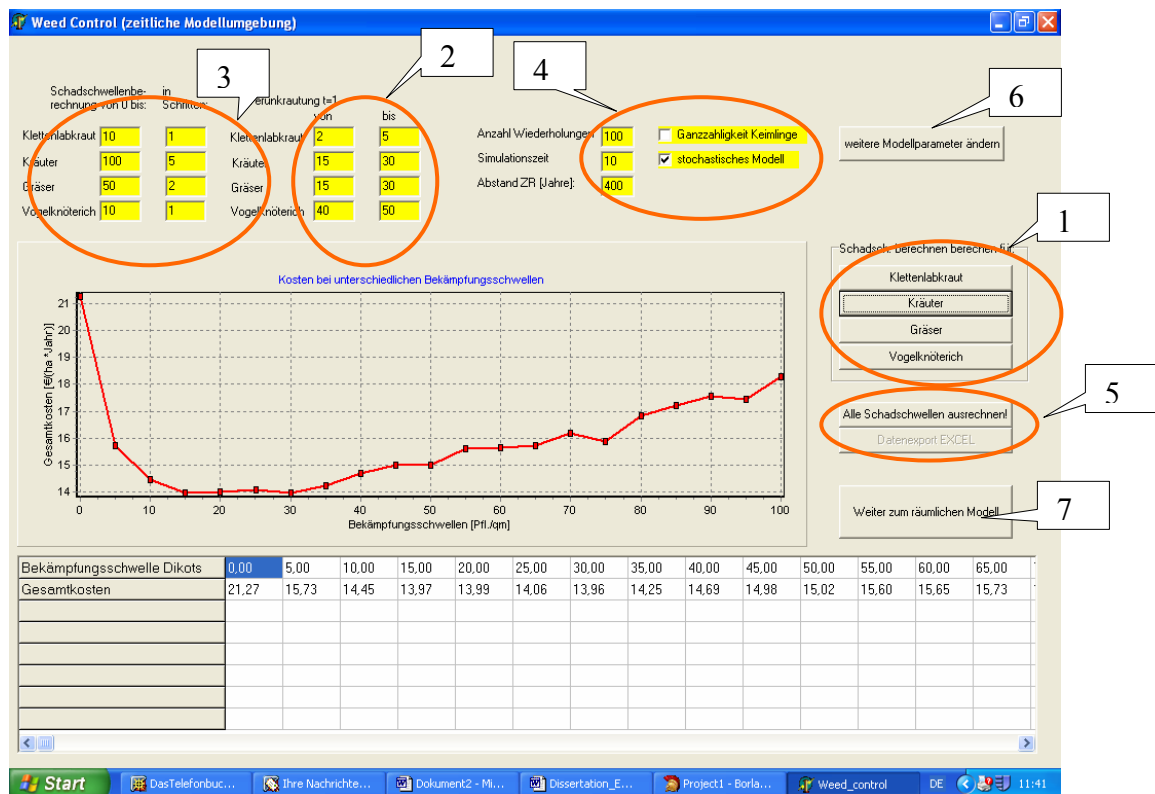
Folgende Möglichkeiten bietet Ihnen das Fenster mit dem Titel „Weed Control (zeitliche Modellumgebung)“ (siehe Abbildung 50).

- 1) Indem Sie auf die vier Buttons mit den Bezeichnungen „Klettenlabkraut“, „Kräuter“, „Gräser“ und „Vogelknöterich“ klicken, werden Schadschwellen für die jeweiligen Unkrautklassen kalkuliert. Die Ergebnisse der Schadschwellenkalkulation werden Ihnen in Form eines Graphen und in Tabellenform gezeigt, indem die durchschnittlichen jährlichen Gesamtkosten (Konkurrenzeffekte + Herbizidkosten, siehe Abschnitt 5.6) in Abhängigkeit von den Bekämpfungsschwellen (Pfl./m²) dargestellt werden.
- 2) Die Startverunkrautung für die Unkrautklasse, für die Sie Schadschwellen kalkulieren möchten, können Sie in den Feldern mit den Bezeichnungen „von“ und „bis“ verändern. Wollen Sie die Schadschwelle nur für einen Wert untersuchen, so geben Sie in den beiden Feldern „von“ und „bis“ denselben Wert ein. Wollen Sie Schadschwellen für einen weiteren Bereich untersuchen, so geben sie in der Zelle „von“ die untere Grenze des Bereichs an und in der Zelle „bis“ die obere Grenze. (In Kapitel 5 finden Sie die Begründungen, warum es sinnvoll ist, einen weiteren Bereich für die Ausgangsverunkrautung zu wählen.)
- 3) Sie können wählen, für welche Bekämpfungsschwellen die Gesamtkosten kalkuliert werden sollen. Die Intervalle, mit denen die Bekämpfungsschwellen erhöht werden, können Sie größer als 1 wählen, um den Rechenaufwand zu reduzieren.
- 4) Die Kalkulationen können deterministisch oder stochastisch durchgeführt werden. Im deterministischen Fall wird die Anzahl der Wiederholungen automatisch auf 1 gesetzt. Im stochastischen Fall ist es sinnvoll, die Anzahl der Wiederholungen auf ≥ 50 zu setzen. Größere Werte kosten mehr Rechenzeit. Die Simulationszeit beschreibt die Planungsperiode in Jahren. Wählen Sie den Zuckerrübenabstand kleiner als die Simulationszeit, so werden Zuckerrüben in dem von Ihnen gewählten Zeitintervall angebaut, solange die Simulationszeit nicht überschritten ist. Wählen Sie beispielsweise

eine Simulationszeit von 12 Jahren und einen Zuckerrübenabstand von 4 Jahren, so werden Zuckerrüben im Jahr 4, 8 und 12 angebaut.

- 5) Um die Ergebnisse der Schadschwellenkalkulationen exportieren zu können, kalkulieren Sie diese zunächst für alle Unkrautklassen. Anschließend können sie den Button „Datenexport EXCEL“ betätigen. Die Daten aus der Tabelle werden nun nach Microsoft Excel exportiert (Excel wird hierfür automatisch geöffnet).
- 6) Wenn sie den Button „weitere Modellparameter ändern“ betätigen, öffnet sich das Fenster mit dem Titel „Parameteranpassung“ (siehe Abbildung 51).
- 7) Betätigen Sie den Button („Weiter zum räumlichen Modell“) gelangen Sie in die räumliche Modellumgebung (Zellulärer Automat), wo Sie Simulationsrechnungen in Raum und Zeit durchführen können (siehe Abbildung 52).

Abbildung 50: Weed Control, zeitliche Modellumgebung



10.2 „Parameteranpassung“ (Abbildung 51)

- 1) In dem Rahmen mit dem Titel „Parameter der Herbizide“ können Sie in der Tabelle links die Preise und die Wirkungsgrade der Herbizide gegen die jeweiligen Unkrautklassen verändern. In der rechten Tabelle („Herbizidwirkungsgrade in Abh. von der Witterung“) können Sie angeben, um wie viel Prozent der Wirkungsgrad bei günstigen („MAX“) bzw. ungünstigen (MIN) Witterungsbedingungen erhöht bzw. vermindert wird. Die Extremwerte treten jeweils mit einer Wahrscheinlichkeit von 25% ein. Mit 50%-iger Wahrscheinlichkeit wird von einer durchschnittlichen Herbizidwirkung, also einem Faktor von 1, ausgegangen.
- 2) Hier können Sie den Weizenpreis und den Zinsfaktor verändern. Darüber hinaus können Sie entscheiden, ob Sie die Berechnungen im stochastischen oder deterministischen Modell durchführen wollen.
- 3) Die Konkurrenz- und Populationsparameter der Unkräuter können geändert werden. Befinden Sie sich in der stochastischen Modellumgebung, existieren für jede Unkrautklasse minimale, maximale und durchschnittliche Parameterwerte. Im deterministischen Fall sind es nur die Standardwerte. Geändert werden können für alle Unkrautklassen die
 - a. Konkurrenzindizes,
 - b. Auflaufwahrscheinlichkeiten,
 - c. Multiplikatoren zur Veränderung der Samenproduktion und
 - d. Multiplikatoren zur Veränderung der Überlebenswahrscheinlichkeit der Keimpflanzen.

Alle Veränderungen, die Sie in diesem Fenster durchführen, sind bei allen weiteren Kalkulationen – auch in der räumlichen Modellumgebung – wirksam.

Abbildung 51: Parameteranpassung

Parameter der Herbizide

	Preis	W-Grad	W-Grad	W-Grad	W-Grad
	in €	DIKOT	MOKOT	GALAP	POLAV
Primus	26,00	0,70	0,00	0,95	0,70
DP+Gropper	21,00	0,95	0,15	0,40	0,95
Husar	38,00	0,80	0,95	0,70	0,75

Herbizidwirkungsgrade in Abh. von der Witterung

	MIN	MAX
Frühjahrsanwendung	0,90	1,10
Herbstanwendung	0,90	1,10

Zinsfaktor: 1,05
Weizenpreis: 10 €/dt
☒ stochastisch

Konkurrenz- und Populationsparameter der Unkräuter

	MIN	STAND	MAX	MIN	STAND	MAX	MIN	STAND	MAX	MIN	STAND	MAX
	DIKOT			MOKOT			GALAP			POLAV		
Konkurrenzindex [kg/ha je Pfl./qm]	0,00	4,50	25,00	0,00	5,30	29,00	0,00	20,00	110,00	0,00	4,50	25,00
Aufauftwahrscheinlichkeit	0,02	0,11	0,18	0,03	0,15	0,30	0,06	0,27	0,50	0,00	0,07	0,17
Faktor Samenproduktion	0,50	1,00	2,00	0,50	1,00	2,00	0,50	1,00	2,00	0,50	1,00	2,00
Faktor Überlebenswahr. Keimpflanzen	0,25	1,00	2,00	0,25	1,00	2,00	0,20	1,00	3,00	0,25	1,00	2,00

10.3 „Weed Control (räumliche Modellumgebung)“

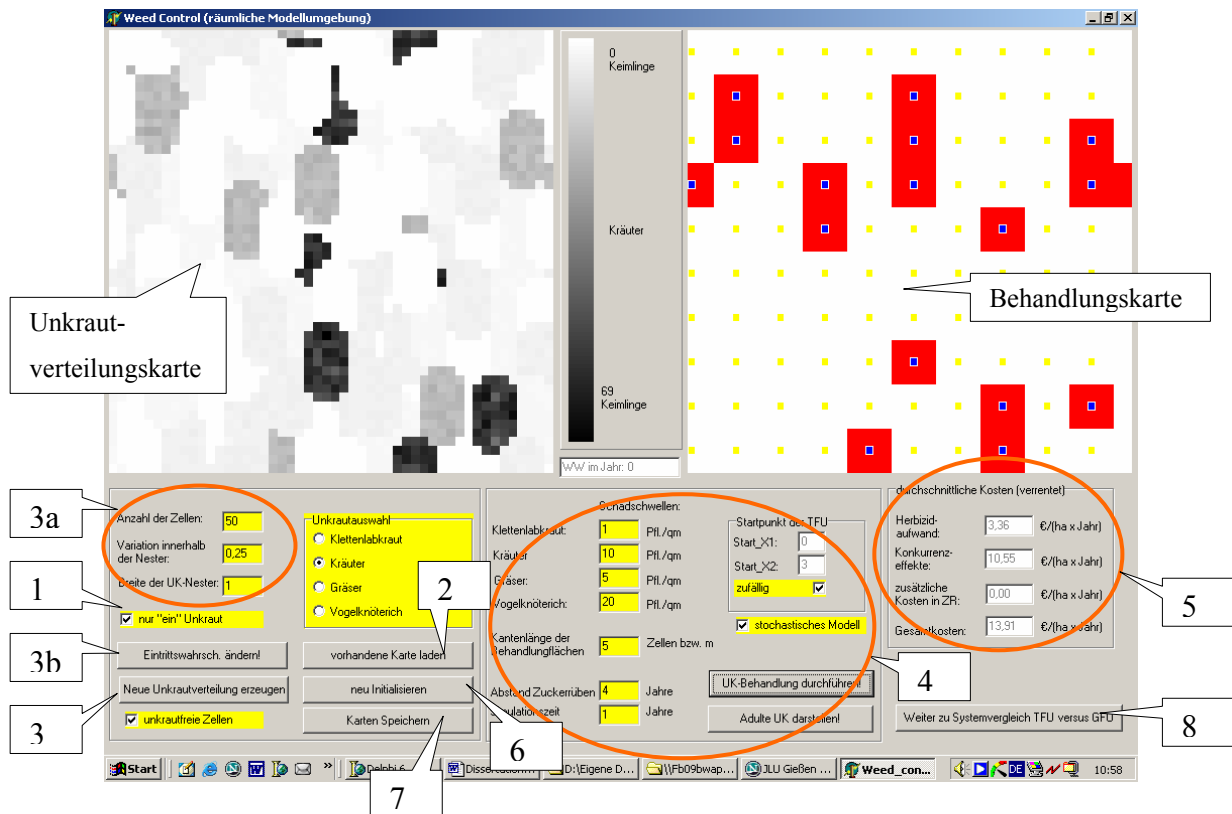
Bevor Sie Simulationsrechnungen in der räumlichen Umgebung durchführen können, müssen Sie eine Startverunkrautung erzeugen bzw. eine Startverunkrautung laden.

- 1) Zunächst können Sie sich entscheiden, ob Sie nur ein Unkraut allein betrachten wollen oder ob Sie alle vier Unkrautklassen simultan untersuchen wollen. In dem Kasten „Unkrautauswahl“ können Sie wählen, für welche Unkrautklasse die Unkrautkarte und die Behandlungskarte visualisiert werden soll. Führen Sie keine simultane Betrachtung durch, sondern untersuchen nur einzelne Unkräuter, so können Sie hier entscheiden, welches Unkraut Sie untersuchen möchten.
- 2) Für die ersten Simulationsrechnungen empfiehlt es sich, zunächst eine vorhandene Unkrautkarte zu laden, da die Erzeugung einer neuen Unkrautkarte (3) deutlich mehr Rechenzeit benötigt.
- 3) Hier können Sie neue Unkrautkarten erzeugen.
 - a. Bevor Sie dies tun, können Sie wählen, wie groß der Ausschnitt ihrer Unkrautkarte sein soll (Anzahl der Zellen), wie groß die Unkrautnester sein sollen (Breite der Unkrautnester) und wie hoch die Variation (Variationskoeffizient) der Unkrautdichten innerhalb eines Unkrautnestes (Variation innerhalb der Nester) sind.

- b. Die Eintrittswahrscheinlichkeiten, mit denen die durchschnittlichen Unkrautdichtewerte innerhalb der Unkrautnester ermittelt werden, können Sie verändern, indem Sie auf den Button „Eintrittswahr. ändern“ klicken und Ihre gewünschten Anpassungen in dem sich öffnenden Fenster vornehmen.
- 4) Nachdem Sie nun eine Unkrautkarte erzeugt bzw. eine vorhandene geladen haben, können Sie eine teilflächenspezifische Unkrautbekämpfung simulieren („UK-Bekämpfung durchführen!“). Auch hier haben Sie eine Reihe von Einstellungsmöglichkeiten.
 - a. Sie können die Schadschwellen verändern, ab deren Überschreiten eine Unkrautbekämpfung ausgelöst wird.
 - b. Sie können die Präzision der Teilflächenbehandlung ändern, indem Sie die Größe der Behandlungsflächen variieren.
 - c. Der Simulationszeitraum und der Zuckerrübenabstand können in den entsprechenden Feldern verändert werden.
 - d. Sie können festlegen, ob die Startpunkte der Unkrautbekämpfung zufällig gewählt werden oder nicht (vgl. Abschnitt 5.5.6). Wählen Sie feste Startpunkte, so können Sie den Startpunkt in X und Y-Richtung festlegen.
 - e. Weiter können Sie entscheiden, ob die Konkurrenz-, Populations- und die Herbizidparameter zufällig gewählt werden (stochastisches Modell) oder ob in jedem Fall die Durchschnittswerte verwendet werden sollen (deterministisches Modell).
 - f. Nachdem Sie den Button „UK-Behandlung durchführen!“ betätigt haben, können Sie den Bekämpfungserfolg visualisieren, indem Sie den Button „Adulte Unkräuter anzeigen“ betätigen.
- 5) Die Ergebnisse Ihrer Unkrautbekämpfung werden Ihnen angezeigt, indem die durchschnittlichen jährlichen Herbizidaufwendungen, die Konkurrenzeffekte, die entscheidungsrelevanten zusätzlichen Kosten der Unkrautbekämpfung in Zuckerrüben und die Summe aus all diesen Posten, die Gesamtkosten, in den entsprechenden Feldern angezeigt werden.
- 6) Wollen Sie die Kalkulation für dieselbe Startverunkrautung wiederholen, betätigen Sie den Knopf „neu initialisieren“. Sie können nun eine weitere Unkrautbekämpfung mit veränderten Einstellungen simulieren.
- 7) Die Unkrautkarten können Sie als bmp-Datei abspeichern.

- 8) Für einen systematischen Vergleich zwischen den unterschiedlichen Unkrautbekämpfungsstrategien betätigen sie den Button: „Weiter zu Systemvergleich TFU versus GFU“.

Abbildung 52: Weed Control (räumliche Modellumgebung)



10.4 Systematischer Vergleich zwischen unterschiedlichen Unkrautbekämpfungsstrategien

- 1) Betätigen Sie den Button „Eintrittswahrscheinlichkeiten für Ausgangsverteilungen ändern“, so gelangen Sie in ein Fenster, in dem Sie für die Wahrscheinlichkeitsverteilung 1 und 2 anpassen können (siehe auch Tabelle 24).
- 2) Wenn Sie anschließend auf den Button „neue Unkrautverteilungen erstellen“ klicken, werden Unkrautkarten mit einer Ausdehnung von 100 x 100 Zellen mit unterschiedlichen Nestergrößen erzeugt (siehe Abschnitt 5.5.4). Die Unkrautkarten werden als Bilder in dem Ordner Desktop\Karten abgespeichert. Dies funktioniert jedoch nur dann, wenn nach betätigen des Buttons keine neuen Fenster geöffnet werden. Die Rasterkarten an sich werden als Access-Datei in dem Ordner Desktop\Datenbanken\Ausgangsverteilungen

11 Zusammenfassung

Aus umweltpolitischen Gründen werden Möglichkeiten gesucht, um den Einsatz von Pflanzenschutzmitteln in der Landwirtschaft zu reduzieren. Neben einer Reihe pflanzenbaulicher Maßnahmen, die die Notwendigkeit für chemischen Pflanzenschutz reduzieren, bieten sich Möglichkeiten, den Einsatz von Pflanzenschutzmitteln zu optimieren. Unkräuter sind auf landwirtschaftlichen Flächen sehr ungleichmäßig verteilt. Dennoch erfolgt die chemische Unkrautbekämpfung derzeit auf der gesamten Fläche einheitlich. *Precision farming* in der Unkrautkontrolle bietet die Möglichkeit, den Herbizideinsatz an die räumliche Verteilung von Unkräutern innerhalb eines Schlags anzupassen und somit die Verwendung von Herbiziden zu optimieren und zu reduzieren. Als Entscheidungsgrundlage für die kleinräumig angepasste Herbizidapplikation dient die ökonomische Schadschwelle. Ohne Berücksichtigung von Zinsen stabilisieren sich langfristige Schadschwellen zur Unkrautbekämpfung erst bei sehr niedrigen Werten. Werden Zinsen berücksichtigt, so sind die dynamischen Schadschwellen deutlich größer als null. Die Unkrautdichten schwanken auf Ackerflächen zum Teil innerhalb kurzer Distanzen stark, so dass eine Erfassung der räumlichen Verteilung von Unkräutern nur mittels automatischer Erkennungssysteme mit einer sehr hohen räumlichen Auflösung möglich ist. Für eine räumlich differenzierte Applikation von unterschiedlichen Wirkstoffen in einem Arbeitsgang sind entweder mehrere Pflanzenschutzspritzen auf einem Trägerfahrzeug oder ein Direkteinspeisungssystem erforderlich. Sowohl die automatische Unkrauterkennung als auch die Applikationstechnik für Teilflächenunkrautbekämpfung befinden sich derzeit noch in der Entwicklungsphase.

In pflanzenbaulichen Versuchen zur Teilflächenunkrautbekämpfung konnten sehr unterschiedliche Einsparungen an Herbiziden realisiert werden. Mögliche Ertragseffekte oder andere potenzielle negative Effekte durch Unkräuter und die dynamischen Aspekte der Folgeverunkrautung wurden bei der Auswertung dieser Versuche häufig nicht in ausreichendem Maße berücksichtigt. Eine Abschätzung der realisierbaren Einsparungen und eine ökonomische Bewertung von Teilflächenunkrautbekämpfung allein auf Grund dieser Ergebnisse sind deshalb schwierig. Um das derzeit vorhandene Wissen zum Konkurrenzverhalten und zur Populationsdynamik bei der ökonomischen Bewertung von Teilflächenunkrautbekämpfung zu berücksichtigen, wurde in dieser Arbeit ein Computersimulationsprogramm entwickelt. Für die wichtigsten Modellparameter zur Beschreibung der Populationsdynamik und des Konkurrenzgeschehens wurden

Eintrittswahrscheinlichkeiten für bestimmte Parameterwerte festgelegt. Anschließend wurden Monte-Carlo-Simulationen durchgeführt, um neben den Erwartungswerten auch die Verteilungsfunktionen der Ergebnisse zu bestimmen. Je niedriger die räumliche Auflösung der Teilflächenunkrautbekämpfung und je kleiner die Teilflächen mit ähnlichen Unkrautdichten (Unkrautnester) sind, desto niedriger sind die möglichen Einsparungen einer Teilflächenunkrautbekämpfung gegenüber Ganzflächenunkrautbekämpfung und desto höher ist die Varianz als Maß für das Risiko. Teilflächenunkrautbekämpfung weist generell höhere Variationen in den Kosten auf als prophylaktische Ganzflächenbehandlungen. Je nach Ausgangsverteilung, Präzision, Fruchtfolge und ganzflächiger Referenz können durch Teilflächenunkrautbekämpfung durchschnittlich zwischen -25 und +40 €/ha an Kosten eingespart werden. Diese Kosteneinsparungen werden durch einen verminderten Herbizidverbrauch und erhöhte Konkurrenzeffekte verursacht. Sollten die eingesparten Herbizidkosten höher gewichtet werden als die erhöhten Konkurrenzeffekte, beispielsweise durch staatliche Ausgleichszahlungen, so erhöht sich das Leistungspotenzial von TFU. Ein Großteil der Kosten- und Herbizideinsparung kann bereits durch zeitlich angepasste und räumlich einheitliche Unkrautbekämpfung erreicht werden (*factor-adjusted doses*). In manchen Betrieben ist eine solche Anpassung aus arbeits- und/ oder organisationstechnischen Gründen jedoch nicht möglich. Schätzungen der zusätzlichen Kosten für eine automatische Unkrauterkennerung und räumlich differenzierte Wirkstoffapplikation ergaben unter der Voraussetzung einer hohen Auslastung und großen Schlägen Beträge von ca. 10 €/ha.

Auf Grund der derzeit noch fehlenden Kenntnisse zur Beschreibung der Populationsdynamik und der Konkurrenzeffekte sind die aufgezeigten Modellergebnisse mit Unsicherheiten behaftet. Generell muss das ökonomische Potenzial von Teilflächenunkrautbekämpfung derzeit jedoch als gering eingestuft werden. Diese Einschätzung gilt für den derzeitigen Wissensstand und die zu erwartenden technischen Entwicklungen. Neue Erkenntnisse oder neue politischen Rahmenbedingungen können zu anderen Einschätzungen führen. Diese Veränderungen können problemlos im Simulationsprogramm umgesetzt werden, so dass mit dem Programm ein wichtiges Instrument zur objektiven Beurteilung von *precision farming* entwickelt wurde.

12 Summary

Environmental concerns have motivated attempts to reduce the use of pesticides in agriculture. Apart from various crop production measures which reduce the need for chemical plant protection, there are also ways to optimise the use of pesticides. Despite the fact that weeds are spread very unevenly across agricultural land chemical pesticides are usually applied evenly across a whole field. *Precision farming* in weed control can optimise and reduce the use of pesticides by suiting the pesticide use to the actual spatial distribution of weeds across a field. Thresholds determining economic damage are used as a basis for decision making about the application of pesticides that is adapted to small-scale spatial differentiation. Not taking interest rates into account, these thresholds in the long run only balance out at very low values. Including interest rates, however, dynamic thresholds are clearly larger than zero. Weed densities in crops can vary immensely and over short distances, which means that recording them requires an automatic identification system with a very detailed spatial resolution. In order to apply various pesticides in a spatially differentiated way in one cycle, one could have several spray systems on one vehicle or a system with a direct feeder. The technologies for both the automatic identification and the spatially differentiated pesticide application are still at the development stage.

Experiments in spatially differentiated weed control resulted in rather disparate savings of pesticides used. Interpreting these experiments, potential effects on profits or other potentially negative effects of weeds and dynamic aspects of weeds in subsequent years have often not been sufficiently considered. It is therefore difficult to estimate possible savings and to economically evaluate spatially differentiated weed control.

The aim of the simulation programme developed in this study is to take current knowledge about competition and population dynamics of weeds into account when evaluating the economics of spatially differentiated weed control. Probabilities for certain parameter values have been determined for the most important parameters of the model describing population dynamics and competition. Subsequently, Monte-Carlo simulations were carried out in order to determine expected values as well as the distribution functions of results. If one compares spatially differentiated weed control to evenly applying pesticides, then possible savings are lower and variance higher the lower the spatial resolution of spatially differentiated weed control and the smaller the land proportions with similar weed densities. The costs of spatially

differentiated weed control generally vary more than for prophylactic evenly applied weed control. Spatially differentiated weed control can save on average between -25 and + 40 €/ha, depending on initial distribution, precision, crop rotation and chosen reference of whole field weed control. This reduction of costs is due to reduced amounts of pesticides and stronger competition. If the reduction of pesticides used were to be weighed more heavily than the increased competition (for example through government compensation payments), then spatially differentiated weed control will appear more profitable.

A large proportion of savings can already be incurred through factor-adjusted doses, spatially evenly used pesticides which are adjusted to time. For some farms, however, such an adjustment is not possible because of work and organisation related issues. Assuming a high usage and large fields, additional costs for an automated weed identification system and spatially differentiated pesticide application were estimated to be around 10 €/ha.

Due to insufficient understanding of population dynamics and the effects of competition, there is still some uncertainty about the results of the model. In general, the economic potential of spatially differentiated weed control has to be regarded as limited. This estimate is valid for the current state of knowledge and the technological development one can expect. New findings and new policies can lead to differing estimates. These changes can easily be included in the simulation programme which is therefore an important instrument for an objective evaluation of spatially differentiated weed control.

13 Quellenverzeichnis

- AARTS, H. F. M. (1986):** A computerized model for predicting changes in population of *Galium aparine*. In: In: Proceedings EWRS Symposium, Economic Weed Control, S. 277 – 284.
- ACKER VAN, R. C., LUTMAN, P. J. W. UND FROUD-WILLIAMS, R. J. (1997):** The influence of interspecific interference on the seed production of *Stellaria media*. In: Weed Research, 37, S. 277 – 286.
- AHRENS, W. H. (1994):** Relative costs of a weed-activated versus conventional sprayer in Northern Great Plains fallow. In: Weed Technology 8, S. 50 – 57.
- ALBRECHT, H. (2004):** Langfristige Veränderung des Bodensamenvorrates bei pflugloser Bodenbearbeitung. In: Zeitschrift für Pflanzenkrankheiten und Pflanzenschutz. Sonderheft XIX, S. 97 – 104.
- ALLEN, L. J., S., ALLEN, E. J. UND PONWEERA, S. (1996):** A mathematical model for weed dispersal and control. In: Bulletin of Mathematical Biology, 58, S. 815 – 834.
- AMMON, H. U. (2002):** Unkrautbekämpfung in Kulturen. In: Zwerger, P., Ammon, H. U.: Unkraut – Ökologie und Bekämpfung, S. 238 – 348.
- ANDERSSON, L. (1992):** Effect of MCPA on the seed production of six weed species. In: IXème Colloque International sur la Biologie des Mauvaises Herbes, S. 279 – 287.
- ANDREASEN, C., STREIBIG, J. C. UND HAAS, H. (1991):** Soil properties affecting the distribution of 37 weed species in Danish soil. In: Weed Research, 31, S. 181 – 187.
- AUDSLEY, E. (1993):** Operational Research Analysis of Patch Spraying. In: Crop Protection, 12, S. 111 – 119.
- AUERNHAMMER, H. (2003):** Wie weiter bei *precision farming*? – Entwicklungsstand und Trends. In DLG-Pressemitteilung Nr. 3. 10. November 2003. Online im Internet: URL: http://www.agritechnica.com/uploads/media/trend_Precisionfarming.pdf.
- AULD, B. A., MENZ, K. M. UND TISDELL, C. A. (1987):** Weed Control Economics. Academic Press, Suffolk.
- BACKES, M. PLÜMER, L. (2003):** On the adequacy of GIS-generated maps for *Precision farming*. In: Proceedings of the 9th Scandinavian Research Conference on Geographical Information Sciences.

- BACKES, M., DÖRSCHLAG, D. UND PLÜMER, L. (2004 a):** Ein neues Verfahren zur Verifizierung von Unkrautbonituren. In: Zeitschrift für Pflanzenkrankheiten und Pflanzenschutz, Sonderheft XIX, S. 439 – 443.
- BACKES, M., SCHUMACHER, D. UND PLÜMER, L. (2004 b):** *Precision farming* mit GIS. Wie präzise sind landwirtschaftliche Bonituren. In: Referate der 25. GIL Jahrestagung, 2004, Bonn, S. 283 – 286.
- BALLARÉ, C. L., SCOPEL, A. L., GHERSA, C. M. und SANCHEZ, R. A. (1987):** The demography of *Datura ferox* (L.) in soybean crops. In: Weed Research, 27, S. 91 – 102.
- BALZTER, H., BRAUN, P. W. UND KÖHLER, W. (1998):** Cellular automata models for vegetation dynamics. In: Ecological Modelling, 107, S. 113 – 125.
- BBA (2004):** Integrierter Pflanzenschutz. Online im Internet, URL: http://www.bba.de/ip/ip_start.htm, Abrufdatum: 1.12.2004.
- BEER, E., SCHMITZ, W. (1981):** Unkrautbekämpfung nach Anwendung des Konzeptes der wirtschaftlichen Schadensschwelle in Getreide. In: Gesunde Pflanzen, 33, S. 142 – 151.
- BEHLE-SCHALK (2002):** Persönliches Gespräch. Rauischholzhausen, 17.01.2002.
- BERG, E., HARSCH, S. B. UND KUHLMANN, F. (1985):** Kontrolltheoretische Konzepte als Grundlage für die Entwicklung von Entscheidungshilfsmitteln. In: Agrarwirtschaft, 34, Heft 7, S. 206 – 212.
- BERG, E., KUHLMANN, F. (1993):** Systemanalyse und Simulation für Agrarwissenschaftler und Biologen. Ulmer-Verlag, Stuttgart.
- BERG, E., THOER, K. UND STEFFEN, G. (1988):** Konzeption und Entwicklung bioökonomischer Modelle. In: Agrarwirtschaft 37, S. 1 – 11.
- BLACKSHAW, R. E. (1996):** Weed sensing sprayer reduces herbicide use in conservation tillage. In: Proceedings Second International Weed Control Congress, Foulum, Denmark, S. 13 – 16.
- BLANCO-MORENO, J. M., CHAMORRO, L., MASALLES, R. M., RECASENS, J. UND SANS, F. X. (2004):** Spatial distribution of *Lolium rigidum* seedlings following seed dispersal by combine harvesters. In: Weed Research, 44, S. 375 – 387.
- BLUMENBERG, E. (1987):** Auswirkungen der Berücksichtigung von Schadensschwellen für Unkräuter in Winterweizen in einer Fruchtfolge mit Zuckerrüben und Wintergetreide und zur Vorhergehensweise bei der Ermittlung der Unkrautbesatzes unter praktischen Bedingungen. Dissertation Göttingen.

- BMVEL (BUNDESMINISTERIUM FÜR VERBRAUCHERSCHUTZ, ERNÄHRUNG UND LANDWIRTSCHAFT) (2004):** Reduktionsprogramm chemischer Pflanzenschutz. Nachhaltige Landwirtschaft – Vorsorgender Verbraucherschutz – Schutz des Naturhaushaltes. Berlin.
- BRANDES, A., SCHÄUFELE, W. R. UND BENZ, W. (1998):** Einfluss unterschiedlicher Unkrautdeckungsgrade auf den Ertrag von Zuckerrüben. In: Zeitschrift für Pflanzenkrankheiten und Pflanzenschutz, Sonderheft XIV, S. 351 – 356.
- BRODERSEN, C. M. (1995):** Die Bedeutung der Individualisierung des Schadschwellenkonzeptes für den Pflanzenschutz. Dissertation Kiel.
- BULLOCK, D. S. und BULLOCK, D. G. (2000):** From Agronomic Research to Farm Management Guidelines: A Primer on the Economics of Information and Precision Technology. Precision Agriculture, 2, S. 71 – 101.
- CARTER, A. D. (2000):** Herbicide movement in soils: Principles, pathways and processes. In: Weed Research, 40, S. 113 – 122.
- CASWELL, H., (1978):** A general formula for the sensitivity of population growth rate to changes in life history parameters. In: Theoretical Population Biology, 14, S. 215 – 230.
- CHRISTENSEN, S. HEISEL, T. (1998):** Patch spraying using historical, manual and real-time monitoring of weeds in cereals. In: Zeitschrift für Pflanzenkrankheiten und Pflanzenschutz, Sonderheft XVI, S. 257 – 263.
- CHRISTENSEN, S., HEISEL, T., WALTER, A. M. UND GRAGLIA, E. (2003):** A decision algorithm for patch spraying. In: Weed Research, 43, S. 276 – 284.
- CLAUBEIN, W., BAEUMER, K. (1992):** Einfluss von Fruchtfolge, chemischem Pflanzenschutz und Stickstoffdüngung auf die Segetalflora eines Dauerversuches auf Lössböden. In: Zeitschrift für Pflanzenkrankheiten und Pflanzenschutz, Sonderheft XIII, S. 243 – 251.
- COLBACH, N., ROGER-ESTRADE, J., CHAUVEL, B. und CANEILL, J. (2000):** Modelling vertical and lateral seed bank movements during mouldboard ploughing. In: European Journal of Agronomy 13, S. 111 – 124.
- COLLINGS, L. V., BLAIR, A. M., GAY, A. P., DYER, C. J. UND MACKAY, N. (2003):** The effect of weather factors on the performance of herbicides to control *Alopecurus myosuroides* in winter wheat. In: Weed Research, 43, S. 146 – 153.
- COUSENS, R. D. (1985):** A simple model relating yield loss to weed density. In: Annals of Applied Biology, 107, S. 239 – 252.

- COUSENS, R. D. (1986):** The use of population models in the study of the economic weed control. In: Proceedings EWRS Symposium, Economic Weed Control, S. 269 – 276.
- COUSENS, R. D., CROFT, A. M. (2000):** Weed populations and pathogens. In: Weed Research, 40, S. 63 – 82.
- COUSENS, R. D., MORTIMER, M. (1995):** Dynamics of weed populations. Cambridge University Press.
- COUSENS, R. D., MOSS, S. R., CUSSANS, G. W. UND WILSON, B. J. (1987):** Modelling weed populations in cereals. In: Review of Weed Science, 3, S. 93 – 112.
- CUSSANS, G. W. (1992):** Identifying ways of optimising herbicide use in crops. In: Proceedings of the first International Weed Control Congress, Melbourne, Australia, S. 208 – 14.
- DAMMER, K. H., WARTENBERG, G. (2004):** Wirkung sensorgestützter Herbizidapplikation in Getreide und Erbsen. In: Zeitschrift für Pflanzenkrankheiten und Pflanzenschutz, Sonderheft XIX, S. 405 – 412.
- DEKKER, J., MEGGITT, W. F. (1983):** Interference between velvetleaf (*Abutilon theophrasti* Medic.) and soybean *Glycine max* (L.) Merr. II. Population dynamics. In Weed Research, 23, S. 103 – 107.
- DENT, J. B., FAWCETT, R. H., THORNTON, P. K. (1989):** Economics of crop protection in Europe with reference to weed control. In: Brighton Crop Protection Conference – Weeds, S. 917 – 926.
- DERKSEN, D. A., SWANTON, C. J. UND THOMAS, A. G. (1991):** Weed community changes over time in reduced tillage systems. In: Abstracts of the Weed Science Society of America, 31, S. 40.
- DEW, D. A. (1992):** An index of competition for estimating crop loss due to weeds. In: Canadian journal of plant science, 52, S. 921 – 927.
- DICKE, D., FRIES, A. und GERHARDS, R. (2004):** Ermittlung von Schadschwellen für die teilflächenspezifische Unkrautbekämpfung im Braugerstenanbau. In: Zeitschrift für Pflanzenkrankheiten und Pflanzenschutz, Sonderheft XIX, S. 413 – 421.
- DIELEMAN, J. A., MORTENSEN, D. A. BUHLER, D. D., CAMBARDELLA, C. A. und MOORMANN, T. B. (2000):** Identifying associations among site properties and weed species abundance. I. Multivariate analysis. In: Weed Science, 48, S. 567 – 575.
- DIERCKS, R., HEITEFUSS, R. (1994):** Gezielter chemischer Pflanzenschutz. In: DIERCKS, R., HEITEFUSS, R.: Integrierter Landbau. S. 152 – 170.

- DIERCKS, R., HEYE, C. (1970):** Notwendigkeit und Problematik der Ermittlung von Schadensschwellenwerten. In: Zeitschrift für Pflanzenkrankheiten und Pflanzenschutz, S. 610 – 627.
- DORR, G. J., PANNELL, D. J. (1992):** Economics of improved spatial distribution of herbicide for weed control in crops. Crop Protection, 1992, Vol. 11, S. 385 – 391.
- DOYLE, C. J., COUSENS, R. UND MOSS, S. R. (1986):** A model of the economics of controlling *Alopecurus myosuroides* Huds. in winter wheat In: Crop Protection, 5, S. 143 – 150.
- DOYLE, C. J (1997):** A review of the use of models of weed control in integrated crop protection. In: Agriculture, Ecosystems and Environment, 64, S. 165 – 172.
- DOYLE, C. J., COUSENS, R. UND MOSS, S. R. (1986):** A model of the economics of controlling *Alopecurus myosuroides* Huds. in winter wheat. In: Crop Protection, 5, S. 143 – 150.
- DREYER (BETRIEBSLEITER DER DOMÄNE ST. LUDGERI) (2002):** Persönliches Gespräch, Helmstedt, 27. und 28.03.02.
- DREYER (BETRIEBSLEITER DER DOMÄNE ST. LUDGERI) (2004):** Persönliches Gespräch, Helmstedt, 16.03.2004.
- DUNKER, M. (2002):** Erfassung und Modellierung der kleinräumigen Unkrautverteilung auf Ackerflächen in Abhängigkeit von der Bodenvariabilität. Dissertation, TU Braunschweig
- EHLERT, D., DAMMER, K.-H. (2002):** Herbizide, Fungizide und Wachstumsregler (TP III-5). In: Tagungsband Preagro, Managementsystem für den orstspezifischen Pflanzenbau, S. 275 – 292.
- ENGQVIST, A., BENGTTSSON, P. und ALNESS, K. (1997):** Selective broad-leaved weed control by site based on plant variables. In: Aspects of Applied Biology, 48, S. 65 - 70
- EUROPÄISCHE KOMMISSION (2002):** Hin zu einer thematischen Strategie zur nachhaltigen Nutzung von Pestiziden. Brüssel.
- EUROSTAT (2002):** The use of plant protection products in the European Union, Data 1992 – 1999. Online im Internet: URL: http://europa.eu.int/comm/eurostat/newcronos/reference/sdds/en/milieu/use_of_plant_protection_products.pdf, Abrufdatum: 16.08.2004.
- FEDER, G. (1979):** Pesticide, Information, and Pestmanagement under Uncertainty. In: American Journal of Agricultural Economics, 61, S. 97 – 103.
- FELTON, W. L., DOSS, A. F., NASH, P. G. UND MCCLOY, K. R. (1991):** To selectively spot spray weeds. In: American Society of Agricultural Engineers Symposium 11, S. 427 – 432.

- FERNANDEZ-QUINTANILLA, C. (1988):** Studying the population dynamics of weeds. In: Weed Research, 28, S. 289 – 295.
- FLATTER, A. (1999):** Untersuchungen zur Verbesserung der Vorhersage unkrautbedingter Ertragsverluste in Winterweizen. Dissertation, Universität Hohenheim.
- FOGELFORS, H. (1985):** The importance of field edge as a spreader of seed-propagated weeds. In: 20th Swedish Weed Conference, Uppsala, Sweden, S. 178 – 189.
- FRANZ, K., KAISER, F. UND GEROWITT, B. (1990):** Wirkung unterschiedlich hoher Stickstoffdüngung auf Entwicklung und Samenproduktion ausgewählter Unkrautarten im Winterweizen. In: Zeitschrift für Pflanzenkrankheiten und Pflanzenschutz, Sonderheft XIII, S. 127 – 135.
- FREYER, J. D. (1979):** Key factors effecting important weed problems and their control. In: Proceedings of EWRS Symposium, The Influence of Different Factors of Development and Control of Weeds, Mainz, S. 13 – 23.
- FROUD-WILLIAMS, R. J. (1987):** Survival and fate of weed seed populations: interactions with cultural practice. In: Proceedings British Crop Protection Conference-Weeds, S. 707 – 718.
- FUNK, H. (2004):** Verhandeln Sie über die Zu- und Abschlüge. In: top agrar, 6, S. 92 – 96.
- GEHRING, K. (1999):** Einfluss der Unkrautbekämpfungsintensität auf Unkrautflora und Unkrautsamenpotenzial. In: Zuckerrübe, Heft 48, 1999.
- GEHRING, K. (2003 a):** Unkrautbekämpfung im Getreidebau – Allgemein. Online im Internet, URL: http://www.lfl.bayern.de/ips/landwirtschaft/06720/linkurl_0_7.pdf, Abrufdatum: 16.10.2003.
- GEHRING, K. (2003 b):** Unkrautbekämpfung im Getreidebau – Herbizidresistenz. Online im Internet, URL: http://www.lfl.bayern.de/ips/landwirtschaft/06720/linkurl_0_7.pdf, Abrufdatum: 16.10.2003.
- GERHARDS, R., SÖKEFELD, M., NABOUT, A., THERBURG, R.-D. und W. KÜHBAUCH (2002):** Online weed control using digital image analysis. In: Zeitschrift für Pflanzenkrankheiten und Pflanzenschutz, Sonderheft XVIII, S. 421-427.
- GERHARDS, R., WYSE-PESTER, D. Y., MORTENSEN, D. A. (1997):** Characterizing spatial stability of weed populations using interpolated maps. In: Weed Science, 45, S. 108 – 119.
- GEROWITT, B. (1998):** Untersuchungen zur Abnahme des Samenvorrates von Galium aparine L. im Boden unter dem Einfluss der Bodenbearbeitung. In: Zeitschrift für Pflanzenkrankheiten und Pflanzenschutz, Sonderheft XVI, S. 91 – 98.

- GEROWITT, B. (2002):** Interaktionen zwischen Kulturpflanzen und Unkräutern. In: ZWERGER, P. AMMON, H. U.: Unkraut – Ökologie und Bekämpfung. S. 79 – 103.
- GEROWITT, B., HEITEFUSS, R. (1989):** Sind Schadensschwellen „out“? In: Pflanzenschutz-Praxis 3, S. 9 – 11.
- GEROWITT, B., HEITEFUSS, R. (1990):** Weed economic thresholds in the F. R. Germany. In: Crop Protection 9, S. 323 – 331.
- GHERSA, C. M., BENECK-ARNOLD, R. L., SATORRE, E. H. UND MARTINEZ-GHERSA, M. A. (2000):** Advances in weed management strategies. In: Field Crops Research, 67, 2, S. 95 – 104.
- GROENENDAEL VAN, J. M. (1988):** Patchy distribution of weeds and some implications for modelling population dynamics: a short literature review. In: Weed Research, 1988, 28, S. 437 – 441.
- GRUNDY, A. C., MEAD, A. UND BURSTON, S. (2003):** Modelling the emergence response of weed seed to burial depth: interactions with weed density, weight and shape. In: Journal of Applied Ecology, 2003, 40, S. 757 – 770.
- GUJARATI, D. N. (1995):** Basic Econometrics. 3.te Auflage.
- GUYER, D. E., MILES, G. E., SCHREIBER, M. M., MITCHELL, O. R. UND VANDERBILT, V. C. (1986):** Machine vision and image processing for plant identification. In: Trans. ASAE 29 (6), S. 1500 – 1507.
- HÅKANSON, S. (1986):** Competition between crops and weeds – influence factors, experimental methods and research needs. In: Proceedings of EWRS Symposium, Economic weed control, S. 49 – 60.
- HARPER, J. L. (1977):** The population Biology of Plants. Academic Press, London.
- HÄUSLER, A., NORDMEYER, H. (1995):** Impact of soil properties on weed distribution. In: Proceedings 1995 of the Seminar on Site Specific Farming (ed. SE Olesen). Kolkaergaard, Aarhus, Denmark, S. 186 - 189
- HDLGN (HESSISCHES DIENSTLEISTUNGSZENTRUM FÜR LANDWIRTSCHAFT, GARTENBAU UND NATURSCHUTZ) (2002):** Warndienst Ackerbau. Nr. 1, Februar 2002.
- HEIL, M. (PFLANZENSCHUTZDIENST HESSEN) (2002):** Persönliches Gespräch. Wetzlar, 17.01.2002.
- HEIL, M. (PFLANZENSCHUTZDIENST HESSEN) (2004):** Persönliches Gespräch. Wetzlar, 10.06.2004.
- HEISEL, T., ANDREASEN, C., ERSBØLL, A. K. (1996):** Annual weed distributions can be mapped with kriging. Weed Research 36 ,325 337.

- HEITEFUSS, R. H., BODENDÖRFER, H. und GEROWITT, B. (1994):** Langfristige Entwicklung und Simulation der Verunkrautung in der Fruchtfolge Rüben-Winterweizen-Wintergerste bei unterschiedlicher Häufigkeit der Bekämpfung und unter Berücksichtigung von Schadensschwellen. In: HEITEFUSS, R. (Hrsg.): Ingegrierte Pflanzenproduktion II, VCH-Weinheim, S. 214 – 229.
- HEYLAND, K. U., GOLDHAMMER, T., SCHMITZ, P. H. UND E. SCHENKE (1986):** Auswirkungen von Unkrautbekämpfungsprogrammen über die Fruchtfolge. In: EWRS Symposium 1986, S. 293 – 300.
- HOFFMANN, B. (2004):** Gut bestückte Mittelpalette. In: Neue Landwirtschaft, 9, S. 36 – 40.
- HOFSTETTER, W. (1986):** Untersuchungen zur Schadwirkung und zur Populationsdynamik von Einjährigem Bingelkraut (*Mercurialis annua*). Dissertation, Universität Gießen.
- HOLZMANN, A. (1987):** Zur Populationsdynamik und Schadwirkung des Acker-Stiefmütterchens (*Viola arvensis* Murr.) als Grundlage einer wirtschaftlichen Bekämpfung. Dissertation, Hannover.
- HOPPE, J. H., KRÜSSEL, S. (2004):** Wirkstoffe nicht verheizen. In: DLG-Mitteilung 1, S. 36 – 39.
- HOWARD, C. L. MORTIMER, A. M. COULD, P. PUTWAIN, P. D. COUSENS, R. UND CUSSANS, G. W. (1991):** The dispersal of weeds; seed movement in arable agriculture. In: Proceedings Brighton Crop Protection Conference – Weeds, Brighton, S. 821 – 828.
- ISAAKS, E. H., SRIVASTAVA, R. M. (1989):** An Introduction to Applied Geostatistics.
- JENSEN, J. E. (2004):** Weed Control: presence and future – the Danish view. In: Zeitschrift für Pflanzenkrankheiten und Pflanzenschutz, Sonderheft XIX, S. 19 – 26.
- JOHNSON, G. A. MORTENSEN, D. A. und MARTIN, A. R. (1995):** A simulation of herbicide use based on weed spatial distribution. In: Weed Research 35, S. 197 – 205.
- KAISER, F. (1989):** Langfristige Beurteilung und Vorausschätzung der Unkrautdichte in der Fruchtfolge Rüben-Winterweizen-Wintergerste bei unterschiedlicher Bekämpfungshäufigkeit. Dissertation Göttingen.
- KAUL, H.-P., HEYLAND, K.-U. (1992):** Zum Einfluß von Unkraut- und Nutzpflanzendichte auf die Unkraut-Populationsdynamik bei variiertem Herbizideinsatz in Winterweizen. In: Zeitschrift für Pflanzenkrankheiten und Pflanzenschutz, Sonderheft XIII, 171-180.
- KEES, H. (1975):** Beziehungen zwischen Flughaferbesatz und Ertragsbeziehung bei Weizen nach Einsatz von Flughaferherbiziden in Nachauflaufverfahren – Versuchserfahrungen in Bayern 1971 – 1974. In: Zeitschrift für Pflanzenkrankheiten und Pflanzenschutz, Sonderheft VII, S. 34 – 38.

- KEMPENAAR, C., LOTZ, L. A. P. (1999):** Weed control with limited use of herbicides: the MLHD method. Annual report AB-DLO 1998, Wageningen, The Netherlands, S. 45 – 48.
- KIM, D. S., BRAIN, P. MARSHALL, E. J. P. UND CASELEY, J. C. (2002):** Modelling herbicide dose and weed density effects on crop: weed competition. In: Weed Research, 2002, 42, S. 1 –13.
- KOCH, W. (1969):** Einfluss von Umweltfaktoren auf die Samenphase annueller Unkräuter insbesondere unter dem Gesichtspunkt der Unkrautbekämpfung, Habilitationsschrift, Hohenheim.
- KOCH, W., HURLE, K. (1978):** Grundlagen der Unkrautbekämpfung. Stuttgart.
- KOCH, W., WALTER, H. (1983):** Principles of crop/weed competition – the limitations and possibilities of application of economic threshold levels (ETL) in weed management programs. In: PLITS 1, S. 42 – 53.
- KÖTTER, U. (1991):** Zur Biologie von Ackerfuchsschwanz (*Alopecurus myosuroides* Huds.) und dessen Konkurrenzbeziehungen zu Winterweizen. In: Gesunde Pflanzen 43, S. 184 – 189.
- KRÖCHERT, R. M. (1982):** Überprüfung von Schadensschwellen für Unkräuter in Winterweizen unter Berücksichtigung von N-Düngung, Fungizid- und Herbizideinsatz. Dissertation Göttingen.
- KROHMANN, P. (2003):** Effizienz teilschlagspezifischer Unkrautkontrolle und räumlich-zeitliche Dynamik der Unkrautpopulation in einer Felderfolge und Monokultur. Dissertation Bonn.
- KROPFF, M. J., LAAR, H. H. VAN (1993):** Modelling Crop-Weed Interactions. CAB International, Wallingford, UK.
- KRÜGER, A. KETEL, D. H. UND SCHMIDT, B. (1996):** Unkrautbekämpfung mit angepassten Aufwandmengen. In: Zeitschrift für Pflanzenkrankheiten und Pflanzenschutz, Sonderheft XV, S. 455 – 461.
- KTBL (KURATORIUM FÜR TECHNIK UND BAUWESEN IN DER LANDWIRTSCHAFT) (2000):** Taschenbuch Landwirtschaft 2000/01. Darmstadt.
- KTBL (KURATORIUM FÜR TECHNIK UND BAUWESEN IN DER LANDWIRTSCHAFT) (2001):** Bewirtschaftung großer Schläge. Darmstadt.
- KTBL (KURATORIUM FÜR TECHNIK UND BAUWESEN IN DER LANDWIRTSCHAFT) (2002):** Betriebsplanung Landwirtschaft 2002/2003, Darmstadt.

- KUDSK, P. (1989):** Reduced herbicide doses in Denmark and the development of the concept of factor-adjusted doses. In: Proceedings 1989 Brighton Crop Protection Conference – Weeds, Brighton, UK, S. 545 – 554.
- KUDSK, P. (1999):** Optimising herbicide use – the driving force behind the development of the Danish decision support system. In: Proceedings 1999 Brighton Conference – Weeds, Brighton, UK, S. 737 – 746,
- KUDSK, P., STREIBIG, J. C. (2003):** Herbicides – a two-edged sword. In: Weed Research, 43, S. 90 – 102.
- KUHLMANN, F., GLENZ, H. (1994):** Computergestützte Entscheidungsmodelle für die Winterweizenproduktion. In: HEITEFUSS, R. (Hrsg.): Deutsche Forschungsgemeinschaft, Integrierte Pflanzenproduktion II, Forschungsbericht, Weinheim.
- LANDESPFLANZENSCHUTZAMT MECKLENBURG-VORPOMMERN (2002):** Ergebnisse und Empfehlungen aus dem Landespflanzenschutzamt Mecklenburg-Vorpommern. Druck: Innenministerium Mecklenburg-Vorpommern, Rostock.
- LANDWIRTSCHAFTSKAMMER WESTFALEN-LIPPE (2002):** Ratgeber Pflanzenbau und Pflanzenschutz. Münster.
- LANDWIRTSCHAFTSKAMMER WESTFALEN-LIPPE (2005):** Ratgeber Pflanzenbau und Pflanzenschutz. Münster.
- LEMERLE, D., VERBEEK, B. UND COOMBES, N. E. (1996):** The potential for selecting wheat varieties strongly competitive against weeds. In: Weed Research, 36, S. 505 – 513.
- LETTNER, J., HANK, K., WAGNER, P. (2001):** Ökonomische Potenziale der teilflächenspezifischen Unkrautbekämpfung. In: Berichte über Landwirtschaft, 1, S. 107 – 139.
- LOEWENBERG-DEBOER, J. (1996):** *Precision farming* and the New Information Technology: Implications for Farm Management, Policy, and Research: Discussion. In: American Journal of Agricultural Economics, Vol. 78, S. 1281 – 1284
- LUTMAN, P. J. W., CUSSANS, G. W., WRIGHT, K. J., WILSON, B. J., WRIGHT, G. M. UND H. M. LAWSON (2001):** The persistence of seeds of 16 weed species over six years in two arable fields. In: Weed Research, 42, S. 231 – 241.
- LUTMAN, P., J. W., BOWERMAN, P., PALMER, G. M. UND G. P. WHYTOCK (2000):** Prediction of competition between oilseed rape and *Stellaria media*. In: Weed Research, 40, S. 255 – 269.

- MAHN, E.-G. (2002 a):** Nutzen der Unkräuter. In: Zwerger, P. Ammon, H. U.: Unkraut – Ökologie und Bekämpfung. S. 14 –19.
- MAHN, E.-G. (2002 b):** Biologie und Ökologie der Unkräuter. In: Zwerger, P. Ammon, H. U.: Unkraut – Ökologie und Bekämpfung. S. 21 –74.
- MARSHALL, E, J. P., BRAIN, P. (1999):** The horizontal movement of seed in arable soil by different soil cultivation methods. In: Journal of Applied Ecology, 36, S. 443 – 454.
- MARSHALL, E. J. P. (1988):** Field-scale estimates of grass weed populations in arable land. In: Weed Research, 28, S. 191 – 198.
- MATTESON, P. C. (1995):** The ‘50% pesticide cuts’ in Europe: a glimpse of our future? In: American Entomologist, 41, S. 210 – 220.
- MCCANNY, S. J., CAVERS, P. B. (1988):** Spread of proso millet (*Panicum miliaceum* L.) in Ontario, Canada. ii. Dispersal by combines. Weed Research, 28, S. 67 – 72.
- MEDD, R. W., AULD, B. A., KEMP, D. R. UND MURISON, R. D. (1985):** Competitive interactions for cultural control of *Lolium rigidum* Gaud. in wheat. In: Australian Journal of Agricultural Research, 36, S. 361 – 371.
- MEINLSCHMIDT, E., KARCH, K. (1994):** Einfluss reduzierter Herbiziddosen auf Unkrautunterdrückung und Samenproduktion. In: Zeitschrift für Pflanzenkrankheiten und Pflanzenschutz, Sonderheft XIV, S. 373 – 380.
- MELANDER, B. (1995):** Impact of drilling date on *Apera spica-venti* L. and *Alopecurus myosuroides* Huds. in winter cereals. In: Weed Research, 35, S. 157 – 166.
- MENNERICH, J. (2001):** Trocknungskosten gehören auf den Prüfstand. In: top agrar, 8, S. 104.
- MITTLER, S. PETERSEN, J. UND KOCH, H.-J. (2002):** Bekämpfungsschwellen bei der Unkrautregulierung von Zuckerrüben. In: Zeitschrift für Pflanzenkrankheiten und Pflanzenschutz, Sonderheft XVIII, S. 499 – 509.
- MÖLLER, D. (1995):** ECOSIM – Ein dynamisches Simulationsmodell für Betriebe des ökologischen Landbaus. Dissertation Gießen.
- MORTENSEN, D. A., BASTIAANKS, L. und SATTIN, M. (2000):** The role of ecology in the development of weed management systems: an outlook. In: Weed Research, 40, S. 49 – 62.
- MORTENSEN, D. A., HIGLEY, L. G., DIELEMAN, J. A., LINDQUIST, J. L. UND HOLSHOUSER, D. L. (1998):** Ecological principles underlying integrated weed management systems. In: Proceedings Weed Science Society of America, 38, S. 62.

- MOSS, S. R. (1980):** A study of populations of black-grass (*Alopecurus myosuroides*) in winter wheat, as influenced by seed shed in the previous crop, cultivation system and straw disposal method. In: Annals of Applied Biology, 94, S. 121 – 126.
- MOSS, S. R. (1985a):** The influence of crop variety and seed rate on *Alopecurus myosuroides* competition in winter cereals. In: Proceedings of British Crop Protection Conference, S. 785 – 792.
- MOSS, S. R. (1985b):** The survival of *Alopecurus myosuroides* Huds. seeds in soil. In: Weed Research, 25, S. 201 – 211.
- MOSS, S. R. (1990):** The seed cycle of *Alopecurus myosuroides* in winter cereals. In Proceedings 8ème Colloque sur la Biologie, l'Écologie et la Systématique des Mauvaises Herbes, Dijon, France, S. 71 – 80.
- MÜLLER, P. (1981):** Ackerbau. 1. Auflage, Berlin, 232 S.
- MÜLLVERSTEDT, R. (1975):** Die Bedeutung von Galium aparine nach Pflanzenzahl und Zeitpunkt der Bekämpfung für die Ertragsbildung bei Winterweizen. In: Zeitschrift für Pflanzenkrankheiten und Pflanzenschutz, Sonderheft VII, S. 31 – 33.
- MUMFORD, J. D., NORTON, G. A. (1984):** Economics of Decision Making in Pest Management. In: Ann. Rev Entmol, 29, S. 157 – 174.
- MUNIER-JOLAIN, N. M., CHAUVEL, B. UND GASQUEZ, J. (2002):** Long-term modelling of weed control strategies: analysis of threshold-based options for weed species with contrasted competitive abilities. In Weed Research, 42, S. 107 – 122.
- MURALI, N. S., SECHER, B. J. M., RYDAHL, P. UND F. M. ANDREASEN (1999):** Application of information technology in plant protection in Denmark: from vision to reality. In: Computer and Electronics in Agriculture, 22, S. 109 – 115.
- MUBHOFF, O., HIRSCHAUER, N. (2004):** Optimierung unter Unsicherheit mit Hilfe stochastischer Simulation und Genetischer Algorithmen – dargestellt anhand der Optimierung des Produktionsprogrammes eines Brandenburger Marktfruchtbetriebes – . In: Agrarwirtschaft, 7, S. 264 – 279.
- NIEMANN, P. (1984):** Unkrautkonkurrenz in Winterroggen in Abhängigkeit von Stickstoffdüngung und Fungizidbehandlung. In: Zeitschrift für Pflanzenkrankheiten und Pflanzenschutz, Sonderheft X, S. 159 – 167.
- NIEMANN, P., HURLE, K., BEER, E. UND J. KAKAU (2000):** Mittelfristige Auswirkungen erhöhter Unkraut-Schadensschwellen in Getreide auf die Verunkrautung in den Folgekulturen. In: Zeitschrift für Pflanzenkrankheiten und Pflanzenschutz, Sonderheft XVII, S. 281 – 290.

- NORDMEYER, H, DUNKER, M. (1999):** Variable weed densities and soil properties in a weed mapping concept for patchy weed control. In: Proceedings Second European Conference on Precision Agriculture, Odense, Denmark, S. 453 – 462.
- NORDMEYER, H. (2004):** Arbeitsgruppenbesprechung am 16.03.2004, Braunschweig.
- NORDMEYER, H., NIEMANN, P. (1992):** Möglichkeiten der gezielten Teilflächenbehandlung mit Herbiziden auf der Grundlage von Unkrautverteilung und Bodenvariabilität. In: Zeitschrift für Pflanzenkrankheiten und Pflanzenschutz, Sonderheft XIII, S. 539 – 547.
- NORDMEYER, H., ZUK, A. (2002):** Teilflächenunkrautbekämpfung in Winterweizen. In: Zeitschrift für Pflanzenkrankheiten und Pflanzenschutz, Sonderheft XVIII, S. 459 – 466
- ODENING, M., BOKELMANN, W. (2000):** Agrarmarktmanagement – Landwirtschaft Gartenbau. Ulmer-Verlag, Stuttgart.
- OERKE, E.-C., STEINER, U. (1996):** Ertragsverluste und Pflanzenschutz. Die Anbausituation für die wirtschaftlich wichtigsten Kulturpflanzen. Schriftenreihe der Deutschen Phytomedizinischen Gesellschaft, Band 6.
- PAICE, M. E. R., DAY, W., REW, L. J. und HOWARD, A. (1998):** A stochastic simulation model for evaluating the concept of patch spraying. In Weed Research, 38, S. 373 – 388.
- PALLUTT, B. (1993):** Populationsdynamik und Konkurrenz von Unkräutern in Abhängigkeit von Fruchtfolgen sowie mechanischen und chemischen Bekämpfungsmaßnahmen in Getreide. In: 8th EWRS-Symposium – Quantitative approaches in weed and herbicide research and their practical application, Braunschweig, S. 723 – 730.
- PALLUTT, B. (2000):** Einfluss der Konkurrenzkraft von Getreidebeständen auf das Unkrautwachstum und den Getreideertrag. In: Zeitschrift für Pflanzenkrankheiten und Pflanzenschutz, Sonderheft XVII, S. 265 – 275.
- PALLUTT, B. (2002 a):** Unkrautregulierung im ökologischen Landbau, Teil 1. In: Bioland 3, S. 26 – 27.
- PALLUTT, B. (2002 b):** Unkrautregulierung im ökologischen Landbau, Teil 2. In: Bioland 4, S. 26 – 27.
- PALLUTT, B. (2002 c):** Maßnahmen zur Unkrautbekämpfung. In: ZWERGER, P. AMMON, H. U.: Unkraut – Ökologie und Bekämpfung. S. 105 – 117; 224 – 230.
- PALLUTT, B., FLATTER, A. (1998):** Variabilität der Konkurrenz von Unkräutern in Getreide und daraus resultierende Auswirkungen auf die Sicherheit von Schwellenwerten. In: Zeitschrift für Pflanzenkrankheiten und Pflanzenschutz, Sonderheft XVI, S. 333 – 344.

- PANNELL, D. J. (1990):** An economic response model of herbicide application for weed control. In: Australien Journal of Agricultural Economics, 34, S. 223 – 241.
- PANNELL, D. J. (1997):** Sensitivity analysis of normative economic models: Theoretical framework and practical strategies. In: Agricultural Economics, 16, S. 139 – 152.
- PEDERSEN, H. J. KUDSK, P. UND HELWEG, A. (1993):** Principles of factor-adjusted doses herbicides. In: 8th EWRS-Symposium – Quantitative approaches in weed and herbicide research and their practical application, Braunschweig, S. 201 – 208.
- PÉREZ, A. J., LÓPEZ, F., BENLLOCH, J. V. und CHRISTENSEN, S. (2000):** Colour and shape analysis techniques for weed detection in cereal fields. In: Computers and electronics in agriculture, 25, S. 197 – 212.
- PHIPPS, M. J. (1990):** From Local to Global: The Lesson of Cellular Automata. In: Proceedings of a Symposium/ Workshop: Knoxville, Tennessee, S. 165 – 187.
- PIERCE, W. D. (1934):** At what point does insect attack become damage? In: Entomological News, 45, S. 1 – 4.
- PLUSCHKEL, U., PALLUTT, B. (1996):** Zur Verteilung von Unkräutern auf Getreidefeldern und deren Auswirkungen auf die Nutzung von Schadensschwellen. In: Zeitschrift für Pflanzenkrankheiten und Pflanzenschutz, Sonderheft, XV, S. 141 – 147.
- RADEMACHER, B. (1960):** Geeignete gesunde Fruchtfolgen. In: Archiv der Deutschen Landwirtschaftsgesellschaft 25, S. 50 – 70.
- RAHMAN, A., JAMES, T. K. UND N. GRBAVAC (2001):** Potential of weed seedbanks for managing weeds: a review of recent New Zealand research. In: Weed Biology and Management 1, S. 89 – 95.
- REES M., LONG M. J. (1993):** The analysis and interpretation of seedling recruitment curves. In: American Naturalist 141, 233 – 262.
- REW, L. J., COUSENS, R. D. (2001):** Spatial distribution of weeds in arable crops: are current sampling and analytical methods appropriate? Weed Research Oxford, 41, S. 1 – 18.
- REW, L. J., CUSSANS, G. W. (1995):** Patch ecology and dynamics – how much do we know? In: Proceedings Brighton Crop Protection Conference – Weeds, Brighton, S. 1059 – 1068.
- REW, L. J., CUSSANS, G. W., MUGGLESTONE, M. A. UND MILLER, R. C. H. (1996a):** A technique for mapping the spatial distribution of *Elymus repens*, with estimates of the potential reduction in herbicide usage from patch spraying. In: Weed Research 36, S. 283 – 296.

- REW, L. J., FROUD-WILLIAMS, R. J. und BOATMAN, N. D. (1996b):** Dispersal of *Bromus sterilis* und *Anthriscus sylvestris* seed within arable field margins. In: Agriculture, Ecosystems and Environment, 59, S. 104 – 114.
- REW, L. J., MILLER, P. C. H. MILLER UND M. E. R. PAICE (1997):** The importance of patch mapping resolution for sprayer control. In: Proceedings Association of Applied Biologists Conference, Optimising pesticide applications Aspects of Applied Biology. Bristol, 48 , S. 49 – 55..
- REW, L. J., WHELAN, B. UND MCBRATNEY, A. B. (2001):** Does kriging predict weed distributions accurately enough for site-specific weed control? In: Weed Research, 2001, Vol. 41, S. 245 – 263.
- RICHARDS, M. C., WHYTOCK, G. P. (1993):** Varietal competitiveness with weeds. Aspects of Applied Biology, 34, Physiology of Varieties, S. 345 – 354.
- ROBERTS, H. A., DAWKINS, P. A. (1967):** Effect of cultivation of the number of viable weed seeds in the soil. In: Weed Research, 7, S. 290 – 301.
- ROBERTS, H. A., FEAST, P. M. (1972):** Fate of seeds of some annual weeds in different depths of cultivated and undisturbed soil. In: Weed Research, 12, S: 316 – 324.
- ROBERTS, H. A., STOKES, F. G. (1965):** Studies on the weeds of vegetable crops. V. Final observation on an experiment with different primary cultivations. Journal of Applied Ecology 2, S. 307 – 315.
- ROBINSON, L. B., BARRY, P. J. (1987):** The Competitive Firm's response to Risk. MacMillian Publishing Company, New York.
- RODER, W. (1989):** Zur Schadwirkung der Unkräuter bei Getreide. Akademie der Landwirtschaftswissenschaften der Deutschen Demokratischen Republik.
- RODER, W., EGGERT, H., KALMUS, A. und PETERS, I. (1989 B):** Zum Konkurrenzverhalten von Mischverunkrautungen bei Wintergerste in Abhängigkeit von ökologischen Bedingungen. In: Archiv für Phytopathologie und Pflanzenschutz, 25, (2), S. 175 – 180.
- RÖTTELE, M. (1980):** Populationsdynamik des Klettenlabkrautes (*Galium aparine* L.). Dissertation, Universität Hohenheim.
- SADEGHI, A. M., ISENSEE, A. R. UND SHELTON, D. R. (1998):** Effect of tillage age on herbicide dissipation: a side-by-side comparision using microplots. In: Soil Science, 163, S. 883 – 890.

- SCHEER, M. (1983):** Die Saat als Mittel zur Optimierung inner- und zwischenpflanzlicher Konkurrenzverhältnisse bei Winterweizen und Möglichkeiten der Regulation durch Pflanzenschutz und N-Düngung. Dissertation Bonn.
- SCHMIDT, H., BLÖNNINGEN, P. (1987):** Der pflanzenbauliche Versuch und seine Aussagefähigkeit für betriebliche Entscheidungen. In: Berichte über Landwirtschaft 65, S. 555 – 569.
- SCHMITZ, P. H. (1984):** Der Einfluss von Unkrautbekämpfungssystemen auf Unkrautpopulation und Ertragsstruktur in einer Fruchtfolge mit Zuckerrüben, Winterweizen und Wintergerste. Dissertation Bonn.
- SFZ (SCHWEIZERISCHE FACHSTELLE FÜR ZUCKERRÜBENANBAU) (2003):** Der Rübenpflanzer – Unkrautkontrolle. Online im Internet: URL: <http://www.zuckerruebe.ch/PDF/Sonderausgabe.PDF>, Abrufdatum: 10.01.2003.
- SHANER, D. L. (2000):** The impact of glyphosate-tolerant crops on the use of other herbicides and on resistance management. Pest Management Science, 56, S. 320 – 326.
- SIEBERHEIN, K. (1979):** Bedeutung, Verbreitung, Biologie und Bekämpfung von auf dem Ackerland vorkommenden Klebkraut-Arten. Tag.-Ber., VEB Synthesewerk Schwarzheide. S. 9 – 21.
- SÖKEFELD, M., R. GERHARDS, KÜHBAUCH, W. (2000):** Teilflächenspezifische Unkrautkontrolle – von der Unkrauterfassung bis zur Herbizidapplikation. In Zeitschrift für Pflanzenkrankheiten und Pflanzenschutz, Sonderheft XVI, S. 227 – 233.
- SÖKEFELD, M. (2004):** Technik erkennt Pflanzen. In: Neue Landwirtschaft, 6, S. 50 – 52.
- SÖKEFELD, M., GERHARDS, R., THERBURG, R.-D., NABOUT, A., JACOBI, J., LOCK, R. UND KÜHBAUCH, W. (2002):** Multispektrale Bildanalyse zur Erfassung von Unkraut und Blattkrankheiten. In: Zeitschrift für Pflanzenkrankheiten und Pflanzenschutz, Sonderheft XVIII, S. 437 – 442.
- SÖKEFELD, M., HLOBEŇ, P. UND SCHULZE LAMMERS, P. (2004):** Möglichkeiten und Grenzen der Direkteinspeisung von Herbiziden zur teilflächenspezifischen Unkrautkontrolle. In: Zeitschrift für Pflanzenkrankheiten und Pflanzenschutz, Sonderheft XIX, S. 431 – 437.
- STEINHAUSER, H., LANGBEHN, C. und PETERS, U. (1992):** Einführung in die landwirtschaftliche Betriebslehre – Band 1: Allgemeiner Teil.
- STREIT, B., RIEGER, S. B., STAMP, P. und RICHNER, W. (2000):** Weed populations in winter wheat as affected by crop sequence, intensity of tillage and time of herbicide application in a cool and humid climate. In: Weed Research, 43, S. 20 – 32.

- SYNGENTA (2002):** Glyphosate-Resistant Weeds. Will They Decrease Land Value? Online im Internet: URL: http://www.syngentacropprotection-us.com/Resource/Prod/Touchdown/land_values.pdf, Abrufdatum: 13.04.2004.
- TEBRÜGGE, F. (2001):** Conservation tillage-protection of soil, water, and climate and influence on management and farm income. In: GARCIA-TORRES, L., BENITES, J. UND MARTINEZ-VILELA, A (eds.): Conservation Agriculture – A Worldwide Challenge. S. 303 – 316.
- THOLE, R. (1992):** Quantifizierung der Konkurrenzbeziehungen zwischen Winterweizen sowie Wintergerste und ausgewählten Unkrautarten. Dissertation, Universität Göttingen.
- THOLE, R., HEITEFUSS, R. (1992):** Quantifizierung der Konkurrenzbeziehungen zwischen Wintergetreide und ausgewählten Unkrautarten. In: Zeitschrift für Pflanzenkrankheiten und Pflanzenschutz, Sonderheft XIII, S. 139 – 148.
- TIMMERMANN, C. GERHARDS, R. UND KÜHBAUCH, W. (2003):** The economic Impact of Site-Specific Weed Control. In: Precision Agriculture, 4, S. 249 – 260.
- VAN DER WEIDE, R. Y. VAN GROENENDAEL, J. M. (1990):** How useful are population dynamical models: an example from *Galium aparine*. In: Zeitschrift für Pflanzenkrankheiten und Pflanzenschutz, Sonderheft XII, S. 147 – 155.
- WAHMHOF, W., HEITEFUSS, R. (1984):** Der Einfluss der Berücksichtigung von Schadensschwellen für Unkräuter in Wintergerste auf Kornertrag, Qualität des Erntegutes, Erntetechnik und Wirtschaftlichkeit der Unkrautbekämpfung. In Zeitschrift für Pflanzenkrankheiten und Pflanzenschutz, Sonderheft X, S. 137 – 142.
- WALLINGA, J., (1998):** Dynamics of Weed Populations – spatial pattern formation and implications for Control. Dissertation Wageningen.
- WALLINGA, J., GRASMAN, J., GROENEVELD, R. M. V., KROPFF, M. J. UND L. A. P. LOTZ (1999):** Prediction of weed density: the increase of error with prediction interval, and the use of long-term prediction for weed management. In: Journal of Applied Ecology, 1999, 36, S. 307 – 316.
- WALTER, A. M., CHRISTENSEN, S. UND SIMMELSGAARD, S. E. (2002):** Spatial correlation between weed species densities and soil properties. In: Weed Research, 42, S. 26 – 38.
- WARTENBERG, G., DAMMER, K. H. (2002):** Erfahrungen bei der Verfahrensentwicklung zur teilflächenspezifischen Herbizidanwendung in Echtzeit. In: Zeitschrift für Pflanzenkrankheiten und Pflanzenschutz, Sonderheft XVIII, S. 443 – 450.

- WARTENBERG, G., DAMMER, K. H. (2004):** Wirkung sensorgestützter Herbizidapplikation in Getreide und Erbsen. In: Zeitschrift für Pflanzenkrankheiten und Pflanzenschutz, Sonderheft XIX, S. 405 – 412.
- WERNER, B., HEITEFUSS, R. (1997):** Möglichkeiten der überregionalen Anwendung des Göttinger Schadschwellenmodells zur gezielten Unkrautbekämpfung in Winterraps. In: Nachrichtenblatt des Deutschen Pflanzenschutzdienstes, 49, S. 191 – 200.
- WHELAN, B. M., MCBRATNEY, A. B. (2000):** The “Null Hypothesis” of Precision Agriculture Management. In: Precision Agriculture, 2, S. 265 – 279.
- WILLIAMS II, M. M., GERHARDS, R. UND MORTENSEN, D. A. (2000):** Two-Year Weed Seedling Population Response to a Post-Emergent Method of Site-Specific Weed Management. In: Precision Agriculture, 2, S. 247 – 263.
- WILSON, B. J. (1986):** Yield response of winter cereals to the control of broad-leaved weeds. In: EWRS-Symposium – Economic Weed Control, S. 75 – 82.
- WILSON, B. J., LAWSON, J. M. (1992):** Seedbank persistence and seedling emergence of seven weed species on autumn-sown crops following a single year’s seeding. In: Annals of Applied Biology, 120, S. 105 – 116.
- WILSON, B. J., WRIGHT, K. J. (1987):** Variability in the growth of cleavers (*Galium aparine*) and their effect on wheat yield. In: Proceedings of British Crop Protection Conference-Weeds, S. 1051 – 1058.
- ZANIN, B. BERTI, A., RIELLO, L. (1998):** Incorporation of weed spatial variability into the weed control decision-making process. In: Weed Research, 38, S. 107 – 118.
- ZIEGLER, W. (RAIFFEISEN ZENTRALGENOSSENSCHAFT STOCKACH) (2004):** Persönliches Gespräch vom 27.10.2004.
- ZWERGER, P. (1987):** Einfluss der Fruchtfolge, der Pflanzenbau- und Pflanzenschutz-Intensität auf die Populationsdynamik von Unkräutern unter besonderer Berücksichtigung des Windenknöterichs (*Fallopia convolvulus*) (L.) A. Löve), Dissertation Hohenheim.
- ZWERGER, P. (1993):** Modellierung und Simulation der Populationsdynamik von annuellen Unkräutern. Habilitation Hohenheim.
- ZWERGER, P. (2004):** Arbeitsgruppenbesprechung am 16.03.2004, Braunschweig.
- ZWERGER, P., AMMON, H. U. (2002):** Unkraut – Ökologie und Bekämpfung. Ulmer Verlag, Stuttgart