

Institut für Landtechnik
der Technischen Universität München
in Weihenstephan

Geräte- und verfahrenstechnische Optimierung der thermischen Unkrautbekämpfung

von

Andreas Bertram

Vollständiger Abdruck der
von der Fakultät für Landwirtschaft und Gartenbau
der technischen Universität München
zur Erlangung des akademischen Grades eines

Doktor der Agrarwissenschaften

genehmigten Dissertation

Vorsitzender: Univ.-Prof. Dr. J. Schön
Prüfer der Dissertation: 1. Univ.-Prof. Dr. J. Meyer
2. Univ.-Prof. Dr.-Ing. Chr. von Zabeltitz, Universität Hannover

Die Dissertation wurde am 29. 03. 1996 bei der
Technischen Universität eingereicht
und durch die Fakultät für Landwirtschaft und Gartenbau
am 23. 05. 1996 angenommen

Die vorliegende Arbeit wurde vom Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten gefördert.

© 1996 by Landtechnik Weihenstephan

ISSN-Nr. 0931-6264

Alle Rechte, auch die der Übersetzung und des Nachdrucks sowie jede Art der photomechanischen Wiedergabe, auch auszugsweise, bleiben vorbehalten.

Selbstverlag im Eigenvertrieb:
Institut für Landtechnik Weihenstephan
Vöttingerstraße 36
85354 Freising

Vorwort

Die Suche nach Alternativen zum Einsatz von Herbiziden führte in den letzten Jahren zu einer Renaissance lange vernachlässigter physikalischer Methoden der Unkrautregulierung. Seit dem Jahre 1990 wird in der Abteilung "Technik im Gartenbau" am Institut für Landtechnik, Weihenstephan, als Forschungsschwerpunkt an der Optimierung bestehender und der Entwicklung neuer Verfahren zur Unkrautregulierung im Freilandgartenbau gearbeitet. Ein Schwerpunkt ist dabei die Optimierung thermischer Verfahren.

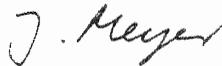
Grundlegende Erkenntnisse darüber, wie der Wärmeübergang auf die Pflanze stattfindet und von welchen Faktoren er beeinflußt wird, sind die Voraussetzung für eine gezielte Geräteentwicklung und einen optimalen Geräteeinsatz.

Zur Verbesserung der Schlagkraft muß die Wärmeübertragungsgeschwindigkeit bei den Geräten erhöht, zur Verminderung der Verluste müssen die Gerätetechnik verbessert und die Übertragungsverluste vermindert werden. Für eine sachgerechte Anwendung muß die zur ausreichenden Erhitzung der Pflanzen notwendige Wärmemenge bekannt sein.

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurden auf der Basis eines thermodynamischen Rechenmodells geräte- und verfahrenstechnische Ansätze zur Optimierung von Geräten erarbeitet und nach dem Bau von Prototypen unter Einsatz standardisierter Meßmethoden überprüft.

Es konnten eindrucksvolle und direkt praxisverwertbare Ergebnisse erarbeitet werden. Diese Ergebnisse werden sowohl für die Hersteller von Geräten, für forschungsrelevante Grundlagenfragen als auch für den Anwender von Geräten von großem Nutzen sein.

Weihenstephan, im Juni 1996



Prof. Dr. habil. Joachim Meyer

An dieser Stelle möchte ich allen herzlich Danken, die zum Gelingen der Dissertation beigetragen haben:

Mein besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr. Meyer für die Überlassung des Themas und für die fachliche Betreuung, Herrn Prof. Dr. Chr. von Zabeltitz für die Übernahme des Koreferates und Herrn Prof. Dr. Dr. h.c. (AE) J. Schön für die Übernahme des Prüfungsvorsitzes.

Danken möchte ich Herrn Prof. Feucht für die Überlassung eines Gewächshausteiles für die Errichtung der Versuchsstrecke.

Danken möchte ich an dieser Stelle auch meinen ausländischen Kollegen Dr. J. Ascard, Prof. Dr. Holmoy und Dr. K. Storeheier für die anregenden Gespräche und die konstruktive Kritik.

Mein Dank gilt allen, die an der Planung und dem Bau der Versuchseinrichtungen beteiligt waren. Nennen möchte ich an dieser Stelle Herrn Dr. H. Stanzel und Herrn F. Bauer von der Abteilung Meßtechnik, Herrn H. Stadler und die Mitarbeiter der Werkstatt, sowie den Elektroingenieur der Landtechnik J. Dallinger.

Bedanken möchte ich mich auch bei denen, die an der Planung, Durchführung und Auswertung der Experimente mitgearbeitet haben. Hervorzuheben sind an dieser Stelle Anja Egenolf, Monika Bietsch und Hans Peter Römer.

Mein Dank gilt den Mitarbeitern des Zeichenbüros, insbesondere Herrn H. Keller, für die Anfertigung der technischen Zeichnungen.

Ganz besonders bedanken möchte ich mich schließlich bei meiner Frau Lisa und meinen Kindern Michael, Thomas und Franziska für die tatkräftige Unterstützung während meiner Promotionszeit.

Inhaltsverzeichnis

	Inhaltsverzeichnis	5
	Abbildungsverzeichnis	9
	Tabellenverzeichnis	17
	Verzeichnis der Formelzeichen	18
	Verzeichnis der Abkürzungen	19
1	Einleitung und Problemstellung	21
2	Stand des Wissens	23
2.1	Gerätetechnik	23
2.2	Verfahrenstechnik	25
2.2.1	Nichtselektive Unkrautbekämpfung im Vorauf und zwischen den Reihen	25
2.2.2	Selektive Unkrautbekämpfung in den Reihen	26
2.3	Methoden zur meßtechnischen Überprüfung von Geräten zur thermischen Unkrautbekämpfung	28
2.4	Einflußfaktoren auf die optimale Fahrgeschwindigkeit und den flächenbezogenen Gaseinsatz bei der thermischen Unkrautbekämpfung mit dem Gerätekonzept "Abflammen"	29
2.4.1	Einfluß der Gerätetechnik	29
2.4.1.1	Brennertyp	29
2.4.1.2	Brennereinstellung	30
2.4.1.3	Gasdurchsatz am Brenner	31
2.4.1.4	Einfluß der Gestaltung der Abdeckung	31
2.4.2	Einfluß der Pflanzen	32
2.4.2.1	Temperaturerhöhung im Pflanzengewebe und Schädigung	32
2.4.2.2	Morphologischer Aufbau der Einzelpflanze und Bestandsstruktur	33
2.4.3	Einfluß von Bodenparametern	33
2.4.4	Einfluß von Klimafaktoren	34
3	Zielsetzung	35

4	Material und Methode: Prozeßmodell der thermischen Unkrautbekämpfung mit dem Gerätekonzept "Abflammen"	37
4.1	Thermodynamisches Grundmodul: Erwärmung einer Modellpflanze in einem heißen Gasstrom	41
4.1.1	Energieträger	41
4.1.2	Rechenansätze für die verschiedenen Wärmeübertragungsmechanismen	42
4.1.2.1	Konvektion (sensibel)	43
4.1.2.2	Konvektion (latent)	50
4.1.2.3	Strahlung	52
4.1.2.4	Leitung	55
4.1.3	Modellpflanze	56
4.1.4	Mathematische Verknüpfung der Rechenansätze	58
4.1.5	Meßtechnische Überprüfung der Rechenergebnisse des thermodynamischen Grundmodules	64
4.1.5.1	Material und Methode	64
4.1.5.2	Ergebnisse und Diskussion	67
4.2	Thermodynamisches Modell: Erwärmung eines Modellpflanzenbestandes während einer thermischen Behandlung mit dem Gerätekonzept "Abflammen"	69
4.3	Gewebetemperatur und Schädigung: Experimentelle Untersuchungen zum Schädigungsmechanismus	77
4.3.1	Material und Methode	77
4.3.2	Ergebnisse und Diskussion	78
4.3.3	Schlußfolgerungen für die Modellbildung	79
5	Ergebnisse der Anwendung des thermodynamischen Modells	81
5.1	Einfluß der physikalischen Systemparameter des Gasstromes auf die temperaturwirksame Nettowärmestromdichte und die Behandlungsdauer zum Abtöten einer Modellpflanze	81
5.1.1	Temperatur	83
5.1.2	Strömungsgeschwindigkeit	85
5.1.3	Emissionsverhältnis	87
5.1.4	Wassergehalt	90
5.2	Einflußfaktoren auf die optimale Fahrgeschwindigkeit und den flächenbezogenen Gaseinsatz zum Abtöten eines Modellpflanzenbestandes	92
5.2.1	Gerätetechnik	93
5.2.1.1	Luftüberschuß der Verbrennung	93
5.2.1.2	Gasdurchsatz am Brenner und Flammenaustrittsrichtung	94
5.2.1.3	Emissionsvermögen des Gaskörpers	97
5.2.1.4	Höhe der Abdeckung	98
5.2.1.5	Länge der Abdeckung	100
5.2.1.6	k-Wert der Abdeckung	103
5.2.2	Modellpflanzen	105
5.2.2.1	Durchmesser der Modellpflanze	105
5.2.2.2	Gewebeausgangstemperatur in der Modellpflanze	106
5.2.2.3	Bestandsdichte	107

5.3	Schlußfolgerungen für die Gerätekonzepte	109
5.3.1	Optimierung des Gerätekonzeptes "Abflammen"	110
5.3.2	Neues Gerätekonzept "Low Temperature Weeder"	111
5.3.3	Einfluß der Geräteauslegung auf die optimale Fahrgeschwindigkeit und den flächenbezogenen Gaseinsatz bei der thermischen Unkrautbekämpfung mit dem Gerätekonzept "Low Temperature Weeder"	112
5.3.3.1	Anpassung des thermodynamischen Modells	113
5.3.3.2	Ergebnisse und Schlußfolgerungen für die Geräteauslegung	115
5.3.4	Vergleich der optimierten Gerätekonzepte "Abflammen" und "Low Temperature Weeder"	118
5.3.4.1	Modellannahmen	118
5.3.4.2	Ergebnisse	120
5.3.4.3	Schlußfolgerungen	125
6	Meßtechnische Überprüfung des thermodynamischen Modells und der ausgeführten Gerätekonzepte	127
6.1	Material und Methoden	128
6.1.1	Testpflanzen	128
6.1.2	Meßkörper	129
6.1.3	Versuchsstand und Meßaufbau	130
6.1.4	Versuchsgeräte	132
6.1.5	Modellannahmen	136
6.1.6	Versuchsdurchführung und Auswertung	138
6.2	Ergebnisse	141
6.2.1	Einfluß der Strömungsrichtung auf den Wärmeeintrag	141
6.2.1.1	Offener Stabbrenner	141
6.2.1.2	Abgedeckter Stabbrenner	143
6.2.1.3	Low Temperature Weeder	145
6.2.2	Gleichmäßigkeit des Wärmeeintrages über die Arbeitsbreite und die Behandlungstrecke	147
6.2.3	Vergleich der ausgeführten Gerätekonzepte	153
6.2.3.1	Speed (Dose)/Response und thermodynamisches Modell	153
6.2.3.2	Temperaturmessung (Meßkörper) und thermodynamisches Modell	162
7	Diskussion und Schlußfolgerungen	169
7.1	Einflußfaktoren auf die optimale Fahrgeschwindigkeit und den flächenbezogenen Gaseinsatz bei der thermischen Unkrautbekämpfung mit dem Gerätekonzept "Abflammen"	169
7.1.1	Einfluß der Pflanzen	170
7.1.1.1	Morphologischer Aufbau der Einzelpflanze	170
7.1.1.2	Bestandsstruktur	172
7.1.2	Einfluß der Gerätetechnik	172
7.1.2.1	Luftüberschuß der Verbrennung	173
7.1.2.2	Gasdurchsatz am Brenner	173
7.1.2.3	Brennrichtung	174
7.1.2.4	Emissionsverhältnis des Gaskörpers	174
7.1.2.5	Einfluß der Gestaltung der Abdeckung	175

7.1.2.6	Gleichmäßigkeit des Wärmeeintrags über die Arbeitsbreite	176
7.1.4	Einfluß von Klimafaktoren	176
7.1.3	Einfluß von Bodenparametern	177
7.2	Schlußfolgerungen für die Gerätekonzepte	178
7.2.1	Gerätekonzept "Abflammen"	178
7.2.2	Gerätekonzept "Low Temperature Weeder"	180
7.3	Methoden zur meßtechnischen Überprüfung von Geräten zur thermischen Unkrautbekämpfung	181
7.3.1	Speed (Dose)/Response	181
7.3.2	Temperaturmessung	182
7.4	Thermodynamisches Modell	183
8	Weiterführende Arbeiten	185
9	Zusammenfassung	186
10	Summary	189
11	Literaturverzeichnis	191

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1:	Brennertypen zur thermischen Unkrautbekämpfung mit dem Gerätekonzept "Abflammen"	24
Abb. 2:	Nichtselektive Unkrautbekämpfung mit dem Gerätekonzept "Abflammen" (abgedeckter Brenner)	26
Abb. 3:	Selektive Unkrautbekämpfung mit dem Gerätekonzept "Abflammen" (offener Brenner)	27
Abb. 4:	Prozeßmodell der thermischen Unkrautbekämpfung mit dem Gerätekonzept "Abflammen"	38
Abb. 5:	Konvektiver Wärmeübergangskoeffizient in Abhängigkeit von der Strömungsgeschwindigkeit des Gases für verschiedene Überströmlängen	48
Abb. 6:	Taupunkttemperatur der Verbrennungsgase in Abhängigkeit vom Luftüberschuß der Verbrennung (Flüssiggas)	51
Abb. 7:	Emissionsverhältnis eines Gaskörpers für drei verschiedene Gaskörperhöhen und zwei verschiedene Luftüberschüsse für die Verbrennung in Abhängigkeit von der Temperatur des Gaskörpers (Flüssiggas)	55
Abb. 8:	Schichtenmodell eines zylindrischen Pflanzenkörpers zur numerischen Näherung der Temperaturverläufe über den Querschnitt während und unmittelbar nach einer thermischen Behandlung mit einem heißen Gasstrom	60
Abb. 9:	Struktogramm des thermodynamischen Grundmodules zur Berechnung der Temperaturverläufe über den Querschnitt einer zylindrischen Modellpflanze während und nach einer thermischen Behandlung mit einem heißen Gasstrom	63
Abb. 10:	Heißluftwindtunnel mit getrennt wählbarer Einstellung von Temperatur und Strömungsgeschwindigkeit der Heißluft	65
Abb. 11:	Meßaufbau zur Untersuchung der Erwärmung von Pflanzen mit einem Heißluftstrom	66
Abb. 12:	Simulierter und gemessener Temperaturverlauf über den Querschnitt des Stengels der Mungbohne (<i>Vigna radiata</i> (L.) var. <i>radiata</i> , $d = 2$ mm) während und nach einer thermischen Behandlung von 2 s im Heißluftwindtunnel (Simulation: Standarddatensatz "Heißluft". $T_{\text{Luft}} = 250$ °C, $v_{\text{Luft}} = 2.5$ m/s)	68
Abb. 13:	Verteilung der eingesetzten Verbrennungsenergie bei der thermischen Unkrautbekämpfung mit dem Gerätekonzept "Abflammen"	69

Abb. 14:	Struktogramm des thermodynamischen Modells zur Berechnung der Temperaturverläufe über den Querschnitt der zylindrischen Modellpflanze während einer thermischen Behandlung eines Modellpflanzenbestandes mit dem Gerätekonzept "Abflammen"	70
Abb. 15:	Schichtenmodell zur Berechnung des Temperaturverlaufes in Abhängigkeit von der Bodentiefe während und unmittelbar nach der thermischen Behandlung mit dem Gerätekonzept "Abflammen"	76
Abb. 16:	Temperaturprofil über den Stengelquerschnitt ($d = 2 \text{ mm}$) der Mungbohne (<i>Vigna radiata</i> (L.) var. <i>radiata</i>) in Abhängigkeit von der Dauer der Behandlung im einem Heißluftwindtunnel (Simulation: Standarddatensatz "Heißluft". $T_{\text{Luft}} = 250 \text{ }^\circ\text{C}$, $v_{\text{Luft}} = 2.5 \text{ m/s}$)	79
Abb. 17:	"Temperaturwirksame" Nettowärmestromdichte in die Oberfläche einer Modellpflanze während der thermischen Behandlung mit einem heißen Gasstrom in Abhängigkeit von der Oberflächentemperatur für verschiedene Gastemperaturen (Simulation: Standarddatensatz "Gasstrom")	83
Abb. 18:	Behandlungsdauer zum Abtöten einer Modellpflanze mit einem heißen Gasstrom in Abhängigkeit von der Gastemperatur für zwei verschiedene Schädigungstiefen (Simulation: Standarddatensatz "Gasstrom")	84
Abb. 19:	"Temperaturwirksame" Nettowärmestromdichte in die Oberfläche der Modellpflanze während der thermischen Behandlung mit einem heißen Gasstrom in Abhängigkeit von der Oberflächentemperatur für verschiedene Strömungsgeschwindigkeiten (Simulation: Standarddatensatz "Gasstrom")	85
Abb. 20:	Behandlungsdauer zum Abtöten einer Modellpflanze mit einem heißen Gasstrom in Abhängigkeit von der Strömungsgeschwindigkeit des Gases für zwei verschiedene Schädigungstiefen (Simulation: Standarddatensatz "Gasstrom") ...	86
Abb. 21:	"Temperaturwirksame" Nettowärmestromdichte in die Oberfläche einer Modellpflanze während der thermischen Behandlung mit einem heißen Gasstrom in Abhängigkeit von der Oberflächentemperatur für unterschiedliche Emissionskoeffizienten des Gaskörpers (Simulation: Standarddatensatz "Gasstrom")	87
Abb. 22:	Behandlungsdauer zum Abtöten einer Modellpflanze mit einem heißen Gasstrom in Abhängigkeit vom Emissionskoeffizienten des Gaskörpers für zwei verschiedene Schädigungstiefen (Simulation: Standarddatensatz "Gasstrom") ...	88
Abb. 23:	"Temperaturwirksame" Nettowärmestromdichte in die Oberfläche einer Modellpflanze während der thermischen Behandlung mit einem heißen Gasstrom in Abhängigkeit von der Oberflächentemperatur für verschiedene Wassergehalte im Gas (Simulation: Standarddatensatz "Gasstrom")	89

- Abb. 24: Behandlungsdauer zum Abtöten einer Modellpflanze mit einem heißen Gasstrom in Abhängigkeit vom Wassergehalt im Gas für zwei verschiedene Schädigungstiefen (Simulation: Standarddatensatz "Gasstrom") 90
- Abb. 25: Optimale Fahrgeschwindigkeit und flächenbezogener Gaseinsatz für das Abtöten eines Modellpflanzenbestandes mit dem Gerätekonzept "Abflammen" in Abhängigkeit vom Luftüberschuß der Verbrennung für zwei verschiedene Schädigungstiefen in den Modellpflanzen (Simulation: Standarddatensatz "Abflammen") 93
- Abb. 26: Optimale Fahrgeschwindigkeit und flächenbezogener Gaseinsatz für das Abtöten eines Modellpflanzenbestandes mit dem Gerätekonzept "Abflammen" in Abhängigkeit vom Gasdurchsatz am Brenner für zwei verschiedene Schädigungstiefen in den Modellpflanzen (Simulation: Standarddatensatz "Abflammen", Flammenaustritt rückwärts) 95
- Abb. 27: Optimale Fahrgeschwindigkeit und flächenbezogener Gaseinsatz für das Abtöten eines Modellpflanzenbestandes mit dem Gerätekonzept "Abflammen" in Abhängigkeit vom Gasdurchsatz des Brenners für zwei verschiedene Schädigungstiefen in den Modellpflanzen (Simulation: Standarddatensatz "Abflammen", Flammenaustritt vorwärts) 96
- Abb. 28: Optimale Fahrgeschwindigkeit und flächenbezogener Gaseinsatz für das Abtöten eines Modellpflanzenbestandes mit dem Gerätekonzept "Abflammen" in Abhängigkeit vom Emissionsverhältnis des Gaskörpers für zwei verschiedene Schädigungstiefen in den Modellpflanzen (Simulation: Standarddatensatz "Abflammen") 98
- Abb. 29: Optimale Fahrgeschwindigkeit und flächenbezogener Gaseinsatz für das Abtöten eines Modellpflanzenbestandes mit dem Gerätekonzept "Abflammen" in Abhängigkeit von der Höhe der Abdeckung für zwei verschiedene Schädigungstiefen in den Modellpflanzen (Simulation: Standarddatensatz "Abflammen") 99
- Abb. 30: Optimale Fahrgeschwindigkeit und flächenbezogener Gaseinsatz für das Abtöten eines Modellpflanzenbestandes mit dem Gerätekonzept "Abflammen" in Abhängigkeit von der Höhe am Ende der Abdeckung (Abflachung) für zwei verschiedene Schädigungstiefen in den Modellpflanzen (Simulation: Standarddatensatz "Abflammen") 100
- Abb. 31: Optimale Fahrgeschwindigkeit und flächenbezogener Gaseinsatz für das Abtöten eines Modellpflanzenbestandes mit dem Gerätekonzept "Abflammen" in Abhängigkeit von der Länge der Abdeckung für zwei verschiedene Schädigungstiefen in den Modellpflanzen (Simulation: Standarddatensatz "Abflammen") 101

Abb. 32:	Optimale Fahrgeschwindigkeit und flächenbezogener Gaseinsatz für das Abtöten eines Modellpflanzenbestandes mit dem Gerätekonzept "Abflammen" in Abhängigkeit vom Gasdurchsatz am Brenner für verschiedene Abdeckungslängen (Simulation: Standarddatensatz "Abflammen", Schädigungstiefe: "Mitte")	102
Abb. 33:	Optimale Fahrgeschwindigkeit und flächenbezogener Gaseinsatz für das Abtöten eines Modellpflanzenbestandes mit dem Gerätekonzept "Abflammen" in Abhängigkeit vom k-Wert der Abdeckung für zwei verschiedene Schädigungstiefen in den Modellpflanzen (Simulation: Standarddatensatz "Abflammen")	104
Abb. 34:	Optimale Fahrgeschwindigkeit und flächenbezogener Gaseinsatz für das Abtöten eines Modellpflanzenbestandes mit dem Gerätekonzept "Abflammen" in Abhängigkeit vom Durchmesser der zylindrischen Modellpflanzen für zwei verschiedene Schädigungstiefen in den Modellpflanzen (Simulation: Standarddatensatz "Abflammen")	105
Abb. 35:	Optimale Fahrgeschwindigkeit und flächenbezogener Gaseinsatz für das Abtöten eines Modellpflanzenbestandes mit dem Gerätekonzept "Abflammen" in Abhängigkeit von der Gewebeausgangstemperatur in den Pflanzen für zwei verschiedene Schädigungstiefen in den Modellpflanzen (Simulation: Standarddatensatz "Abflammen")	107
Abb. 36:	Optimale Fahrgeschwindigkeit und flächenbezogener Gaseinsatz für das Abtöten eines Modellpflanzenbestandes mit dem Gerätekonzept "Abflammen" in Abhängigkeit von der Dichte der Pflanzen für zwei verschiedene Schädigungstiefen in den Modellpflanzen (Simulation: Standarddatensatz "Abflammen")	108
Abb. 37:	Gerätekonzept und Modell der Energieströme bei der thermischen Unkrautbekämpfung mit dem Low Temperature Weeder (LTW)	112
Abb. 38:	Einfluß der Arbeitstemperatur auf die optimale Fahrgeschwindigkeit und den flächenbezogenen Gaseinsatz für das Abtöten eines Modellpflanzenbestandes mit dem LTW für zwei verschiedene Schädigungstiefen in den Modellpflanzen (Simulation: Standarddatensatz "LTW")	116
Abb. 39:	Einfluß der Strömungsgeschwindigkeit des Abgases auf die optimale Arbeitsgeschwindigkeit und den flächenbezogenen Gaseinsatz für das Abtöten eines Modellpflanzenbestandes mit dem LTW für zwei verschiedene Schädigungstiefen in den Modellpflanzen (Simulation: Standarddatensatz "LTW")	117
Abb. 40:	Einfluß der Bestandsdichte auf die optimale Fahrgeschwindigkeit für das Abtöten eines Modellpflanzenbestandes mit den Gerätekonzepten "Gebläsebrenner" und "LTW" für zwei verschiedene Schädigungstiefen in den Modellpflanzen (Simulation: Standarddatensätze "Gebläsebrenner", "LTW")	120

Abb. 41:	Einfluß der Bestandsdichte auf den flächenbezogenen Gaseinsatz für das Abtöten eines Modellpflanzenbestandes mit den Gerätekonzepten "Gebläsebrenner" und "LTW" für zwei verschiedene Schädigungstiefen in den Modellpflanzen (Simulation: Standarddatensätze "Gebläsebrenner", "LTW")	121
Abb. 42:	Gasdurchsatz am Brenner für das Abtöten eines Modellpflanzenbestandes mit den Gerätekonzepten "Gebläsebrenner" und "LTW" in Abhängigkeit von der Bestandsdichte für zwei verschiedene Schädigungstiefen in den Modellpflanzen (Simulation: Standarddatensätze "Gebläsebrenner", "LTW")	122
Abb. 43:	Einfluß des Durchmessers der Modellpflanze auf den flächenbezogenen Gaseinsatz für das Abtöten eines Modellpflanzenbestandes mit den Gerätekonzepten "Gebläsebrenner" und "LTW" für zwei verschiedene Schädigungstiefen in den Modellpflanzen (Simulation: Standarddatensätze "Gebläsebrenner", "LTW")	123
Abb. 44:	Einfluß des Durchmessers der Modellpflanze auf den flächenbezogenen Gaseinsatz für das Abtöten eines Modellpflanzenbestandes mit den Gerätekonzepten "Gebläsebrenner" und "LTW" für zwei verschiedene Schädigungstiefen in den Modellpflanzen (Simulation: Standarddatensätze "Gebläsebrenner", "LTW")	124
Abb. 45:	Gasdurchsatz am Brenner für das Abtöten eines Modellpflanzenbestandes mit den Gerätekonzepten "Gebläsebrenner" und "LTW" in Abhängigkeit vom Durchmesser der Modellpflanze für zwei verschiedene Schädigungstiefen in den Modellpflanzen (Simulation: Standarddatensätze "Gebläsebrenner", "LTW")	125
Abb. 46:	Meßkörper zur vergleichenden Messung des Wärmeeintrags während der Überfahrt mit einem Gerät zur thermischen Unkrautbekämpfung	129
Abb. 47:	Versuchsstrecke mit angetriebenen Gerätetragrahmen	130
Abb. 48:	Meßaufbau zur Überprüfung von Geräten zur thermischen Unkrautbekämpfung	131
Abb. 49:	offener Stabbrenner	132
Abb. 50:	abgedeckter Stabbrenner	132
Abb. 51:	Prototyp des Gerätekonzeptes "Low Temperature Weeder" zur thermischen Unkrautbekämpfung	133
Abb. 52:	Offener Stabbrenner: Temperaturerhöhung in den Meßkörpern (Mittelwert über die Arbeitsbreite) in Abhängigkeit von der Fahrgeschwindigkeit für unterschiedliche Arbeitsrichtungen (Brenner: Gasdurchsatz 13,7 kg/h m, Winkel 45°, Höhe 10 cm)	141

- Abb. 53: Offener Stabbrenner: "effektive" Temperaturerhöhung in den Meßkörpern (Mittelwert über die Arbeitsbreite) in Abhängigkeit von der Fahrgeschwindigkeit für unterschiedliche Arbeitsrichtungen (Brenner: Gasdurchsatz 13.7 kg/h m, Winkel 45°, Höhe 10 cm) 142
- Abb. 54: Abgedeckter Stabbrenner: Gemessene (Mittelwert über die Arbeitsbreite) und errechnete (thermodynamisches Modell) Temperaturerhöhung in den Meßkörpern in Abhängigkeit von der Fahrgeschwindigkeit für unterschiedliche Arbeitsrichtungen (Brenner: Gasdurchsatz 13.7 kg/h m, Winkel 30°, Höhe 6 cm, Abdeckung: Länge 1.5 m, Höhe (vorn) 17 cm, Höhe (hinten) 7 cm) 143
- Abb. 55: Abgedeckter Stabbrenner: Gemessene (Mittelwert über die Arbeitsbreite) und errechnete (thermodynamisches Modell) "effektive" Temperaturerhöhung in den Meßkörpern in Abhängigkeit von der Fahrgeschwindigkeit für unterschiedliche Arbeitsrichtungen (Brenner: Gasdurchsatz 13.7 kg/h m, Winkel 30°, Höhe 6 cm, Abdeckung: Länge 1.5 m, Höhe (vorn) 17 cm, Höhe (hinten) 7 cm) 144
- Abb. 56: Low Temperature Weeder (LTW): Gemessene (Mittelwert über die Arbeitsbreite) und errechnete (thermodynamisches Modell) Temperaturerhöhung in den Meßkörpern in Abhängigkeit von der Fahrgeschwindigkeit für unterschiedliche Arbeitsrichtungen (Heizleistung 8 kWh/h m, Abdeckung: Arbeitstemperatur 300°C, Strömungsgeschwindigkeit 2.5 m/s, Länge 2 m, Höhe 20 cm) 146
- Abb. 57: Low Temperature Weeder (LTW): Gemessene (Mittelwert über die Arbeitsbreite) und errechnete (thermodynamisches Modell) "effektive" Temperaturerhöhung in den Meßkörpern in Abhängigkeit von der Fahrgeschwindigkeit für unterschiedliche Arbeitsrichtungen (Heizleistung 8 kWh/h m, Abdeckung: Arbeitstemperatur 300°C, Strömungsgeschwindigkeit 2.5 m/s, Länge 2 m, Höhe 20 cm) 147
- Abb. 58: Offener Stabbrenner: Verteilung der Temperaturerhöhung in den Meßkörpern über die Arbeitsbreite. (20 Wiederholungen, Fahrgeschwindigkeit 2.2 km/h, Brenner: Gasdurchsatz 13.7 kg/h m, Winkel 45° (rückwärts), Höhe 10 cm) 148
- Abb. 59: Abgedeckter Stabbrenner: Verteilung der Temperaturerhöhung in den Meßkörpern über die Arbeitsbreite. (20 Wiederholungen, Fahrgeschwindigkeit 4.9 km/h, Brenner: Gasdurchsatz 13.7 kg/h m, Winkel 30° (rückwärts), Höhe 6 cm, Abdeckung: Länge 1.5 m, Höhe (vorn) 15 cm, Höhe (hinten) 7 cm) 150
- Abb. 60: Low Temperature Weeder (LTW): Verteilung der Temperaturerhöhung in den Meßkörpern über die Arbeitsbreite. (20 Wiederholungen, Fahrgeschwindigkeit 2.5 km/h, Heizleistung 8 kWh/h m, Abdeckung: Arbeitstemperatur 300°C, Strömungsgeschwindigkeit 2.5 m/s (vorwärts), Länge 2 m, Höhe 20 cm) 151
- Abb. 61: Bekämpfungserfolg (Testpflanze: Mungbohne (*Vigna radiata* (L.) var. *radiata*), 2 Laubblätter) in Abhängigkeit von der Fahrgeschwindigkeit für verschiedene Geräte zur thermischen Unkrautbekämpfung 154

- Abb. 62: Vergleich der gemessenen mit den errechneten Fahrgeschwindigkeiten zur Erreichung definierter Bekämpfungserfolge (Testpflanze: Mungbohne (*Vigna radiata* (L.) var. *radiata*), 2 Laubblätter) für verschiedene Geräte zur thermischen Unkrautbekämpfung 156
- Abb. 63: Vergleich des gemessenen (Testpflanze: Mungbohne (*Vigna radiata* (L.) var. *radiata*), 2 Laubblätter) mit dem errechneten flächenbezogenen Gaseinsatz zur Erreichung definierter Bekämpfungserfolge für verschiedene Geräte zur thermischen Unkrautbekämpfung 157
- Abb. 64: Bekämpfungserfolg (Testpflanze: Winterweizen (*Triticum aestivum* L.), Entwicklungsphase 14 - 16 (ZADOKS et al. 1974)) in Abhängigkeit von der Fahrgeschwindigkeit für verschiedene Geräte zur thermischen Unkrautbekämpfung . 158
- Abb. 65: Vergleich der gemessenen (Testpflanze: Winterweizen (*Triticum aestivum* L.), Entwicklungsphase 14 - 16 (ZADOKS et al. 1974)) mit den errechneten Fahrgeschwindigkeiten zur Erreichung definierter Bekämpfungserfolge für verschiedene Geräte zur thermischen Unkrautbekämpfung 161
- Abb. 66: Vergleich des gemessenen (Testpflanze: Winterweizen (*Triticum aestivum* L.), Entwicklungsphase 14 - 16 (ZADOKS et al. 1974)) mit dem errechneten flächenbezogenen Gaseinsatz zur Erreichung definierter Bekämpfungserfolge für verschiedene Geräte zur thermischen Unkrautbekämpfung 162
- Abb. 67: Bekämpfungserfolg (Testpflanze: Mungbohne (*Vigna radiata* (L.) var. *radiata*), 2 Laubblätter) in Abhängigkeit von der Temperaturerhöhung im Meßkörper (Mittelwert über 8 Meßkörper) für verschiedene Geräte zur thermischen Unkrautbekämpfung 163
- Abb. 68: Vergleich der Temperaturerhöhung in den Meßkörpern (Mittelwert über die Arbeitsbreite) bei der Erreichung definierter Bekämpfungserfolge (Standardunkraut: Mungbohne (*Vigna radiata* (L.) var. *radiata*), 2 Laubblätter) mit verschiedenen Geräten zur thermischen Unkrautbekämpfung 165
- Abb. 69: Bekämpfungserfolg (Testpflanze: Winterweizen (*Triticum aestivum* L.), Entwicklungsphase 14 - 16 (ZADOKS et al. 1974)) in Abhängigkeit von der Temperaturerhöhung im Meßkörper (Mittelwert über die Arbeitsbreite) für verschiedene Gerätekonzepte 166
- Abb. 70: Vergleich der gemessenen (Testpflanze: Winterweizen (*Triticum aestivum* L.), Entwicklungsphase 14 - 16 (ZADOKS et al. 1974)) mit der errechneten Temperaturerhöhung in den Meßkörpern (Mittel über die Arbeitsbreite) zur Erreichung definierter Bekämpfungserfolge mit verschiedenen Geräten zur thermischen Unkrautbekämpfung 168

Tabellenverzeichnis

Tab. 1:	Kenndaten von Flüssiggas (TANTAU 1983)	42
Tab. 2:	Stoffkennwerte (temperaturabhängig, T_{Gas} [°C]) für die Gaskomponenten (verändert nach MEYER PITTROFF und RIEß 1984, SCHWIER 1984, STRAUB 1984) ...	49
Tab. 3:	Standarddaten für die Modellpflanze	57
Tab. 4:	Standarddatensatz "Heißluft"	67
Tab. 5:	Stoffkennwerte für den Boden (HINZ 1963)	76
Tab. 6:	Standarddatensatz "Gasstrom"	82
Tab. 7:	Standarddatensatz "Abflammen"	92
Tab. 8:	Standarddatensatz "LTW"	113
Tab. 9:	Standarddatensatz "Gebläsebrenner"	119
Tab. 10:	Standarddaten für den Meßkörper	136
Tab. 11:	Gerätevariante "abgedeckter Stabbrenner" - Eingangsgrößen für das thermodynamische Modell	137
Tab. 12:	Gerätevariante "Low Temperature Weeder" - Eingangsgrößen für das thermodynamische Modell	138
Tab. 13:	Offener Stabbrenner: Temperaturerhöhung in den Meßkörpern über die Arbeitsbreite (20 Wiederholungen, Fahrgeschwindigkeit 2,2 km/h, Brenner: Gasdurchsatz 13,7 kg/h m, Winkel 45° (rückwärts), Höhe 10 cm)	149
Tab. 14:	Abgedeckter Stabbrenner: Temperaturerhöhung in den Meßkörpern Arbeitsbreite. (20 Wiederholungen, Fahrgeschwindigkeit 4,9 km/h, Brenner: Gasdurchsatz 13,7 kg/h m, Winkel 30° (rückwärts), Höhe 6 cm, Abdeckung: Länge 1,5 m, Höhe (vorn) 15 cm, Höhe (hinten) 7 cm)	150
Tab. 15:	Low Temperature Weeder (LTW): Temperaturerhöhung in den Meßkörpern über die Arbeitsbreite. (20 Wiederholungen, Fahrgeschwindigkeit 2,5 km/h, Heizleistung 8 kWh/h m, Abdeckung: Arbeitstemperatur 300°C, Strömungsgeschwindigkeit 2,5 m/s (vorwärts), Länge 2 m, Höhe 20 cm)	152
Tab. 16:	Gleichmäßigkeit des Wärmeintrages in die Meßkörper (Variationskoeffizient) über die Arbeitsbreite für verschiedene Geräte zur thermischen Unkrautbekämpfung	153

Tab. 17:	Regressionsanalyse: Fahrgeschwindigkeit zur Erreichung definierter Bekämpfungserfolge (Testpflanze: Mungbohne (<i>Vigna radiata</i> (L.) var. <i>radiata</i>), 2 Laubblätter) für verschiedene Gerätekonzepte	155
Tab. 18:	Regressionsanalyse: Fahrgeschwindigkeit zur Erreichung definierter Bekämpfungserfolge (Testpflanze: Winterweizen (<i>Triticum aestivum</i> L.), Entwicklungsphase 14 - 16 (ZADOKS et al. 1974)) für verschiedene Gerätekonzepte	160
Tab. 19:	Regressionsanalyse: Temperaturerhöhung in den Meßkörpern (Mittelwert über die Arbeitsbreite) beim Erreichen definierter Bekämpfungserfolge (Testpflanze: Mungbohne (<i>Vigna radiata</i> (L.) var. <i>radiata</i>), 2 Laubblätter) mit verschiedenen Geräten zur thermischen Unkrautbekämpfung	164
Tab. 20:	Regressionsanalyse: Temperaturerhöhung in den Meßkörpern (Mittelwert über die Arbeitsbreite) beim Erreichen definierter Bekämpfungserfolge (Testpflanze: Winterweizen (<i>Triticum aestivum</i> L.), Entwicklungsphase 14 - 16 (ZADOKS et al. 1974)) mit verschiedenen Geräten zur thermischen Unkrautbekämpfung	167

Verzeichnis der Formelzeichen

Formelzeichen	Größe	Einheit
A	Fläche	m ²
α	Wärmeübergangskoeffizient	W/m ² K
b	Breite	m
Bek. (%)	Bekämpfungserfolg	%
B _{MP}	Bestandsdichte der Pflanzen	kg/m ²
c _p	spezifische Wärmekapazität	kJ/kg K, J/kg K
d	Durchmesser	mm
ε	Emissionsverhältnis	-
h	Höhe	m
H _u	unterer Heizwert	kJ/kg K, J/kg K
Δh_v	Verdampfungsenthalpie	kJ/kg
k	Wärmedurchgangszahl	W/m ² K
l	Länge	m
LD	Lethal Dose (Flüssiggas)	kg/ha
LS	Lethal Speed (Gerät)	km/h
LT	Lethal Temperature (Meßkörper)	K
l _{Überström}	Überströmlänge	m
λ	Wärmeleitfähigkeit	W/m K
m	Masse	kg
n _{Luft}	Luftüberschuß der Verbrennung	-
Nu	Nußelt - Zahl	-
η	dynamische Viskosität	kg/m s
ξ	Wasserbedeckungsfaktor	-
φ	Raumwinkel	rad
$\dot{P}_{Brenner}$	Brennerleistung	kg/h m, kW/ m
Pr	Prandtl - Zahl	-
ρ	Dichte	kg/m ³
Q	Energie	kJ, kWh
\dot{Q}	Wärmestrom	W, kW
\dot{q}	Wärmestromdichte	W/m ² , kW/m ²
r	Radius	mm
Re	Reynold - Zahl	-
σ	Boltzmann - Konstante	W/m ² K ⁴
S _g	schichtgleiche Dicke	m
t	Zeit	s
t _z	Zeitdauer eines Rechenschritts	s
T	Temperatur	°C, K
ΔT	Temperaturdifferenz	K
v	Geschwindigkeit	m/s, km/h
\dot{V}	Volumenstrom	m ³ /s
Vol.-%	Volumenprozent	%
x	Mischungsverhältnis	kg/kg
z	Zylinderkoordinate	m

Verzeichnis der Abkürzungen

Abd.	Abdeckung
Beh.	Behandlung
Bod.	Boden
CO ₂	Kohlendioxid
C ₃ H ₈	Propan
C ₄ H ₁₀	Butan
Gl.	Gleichung
H ₂ O	Wasser
Kond.	Kondensation
Konv.	Konvektion
lam.	laminar
Leit.	Leitung
M	strömendes Medium
max.	maximaler Wert
min.	minimaler Wert
MK	Meßkörper
MP	Modellpflanze
∇	Nabla - Operator
O ₂	Sauerstoff
S	Schicht
Sätt.	Sättigung
Str.	Strahlung
turb.	turbulent
Verd.	Verdunstung

1 Einleitung und Problemstellung

Im Pflanzenbau konkurrieren die Kulturpflanzen mit den Unkräutern um Licht, Wasser und Nährstoffe. Eine ausreichende Unkrautregulierung ist für die Erzielung hoher Erträge und guter Qualitäten von zentraler Bedeutung. Lange Zeit standen dem Anwender dafür ausschließlich mechanische und thermische Verfahren zur Verfügung. Mit der Entwicklung von Herbiziden und dem starken Anstieg der Lohnkosten verloren die arbeitsintensiven nicht-chemischen Verfahren stark an Bedeutung. Der Hauptvorteil der chemischen Verfahren lag bisher in der einfachen Anwendung, der Wirksamkeit und den geringen Kosten.

Die jahrelange fast ausschließliche Verwendung von "Standardherbiziden" mit ihrer zum Teil selektiven Wirkung hatte eine Veränderung der Unkrautflora zur Folge. Damit verbunden war eine starke Ausbreitung schwer bekämpfbarer Unkräuter und zunehmende Resistenzerscheinungen gegenüber den Wirkstoffen bei verschiedenen Unkräutern (ESTLER 1989, LOHUIS 1990). Diese Probleme führten zur Entwicklung des Integrierten Pflanzenschutzes.

Die Richtlinien für den Integrierten Anbau von Obst und Gemüse in der Bundesrepublik Deutschland fordern sinngemäß:

Zum Schutze der Pflanzen sind vorrangig biologische, technische, biotechnische sowie anbau- und kulturtechnische Maßnahmen anzuwenden, damit der Einsatz chemischer Pflanzenschutzmittel auf das notwendigste Maß beschränkt bleibt.

Bei der Unkrautbekämpfung sind verstärkt nicht-chemische Verfahren zu berücksichtigen, wie mechanische und thermische Unkrautbekämpfung und Mulchen.

Ziel des Integrierten Pflanzenschutzes ist es, durch die Kombination biologischer, biotechnischer, pflanzenzüchterischer sowie anbau- und kulturtechnischer Maßnahmen die Anwendung chemischer Pflanzenschutzmittel auf das notwendige Maß zu beschränken.

Diese Entwicklung hat entscheidend zur Renaissance alter und zur Entwicklung neuer Geräte und Verfahren zur nicht-chemischen Unkrautbekämpfung beigetragen. Dabei lassen sich direkte und indirekte Maßnahmen unterscheiden. Auf die Unkrautproblematik kann indirekt über die Verminderung des Unkrautdruckes durch der Kultur vor- bzw. nachgeschaltete Maßnahmen, wie Grundbodenbearbeitung, Saatbettbereitung, Bodendämpfung und Kulturfolge, Einfluß genommen werden. Durch den Einsatz von Mulchverfahren können Unkräuter am Auflaufen gehindert werden. Für die direkte Bekämpfung der Unkräuter während der Kulturperiode stehen dem Anwender unterschiedliche mechanische, thermische und biologische Verfahren zur Verfügung. In allen genannten

Bereichen sind verfahrenstechnische Verbesserungen möglich. Besondere Spielräume für Verbesserungen liegen in den thermischen Verfahren der Unkrautbekämpfung.

Bei den thermischen Verfahren der Unkrautbekämpfung werden die Pflanzen oder Pflanzenteile soweit erwärmt, daß sie in Folge irreversibler Schädigungen absterben. Der Wärmeeintrag erfolgt durch eine Gasflamme (Abflamngerät) oder durch die Wärmestrahlung einer glühenden Keramikplatte (Infrarotgerät). In der Praxis konnte sich aufgrund des größeren Einsatzspektrums und der geringeren Investitionskosten die Abflamntechnik durchsetzen.

Die Einsatzschwerpunkte der Abflamntechnik liegen in der Unkrautbekämpfung im Voraufbau bei langsam keimenden Kulturen und in der selektiven Unkrautbekämpfung in der Reihe bei entsprechender Eignung der Kulturen.

Die Anwendung der thermischen Verfahren zur Unkrautbekämpfung ist mit hohen Verfahrenskosten verbunden (KLOOSTER 1983, LARSSON 1992). Während bei einer geringen Auslastung der Geräte die Fixkosten (hohe Investitionen) dominieren, gewinnen die Arbeits- und Mittelkosten (Flüssiggas) mit zunehmender Einsatzfläche an Bedeutung (NEMMING 1994). Eine Verringerung der Arbeitskosten kann durch eine Erhöhung der Schlagkraft der Geräte erreicht werden. Dies kann prinzipiell durch eine Vergrößerung der Arbeitsbreite und/oder durch eine Erhöhung der Fahrgeschwindigkeit erfolgen. Der im intensiven Gemüsebau traditionell übliche Anbau auf Beeten beschränkt die maximale Arbeitsbreite auf 1,50 m. Eine größere Schlagkraft ist folglich nur über eine Erhöhung der Fahrgeschwindigkeit zu erreichen. Für eine Minimierung des flächenbezogenen Gaseinsatzes muß der Wirkungsgrad der Verfahren verbessert werden.

Das Ziel der vorliegenden Arbeit ist die Erarbeitung geräte- und verfahrenstechnischer Ansätze zur Erhöhung der Fahrgeschwindigkeit und zur Verminderung des flächenbezogenen Gaseinsatzes bei der thermischen Unkrautbekämpfung.

2 Stand des Wissens

In der Vergangenheit haben sich eine Vielzahl von Autoren mit geräte- und verfahrenstechnischen Ansätzen zur Erhöhung der Fahrgeschwindigkeit und zur Minimierung des flächenbezogenen Gaseinsatzes beschäftigt. Dabei wurden sehr unterschiedliche methodische Ansätze angewandt. Die Ergebnisse sind deshalb immer im Zusammenhang mit der eingesetzten Geräte- und Verfahrenstechnik und der angewendeten Versuchsmethodik zu bewerten.

2.1 Gerätetechnik

In der Geschichte der Abflammtchnik hat es eine Vielzahl von Detailentwicklungen gegeben, von denen sich aber viele nicht durchsetzen konnten. Der folgende Teil beschränkt sich deshalb auf einen Überblick über die aktuelle Gerätetechnik. Als **Energieträger** wird heute nahezu ausschließlich **Flüssiggas** eingesetzt.

Unter Abflammen versteht man das Abtöten von Unkräutern mittels einer frei brennenden Flamme. Der Brenner wird in einem Winkel auf den Boden gerichtet. Die durch den Brenner erzeugte Flamme überströmt die Pflanzen und erwärmt sie. Die Behandlungsdauer wird durch die Fahrgeschwindigkeit und die Flammenlänge in Bodennähe definiert. Der flächenbezogene Gaseinsatz hängt von der Fahrgeschwindigkeit und dem Gasdurchsatz am Brenner (kg/h m) ab. Zum Schutz vor Weineinflüssen und zur Verlängerung der Behandlungsdauer sollte bei der Unkrautbekämpfung im Voraufbau eine Abdeckung über dem Brenner angebracht werden.

Die **Entnahme des Brenngases** kann auf zwei Arten erfolgen:

Bei der Entnahme aus der **Gasphase** verdampft das Flüssiggas bereits in der Stahlflasche und wird dann über Schläuche und Armaturen zum Brenner geleitet. Die Entnahmeeistung ist bei diesem Verfahren begrenzt. Um ein zu starkes Abkühlen der Gasflaschen während der Entnahme zu verhindern, stehen sie in einem mit einem Flüssiggas-Brenner beheizten Wasserbad.

Bei der Entnahme aus der **Flüssigphase** wird das Brenngas einer Verdampfungskammer in flüssiger Form zugeleitet, verdampft dort und gelangt dann durch eine Düse in die Brennkammer. Auf diese Weise kann die Entnahmeeistung beliebig erhöht werden. Diese Art der Entnahme ist jedoch nicht unproblematisch. Durch Innenkorrosion kann es bei dieser Entnahmeart zu einem Verstopfen der Leitungsfiter kommen. Bei Undichtigkeiten an der Zuleitung können erhebliche Mengen an Flüssiggas austreten, was eine akute Explosionsgefahr zur Folge hat. Zudem muß nach dem

Abstopfen der Gaszufuhr noch der gesamte Inhalt der Zuleitung aufgebraucht werden (HOFFMANN 1989).

Für die Übertragung der eingesetzten Verbrennungsenergie auf die Pflanzen werden unterschiedliche **Brennertypen** eingesetzt.

Die für die Verbrennung eingesetzten Brenner unterscheiden sich durch ihren Aufbau und durch ihr **Flammenprofil** (STOREHEIER 1991, HOFFMANN 1989, HEGE 1990) (Abb. 1).

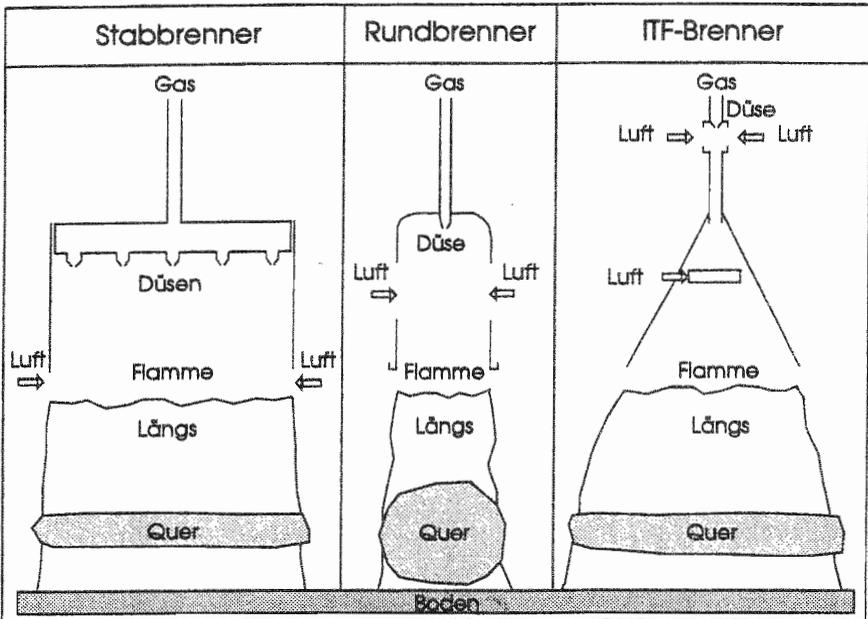


Abb. 1: Brennertypen zur thermischen Unkrautbekämpfung mit dem Gerätekonzept "Abflammen"

Prinzipiell besteht ein Brenner aus einer Gaszuleitung, einer Düse und einem Brennermund. Die Einstellung des Gasdurchsatzes erfolgt über die Anzahl der Düsen, die Düsengröße und den Arbeitsdruck an der Gaszuleitung. Da Düsenanzahl und -größe vom Hersteller vorgegeben sind, kann der Anwender den Gasdurchsatz nur in engen Grenzen durch die Einstellung des Gasdruckes verändern. Der Brennermund entscheidet über das Strömungsprofil der Flamme. Nach der Art der Zumischung der Verbrennungsluft lassen sich atmosphärische und Gebläsebrenner unterscheiden. Gebläsebrenner ermöglichen eine Steuerung des Luftüberschusses und damit eine Optimierung der

Verbrennung, werden aber in der Praxis nicht eingesetzt. Bei den in der Praxis üblichen atmosphärischen Brennern ist die Zumischung der Verbrennungsluft unterschiedlich gelöst.

Stabbrenner haben an einem Rohr im Abstand von einigen Zentimetern Düsen, aus denen das Brenngas in der Gasphase ausströmt. Durch die dichte Anordnung der Düsen wird ein "Durchzündn" des gesamten Brenners gewährleistet. Das Rohr ist im oberen Teil eines Blechkastens angeordnet. Durch seitliche Schlitze wird Verbrennungsluft in den Kasten mitgerissen und mischt sich mit dem Gas. Am Kastenaustritt ergibt sich eine kurze, flache Flamme über die gesamte Länge des Kastens. Sie ist sehr gleichmäßig und zu den Kastenseiten hin scharf begrenzt. Mit dieser Bauweise lassen sich mit einem Brenner Arbeitsbreiten bis 60 cm realisieren.

Rundbrenner haben einen zylindrischen Querschnitt und eine runde Austrittsöffnung. Das Brenngas strömt in der Gasphase durch eine Düse zunächst in die Mischkammer und reißt durch seitliche Öffnungen Verbrennungsluft mit. Das Gas-Luftgemisch durchströmt dann einen Brennkammerring und verbrennt hinter der Austrittsöffnung mit einer runden Flamme. Durch die Konstruktion des Brennermundes lassen sich mit einem Brenner nur Arbeitsbreiten von 10 - 15 cm realisieren.

Ein etwas modifizierter Brennertyp ist der ITF-Brenner. Er besitzt bereits in der Zuleitung, unmittelbar nach der Düse, eine Öffnung zum Ansaugen von Verbrennungsluft. Damit wird auch bei größeren Durchsatzleistungen eine ausreichende Zumischung der Verbrennungsluft gewährleistet. Das Gas-Luftgemisch strömt in einen flachen sich aufweitenden Blechkasten. Hier befindet sich ein weiterer Schlitz zum Ansaugen von Verbrennungsluft. Es ergibt sich eine kurze, flache, fächerförmige Flamme. Durch die Konstruktion des Brennermundes kommt es zu einer Aufweitung der Flamme. Damit lassen sich mit einem Brenner Arbeitsbreiten von 20 - 30 cm realisieren.

2.2 Verfahrenstechnik

Die Abflammttechnik wird zur thermischen Unkrautregulierung im Vorauflauf bzw. zwischen den Reihen und im Nachauflauf zur selektiven Unkrautregulierung in der Kulturpflanzenreihe eingesetzt.

2.2.1 Nichtselektive Unkrautbekämpfung im Vorauflauf und zwischen den Reihen

Ein klassisches Einsatzgebiet ist die Anwendung im Vorauflauf bei Möhren. Dabei wird entweder flächig oder gezielt über der Saatreihe "abgeflammt", wenn die ersten Möhrenkeimlinge aus der Erde spitzen (Abb. 2). Die bis zu diesem Zeitpunkt aufgelaufenen Unkräuter können so bekämpft und der Kultur ein Wachstumsvorsprung verschafft werden (HOFFMANN 1989, VESTER 1985, 1986, 1987).

1988, 1990). Da der Boden während einer thermischen Behandlung nur sehr wenig erwärmt wird (PREUSCHEN 1968, KRAUS 1971, BEUERMANN 1985, HEGE 1990), werden nur die oberirdischen Teile der zu diesem Zeitpunkt bereits aufgelaufenen Unkräuter erfaßt. Die noch im Boden befindlichen Keimlinge werden nicht geschädigt. Die optimale Fahrgeschwindigkeit liegt je nach Geräteeinstellung, Unkrautbestand und Witterungsbedingungen zwischen 2 und 4 km/h. Daraus errechnet sich für einen Gasdruck von 2 bar ein flächenbezogener Gaseinsatz zwischen 30 kg und 60 kg pro Hektar beflammter Fläche (HOFFMANN 1989).

Die thermische Unkrautbekämpfung zwischen den Reihen steht aus ökonomischer Sicht in Konkurrenz zu den verschiedenen mechanischen Verfahren. Aus Kostengründen werden in der Regel mechanische Geräte eingesetzt.

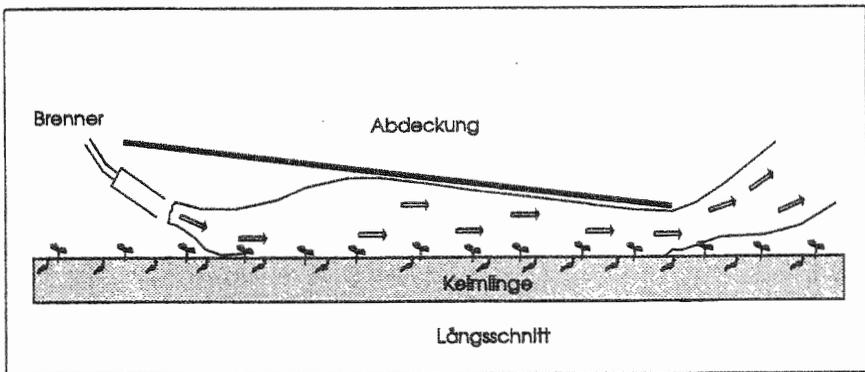


Abb. 2: Nichtselektive Unkrautbekämpfung mit dem Gerätekonzept "Abflammen" (abgedeckter Brenner)

2.2.2 Selektive Unkrautbekämpfung in der Reihe

Bei einigen Kulturen ist es möglich, das Unkraut auch in der Reihe zu bekämpfen, ohne die Kulturpflanze nachhaltig zu beeinträchtigen (Abb. 3). Entsprechende Versuchsergebnisse finden sich für Mais (FITZGERALD et al. 1964, CHAPPELL 1966, 1969, HOFFMANN 1975), Zuckerrüben (MAXEY 1965), Baumwolle (BAGETTE 1946, DANIELSON und CROWE 1948), Sonnenblumen (CASINI et al. 1992), Zwiebeln (CASTILLE und GHESQUIRE 1985, VESTER 1986, ASCARD 1989), im Weinbau (ENGEL 1968) und im Obstbau (WHITNEY 1968). Bei diesem Verfahren werden in der Regel 2

Brenner pro Reihe quer zur Fahrtrichtung in einem Winkel von 45° in die Kulturreihe gerichtet.

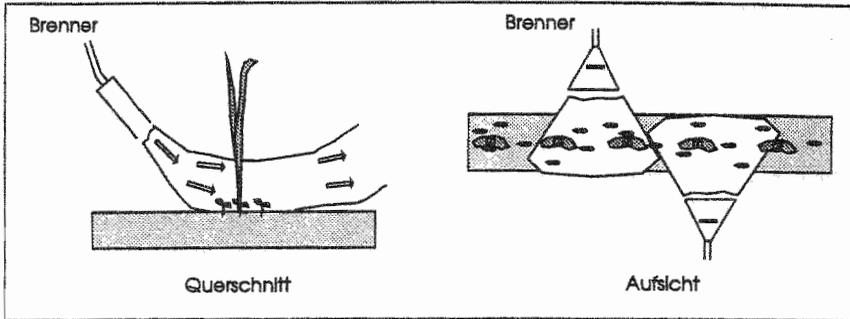


Abb. 3: Selektive Unkrautbekämpfung mit dem Gerätekonzept "Abflammen" (offener Brenner)

Die "thermische Empfindlichkeit" einer Kultur hängt dabei von dem prinzipiellen morphologischen Aufbau, der Größe und dem Wachstumsstadium der Pflanzen ab. Beim flächigen Abflammen im stehenden Getreide werden die Hüllblätter der Getreidepflanzen geschädigt. Die daraus resultierende Wachstumsverzögerung gegenüber einer unbehandelten Kultur wird aber nach HOFFMANN (1989) in der Regel bis zur Ernte wieder aufgeholt. Die Zwiebeln und der Mais weisen keine Wachstumsverzögerungen nach einer sachgerechten thermischen Behandlung auf. Für einen Bekämpfungserfolg bei gleichzeitiger Schonung der Kulturpflanzen ist ein ausreichend großer Unterschied in der "thermischen" Empfindlichkeit zwischen der Kulturpflanze und den Unkräutern notwendig (HOFFMANN 1989). Dabei ist auf eine exakte Terminierung und Dosierung der thermischen Behandlung hinsichtlich des Wachstumsstadiums und der thermischen Empfindlichkeit der Kulturpflanzen zu achten. Die optimale Fahrgeschwindigkeit liegt in Abhängigkeit von der thermischen Empfindlichkeit der Kulturpflanzen zwischen 3 und 4 km/h. Geht man von einem Gasdruck am Brenner von 2 bar und einer üblichen Brennerbreite von 25 cm aus, so errechnet sich für einen Reihenabstand von 50 cm ein flächenbezogener Gaseinsatz von 30 bis 40 kg pro Hektar. Für einen Reihenabstand von 37,5 cm erhöht sich der flächenbezogene Gaseinsatz auf 40 bis 53 kg/ha.

2.3 Methoden zur meßtechnischen Überprüfung von Geräten zur thermischen Unkrautbekämpfung

Das Ziel einer thermischen Unkrautbekämpfung ist das Abtöten der Unkräuter in einem Arbeitsgang. Für den Vergleich der Geräte werden die mögliche Fahrgeschwindigkeit und der sich daraus ergebende flächenbezogene Gaseinsatz (kg/ha) herangezogen. Für die Untersuchung der "Bekämpfungsleistung" von Geräten zur thermischen Unkrautbekämpfung wurden in den bisherigen Arbeiten unterschiedliche methodische Ansätze verwendet. Das prinzipielle Problem dieser Untersuchungen ist die Parametrisierung und damit die Standardisierung der Versuchsbedingungen. Während die Parametrisierung der Geräte über die Konstruktion und die technischen Daten relativ leicht möglich ist, gestaltet sich die Parametrisierung der Bodenoberfläche und des Unkrautbestands äußerst schwierig. Der Einfluß von Pflanzenart, Wachstumsstadium und Bestandsdichte auf den Bekämpfungserfolg zwingt bei einem Gerätevergleich zu einer möglichst weitgehenden Standardisierung des Systems "Pflanze".

Diese Problematik führte zum Einsatz von Standardunkräutern, wie sie in der mechanischen Unkrautbekämpfung längst üblich sind. Für die Versuche wurden die Pflanzen im Freiland ausgesät und zu definierten Wachstumsstadien behandelt. Auswertungskriterien waren Reduktion nach Anzahl und Frischgewicht. Die Auswertung der Ergebnisse erfolgte über nichtlineare Regressionsmodelle (ASCARD 1995). Diese sind den nichtlinearen Regressionsansätzen zur Beschreibung des "Dose/Response" Zusammenhangs beim Einsatz von Herbiziden entnommen (STREIBIG 1988, STREIBIG et al. 1993a, 1993b).

Ein anderer methodischer Ansatz ist der Einsatz von Thermoelementen zur Temperaturmessung. PERUMPRAL et al. (1966) untersuchte unter Laborbedingungen die Temperaturverteilung innerhalb einer stationären Flamme in Abhängigkeit von verschiedenen Einflußfaktoren. Viele Versuchsansteller haben den Temperaturverlauf während einer thermischen Behandlung in der unmittelbaren Nähe der Pflanzen gemessen (BEUERMANN 1985, PARISH 1989, 1990a, 1990b, HEGE 1990). Prinzipiell führten höhere Temperaturen auch zu einem besseren Bekämpfungserfolg. Aufgrund der fehlenden Parametrisierung der Einflußfaktoren und der fehlenden Standardisierung der Methode war ein Vergleich der Ergebnisse verschiedener Versuchsansteller nicht möglich. Die notwendige Standardisierung der Methode erfolgte erst durch STOREHEIER (1991). Dabei wurden nackte Thermolemente in definierter Höhe über den Boden angebracht und mit dem Gerät zur thermischen Unkrautbekämpfung überfahren. Ausgewertet wurde die erreichte Maximaltemperatur ($^{\circ}\text{C}$) und die Temperatursumme ($^{\circ}\text{Cs}$). Als eine Art Wirkungsgrad wurden die erreichten Werte in Bezug zu der dafür aufgewandten Gasmenge gesetzt ($^{\circ}\text{C/kg}$, $^{\circ}\text{Cs/kg}$). Eine Korrelation zwischen den Meßwerten und dem Bekämpfungserfolg konnte in einer Reihe von Versuchen nachgewiesen werden (STOREHEIER 1991, ASCARD 1995). In nahezu allen Versuchen lag der Meßort 1 cm über dem Boden. Bei

größeren Pflanzen kann ein höherer Meßwert die Korrelation zwischen den Meßwerten und dem Bekämpfungserfolg verbessern (ASCARD 1995). Der Vorteil der Anwendung von Thermoelementen gegenüber dem Einsatz von Standardunkräutern liegt im geringen Arbeitsaufwand und in der einfacheren Standardisierung der Methode. Darüber hinaus ist sie von den Witterungsbedingungen weitgehend unbeeinflusst. Der ausschließliche Einsatz von nackten Thermoelementen reicht aber für einen Vergleich der Bekämpfungsleistung von Geräten zur thermischen Unkrautbekämpfung nicht aus (ASCARD 1995). Während bei abgedeckten Brennern in der Regel die Temperatursumme besser mit dem Bekämpfungserfolg korrelierte, war es beim offenen Brenner die Maximaltemperatur.

2.4 Einflußfaktoren auf die optimale Fahrgeschwindigkeit und den flächenbezogenen Gaseinsatz bei der thermischen Unkrautbekämpfung mit dem Gerätekonzept "Abflammen"

Die optimale Fahrgeschwindigkeit und der entsprechende flächenbezogene Gaseinsatz für das thermische Abtöten eines Unkrautbestandes werden von der eingesetzten Geräte- und Verfahrenstechnik, von den zu bekämpfenden Pflanzen, von den klimatischen Bedingungen während und unmittelbar nach der Maßnahme und von der Struktur der Bodenoberfläche beeinflusst.

2.4.1 Einfluß der Gerätetechnik

2.4.1.1 Brennertyp

In Versuchen zur thermischen Unkrautbekämpfung wurden sehr unterschiedliche Brenner eingesetzt (EDWARDS 1964, PARKER et al. 1965, KEPNER et al. 1978, VESTER 1987, 1988, ASCARD 1988, HOFFMANN 1989). Für die selektive Unkrautbekämpfung in der Reihe haben sich Brenner mit einem flachen Querschnitt und einer großen Arbeitsbreite (Stabbrenner, IFT-Brenner) bezüglich der Fahrgeschwindigkeit und dem flächenbezogenen Gaseinsatz als vorteilhaft erwiesen (HOFFMANN 1989, HOLMOY und STOREHEIER 1995). Für die Unkrautbekämpfung mit abgedeckten Brennern konnte keine eindeutige Aussage über das notwendige Flammenbild des Brenners erarbeitet werden. Hier war das primäre Problem eine ausreichende Zumischung der Außenluft, um eine vollständige Verbrennung zu gewährleisten (ASCARD 1995).

2.4.1.2 Brennereinstellung

Unter der Brennereinstellung versteht man die Höhe des Brennermundes über dem Boden, den Anstellwinkel des Brenners zum Boden und die Ausströmrichtung der Flamme. Die Brennereinstellung sollte so erfolgen, daß die Flamme eine möglichst lange Strecke über den Boden strömt. Die optimale Brennereinstellung hängt vom Brennertyp, vom Gasdurchsatz, von der Pflanzengröße und von einer möglichen Abdeckung ab. Da die Flammenlänge über dem Boden zusätzlich von der Struktur der Bodenoberfläche, von den Pflanzen und von Luftbewegungen (Wind, Fahrtwind) beeinflusst wird, ergibt sich für die optimale Einstellung eines Brenners ein weiter Bereich. Diese komplexen Zusammenhänge führten in der Vergangenheit zu einer Vielzahl sehr unterschiedlicher Ergebnisse. Die meisten Ergebnisse sind für die thermische Unkrautbekämpfung zwischen den Reihen und im Vorauftrieb ohne Abdeckung erarbeitet worden. Da für diese Einsatzzwecke eine Abdeckung aber unbedingt empfohlen wird (STOREHEIER 1991, ASCARD 1995), sind die entsprechenden Ergebnisse nicht mehr praxisrelevant und werden hier deshalb nicht aufgeführt. Für die selektive Unkrautbekämpfung in der Reihe mit einem Stabbrenner hat sich ein Brennerwinkel von 45° und eine Brennerhöhe von 10 - 12 cm als vorteilhaft erwiesen (HOFFMANN 1989). Für den IFT-Brenner werden ähnliche Geräteeinstellungen wie beim Stabbrenner empfohlen (STOREHEIER 1989).

PERUMPRAL et al. (1966) untersuchten in einem stationären Laborversuch die Temperaturverteilung in einer frei brennenden Flüssiggasflamme ohne Abdeckung in Abhängigkeit von den Einflußfaktoren Gasdruck, Anströmwinkel und Beschaffenheit der Bodenoberfläche. Die Höhe der Temperatur in x, y und z Richtung wurde zur Beurteilung der Wärmeübertragungsleistung der Flamme herangezogen. Je höher der Gasdruck war, desto breiter und länger wurde die Flamme in 1 cm Höhe über dem Boden. Über 3.067 bar kam es bei dem untersuchten Brenner zu einem verstärkten Auftreten von Turbulenzen im Randbereich und somit zu keiner weiteren Erhöhung der "wirksamen" Geräte-länge. Der optimale Gasdruck betrug für den verwendeten Brenner 2,7 bar. Der Winkel zwischen Brenner und Boden wurde in einem Bereich von 30° bis 60° variiert. Der optimale Winkel für eine ebene Oberfläche wurde mit 30° ermittelt. Die Beschaffenheit der Bodenoberfläche beeinflusst die Geometrie der Flamme erheblich. Mit zunehmender "Rauigkeit der Bodenoberfläche" traten verstärkt Turbulenzen im Randbereich auf, die "wirksame" Flamme wurde schmaler und kürzer. Gleichzeitig nahm die Höhe der Flamme zu.

Für die Unkrautbekämpfung im Vorauftrieb mit abgedeckten Brennern müssen die Höhe und der Winkel des Brenners zusätzlich auf die Höhe der Abdeckung abgestimmt werden. Über den Einfluß der Ausströmrichtung gibt es keine gezielten Untersuchungen.

2.4.1.3 Gasdurchsatz am Brenner

Bei vergleichbarem Unkrautbestand ermöglicht ein höherer Gasdurchsatz in der Regel höhere Fahrgeschwindigkeiten. In Abhängigkeit vom Gasdurchsatz des verwendeten Gerätekonzeptes (4 - 70 kg/h m) und vom Unkrautbestand ergaben sich optimale Fahrgeschwindigkeiten von 1 - 13 km/h (LILJEDAHN et al. 1964, PARKER et al. 1965, ANDERSON et al. 1967, LIEN et al. 1967, MATTHEWS und SMITH 1971, CASTILLE und GHESQUIERE 1985, KEPNER et al. 1987, PARISH 1989a, RAHKONEN und VANHALA 1993, ASCARD 1995). Der flächenbezogene Gaseinsatz nimmt mit steigendem Gasdurchsatz zu. Kleine Pflanzen führen dabei zu einer geringeren Erhöhung des flächenbezogenen Gaseinsatzes als große (ASCARD 1995).

2.4.1.4 Einfluß der Gestaltung der Abdeckung

Eine Abdeckung über dem Brenner wird für die thermische Unkrautbekämpfung im Voraufbau und zwischen den Reihen unbedingt empfohlen (LUTTRELL und BENNETT 1968, KLOOSTER 1983, VESTER 1985, GEIER 1987). Die Gestaltung der Abdeckung übt einen großen Einfluß auf die im Vergleich zum offenen Brenner mögliche Erhöhung der optimalen Fahrgeschwindigkeit und die entsprechende Verringerung des flächenbezogenen Gaseinsatzes aus (HANSEN 1969, LUTTRELL und GORDON 1969, VRIESMA 1985).

Konstruktionsbedingte Einflußfaktoren sind die Höhe der Abdeckung, die Länge und die Isolierung.

Prinzipiell sollte die Abdeckung lang und flach sein. Zum Ende hin sollte die Abdeckung zusätzlich abflachen, um den Heißluftstrom zum Boden hinunter zudrücken (STOREHEIER 1991). Um eine optimale Verbrennung zu garantieren, müssen die Abdeckung und der Brenner optimal aufeinander abgestimmt werden. Eine ausreichende Zuführung der Verbrennungsluft muß unter allen Betriebszuständen gewährleistet werden (ASCARD 1995).

Ein Einfluß der Isolierung auf die optimale Fahrgeschwindigkeit konnte nicht nachgewiesen werden (STOREHEIER 1991).

Der Unterschied in der optimalen Fahrgeschwindigkeit zwischen einem offenen und einem abgedeckten Brenner hängt zusätzlich von der Pflanzengröße ab. Bei sehr kleinen Pflanzen unterscheiden sich diese beiden Gerätekonzepte nur wenig. Bei größeren, schwer bekämpfbaren Pflanzen kann die Arbeitsgeschwindigkeit bis auf das Doppelte gesteigert werden (ASCARD 1995).

2.4.2 Einfluß der Pflanzen

2.4.2.1 Temperaturerhöhung im Pflanzengewebe und Schädigung

Ziel einer thermischen Behandlung ist das Abtöten der Pflanzen in möglichst einem einzigen Arbeitsgang. Zum Erreichen dieses Zieles ist die Übertragung einer Mindestwärmemenge auf möglichst viele Pflanzenzellen in sehr kurzer Zeit notwendig (HOFFMANN 1989). Geht man von Fahrgeschwindigkeiten zwischen 1 und 13 km/h und von einer wirksamen Gerätelänge von 1,50 m aus, errechnet sich eine dafür zur Verfügung stehende Behandlungsdauer zwischen 5,4 s und 0,4 s.

Über den für eine ausreichende Schädigung einer Pflanzenzelle notwendigen Temperatur/Zeit-Zusammenhang herrscht in der Literatur Uneinigkeit. Eine Gruppe von Autoren hält dafür Temperaturen von über 100 °C über einen Zeitraum von 0,1 s für notwendig. Das dabei verdampfende Wasser soll zum Zerreißen der Zellen und somit zum Absterben der Pflanze führen (ANONYM 1969, PREUSCHEN 1968). Nach HEGE (1990) ist eine kurzfristige Erwärmung der Zellen auf 60 °C bis 70 °C ausreichend, um über die damit verbundene irreversible Schädigung der Zellmembranen den Wärmetod zu verursachen. HOFFMANN (1989) hält eine schlagartige Erwärmung des Zellinhalts auf 50 °C bis 70 °C und die damit verbundene Volumenausdehnung des Zellinhalts für ein Zerreißen der Zellen für notwendig. Eine ebenfalls mit der Temperaturerhöhung einhergehende Eiweißdenaturierung führt zu einer irreversiblen Schädigung der Zellen und die Pflanze vertrocknet durch fortlaufende Verdunstung innerhalb von zwei bis drei Tagen. Die Unsicherheit über die notwendige Temperatur und Einwirkdauer resultiert daraus, daß die oben genannten Autoren ihre Hypothesen nicht durch entsprechende Experimente nachgeprüft haben.

Die Letalgrenze wird für Gewächse der temperaten Zone abhängig von der Pflanzenart zwischen 40 °C und 52 °C angegeben (LEVITT 1980). Höhere Temperaturen führen zu einer starken Denaturierung lebenswichtiger Proteine und damit zum Absterben der Zelle. Die Zellmembran verliert bei Temperaturen zwischen 50 °C und 60 °C ihre selektive Permeabilität, elektrolytisch wirksame Stoffe treten aus der Zelle aus. DANIELL et al. (1969) fanden heraus, daß nach einer Behandlungszeit von einer Minute in 53 °C warmen Wasser die Zellen von *Glycine max* (Sojabohne) abgestorben waren. Bei einer Wassertemperatur von 51 °C war bereits eine Einwirkdauer von 15 Minuten notwendig, um 80 % der Zellen irreversibel zu schädigen, wobei geringe Sortenunterschiede auftraten (MARTINEAU et al. 1979). Eine Übertragung dieser Ergebnisse auf den Fall einer thermischen Behandlung ist nur bedingt möglich, da die Einwirkdauer weit über der einer thermischen Behandlung lag.

2.4.2.2 Morphologischer Aufbau der Einzelpflanze und Bestandsstruktur

Unkrautdichte, Artenzusammensetzung und Wachstumsstadien haben einen großen Einfluß auf die optimale Fahrgeschwindigkeit und den entsprechenden flächenbezogenen Gaseinsatz (HOFFMANN 1989, ASCARD 1995). Zur Bekämpfung einkeimblättriger Pflanzen muß langsamer gefahren werden als zur Bekämpfung zweikeimblättriger (HOFFMANN 1989). Unkräuter im Keimblattstadium sind leichter zu bekämpfen als Pflanzen im Laubblattstadium (SUTCLIFFE 1977, VESTER 1990, ASCARD 1995). Die "thermische Empfindlichkeit" einer Pflanzenart wird darüber hinaus durch seine morphologische Struktur bestimmt. Regenerationsfähigkeit aus der Wurzel, dicke Stengel und durch Hüllblätter gut geschützte Vegetationspunkte sind Merkmale "thermisch toleranter" Pflanzen. Dünne Blätter und offene Vegetationspunkte sind dagegen Kennzeichen "thermisch sensibler" Pflanzenarten (HOFFMANN 1989). Bei hoher Unkrautdichte muß etwas langsamer gefahren werden als bei niedriger (ASCARD 1995).

Aufgrund der großen Variabilität der natürlichen Unkrautbestände können oft nicht alle Pflanzen in einem Arbeitsgang abgetötet werden. Damit ist nicht nur der Bekämpfungserfolg unmittelbar nach der Behandlung, sondern auch die Nachhaltigkeit der Maßnahme für die Beurteilung des Verfahrens von Bedeutung. Wird die Pflanze nur geschädigt, aber nicht abgetötet, spielt die Regenerationsfähigkeit der Einzelpflanze für die Nachhaltigkeit einer thermischen Behandlung eine entscheidende Rolle (ASCARD 1995).

2.4.3 Einfluß von Bodenparametern

PERUMPRAL et al. (1966) untersuchte in einem stationären Laborversuch die Temperaturverteilung in einer frei brennenden Flüssiggasflamme ohne Abdeckung in Abhängigkeit von der Beschaffenheit der Bodenoberfläche. Mit zunehmender "Rauigkeit" der Bodenoberfläche traten verstärkt Turbulenzen im Randbereich der Flamme auf, die Flamme wurde in Bodennähe schmaler und kürzer. Gleichzeitig nahm die Höhe der Flamme zu.

Sehr kleine Pflanzen, die unmittelbar hinter größeren Erdkluten wachsen, können von der Flamme nicht direkt erfaßt werden und sind so schwerer zu bekämpfen (HOFFMANN 1989).

2.4.4 Einfluß von Klimafaktoren

Da die irreversible Schädigung des Pflanzengewebes bei Erreichung einer bestimmten Temperatur eintritt, hat die Ausgangstemperatur des Pflanzengewebes einen entscheidenden Einfluß auf die dafür einzutragende Wärmeenergie. Die Gewebetemperatur wird klimatisch in erster Linie von der Temperatur und der relativen Feuchte der umgebenden Luft, von der Höhe der Einstrahlung auf die Gewebeoberfläche und vom Wind beeinflusst. Dabei kann die Gewebetemperatur deutlich über oder unter der Temperatur der Umgebungsluft liegen (RASCHKE 1956). Untersuchungen zu diesem Zusammenhang liegen nicht vor.

Durch eine Benetzung der Pflanzenoberfläche mit Wasser (Regen, Tau) verringert sich die optimale Fahrgeschwindigkeit für einen vergleichbaren Bekämpfungserfolg (PARISH 1990).

Offene Brenner sind deutlich "windempfindlicher" als abgedeckte (HOFFMANN 1989, HEGE 1990).

Die klimatischen Bedingungen nach einer thermischen Behandlung entscheiden über die Regenerationsfähigkeit der geschädigten, aber nicht unmittelbar abgetöteten Pflanzen. Streßfaktoren sind hohe Lufttemperaturen, niedrige relative Luftfeuchte, eine hohe Einstrahlung und starker Wind bei gleichzeitigem Wassermangel (LEVITT 1980).

3 Zielsetzung

In der Vergangenheit wurde eine Vielzahl von Untersuchungen zu den verschiedenen Einflußfaktoren auf die Fahrgeschwindigkeit und den flächenbezogenen Energieeinsatz bei einem definierten Bekämpfungserfolg durchgeführt. Die vergleichende Einordnung zu anderen Versuchsanstellungen gestaltete sich schwierig, da die dafür notwendige Parametrisierung der Einflußfaktoren und Standardisierung der Versuchsmethodik fehlte. Erst durch die Einführung standardisierter Versuchsmethoden durch ASCARD (1988) und STOREHEIER (1991) wurden dafür die notwendigen Voraussetzungen geschaffen. Da die dem Prozeß "thermische Unkrautbekämpfung mit dem Gerätekonzept "Abflammen"" zugrunde liegenden thermodynamischen Abläufe nicht bekannt sind, bereitet die Interpretation der Ergebnisse jedoch weiterhin Schwierigkeiten. Für eine zielgerichtete geräte- und verfahrenstechnische Optimierung der thermischen Unkrautbekämpfung hinsichtlich Schlagkraft und Verlustminimierung ist aber die genaue Kenntnis der Einflußfaktoren auf den Energieeintrag in die Pflanzen und die daraus resultierende Schädigung in Abhängigkeit vom eingesetzten Gerätekonzept von entscheidender Bedeutung. Eine Erarbeitung dieser Zusammenhänge ist mit experimentellen Methoden nicht möglich.

Einen geeigneten methodischen Ansatz stellt die Systemanalyse (BERG und KUHLMANN 1993) dar. Einfache Ursache-Wirkungsbeziehungen werden dabei durch ein System mit einer größeren Anzahl von Kausalzusammenhängen mathematisch abgebildet und simuliert. Die Systemanalyse dient dazu, generelle Gesetzmäßigkeiten im dynamischen Verhalten von Systemen zu erarbeiten und zu verstehen. Dafür ist eine möglichst realitätsnahe Strukturierung des Modells erforderlich. Die so gewonnenen Erkenntnisse bilden die Voraussetzung für die Ableitung zielgerichteter Maßnahmen, um gewünschte Systemzustände zu erhalten.

Das **Ziel dieser Arbeit** ist es, geräte- und verfahrenstechnische Ansätze zur Erhöhung der Fahrgeschwindigkeit und zur Minimierung des flächenbezogenen Gaseinsatzes für das thermische Abtöten eines Unkrautbestandes zu erarbeiten und zu überprüfen. Zu diesem Zweck wird der Prozeß "Thermische Unkrautbekämpfung" auf der Grundlage der thermodynamischen Zusammenhänge in einem mathematischen Modell dynamisch abgebildet.

Die **Modellbildung** wird aufgrund der komplexen thermodynamischen Zusammenhänge in drei Teilschritten vollzogen:

Im ersten Schritt wird ein **Grundmodul** zur Berechnung der Erwärmung einer Modellpflanze durch eine Behandlung mit einem heißen Gasstrom erstellt und überprüft.

Im zweiten Schritt wird das Grundmodul zum **thermodynamischen Modell** zur Berechnung der Erwärmung eines Modellpflanzenbestandes durch ein definiertes Gerätekonzept zur thermischen Unkrautbekämpfung erweitert.

Für die Vervollständigung des Grundmodules und des thermodynamischen Modells ist es im dritten und letzten Schritt notwendig, die errechneten **Gewebetemperaturen** in den Modellpflanzen mit einer **Schädigung** bzw. mit einem Bekämpfungserfolg zu verknüpfen.

Die **Modellanwendung** umfaßt drei Teilziele:

- Mit dem Grundmodul wird der **Einfluß der physikalischen Systemparameter des wärmeübertragenden Gasstromes** auf die notwendige Behandlungsdauer unabhängig vom Gerätekonzept und von der Bestandesdichte der Pflanzen berechnet. Dieser Abschnitt dient dazu, prinzipielle Ansätze zur Verkürzung der notwendigen Behandlungsdauer zu erarbeiten und somit Ansatzpunkte für eine entsprechende Optimierung der Gerätetechnik abzuleiten.
- Mit dem thermodynamischen Modell wird der **Einfluß der Gerätetechnik, des Pflanzenbestandes und der klimatischen Ausgangsbedingungen** auf die optimale Fahrgeschwindigkeit und den flächenbezogenen Gaseinsatz errechnet.
- Auf der Grundlage der erarbeiteten Ergebnisse werden **optimierte Gerätekonzepte** für eine schlagkräftige und sparsame thermische Unkrautbekämpfung definiert. Auf der Basis des thermodynamischen Modells wird ein Vergleich der optimierten Gerätekonzepte durchgeführt.

Die **Modellüberprüfung** erfolgt anhand des Stand des Wissens und anhand einer meßtechnischen Untersuchung zweier optimierter Gerätekonzepte und einem praxisüblichen Gerätekonzept auf der Basis standardisierter methodischer Ansätze (Speed (Dose)/Response, Temperaturmessung).

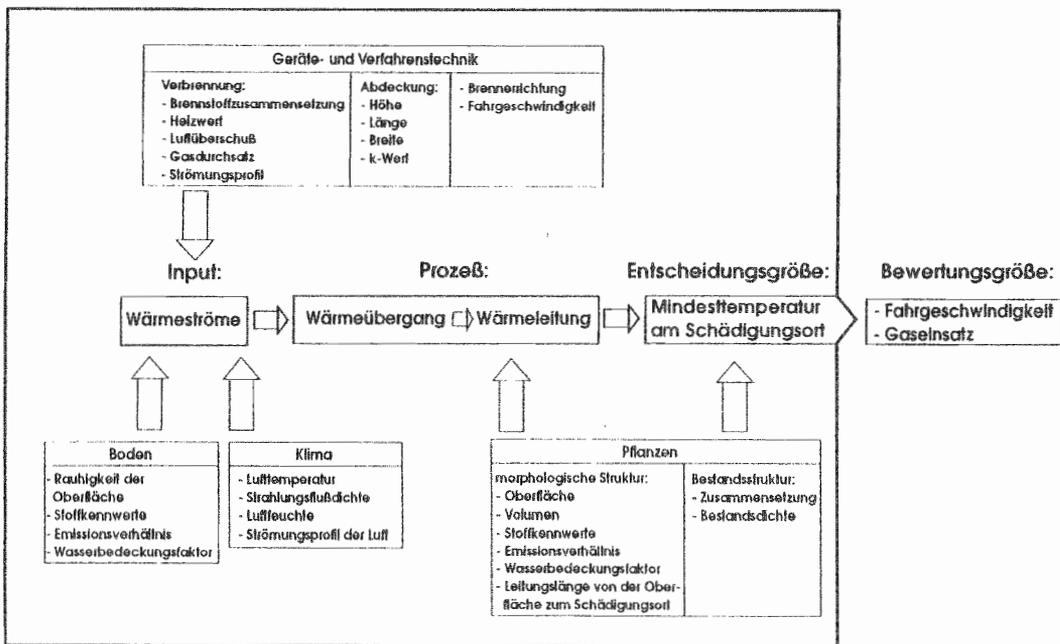
4 Material und Methode: Prozeßmodell der thermischen Unkrautbekämpfung mit dem Gerätekonzept "Abflammen"

Das Ziel einer thermischen Behandlung ist das Abtöten eines Unkrautbestandes in einem Arbeitsgang. Zu diesem Zweck muß durch die Geräte- und Verfahrenstechnik eine ausreichende Wärmemenge in einen lebenswichtigen Teil der Pflanzen eingetragen werden. Aufgrund der Literaturergebnisse kann davon ausgegangen werden, daß ab einer bestimmten Gewebetemperatur eine irreversible Schädigung eintritt. Für das Abtöten einer Pflanze muß folglich durch den Wärmeeintrag eine definierte Gewebetemperatur an einem definierten Ort im Pflanzengewebe erreicht werden. Diese **Entscheidungsgröße** dient als Ausgangspunkt für die Strukturierung des **Prozeßmodells** "Thermische Unkrautbekämpfung mit einem Abflammgerät" (Abb. 4). Der Wärmeeintrag erfolgt über die Oberfläche und ergibt sich aus der Bilanzierung der Wärmeströme durch Konvektion (latent, sensibel) und durch Strahlung (Gasstrahlung, Rückstrahlung der Pflanzenoberfläche). Der Weitertransport der Wärmeenergie durch das Pflanzengewebe zum Schädigungsort erfolgt ausschließlich durch Leitung. Die während einer thermischen Behandlung tatsächlich eingetragene Energiemenge hängt von der Höhe der Wärmeströme und von der Behandlungsdauer ab. Die während der thermischen Behandlung in die Pflanzen eingetragene Energie wird von der eingesetzten Gerätetechnik, vom Boden, vom Klima und von den Pflanzen beeinflusst.

Die Behandlungsdauer hängt von der "wirksamen" Gerätelänge und von der Fahrgeschwindigkeit ab. Da der flächenbezogene Gaseinsatz über den Gasdurchsatz am Brenner mit der Fahrgeschwindigkeit fest verknüpft ist, genügt es bei der Modellanwendung die Fahrgeschwindigkeit solange zu verändern, bis am vorher definierten Schädigungsort die Mindesttemperatur gerade noch erreicht wird (optimale Fahrgeschwindigkeit). Als **Bewertungsgröße** für die Modellanwendung wird die optimale Fahrgeschwindigkeit und der flächenbezogene Gaseinsatz für das Erreichen der Mindesttemperatur am Schädigungsort in der Modellpflanze herangezogen.

Im Modell muß die mathematische Verknüpfung zwischen diesen Einflußfaktoren möglichst realitätsnah, also auf der Basis der thermodynamischen Zusammenhänge erfolgen. Der Gasstrom kühlt aufgrund der Wärmeübergänge während der Behandlungsdauer ab. Die Oberflächentemperatur der Pflanze dagegen steigt während der Behandlung an. Innerhalb des Pflanzengewebes muß deshalb mit einem instationären Wärmestrom- und Temperaturverlauf gerechnet werden. Das Modell muß folglich in der Lage sein, die Höhe der Wärmeströme dynamisch abzubilden. Die richtige mathematische Verknüpfung zwischen den Einflußfaktoren und den daraus resultierenden Wärmeströmen ist für die Realitätsnähe des Modells von entscheidender Bedeutung.

Abb. 4: Prozessmodell der thermischen Unkrautbekämpfung mit dem Gerätekonzept "Abflammen"



Wieviel Energie während einer thermischen Behandlung in eine Pflanze bzw. in einen Pflanzenbestand eingetragen wird und welche Temperaturen im Gewebe dadurch erreicht werden, wird von der eingesetzten Geräte- und Verfahrenstechnik, von der Pflanze, vom Boden und vom Klima beeinflusst. Aus thermodynamischer Sicht kann dieser Einfluß auf die Veränderung der maßgeblichen physikalischen Systemparameter zurückgeführt werden:

Die **Geräte- und Verfahrenstechnik** beeinflusst die Höhe der Wärmeströme vom Gaskörper in die Grenzflächen über die physikalischen Systemparameter Temperatur, Strömungsgeschwindigkeit, Wassergehalt und Emissionsverhältnis des Gasstromes.

Die maximale **Temperaturerhöhung** der Gase durch den Verbrennungsprozeß wird vom Heizwert des Energieträgers, der Brennstoffzusammensetzung, dem Gasdurchsatz am Brenner und dem Luftüberschuß der Verbrennung beeinflusst.

Die **Strömungsgeschwindigkeit** der Gase wird vom Gasdurchsatz am Brenner und durch die Höhe und die Breite der Abdeckung beeinflusst. Für die Strömungsgeschwindigkeit der Gase relativ zu den Pflanzen und zum Boden müssen die Fahrgeschwindigkeit und die Austrittsrichtung der Flammen berücksichtigt werden. Bei einer frei brennenden Flamme und gegebenem Brennstoff wird das Strömungsprofil vom Brenneraufbau, vom Winkel des Brenners zum Boden, vom Gasdurchsatz am Brenner, von der Rauigkeit der Bodenoberfläche, von der Strömungsgeschwindigkeit und Strömungsrichtung der Umgebungsluft, vom Strömungswiderstand des Pflanzenbestands und von der Höhe des thermischen Auftriebs beeinflusst. Bei einer abgedeckten Flamme wird der Strömungsquerschnitt durch den Querschnitt der Abdeckung begrenzt.

Der **Wassergehalt** des Gasstroms wird durch die Brennstoffzusammensetzung, durch das Verhältnis von Gasdurchsatz am Brenner, vom Luftüberschuß der Verbrennung und durch das Mischungsverhältnis der Verbrennungsluft bestimmt.

Das **Emissionsverhältnis** des Gaskörpers wird vom Heizwert und der Zusammensetzung des Energieträgers, dem Strömungsprofil und dem Luftüberschuß der Verbrennung beeinflusst.

Die **Pflanzen** beeinflussen über morphologische Strukturmerkmale und über die Bestandsstruktur den Prozeß und die Entscheidungsgröße. Einflußgrößen auf den Wärmeübergang und die Wärmeleitung sind Oberfläche, Volumen, Stoffkennwerte des Pflanzengewebes, Wasserbedeckungsfaktor und Emissionsverhältnis der Pflanzenoberfläche. Die Bestandsdichte beeinflusst über die Größe der insgesamt für den Wärmeeintrag zur Verfügung stehenden Pflanzenoberfläche den Verlauf der physikalischen Systemparameter des wärmeübertragenden Gasstromes. Die

Bestandzusammensetzung ist keine Einflußgröße im physikalischen Sinne. Die Unkrautbestände weisen jedoch hinsichtlich der morphologischen Struktur der Einzelpflanzen eine große Variabilität auf. Damit begrenzt die thermisch am schwierigsten zu bekämpfende Pflanze die optimale Fahrgeschwindigkeit. Die Lage des lebenswichtigen Gewebeteiles ist ein morphologisches Strukturmerkmal. Physikalisch läßt sich dieser Einfluß auf den Abstand zwischen der Pflanzenoberfläche und dem Schädigungsort zurückführen.

Die Ausgangstemperatur des Pflanzengewebes wird durch die **Klimafaktoren** Globalstrahlung, relative Feuchte, Temperatur und Strömungsgeschwindigkeit der Luft bestimmt. Da der Bekämpfungserfolg mit dem Erreichen einer definierten Temperatur an einem definierten Ort im Pflanzengewebe verknüpft ist, beeinflussen die Klimafaktoren letztlich über die Gewebeausgangstemperatur die zum Abtöten der Pflanze einzutragende Energiemenge.

Der **Boden** beeinflusst als Pflanzenstandort die Wärmeströme in die Pflanzenoberfläche erheblich. Maßgeblicher Einflußfaktor ist die Rauigkeit der Bodenoberfläche. Innerhalb der Grenzschicht zwischen der Bodenoberfläche und den frei strömenden Gasen kommt es zu einer Verminderung der Systemparameter Temperatur und Strömungsgeschwindigkeit des Gasstroms. Mit zunehmender Rauigkeit der Bodenoberfläche nimmt die Grenzschichtdicke zu. Der Wärmestrom in Pflanzen oder Pflanzenteile, die sich innerhalb dieser Grenzschicht befinden, verringert sich dementsprechend. Die Oberflächeneigenschaften (Emissionsverhältnis, Wasserbedeckungsfaktor) und die Stoffkennwerte des Bodens bestimmen über den Verlauf der Oberflächentemperatur Höhe und Verlauf der Wärmeströme in den Boden und damit letztlich den Verlauf der physikalischen Systemparameter des wärmeübertragenden Gasstromes.

Aufgrund der komplizierten thermodynamischen Zusammenhänge wird die Modellbildung in drei Teilschritten vollzogen:

Im ersten Schritt wird ein **Grundmodul** zur Berechnung der Erwärmung einer Modellpflanze durch eine Behandlung mit einem heißen Gasstrom erstellt und überprüft. Hierfür ist es notwendig, geeignete Rechenansätze für die beteiligten Wärmeübertragungsmechanismen auszuwählen und entsprechend den thermodynamischen Abläufen zu verknüpfen.

Im zweiten Schritt wird das Grundmodul zum **thermodynamischen Modell** zur Berechnung der Erwärmung eines Modellpflanzenbestandes durch ein definiertes Gerätekonzept erweitert. Dabei muß im Gegensatz zum Grundmodul der Einfluß des Gerätekonzeptes, des Pflanzenbestandes und des Bodens auf die physikalischen Systemparameter des wärmeübertragenden Gasstromes berücksichtigt werden.

Für die Vervollständigung des Grundmodules und des thermodynamischen Modells ist es im dritten und letzten Schritt notwendig, die errechneten Temperaturen in den Modellpflanzen mit einer **Schädigung** bzw. einem Bekämpfungserfolg zu verknüpfen. In der Literatur werden zu diesem Problemkreis sehr unterschiedliche Aussagen gemacht. Es ist daher für die Modellbildung notwendig, die durch eine thermische Behandlung zu erreichende Gewebetemperatur zum Abtöten einer Pflanze experimentell einzugrenzen.

4.1 Thermodynamisches Grundmodul: Erwärmung einer Modellpflanze in einem heißen Gasstrom

4.1.1 Energieträger

Als Energieträger findet heute vorwiegend Flüssiggas, ein Gemisch aus Propan (C_3H_8) und Butan (C_4H_{10}) im Verhältnis 60/40 (Vol.-%), Verwendung. Das Gasgemisch ist schon bei geringem Überdruck und Normaltemperatur flüssig. Der untere Heizwert H_u wird mit 47.160 kJ/kg angegeben (TANTAU 1983). Das Dichteverhältnis (Flüssiggas/Luft) beträgt 1,85 bei einer Luftdichte von 1,275 kg/m³ (0°C, 1013 mbar).

Die bei der Verbrennung frei werdende Energie führt zu einer Temperaturerhöhung der Abgase. Die maximale Flammentemperatur ist bei gegebenem Brennstoff und vollständiger Verbrennung nur vom Luftüberschuß der Verbrennung und von der Ausgangstemperatur des Brennstoffs und der Verbrennungsluft abhängig. Die theoretische Maximaltemperatur T_{max} bei exakt stöchiometrischer Verbrennung errechnet sich somit nach:

$$T_{max} = T_{Luft} + H_u \cdot \frac{m_{Flüssiggas}}{c_{p(Gas)} \cdot m_{Gas}} \quad (1)$$

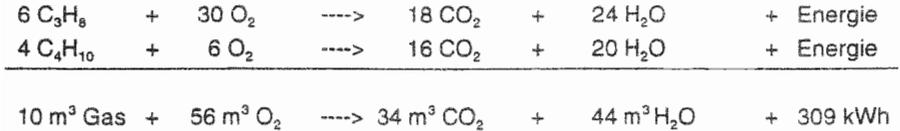
Darin ist:

T_{max}	: Maximale Gastemperatur	[K]
T_{Luft}	: Lufttemperatur	[K]
H_u	: unterer Heizwert	[J/kg]
$m_{Flüssiggas}$: Masse des Flüssiggases	[kg]
$c_{p(Gas)}$: spezifische Wärmekapazität der Verbrennungsgase	[J/kg K]
m_{Gas}	: Masse der Verbrennungsabgase	[kg]

Bei den Abflamngeräten wird die Luft durch die Verbrennungsdynamik unkontrolliert angesaugt.

Entsprechend dem sich ergebenden Luftüberschuß verringert sich die theoretische Maximaltemperatur. Bei ausreichender Luftzufuhr verbrennt das Gas mit dem Sauerstoff der Luft restlos zu H_2O und CO_2 .

Unter Berücksichtigung des Mischungsverhältnisses von Propan und Butan ergeben sich folgende stöchiometrische Gleichungen:



Das heißt, pro m^3 Flüssiggas entstehen $3,4 m^3$ Kohlendioxid und $4,4 m^3$ Wasserdampf. Für eine vollständige Verbrennung werden pro m^3 Brenngas $5,6 m^3$ Sauerstoff benötigt. Bei einem Sauerstoffgehalt der Luft von ca. 20 % (Vol.-%) ergibt sich daraus ein Luftbedarf von $28 m^3$. Dabei entstehen $30,2 m^3$ Abgas, bestehend aus einem Gemisch von H_2O , CO_2 und Luft. Die Zusammensetzung des entsprechenden Gasvolumens hängt noch vom Luftüberschuß der Verbrennung ab.

Die untere Zündgrenze für Flüssiggas ist bei einer Konzentration von 2 % erreicht. Daraus errechnet sich für die Verbrennung ein maximaler Luftüberschuß von 75 % oder 1.75. In Tab. 1 sind die wichtigsten Daten noch einmal zusammengefaßt.

Tab. 1: Kenndaten von Flüssiggas

Bestandteile:	Propan, Butan	
Mischungsverhältnis:	60/40	
Dichte (0 °C, 1013 mbar):	2,353	[kg/m ³]
Heizwert (H _v):	47,160	[kJ/kg]
Luftbedarf (stöchiometrische Verbrennung):	28	[m ³ /m ³]
untere Zündgrenze:	2,0	[Vol.-%]

4.1.2 Rechenansätze für die verschiedenen Wärmeübertragungsmechanismen

Wärme ist Bewegungsenergie der Moleküle. Die Temperatur ist ein Maß für die Höhe dieser Energie. Für die Wärmeübertragung ist ein Temperaturgefälle erforderlich. Dabei strömt die Wärmeenergie entlang des Temperaturgefälles vom Ort höherer Temperatur (Wärmequelle) zum Ort niedrigerer Temperatur (Wärmesenke) (GERSTEN 1989). Grundsätzlich können drei verschiedene Arten der Wärmeübertragung unterschieden werden:

- Konvektion (sensibel, latent)
- Strahlung
- Wärmeleitung

Bei der thermischen Unkrautbekämpfung mit dem Gerätekonzept "Abflammen" fließen Wärmeströme vom heißen Abgasstrom (Flamme) in die Pflanzen, durch die Abdeckung und in den Boden. Der Wärmeeintrag erfolgt über die Oberfläche und ergibt sich aus der Bilanzierung der Wärmeströme durch Konvektion (sensibel, latent) und durch Strahlung. Der Weitertransport der Wärmeenergie ins Pflanzeninnere, durch die Abdeckung und in den Boden kann nur durch Leitung erfolgen.

Aufbauend auf den Kenndaten des Energieträgers (Flüssiggas) werden im folgenden Teil die Rechenansätze für die verschiedenen Arten der Wärmeübertragung bei der thermischen Unkrautbekämpfung mit dem Gerätekonzept "Abflammen" dargestellt.

4.1.2.1 Konvektion (sensibel)

Beim konvektiven Wärmeübergang (Wärmemitführung) handelt es sich um die Wärmeabgabe oder Wärmeaufnahme an einer festen Oberfläche durch strömende Gase oder Flüssigkeiten. Dabei läßt sich die sensible von der latenten Konvektion unterscheiden. Sind bei diesen Wärmeübergängen Verdunstungs- oder Kondensationsvorgänge beteiligt, so spricht man von latenter, ansonsten von sensibler Konvektion.

Je nach Art der Strömung unterscheidet man die freie von der erzwungenen Konvektion. Bei der freien Konvektion entsteht die für einen Wärmeübergang erforderliche Strömung allein durch Temperatur- und Dichteunterschiede innerhalb des strömenden Mediums (thermischer Auftrieb). Die erzwungene Konvektion ist unabhängig vom thermischen Auftrieb. Dabei wird Strömung künstlich (z.B. durch Ventilatoren, Dynamik von Verbrennungsprozessen) herbeigeführt.

Das strömende Medium wird durch Reibung an der Oberfläche des angeströmten Körpers abgebremst und unmittelbar an der Grenzfläche zum Stillstand gebracht. Gleichzeitig findet ein Übergang der Temperatur von ihrem Wert im frei strömenden Medium auf ihren Wert an der Oberfläche statt. Der Bereich, in dem diese beiden Übergänge stattfinden, wird Grenzschicht genannt.

Es lassen sich grundsätzlich zwei Strömungsarten unterscheiden:

Eine **laminare Strömung** bildet sich bei entsprechend kleinen Anströmgeschwindigkeiten aus. Es handelt sich dabei um eine sogenannte Schichtenströmung, bei der Schichten unterschiedlicher Geschwindigkeiten nebeneinander strömen, ohne daß ein starker Austausch von Fluidteilchen quer zur Strömungsrichtung stattfindet. Eine **turbulente Strömung** ist durch zufallsbedingte, daher unregelmäßige Schwankungsbewegungen, die geordnete Grundströmung überlagern, charakterisiert. Sie sorgen für eine intensive Vermischung quer zur Strömungsrichtung. Die ungestörte Außenströmung, wie auch die Strömung innerhalb der Grenzschicht kann laminar oder turbulent sein. In unmittelbarer Nähe der Oberfläche wird die Grenzschicht stets laminar sein, selbst wenn sie etwas weiter weg von der Oberfläche turbulent ist (GERSTEN 1989).

Der Wärmeübergang an einer Oberfläche durch Konvektion (sensibel) $\dot{Q}_{Konv.}$ berechnet sich nach folgender Gleichung:

$$\dot{Q}_{Konv.} = \alpha_{Konv.} \cdot A \cdot (T_M - T_A) \quad (2)$$

Darin ist:

$\dot{Q}_{Konv.}$: konvektiver Wärmestrom (sensibel)	[W]
$\alpha_{Konv.}$: Wärmeübergangskoeffizient	[W/m ² K]
A	: Oberfläche	[m ²]
T_A	: Oberflächentemperatur	[K]
T_M	: Temperatur des ungestört strömenden Mediums	[K]

Neben der Größe der überströmten Fläche und der Temperaturdifferenz zwischen dem ungestört strömenden Medium und der Oberfläche ist der konvektive Wärmeübergangskoeffizient $\alpha_{Konv.}$ eine entscheidende Größe für die Höhe des Wärmeeintrags durch Konvektion. Er ist von der Art und Geschwindigkeit der Anströmung, vom Anströmwinkel, von den physikalischen Eigenschaften des wärmeübertragenden Gases, von der Oberflächenbeschaffenheit der Grenzfläche (Rauigkeit) und der Länge der überströmten Oberfläche in Strömungsrichtung (Überströmlänge) abhängig.

In den zur Berechnung des konvektiven Wärmeübergangskoeffizienten notwendigen Gleichungen werden verschiedene dimensionslose Kenngrößen verwendet:

Reynolds-Zahl Re :

$$Re = \frac{\rho \cdot v \cdot l_{\text{Überström}}}{\eta} \quad (3)$$

Darin ist:

ρ	: Dichte	[kg/m ³]
v	: Anströmgeschwindigkeit	[m/s]
$l_{\text{Überström}}$: Überströmlänge oder charakteristische Länge	[m]
η	: dynamische Viskosität	[kg/ms]

Die Reynolds-Zahl Re kann als Verhältnis der Trägheitskraft zur Reibungskraft angesehen werden. Für die Frage, ob eine Strömung stabil laminar bleibt, oder ob sich eine turbulente Strömung einstellen kann, ist der Zahlenwert der Reynolds-Zahl das entscheidende Kriterium. Als charakteristische Länge l wird zum Beispiel der Durchmesser eines durchströmten Kanals oder die Länge einer überströmten Platte benutzt. In jedem Einzelfall sind für die Definition von α_{Konv} , die Wahl der Überströmlänge l und die Bezugstemperaturen für die Stoffwerte anzugeben.

Prandtl-Zahl Pr :

$$Pr = \frac{\eta \cdot c_p}{\lambda} \quad (4)$$

Darin ist:

η	: dynamische Viskosität	[kg/ms]
c_p	: spezifische Wärmekapazität bei konstantem Druck	[J/kgK]
λ	: spezifische Wärmeleitfähigkeit	[W/mK]

Die Prandtl-Zahl ist als Stoffwertverhältnis anzusehen. Ihr Zahlenwert ist ein Kriterium für den Gültigkeitsbereich von Gleichungen zur Berechnung von α_{Konv} .

Nußelt-Zahl Nu:

$$Nu = \frac{\alpha_{Konv.} \cdot l_{Überström}}{\lambda} \quad (5)$$

Darin ist:

$\alpha_{Konv.}$: Wärmeübergangskoeffizient	[W/m ² K]
$l_{Überström}$: Überströmlänge	[m]
λ	: spezifische Wärmeleitfähigkeit	[W/mK]

Die Nußelt-Zahl Nu kann als ein dimensionsloser Wärmeübergangskoeffizient interpretiert werden.

Die Wärmeübergangskoeffizienten werden sowohl theoretisch als auch experimentell immer unter Zugrundelegung bestimmter hydrodynamischer und thermischer Randbedingungen ermittelt. In der Praxis liegen diese Randbedingungen in den seltensten Fällen vor. Man muß also damit rechnen, daß bei der Anwendung der aufgeführten Formeln zur Berechnung von Wärmeübergangskoeffizienten in praktischen Fällen allein wegen anderer Randbedingungen zwangsläufig Differenzen auftreten. Darüber hinaus stellt der so errechnete konvektive Wärmeübergangskoeffizient nur einen Mittelwert über die überströmte Länge der betrachteten Oberfläche dar.

Für den Wärmeübergang von den heißen strömenden Gasen auf die Oberfläche ergibt sich der Fall einer erzwungenen Konvektion. Als Modell für die Berechnung des Wärmeübergangskoeffizienten $\alpha_{Konv.}$ dient die Wärmeübertragung bei der Strömung längs einer ebenen Wand (GNIELINSKI 1984). Als Überströmlänge wird die Länge der angeströmten Fläche in Anströmrichtung verwendet. Für ein Blatt wäre je nach Anströmung die Blattlänge oder Blattbreite einzusetzen, für ein zylindrisches Pflanzenteil der halbe Umfang. Ist eine Abdeckung über der Flamme vorhanden, muß für die Überströmlänge zur Berechnung des konvektiven Wärmeübergangskoeffizienten in den Boden von der mittleren Höhe der Abdeckung ausgegangen werden. Für eine frei brennende Flamme wird die Länge des überströmten Bodens angenommen. Die empirisch ermittelten Ansätze zur Berechnung des konvektiven Wärmeübergangskoeffizienten bei der Strömung längs einer ebenen Wand gehen von einer glatten Oberfläche aus. Eine höhere Rauigkeit der Pflanzen- bzw. Bodenoberfläche führt prinzipiell zu einer Verringerung des konvektiven Wärmeübergangskoeffizienten. Er wird in diesem Rechenansatz wegen der Problematik der Parametrisierung aber nicht berücksichtigt.

Für einen laminaren Strömungsverlauf gilt für die mittlere Nußelt-Zahl einer ebenen Fläche der Länge l bei konstanter Oberflächentemperatur und konstanten Stoffwerten:

$$Nu_{lam.} = 0,664 \cdot \sqrt{Re} \cdot \sqrt[3]{Pr} \quad (6)$$

Gültigkeitsbereiche:

$$Re = 10^4 \text{ bis } 10^5$$

$$Pr = 0,6 \text{ bis } 2000$$

Die Stoffwerte sind für mittlere Gastemperaturen einzusetzen.

Für die Berechnung der mittleren Nußelt-Zahl einer ebenen Fläche mit turbulenter Grenzschicht gilt bei konstanter Oberflächentemperatur und konstanten Stoffwerten:

$$Nu_{turb.} = \frac{0,037 \cdot Re^{0,8} \cdot Pr}{1 + 2,443 \cdot Re^{-0,1} \cdot (Pr^{0,67} - 1)} \quad (7)$$

Gültigkeitsbereich:

$$Re = 10^5 \text{ bis } 10^7$$

$$Pr = 0,6 \text{ bis } 2000$$

Die Stoffwerte sind für mittlere Gastemperaturen einzusetzen.

Auf Grund der bedingt durch die Verbrennung sehr turbulenzreichen Anströmung kann nicht ausgeschlossen werden, daß sich schon bei kleinen Reynolds-Zahlen keine laminare Grenzschicht über der gesamten überströmten Fläche ausbilden wird. Unter diesen Umständen muß mit einer sogenannten Mittelkurve gerechnet werden:

$$Nu_{lam./turb.} = \sqrt{Nu_{lam.}^2 + Nu_{turb.}^2} \quad (8)$$

Gültigkeitsbereiche:

$$Re = 10^1 \text{ bis } 10^7$$

$$Pr = 0,6 \text{ bis } 2000$$

Aus den Gleichungen (5) und (8) läßt sich nun $\alpha_{Konv.}$ berechnen:

$$\alpha_{Konv.} = \frac{Nu_{lam./turb.} \cdot \lambda}{l_{Überström}} \quad (9)$$

Ausgehend von dem Modell des Wärmeübergangs bei einer erzwungenen Strömung längs einer ebenen Wand ist $\alpha_{Konv.}$ nur noch von der Anströmgeschwindigkeit, der Überströmlänge und von den physikalischen Eigenschaften des Gasgemisches abhängig (Abb. 5).

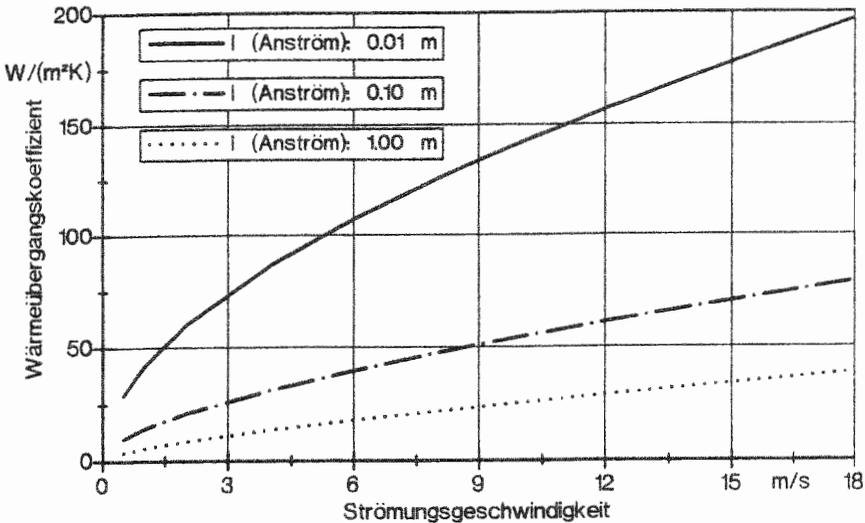


Abb. 5: Konvektiver Wärmeübergangskoeffizient in Abhängigkeit von der Strömungsgeschwindigkeit der Gase für verschiedene Überströmlängen

Mit steigender Strömungsgeschwindigkeit der Gase und mit abnehmender Überströmlänge steigt der konvektive Wärmeübergangskoeffizient und damit die konvektive Wärmestromdichte in die entsprechende Grenzfläche an.

Die Stoffkennwerte des wärmeübertragenden Gases ergeben sich durch Addition der Kennwerte der Teilkomponenten CO_2 , H_2O und der Restluft (Tab. 2), entsprechend ihrem Anteil in Gewichtsprozenten an der Verbrennungsluft. Da die Stoffkennwerte temperaturabhängig sind, wurden die experimentell ermittelten Einzelwerte (MEYER PITTROFF und RIEß 1985, SCHWIER 1985, STRAUB 1985) für die Berechnungen durch entsprechende Funktionen angenähert (Tab. 2).

Tab. 2: Stoffkennwerte (temperaturabhängig, T_{Gas} [°C]) für die Gaskomponenten (verändert nach MEYER PITTROFF und RIEß 1984, SCHWIER 1984, STRAUB 1984)

	CO_2	H_2O	Restluft
ρ [kg/m ³]	$1,9426 \cdot \frac{273,4}{273,4 + T_{\text{Gas}}}$	$0,8054 \cdot \frac{273,4}{273,4 + T_{\text{Gas}}}$	$1,2746 \cdot \frac{273,4}{273,4 + T_{\text{Gas}}}$
λ 10^{-3} [W/mK]	$10 + 0,292 \cdot e^{0,804 \cdot \ln(T_{\text{Gas}})}$	$19 + 0,0137 \cdot e^{1,319 \cdot \ln(T_{\text{Gas}})}$	$16 + 0,992 \cdot e^{0,602 \cdot \ln(T_{\text{Gas}})}$
η 10^{-6} [kg/ms]	$11 + 0,305 \cdot e^{0,696 \cdot \ln(T_{\text{Gas}})}$	$8,4 + 0,04 \cdot T_{\text{Gas}}$	$15 + 0,281 \cdot e^{0,69 \cdot \ln(T_{\text{Gas}})}$
Pr [-]	0,94	0,75	0,67

4.1.2.2 Konvektion (latent)

Transpiration ist die Wasserdampfabgabe durch **Verdunstung** von Pflanzen an die Luft. Die Quelle des Wasserdampfes ist das in den Pflanzen enthaltene Wasser. Bei krautigen Landpflanzen beträgt der Gewichtsanteil des Wassers 85 - 90 % (MOHR und SCHOPFER 1992). Damit Wasser in die Dampfphase übergeht, ist eine bestimmte Energiemenge notwendig. Diese wird der Umgebung in Form von Wärmeenergie entzogen. Diese Verdunstungsvorgänge stellen somit einen Verlust an latenter Wärmeenergie dar. Der Wärmestrom durch Verdunstung errechnet sich nach folgender Gleichung:

$$Q_{\text{Verd.}} = \frac{\alpha_{\text{Konv.}}}{c_{p(\text{Luft})}} \cdot A_{\text{MP}} \cdot \xi_{\text{MP}} \cdot \Delta h_v \cdot (x_{\text{Sätt.}} - x_{\text{Luft}}) \quad (10)$$

Darin ist:

$Q_{\text{Verd.}}$: Wärmestrom durch Verdunstung	[W]
$\alpha_{\text{Konv.}}$: konvektioneller Wärmeübergangskoeffizient	[W/m ² K]
$c_{p(\text{Luft})}$: spezifische Wärme der Luft bei konstantem Druck	[J/kgK]
A_{MP}	: Pflanzenoberfläche	[m ²]
Δh_v	: Verdampfungsenthalpie des Wassers	[J/kg]
ξ_{MP}	: Wasserbedeckungsfaktor der Pflanzenoberfläche	[-]
$x_{\text{Sätt.}}$: Sättigungsfeuchte der Luft bei Oberflächentemperatur	[kg/kg]
x_{Luft}	: Wassergehalt	[kg/kg]

Die Pflanzenoberfläche besteht aus Cutin, das hydrophob und daher schlecht durchlässig für Wasser ist. Ein Maß für den Verdunstungswiderstand einer pflanzlichen Oberfläche ist der Wasserbedeckungsfaktor. Er errechnet sich aus dem Verhältnis der tatsächlich abgegebenen Wasserdampfmenge zu der Menge, die von einer freien Wasseroberfläche gleicher Größe unter gleichen klimatischen Bedingungen verdunstet (Evaporation), und liegt somit zwischen 0 und 1. Die Wasserabgabe der Pflanze erfolgt hauptsächlich über Spaltöffnungen. Bei voll geöffneten Spaltöffnungen kann der Wasserbedeckungsfaktor eines Blattes bis auf 0,8 ansteigen. Bei geschlossenen Stomata liegt er aufgrund der cuticulären Transpiration zwischen 0,1 (krautige Pflanzen) und 0,01 (Blätter von Nadelbäumen). Am Stengel einer Pflanze gibt es nur wenige oder gar keine Spaltöffnungen, es kann aber auch hier von einer Wasserabgabe durch die Cuticula ausgegangen werden (ZIEGLER 1991). Die Fähigkeit der Luft Wasserdampf aufzunehmen ist begrenzt. Wärmere Luft kann mehr Wasser aufnehmen als kühlere. Der maximal mögliche Wassergehalt wird als Sättigungsfeuchte bezeichnet.

Ist die Sättigungsfeuchte der Luft bei Oberflächentemperatur kleiner als der absolute Wassergehalt der Luft kommt es zur **Kondensation** von Wasserdampf an der Pflanzenoberfläche und damit zu einem Eintrag von Wärmeenergie in die Pflanze. Dieser Wärmestrom durch Kondensation errechnet sich nach der gleichen Gleichung wie der Wärmestrom durch Verdunstung. Nur der Wasserbedeckungsfaktor wird in diesem Fall mit 1 angesetzt.

Bei der Abflammtchnik wird der Wassergehalt im Gasstrom von der chemischen Zusammensetzung des Brennstoffes und vom Verhältnis von Brennstoffdurchsatz zu Luftdurchsatz am Brenner bestimmt. Überströmt das Gas die Pflanzenoberfläche kühlt es innerhalb der Grenzschicht bis auf die Oberflächentemperatur ab. Liegt die Sättigungsfeuchte bei Oberflächentemperatur unterhalb des Wassergehaltes der Abgase, kommt es zur Kondensation von Wasser an der Pflanzenoberfläche und damit zu einem temperaturwirksamen Energieeintrag in die Pflanzenoberfläche. Ist die Sättigungsfeuchte des Gases bei Oberflächentemperatur höher als das Mischungsverhältnis der Gase, beginnt die Oberfläche zu verdunsten (Abb. 6).

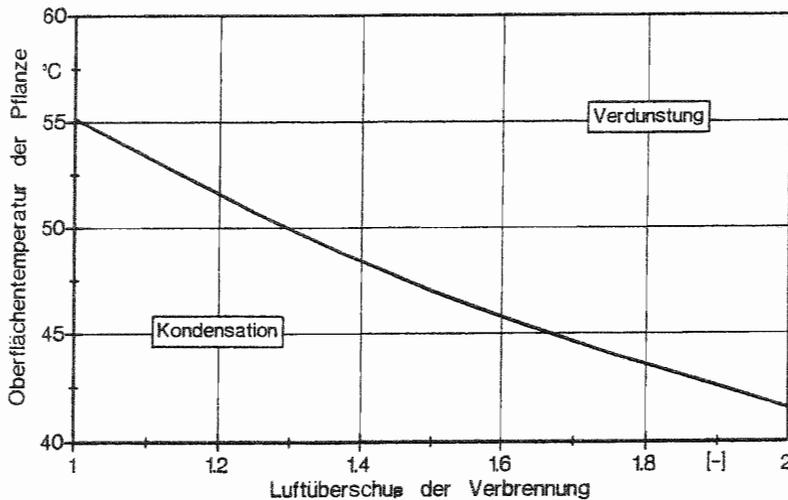


Abb. 6: Taupunkttemperatur der Verbrennungsgase in Abhängigkeit vom Luftüberschuß der Verbrennung (Flüssiggas)

Prinzipiell kann die Temperatur an der Pflanzenoberfläche nur dann über 100°C ansteigen, wenn keine Gewebeflüssigkeit für die Verdunstung mehr zur Verfügung steht. Befindet sich ein Wasserfilm auf der Pflanzenoberfläche, muß für die Verdunstungswärmestromdichte von einem

Wasserbedeckungsfaktor von 1 ausgegangen werden. Gegenüber einer trockenen Oberfläche (krautige Pflanze) bedeutet dies eine Erhöhung der Verdunstungswärmestromdichte um den Faktor 10.

Die Berechnung der entsprechenden Luftzustände erfolgt nach WEISS (1977)

4.1.2.3 Strahlung

Jeder Körper sendet in Abhängigkeit von seiner Oberflächentemperatur Energie in Form von Strahlung (elektromagnetische Wellen) aus. Den maximal möglichen Höchstbetrag liefert ein sogenannter "schwarzer Körper". Jeder andere Körper emittiert weniger. Das Verhältnis seiner Ausstrahlung zu der eines schwarzen Körpers gleicher Temperatur nennt man sein Emissionsverhältnis ϵ ; es ist nach dem Kirchhoffschen Gesetz für den Fall, daß der Körper mit dem ihn umgebenden Medium im Temperaturgleichgewicht steht, identisch mit seinem Absorptionsverhältnis und liegt demnach zwischen 0 und 1. Die Wärmestrahlung eines Körpers berechnet sich nach dem Stefan-Boltzmannschen Gesetz. Dessen allgemeine Form lautet:

$$\dot{Q}_{Str.} = A \cdot \epsilon \cdot \sigma \cdot T^4 \quad (11)$$

Darin ist:

$\dot{Q}_{str.}$: Strahlungsstrom	[W]
ϵ	: Emissionsverhältnis	[-]
A	: Oberfläche des Körpers	[m ²]
σ	: Strahlungskoeffizient des schwarzen Körpers (Stefan-Boltzmann Konstante)	[W/m ² K ⁴]
T	: Oberflächentemperatur des Körpers	[K]

Neben den festen und flüssigen Körpern strahlt auch ein Teil der Gase Wärme aus und absorbiert nach dem Kirchhoffschen Gesetz Wärmestrahlung. Elementare Gase wie Sauerstoff und Stickstoff verhalten sich bei Temperaturen bis 3000 °C praktisch diatherm, das heißt, sie sind durchlässig für die einfallenden Wärmestrahlen. Dagegen sind andere Gase wie Wasserdampf und Kohlendioxid wirksame Strahler, die in einem engen Wellenbereich (Banden) ausstrahlen und absorbieren (selektive Strahler).

Für die Emission bzw. Absorption von Wärmestrahlung fester Körper genügt schon eine Schichtdicke von wenigen hundertstel Millimetern, und man spricht deshalb von der Strahlung bzw.

Absorption fester Oberflächen. Bei Gasen werden Absorption und Emission erst bei Schichtdicken von wenigen Zentimetern merklich, so daß erst ein Gaskörper strahlt.

Das Emissionsverhältnis ϵ_{Gas} ist für ein bestimmtes Gas nur von seinem Teildruck und von der Schichtdicke abhängig. Der Teildruck entspricht dem Volumenanteil des strahlenden Gases am gesamten Gaskörper. Mit zunehmenden Werten steigen Absorption und Emission des Gases.

Die Strahlung leuchtender Flammen ist um ein Vielfaches stärker als die von ihrem Kohlendioxid und Wassergehalt herrührende Gasstrahlung. Diese Strahlung wird durch kleinste Teilchen von festem Kohlenstoff ausgesandt, die in einer solchen Flamme glühend schweben. Die Höhe der von einer leuchtenden Flamme ausgehenden Strahlung ist stark von den Bedingungen abhängig, unter denen die Verbrennung stattfindet. Eine exakte Berechnung ist daher nicht möglich, Messungen wurden jedoch mehrmals durchgeführt. Näherungsweise kann man solche Flammen als schwarze Körper ansehen und einen Abminderungsfaktor einführen, der von der Feuerraumgröße und der Bauart abhängt. Dabei kann das Emissionsverhältnis einer solchen Flamme Werte zwischen 0,6 und 1 (schwarzer Körper) erreichen.

Da innerhalb einer Flamme die Einflußfaktoren Gaskörperform, Temperatur und Partialdruck der strahlenden Komponenten stark schwanken, ist eine exakte mathematische Berechnung des Strahlungsstroms einer frei brennenden Flamme ein im Rahmen dieser Arbeit unlösbares Problem. Für eine näherungsweise Berechnung wird deshalb der Modellansatz zur Berechnung des Strahlungstransportes innerhalb einer Brennkammer zugrunde gelegt (RICHTER und MICHELFELDER 1984, VORTMEYER 1984). Dabei wird davon ausgegangen, daß die Teildrücke und die Temperatur des Gasgemisches räumlich und zeitlich konstant bleiben. Die Geometrie der Brennkammer bestimmt die Gaskörperform. Für eine thermische Behandlung mit einer abgedeckten Flamme wird die Gaskörperform näherungsweise mit der Form der Abdeckung angenommen.

Die Teildrücke von H_2O und CO_2 werden bei gegebener Verbrennung durch den Luftüberschuß bestimmt. Die Emissionsgrade von CO_2 und H_2O sind bei 1 bar Gesamtdruck nun noch von der Gastemperatur, von dem Produkt aus dem Partialdruck der Gaskomponenten und der schichtgleichen Dicke S_g abhängig.

Die schichtgleiche Dicke wird von der Form und der Größe des Gaskörpers bestimmt:

$$S_{gl} = 0,9 \cdot \frac{4 \cdot V_{Gas}}{A_{Gas}} \quad (12)$$

Darin ist:

S_{gl}	: schichtgleiche Dicke	[m]
V_{Gas}	: Volumen des Gaskörpers	[m ³]
A_{Gas}	: Oberfläche des Gaskörpers	[m ²]

Das Emissionsverhältnis ϵ_{Gas} ergibt sich aus der Addition der Emissionsgrade der einzelnen strahlenden Gaskomponenten unter der Berücksichtigung eines Korrekturwertes $\Delta\epsilon$. Diese Korrektur muß wegen der Überlagerung einzelner Emissionsbanden vorgenommen werden:

$$\epsilon_{Gas} = \epsilon_{H_2O} + \epsilon_{CO_2} - \Delta\epsilon \quad (13)$$

Das Emissionsverhältnis ϵ_{Gas} des Abgases wurde für zwei verschiedene Luftüberschüsse für die Verbrennung und für drei verschiedene Gaskörper in Abhängigkeit von der Temperatur berechnet (Abb. 7). Die Gaskörper besitzen die gleiche Grundfläche von 1 m² und variieren nur in der Höhe.

Für ϵ_{Gas} zeigen sich drei Abhängigkeiten:

Mit steigendem Luftüberschuß für die Verbrennung nimmt der Partialdruck der strahlenden Abgaskomponenten CO₂ und H₂O ab. Das Emissionsverhältnis wird kleiner.

Mit zunehmender Gaskörperhöhe bei gleichbleibender Grundfläche steigt das Volumen/Oberflächen Verhältnis und damit die schichtgleiche Dicke an. Das Emissionsverhältnis nimmt zu.

Mit steigender Temperatur dehnt sich der Gaskörper aus. Da aber das gleiche Gaskörpervolumen bei gleichem Druck betrachtet wird, bleibt zwar der Partialdruck der strahlenden Gaskomponenten gleich, deren Molekülzahl aber nimmt ab. Das Emissionsverhältnis wird kleiner.

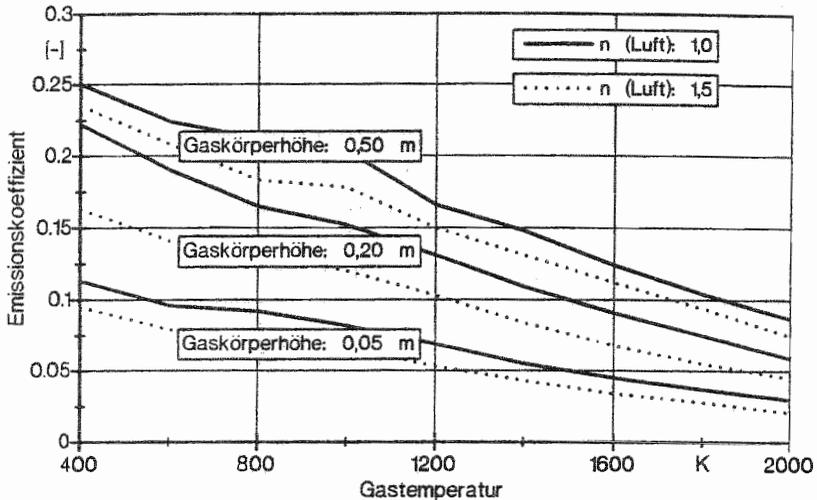


Abb. 7: Emissionsverhältnis eines Gaskörpers für drei verschiedene Gaskörperhöhen und zwei verschiedene Luftüberschüsse für die Verbrennung in Abhängigkeit von der Temperatur (Flüssiggas)

4.1.2.4 Leitung

Bestehen Temperaturunterschiede innerhalb eines ruhenden Mediums, strömt entlang des Temperaturgefälles solange ein Wärmestrom, bis sich beide Orte auf gleichem Temperaturniveau befinden. Der Wärmestrom durch Leitung berechnet sich nach folgender Gleichung:

$$\dot{Q}_{\text{Leit}} = \frac{\lambda}{d} \cdot A \cdot \Delta T \quad (14)$$

Darin ist:

\dot{Q}_{Leit}	: Wärmeleitungsstrom	[W]
λ	: Wärmeleitfähigkeit	[W/mK]
d	: Länge des Wärmeleiters	[m]
A	: Querschnittsfläche	[m ²]
ΔT	: Temperaturdifferenz der Orte, zwischen denen Wärmeenergie geleitet wird	[K]

Einflußgrößen auf die Wärmestromdichte durch Leitung sind die Schichtdicke, die Wärmeleitfähigkeit des ruhenden Mediums und das Temperaturgefälle zwischen den beiden Schichtgrenzen.

Der Energieeintrag in eine Pflanze während einer thermischen Behandlung erfolgt über die Pflanzenoberfläche. Die damit verbundene Temperaturerhöhung der äußersten Gewebeschicht hat die Ausbildung eines Temperaturgradienten von der Pflanzenoberfläche zur Pflanzenmitte zur Folge. Der Energietransport ins Pflanzeninnere erfolgt durch Leitung entlang dieses Temperaturgradienten. Da die Pflanze überwiegend aus Wasser besteht, kann für die entsprechenden Stoffkennwerte eines Pflanzengewebes ohne Interzellularen näherungsweise von den Stoffkennwerten von Wasser ausgegangen werden. Durch luftgefüllte Interzellularen werden die spezifische Wärmekapazität und die Wärmeleitfähigkeit des Pflanzengewebes entsprechend vermindert.

4.1.3 Modellpflanze

Für die Berechnung der Wärmeübergänge und der Leitungsvorgänge innerhalb des Gewebes ist es notwendig, die Pflanzen hinsichtlich ihrer morphologischen Struktur exakt zu parametrisieren. Die oberirdischen Teile der Pflanzen lassen sich morphologisch zum Zeitpunkt der Unkrautbekämpfung in Blätter, Stengel und Vegetationspunkte unterteilen. Die damit verbundenen Unterschiede in Form und Größe selbst innerhalb dieser Pflanzenteile lassen die Probleme einer Parametrisierung bereits an dieser Stelle deutlich werden und führen dazu, daß der Energieeintrag und der damit verbundene Temperatureffekt an jedem Punkt der Pflanze verschieden ist. Darüber hinaus stellt die Berechnung des konvektiven Wärmeübergangskoeffizienten nur einen Mittelwert für die gesamte betrachtete Überströmlänge dar. Tatsächlich nimmt der konvektive Wärmeübergangskoeffizient über die Länge der überströmten Fläche ab. Beim Blatt ergibt sich aus dieser Tatsache ein hoher konvektiver Wärmeübergang an der angeströmten Blattkante. Über die Blattlänge nimmt die konvektive Wärmestromdichte ab. Aufgrund der variierenden Gewebedicke, bedingt durch die Blattadern, kommt es an jedem Punkt des Blattes zu unterschiedlichen Temperaturerhöhungen und damit zu unterschiedlichen Schadbildern. Eine ausreichende Erwärmung der Blätter reicht aber für eine Bekämpfung der Gesamtpflanze in der Regel nicht aus. Lebenswichtige oberirdische Gewebeabschnitte sind Vegetationspunkte und der Stengelabschnitt unmittelbar über dem Boden (HOFFMANN 1989). Diese Abschnitte weisen in der Regel eine halbrunde oder zylindrische Form auf. Ist der Vegetationspunkt von Hüllblättern umgeben (Monokotyledone), so ergibt sich für diesen Pflanzenabschnitt ebenfalls eine zylindrische Form. Je nach Pflanzenart und Größe ist die Leitungslänge von der Pflanzenoberfläche zum lebenswichtigen Gewebeabschnitt sehr unterschiedlich.

Um den Einfluß der Leitungslänge ausreichend berücksichtigen zu können, wurde für die Modell-

pflanze von einer zylindrischen Form ausgegangen. Für die Berechnung der Wärmeübergänge und der Leitungsvorgänge innerhalb der Modellpflanze sind neben den Stoffkennwerten des Pflanzengewebes damit der Durchmesser und die Oberflächeneigenschaften der Modellpflanze entscheidend. Für die Stoffkennwerte des Pflanzengewebes wurde vereinfacht von den Stoffkennwerten von Wasser ausgegangen (Tab. 3). Der Wasserbedeckungsfaktor ξ der Pflanzenoberfläche wurde mit 0,1, das Emissionsverhältnis mit 0,9 festgelegt.

Tab. 3: Standarddaten für die Modellpflanze

Wärmeleitfähigkeit:	$\lambda_{MP} = 0.624$	[W/mK]
Dichte:	$\rho_{MP} = 998$	[kg/m ³]
spez. Wärmekapazität:	$c_{p,MP} = 4128$	[J/kgK]
Wasserbedeckungsfaktor:	$\xi_{MP} = 0.1$	[-]
Emissionsverhältnis:	$\epsilon_{MP} = 0.9$	[-]

4.1.4 Mathematische Verknüpfung der Rechenansätze

Die Grundlagen für die Berechnung des Energieeintrages eines heißen Gasstromes in die Modellpflanze und des daraus resultierenden Temperaturverlaufes über den Querschnitt sind der erste Hauptsatz der Thermodynamik und das Fouriersche Grundgesetz der Wärmeleitung (kinetischer Ansatz) (MARTIN 1985).

Die Energiebilanz lautet für jedes Volumenelement eines ruhenden inkompressiblen Mediums:

$$\rho \cdot c_p \cdot \frac{dT}{dt} = - \nabla \dot{q} \quad (15)$$

Darin ist:

ρ	: Dichte	[kg/m ³]
c_p	: spez. Wärmekapazität	[J/kg K]
T	: Temperatur	[K]
$\nabla \dot{q}$: Wärmestromdichte durch das Volumenelement	[W/m ³]
t	: Zeit	[s]

Der Nabla-Operator ∇ symbolisiert die entsprechenden Differentialoperationen in der x, y und z - Richtung des Koordinatensystems.

Gl. 15 besagt, daß sich die innere Energie (Temperatur) des Volumenelementes erhöht, wenn der austretende Wärmestrom kleiner als der eintretende ist. Der kinetische Ansatz (Fourier) verknüpft die Wärmestromdichte mit dem Gradienten des Temperaturfeldes:

$$\dot{q} = - \lambda \cdot \nabla T \quad (16)$$

Darin ist:

\dot{q}	: Wärmestromdichte	[W/m ²]
λ	: Wärmeleitfähigkeit	[W/m K]
∇T	: Temperaturgradient	[K / m]

Nach Gl. 16 stimmt die Richtung der Wärmestromdichte mit der Richtung des negativen Temperaturgradienten überein, wenn die Wärmeleitfähigkeit nicht eine richtungsabhängige Größe ist.

Aus den Gleichungen (15) und (16) folgt die Gleichung zur Berechnung des entsprechenden Temperaturfeldes:

$$\rho \cdot c_p \cdot \frac{dT}{dt} = \nabla \lambda \nabla T \quad (17)$$

Da die Wärmeleitfähigkeit sich innerhalb der Modellpflanze nicht ändert vereinfacht sich die Gl. (17) zu:

$$\frac{dT}{dt} = \frac{\lambda}{(\rho \cdot c_p)} \cdot \nabla^2 T \quad (18)$$

Die Pflanzen werden im Grundmodul durch einen Zylinder mit den Stoffkennwerten von Wasser und den Oberflächeneigenschaften von pflanzlichem Gewebe abgebildet.

Die Differentialgleichung für die Berechnung des Temperaturfeldes innerhalb der Modellpflanze lautet somit:

$$\frac{dT}{dt} = \frac{\lambda}{(\rho \cdot c_p)} \cdot \left(\frac{1}{r} \cdot \frac{d}{dr} \cdot \left(r \cdot \frac{dT}{dr} \right) + \frac{1}{r^2} \cdot \frac{d^2 T}{d\varphi^2} + \frac{d^2 T}{dz^2} \right) \quad (19)$$

Darin ist:

T	: Temperatur	[K]
ρ	: Dichte	[kg/m ³]
c_p	: spez. Wärmekapazität	[J/kg K]
r	: Radius der Modellpflanze	[m]
φ	: Raumwinkel (Zylinderkoordinate)	[rad]
z	: Zylinderkoordinate	[m]
λ	: Wärmeleitfähigkeit	[W/m K]

Während der thermischen Behandlung mit einem heißen Gasstrom bzw. einem Abflammergerät wird Wärmeenergie in die Modellpflanze eingetragen. Der Wärmeeintrag verursacht eine zeitliche Veränderung des Temperaturfeldes. Da sich die Wärmestromdichte in die Modellpflanze während der thermischen Behandlung verändert, ist eine analytische Lösung der Differentialgleichung nicht

möglich. Als Lösungsansatz wird deshalb das Differenzenverfahren herangezogen. Zur Vereinfachung des Rechenablaufes wird für die Modellpflanze von einem unendlich ausgedehnten Zylinder ausgegangen. Damit ist eine vereinfachte eindimensionale Betrachtung des Problems möglich. Für die entsprechende Berechnung der Energieströme und des daraus resultierenden Temperaturverlaufes über den Querschnitt der Modellpflanze während und unmittelbar nach einer thermischen Behandlung mit einem heißen Gasstrom wird die Modellpflanze in n -Schichten gleichen Volumens aufgeteilt (Abb. 8).

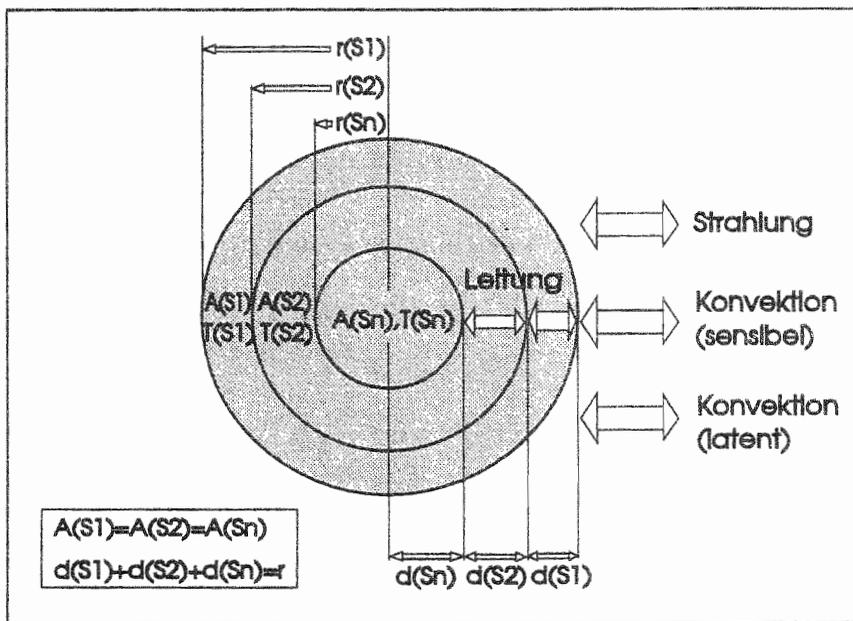


Abb. 8: Schichtenmodell eines zylindrischen Pflanzenkörpers zur numerischen Näherung der Temperaturverläufe über den Querschnitt während und unmittelbar nach einer thermischen Behandlung mit einem heißen Gasstrom

Die temperaturwirksame Nettowärmestromdichte vom Gasstrom in die Oberfläche der Modellpflanze ergibt sich aus der Bilanzierung der verschiedenen Wärmeübertragungsmechanismen (Kap.4.1.2):

$$\dot{q}_{\text{netto}} = \dot{q}_{\text{Konv.}} + \dot{q}_{\text{Str. (Gas)}} + \dot{q}_{\text{Kond.}} - \dot{q}_{\text{Str. (MP)}} - \dot{q}_{\text{Verd.}} \quad (20)$$

Darin ist:

q_{netto}	: Temperaturwirksame Nettowärmestromdichte	[W/m ²]
$q_{\text{Konv.}}$: Wärmestromdichte durch Konvektion	[W/m ²]
$q_{\text{Str. (Gas)}}$: Wärmestromdichte durch Gasstrahlung	[W/m ²]
$q_{\text{Kond.}}$: Wärmestromdichte durch Kondensation	[W/m ²]
$q_{\text{Str. (MP)}}$: Wärmestromdichte durch Rückstrahlung der Modellpflanze	[W/m ²]
$q_{\text{Verd.}}$: Wärmestromdichte durch Verdunstung	[W/m ²]

Die Nettowärmestromdichte q_{netto} hat im Zeitraum t_z eine Temperaturerhöhung ΔT in der äußersten Schicht $S(i=1)$ zur Folge:

$$\Delta T_{S(i=1)} = \frac{\dot{q}_{\text{netto}}}{c_{p(\text{MP})} \cdot \rho_{\text{MP}}} \cdot \frac{2 \cdot r_{S(i=1)}}{r_{S(i=1)}^2 - r_{S(i=2)}^2} \cdot t_z \quad (21)$$

Darin ist:

$c_{p(\text{MP})}$: spez. Wärmekapazität der Modellpflanze	[J/kg K]
ρ_{MP}	: Dichte der Modellpflanze	[kg/m ³]
$r_{S(i)}$: äußerer Radius der Schicht i	[m]

Damit ergibt sich eine Temperaturdifferenz zur nächsten Schicht $S(i=2)$. Der allgemeine Ansatz für die Berechnung der Wärmestromdichte durch Leitung von $S(i)$ nach $S(i+1)$ lautet:

$$\dot{q}_{\text{Leit.}(S(i)-S(i+1))} = \frac{\lambda_{\text{MP}}}{r_{S(i)} - r_{S(i+1)}} \cdot (T_{S(i)} - T_{S(i+1)}) \quad (22)$$

Darin ist:

$\dot{q}_{\text{Leit.}}$: Wärmestromdichte durch Leitung	[W/m ²]
λ_{MP}	: spez. Wärmekapazität der Modellpflanze	[W/m K]
$r_{S(i)}$: äußerer Radius der Schicht i	[m]
$T_{S(i)}$: Temperatur der Schicht i	[K]

Der allgemeine Ansatz für die Berechnung des Temperatureffektes ΔT durch Wärmeleitung zwischen den Schichten $S(i)$ und $S(i+1)$ innerhalb des Zeitraumes t_z lautet:

$$-\Delta T_{S(i)} = \Delta T_{S(i+1)} = \frac{\dot{q}_{Leit.}}{c_{p(MP)} \cdot \rho_{MP}} \cdot \frac{2 \cdot r_{S(i+1)}}{r_{S(i)}^2 - r_{S(i+1)}^2} \cdot t_z \quad (23)$$

Aufgrund der damit verbundenen Temperaturerhöhung in der Schicht $S(i+1)$ kommt es zur Leitung von Wärmeenergie entlang des Temperaturgefälles. Nachdem für alle n Schichten die entsprechenden Leitungsvorgänge und Temperatureffekte berechnet wurden, wird für den nächsten Zeitschritt t_z erneut mit der Bilanzierung an der äußersten Schicht $S(i=1)$ begonnen.

Erreicht die Summe der Zeitschritte t_z die gewünschte Behandlungsdauer $t_{Beh.}$, wird der Datensatz für die Berechnung der Abkühlvorgänge eingelesen. Die Wärmeabgabe an der Oberfläche erfolgt nun durch Konvektion, Strahlung und Verdunstung:

$$\dot{q}_{netto} = \dot{q}_{Str.(Umg.)} - (\dot{q}_{Konv.} + \dot{q}_{Str.(MP)} + \dot{q}_{Verd.}) \quad (24)$$

Darin ist:

\dot{q}_{netto}	:	Temperaturwirksame Nettowärmestromdichte	[W/m ²]
$\dot{q}_{Konv.}$:	Wärmestromdichte durch Konvektion	[W/m ²]
$\dot{q}_{Str.(Umg.)}$:	Wärmestromdichte durch Strahlung der Umgebung	[W/m ²]
$\dot{q}_{Str.(MP)}$:	Wärmestromdichte durch Rückstrahlung der Modellpflanze	[W/m ²]
$\dot{q}_{Verd.}$:	Wärmestromdichte durch Verdunstung	[W/m ²]

Für die Strahlungsbilanz wird vereinfacht davon ausgegangen, daß die Rückstrahlung der Umgebung mit Lufttemperatur und einem Emissionsverhältnis von 0,9 erfolgt. Der Rechenablauf für den Abkühlvorgang unterscheidet sich ansonsten nicht vom Rechenablauf für den Erwärmungsvorgang. Das Programm endet, wenn die Summe der Zeitschritte t_z die gewünschte Gesamtsimulationsdauer t_{Ende} erreicht. Für die Berechnung des Temperaturverlaufes in der Modellpflanze während der thermischen Behandlung mit einem heißen Gasstrom ergibt sich damit folgender Rechenablauf (Abb. 9):

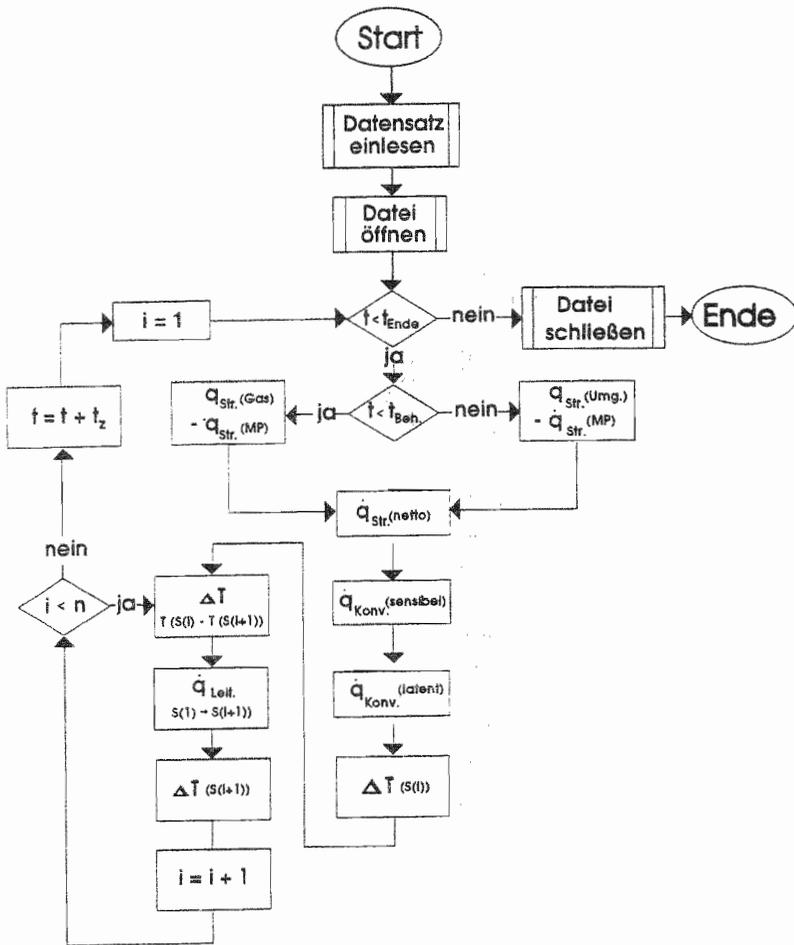


Abb. 9: Struktogramm des thermodynamischen Grundmodules zur Berechnung der Temperaturverläufe über den Querschnitt einer zylindrischen Modellpflanze während und nach einer thermischen Behandlung mit einem heißen Gasstrom

Die Zahl der Schichten wird mit 50 festgelegt. Eine höhere Anzahl bringt keine Veränderung der Rechenergebnisse. Der Zeitschritt t_z wird mit $1/100.000$ s gewählt. Der enorme Rechenaufwand erforderte den Einsatz eines Computers. Als Programmiersprache diente dabei *Turbo Pascal* (Borland, Version 6.0).

4.1.5 Meßtechnische Überprüfung der Rechenergebnisse des Grundmodules

Aufgrund des komplexen Modellaufbaus war es sinnvoll, bereits das Grundmodul meßtechnisch zu überprüfen. Da im Grundmodul die physikalischen Systemparameter Temperatur, Strömungsgeschwindigkeit, Emissionsverhältnis und Wassergehalt des wärmeübertragenden Gasstromes noch unverändert blieben, erfolgte die meßtechnische Überprüfung des Grundmodules mit Hilfe eines Heißluftwindtunnels (HWT).

4.1.5.1 Material und Methoden

Heißluftwindtunnel (HWT): Für die Überprüfung des Grundmodules war es notwendig, die physikalischen Systemparameter des wärmeübertragenden Gasstromes über die Versuchsdauer definieren und konstant halten zu können. Aufgrund dieser Anforderungen wurde ein Heißluftwindtunnel (HWT) konzipiert und gebaut (Abb. 10). Die Luft strömt mittels eines Abgasgebläses in einem Kreislauf aus gut isolierten Blechrohren. Die Strömungsgeschwindigkeit der Luft kann durch die Verstellung der Spannung des Gebläses (0 - 250 V) in einem weiten Bereich (0 - 5 m/s) eingestellt werden. Durch in diesem Kreislauf eingebaute regelbare Heizregister (3,6 kW) wird die Luft erhitzt (max. 330°C). Damit sind die Temperatur und die Strömungsgeschwindigkeit der Luft getrennt einstellbar. An einer Stelle ist der HWT durch einen Spalt unterbrochen. An dieser Stelle können mittels eines regelbaren Gleichstrommotors und einer daran angebrachten Halterung die Versuchsobjekte unterschiedlich lang dem Heißluftstrom ausgesetzt werden. Dabei wird die benötigte Drehgeschwindigkeit des Gleichstrommotors durch eine Änderung der Spannung (0 - 15 V) auf einen Sollwert eingestellt. Die Behandlungsdauer definiert sich dann aus der Zeit, die das Meßobjekt zum Durchfahren des Meßspaltes benötigt. Ein Strömungsgleichrichter und eine anschließende Beruhigungsstrecke sorgen für eine möglichst gleichmäßige Verteilung der Strömungsgeschwindigkeit über den Querschnitt des Meßspaltes. Die Messung der Strömungsgeschwindigkeit erfolgte mit einer Stausonde, wobei als Meßort die Mitte des Meßspaltes und der Mittelpunkt des Kanalquerschnittes gewählt wurde. Eine meßtechnische Überprüfung des Emissionsverhältnisses des Gaskörpers war für den HWT nicht möglich. Aufgrund der niedrigen Betriebstemperaturen und des geringen Gehalts der Heißluft an strahlenden Komponenten (CO_2 , H_2O) konnte ein Wärmeeintrag durch Gasstrahlung in den Berechnungen mit dem HWT vernachlässigt werden. Der Wassergehalt des heißen Luftstromes (Mischungsverhältnis) wurde mit dem Wassergehalt der Umgebungsluft gleichgesetzt. Der Einfluß des Mischungsverhältnisses der Umgebungsluft auf die Rechenergebnisse war so gering, daß auf eine meßtechnische Erfassung verzichtet werden konnte. Für die Berechnungen wurde deshalb von einem Wassergehalt von 0,01 kg/kg (kg Wasserdampf pro kg trockener Luft) ausgegangen. Mit dem HWT war es nun möglich, das Erwärmungsverhalten verschiedener Versuchsobjekte unter standardisierbaren.

reproduzierbaren Versuchsbedingungen zu untersuchen und mit den Rechenergebnissen des Grundmodules zu vergleichen.

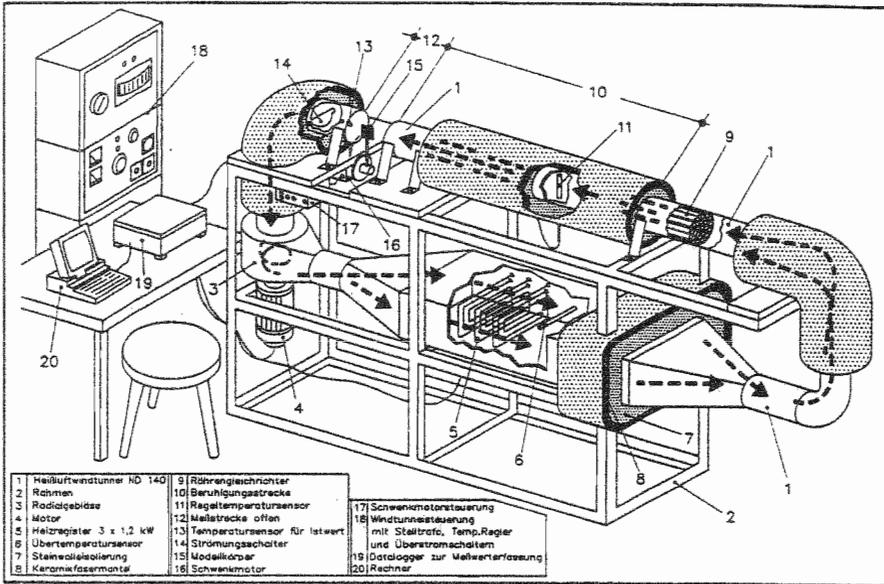


Abb. 10: Heißluftwindtunnel mit getrennt wählbarer Einstellung von Temperatur und Strömungsgeschwindigkeit der Heißluft

Versuchspflanze und Meßaufbau: Als Versuchsobjekt diente der Stengel von *Vigna radiata* (L.) var. *radiata* (Mungbohne). Der zylindrische, fast interzellularenfreie Aufbau des Stengels stimmt recht gut mit dem Aufbau der Modellpflanze überein. Die Pflanzen wurden einzeln in Jiffy-Pots angezogen. In Vorversuchen wurde die Mitte zwischen den Keimblättern und den primären Laubblättern als primärer Schädigungsort beobachtet. Der Stengeldurchmesser an dieser Stelle wurde für die Versuche mit einer Mikrometerschraube vermessen. Die Pflanzen wurden für die thermische Behandlung im HWT an einer am Gleichstrommotor befestigten Halterung fixiert (Abb. 11). Für die Erfassung der Temperaturverläufe innerhalb des Stengels während der thermischen Behandlung wurden Thermoelemente des Typs K verwendet. Der Einzeldrahtdurchmesser betrug 0,1 mm. Sie wurden an einem Ende in einem spitzen Winkel miteinander verschweißt. Damit waren sie stabil genug, um sie direkt ins Pflanzengewebe einstechen zu können.

Als Meßort wurde die vorher vermessene Stelle in der Mitte zwischen den Keimblättern und den primären Laubblättern ausgewählt. Zwei Thermoelemente wurden schräg von der strömungsabgewandten Seite in den Stengel eingestochen, wobei ein Thermoelement möglichst nah an der direkt angeströmten Seite, das zweite in der Stengelmittle platziert wurde. Anschließend wurden die Thermoedrähte an der Halterung fixiert, um ein Verrutschen der Meßpunkte im Stengel zu vermeiden. Die Meßdatenerfassung erfolgte über eine spezielle Meßkarte für Thermoelemente.

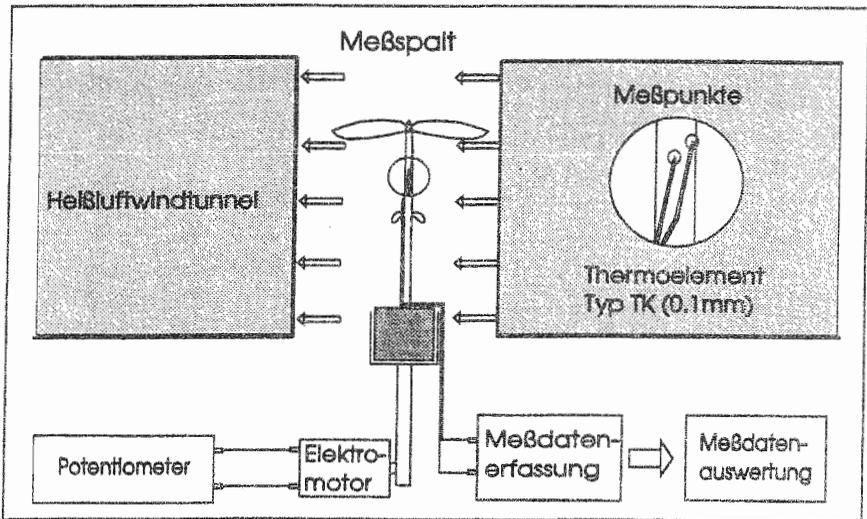


Abb. 11: Meßaufbau zur Untersuchung der Erwärmung von Pflanzen in einem Heißluftstrom

Versuchsbedingungen und Eingangsgrößen für das thermodynamische Grundmodul: Für die Versuche und die Berechnungen mit dem thermodynamischen Grundmodul wurde vom Standarddatensatz "Heißluft" ausgegangen (Tab. 5).

Tab. 4: Standarddatensatz "Heißluft"

Luftstrom, thermische Behandlung (einschließlich Tab. 2)			
Temperatur:	$T_{\text{Gas}} = 250 \text{ }^{\circ}\text{C}$	Wassergehalt:	$x_{\text{Gas}} = 0,01 \text{ kg/kg}$
Strömungsgeschw.:	$v_{\text{Gas}} = 2,5 \text{ m/s}$	Emissionskoeff.:	$\epsilon_{\text{Gas}} = 0$
Luftstrom, Abkühlphase (einschließlich Tab. 2)			
Temperatur:	$T_{\text{Gas}} = 20 \text{ }^{\circ}\text{C}$	Wassergehalt:	$x_{\text{Gas}} = 0,01 \text{ kg/kg}$
Strömungsgeschw.:	$v_{\text{Gas}} = 0,2 \text{ m/s}$	Emissionskoeff.:	$\epsilon_{\text{Umg}} = 0,9$
Modellpflanze (einschließlich Tab. 3)			
Durchmesser:	Meßwert		
Klima			
Lufttemperatur:	Meßwert (Starttemperatur im Gewebe)		

4.1.5.2 Ergebnisse und Schlußfolgerungen

Einen Vergleich zwischen dem errechneten und dem gemessenen Temperaturverlauf über den Zylinderquerschnitt zeigt die Abb. 12. Während der thermischen Behandlung stieg die Temperatur am Stengelrand auf $46 \text{ }^{\circ}\text{C}$, die Temperatur in der Stengelmittle nur auf $34 \text{ }^{\circ}\text{C}$. Während der Behandlung baute sich somit ein Temperaturprofil über den Zylinderquerschnitt auf. Die maximale Temperaturdifferenz zwischen Stengelrand und Stengelmittle betrug 12 K . Nach Beendigung der thermischen Behandlung begann der Stengelrand abzukühlen, während die Temperatur in der Stengelmittle noch bis $44 \text{ }^{\circ}\text{C}$ anstieg. Dem Temperaturengleich bei $42 \text{ }^{\circ}\text{C}$ folgte eine Umkehr des während der thermischen Behandlung aufgebauten Temperaturprofils. Die Pflanzenoberfläche gab Wärmeenergie durch Verdunstung, Konvektion und Strahlung ab und kühlte damit den Randbereich. Das Simulationsmodell errechnete einen ähnlichen Verlauf. Während die maximale Temperaturdifferenz zwischen Stengelrand und Stengelmittle ebenfalls 12 K betrug, lagen die Maximaltemperaturen für die Stengeloberfläche und die Stengelmittle etwa 5 K höher als die gemessenen Maximaltemperaturen.

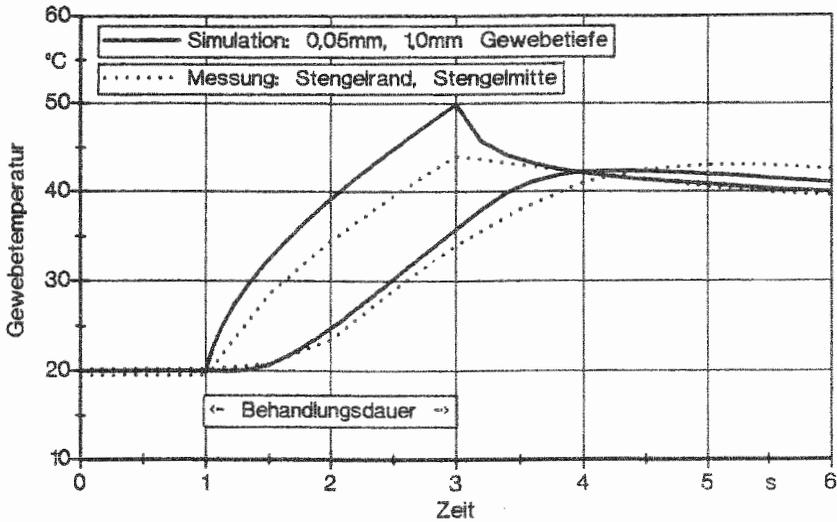


Abb. 12: Simulierter und gemessener Temperaturverlauf über den Querschnitt des Stengels der Mungbohne (*Vigna radiata* (L.) var. *radiata*, $d = 2$ mm) während und nach einer thermischen Behandlung von 2 s im Heißluftwindtunnel (Simulation: Standarddatensatz "Heißluft", $T_{\text{Luft}} = 250^\circ\text{C}$, $v_{\text{Luft}} = 2,5$ m/s)

Während aber für die Simulation eindeutige Meßorte definiert wurden, ergaben sich für die definierte Platzierung der Thermoelemente in Anbetracht des starken Temperaturgefälles von der Stengeloberfläche zur Stengelmittle erhebliche Schwierigkeiten. Eine Abweichung des Meßorts um 0,5 mm hätte in diesem Fall einen um 6 K veränderten Meßwert zur Folge. Darüber hinaus stellt der berechnete konvektive Wärmeübergangskoeffizient nur Mittelwerte für die gesamte überströmte Pflanzenoberfläche dar. Dies bedeutet, daß die während der thermischen Behandlung erreichte Gewebetemperatur an der direkt angeströmten Seite höher ist als die Gewebetemperatur an der gegenüberliegenden Seite. Die errechneten Werte stellen nur einen Mittelwert dar. Deshalb wird für eine Bewertung der Modellannahmen die Temperatur nach Temperaturengleich über den gesamten Zylinderquerschnitt herangezogen. Hier liegen die Meßergebnisse nur noch 3 K bzw. 15 % über den Rechenergebnissen. Für die Berechnung des konvektiven Wärmeübergangskoeffizienten können nicht alle Einflußfaktoren exakt parametrisiert werden. So geht das Rechenmodell von einer glatten, runden Oberfläche aus. Die Oberflächenstruktur des Stengels der Mungbohne ist aber leicht sechskantig und etwas behaart. Eine entsprechende Anpassung des Rechenmodells ist aber wegen der Problematik der meßtechnischen Erfassung der Gewebetemperaturen und der Unsicherheiten bei der Berechnung des konvektiven Wärmeübergangskoeffizienten nicht sinnvoll. Es wird davon ausgegangen, daß das Grundmodul den Temperaturverlauf im Stengelgewebe ausreichend gut abbildet.

4.2 Thermodynamisches Modell: Erwärmung eines Modellpflanzenbestandes während einer thermischen Behandlung mit dem Gerätekonzept "Abflammen"

Ausgangspunkt für die Modellbildung ist eine Übersicht über die Verteilung der eingesetzten Verbrennungsenergie während einer thermischen Behandlung mit dem Gerätekonzept "Abflammen" (Abb. 13).

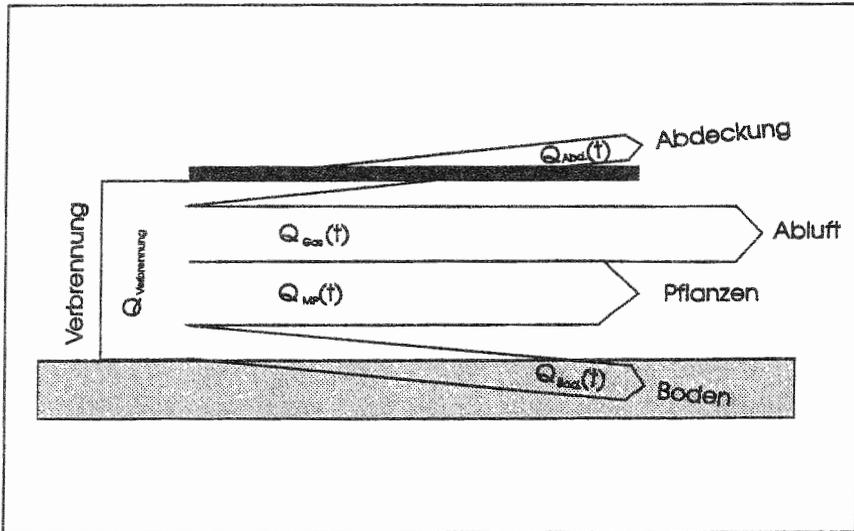


Abb. 13: Verteilung der eingesetzten Verbrennungsenergie bei der thermischen Behandlung mit dem Gerätekonzept "Abflammen"

Durch die Verbrennung wird ein heißer Gasstrom erzeugt. Dieser überströmt den Boden und die darauf befindlichen Pflanzen, wobei ein Teil der in den Gasen enthaltenen Verbrennungsenergie auf die Pflanzen übertragen wird. Die Verluste setzen sich aus dem Wärmeeintrag in den Boden, aus dem Wärmedurchgang durch die Abdeckung und aus der während der thermischen Behandlung nicht übertragenen Restenergie (Abluftverluste) zusammen.

Für das thermodynamische Modell muß der Einfluß des Gerätekonzeptes, des Pflanzenbestandes und des Bodens auf die physikalischen Systemparameter des wärmeübertragenden Gasstromes berücksichtigt werden. Beim Durchströmen der Abdeckung wird dem Gas aufgrund der Wärmeströme in die Pflanzen, in den Boden und durch die Abdeckung laufend Energie entzogen. Damit verändern sich in Abhängigkeit von den Wärmeübergängen die Systemparameter Temperatur, Strömungsgeschwindigkeit, Wassergehalt und Emissionsvermögen des heißen Gasstromes.

Ausgangspunkt für die Berechnung der Wärmeströme während der thermischen Behandlung mit dem Gerätekonzept "Abflammen" (Abb. 14) ist das thermodynamische Grundmodul.

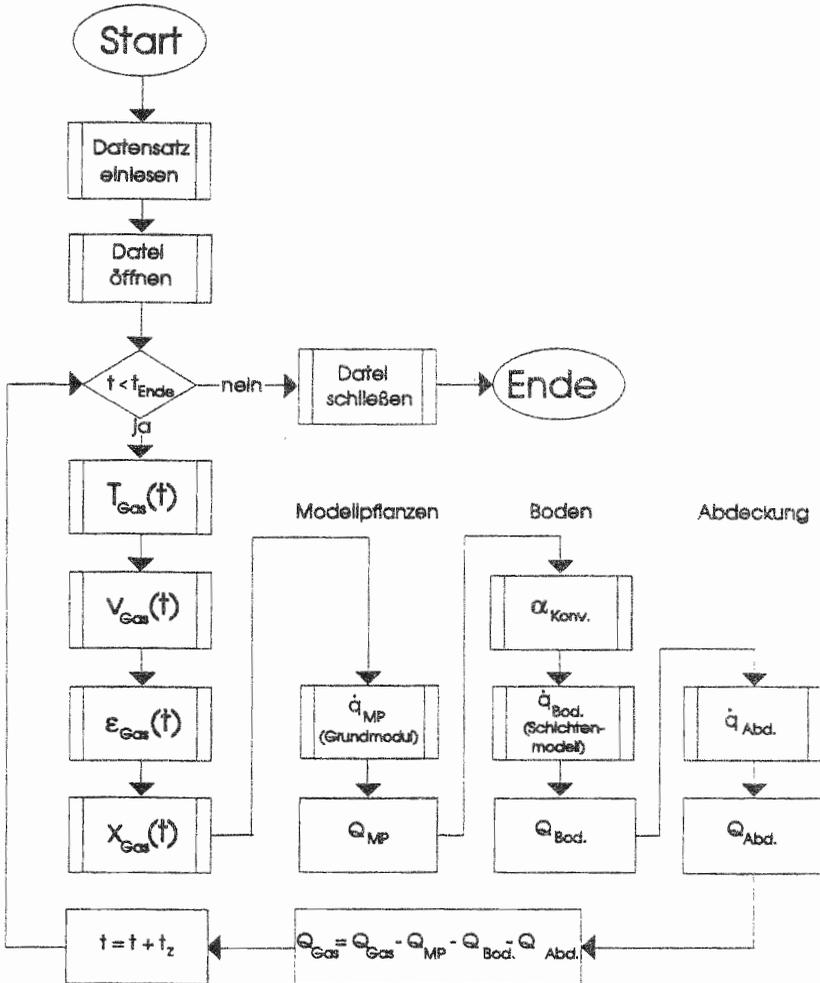


Abb. 14: Struktogramm des thermodynamischen Modells zur Berechnung der Temperaturverläufe über den Querschnitt der zylindrischen Modellpflanze während einer thermischen Behandlung eines Modellpflanzenbestandes mit dem Gerätekonzept "Abflammen"

Für die Dauer der einzelnen Zeitschritte t_z werden die Systemparameter Temperatur, Strömungsgeschwindigkeit, Emissionsvermögen und Mischungsverhältnis des wärmeübertragenden Gasstromes konstant gehalten und die jeweiligen Wärmeübergänge in die Pflanzen, in den Boden und durch die Abdeckung berechnet. Anschließend wird die Rückwirkung der erfolgten Wärmeübergänge auf die Systemparameter des Gasstromes berechnet. Die entsprechend veränderten Werte sind dann die Grundlage für die Berechnung der Wärmeübergänge im nächsten Zeitschritt. Durch die Festsetzung der Zeitschritte auf $1/100.000$ s wird so ein nahezu dynamischer Verlauf der physikalischen Systemparameter des Gasstromes abgebildet.

Die Geometrie des Gaskörpers wird vereinfachend mit der Geometrie der Abdeckung gleichgesetzt. Die mit dem mathematischen Modell errechneten Temperaturen sind Mittelwerte über den Querschnitt des Gaskörpers in Strömungsrichtung. In Wirklichkeit wird sich ein Strömungs-, Temperatur- und Feuchteprofil über den Abdeckungsquerschnitt ergeben. Innerhalb der Grenzschicht zum Boden nimmt die Wärmestromdichte zur Bodenoberfläche hin ab. Die Wärmestromdichte in die Pflanzenoberfläche hängt nun von der Lage des betrachteten Pflanzenteils innerhalb dieser Grenzschicht ab. Dieser Zusammenhang wird aufgrund der äußerst komplizierten strömungsdynamischen Zusammenhänge für die Modellbildung nicht berücksichtigt.

Grundlage für die Berechnung der Verteilung der eingesetzten Verbrennungsenergie während der thermischen Behandlung mit dem Gerätekonzept "Abflammen" ist der erste Hauptsatz der Wärmelehre (Energieerhaltung). Für die Verteilung der eingesetzten Verbrennungsenergie gilt zu jedem Zeitpunkt der thermischen Behandlung:

$$Q_{\text{Verbrennung}}(t_{\text{Beh.}}) = Q_{\text{MP}}(t) + Q_{\text{Bod.}}(t) + Q_{\text{Abd.}}(t) + Q_{\text{Gas}}(t) \quad (25)$$

Darin ist:

$Q_{\text{Verbrennung}}$: eingesetzte Verbrennungsenergie	[kJ]
$t_{\text{Beh.}}$: Behandlungsdauer	[s]
Q_{MP}	: Energieeintrag in die Modellpflanzen	[kJ]
$Q_{\text{bod.}}$: Energieeintrag in den Boden	[kJ]
$Q_{\text{Abd.}}$: Energiedurchgang durch die Abdeckung	[kJ]
Q_{Gas}	: Energieinhalt des Gasstromes	[kJ]

Für die dynamische Berechnung der physikalischen Systemparameter des wärmeübertragenden Gasstromes während der thermischen Behandlung wird von folgenden Annahmen ausgegangen:

Die bezogen auf die Dauer eines Simulationslaufes eingesetzte Verbrennungsenergie ergibt sich aus der Brennerleistung, der Fahrgeschwindigkeit und der Grundfläche der Abdeckung:

$$Q_{\text{Verbrennung}}(t_{\text{Beh.}}) = \dot{P}_{\text{Brenner}} \cdot H_u \cdot \frac{l_{\text{Abd.}} \cdot b_{\text{Abd.}}}{V_{\text{Gerät}}} \quad (26)$$

Darin ist:

$Q_{\text{Verbrennung}}$: eingesetzte Verbrennungsenergie	[kJ]
$t_{\text{Beh.}}$: Behandlungsdauer	[s]
\dot{P}_{Brenner}	: Gasdurchsatz am Brenner	[kg/h m]
H_u	: Heizwert des Gases	[kJ/kg]
$l_{\text{Abd.}}$: Länge der Abdeckung	[m]
$b_{\text{Abd.}}$: Breite der Abdeckung	[m]
$V_{\text{Gerät}}$: Fahrgeschwindigkeit	[m/s]

Für die Berechnung der maximalen **Gastemperatur** wird nicht von der theoretisch möglichen Temperaturerhöhung, sondern von einer maximalen Temperaturerhöhung des Gasgemisches um 1800 K ausgegangen. In Abhängigkeit vom Luftüberschuß der Verbrennung verringert sich die maximale Temperaturerhöhung des Gasgemisches. Für den Zusammenhang zwischen der Temperatur und dem Energiegehalt des Gases wird ein linearer Zusammenhang zugrunde gelegt:

$$T_{\text{Gas}}(t) = T_{\text{Luft}} + \frac{1800 \text{ K}}{n_{\text{Luft}}} \cdot \left(1 - \frac{Q_{\text{MP}}(t) + Q_{\text{Bod.}}(t) + Q_{\text{Abd.}}(t)}{Q_{\text{Verbrennung}}(t_{\text{Beh.}})}\right) \quad (27)$$

Darin ist:

T_{Gas}	: Gastemperatur	[K]
T_{Luft}	: Lufttemperatur	[K]
n_{Luft}	: Luftüberschuß der Verbrennung	[-]
Q_{MP}	: Energieeintrag in die Pflanze	[kJ]
$Q_{\text{bod.}}$: Energieeintrag in den Boden	[kJ]
$Q_{\text{Abd.}}$: Energieeintrag in die Abdeckung	[kJ]
$Q_{\text{Verbrennung}}$: Energieeinsatz durch Verbrennung	[kJ]
$t_{\text{Beh.}}$: Behandlungsdauer	[s]

Die **Strömungsgeschwindigkeit** der Gase ergibt sich aus dem Volumenstrom des Gases und der

Querschnittsfläche der Abdeckung in Strömungsrichtung. Der Volumenstrom wird durch die Brennstoffart, den Gasdurchsatz am Brenner, den Luftüberschuß der Verbrennung und durch die Temperatur der Gase bestimmt.

Die Veränderung der Strömungsgeschwindigkeit über die "wirksame" Gerätelänge errechnet sich über die Verminderung des Gasvolumens durch den Abkühlvorgang:

$$v_{\text{Gas}}(t) = \frac{T_{\text{Gas}}}{T_{\text{Umg.}}} \cdot \dot{V}_{\text{Flüssiggas}}(t_{\text{Beh.}}) \cdot 30,8 \cdot \frac{1}{b_{\text{Abd.}} \cdot h_{\text{Abd.}}} \quad (28)$$

Darin ist:

v_{Gas}	:	Strömungsgeschwindigkeit der Gase	[m/s]
T_{Gas}	:	Maximale Temperatur der Gase	[K]
$T_{\text{Umg.}}$:	Temperatur der Umgebungsluft	[K]
$b_{\text{Abd.}}$:	Breite der Abdeckung	[m]
$h_{\text{Abd.}}$:	Höhe der Abdeckung	[m]
$\dot{V}_{\text{Flüssiggas}}$:	Volumenstrom des Flüssiggases (Gasphase)	[m ³ /s]

Der **Wassergehalt** des Gases unmittelbar nach der Verbrennung ist bei gegebenem Brennstoff nur vom Luftüberschuß der Verbrennung abhängig. Kondensationsvorgänge an der Pflanze und am Boden verringern den Wassergehalt des wärmeübertragenden Gasstromes. Verdunstungsvorgänge erhöhen ihn:

$$x_{\text{Gas}}(t) = \frac{0,1}{n_{\text{Luft}}} \cdot \left(1 + \frac{Q_{\text{lat.}(MP)}(t) + Q_{\text{lat.}(Bod.)}(t)}{m_{\text{Gas}}(t_{\text{Beh.}}) \cdot \Delta h_v} \right) \quad (29)$$

Darin ist:

x_{Gas}	:	Wassergehalt des Gases	[kg/kg]
n_{Luft}	:	Luftüberschuß der Verbrennung	[-]
$Q_{\text{lat.}(MP)}$:	Energiebilanz der latenten Wärmeströme an den Modellpflanzen	[kJ]
$Q_{\text{lat.}(Bod.)}$:	Energiebilanz der latenten Wärmeströme am Boden	[kJ]
m_{Gas}	:	Masse des Gases	[kg]
$t_{\text{Beh.}}$:	Behandlungsdauer	[s]
Δh_v	:	Verdampfungsenthalpie von Wasser	[kJ/kg]

Das **Emissionsverhältnis** ist von der Geometrie und der Temperatur des Gaskörpers und bei gegebenem Brennstoff vom Luftüberschuß der Verbrennung abhängig. Der Zusammenhang zwischen der Gastemperatur und dem Emissionsverhältnis wird vereinfacht durch eine lineare Funktion abgebildet. Für die folgenden Simulationen wird dafür aufgrund der Komplexizität der Berechnungen von einem einheitlichen Gaskörper von 1 m² Grundfläche und einer Höhe von 0,2 m ausgegangen.

$$\varepsilon_{\text{Gas}}(t) = 0,223 - T_{\text{Gas}}(t) \cdot 10^{-4} \cdot \frac{1}{K} \quad (30)$$

Darin ist:

ε_{Gas}	: Emissionsverhältnis des Gaskörpers	[-]
T_{Gas}	: Gastemperatur	[K]

Für die Berechnung des **Wärmestromes** in die **Modellpflanzen** wird vom thermodynamischen Grundmodul ausgegangen. Für eine Bilanzierung der Energieströme ist es notwendig, die für den Wärmeeintrag zur Verfügung stehende Pflanzenoberfläche zu berücksichtigen. Diese hängt vom Durchmesser und dem spezifischen Gewicht der Modellpflanze, der angestrebten Dichte des Modellpflanzenbestandes B_{MB} (kg/m²) und der Länge und der Breite der Abdeckung ab:

$$A_{\text{MP}} = 4 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{B_{\text{MP}} \cdot l_{\text{Abd.}} \cdot b_{\text{Abd.}}}{d_{\text{MP}} \cdot \rho_{\text{MP}}} \quad (31)$$

Darin ist:

A_{MP}	: Pflanzenoberfläche	[m ²]
B_{MP}	: Bestandsdichte der Modellpflanze	[kg/m ²]
$l_{\text{Abd.}}$: Länge der Abdeckung	[m]
$b_{\text{Abd.}}$: Breite der Abdeckung	[m]
d_{MP}	: Durchmesser der Modellpflanze	[mm]
ρ_{MP}	: Dichte der Modellpflanze	[kg/m ³]

Die während des Zeitraumes t_z durch den Energieeintrag in die Modellpflanzen dem Gas temperaturwirksam entzogene Wärmeenergie errechnet sich nun nach:

$$Q_{MP}(t_z) = (\dot{q}_{Konv.}(t) + \dot{q}_{Str.(Gas)}(t)) \cdot A_{MP} \cdot t_z \quad (32)$$

Die **Wärmestromdichte** durch die **Abdeckung** hängt vom k-Wert der Abdeckung und von der Differenz zwischen der Gastemperatur und der Außenlufttemperatur ab:

$$\dot{q}_{Abd.}(t) = k_{Abd.} \cdot (T_{Gas}(t) - T_{Luft}) \quad (33)$$

Darin ist:

$\dot{q}_{Abd.}$: Wärmestromdichte durch die Abdeckung	[W/m ²]
$k_{Abd.}$: k-Wert der Abdeckung	[W/m ² K]
T_{Gas}	: Gastemperatur	[K]
T_{Luft}	: Temperatur der Außenluft	[K]

Die während des Zeitraums t_z durch den Wärmedurchgang durch die Abdeckung dem Gas temperaturwirksam entzogene Wärmeenergie berechnet sich nun nach:

$$Q_{Abd.}(t_z) = \dot{q}_{Abd.}(t) \cdot A_{Abd.} \cdot t_z \quad (34)$$

Für die Berechnung des **Wärmestromes** in den **Boden** muß wie beim Energieeintrag in die Modellpflanze der Einfluß der Oberflächentemperatur berücksichtigt werden. Diese wird in erster Linie durch die Stoffkennwerte des Bodens (Tab. 4) und durch Kondensations- und Verdunstungsvorgänge an der Bodenoberfläche beeinflusst. Um diese Zusammenhänge entsprechend zu berücksichtigen, ist es notwendig, auch die Wärmeströme in den Boden und den daraus resultierenden Temperatureffekt über die Bodentiefe über ein Schichtenmodell zu berechnen (Abb. 15).

Da eine entsprechende Parametrisierung der Oberflächenrauigkeit nicht möglich ist, wird vereinfacht von einer glatten Oberfläche ausgegangen. Für das Schichtenmodell genügt es die Temperaturverläufe bis zu einer Tiefe von 5 cm zu berechnen. Bereits in 3 cm Tiefe beträgt die errechnete Temperaturerhöhung durch die thermische Behandlung in der Regel weniger als 1 K. Die Schichtenzahl wird mit 50 festgelegt. Eine mögliche Verminderung des Strahlungstroms in den Boden durch die "Beschattung" durch die Pflanzen wird im Modell nicht berücksichtigt. Damit stellt der errechnete Wärmestrom in den Boden eine Obergrenze dar.

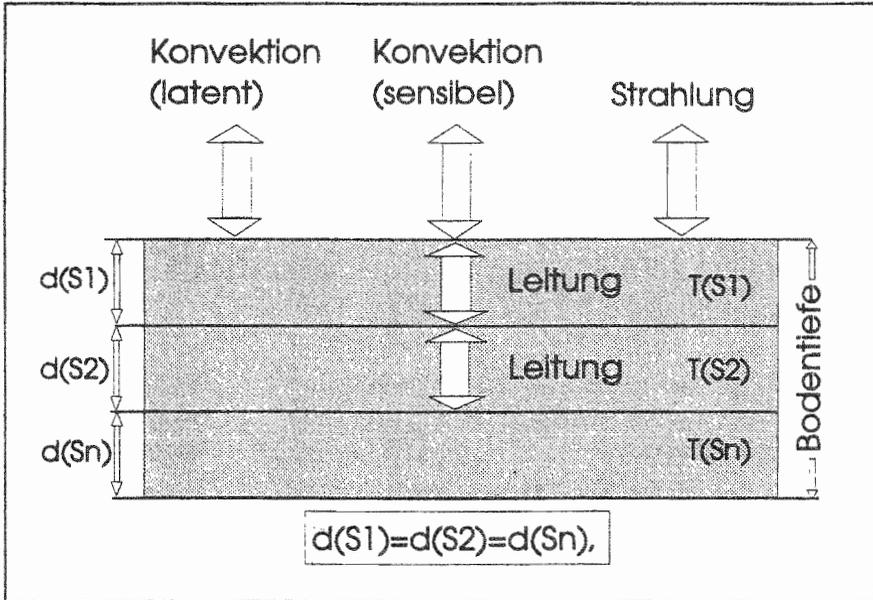


Abb. 15: Schichtenmodell zur Berechnung des Temperaturverlaufes in Abhängigkeit von der Bodentiefe während und unmittelbar nach der thermischen Behandlung mit dem Gerätekonzept "Abflammen"

Tab. 5: Stoffkennwerte für den Boden (verändert nach Hinz 1963)

Wärmeleitfähigkeit:	$\lambda_{\text{Bod.}} = 0,73$	[W/mK]
Dichte:	$\rho_{\text{Bod.}} = 1,60$	[kg/kg]
spez. Wärmekapazität:	$c_{p(\text{Bod.})} = 2200$	[J/kgK]
Wasserbedeckungsfaktor:	$\xi_{\text{Bod.}} = 0,1$	[-]
Emissionsverhältnis:	$\epsilon_{\text{Bod.}} = 0,9$	[-]

Die während des Zeitraumes t_z durch den Wärmeeintrag in den Boden dem Gas temperaturwirksam entzogene Energie berechnet sich nun nach:

$$Q_{\text{Bod.}} = (\dot{q}_{\text{Konv.}}(t) + \dot{q}_{\text{Str.}(Gas)}(t)) \cdot A_{\text{Bod.}} \cdot t_z \quad (35)$$

Die wirksame Gerätelänge wird mit der Länge der Abdeckung gleichgesetzt. Die Behandlungsdauer ist nun nur noch von der Länge der Abdeckung und von der Fahrgeschwindigkeit abhängig:

$$t_{Beh.} = \frac{l_{Abd.}}{v_{Gerät}} \quad (36)$$

Darin ist:

$t_{Beh.}$: Behandlungsdauer	[s]
$l_{Abd.}$: Länge der Abdeckung	[m]
$v_{Gerät}$: Fahrgeschwindigkeit	[m/s]

4.3 Gewebetemperatur und Schädigung: Experimentelle Untersuchungen zum Schädigungsmechanismus

Für die Vervollständigung des Rechenmodells war es notwendig, den zu schädigenden Gewebeabschnitt innerhalb der Modellpflanze und die zum Abtöten des Gewebes notwendige Mindesttemperatur zu definieren. Die Meinungen über die zum Abtöten eines Pflanzengewebes notwendige Mindesttemperatur gehen in der Literatur weit auseinander. Der Unterschied der dafür einzutragenden Energiemengen ist erheblich. Deshalb musste die tatsächlich notwendige Schädigungstemperatur experimentell eingegrenzt werden.

4.3.1 Material und Methoden

In einem Versuch im Heißluftwindtunnel sollten zwei Teilbereiche des Problemkreises Schädigungsmechanismus einer thermischen Behandlung an einem Beispiel bearbeitet werden. Zum ersten sollte der Zusammenhang zwischen erreichter Temperatur im Stengelgewebe und die daraus resultierenden "sichtbaren" Schäden untersucht werden. Zweitens sollte die Minimalschädigung, die zum Absterben der Versuchspflanze führt, erarbeitet werden. Als Versuchspflanze diente die Mungbohne (*Vigna radiata* (L.) var. *radiata*). Sie ist in einem frühen Entwicklungsstadium klar in Blatt, Stengel und Vegetationspunkt gegliedert und ist sehr einheitlich und schnell anzuziehen. Die Pflanzen wurden einzeln in Jiffy-Pots angezogen. Thermisch behandelt wurde, als die ersten beiden Laubblätter etwa 3 cm lang waren. Die Höhe der Pflanzen betrug zu diesem Zeitpunkt etwa 10 cm. Das dritte Laubblatt war noch nicht zu erkennen. Der Vegetationspunkt war nicht von den Laubblättern verdeckt. Es wurden etwa doppelt so viele Pflanzen angezogen, wie für die Versuche benötigt wurden. Für die anschließende Auswahl als Versuchspflanze war der Stengeldurchmesser in der

Mitte zwischen den Keimblättern und den primären Laubblättern ausschlaggebend. Er betrug im Versuch im Mittel 2 mm. Der Heißluftwindtunnel wurde für diese Untersuchungen auf 250°C Lufttemperatur und 2,5 m/s Strömungsgeschwindigkeit eingestellt. Die Behandlungsdauer wurde in 0,5 s Schritten von 0,5 s bis 3 s variiert. Pro Variante wurden 10 Pflanzen behandelt. Die meßtechnisch exakte Erfassung des Temperaturprofils über den Zylinderquerschnitt während der thermischen Behandlung ist in diesem Zusammenhang ein nahezu unlösbares Problem. Darüber hinaus wird beim Einstechen in den Stengel das Gewebe beschädigt. Um den Einfluß des während der thermischen Behandlung aufgetretenen Temperaturprofils auf die anschließenden sichtbaren Schäden beurteilen zu können, wurden deshalb die entsprechenden Stengeldurchmesser gemessen und die jeweiligen Temperaturprofile mittels des thermodynamischen Grundmodul errechnet.

Für die folgenden Berechnungen wurde vom Standarddatensatz "Heißluft" ausgegangen (Tab. 5).

4.3.2 Ergebnisse

Unmittelbar nach der Behandlung unterschieden sich die Pflanzen der Varianten "0,5 s" bis "1,5 s" Behandlungsdauer optisch nicht von der Kontrolle. Erst ab einer Behandlungsdauer von 2,0 s zeigten die Blätter der Pflanzen Wirkung, d.h. gegenüber der Kontrolle wirkten die Blätter etwas schlaffer. Bei den Varianten "2,5 s" und "3,0 s" verlor auch der Stengel an Festigkeit und knickte um. Die in der Praxis übliche "Fingerdruckprobe" an den Blättern ließ ab der Variante "1,0 s" den charakteristischen dunkelgrünen Fleck zurück.

Ein deutlicheres Bild ergab sich drei Tage nach der Behandlung. Hier wurde die Schädigung der Pflanzen durch die thermische Behandlung deutlich sichtbar. Bei der Variante "0,5 s" waren die Blätter auf der von der Heißluft angeströmten Seite teilweise eingetrocknet. An den Stengeln waren optisch keine Schäden erkennbar. Die Simulation ergab für den Stengelrand eine maximale Temperatur von 38 °C (Abb. 16). Bereits bei der Variante "1,0 s" waren die Blätter der Pflanzen bis auf den Bereich der Mittelrippe und deren unmittelbare Umgebung vollständig abgetötet. Die völlige Entfärbung des betroffenen Gewebes deutete auf einen stattgefundenen Abbau der Chloroplasten hin. Die Stengel dieser Varianten wiesen auf der von der Heißluft angeströmten Seite streifenförmige Nekrosen auf. Die Simulation ergab für diesen Bereich des Stengels eine maximale Temperatur von 44 °C. Die Stengel der Variante "1,5 s" waren auf der von der Heißluft angeströmten Seite etwa 0,3 mm tief bis knapp in den Phloembereich eingetrocknet. Die gegenüberliegende Seite wies streifenförmige Nekrosen auf. Die Simulation ergab für diesen Bereich eine maximale Temperatur zwischen 50 °C an der Stengeloberfläche und 44 °C in 0,3 mm Tiefe. Die Blätter dieser Variante waren bis auf die Mittelrippe eingetrocknet. Die Pflanzen waren zwar schwer geschädigt, aber noch nicht abgetötet. Erst eine Behandlungsdauer von 2,0 s führte zu einem ringförmigen Eintrocknen

eines Stengelabschnitts zwischen den Keimblättern und den primären Laubblättern und damit zum Absterben der Gesamtpflanzen. Die Simulation ergab für diesen Bereich eine maximale Temperatur zwischen 55 °C an der Stengeloberfläche und 42 °C in 0,5 mm Tiefe. Nach dem Ausgleich des Temperaturprofils betrug die berechnete Gewebetemperatur 47 °C. Eine mikroskopische Untersuchung der geschädigten Stengelabschnitte unmittelbar nach der thermischen Behandlung ergab keinen Anhaltspunkt für eine mechanische Beschädigung der Zellwände. Die Vegetationspunkte wiesen bei dieser Behandlungsdauer auch nach drei Tagen noch keine sichtbaren Schäden auf. Durch ihre Lage zwischen den primären Laubblättern war der Energieeintrag in diesen empfindlichen Teil der Pflanze und damit dessen Erwärmung deutlich geringer als die der Blätter und der Stengel.

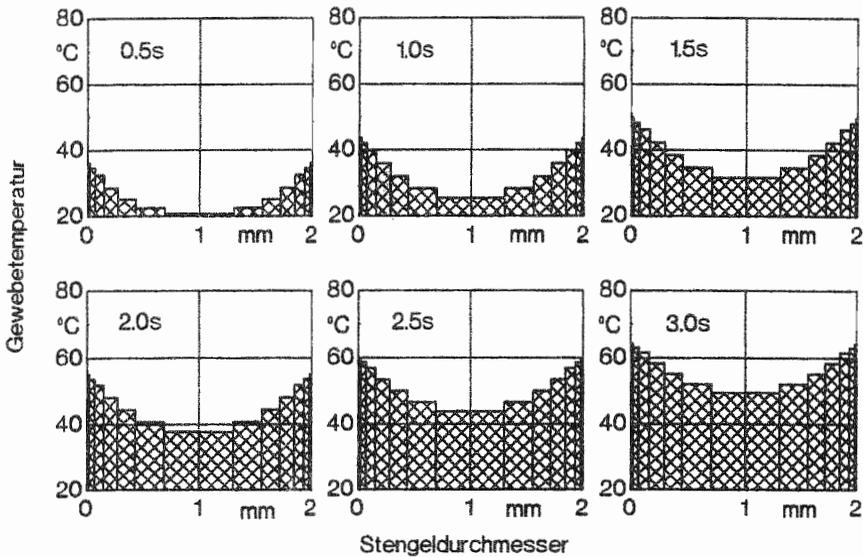


Abb. 16: Temperaturprofil über den Zylinderquerschnitt ($d = 2 \text{ mm}$) der Mungbohne (*Vigna radiata* (L.) var. *radiata*) in Abhängigkeit von der Dauer der Behandlung in einem Heißluftwindtunnel (Simulation: Standarddatensatz "Heißluft", $T_{\text{Luft}} = 250^\circ\text{C}$, $v_{\text{Luft}} = 2.5 \text{ m/s}$)

4.3.3 Diskussion und Schlußfolgerungen für die Modellbildung

Ziel der experimentellen Untersuchungen am Heißluftwindtunnel war die Eingrenzung der zum Abtöten eines Gewebeabschnitts notwendigen Mindesttemperatur. Für den Stengel konnte die dafür notwendige Mindesttemperatur auf einen Wert zwischen 44 °C und 55 °C eingegrenzt werden. In

der Literatur wurden irreversible Gewebeschädigungen durch Temperaturen in einem Bereich zwischen 50 °C und 60 °C nachgewiesen (SULLIVAN et al. 1967, MAYEUX et al. 1968, ELLWANGER et al. 1973, LEVITT 1980). Aufgrund der guten Genauigkeit des Grundmodules und der mikroskopischen Untersuchungen kann damit ein "Zerreißen" der Zellwände durch schlagartig verdampfendes Wasser als notwendige Voraussetzung für eine erfolgreiche Bekämpfung ausgeschlossen werden.

Aufgrund der Versuchsergebnisse und der Literaturangaben wird für eine irreversible Schädigung eines Gewebeabschnitts innerhalb der Modellpflanze ein Erreichen von 60 °C als ausreichend angenommen.

Die Ergebnisse zeigen deutlich, daß für das Abtöten einer Pflanze nicht nur die erreichte Gewebetemperatur, sondern auch die Lage des dafür zu erwärmenden Gewebeabschnittes wichtig ist. In den Versuchen mit der Mungbohne war das am leichtesten zu schädigende Pflanzenorgan das Blatt. Die im Verhältnis zur Masse große Oberfläche und die geringe notwendige Schädigungstiefe führten zu einem sehr schnellen Erreichen der Schädigungstemperatur. Ein Abtöten der Blätter reichte jedoch für ein Abtöten der Gesamtpflanze nicht aus. Bei der untersuchten Mungbohne führte erst eine ausreichende Erwärmung des Randbereiches des Stengels zu einem Absterben der Gesamtpflanze. Eine vollständige Durchwärmung des Stengels war allerdings ebensowenig notwendig, wie ein Abtöten des Vegetationspunktes. Die Mungbohne wird deshalb als thermisch leicht bekämpfbar eingestuft. Bei thermisch schwer bekämpfbaren Pflanzen liegt der zu erwärmende Gewebeabschnitt deutlich tiefer. Eine Erwärmung des Randbereiches der Pflanze führt nicht zum Absterben der Gesamtpflanze.

Im thermodynamischen Grundmodul muß der zu schädigenden Gewebeabschnitt innerhalb der Modellpflanze definiert werden. Die Modellpflanze ist dann erfolgreich bekämpft, wenn während der thermischen Behandlung in der vorher festgelegten Gewebetiefe eine Temperatur von 60 °C erreicht worden ist (notwendige Schädigungstiefe). In allen Modellrechnungen wird der Einfluß der notwendigen Schädigungstiefe über zwei Grenzwerte berücksichtigt:

Thermisch leicht bekämpfbare Pflanzen wurden im Modell mit einer sehr geringen notwendigen Schädigungstiefe (0,05 mm) abgebildet.

Für thermisch schwer bekämpfbare Pflanzen wurde eine Schädigung des gesamten Gewebes der Modellpflanze als Behandlungsziel definiert.

5 Ergebnisse der Modellanwendung

5.1 Einfluß physikalischer Systemparameter des Gasstromes auf die temperaturwirksame Nettowärmestromdichte und die Behandlungsdauer zum Abtöten der Modellpflanze

Mit dem thermodynamischen Grundmodul wurde der Einfluß der physikalischen Systemparameter des wärmeübertragenden Gasstromes auf die notwendige Behandlungsdauer unabhängig vom Gerätekonzept und von der Bestandesdichte der Pflanzen berechnet. Zur Klärung dieser Zusammenhänge wurde der Einfluß der physikalischen Systemparameter **Temperatur**, **Strömungsgeschwindigkeit**, **Emissionsverhältnis** und **Wassergehalt** auf die zum Abtöten notwendige Behandlungsdauer der Modellpflanze für zwei unterschiedliche Schädigungstiefen (0,05 mm, Mitte) berechnet. Die Ergebnisse dienen dazu, prinzipielle Ansätze zur Verkürzung der notwendigen Behandlungsdauer zu erarbeiten und daraus Ansatzpunkte für eine entsprechende Optimierung der Gerätetechnik abzuleiten.

Für die Erklärung der Ergebnisse aus thermodynamischer Sicht ist der Einfluß der untersuchten Systemparameter auf die temperaturwirksame Nettowärmestromdichte in die Modellpflanze von entscheidender Bedeutung. Die temperaturwirksame Nettowärmestromdichte in die Modellpflanze ergibt sich aus der Bilanzierung der Wärmestromdichten der verschiedenen Wärmeübertragungsmechanismen an der Oberfläche der Modellpflanze. Durch die Erwärmung der Oberfläche steigen die Verluste von der Oberfläche an, bis Wärmeeintrag und Wärmeausstrag die gleiche Höhe erreichen. Die Höhe der Gleichgewichtstemperatur stellt die unter den jeweiligen Annahmen maximal mögliche Oberflächentemperatur dar. Der Verlauf der Nettowärmestromdichte und die Lage der Gleichgewichtstemperatur bestimmen wiederum die Wärmestromdichte durch Leitung ins Pflanzeninnere und damit die notwendige Behandlungsdauer zum Erreichen der notwendigen Schädigungstemperatur am Schädigungsort. Der Einfluß der physikalischen Systemparameter auf die temperaturwirksame Nettowärmestromdichte wird in Abhängigkeit von der aktuellen Oberflächentemperatur der Modellpflanze berechnet und dargestellt.

In den folgenden Simulationen wurde der Einfluß der physikalischen Systemparameter auf die zum Abtöten notwendige Behandlungsdauer der Modellpflanze für zwei unterschiedliche Schädigungstiefen (0,05 mm, Mitte) berechnet. Für die Simulationen wurde von einem Standarddatensatz "Gasstrom" (Tab. 6) ausgegangen, und die entsprechenden Systemparameter wurden getrennt voneinander variiert.

Tab. 6: Standarddatensatz "Gasstrom"

Gasstrom (einschließlich Tab. 2)			
Temperatur:	$T_{\text{Gas}} = 600 \text{ °C}$	Wassergehalt:	$x_{\text{Gas}} = 0,1 \text{ kg/kg}$
Strömungsgeschw.:	$v_{\text{Gas}} = 2,5 \text{ m/s}$	Emissionskoeff.:	$\epsilon_{\text{Gas}} = 0,146$
Modellpflanze (einschließlich Tab. 3)			
Durchmesser:	$d_{\text{MP}} = 2,0 \text{ mm}$		
Klima			
Lufttemperatur:	$T_{\text{Luft}} = 20 \text{ °C}$		

5.1.1 Temperatur

Der Einfluß der Gastemperatur auf die Nettowärmestromdichte in eine Modellpflanze in Abhängigkeit von der Oberflächentemperatur wurde für Gastemperaturen von 300 °C, 600 °C, 1200 °C und 1800 °C exemplarisch berechnet (Abb. 17).

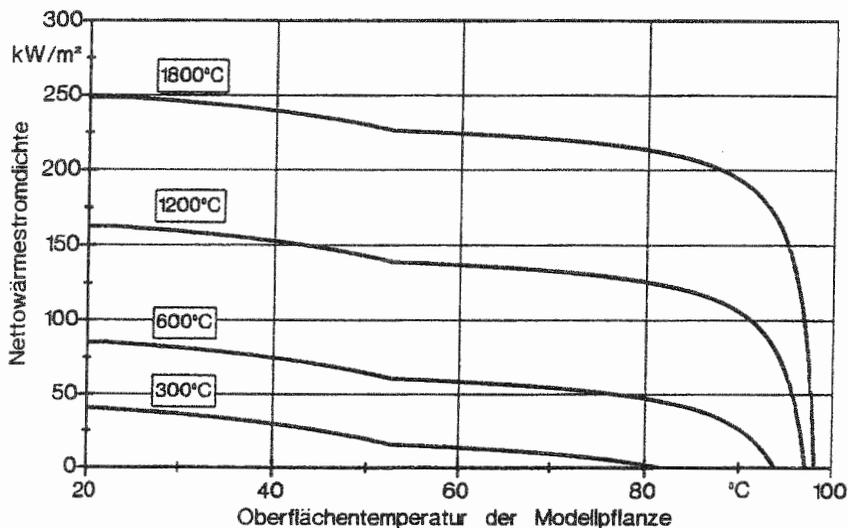


Abb. 17: "Temperaturwirksame" Nettowärmestromdichte in die Oberfläche einer Modellpflanze während der thermischen Behandlung mit einem heißen Gasstrom in Abhängigkeit von der Oberflächentemperatur für verschiedene Gastemperaturen (Simulation: Standarddatensatz "Gasstrom")

Die Nettowärmestromdichte in die Pflanze steigt proportional zur Gastemperatur. Eine Erhöhung der Gastemperatur führt zu einer Erniedrigung der für den konvektiven Wärmeübergangskoeffizienten maßgeblichen Stoffkennwerte der verschiedenen Gaskomponenten und damit zu einer Erniedrigung des konvektiven Wärmeübergangskoeffizienten. Die damit verbundene Verringerung der konvektiven Wärmestromdichte ist aber gegenüber der Erhöhung derselben durch die Erhöhung der Gastemperatur vernachlässigbar gering. Die Gleichgewichtstemperatur nimmt mit steigender Gastemperatur etwas zu. Sie liegt bei einer Gastemperatur von 400 °C bei 90 °C und steigt bei einer Gastemperatur von 1200 °C auf 97 °C an. Dieser Zusammenhang erklärt sich aus der Tatsache, daß hier die zur Erreichung des Gleichgewichts notwendige Erhöhung der Verdunstungswärmestromdichte über eine Erhöhung der Oberflächentemperatur stattfindet. Die Taupunkttemperatur, kenntlich durch den "Knick" in der Funktion der Nettowärmestromdichte, wird von der

Gastemperatur nicht beeinflußt.

Für die notwendige Behandlungsdauer zum Erreichen von 60 °C Gewebetemperatur in 0,05 mm Tiefe bzw. im gesamten Gewebe der Modellpflanze in Abhängigkeit von der Gastemperatur ergab sich folgender Zusammenhang (Abb. 18).

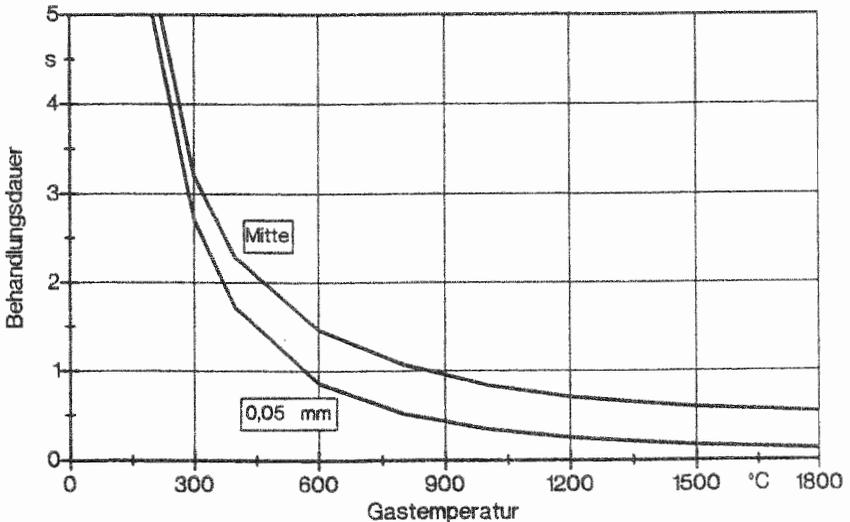


Abb. 18: Behandlungsdauer zum Abtöten einer Modellpflanze mit einem heißen Gasstrom in Abhängigkeit von der Gastemperatur für zwei verschiedene Schädigungstiefen (Simulation: Standarddatensatz "Gasstrom")

Mit steigender Gastemperatur nimmt die notwendige Behandlungsdauer zum Erreichen von 60 °C Gewebetemperatur ab. Am Rand wird die kritische Temperatur von 60 °C deutlich früher als in der Pflanzenmitte erreicht. Bei einer sehr niedrigen Gastemperatur von 200 °C und einer geringen Schädigungstiefe von 0,05 mm beträgt die notwendige Behandlungsdauer 3,4 s, für die Schädigung des gesamten Gewebes der Modellpflanze 4,4 s. Bei einer sehr hohen Gastemperatur von 1600 °C verringert sich die notwendige Behandlungsdauer für eine Schädigungstiefe von 0,05 mm auf 0,1 s, für eine Schädigung des gesamten Gewebes der Modellpflanze auf 0,6 s. Mit zunehmender Gastemperatur wird der Unterschied der notwendigen Behandlungsdauer zwischen der geringen und einer hohen Schädigungstiefe deutlich größer.

5.1.2 Strömungsgeschwindigkeit

Der Einfluß der Strömungsgeschwindigkeit der Abgase auf die Nettowärmestromdichte in eine Modellpflanze in Abhängigkeit von der Oberflächentemperatur wurde für Strömungsgeschwindigkeiten von 0,5 m/s, 2,0 m/s, 6,0 m/s und 20 m/s exemplarisch berechnet (Abb. 19).

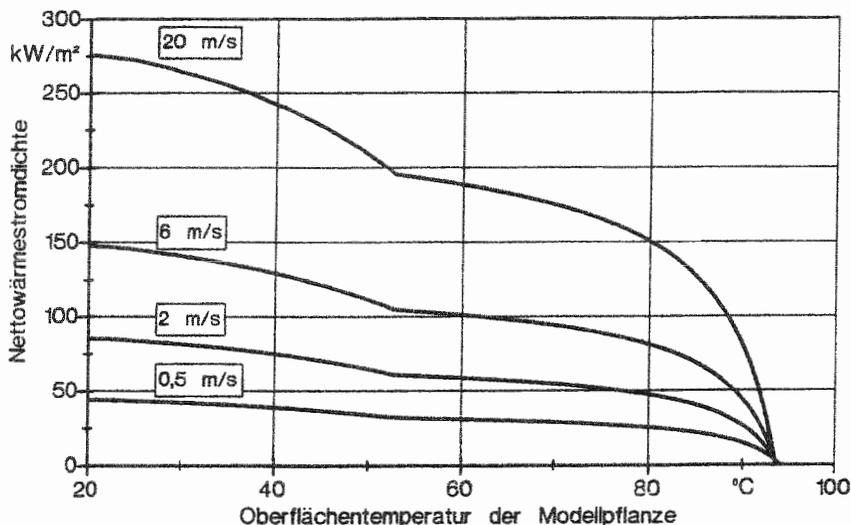


Abb. 19: "Temperaturwirksame" Nettowärmestromdichte in die Oberfläche der Modellpflanze während der thermischen Behandlung mit einem heißen Gasstrom in Abhängigkeit von der Oberflächentemperatur für verschiedene Strömungsgeschwindigkeiten (Simulation: Standarddatensatz "Gasstrom")

Die Nettowärmestromdichte in die Pflanzenoberfläche nimmt mit steigender Strömungsgeschwindigkeit zu. Eine Erhöhung der Strömungsgeschwindigkeit führt zu einer Erhöhung des konvektiven Wärmeübergangskoeffizienten und damit zu einer Erhöhung der konvektiven Wärmestromdichte. Die Gleichgewichtstemperatur wird durch die Strömungsgeschwindigkeit des Gases nicht beeinflusst, da der konvektive Wärmeübergangskoeffizient sowohl die konvektive Wärmestromdichte, als auch die Verdunstungswärmestromdichte direkt proportional beeinflusst und die Strahlungstromdichte von der Strömungsgeschwindigkeit des Gases nicht verändert wird. Die Taupunkttemperatur, kennzeichnend durch den "Knick" in der Funktion der Nettowärmestromdichte, wird von der Strömungsgeschwindigkeit des Gases ebenfalls nicht beeinflusst.

Für die notwendige Behandlungsdauer zum Erreichen von 60 °C Gewebetemperatur in 0,05 mm Gewebetiefe bzw. im gesamten Gewebe der Modellpflanze in Abhängigkeit von der Gastemperatur ergab sich folgender Zusammenhang (Abb. 20).

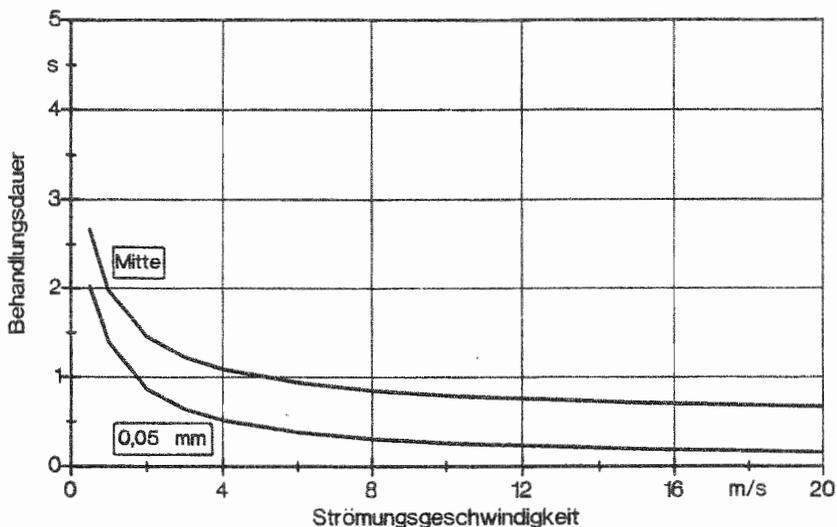


Abb. 20: Behandlungsdauer zum Abtöten einer Modellpflanze mit einem heißen Gasstrom in Abhängigkeit von der Strömungsgeschwindigkeit des Gases für zwei verschiedene Schädigungstiefen (Simulation: Standarddatensatz "Gasstrom")

Mit steigender Strömungsgeschwindigkeit des Gases nimmt die notwendige Behandlungsdauer zum Erreichen von 60 °C Gewebetemperatur ab. An Rand wird die kritische Temperatur von 60 °C deutlich früher als in der Pflanzenmitte erreicht. Bei einer sehr niedrigen Strömungsgeschwindigkeit von 0,5 m/s und einer geringen Schädigungstiefe von 0,05 mm beträgt die notwendige Behandlungsdauer 1,7 s, für die Schädigung des gesamten Gewebes der Modellpflanze 2,6 s. Bei einer sehr hohen Strömungsgeschwindigkeit von 9 m/s verringert sich die notwendige Behandlungsdauer für eine Schädigungstiefe von 0,05 mm auf 0,2 s, für eine Schädigung des gesamten Gewebes der Modellpflanze auf 0,8 s. Mit zunehmender Strömungsgeschwindigkeit des Gases wird der Unterschied der notwendigen Behandlungsdauer zwischen der geringen und einer hohen Schädigungstiefe deutlich größer.

5.1.3 Emissionsverhältnis

Der Einfluß des Emissionsverhältnisses des Gaskörpers auf die Nettowärmestromdichte in eine Modellpflanze in Abhängigkeit von der Oberflächentemperatur wurde für Emissionsverhältnisse von 0,1, 0,6, und 1,0 exemplarisch berechnet (Abb. 21).

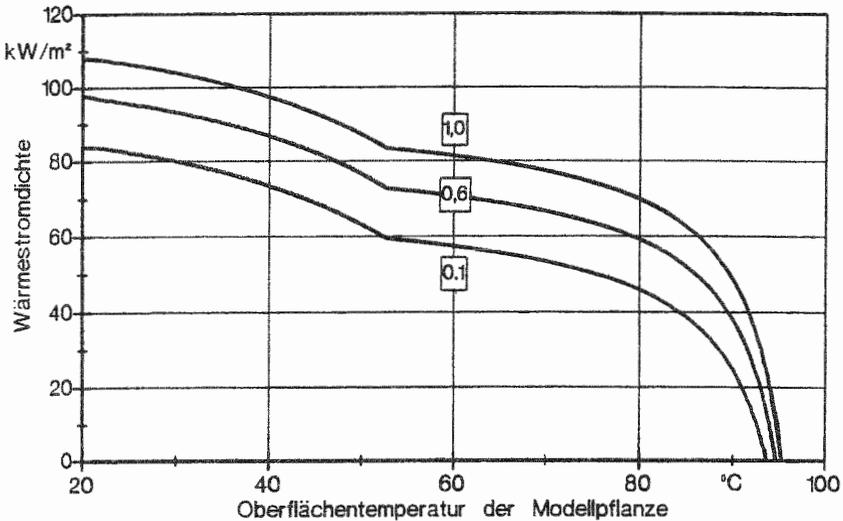


Abb. 21: "Temperaturwirksame" Nettowärmestromdichte in die Oberfläche einer Modellpflanze während der thermischen Behandlung mit einem heißen Gasstrom in Abhängigkeit von der Oberflächentemperatur für unterschiedliche Emissionsverhältnis des Gaskörpers (Simulation; Standarddatensatz "Gasstrom")

Die Nettowärmestromdichte in die Pflanzenoberfläche nimmt mit steigendem Emissionsvermögen des Gaskörpers zu. Eine Erhöhung des Emissionsvermögens führt zu einer Erhöhung der Strahlungsstromdichte. Die Gleichgewichtstemperatur nimmt mit steigender Strahlungsstromdichte ebenfalls zu. Die zur Erreichung des Gleichgewichts notwendige Erhöhung der Verdunstungswärmestromdichte findet hier über eine Erhöhung der Oberflächentemperatur statt. Die Taupunkttemperatur, kenntlich durch den "Knick" in der Funktion der Nettowärmestromdichte, wird vom Emissionsvermögen des Gaskörpers nicht beeinflusst.

Für die notwendige Behandlungsdauer zum Erreichen von 60 °C Gewebetemperatur in 0,05 mm Gewebetiefe bzw. im gesamten Gewebe der Modellpflanze in Abhängigkeit vom Emissionsverhältnis

des Gaskörpers ergab sich folgender Zusammenhang (Abb. 22).

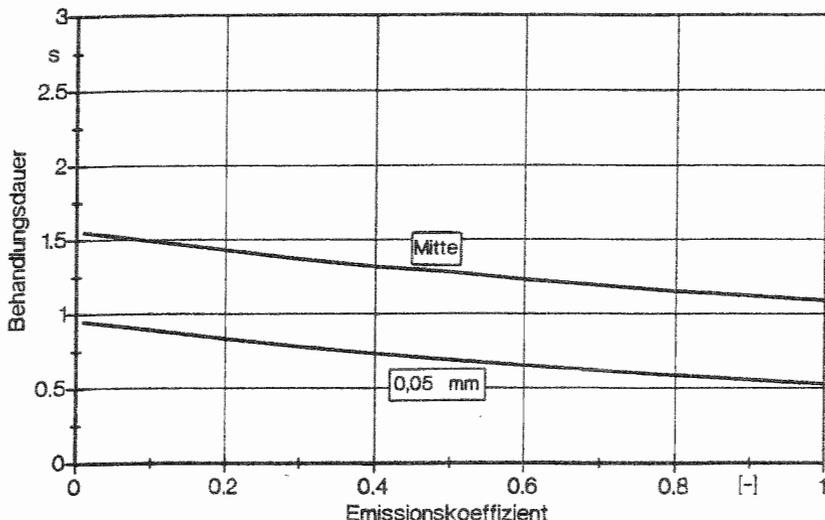


Abb. 22: Behandlungsdauer zum Abtöten einer Modellpflanze in einem heißen Gasstrom in Abhängigkeit vom Emissionsverhältnis des Gaskörpers für zwei verschiedene Schädigungstiefen (Simulation: Standarddatensatz "Gasstrom")

Mit steigendem Emissionsverhältnis des Gaskörpers nimmt die notwendige Behandlungsdauer zum Erreichen von 60 °C Gewebetemperatur ab. Am Rand wird die kritische Temperatur von 60 °C deutlich früher als in der Pflanzenmitte erreicht. Bei einem sehr niedrigen Emissionsverhältnis von 0,05 und einer geringen Schädigungstiefe von 0,05 mm beträgt die notwendige Behandlungsdauer 1,7 s. für die Schädigung des gesamten Gewebes der Modellpflanze 2,6 s. Bei einem maximalen Emissionsverhältnis von 1 verringert sich die notwendige Behandlungsdauer für eine Schädigungstiefe von 0,05 mm auf 0,2 s, für die Schädigung des gesamten Gewebes der Modellpflanze auf 0,8 s. Mit zunehmendem Emissionsverhältnis des Gaskörpers wird der Unterschied der notwendigen Behandlungsdauer zwischen der geringen und einer hohen Schädigungstiefe nur leicht größer.

Bei der für die Berechnungen gewählten Gastemperatur von 600 °C überwiegt der konvektive Wärmeeintrag deutlich gegenüber dem Wärmeeintrag durch Strahlung. Eine Erhöhung der Strahlungsstromdichte durch eine Anhebung des Emissionsverhältnisses führt bei dieser Temperatur nur zu einer vergleichsweise geringen Erhöhung der Nettowärmestromdichte in die Oberfläche. Bei

höheren Gastemperaturen könnte eine Anhebung des Emissionsverhältnisses zu einer weitaus deutlicheren Erhöhung der temperaturwirksamen Nettowärmestromdichte und zu einer deutlicheren Verkürzung der notwendigen Behandlungsdauer führen.

5.1.4 Wassergehalt

Der Einfluß des Wassergehaltes des Gases auf die Nettowärmestromdichte in eine Modellpflanze in Abhängigkeit von der Oberflächentemperatur wurde für Wassergehalte von 0,1 kg/kg, 1,0 kg/kg, 2,5 kg/kg und 5,0 kg/kg exemplarisch berechnet (Abb. 23).

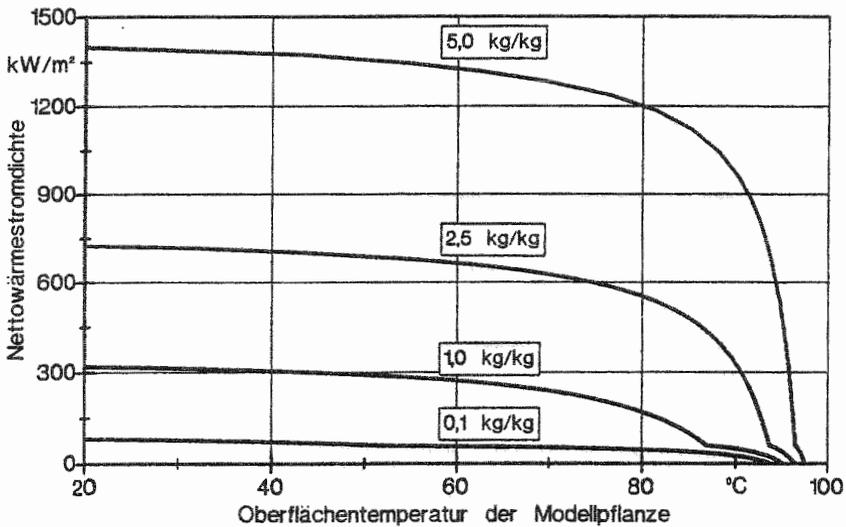


Abb. 23: "Temperaturwirksame" Nettowärmestromdichte in die Oberfläche einer Modellpflanze während der thermischen Behandlung mit einem heißen Gasstrom in Abhängigkeit von der Oberflächentemperatur für verschiedene Wassergehalte im Gas (Simulation: Standarddatensatz "Gasstrom")

Die Nettowärmestromdichte in die Oberfläche der Modellpflanze nimmt mit steigendem Wassergehalt des Gases zu. Eine Erhöhung des Wassergehaltes führt zu einer Erhöhung der Wärmestromdichte der Kondensation. Die Taupunkttemperatur, kenntlich durch den "Knick" in der Funktion der Nettowärmestromdichte, nimmt mit steigendem Wassergehalt der Gase ebenfalls zu. Die Gleichgewichtstemperatur verändert sich aber mit steigender absoluter Feuchte der Abgase

kaum. Dies erklärt sich aus der Tatsache, daß bei diesen Oberflächentemperaturen die Erniedrigung der Wärmestromdichte der Verdunstung durch die Erhöhung der absoluten Feuchte bereits durch eine minimale Erhöhung der Oberflächentemperatur ausgeglichen wird.

Für die notwendige Behandlungsdauer zum Erreichen von 60 °C Gewebetemperatur in 0,05 mm Gewebetiefe bzw. im gesamten Gewebe der Modellpflanze in Abhängigkeit vom Wassergehalt des Gases ergab sich folgender Zusammenhang (Abb. 24).

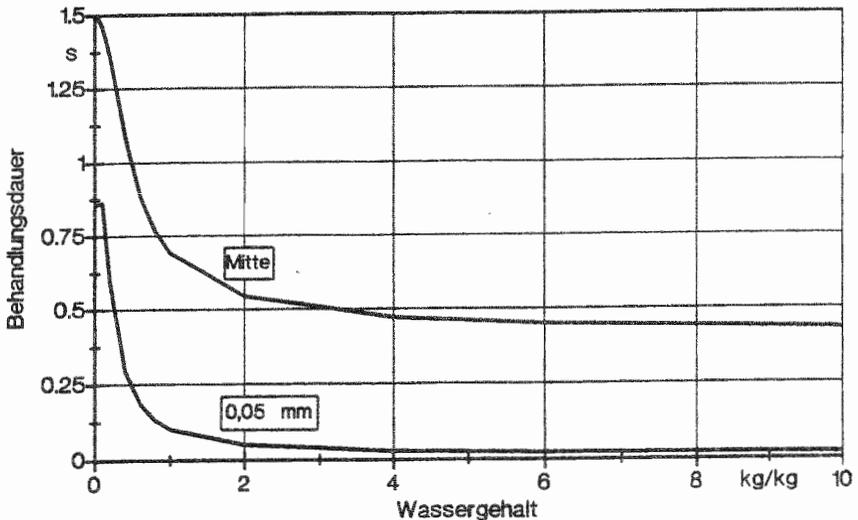


Abb. 24: Behandlungsdauer zum Abtöten einer Modellpflanze mit einem heißen Gasstrom in Abhängigkeit vom Wassergehalt im Gas für zwei verschiedene Schädigungstiefen (Simulation: Standarddatensatz "Gasstrom")

Mit steigendem Wassergehalt des Gases nimmt die notwendige Behandlungsdauer zum Erreichen von 60 °C Gewebetemperatur ab. Am Rand wird die kritische Temperatur von 60 °C deutlich früher als in der Pflanzenmitte erreicht. Bei einem niedrigen Wassergehalt von 0,1 kg/kg beträgt die notwendige Behandlungsdauer für eine Schädigungstiefe von 0,05 mm 1,7 s, für eine Schädigung des gesamten Gewebes der Modellpflanze 2,6 s. Die Behandlungsdauer verringert sich bei einer Erhöhung des Wassergehaltes auf 10 kg/kg für eine Schädigungstiefe von 0,05 mm auf 0,03 s, für eine Schädigung des gesamten Gewebes der Modellpflanze auf 0,4 s. Mit zunehmendem Wassergehalt des Gases wird der Unterschied der notwendigen Behandlungsdauer zwischen der geringen und einer hohen Schädigungstiefe deutlich größer. Ab einem Wassergehalt von etwa

2 kg/kg führt eine weitere Erhöhung des Wassergehaltes nur noch zu einer geringfügigen Verkürzung der Behandlungsdauer.

5.2 Einflußfaktoren auf die optimale Fahrgeschwindigkeit und den flächenbezogenen Gaseinsatz zum Abtöten eines Modellpflanzenbestandes

Ziel einer thermischen Behandlung ist das Abtöten des Unkrautbestandes in einem Arbeitsgang. Ziel der Optimierung der thermischen Unkrautbekämpfung ist die sichere Erwärmung eines lebenswichtigen Teiles der zu bekämpfenden Pflanze auf 60°C auch bei höheren Fahrgeschwindigkeiten bei gleichzeitiger Minimierung des dafür notwendigen Gesamtenergieeinsatzes. Der für den Energieeintrag und die notwendigen Leitungsvorgänge zur Verfügung stehende Zeitraum wird durch die Fahrgeschwindigkeit und die "wirksame" Gerätelänge definiert. Die tatsächlich notwendige Behandlungsdauer kann durch eine Erhöhung der Nettowärmestromdichte vom heißen Gasstrom in die Pflanzen verkürzt werden. Die bisherigen Ergebnisse zeigen, daß eine deutliche Verringerung der Behandlungsdauer geräteseitig durch eine Erhöhung der physikalischen Einflußfaktoren Temperatur, Strömungsgeschwindigkeit, Wassergehalt des wärmeübertragenden Gasstromes möglich ist. Diese Systemparameter können für das Gerätekonzept "Abflammen" durch verschiedene konstruktive Maßnahmen beeinflußt werden.

In den Untersuchungen zur "Speed (Dose)/Response" erfolgte die Variierung des flächenbezogenen Gaseinsatzes in erster Linie durch die Veränderung der Fahrgeschwindigkeit (ASCARD 1989, 1995). Für die Bekämpfung eines definierten Pflanzenbestandes mit einem definierten Gerät wurde so eine optimale Fahrgeschwindigkeit und ein entsprechender flächenbezogener Gaseinsatz ermittelt. In den folgenden Simulationen wurde diese Methodik durch die Berechnung der optimalen Fahrgeschwindigkeit für ein definiertes Gerät zur Erreichung einer definierten Schädigungstiefe in einem definierten Modellpflanzenbestand abgebildet. Aus der optimalen Fahrgeschwindigkeit und dem Gaseinsatz am Brenner wurde dann der entsprechende flächenbezogene Gaseinsatz errechnet.

Die optimale Fahrgeschwindigkeit und der flächenbezogene Gaseinsatz werden von der eingesetzten Gerätetechnik, vom Unkrautbestand, von Klimafaktoren und Bodenparametern beeinflußt (Kap. 4.1). Der Einfluß der Oberflächenrauigkeit des Bodens konnte im thermodynamischen Modell nicht abgebildet werden.

In den Simulationen zum Einfluß der **Gerätetechnik** wurden folgende Einflußfaktoren untersucht:

- Luftüberschuß der Verbrennung (Brennerart)
- Gasdurchsatz am Brenner (Brennerleistung)
- Emissionsverhältnis des Gaskörpers
- Höhe und Länge der Abdeckung
- Wärmedurchgangskoeffizient der Abdeckung (Isolierung)

In den Simulationen zum Einfluß der **Pflanzen** wurden folgende Einflußfaktoren untersucht:

- Schädigungstiefe
- Größe
- Bestandsdichte

In den Simulationen zum Einfluß von **Klimafaktoren** wurde folgender Einflußfaktor untersucht:

- Gewebeausgangstemperatur

Für die Berechnungen wurde der Standarddatensatz "Abflammen" (Tab. 5) zugrunde gelegt.

Tab. 7: Standarddatensatz "Abflammen"

Gerät (einschließlich Tab. 2)			
Brennerdurchsatz:	$m_{\text{BRENNER}} = 12$ kg/h m	Abdeckung:	$h_{\text{Abd.}} = 15$ cm
Luftüberschuß:	$n_{\text{Luft}} = 1,3$		$l_{\text{Abd.}} = 1,5$ m
Maximaltemperatur:	$T_{\text{Gas}} = 1405$ °C		$b_{\text{Abd.}} = 1,0$ m
Arbeitsrichtung:	rückwärts		$k_{\text{Abd.}} = 1$ W/m ² K
Modellpflanzen (einschließlich Tab. 3)			
Durchmesser:	$d_{\text{MP}} = 2$ mm	Bestandsdichte:	$B_{\text{MP}} = 0,5$ kg/m ²
Klima			
Lufttemperatur:	$T_{\text{Luft}} = 20$ °C		
Boden (siehe Tab. 4)			

5.2.1 Gerätetechnik

5.2.1.1 Luftüberschuß der Verbrennung

Über die Verringerung des **Luftüberschusses der Verbrennung** kann bei gegebenem Brennstoff die maximale Gastemperatur erhöht werden. Durch den Einsatz von Gebläsebrennern wäre ein optimaler Luftüberschuß nahe bei einem Wert von 1 einstellbar. Der tatsächliche Luftüberschuß der Verbrennung ist für die bisher verwendeten atmosphärischen Brenner nicht bekannt. Im Standarddatensatz "Abflammen" wurde von einem Luftüberschuß von 1,3 ausgegangen. Mit Hilfe des thermodynamischen Modells wurde der Einfluß des Luftüberschusses der Verbrennung auf die optimale Fahrgeschwindigkeit und den entsprechenden flächenbezogenen Gaseinsatz für das thermische Abtöten eines Modellpflanzenbestandes mit dem Gerätekonzept "Abflammen" für zwei verschiedene Schädigungstiefen in den Modellpflanzen berechnet. Dafür wurde der Luftüberschuß der Verbrennung in dem für Flüssiggas technisch möglichen Bereich von 1 bis 1,75 variiert (Abb. 25).

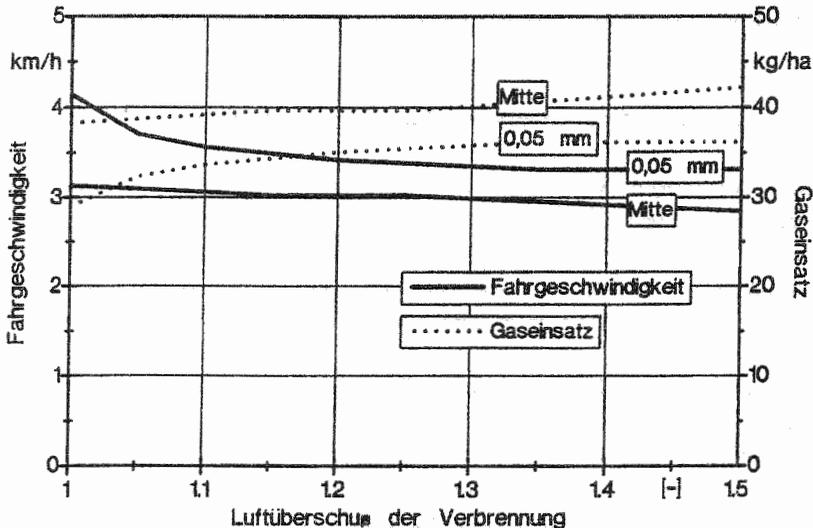


Abb. 25: Optimale Fahrgeschwindigkeit und flächenbezogener Gaseinsatz für das Abtöten eines Modellpflanzenbestandes mit dem Gerätekonzept "Abflammen" in Abhängigkeit vom Luftüberschuß der Verbrennung für zwei verschiedene Schädigungstiefen in den Modellpflanzen (Simulation: Standarddatensatz "Abflammen")

Mit abnehmenden Luftüberschuß der Verbrennung nimmt die optimale Fahrgeschwindigkeit nur leicht zu. Eine Verringerung des Luftüberschusses der Verbrennung von 1,3 auf 1,0 erhöht die optimale Fahrgeschwindigkeit für eine Schädigungstiefe von 0,05 mm um 24 %, für eine Schädigung des gesamten Gewebes der Modellpflanze um 5 %. Der flächenbezogene Gaseinsatz verringert sich dementsprechend.

Eine Verringerung des Luftüberschusses der Verbrennung von 1,3 auf 1,0 führt im Modell zu einer Erhöhung der maximalen Gastemperatur von 1405 °C auf 1820 °C. Die Erhöhung der Nettowärmestromdichte durch diese Temperaturerhöhung kann bei einer geringen angestrebten Schädigungstiefe von 0,05 mm zu einem großen Teil in eine entsprechende Erhöhung der optimalen Fahrgeschwindigkeit umgesetzt werden. Hier spielen Leitungsvorgänge im Pflanzengewebe nur eine untergeordnete Rolle. Mit zunehmender notwendiger Schädigungstiefe gewinnen Höhe und Verlauf der Wärmestromdichte durch Leitung an Bedeutung. Die Erhöhung der Nettowärmestromdichte in die Pflanzenoberfläche führt zu einer schnelleren Erwärmung der Randschicht und zu einer etwas höheren Gleichgewichtstemperatur. Eine Erhöhung der maximalen Verbrennungstemperatur durch eine Verringerung des Luftüberschusses der Verbrennung kann damit nur zu einem geringen Teil in eine entsprechende Erhöhung der optimalen Fahrgeschwindigkeit umgesetzt werden.

5.2.1.2 Gasdurchsatz am Brenner und Flammenaustrittsrichtung

Über ein Erhöhung des **Gasdurchsatzes am Brenner** kann bei gegebener Querschnittsfläche der Abdeckung der Gasvolumenstrom erhöht werden. Bei einem Flammenaustritt in Arbeitsrichtung erhöht sich dadurch die Strömungsgeschwindigkeit der Abgase relativ zu den Pflanzen, zur Abdeckung und zum Boden. Die damit verbundene Erhöhung des konvektiven Wärmeübergangskoeffizienten führt zu einer Erhöhung der jeweiligen konvektiven Wärmestromdichte.

Die **Flammenaustrittsrichtung** beeinflusst die Strömungsgeschwindigkeit der Abgase relativ zu den Pflanzen und zum Boden. Erfolgt der Flammenaustritt gegen die Arbeitsrichtung, errechnet sich die Strömungsgeschwindigkeit relativ zu den Pflanzen und zum Boden aus der Strömungsgeschwindigkeit der Abgase abzüglich der Fahrgeschwindigkeit. Bei einem Flammenaustritt in Arbeitsrichtung ergibt sich die relative Strömungsgeschwindigkeit aus der Summe der Strömungsgeschwindigkeit der Abgase und der Fahrgeschwindigkeit.

Mit Hilfe des thermodynamischen Modells wurde der Einfluß des Gasdurchsatzes am Brenner und der Flammenaustrittsrichtung auf die optimale Fahrgeschwindigkeit und den flächenbezogenen Gaseinsatz für das thermische Abtöten eines Modellpflanzenbestandes mit dem Gerätekonzept

"Abflammen" für zwei verschiedene Schädigungstiefen in den Modellpflanzen berechnet. Dafür wurde der Gasdurchsatz am Brenner in einem Bereich von 10 kg/h m bis 40 kg/h m variiert (Abb. 26, Abb. 27).

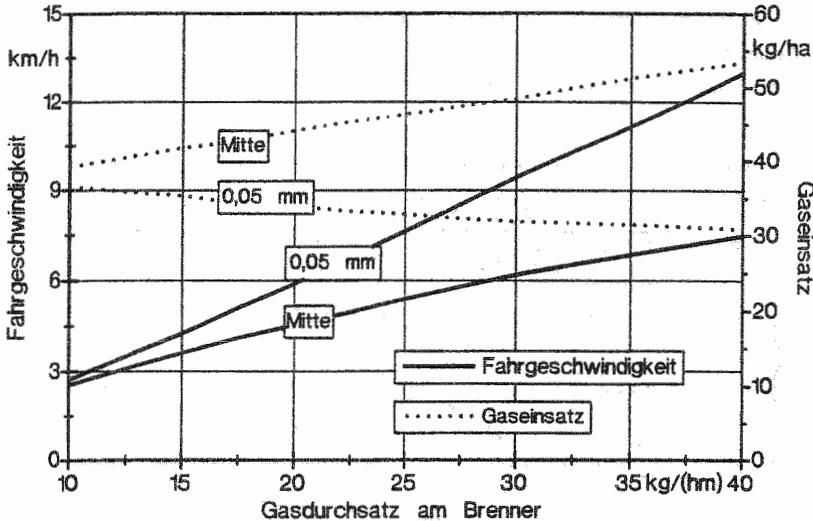


Abb. 26: Optimale Fahrgeschwindigkeit und flächenbezogener Gaseinsatz für das Abtöten eines Modellpflanzenbestandes mit dem Gerätekonzept "Abflammen" in Abhängigkeit vom Gasdurchsatz am Brenner für zwei verschiedene Schädigungstiefen in den Modellpflanzen (Simulation: Standarddatensatz "Abflammen", Flammenaustritt rückwärts)

Mit zunehmendem Gasdurchsatz am Brenner und einem rückwärts gerichteten Flammenaustritt steigt die optimale Fahrgeschwindigkeit deutlich an. Eine Verdoppelung des Gasdurchsatzes von 12 kg/h m (Standarddatensatz) auf 24 kg/h m erhöht die optimale Fahrgeschwindigkeit für eine geringe Schädigungstiefe von 0,05 mm um 103 %. für eine Schädigung des gesamten Gewebes der Modellpflanze um 75 %. Der flächenbezogene Gaseinsatz verhält sich mit steigendem Gasdurchsatz am Brenner in Abhängigkeit von der Schädigungstiefe unterschiedlich. Für eine geringe Schädigungstiefe von 0,05 mm nimmt der notwendige Gaseinsatz von 35,7 kg/ha bei 12 kg/h m um 4,8 % auf 34,0 kg/ha für 24 kg/h m ab. Für die Schädigung des gesamten Gewebes der Modellpflanze erhöht sich der Gaseinsatz von 40,0 kg/ha bei 12 kg/h m um 36 % auf 54,3 kg/ha.

Mit zunehmendem Gasdurchsatz am Brenner und einem vorwärts gerichteten Flammenaustritt steigt die optimale Fahrgeschwindigkeit ebenfalls deutlich an. Eine Verdoppelung des Gasdurchsatzes von

12 kg/h m (Standarddatensatz) auf 24 kg/h m erhöht die optimale Fahrgeschwindigkeit für eine geringe Schädigungstiefe von 0,05 mm um 156 %, für eine Schädigung des gesamten Gewebes der Modellpflanze aber nur um 65 %. Der flächenbezogene Gaseinsatz verhält sich mit steigendem Gasdurchsatz am Brenner in Abhängigkeit von der unterschiedlich. Für eine geringe Schädigungstiefe von 0,05 mm nimmt der notwendige Gaseinsatz von 30,0 kg/ha bei 12 kg/h m um 50 % auf 15,0 kg/ha für 24 kg/h m ab. Für die Schädigung des gesamten Gewebes der Modellpflanze erhöht sich der Gaseinsatz von 36,2 kg/ha bei 12 kg/h m um 21 % auf 43,8 kg/ha.

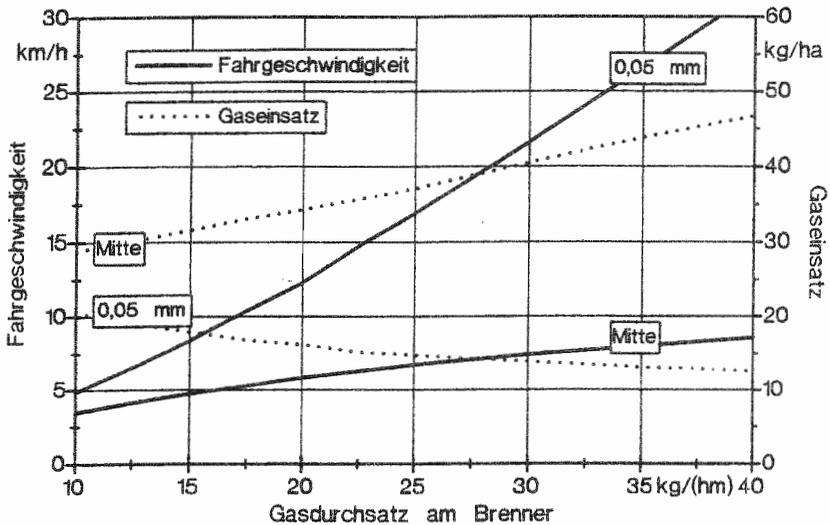


Abb. 27: Optimale Fahrgeschwindigkeit und flächenbezogener Gaseinsatz für das Abtöten eines Modellpflanzenbestandes mit dem Gerätekonzept "Abflammen" in Abhängigkeit vom Gasdurchsatz des Brenners für zwei verschiedene Schädigungstiefen in den Modellpflanzen (Simulation: Standarddatensatz "Abflammen", Flammenausritt vorwärts)

Vergleicht man den Flammenausritt gegen die Fahrtrichtung mit dem Flammenausritt in Fahrtrichtung, so erlaubt der Flammenausritt in Fahrtrichtung durchweg höhere Fahrgeschwindigkeiten und geringere flächenbezogene Gaseinsätze. Bei einem Gasdurchsatz am Brenner von 12 kg/h m und einer geringen Schädigungstiefe von 0,05 mm erhöht sich die optimale Fahrgeschwindigkeit um 54 % von 3,4 km/h auf 6,3 km/h, bei einer Schädigung des gesamten Gewebes der Modellpflanze um 33 % von 3,0 km/h auf 4,0 km/h. Bei einem doppelten Gasdurchsatz am Brenner von 24 kg/h m und einer geringen Schädigungstiefe von 0,05 mm erhöht sich die optimale Fahrgeschwindigkeit um 119 % von 7,3 km/h auf 16,0 km/h, bei einer Schädigung des gesamten Gewebes der Modellpflanze

um 25 % von 5,3 km/h auf 6,6 km/h. Der flächenbezogene Gaseinsatz verringert sich entsprechend.

5.2.1.3 Emissionsvermögen des Gaskörpers

Eine Erhöhung der Strahlungsstromdichte während einer thermischen Behandlung mit dem Gerätekonzept "Abflammen" ist bei gegebenem Brennstoff und gegebener maximaler Verbrennungstemperatur über eine Erhöhung des **Emissionsvermögens des Gaskörpers** möglich. Technisch wäre dies durch Einblasen kleinster Staubteilchen, oder durch Beimischung anderer Brennstoffe mit höherem Emissionsvermögen (Diesel, Rapsöl) bei der Verbrennung möglich.

Mit Hilfe des thermodynamischen Modells wurde der Einfluß des Emissionsvermögens des Gaskörpers auf die optimale Fahrgeschwindigkeit und den flächenbezogenen Gaseinsatz für das thermische Abtöten eines Modellpflanzenbestandes mit dem Gerätekonzept "Abflammen" für zwei verschiedene Schädigungstiefen in den Modellpflanzen berechnet. Dafür wurde das Emissionsverhältnis des Gaskörpers schrittweise erhöht (Abb. 28). Die maximale Erhöhung um einen Wert von 0,5 führt zu einem maximalen Emissionsverhältnis des Gaskörpers von 0,72 ($T_{\text{Gas}} = 400 \text{ K}$). Dieser Wert liegt im Bereich einer "leuchtenden" Flamme (VDI 1984).

Die Erhöhung des Emissionsvermögens des Gaskörpers beeinflusst die optimale Fahrgeschwindigkeit nur sehr wenig. Eine maximale Erhöhung des Emissionsverhältnisses des Gaskörpers um 0,5 erhöht die optimale Fahrgeschwindigkeit für eine Schädigungstiefe von 0,05 mm um 6 %. Für eine Schädigung des gesamten Gewebes der Modellpflanze verringert sich dagegen die optimale Fahrgeschwindigkeit um 3 %. Der flächenbezogene Gaseinsatz verhält sich dementsprechend.

Die Erhöhung des Emissionsverhältnisses hat in der ersten Phase der thermischen Behandlung eine Erhöhung der Strahlungswärmestromdichte und damit eine Erhöhung der Nettowärmestromdichte zur Folge. Der Gasstrom gibt in dieser Phase einen Großteil seines Energieinhalts in die Pflanzenoberfläche und in den Boden ab. Der Randbereich der Modellpflanze erwärmt sich dementsprechend etwas schneller. Selbst für eine geringe Schädigungstiefe von 0,05 mm führt die damit verbundene Erhöhung der Nettowärmestromdichte aber nur zu einer minimalen Erhöhung der optimalen Fahrgeschwindigkeit. Im weiteren Verlauf der Behandlung fällt die Nettowärmestromdichte so stark ab, daß sich in der Gesamtbilanz sogar eine leichte Verringerung der optimalen Fahrgeschwindigkeit für eine Schädigung des gesamten zylindrischen Pflanzenkörpers ergibt. Insgesamt führt eine Erhöhung des Emissionsverhältnisses durchweg zu einer Verringerung der Abluftverluste. Dieser Zusammenhang ist auf einen höheren Wärmeeintrag in den Boden zurückzuführen.

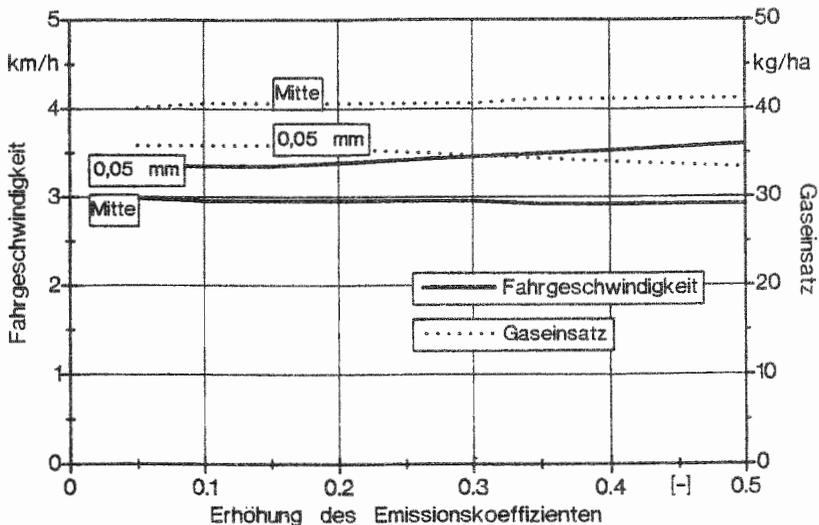


Abb. 28: Optimale Fahrgeschwindigkeit und flächenbezogener Gaseinsatz für das Abtöten eines Modellpflanzenbestandes mit dem Gerätekonzept "Abflammen" in Abhängigkeit vom Emissionsverhältnis des Gaskörpers für zwei verschiedene Schädigungstiefen in den Modellpflanzen (Simulation: Standarddatensatz "Abflammen")

5.2.1.4 Höhe der Abdeckung

Eine Verringerung der **Abdeckungshöhe** hat eine Verkleinerung der entsprechenden Querschnittsfläche zur Folge. Damit verändert sich bei gleichbleibendem Gasdurchsatz am Brenner die Strömungsgeschwindigkeit des Gases relativ zu den Pflanzen und zum Boden. Dies führt zu einer Veränderung der entsprechenden konvektiven Wärmestromdichten.

Eine **Abflachung** der Abdeckung zum Ende hin drückt den wärmeübertragenden Gasstrom entgegen dem thermischen Auftrieb zum Boden und damit zu den Pflanzen. Darüber hinaus beeinflusst diese Abflachung die Strömungsgeschwindigkeit des Gases.

Mit Hilfe des thermodynamischen Modells wurde der Einfluß der Abdeckungshöhe und der Einfluß der Abflachung auf die optimale Fahrgeschwindigkeit und den flächenbezogenen Gaseinsatz für das thermische Abtöten eines Modellpflanzenbestandes mit dem Gerätekonzept "Abflammen" für zwei

verschiedene Schädigungstiefen in den Modellpflanzen getrennt voneinander berechnet. Für die Berechnung des Einflusses der Höhe der Abdeckung wurde die Höhe der Abdeckung von 5 cm bis 25 cm variiert (Abb. 29).

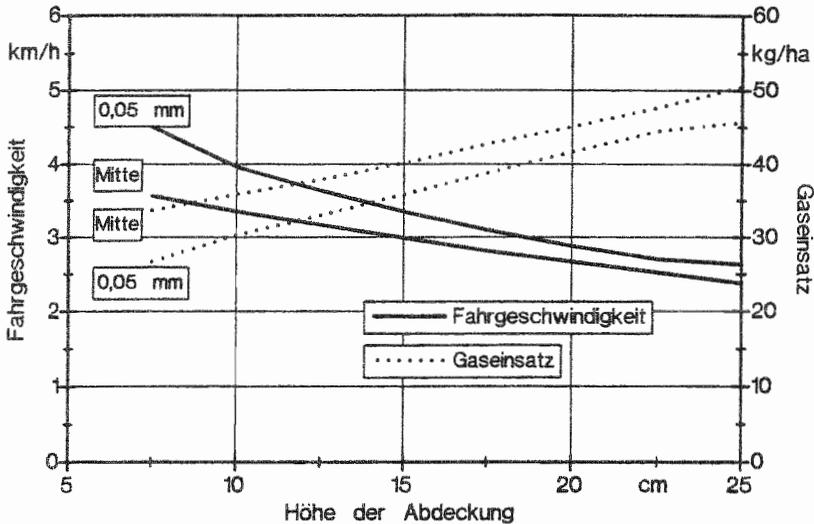


Abb. 29: Optimale Fahrgeschwindigkeit und flächenbezogener Gaseinsatz für das Abtöten eines Modellpflanzenbestandes mit dem Gerätekonzept "Abflammen" in Abhängigkeit von der Höhe der Abdeckung für zwei verschiedene Schädigungstiefen in den Modellpflanzen (Simulation: Standarddatensatz "Abflammen")

Die Höhe der Abdeckung beeinflusste die optimale Fahrgeschwindigkeit und den Gaseinsatz erheblich. Mit abnehmender Höhe der Abdeckung nahm die optimale Fahrgeschwindigkeit zu. Eine Halbierung der Abdeckungshöhe von 15 cm (Standarddatensatz) auf 7,5 cm erhöhte die optimale Fahrgeschwindigkeit für eine Schädigungstiefe von 0,05 mm um 33 %, für eine Schädigung des gesamten Gewebes der Modellpflanze um 20 %. Der flächenbezogene Gaseinsatz verringerte sich dementsprechend.

Für die Berechnung des Einflusses einer Abflachung der Abdeckung wurde ausgehend vom Standarddatensatz "Abflammen" die Höhe der Abdeckung am Ende in einem Bereich von 15 cm bis 5 cm variiert (Abb. 30).

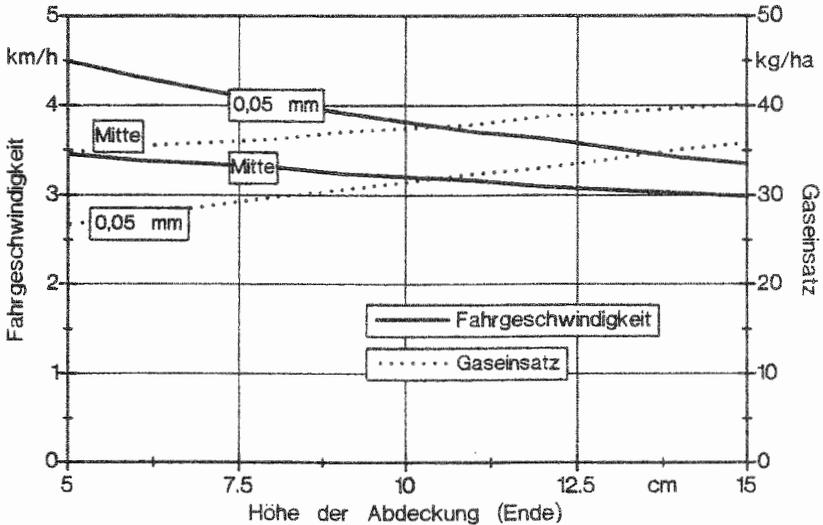


Abb. 30: Optimale Fahrgeschwindigkeit und flächenbezogener Gaseinsatz für das Abtöten eines Modellpflanzenbestandes mit dem Gerätekonzept "Abflammen" in Abhängigkeit von der Höhe am Ende der Abdeckung (Abflachung) für zwei verschiedene Schädigungstiefen in den Modellpflanzen (Simulation: Standarddatensatz "Abflammen")

Mit abnehmender Höhe am Ende der Abdeckung nahm die optimale Fahrgeschwindigkeit zu. Eine Verringerung der Höhe am Ende der Abdeckung von 15 cm (Standarddatensatz) auf 5 cm erhöhte die optimale Fahrgeschwindigkeit für eine Schädigungstiefe von 0,05 mm um 32 %, für eine Schädigung des gesamten Gewebes der Modellpflanze um 15 %. Der flächenbezogene Gaseinsatz verringerte sich dementsprechend.

5.2.1.5 Länge der Abdeckung

Über die **Länge der Abdeckung** läßt sich bei einer entsprechend flachen Abdeckung die "wirksame Gerätelänge" erhöhen. Bei gleichbleibender Fahrgeschwindigkeit sind die Pflanzen entsprechend länger dem Gasstrom ausgesetzt. Damit kann während der thermischen Behandlung mehr von der eingesetzten Verbrennungsenergie auf die Pflanzen übertragen werden. Der Einfluß der Länge der Abdeckung muß im Zusammenhang mit dem Gasdurchsatz am Brenner gesehen werden. Die Simulationen zum Gasdurchsatz am Brenner haben gezeigt, daß mit steigendem Gasdurchsatz in

Verbindung mit großen Schädigungstiefen mit einem höheren flächenbezogenen Gaseinsatz gerechnet werden muß. Im Standarddatensatz "Abflammen" wird von einem vergleichsweise niedrigen Gasdurchsatz am Brenner von 12 kg/hm ausgegangen. Es stellt sich in diesem Zusammenhang die Frage, inwieweit der erhöhte flächenbezogene Gaseinsatz bei höher ausgelegten Brennern durch eine längere Abdeckung kompensiert werden kann.

Mit Hilfe des thermodynamischen Modells wurde der Einfluß der Länge der Abdeckung auf die optimale Fahrgeschwindigkeit und den flächenbezogenen Gaseinsatz für das thermische Abtöten eines Modellpflanzenbestandes mit dem Gerätekonzept "Abflammen" für zwei verschiedene Schädigungstiefen in den Modellpflanzen berechnet. Dafür wurde die Länge der Abdeckung von 0,5 m bis 5,0 m variiert (Abb. 31). Zusätzlich wurde ausgehend der Einfluß des Gasdurchsatzes am Brenner für verschiedene Abdeckungsängen berechnet (Abb. 32).

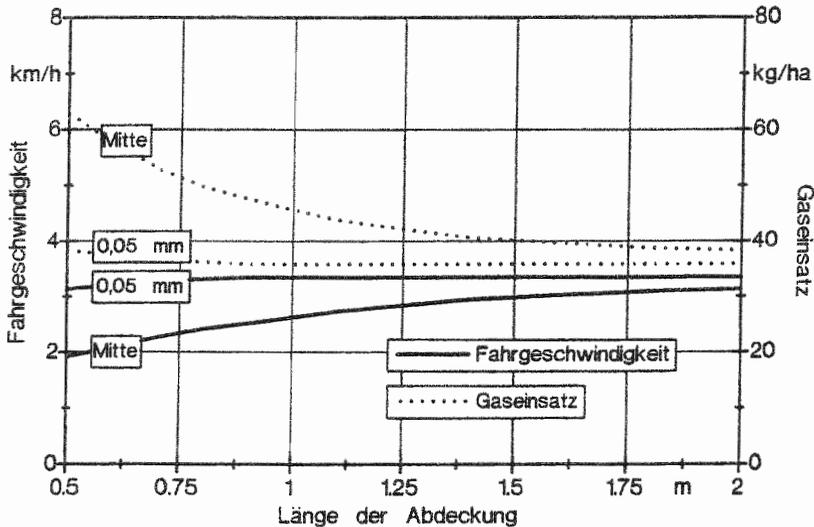


Abb. 31: Optimale Fahrgeschwindigkeit und flächenbezogener Gaseinsatz für das Abtöten eines Modellpflanzenbestandes mit dem Gerätekonzept "Abflammen" in Abhängigkeit von der Länge der Abdeckung für zwei verschiedene Schädigungstiefen in den Modellpflanzen (Simulation: Standarddatensatz "Abflammen")

Die Länge der Abdeckung beeinflusste die optimale Fahrgeschwindigkeit erheblich. Eine Halbierung der Abdeckungslänge von 1,5 m (Standarddatensatz) auf 0,75 m verringerte die optimale Fahrgeschwindigkeit für eine Schädigungstiefe von 0,05 mm um 9 %, für eine Schädigung des gesamten

Gewebes der Modellpflanze um 37 %. Eine Erhöhung der Abdeckungslänge von 1,5 m (Standarddatensatz) auf 2,0 m erhöhte die optimale Fahrgeschwindigkeit für eine Schädigungstiefe von 0,05 mm nur noch um 0,2 %, für eine Schädigung des gesamten Gewebes der Modellpflanze um 6 %. Für den im Standarddatensatz gewählten Gasdurchsatz von 12 kg/h m brachte eine Verlängerung der Abdeckung kaum noch eine Verringerung des flächenbezogenen Gaseinsatzes bzw. eine Erhöhung der optimalen Fahrgeschwindigkeit.

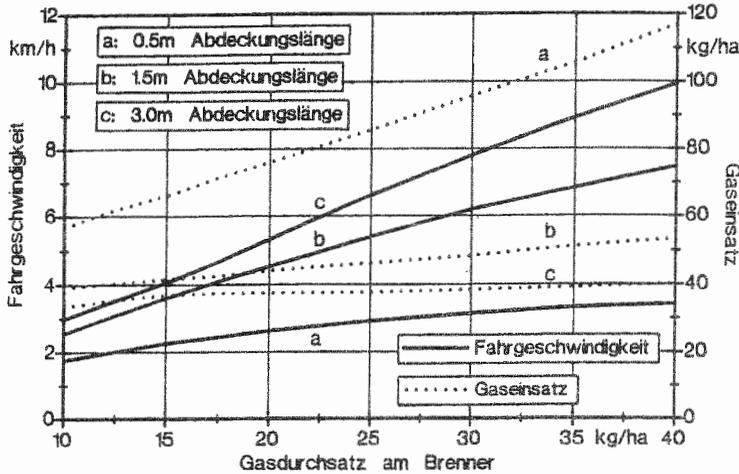


Abb. 32: Optimale Fahrgeschwindigkeit und flächenbezogener Gaseinsatz für das Abtöten eines Modellpflanzenbestandes mit dem Gerätekonzept "Abflammen" in Abhängigkeit vom Gasdurchsatz am Brenner für verschiedene Abdeckungsängen (Simulation: Standarddatensatz "Abflammen", Schädigungstiefe: Mitte)

Mit höher werdendem Gasdurchsatz am Brenner steigt die optimale Fahrgeschwindigkeit bei allen drei Abdeckungsängen deutlich an. Eine längere Abdeckung ermöglicht durchweg höhere Fahrgeschwindigkeiten. Bei einem Gasdurchsatz von 12 kg/h m erhöht sich die optimale Fahrgeschwindigkeit für eine Abdeckungslänge von 1,5 m um 51 %, für eine Abdeckungslänge von 3,0 m um 72 % gegenüber dem Wert bei einer Abdeckungslänge von 0,5 m (1,9 km/h). Bei einer Verdoppelung des Gasdurchsatzes am Brenner auf 24 kg/h m erhöhen sich die relativen Unterschiede auf 81 % für 1,5 m, und 121 % für 3,0 m Abdeckungsängen gegenüber dem Wert bei einer Abdeckungslänge von 0,5 m (2,9 km/h). Bei dem maximal berechneten Gasdurchsatz von 40 kg/h m betragen die Unterschiede bereits 119 % für 1,5 m und 193 % für 3,0 m Abdeckungsängen gegenüber dem Wert bei einer Abdeckungslänge von 0,5 m (3,4 km/h).

Eine Verdoppelung der Abdeckungslänge von 1,5 m auf 3,0 m erhöht bei einem Gasdurchsatz am

Brenner von 12 kg/hm die optimale Fahrgeschwindigkeit um 14 %, bei 24 kg/h m um 22 % und bei 40 kg/h m um 33 %.

Mit höher werdendem Gasdurchsatz am Brenner steigt der flächenbezogene Gaseinsatz bei allen drei Abdeckungslängen deutlich an. Eine längere Abdeckung ermöglicht durchweg niedrigere Gaseinsätze. Bei einem Gasdurchsatz von 12 kg/h m verringert sich der Gaseinsatz für eine Abdeckungslänge von 1,5 m um 34 %, für eine Abdeckungslänge von 3,0 m um 43 % gegenüber dem Wert bei einer Abdeckungslänge von 0,5 m (60,8 kg/ha). Bei einer Verdoppelung des Gasdurchsatzes am Brenner auf 24 kg/hm erhöhen sich die relativen Unterschiede auf 45 % für 1,5 m, und 55 % für 3,0 m Abdeckungslänge gegenüber dem Wert bei einer Abdeckungslänge von 0,5 m (83,5 kg/ha). Bei dem maximal berechneten Gasdurchsatz von 40 kg/h m betragen die Unterschiede bereits 54 % für 1,5 m und 65 % für 3,0 m Abdeckungslänge gegenüber dem Wert bei einer Abdeckungslänge von 0,5 m (116,5 kg/ha).

Eine Verdoppelung der Abdeckungslänge von 1,5 m auf 3,0 m verringert bei einem Gasdurchsatz am Brenner von 12 kg/hm den flächenbezogenen Gaseinsatz um 13 %, bei 24 kg/h m um 19 % und bei 40 kg/h m um 25 %.

Die Ergebnisse zeigen, daß die Abdeckungslänge auf die optimale Fahrgeschwindigkeit und den flächenbezogenen Gaseinsatz einen entscheidenden Einfluß hat. Sie zeigen auch, daß die Länge der Abdeckung auf den Gasdurchsatz am Brenner abgestimmt werden muß. Für einen relativ niedrigen Gasdurchsatz von 12 kg/h m ist eine Abdeckungslänge von 1,50 m ausreichend. Eine kürzere Abdeckung führt aber zu deutlich niedrigeren optimalen Fahrgeschwindigkeiten und höheren flächenbezogenen Gaseinsätzen. Bei höheren Gasdurchsätzen am Brenner kann eine deutliche Verlängerung der Abdeckung über 1,5 m eine deutliche Erhöhung der optimalen Fahrgeschwindigkeit und eine entsprechende Verringerung des flächenbezogenen Gaseinsatzes bewirken.

5.2.1.6 k-Wert der Abdeckung

Über eine Isolierung der Abdeckung läßt sich der **k-Wert der Abdeckung** und damit die Verluste durch die Abdeckung verringern. Aus thermodynamischer Sicht kann eine Isolierung der Abdeckung indirekt über einen langsameren Abfall der Nettowärmestromdichte über die Behandlungsdauer die optimale Fahrgeschwindigkeit erhöhen. Im mathematischen Modell wird der Wärmestrom durch die Abdeckung über den k-Wert berechnet.

Mit Hilfe des thermodynamischen Modells wurde der Einfluß des k-Werts der Abdeckung auf die optimale Fahrgeschwindigkeit und den flächenbezogenen Gaseinsatz für das thermische Abtöten

eines Modellpflanzenbestandes mit dem Gerätekonzept "Abflammen" für zwei verschiedene Schädigungstiefen in den Modellpflanzen berechnet. Dafür wurde der k-Wert der Abdeckung von $1 \text{ W/m}^2\text{K}$ bis $20 \text{ W/m}^2\text{K}$ variiert (Abb. 33).

Die Isolierung der Abdeckung beeinflusste die optimale Fahrgeschwindigkeit geringfügig. Eine Erhöhung des k-Wertes von $1 \text{ W/m}^2\text{K}$ (Standarddatensatz) auf $20 \text{ W/m}^2\text{K}$ verringert die optimale Fahrgeschwindigkeit für eine Schädigungstiefe von $0,05 \text{ mm}$ um 15% , für eine Schädigung des Gewebes der Modellpflanze um 10% . Der flächenbezogene Gaseinsatz erhöht sich dementsprechend.

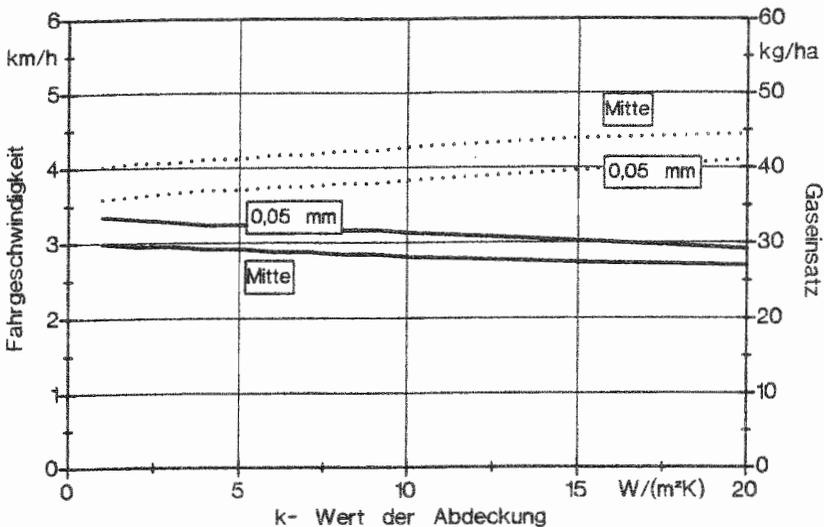


Abb. 33: Optimale Fahrgeschwindigkeit und flächenbezogener Gaseinsatz für das Abtöten eines Modellpflanzenbestandes mit dem Gerätekonzept "Abflammen" in Abhängigkeit vom k-Wert der Abdeckung für zwei verschiedene Schädigungstiefen in den Modellpflanzen (Simulation: Standarddatensatz "Abflammen")

5.2.2 Modellpflanzen

5.2.2.1 Durchmesser der Modellpflanze

Die Größe der Pflanze beeinflusst über den konvektiven Wärmeübergangskoeffizienten die konvektive Wärmestromdichte in die Pflanze. Bei gleichbleibender Bestandsdichte (kg/m^2) verringern sich durch die höheren Blatt- und Stengeldicken die insgesamt für den Wärmeeintrag zur Verfügung stehenden Übertragungsflächen. Gleichzeitig erhöhen sich die Leitungswege für die Durchwärmung des gesamten Gewebes. Da die den Berechnungen zugrunde liegende Modellpflanze eine zylindrische Form aufweist, genügt es für eine Veränderung der Pflanzengröße den Durchmesser der Modellpflanze zu verändern.

Mit Hilfe des thermodynamischen Modells wurde der Einfluß des Durchmessers der Modellpflanze auf die optimale Fahrgeschwindigkeit und den flächenbezogenen Gaseinsatz für das thermische Abtöten eines Modellpflanzenbestandes mit dem Gerätekonzept "Abflammen" für zwei verschiedene Schädigungstiefen in den Modellpflanzen berechnet. Dafür wurde der Durchmesser der Modellpflanze in einem Bereich von 0,5 mm bis 5 mm variiert (Abb. 34).

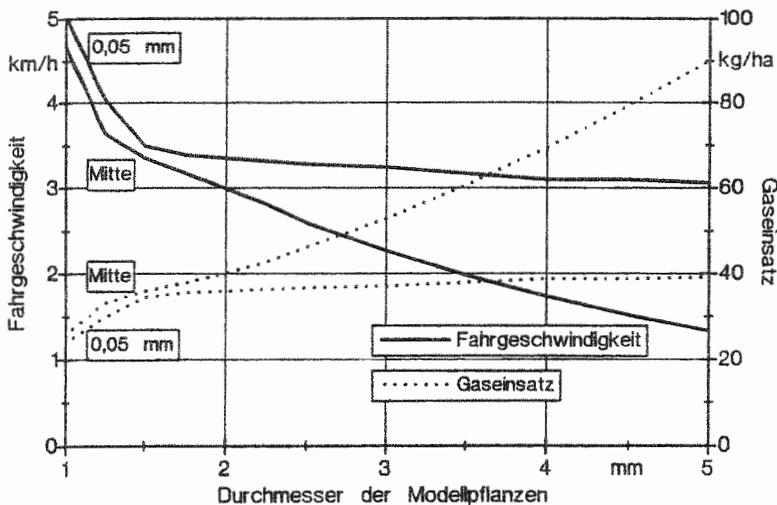


Abb. 34: Optimale Fahrgeschwindigkeit und flächenbezogener Gaseinsatz für das Abtöten eines Modellpflanzenbestandes mit dem Gerätekonzept "Abflammen" in Abhängigkeit vom Durchmesser der zylindrischen Modellpflanzen für zwei verschiedene Schädigungstiefen in den Modellpflanzen (Simulation: Standarddatensatz "Abflammen")

Der Durchmesser der zylindrischen Modellpflanze beeinflusst die optimale Fahrgeschwindigkeit mit zunehmender notwendiger Schädigungstiefe erheblich. Eine Erhöhung des Durchmessers von 2 mm (Standarddatensatz) auf 5 mm verringert die optimale Fahrgeschwindigkeit für eine Schädigungstiefe von 0,05 mm um 9 %, für eine Schädigung der gesamten Modellpflanze um 57 %. Eine Halbierung des Stengeldurchmessers von 2 mm (Standarddatensatz) auf 1 mm erhöht dagegen die optimale Fahrgeschwindigkeit für eine Schädigungstiefe von 0,05 mm um 47 %, für eine Schädigung des gesamten Gewebes der Modellpflanze um 53 %. Eine Erhöhung der optimalen Fahrgeschwindigkeit führt zu einer entsprechenden Verringerung des flächenbezogenen Gaseinsatzes und umgekehrt.

Große Pflanzen in Verbindung mit hohen notwendigen Schädigungstiefen stellen für die thermische Unkrautbekämpfung mit dem Gerätekonzept "Abflammen" ein erhebliches Problem dar. Kleine Pflanzen mit einer geringen notwendigen Schädigungstiefe dagegen sind auch bei hohen Fahrgeschwindigkeiten gut in einem Arbeitsgang abzutöten. Verfahrenstechnisch sollte deshalb auf möglichst kleine Pflanzen zum Zeitpunkt der Bekämpfung geachtet werden.

5.2.2.2 Gewebeausgangstemperatur in der Modellpflanze

Für das Abtöten der Gesamtpflanze muß durch die thermische Behandlung in der notwendigen Gewebetiefe eine Temperatur von 60 °C erreicht werden. Damit ist ein Einfluß der **Gewebeausgangstemperatur** auf die optimale Fahrgeschwindigkeit und den flächenbezogenen Gaseinsatz zu erwarten.

Mit Hilfe des thermodynamischen Modells wurde der Einfluß der Gewebeausgangstemperatur auf die optimale Fahrgeschwindigkeit und den flächenbezogenen Gaseinsatz für das thermische Abtöten eines Modellpflanzenbestandes mit dem Gerätekonzept "Abflammen" für zwei verschiedene Schädigungstiefen in den Modellpflanzen berechnet. Dafür wurde die Gewebeausgangstemperatur in einem Bereich von 10 °C bis 25 °C variiert (Abb. 35).

Die Gewebeausgangstemperatur beeinflusst die optimale Fahrgeschwindigkeit deutlich. Eine Halbierung der Temperatur von 20 °C (Standarddatensatz) auf 10 °C verringert die optimale Fahrgeschwindigkeit für eine Schädigungstiefe von 0,05 mm um 13 %, für eine Schädigung des gesamten Gewebes der Modellpflanze um 12 %. Eine Erhöhung der Gewebeausgangstemperatur von 20 °C (Standarddatensatz) auf 25 °C erhöht dagegen die optimale Fahrgeschwindigkeit für eine Schädigungstiefe von 0,05 mm um 16 %, für eine Schädigung des gesamten Gewebes der Modellpflanze um 13 %. Eine Erhöhung der optimalen Fahrgeschwindigkeit führt zu einer entsprechenden Verringerung des flächenbezogenen Gaseinsatzes und umgekehrt.

Verfahrenstechnisch ist die Gewebeausgangstemperatur nur über die Wahl des Behandlungszeitpunktes zu beeinflussen. Hohe Lufttemperaturen, wenig Wind, hohe Einstrahlung und trockener Boden (Wasserversorgung) stellen dabei günstige Bedingungen für die thermische Unkrautbekämpfung dar.

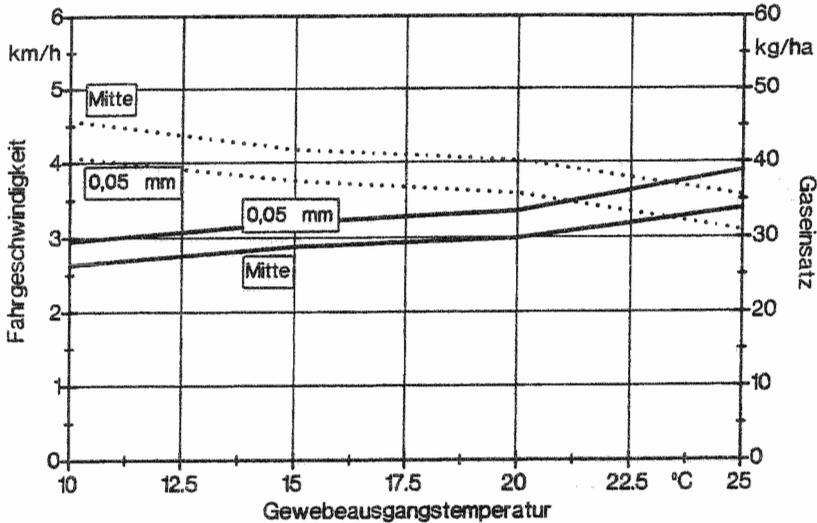


Abb. 35: Optimale Fahrtgeschwindigkeit und flächenbezogener Gaseinsatz für das Abtöten eines Modellpflanzenbestandes mit dem Gerätekonzept "Abflammen" in Abhängigkeit von der Gewebeausgangstemperatur in den Pflanzen für zwei verschiedene Schädigungstiefen in den Modellpflanzen (Simulation: Standarddatensatz "Abflammen")

5.2.2.3 Bestandsdichte

Mit zunehmender **Bestandsdichte** (kg/m^2) nimmt bei gleichbleibendem Durchmesser der Modellpflanze die für den Wärmeeintrag insgesamt zur Verfügung stehende Pflanzenoberfläche zu. Gleichzeitig steigt aber auch die für das Abtöten der Pflanzen insgesamt zu übertragende Energiemenge an.

Mit Hilfe des thermodynamischen Modells wurde der Einfluß der Bestandsdichte auf die optimale Fahrtgeschwindigkeit und den flächenbezogenen Gaseinsatz für das thermische Abtöten eines Modellpflanzenbestandes mit dem Gerätekonzept "Abflammen" für zwei verschiedene Schädigungstiefen in den Modellpflanzen berechnet. Dafür wurde die Bestandsdichte in einem Bereich von

0,1 kg/m² bis 1,0 kg/m² variiert (Abb. 36).

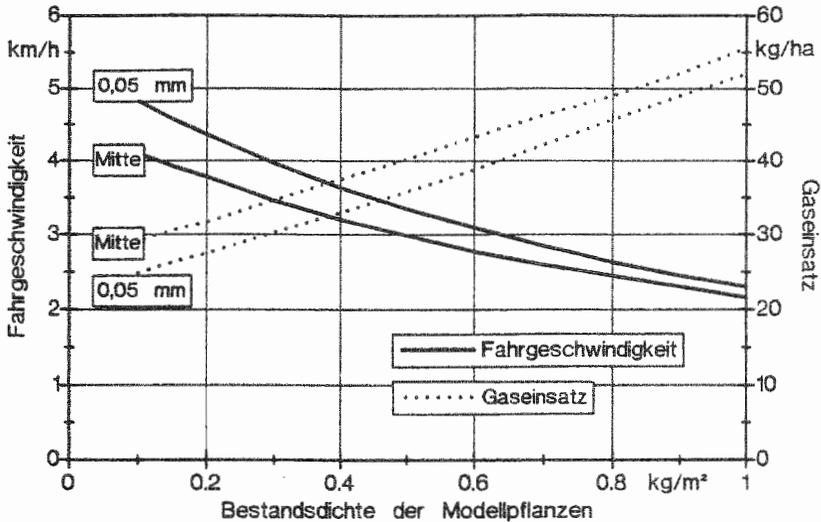


Abb. 36: Optimale Fahrgeschwindigkeit und flächenbezogener Gaseinsatz für das Abtöten eines Modellpflanzenbestandes mit dem Gerätekonzept "Abflammen" in Abhängigkeit von der Dichte der Pflanzen für zwei verschiedene Schädigungstiefen in den Modellpflanzen (Simulation: Standarddatensatz "Abflammen")

Die Bestandsdichte beeinflusst die optimale Fahrgeschwindigkeit deutlich. Eine Verdoppelung der Bestandsdichte von 0,5 kg/m² (Standarddatensatz) auf 1,0 kg/m² verringert die optimale Fahrgeschwindigkeit für eine Schädigungstiefe von 0,05 mm um 25 %, für eine Schädigung des gesamten Gewebes der Modellpflanze um 28 %. Eine Halbierung der Bestandsdichte von 0,5 kg/m² (Standarddatensatz) auf 0,25 kg/m² erhöht dagegen die optimale Fahrgeschwindigkeit für eine Schädigungstiefe von 0,05 mm um 18 %, für eine Schädigung des gesamten Gewebes der Modellpflanze um 16 %. Eine Erhöhung der optimalen Fahrgeschwindigkeit führt zu einer entsprechenden Verringerung des flächenbezogenen Gaseinsatzes und umgekehrt.

Verfahrenstechnisch ist die Bestandsdichte nur über den Behandlungszeitpunkt zu beeinflussen. Eine Bekämpfung der Pflanzen sollte in einem möglichst frühen Entwicklungsstadium erfolgen.

5.3 Schlußfolgerungen für die Gerätekonzepte

In diesem Teil der Arbeit sollen die in den Simulationen gewonnenen Erkenntnisse in entsprechend optimierte Gerätekonzepte umgesetzt werden. Ansatzpunkt für eine Verkürzung der notwendigen Behandlungsdauer zum Abtöten der Modellpflanze ist die Erhöhung der temperaturwirksamen Nettowärmestromdichte über die Erhöhung der physikalischen Systemparameter Temperatur, Strömungsgeschwindigkeit, Emissionsverhältnis und Wassergehalt des wärmeübertragenden Gasstromes.

Inwieweit eine Erhöhung der temperaturwirksamen Nettowärmestromdichte in eine entsprechend kürzere Behandlungsdauer umgesetzt werden kann, hängt in erster Linie von der notwendigen Schädigungstiefe in der zu bekämpfenden Pflanze ab. Im thermodynamischen Grundmodul und im Modell wurde die "thermische Empfindlichkeit" der Modellpflanze über die Wahl der zum Abtöten notwendigen Schädigungstiefe definiert. Für eine "thermisch sensible" Modellpflanze (0,05 mm) konnte die Behandlungsdauer durch eine Erhöhung der Nettowärmestromdichte deutlich verkürzt werden. Je geringer die "thermische Empfindlichkeit" der Modellpflanze war, desto weniger ließ sich die Behandlungsdauer durch eine Erhöhung der Nettowärmestromdichte verkürzen. Thermodynamisch läßt sich dies durch die vergleichsweise geringe Wärmeleitfähigkeit des pflanzlichen Gewebes erklären. Um auch tiefere Gewebeschichten auf die Schädigungstemperatur zu erwärmen, ist eine ausreichende Behandlungsdauer zwingend notwendig. Gerätetechnisch kann auf die Behandlungsdauer nur über die Länge der Abdeckung und über eine optimale Strömungsführung in Bodennähe Einfluß genommen werden.

Für das Gerätekonzept "**Abflammen**" lassen sich durch einfache konstruktive Veränderungen die optimale Fahrgeschwindigkeit erhöhen und der flächenbezogene Gaseinsatz verringern. Diese Ergebnisse konnten in erster Linie auf eine entsprechende Erhöhung der Temperatur und der Strömungsgeschwindigkeit des wärmeübertragenden Gasstromes zurückgeführt werden.

Trotz aller Optimierungsmaßnahmen entweicht am Ende der Abdeckung ein mehr oder minder großer Teil der eingesetzten Verbrennungsenergie. Eine weitergehende Optimierung der thermischen Unkrautbekämpfung hinsichtlich der Minimierung des flächenbezogenen Gaseinsatzes ist nur durch eine Veränderung des Gerätekonzepts möglich. Der "**Low Temperature Weeder**" stellt einen neuartigen Geräteansatz für eine energiesparende thermische Unkrautbekämpfung dar. Da aus den bisherigen Simulationen nicht alle Fragen für eine optimale Auslegung des neuartigen Gerätekonzeptes beantwortet werden konnten, mußten noch offene Probleme über das entsprechend angepaßte thermodynamische Modell berechnet werden.

Die Berechnungen zum Einfluß der physikalischen Systemparameter ergaben eine sehr deutliche Verkürzung der zum Abtöten der Modellpflanze notwendigen Behandlungsdauer durch hohe Wassergehalte im wärmeübertragenden Gasstrom. Der dabei zugrunde liegende **Wärmeeintrag durch Kondensation** stellt einen überaus interessanten Ansatz für eine thermische Unkrautbekämpfung dar. Dieser konnte aber leider im Rahmen dieser Arbeit nicht weiter verfolgt werden. Sowohl die programmtechnische Umsetzung in ein entsprechendes Gerätekonzept, als auch die Erarbeitung einer Methodik zur meßtechnischen Überprüfung der Ergebnisse würden den Rahmen dieser Arbeit sprengen. In diesem Zusammenhang wird auf den Ausblick verwiesen, in dem die weitere Bearbeitung dieses Themas kurz skizziert wird.

5.3.1 Optimierung des Gerätekonzeptes "Abflammen"

Für die thermische Unkrautbekämpfung mit dem Gerätekonzept "Abflammen" ergeben sich aus den Ergebnissen der Simulationen hinsichtlich der Erhöhung der optimalen Fahrgeschwindigkeit und der Minimierung des flächenbezogenen Gaseinsatzes eine Reihe geräte- und verfahrenstechnischer Ansatzpunkte.

Die effektivste Maßnahme ist die **optimale Gestaltung der Abdeckung**. Sie sollte möglichst niedrig sein und zum Ende hin abflachen. Eine gute Isolierung dient nicht nur der Verringerung der Verluste, sondern schützt auch den Anwender vor Verletzungen. Um zusätzliche Abluftverluste zu den Seiten zu vermeiden, sollte die Abdeckung möglichst dicht zum Boden abschließen. Es ist dafür zu sorgen, daß die atmosphärischen Brenner unter diesen Bedingungen noch ausreichend Verbrennungsluft ansaugen können. Dies kann durch Zumischung der Verbrennungsluft bereits in der Zuleitung (IFT-Brenner) und durch eine entsprechend große Öffnung am Anfang der Abdeckung erfolgen. Um das Durchströmen der Abdeckung nicht zu behindern, ist auf eine entsprechend große Öffnung am Ende der Abdeckung zu achten. Die Länge der Abdeckung ist dem Gasdurchsatz am Brenner anzupassen. Eine Steigerung der optimalen Fahrgeschwindigkeit und damit der Schlagkraft der Geräte ist problemlos durch eine **Erhöhung des Gasdurchsatzes am Brenner** zu erreichen. Bei atmosphärischen Brennern müssen dafür nur größere Düsen eingesetzt werden. Konstruktiv muß auch hier auf eine ausreichende Zumischung von Verbrennungsluft geachtet werden. Der erhöhte flächenbezogene Gaseinsatz kann durch eine entsprechende Verlängerung der Abdeckung zum Teil kompensiert werden. Insgesamt muß aber gerade bei Pflanzen mit einer großen notwendigen Schädigungstiefe mit einem erhöhten flächenbezogenen Gaseinsatz gerechnet werden. Die Auslegung der Brenner erfolgt nach der angestrebten Fahrgeschwindigkeit und der auszubringenden Gasmenge.

Der Einsatz von Gebläsebrennern ermöglicht eine weitere Erhöhung der optimalen Fahrgeschwindigkeit und eine entsprechende Verringerung des flächenbezogenen Gaseinsatzes. Gerade bei einem hohen Gasdurchsatz am Brenner und einer entsprechend langen und flachen Abdeckung kann der Gebläsebrenner für die Sicherstellung einer optimalen Verbrennung notwendig werden. Darüber hinaus erlaubt der Gebläsebrenner auch die Verwendung anderer, weitaus billigerer Energieträger als Flüssiggas. Das würde dazu beitragen, die variablen Verfahrenskosten zusätzlich zu verringern. Denkbar wäre der Einsatz von Heizöl oder Rapsöl.

Die Frage nach der optimalen Strömungsrichtung wird vom thermodynamischen Modell eindeutig zugunsten eines vorwärts gerichteten Brenners beantwortet. Dabei wird aber vorausgesetzt, daß der damit verbundene Effekt der Erhöhung der Strömungsgeschwindigkeit relativ zu den Pflanzen über die ganze Länge der Abdeckung in voller Höhe umgesetzt wird. Eine meßtechnische Klärung dieser Frage ist deshalb unbedingt erforderlich (Kap. 5).

5.3.2 Neues Gerätekonzept "Low Temperature Weeder" (LTW)

Trotz aller Optimierungsmaßnahmen entweicht am Ende der Abdeckung ein mehr oder minder großer Teil der eingesetzten Verbrennungsenergie. Eine weitergehende Optimierung der thermischen Unkrautbekämpfung hinsichtlich der Minimierung des flächenbezogenen Gaseinsatzes ist nur durch eine Veränderung des Gerätekonzepts möglich. Der "Low Temperature Weeder" (LTW) stellt ein neuartiges Gerätekonzept zur thermischen Unkrautbekämpfung dar (Abb. 37). Er arbeitet mit einem heißen Gastrom, der mit Hilfe eines druckstabilen Radialgebläses in einem gut isolierten Blechkanal im Kreis herumgeführt wird. Der Kreislauf ist nur zum Boden hin offen. Auf der Vorder- und der Rückseite und zu den Seiten schließt die Abdeckung zum Boden hin möglichst dicht ab. Die Wärmeerzeugung erfolgt mit einem modulierenden Gebläsebrenner in einer offenen Brennkammer im oberen Teil des Kreislaufs. Die vollständige Entkoppelung von Wärmeerzeugung und Wärmeübertragung erschwert ein Entzünden von trockenen Pflanzenteilen durch die thermische Behandlung. Durch die Entkoppelung von Gasdurchsatz und Strömungsgeschwindigkeit der Gase ist es möglich, diese Parameter und damit die konvektive Wärmestromdichte unabhängig vom Gasdurchsatz am Brenner zu erhöhen.

Für die Wärmeströme bei einer thermischen Unkrautbekämpfung mit dem LTW ergibt sich folgendes Bild (Abb. 37). Die heißen Gase durchströmen die zum Boden hin offene Abdeckung. Dabei wird ein Teil der in der Verbrennungsluft enthaltenen Wärmeenergie auf die Pflanzen und in den Boden übertragen. Der nicht übertragene Rest wird im Gegensatz zu den bisherigen Gerätekonzepten zum Ort der Wärmeerzeugung zurückgeführt und durch den Gebläsebrenner wieder auf die Arbeitstemperatur erhitzt. Weitere Verluste treten durch die Wärmeabgabe durch die Abdeckung

und durch das Entweichen der mit dem Gebläsebrenner in den Kreislauf eingebrachten Abgase auf. Die Abgase werden mit maximaler Verbrennungstemperatur in den Kreislauf eingebracht und entweichen durch den Spalt zum Boden mit momentaner Arbeitstemperatur.

Die tatsächlich notwendige Brennerleistung zur Erreichung der Arbeitstemperatur hängt bei gegebener Verbrennung von der Abkühlung des Gasstromes beim Durchströmen der zum Boden hin offenen Abdeckung ab. Eine "lastabhängige" und damit sparsame Betriebsweise des LTW erfordert den Einsatz eines modulierenden Brenners.

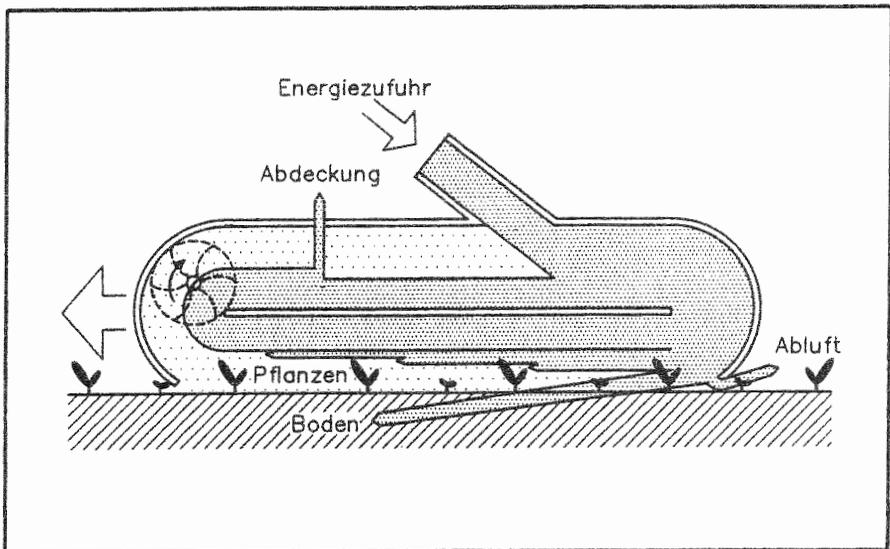


Abb. 37: Gerätekonzept und Modell der Energieströme bei der thermischen Unkrautbekämpfung mit dem Low Temperature Weeder (LTW)

5.3.3 Einfluß der Geräteauslegung auf die Fahrgeschwindigkeit und den flächenbezogenen Gaseinsatz bei der thermischen Unkrautbekämpfung mit dem Gerätekonzept "LTW"

Geht man für die optimale Ausführung des Gerätekonzeptes "LTW" aufgrund der bisherigen Ergebnisse von einer flachen, langen und gut isolierten Abdeckung aus, so bleibt die Frage nach der optimalen Temperatur und Strömungsgeschwindigkeit des wärmeübertragenden Gases offen. Im Gerätekonzept "LTW" können im Gegensatz zum Gerätekonzept "Abflammen" die Eingangswerte der physikalischen Systemparameter Temperatur und Strömungsgeschwindigkeit des

wärmeübertragenden Gases unabhängig voneinander gewählt werden. Die Temperatur wird durch die maximal zulässige Betriebstemperatur für das Gebläse begrenzt. Die geforderte Strömungsgeschwindigkeit geht bei gegebenem Querschnitt der am Boden offenen Abdeckung direkt proportional in die Förderleistung des Gebläses ein. Zur Klärung dieses Zusammenhanges wurde mit Hilfe des thermodynamischen Modells der Einfluß der Temperatur und der Strömungsgeschwindigkeit auf die optimale Fahrgeschwindigkeit und den flächenbezogenen Gaseinsatz für das thermische Abtöten eines Modellpflanzenbestandes für zwei verschiedene Schädigungstiefen in den Modellpflanzen berechnet.

Für die Simulationen wurde vom Standarddatensatz "LTW" ausgegangen (Tab. 8).

Tab. 8: Standarddatensatz "LTW"

Gerät (einschließlich Tab. 2)			
Brennerdurchsatz:	lastabhängig	Abdeckung:	$h_{\text{Abd}} = 0.20 \text{ m}$
Luftüberschuß:	$n_{\text{Luft}} = 1.0$		$l_{\text{Abd}} = 2 \text{ m}$
Arbeitsrichtung:	vorwärts		$b_{\text{Abd}} = 1.0 \text{ m}$
Arbeitstemperatur:	$\Delta T_{\text{Gas}} (t=0) = 400 \text{ }^\circ\text{C}$		$k_{\text{Abd}} = 1 \text{ W/m}^2\text{K}$
Strömungsgeschw.	$v_{\text{Gas}} (t=0) = 8 \text{ m/s}$	Gerät:	$h = 0.5 \text{ m}$
			$A = 5 \text{ m}^2$
Modellpflanzen (einschließlich Tab. 3)			
Durchmesser:	$d_{\text{VP}} = 2 \text{ mm}$	Bestandsdichte	$B_{\text{VP}} = 0.5 \text{ kg/m}^2$
Klima			
Lufttemperatur:	$T_{\text{Luft}} = 20 \text{ }^\circ\text{C}$		
Boden (siehe Tab. 4)			

5.3.3.1 Anpassung des thermodynamischen Modells

Für die Berechnung der optimalen Fahrgeschwindigkeit und des flächenbezogenen Gaseinsatzes bei der thermischen Unkrautbekämpfung mit dem Gerätekonzept "LTW" mußte das thermodynamische Modell leicht verändert werden. Im Gerätekonzept "LTW" können im Gegensatz zum Gerätekonzept "Abflammen" die Eingangswerte der physikalischen Systemparameter Temperatur und Strömungsgeschwindigkeit des wärmeübertragenden Gases unabhängig voneinander festgelegt werden. Die eingesetzte Verbrennungsenergie ist damit nicht mehr an den Gasdurchsatz des Brenners

gekoppelt, sondern an die während der thermischen Behandlung dem System entzogene Energie. Der durch die Verbrennung zugeführte Wärmeinhalt $Q_{\text{Verbrennung}}$ des während der Behandlungsdauer $t_{\text{Beh.}}$ an den Pflanzen vorbeiströmenden Gases errechnet sich nach:

$$Q_{\text{Verbrennung}}(t_{\text{Beh.}}) = v_{\text{Gas}} \cdot h_{\text{Abd.}} \cdot b_{\text{Abd.}} \cdot \rho_{\text{Gas}} \cdot c_{p(\text{Gas})} \cdot \Delta T_{\text{Gas}} \cdot \frac{l_{\text{Abd.}}}{V_{\text{Gerät}}} \quad (37)$$

Darin ist:

$Q_{\text{Verbrennung}}$: eingesetzte Verbrennungsenergie	[kJ]
v_{Gas}	: Strömungsgeschwindigkeit des Gases unter der Abdeckung	[m/s]
$h_{\text{Abd.}}$: Höhe der Abdeckung	[m]
$b_{\text{Abd.}}$: Breite der Abdeckung	[m]
ρ_{Gas}	: Dichte des Gases	[kg/m ³]
$c_{p(\text{Gas})}$: spez. Wärmekapazität des Gases	[kJ/kg K]
$\Delta T_{(\text{Gas})}$: Max. Temperaturdifferenz vom Gas zur Umgebungsluft	[K]
$v_{\text{Gerät}}$: Fahrgeschwindigkeit	[m/s]

Die Arbeitstemperatur wird im Gerätekonzept "LTW" durch Zumischen heißer Verbrennungsabgase mit einem modulierenden Gebläsebrenner erreicht. Dadurch wird dem Kreislauf laufend ein Massenstrom zugeführt, der das System über den Spalt zum Boden wieder verlassen muß. Für das thermodynamische Gesamtmodell wird angenommen, daß der Gasstrom mit maximal möglicher Verbrennungstemperatur dem System zugemischt wird und das System mit Arbeitstemperatur wieder verläßt. Damit errechnen sich die Abluftverluste nach:

$$Q_{\text{Abluft}} = Q_{\text{Verbrennung}} \cdot \frac{\Delta T_{\text{Gas}}}{T_{\text{max.}}} \quad (38)$$

Darin ist:

Q_{Abluft}	: Wärmeinhalt der Abluftverluste	[kJ]
$Q_{\text{Verbrennung}}$: eingesetzte Verbrennungsenergie	[kJ]
ΔT_{Gas}	: Maximale Arbeitstemperatur	[K]
$T_{\text{max.}}$: Maximale Gastemperatur (Verbrennung)	[K]

Die Wärmeenergie, die durch den Brenner im Behandlungszeitraum $t_{Beh.}$ nachgeliefert werden muß, errechnet sich nach:

$$Q_{Bren.}(t_{Beh.}) = Q_{MP}(t) + Q_{Abd.}(t) + Q_{Bod.}(t) + Q_{Abluft}(t) \quad (39)$$

5.3.3.2 Ergebnisse und Schlußfolgerungen für die Geräteauslegung

Um den Einfluß der **Temperatur** des wärmeübertragenden Gases auf die optimale Fahrgeschwindigkeit und den Gaseinsatz für das thermische Abtöten eines Modellpflanzenbestandes mit dem Gerätekonzept "LTW" für zwei verschiedene Schädigungstiefen in den Modellpflanzen zu berechnen, wurde die Arbeitstemperatur in einem Bereich von 200 °C bis 600 °C variiert (Abb. 38).

Mit steigender Temperatur des wärmeübertragenden Abgasstromes nimmt die optimale Fahrgeschwindigkeit erwartungsgemäß zu. Eine Verdoppelung der Arbeitstemperatur von 250 °C auf 500 °C erhöht die optimale Fahrgeschwindigkeit für eine Schädigungstiefe von 0,05 mm um 184 %, für eine Schädigung des gesamten Gewebes der Modellpflanze um 100 %. Der entsprechende Verlauf des flächenbezogenen Gaseinsatzes zeigt deutlich die Entkoppelung von Fahrgeschwindigkeit und flächenbezogenem Gaseinsatz. Für eine Schädigungstiefe von 0,05 mm nimmt der flächenbezogene Gaseinsatz ab. Für eine Schädigung des gesamten Gewebes der Modellpflanze dagegen nimmt er mit steigender Arbeitstemperatur leicht zu. Eine Verdoppelung der Arbeitstemperatur von 250 °C auf 500 °C verringert den Gaseinsatz für eine Schädigungstiefe von 0,05 mm um 17 %, für eine Schädigung des gesamten Gewebes der Modellpflanze erhöht er sich um 6 %.

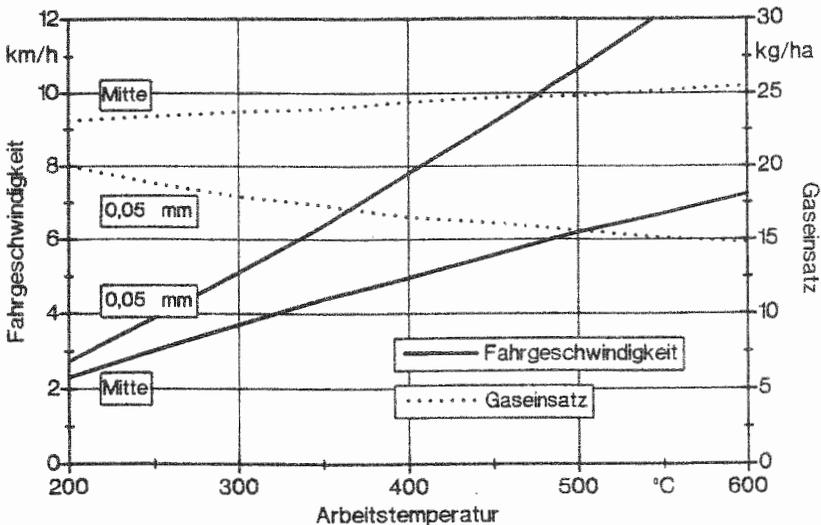


Abb. 38: Einfluß der Arbeitstemperatur auf die optimale Fahrgeschwindigkeit und den flächenbezogenen Gaseinsatz für das Abtöten eines Modellpflanzenbestandes mit dem "LTW" für zwei verschiedene Schädigungstiefen in den Modellpflanzen (Simulation: Standarddatensatz "LTW")

Um den Einfluß der **Strömungsgeschwindigkeit** des wärmeübertragenden Gases auf die optimale Fahrgeschwindigkeit und den Gaseinsatz für das thermische Abtöten eines Modellpflanzenbestandes mit dem Gerätekonzept "LTW" für zwei verschiedene Schädigungstiefen in den Modellpflanzen zu berechnen, wurde die Strömungsgeschwindigkeit in einem Bereich von 1 m/s bis 10 m/s variiert (Abb. 39).

Mit zunehmender Strömungsgeschwindigkeit des wärmeübertragenden Abgasstromes nimmt die optimale Fahrgeschwindigkeit erwartungsgemäß zu. Eine Erhöhung der Strömungsgeschwindigkeit von 2 m/s auf 10 m/s erhöht die optimale Fahrgeschwindigkeit für eine Schädigungstiefe von 0,05 mm um 267 %, für eine Schädigung des gesamten Gewebes der Modellpflanze um 205 %. Der entsprechende Verlauf des flächenbezogenen Gaseinsatzes zeigt auch hier die Entkoppelung von Fahrgeschwindigkeit und flächenbezogenem Gaseinsatz. Für eine Schädigungstiefe von 0,05 mm nimmt der flächenbezogene Gaseinsatz ab. Für eine Schädigung des gesamten Gewebes der Modellpflanze dagegen steigt er mit zunehmender Strömungsgeschwindigkeit leicht an. Eine Erhöhung der Strömungsgeschwindigkeit von 2 m/s auf 10 m/s verringert den Gaseinsatz für eine Schädigungstiefe

von 0,05 mm um 39 %, für eine Schädigung des gesamten Gewebes der Modellpflanze erhöht er sich um 5 %. Der enorme Einfluß der Strömungsgeschwindigkeit ist nicht nur auf die Erhöhung des konvektiven Wärmeübergangskoeffizienten zurückzuführen. Eine Erhöhung der Strömungsgeschwindigkeit führt nicht nur zu einer Erhöhung der Nettowärmestromdichte, sondern auch zu einer Erhöhung der während der Behandlungsdauer ausgebrachten Energiemenge.

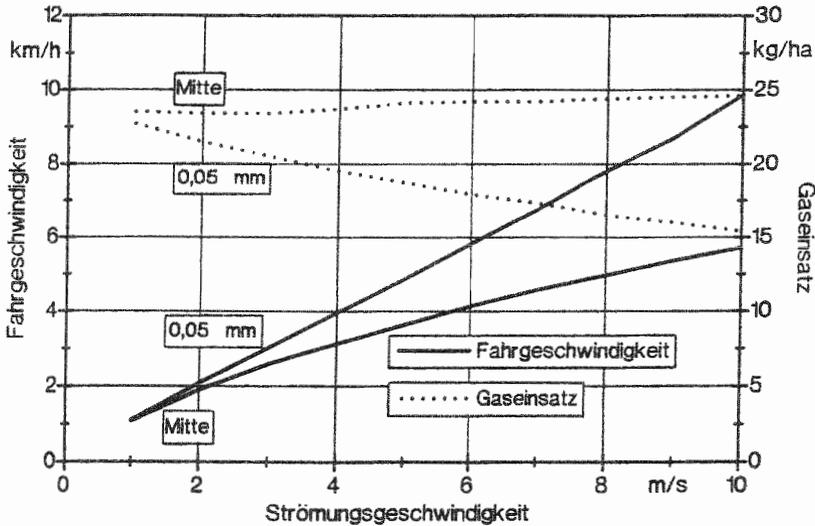


Abb. 39: Einfluß der Strömungsgeschwindigkeit des Abgases auf die optimale Arbeitsgeschwindigkeit und den flächenbezogenen Gaseinsatz für das Abtöten eines Modellpflanzenbestandes mit dem LTW für zwei verschiedene Schädigungstiefen in den Modellpflanzen (Simulation: Standarddatensatz "LTW")

Für die **Auslegung** des LTW muß eine **hohe Betriebstemperatur** und eine **hohe Strömungsgeschwindigkeit** gefordert werden. Begrenzt wird diese Forderung letztlich durch die Kosten für ein entsprechend leistungsfähiges und temperaturbeständiges Gebläse.

5.3.4 Vergleich der optimierten Gerätekonzepte "Abflammen" und "Low Temperature Weeder"

Um das Gerätekonzept "LTW" in Bezug auf das Gerätekonzept "Abflammen" einordnen zu können, erfolgte in diesem Teil der Arbeit ein rechnerischer Vergleich der optimalen Fahrgeschwindigkeit und des flächenbezogenen Gaseinsatzes in Abhängigkeit von der Modellpflanzengröße und der Bestandsdichte der Modellpflanze.

Der "LTW" stellt ein Gerätekonzept für eine energiesparende thermische Unkrautbekämpfung dar. Deshalb lag der Schwerpunkt der Betrachtungen bei den für die Bekämpfung des Modellpflanzenbestandes notwendigen flächenbezogenen Gaseinsatz. Der Vergleich der optimalen Fahrgeschwindigkeit erlaubt zusätzlich Rückschlüsse auf die für eine ausreichende Schlagkraft notwendige Arbeitstemperatur und Strömungsgeschwindigkeit des wärmeübertragenden Gases.

5.3.4.1 Modellannahmen

Für das Gerätekonzept "Abflammen" wurde von der optimierten Variante mit Gebläsebrenner ausgegangen (Standarddatensatz "Gebläsebrenner" (Tab. 9). Der Gasdurchsatz am Brenner wurde mit 12 kg/hm festgelegt. Der Luftüberschuß der Verbrennung betrug 1,0. Die Abdeckung war 1,5 m lang, am Anfang 15 cm hoch und flachte zum Ende auf 5 cm ab. Der k-Wert der Abdeckung wurde mit 1 W/m²K festgelegt. Der Flammenaustritt erfolgte gegen die Fahrtrichtung. Für die Auslegung des LTW wurde vom Standarddatensatz "LTW" ausgegangen. Die Arbeitstemperatur wurde mit 400°C, die Strömungsgeschwindigkeit mit 8 m/s gewählt. Die Wärmeerzeugung erfolgte mit einem modulierenden Gebläsebrenner. Damit ist auch die "lastabhängige" Brennerleistung des LTW für den Gerätevergleich interessant und wird im Ergebnisteil dargestellt. Der Luftüberschuß der Verbrennung betrug analog zum Gerätekonzept "Abflammen" 1,0. Der am Boden offene Teil der Abdeckung war 2 m lang und 0,2 m hoch. Der k-Wert der gesamten Abdeckung wurde analog zum Gerätekonzept "Abflammen" mit 1 W/m²K festgelegt. Die Strömungsrichtung erfolgte aufgrund der Annahme eines ausreichend druckstabilen Gebläses in Fahrtrichtung. Die Geräteauslegung ist identisch mit dem Standarddatensatz "LTW" (Tab. 8).

Die optimale Fahrgeschwindigkeit zur Bekämpfung eines Modellpflanzenbestandes wird von der Größe der Modellpflanze, von der notwendigen Schädigungstiefe und von der Bestandsdichte (kg/m²) beeinflusst. Für den Gerätevergleich wurde deshalb der Modellpflanzendurchmesser in einem Bereich von 1 mm bis 5 mm und die Bestandsdichte in einem Bereich von 0,1 kg/m² bis 1,0 kg/m² variiert. Eine unterschiedliche "thermische Empfindlichkeit" der Modellpflanzen wurde analog zu den bisherigen Simulationen über zwei Schädigungstiefen (0,05 mm, Mitte) abgebildet.

Tab. 9: Standarddatensatz "Gebläsebrenner"

Gerät (einschließlich Tab. 2)			
Brennerdurchsatz:	$P_{\text{Brenner}} = 12 \text{ kg/hm}$	Abdeckung:	$h_{\text{Abd}} = 15 \text{ cm (vorn)}$
Luftüberschuß:	$n_{\text{Luft}} = 1,0$		$h_{\text{Abd}} = 5 \text{ cm (hinten)}$
Maximaltemperatur:	$T_{\text{Gas}} = 1820 \text{ °C}$		$l_{\text{Abd}} = 1,5 \text{ m}$
Arbeitsrichtung:	rückwärts		$b_{\text{Abd}} = 1,0 \text{ m}$
			$k_{\text{Abd}} = 1 \text{ W/m}^2\text{K}$
Modellpflanzen (einschließlich Tab. 3)			
Durchmesser:	$d_{\text{MP}} = 2 \text{ mm}$	Bestandsdichte:	$B_{\text{MP}} = 0,5 \text{ kg/m}^2$
Klima			
Lufttemperatur:	$T_{\text{Luft}} = 20 \text{ °C}$		
Boden (siehe Tab. 4)			

5.3.4.2 Ergebnisse

Die optimale Fahrgeschwindigkeit verringert sich mit zunehmender Bestandsdichte für beide Gerätekonzepte (Abb. 40).

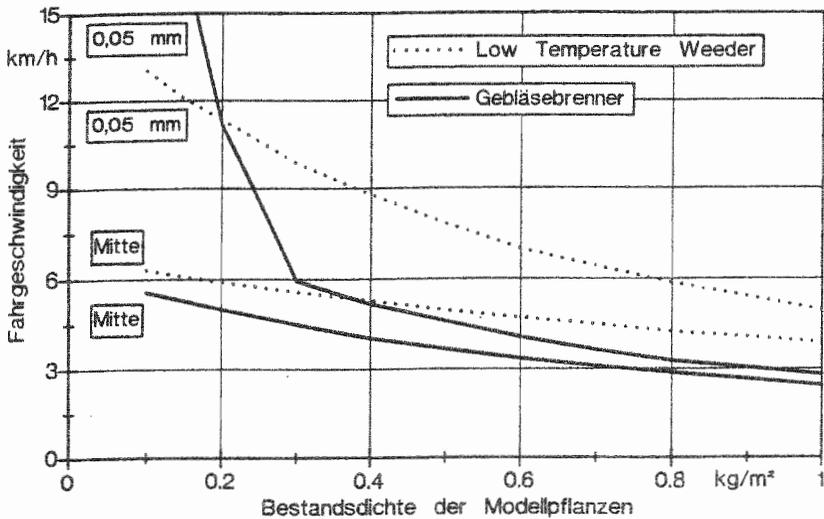


Abb. 40: Einfluß der Bestandsdichte auf die optimale Fahrgeschwindigkeit für das Abtöten eines Modellpflanzenbestandes mit den Gerätekonzepten "Gebläsebrenner" und "LTW" für zwei verschiedene Schädigungstiefen in den Modellpflanzen (Simulation: Standarddatensätze "Gebläsebrenner", "LTW")

Die für die Simulationen gewählte Auslegung des LTW ermöglicht fast durchweg höhere Fahrgeschwindigkeiten als die des Gebläsebrenners. Nur für eine geringe Schädigungstiefe von 0,05 mm und einer Bestandsdichte unter 0,2 kg/m² errechnet sich für den Gebläsebrenner eine höhere optimale Fahrgeschwindigkeit. Bei einer Bestandsdichte von 0,5 kg/m² erlaubt der LTW eine um 68 %, bei einer doppelten Bestandsdichte eine um 75% höhere Fahrgeschwindigkeit. Beträgt der Unterschied für die Schädigung des gesamten Gewebes der Modellpflanze bei einer Bestandsdichte von 0,5 kg/m² zwischen dem Gebläsebrenner und dem LTW noch 34 %, so erhöht sich dieser Unterschied bei einer Verdoppelung der Bestandsdichte auf 59 %.

Ganz anders verhalten sich diese Unterschiede beim Vergleich des entsprechenden flächenbezogenen Gaseinsatzes (Abb. 41).

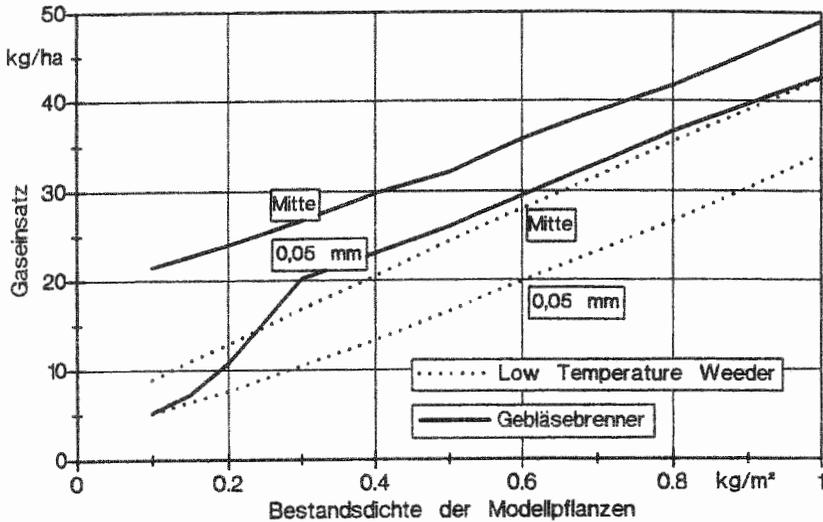


Abb. 41: Einfluß der Bestandsdichte auf den flächenbezogenen Gaseinsatz für das Abtöten eines Modellpflanzenbestandes mit den Gerätekonzepten "Gebläsebrenner" und "LTW" für zwei verschiedene Schädigungstiefen in den Modellpflanzen (Simulation: Standarddatensätze "Gebläsebrenner", "LTW")

Dieser steigt mit zunehmender Bestandsdichte für beide Gerätekonzepte an. Die für die Simulationen gewählte Auslegung des LTW ermöglicht fast durchweg niedrigere flächenbezogene Gaseinsätze als die des Gebläsebrenners. Nur für eine geringe Schädigungstiefe von 0,05 mm und einer Bestandsdichte unter 0,2 kg/m² errechnet sich für den Gebläsebrenner ein niedrigerer Wert. Bei einer Bestandsdichte von 0,5 kg/m² ermöglicht der LTW einen um 29 %, bei einer doppelten Bestandsdichte nur noch einen um 15 % höheren Gaseinsatz. Beträgt der Unterschied für die Schädigung des gesamten Gewebes der Modellpflanze bei einer Bestandsdichte von 0,5 kg/m² zwischen dem Gebläsebrenner und dem LTW noch 48 %, so verringert sich dieser Unterschied bei einer Verdoppelung der Bestandsdichte auf 26 %.

Für den notwendigen **Gasdurchsatz am Brenner** in Abhängigkeit von der **Bestandsdichte** der Modellpflanzen ergibt sich folgender Zusammenhang (Abb. 42):

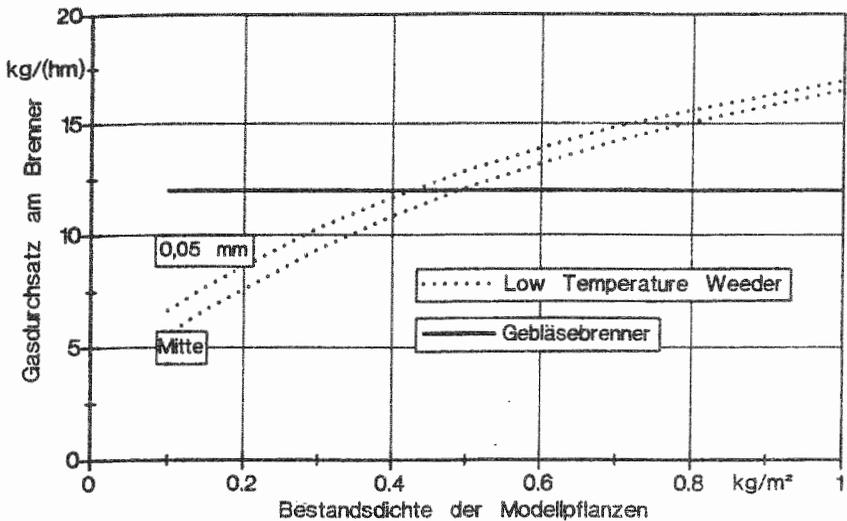


Abb. 42: Gasdurchsatz am Brenner für das Abtöten eines Modellpflanzenbestandes mit den Gerätekonzepten "Gebläsebrenner" und "LTW" in Abhängigkeit von der Bestandsdichte für zwei verschiedene Schädigungstiefen in den Modellpflanzen (Simulation: Standarddatensätze "Gebläsebrenner", "LTW")

Beim Gerätekonzept "Gebläsebrenner" ist der Gasdurchsatz am Brenner mit 12 kg/h m fest eingestellt. Der "LTW" besitzt dagegen eine lastabhängige Regelung des Gasdurchsatzes am Brenner. Mit zunehmendem Durchmesser der Modellpflanze nimmt hier der notwendige Gasdurchsatz am Brenner unabhängig von der angestrebten Schädigungstiefe ab. Für eine Schädigungstiefe von 0,05 mm und einen Durchmesser von 1 mm ist eine Brennerleistung von 19,8 kg/h m notwendig. Für einen Durchmesser von 5 mm nur noch 6,5 kg/h m. Für eine Schädigung des gesamten Gewebes der Modellpflanze und einen Durchmesser von 1 mm ist ebenfalls eine Brennerleistung von 19,8 kg/h m notwendig. Für einen Durchmesser von 5 mm sinkt diese auf 5,5 kg/h m. Damit errechnet sich für den Brenner (Standarddatensatz "LTW") ein maximaler Stellbereich von 1 : 3,6.

Für den LTW verringert sich mit zunehmendem Durchmesser der Modellpflanze die optimale Fahrgeschwindigkeit für beide Schädigungstiefen (Abb. 43).

Beim Gebläsebrenner steigt für eine Schädigungstiefe von 0,05 mm die optimale Fahrgeschwindigkeit mit zunehmendem Pflanzendurchmesser leicht an. Für eine Schädigung des gesamten

Fahrgeschwindigkeit. Vergleicht man die beiden Gerätekonzepte, so ermöglicht der LTW für eine Schädigungstiefe von 0,05 mm bis zu einem Pflanzendurchmesser von etwa 4,3 mm eine höhere Fahrgeschwindigkeit. Darüber hinaus errechnet sich ein leichter Vorteil für den Gebläsebrenner. Für eine Schädigung des gesamten Gewebes der Modellpflanze ergibt sich für den LTW für eine Schädigungstiefe von 0,05 mm bis zu einem Pflanzendurchmesser von 4 mm eine höhere Fahrgeschwindigkeit. Für höhere Pflanzendurchmesser errechnet sich eine in etwa gleiche optimale Fahrgeschwindigkeit.

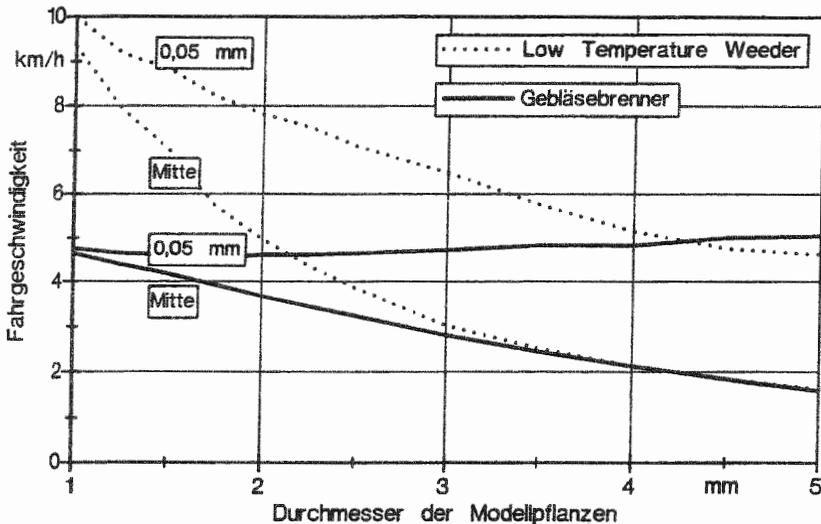


Abb. 43: Einfluß des Durchmessers der Modellpflanze auf die optimale Fahrgeschwindigkeit für das Abtöten eines Modellpflanzenbestandes mit den Gerätekonzepten "Gebläsebrenner" und "LTW" für zwei verschiedene Schädigungstiefen in den Modellpflanzen (Simulation: Standarddatensätze "Gebläsebrenner", "LTW")

Ganz anders verhalten sich die Unterschiede beim Vergleich des entsprechenden flächenbezogenen Gaseinsatzes (Abb. 44).

Der flächenbezogene Gaseinsatz für den LTW liegt durchwegs niedriger als der Gaseinsatz für den Gebläsebrenner. Für eine Schädigungstiefe von 0,05 mm nimmt bei beiden Gerätekonzepten der flächenbezogene Gaseinsatz mit zunehmendem Durchmesser der Modellpflanze leicht ab. Der LTW ermöglicht bei einem Pflanzendurchmesser von 2 mm (Standarddatensatz) einen um 23 %, bei einem Pflanzendurchmesser von 5 mm einen um 55 % niedrigeren flächenbezogenen Gaseinsatz. Für eine Schädigung des gesamten Gewebes der Modellpflanze steigt bei beiden Gerätekonzepten der

Schädigung des gesamten Gewebes der Modellpflanze steigt bei beiden Gerätekonzepten der flächenbezogene Gaseinsatz mit zunehmendem Durchmesser der Modellpflanze an. Für den LTW errechnet sich bei einem Pflanzendurchmesser von 2 mm (Standarddatensatz) ein um 27 %, bei einem Pflanzendurchmesser von 5 mm ein um 41 % niedrigerer flächenbezogener Gaseinsatz.

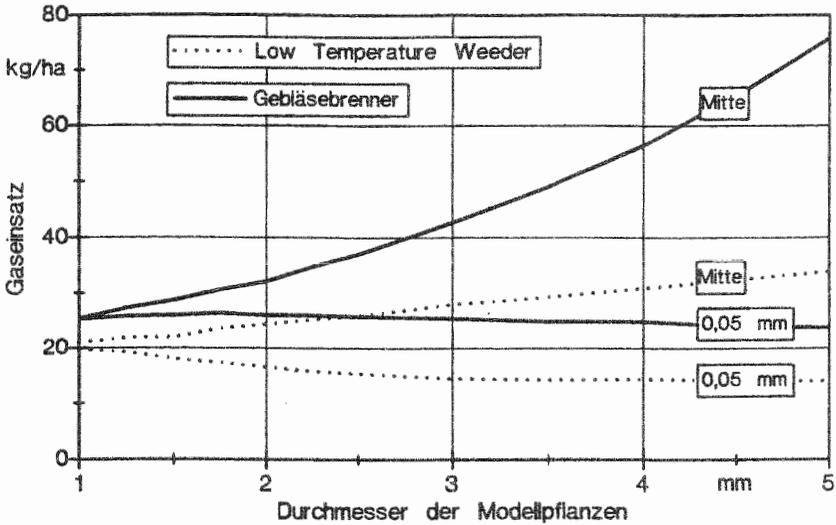


Abb. 44: Einfluß des Durchmessers der Modellpflanze auf den flächenbezogenen Gaseinsatz für das Abtöten eines Modellpflanzenbestandes mit den Gerätekonzepten "Gebläsebrenner" und "LTW" für zwei verschiedene Schädigungstiefen in den Modellpflanzen (Simulation: Standarddatensätze "Gebläsebrenner", "LTW")

Für den notwendigen Gasdurchsatz am Brenner in Abhängigkeit vom Durchmesser der Modellpflanze ergibt sich folgender Zusammenhang (Abb. 45):

Der Gasdurchsatz am Brenner ist für das Gerätekonzept "Gebläsebrenner" mit 12 kg/h m fest eingestellt. Der "LTW" dagegen besitzt eine lastabhängige Regelung des Gasdurchsatzes am Brenner. Mit zunehmender Dichte des Modellpflanzenbestandes nimmt hier die notwendige Brennerleistung unabhängig von der Schädigungstiefe zu. Für eine Schädigungstiefe von 0,05 mm und einer Bestandsdichte von 0,1 kg/m² ist ein Gasdurchsatz am Brenner von 6,3 kg/h m notwendig. Für eine Bestandsdichte von 1,0 kg/m² ein Gasdurchsatz von 16,6 kg/h m notwendig. Für eine Schädigung des gesamten Gewebes der Modellpflanzen und einem Durchmesser von 1 mm errechnet sich ein notwendiger Gasdurchsatz am Brenner von 6,6 kg/h m. Für einen Durchmesser von 5 mm steigt dieser auf

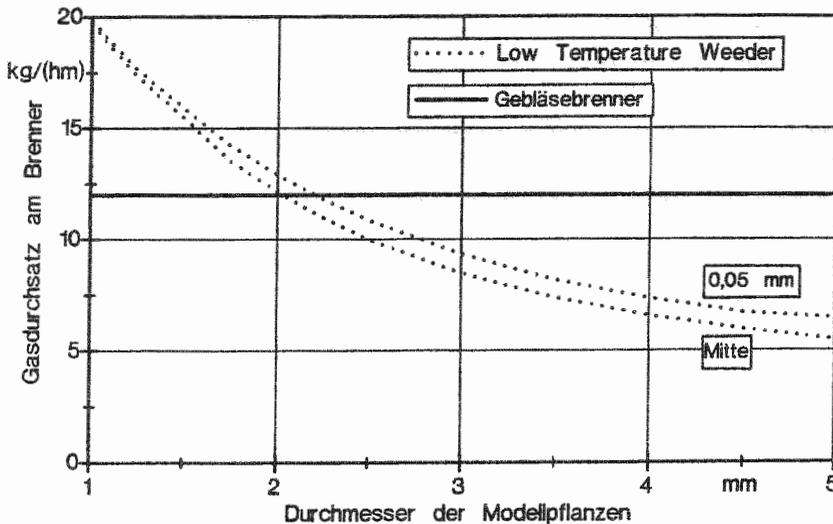


Abb. 45: Gasdurchsatz am Brenner für das thermische Abtöten eines Modellpflanzenbestandes mit den Gerätekonzepeten "Gebläsebrenner" und "LTW" in Abhängigkeit vom Durchmesser der Modellpflanze für zwei verschiedene Schädigungstiefen in den Modellpflanzen (Simulation: Standarddatensätze "Gebläsebrenner", "LTW")

5.3.4.3 Schlußfolgerungen

Der LTW ermöglicht fast durchweg deutlich höhere **Fahrgeschwindigkeiten** als das mit einem Gebläsebrenner ausgerüstete Gerätekonzepet "Abflammen". Allerdings ist die optimale Fahrgeschwindigkeit zum Abtöten eines definierten Modellpflanzenbestandes für beide Gerätekonzepete nur eine Frage der Auslegung. Für die Einordnung der für den LTW gewählten Arbeitstemperatur und Strömungsgeschwindigkeit des wärmeübertragenden Gastromes ist ein Vergleich der optimalen Fahrgeschwindigkeit aber zwingend notwendig. Aufgrund der errechneten Ergebnisse kann die für den LTW gewählte Auslegung als ausreichend bezeichnet werden.

Der Energiespareffekt des Gerätekonzepetes "LTW" kommt genau dann zum tragen, wenn für das Vergleichsgerät (Gebläsebrenner) ungünstige Voraussetzungen herrschen. Niedrige Bestandsdichten und große Modellpflanzen in Verbindung mit einer hohen notwendigen Schädigungstiefe zwingen das Gerätekonzepet "Abflammen" zu einer langsamen Fahrgeschwindigkeit. Da bei diesem

Gerätekonzept der **flächenbezogene Gaseinsatz** über den festen Gasdurchsatz am Brenner an die Fahrgeschwindigkeit gekoppelt ist, ergeben sich zwangsläufig hohe Gaseinsätze zur Erreichung des Behandlungszieles. Beim Gerätekonzept "LTW" ist der flächenbezogene Gaseinsatz von der Fahrgeschwindigkeit entkoppelt. Bei niedriger Last muß über den Gebläsebrenner weniger Energie zur Erreichung der Arbeitstemperatur zugeführt werden. Dies erfordert eine entsprechende Regelung des modulierenden Gebläsebrenners. Die Auslegung des Gebläsebrenners hängt von der angestrebten Fahrgeschwindigkeit ab. In den Simulationen wurde ein lastabhängiger Gasdurchsatz am Brenner von 5,5 kg/h m (72,1 kW/h m) bis 19,8 kg/h m (259,4 kW/h m) errechnet. Damit ist für den modulierenden Gebläsebrenner ein Stellbereich von 1 : 3,6 erforderlich.

6 Meßtechnische Überprüfung des thermodynamischen Modells und der ausgeführten Gerätekonzepte

In diesem Teil der Arbeit erfolgte auf der Grundlage der methodischen Ansätze "Speed (Dose)/Response" und "Temperaturmessung" eine meßtechnische Überprüfung der optimierten Gerätekonzepte. Durch die Kombination der Meßergebnisse mit den Rechenergebnissen sollte das thermodynamische Modell überprüft werden.

Für den Gerätevergleich wurde ein offener Stabbrenner, ein Stabbrenner mit einer optimal gestalteten Abdeckung und ein Prototyp des LTW eingesetzt. Der offene Stabbrenner konnte über das thermodynamische Modell nicht abgebildet werden. Er diente in den Versuchen als Vergleichsgröße zur Einordnung der mit den optimierten Gerätekonzepten erzielten Resultate.

Die Frage nach der optimalen Strömungsrichtung der wärmeübertragenden Gase wurde vom Rechenmodell eindeutig zugunsten eines gegen die Fahrtrichtung gerichteten Gasstromes beantwortet. Hier wurde aber davon ausgegangen, daß der damit verbundene Vorteil der Erhöhung der Strömungsgeschwindigkeit relativ zu den Pflanzen über die ganze "wirksame Gerätelänge" umgesetzt werden kann. Da dies zumindest für die strömungsdynamisch sehr labilen atmosphärischen Brenner fraglich ist, mußte vor dem eigentlichen Gerätevergleich die optimale Brennerstellung bzw. Strömungsrichtung der Gase für die ausgeführten Gerätekonzepte meßtechnisch ermittelt werden. Für diese Untersuchungen wurden die Meßkörper eingesetzt.

Im Modell wird die gerätetechnisch bedingte Variabilität des Wärmeeintrags über die Arbeitsbreite nicht berücksichtigt. Die Gleichmäßigkeit des Wärmeeintrags über die Arbeitsbreite ist aber ein wichtiger Einflußfaktor auf die optimale Fahrgeschwindigkeit und den flächenbezogenen Gaseinsatz. Für das vollständige Abtöten eines Unkrautbestandes in einem Arbeitsgang muß so langsam gefahren werden, daß an der Stelle des geringsten gerätebedingten Wärmeeintrages noch ausreichend Wärmeenergie in dort befindliche Pflanze eingetragen wird. Der Ort mit dem geringsten Wärmeeintrag begrenzt die optimale Fahrgeschwindigkeit.

Der Einfluß der relativen Lage der Pflanze bzw. des Meßkörpers in der Grenzschicht zum Boden konnten im thermodynamischen Modell nicht berücksichtigt werden. Deshalb waren für den Vergleich mit den experimentell ermittelten Werten die relativen Unterschiede zwischen den untersuchten Geräten wichtiger als die absoluten Werte. Ein weiterer, im thermodynamischen Modell nicht erfaßter Einfluß ist die Gleichmäßigkeit der physikalischen Systemparameter des wärmeübertragenden Gases über die Arbeitsbreite. Für die Auswertung und Interpretation der Versuchsergebnisse ist dieser Zusammenhang aber sehr wichtig. Deshalb wurde in einem weiteren Vorversuch auf der Basis der Meßkörper für die untersuchten Gerätekonzepte die Verteilung des

verglichen.

6.1 Material und Methode

Auf der Grundlage des methodischen Ansatzes "Speed (Dose)/Response" (ASCARD 1989, 1995) wurden die gemessene und die mittels des thermodynamischen Modells errechnete optimale Fahrgeschwindigkeit und der flächenbezogene Gaseinsatz verschiedener Geräte für die Bekämpfung zweier unterschiedlich "thermisch empfindlicher" Pflanzen verglichen. In die Untersuchungen sollte auch der methodische Ansatz "Temperaturmessung mit nackten Thermoelementen" (STOREHEIER 1989) einbezogen werden. Die Berechnung der Temperaturerhöhung in einem Thermoelement durch eine thermische Behandlung bereitet aber aufgrund der unregelmäßigen Form der Meßspitze erhebliche Schwierigkeiten. Darüber hinaus erreichen die üblicherweise eingesetzten nackten Thermoelemente sehr schnell hohe Temperaturen, so daß Gastemperaturen unterhalb der momentanen Thermoelementtemperatur nicht mehr temperaturwirksam werden. In diesen Fällen muß die Temperatursumme für die Auswertung herangezogen werden (STOREHEIER 1991, ASCARD 1995). Zur Umgehung dieser Problematik und für die Einbindung des methodischen Ansatzes "Temperaturmessung" in das thermodynamische Modell war es notwendig entsprechend geeignete standardisierte Meßkörper zu entwickeln. Mit in unmittelbarer Nähe der Pflanzen platzierten Meßkörpern konnte der entsprechende Wärmeeintrag erfaßt und dem entsprechenden Bekämpfungserfolg zugeordnet werden. Parallel dazu wurde mit dem thermodynamischen Modell die optimale Fahrgeschwindigkeit zum Abtöten der Pflanzen und die entsprechende Erwärmung der Meßkörper berechnet.

6.1.1 Testpflanzen

Für die Versuche wurden zwei thermisch unterschiedlich "empfindliche" Testpflanzen verwendet. Als "thermisch empfindliche" Pflanze wurde die Mungbohne (*Vigna radiata* (L.) var. *radiata*) eingesetzt. Behandelt wurde, wenn die Pflanze zwei Laubblätter aufwies. Die Stengelhöhe schwankte zwischen 6 cm und 10 cm. Als für das Abtöten der Pflanze ausreichende Minimalschädigung konnte in den Versuchen zum Schädigungsmechanismus eine oberflächliche Erwärmung eines Stengelabschnittes ermittelt werden. Der Stengel trocknete im geschädigten Abschnitt je nach Lufttemperatur und Einstrahlung innerhalb weniger Stunden bis mehreren Tagen vollständig ein. Ausgewertet wurde drei Tage nach der Behandlung.

Als thermisch "tolerante" Pflanze wurde Weizen (*Triticum aestivum* L.) eingesetzt. Behandelt wurde, wenn die Pflanzen 4 - 6 Laubblätter aufwiesen (Entwicklungsstadium 14 - 16 (ZADOKS et al. 1974). In Vorversuchen wurde für dieses Entwicklungsstadium als Mindestschädigung eine

ausreichende Erwärmung des oberen Teils der untersten Blattscheide ermittelt. Die abgestorbene Spitze der Blattscheide verklebte so, daß die Pflanze keine weiteren Blätter durchschieben konnte. Da ein Neuaustrieb (Bestockung) von der Pflanzenbasis in diesem Wachstumsstadium noch nicht möglich war, wurde so die Pflanze über einen längeren Zeitraum am Weiterwachsen gehindert und starb dann ab. Ausgewertet wurde 14 Tage nach der Behandlung. Die Pflanzen wurden in Jiffy-Pots angezogen. Um den Einfluß der Streuung innerhalb der Pflanzen zu vermindern, wurden zu große und zu kleine Pflanzen aussortiert.

6.1.2 Meßkörper

Für die Einbindung des methodischen Ansatzes "Temperaturmessung" in das thermodynamische Modell wurden entsprechend geeignete standardisierte Meßkörper entwickelt (Abb. 49).

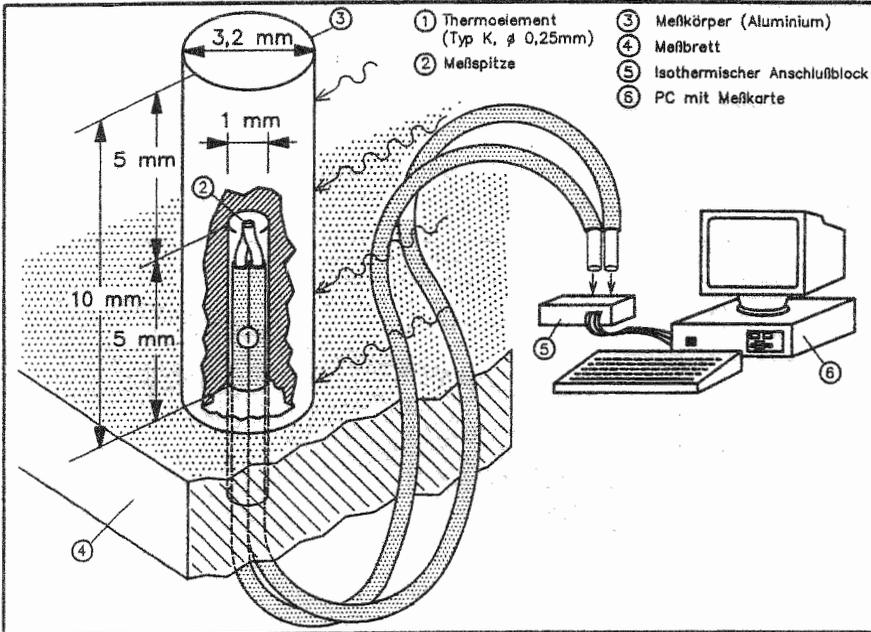


Abb. 46: Meßkörper zur vergleichenden Messung des Wärmeeintrags während der Überfahrt mit einem Gerät zur thermischen Unkrautbekämpfung

Um die Berechnung möglichst zu vereinfachen, wurde für die Meßkörper, analog der Modellpflanze, eine zylindrische Form gewählt. Der Meßkörper wurden so dimensioniert, daß der Temperatur-

anstieg durch die thermische Behandlung im Normalfall unter 100 K lag. Damit ist es möglich, auch bei niedrigen Gastemperaturen noch einen Wärmeeintrag in den Meßkörper zu gewährleisten. Die Temperaturerhöhung soll aber hoch genug sein, um auch bei niedrigen Werten noch eine ausreichende Meßgenauigkeit zu erhalten. Für die Versuche wurden Meßkörper aus Aluminium (3) mit einem Durchmesser von 3,2 mm und einer Höhe von 1 cm eingesetzt. Auf der unteren Querschnittsfläche wurde für das Thermoelement (Typ K, 0,25 mm Einzeldrahtdurchmesser) mittig eine etwa 5 mm tiefe Bohrung mit 1 mm Durchmesser angebracht (1). Der Meßort des Thermoelementes befindet sich damit exakt in der Mitte des Meßkörpers (2). Die hohe Wärmeleitfähigkeit des Aluminiums minimiert den Einfluß des Temperaturgradienten über den Meßkörperquerschnitt und erlaubt so eine Bestimmung des Energieeintrags durch die Messung der entsprechenden Temperaturerhöhung mit nur einem Thermoelement. Die Meßdatenerfassung erfolgte über einen isothermischen Anschlußblock (5) und einem PC mit Meßkarte (6). Da Energieeintrag und Temperaturerhöhung für den Meßkörper direkt proportional sind, genügte es, für die Auswertung die Temperaturerhöhung heranzuziehen.

6.1.3 Versuchsstand und Meßaufbau

Die Untersuchungen wurden auf einer in einem Gewächshaus errichteten Versuchsstrecke mit angetriebenen Gerätetragrahmen durchgeführt (Abb. 47).

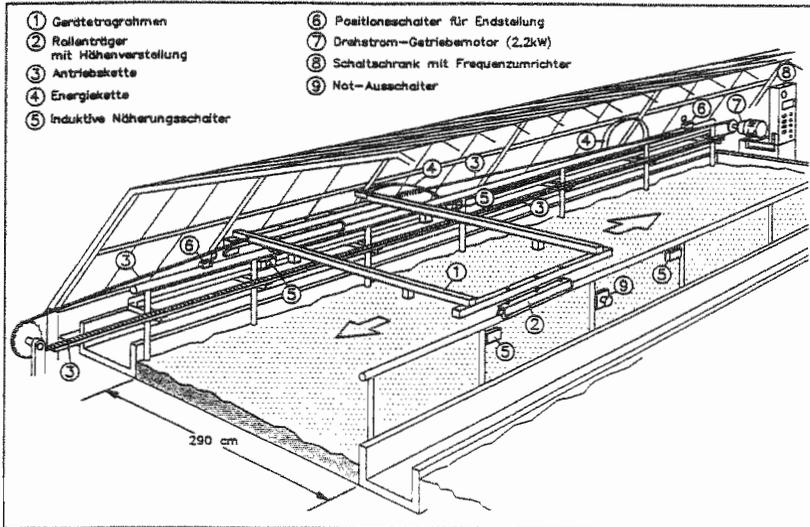


Abb. 47: Versuchsstrecke mit angetriebenen Gerätetragrahmen

Die Geräte werden in einem auf aufgeständerten Rohren laufenden Tragrahmen (1) (System "Mobil-tisch") eingehängt, der mittels einer umlaufenden Kette (6) und einem Drehstrom-Getriebemotor (7) (1,5 kW) über ein Bodenbeet angetrieben wird. Die Einstellung der Geschwindigkeit erfolgt über einen Frequenzumrichter (8). Die Länge der gesamten Versuchsstrecke beträgt 22 m, die Breite 2,92 m. Über Gewindeschrauben (2) kann eine exakte Höheneinstellung der Geräte vorgenommen werden. Nach der Beschleunigungsphase hält der Tragrahmen die gewählte Geschwindigkeit und überfährt den in der Mitte der Versuchsstrecke eingerichteten Meßabschnitt (Abb. 48). Anschließend wird durch das Überfahren der induktiven Näherungsschalter (5) der Bremsvorgang ausgelöst. An beiden Enden der Versuchsstrecke befindet sich jeweils ein Positionsschalter (6) für die Endstellung des Tragrahmens. Die für die Heizregister und das Gebläse des LTW erforderliche Stromzufuhr zum Tragrahmen erfolgt mittels einer Energiekette (4). Der Meßabschnitt befand sich in der Mitte des Bodenbeetes (Abb. 48).

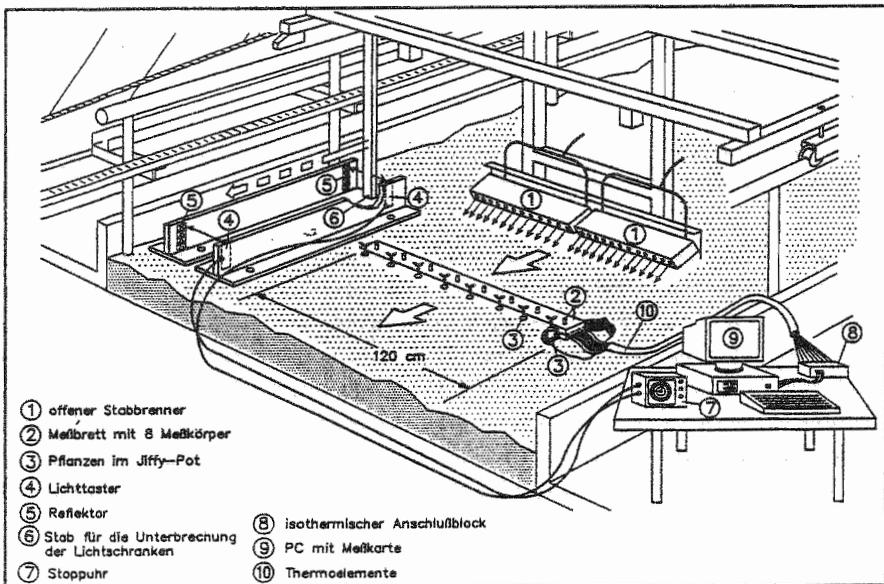


Abb. 48: Meßaufbau für die meßtechnische Überprüfung von Geräten zur thermischen Unkrautbekämpfung

Um die Querverteilung der Wärmeübertragungsleistung beurteilen zu können, wurde die Arbeitsbreite der Geräte (1,2 m) in 8 Abschnitte unterteilt und in die Mitte jedes Abschnitts ein Meßkörper

gestellt. Für die Sicherstellung einer einheitlichen Meßhöhe wurden die Meßkörper nicht auf den Boden, sondern auf ein 10 cm breites Brett gestellt (2). Das Brett wurde so tief eingegraben, daß die Brettoberfläche und die Bodenoberfläche identisch waren. Um den Einfluß der Bodenoberfläche zu vergleichmäßigen, wurde die Bodenoberfläche im Meßabschnitt planiert. Die Einstellung der Gerätehöhe erfolgte in bezug auf das Meßbrett. Die Testpflanzen wurden in den Versuchen unmittelbar hinter den Meßkörpern eingegraben (3). Pro Versuchsfahrt wurde hinter jedem Meßkörper eine Pflanze gesetzt, so daß jeweils 8 Pflanzen und 8 Temperaturdifferenzen für die Auswertung zur Verfügung standen.

Die Messung der erreichten Geschwindigkeit am Meßabschnitt erfolgte über zwei Lichtschranken (4, 5) und einer hochgenauen Uhr (7). Eine am Rahmen angebrachte Latte unterbrach die erste Lichtschranke und löste die Uhr aus. Die anschließende Unterbrechung der zweiten Lichtschranke stoppte die Zeitmessung. Aus der Laufzeit und dem Abstand der Lichtschranken wurde die Fahrgeschwindigkeit ermittelt.

6.1.4 Versuchsgeräte

Für den Gerätevergleich wurde ein offener Stabbrenner, ein Stabbrenner mit einer optimal gestalteten Abdeckung und ein Prototyp des LTW eingesetzt:

Das Abflamngerät (Firma Reinert) bestand aus 2 Stabbrennern mit einer Gesamtarbeitsbreite von 1,20 m (4), zwei in einem beheizbaren Wasserbad (5) stehenden Gasflaschen (1) (je 11 kg Fassungsvermögen) und den entsprechenden Zuleitungen und Armaturen (3) (Abb. 49). Über ein Druckventil (2) konnte der Arbeitsdruck in einem Bereich zwischen 0 und 2,5 bar verstellt werden. Damit war ein maximaler Gasdurchsatz am Brenner von 17,1 kg/hm möglich. Vom Hersteller wurde ein Arbeitsdruck von mindestens 1,75 bar (12 kg/hm) und eine angepaßte Fahrgeschwindigkeit zwischen 2 und 4 km/h empfohlen. In den Versuchen wurde der Betriebsdruck für den offenen und den abgedeckten Stabbrenner auf 2 bar eingestellt. Damit ergab sich ein Gasdurchsatz am Brenner von 13,7 kg/hm (179,5 kWh/hm).

Für die Variante "offener Stabbrenner" (Abb. 49) wurde der Brenner in einem Winkel von 45° gegen den Boden gerichtet. Die Höhe des Brennermundes über dem Boden betrug 10cm.

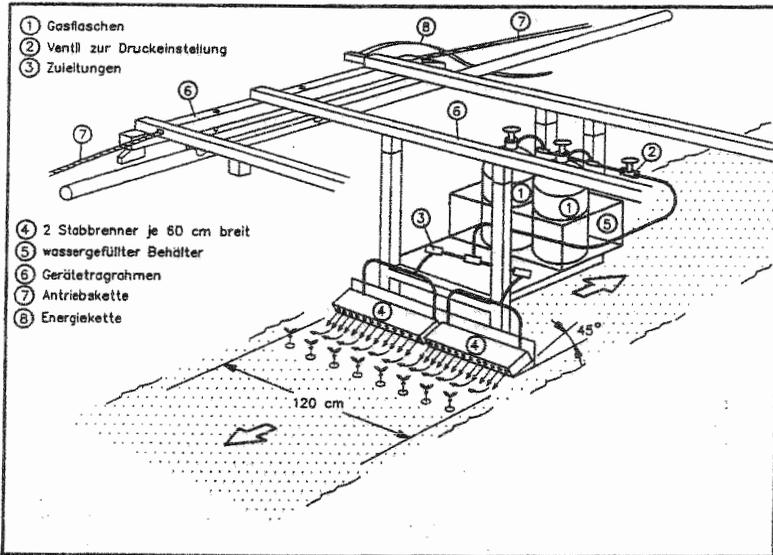


Abb. 49: Offener Stabbrenner

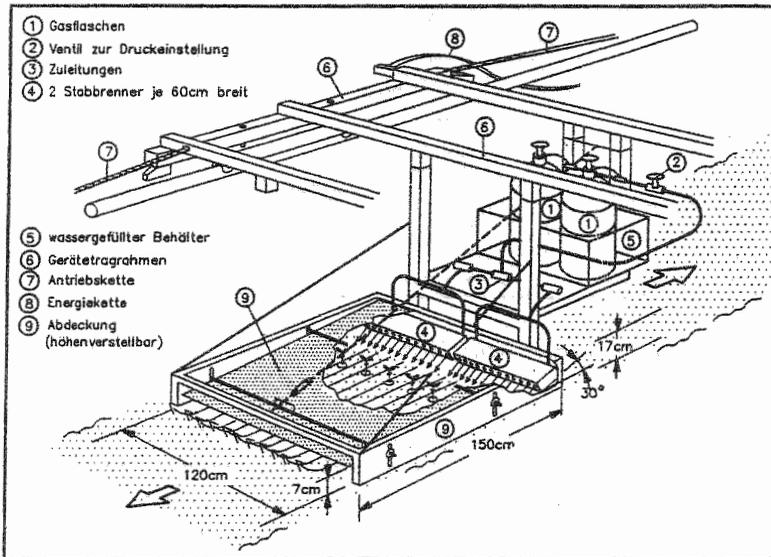


Abb. 50: Stabbrenner mit Abdeckung

Für die Variante "abgedeckter Stabbrenner" (Abb. 50) wurden dieselben Brenner wie bei der Variante "offener Stabbrenner" eingesetzt. Die Brenner wurden hier in einem etwas flacheren Winkel (30°) gegen den Boden gerichtet. Die Höhe des Brennermundes über dem Boden betrug nur 6 cm. Die Abdeckung (9) war 1,2 m breit und 1,5 m lang. Auf der Brennerseite wies sie eine Höhe von 17 cm auf und flachte zum Ende hin auf 7 cm ab. Auf eine zusätzliche Isolierung wurde für das Versuchsgerät verzichtet.

Der Prototyp des "LTW" (Abb. 51) wurde in Zusammenarbeit mit einer Lüftungsbaufirma und der Werkstatt der bayrischen Landesanstalt für Landtechnik konzipiert und gebaut.

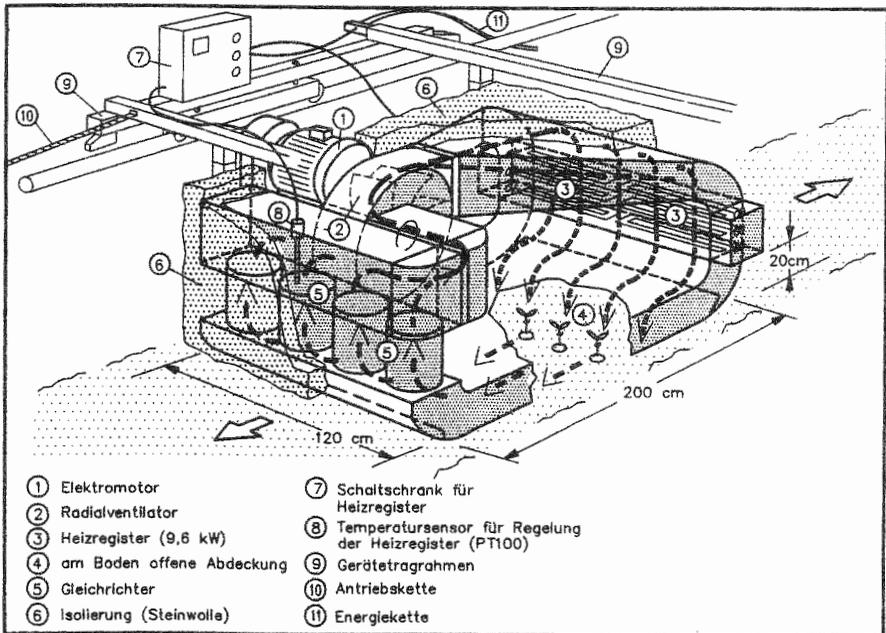


Abb. 51: Prototyp des Gerätekonzepts "Low Temperature Weeder" zur thermischen Unkrautbekämpfung

Mit einer Arbeitsbreite von 1,20 m und einer Länge der am Boden offenen Abdeckung von 2,0 m wurde er für den Einsatz im Beetanbau dimensioniert. Die Isolierung erfolgte mit 5 cm starken Brandschutzmatten aus Steinwolle (Einsatzbereich bis 700°C). Ein temperaturbeständiger Radialventilator (maximale Dauertemperatur: 300°C , externe Druckerhöhung: 730 Pa) mit einem Leistungsbedarf von 0,9 kW sorgte für eine mittlere Strömungsgeschwindigkeit von 2,5 m/s unter

der am Boden offenen Abdeckung. Ein stärkeres Gebläse wäre aus versuchstechnischen Gründen wünschenswert gewesen, konnte aber aus dem dafür zur Verfügung stehenden Etat nicht finanziert werden. Die entsprechende Auslegung des Gebläses wurde von der Lüftungsbaufirma durchgeführt. Da sich die Versuchsstrecke in einem Gewächshaus befand, wurde aus Sicherheitsgründen die Wärmeerzeugung nicht mit Brennern, sondern mit einem geregelten elektrischen Heizregister vorgenommen. Die begrenzte Anschlußleistung im Gewächshaus ließ nur eine Gesamtleistung für die Heizregister von 9,6 kW (8 kW/m) zu. Diese im Vergleich zum Stabbrenner sehr niedrige Leistung (179,5 kW/m bei 2 bar Arbeitsdruck) führte in Verbindung mit der großen metallischen Masse (240 kg) zu entsprechend langen Aufheizzeiten.

6.1.5 Modellannahmen

Durch die entsprechende Festlegung des Durchmessers der Modellpflanze und der notwendigen Schädigungstiefe wurden die Testpflanzen im Rechenmodell abgebildet. Der Schädigungsort wies für beide Modellpflanzen eine annähernd zylindrische Form auf. Damit konnte für den Durchmesser der Modellpflanze der mittlere gemessene Durchmesser am Schädigungsort verwendet werden. Für die notwendige Schädigungstiefe wurde beim Winterweizen aufgrund der Ergebnisse der Vorversuche eine Schädigung des gesamten Gewebes der Modellpflanze zugrunde gelegt. Für die Mungbohne konnte aufgrund der Versuche zum Schädigungsmechanismus (Kap. 4.1.4) von einer geringeren notwendigen Schädigungstiefe im Stengel ausgegangen werden. Für die Modellpflanze wurde deshalb eine geringe notwendige Schädigungstiefe von 0,05 mm festgelegt.

Die Berechnung des Temperaturverlaufes im Meßkörper erfolgte analog dem Schichtenmodell für die Modellpflanze. Dabei wurden die Stoffkennwerte der Modellpflanze durch die Stoffkennwerte von Aluminium ersetzt (Tab. 10).

Tab. 10: Standarddaten für den Meßkörper (Aluminium)

Wärmeleitfähigkeit:	$\lambda_{MK} = 231$	[W/mK]
Dichte:	$\rho_{MK} = 2698,9$	[kg/m ³]
spez. Wärmekapazität:	$c_{p(MK)} = 896$	[kJ/kgK]
Wasserbedeckungsfaktor:	$\xi_{MK} = 0$	[-]
Emissionsverhältnis:	$\epsilon_{MK} = 0,1$	[-]

Problematisch war die Festlegung des Emissionsverhältnisses der Meßkörperoberfläche. Das Emissionsverhältnis metallischer Oberflächen ist deutlich niedriger als der pflanzlicher. Je nach Zustand der Oberfläche ergibt sich aber ein anderer Wert. Oxidationsprozesse oder Verschmutzung durch Staub führen zu höheren Werten. Für die Simulation wurde er mit 0,1 festgelegt. Bei Gasen mit einem entsprechend hohen Wassergehalt erfolgt in der ersten Phase der thermischen Behandlung ein Wärmeeintrag durch Kondensation. Das auf der Meßkörperoberfläche befindliche Wasser erhöht den Absorptionskoeffizienten erheblich. In dieser Phase wurde mit einem Wert von 0,9 gerechnet.

Für das thermodynamische Modell mußte die insgesamt für den Wärmeeintrag zur Verfügung stehende Oberfläche der Pflanzen und der Meßkörper definiert werden. Für die Meßkörper wurde die Oberfläche errechnet und in eine entsprechende Bestandsdichte (kg/m²) umgerechnet. Für die Pflanzen war die Bestimmung der Gesamtoberfläche schwierig. Hier wurde der Wert geschätzt.

Der Prototyp des LTW wurde mit Heißluft betrieben. Dies mußte für die Berechnung des konvektiven Wärmeübergangskoeffizienten berücksichtigt werden. Für die Berechnung der latenten Wärmeströme wurde der Wassergehalt der Heißluft mit 0,01 kg/kg festgelegt. Die Ermittlung des flächenbezogenen Gaseinsatzes erfolgt nachträglich aufgrund der tatsächlich übertragenen Wärmemengen. Für die Energieerzeugung wurde fiktiv von einem modulierenden Gebläsebrenner mit einem Luftüberschuß von 1,0 ausgegangen. Damit war es möglich, den flächenbezogenen Gaseinsatz der LTW mit dem der anderen Geräte zu vergleichen.

Für die Berechnungen mit dem thermodynamischen Modell wurde von den Standarddatensätzen "abgedeckter Stabbrenner" (Tab. 11) und "LTW Prototyp" (Tab. 12) ausgegangen.

Tab. 11: Gerätevariante "abgedeckter Stabbrenner" - Eingangsgrößen für das thermodynamische Modell

Gerät (einschließlich Tab. 2)			
Brennerdurchsatz:	$P = 13.7 \text{ kg/hm}$	Abdeckung:	$h_{\text{Abd}} = 17 \text{ cm}$ (vorn)
Luftüberschuß:	$n_{\text{Luft}} = 1.3$		$h_{\text{Abd}} = 7 \text{ cm}$ (hinten)
Maximaltemperatur:	$T_{\text{Gas}} = 1406 \text{ }^\circ\text{C}$		$l_{\text{Abd}} = 1.5 \text{ m}$
Arbeitsrichtung:	vorwärts/rückwärts		$b_{\text{Abd}} = 1.25 \text{ m}$
			$k_{\text{Abd}} = 20 \text{ W/mK}$
Modellpflanzen (einschließlich Tab. 3)			
Durchmesser:	Meßwert	Bestandsdichte:	$B_{\text{MP}} = 4 \cdot 10^{-3} \text{ kg/m}^2$
Meßkörper (einschließlich Tab. 10)			
Durchmesser:	$d_{\text{MK}} = 3.2 \text{ mm}$	Bestandsdichte:	$B_{\text{MK}} = 4 \cdot 10^{-4} \text{ kg/m}^2$
Klima			
Lufttemperatur:	$T_{\text{Luft}} = 20 \text{ }^\circ\text{C}$		
Boden (siehe Tab. 4)			

Tab. 12: Gerätevariante "Low Temperature Weeder" - Eingangsgrößen für das thermodynamische Modell

Gerät (einschließlich Tab. 2)			
Brennerdurchsatz:	variabel	Abdeckung	$h_{Abd} = 0,20 \text{ m}$
Luftüberschuß:	$n_{r,luft} = 1,3$		$l_{Abd} = 2 \text{ m}$
Arbeitsrichtung:	vorwärts/rückwärts		$b_{Abd} = 1,25 \text{ m}$
Maximaltemperatur	$T_{Gas} = 300 \text{ °C}$		$k_{Abd} = 1 \text{ W/m}^2\text{K}$
Strömungsgeschw.	$v_{Gas} = 2,5 \text{ m/s}$	Gerät:	$h = 1,0 \text{ m}$
Wassergehalt	$x_{Gas} = 0,01 \text{ kg/kg}$		$A = 14 \text{ m}^2$
Modellpflanzen (einschließlich Tab. 3)			
Durchmesser:	$d_{MP} = \text{variabel}$	Bestandsdichte:	$B_{MP} = 5 \cdot 10^{-3} \text{ kg/m}^2$
Meßkörper (einschließlich Tab. 10)			
Durchmesser:	$d_{MK} = 3,2 \text{ mm}$	Bestandsdichte:	$B_{MK} = 5 \cdot 10^{-3} \text{ kg/m}^2$
Klima			
Lufttemperatur:	$T_{I,luft} = 20 \text{ °C}$		
Boden (siehe Tab. 4)			

6.1.6 Versuchsdurchführung und Auswertung

Für die Erfassung des **Wärmeeintrages in Abhängigkeit von der Arbeitsrichtung** wurden 20 Überfahrten in einem Geschwindigkeitsbereich von 1,4 km/h bis 7,2 km/h durchgeführt. Ausgewertet wurde, analog zu den bisherigen Versuchsanstellungen (STOREHEIER 1991, ASCARD 1995) die mittlere Temperaturerhöhung (K) und die "effektive" Temperaturerhöhung (K/(kg/ha)) in den Meßkörpern in Abhängigkeit von der Fahrgeschwindigkeit. Auf eine Annäherung der entsprechenden Funktionen durch eine Regressionsfunktion wurde in diesem Zusammenhang verzichtet. Parallel dazu wurde die entsprechende Temperaturerhöhung in den Meßkörpern in Abhängigkeit von der Fahrgeschwindigkeit für den abgedeckten Stabbrenner und den LTW errechnet und mit den Meßwerten verglichen.

Für die Erfassung der **Gleichmäßigkeit des Wärmeeintrages über die Arbeitsbreite** wurden 20 Überfahrten bei gleicher Geschwindigkeit durchgeführt. Um den Meßfehler bei allen Varianten gleich zu halten, wurden die Fahrgeschwindigkeiten für die verschiedenen Geräte so festgesetzt, daß in etwa eine gleiche mittlere Temperaturerhöhung in den Meßkörpern (Mittelwert über die

Arbeitsbreite) erfolgte. Zur Bewertung der "Gleichmäßigkeit" des Wärmeeintrages über die Arbeitsbreite und über die Wiederholungen wurde der entsprechende Mittelwert, der Variationskoeffizient (%) der Mittelwerte und die Extremwerte (Minimum, Maximum) herangezogen.

Für die Auswertung wurde der **Bekämpfungserfolg** einer Meßfahrt und die entsprechende mittlere Temperaturerhöhung in den **Meßkörpern** über die **Fahrgeschwindigkeit** aufgetragen. Um die Zahl der Versuchsfahrten auf ein Minimum zu beschränken, wurde die optimale Fahrgeschwindigkeit der Varianten in Vorversuchen eingegrenzt. Für jede Variante wurden im Hauptversuch 12 Versuchsfahrten mit unterschiedlichen Fahrgeschwindigkeiten durchgeführt. Die Auswertung der Ergebnisse erfolgte, analog zu den bisherigen Versuchsanstellungen (ASCARD 1989, 1995) mit Hilfe nicht linearer Regressionsmodelle.

Da in den Experimenten der Bekämpfungserfolg Werte von 0 bis 100 % erreichte, konnte der Zusammenhang zwischen den Einflußfaktoren Fahrgeschwindigkeit und Bekämpfungserfolg über folgende Regressionsfunktion gut angenähert werden:

$$\text{Bek. (\%)} = \frac{100}{\left(1 + \left(\frac{V_{\text{Gerät}}}{a}\right)^b\right)} \quad (42)$$

Der Faktor a legt den Wendepunkt der Funktion fest und ist identisch mit der Höhe des untersuchten Einflußfaktors bei einem Bekämpfungserfolg von 50 %. Der Faktor b bestimmt die Steilheit der Funktion. Je höher der Faktor b , desto größer ist die Steilheit der Regressionsfunktion und desto geringer ist in den Versuchen die Streuung der maßgeblichen Einflußfaktoren. Trotz standardisierter Methodik verbleibt geräteseitig ein Einfluß der Verteilung des Wärmeeintrages über die Arbeitsbreite, pflanzenseitig ein Einfluß der Inhomogenität des Versuchsmaterials. Für einen Bekämpfungserfolg von 100 % muß so langsam gefahren werden, daß am Ort des geringsten Wärmeeintrages noch die größte im Versuch eingesetzte Pflanze bekämpft wird.

Der Vergleich der Ergebnisse erfolgte bei einem Bekämpfungserfolg von 95 % (Lethal Speed(95)), 50 % (LS(50)) und 5 % (LS(05)).

Für die Beschreibung des Zusammenhangs zwischen der Meßkörpererwärmung und dem Bekämpfungserfolg (Lethal Temperature) mußte der Regressionsansatz leicht verändert werden:

$$\text{Bek. (\%)} = \frac{100}{\left(1 + \left(\frac{a}{\Delta T_{MK}}\right)^b\right)} \quad (43)$$

Der Vergleich der Ergebnisse erfolgte bei einem Bekämpfungserfolg von 95 % (Lethal Temperature (95)), 50 % (LT(50)) und 5 % (LT(05)).

Um eine Aussage über den Einfluß der Homogenität des verwendeten Pflanzenmaterials machen zu können, wurde der Pflanzendurchmesser am erwarteten Schädigungsort mit einer Mikrometerschraube gemessen. Daraus wurde der Mittelwert und der Variationskoeffizient zur Beschreibung der Homogenität des Pflanzenmaterials errechnet.

Die entsprechenden **flächenbezogenen Gaseinsätze** für den offenen und den abgedeckten Stab- brenner wurden über die gemessene Fahrgeschwindigkeit und dem eingestellten Betriebsdruck ermittelt. Die Wärmeerzeugung im LTW erfolgte mit elektrischen Heizregistern. Der Leistungsbedarf wurde aus der elektrischen Leistung der Heizregister und der gemessenen Fahrgeschwindigkeit ermittelt und anschließend über den entsprechenden Heizwert in kg/ha Flüssiggas umgerechnet. Eine Regelung der Betriebstemperatur während der Versuchsfahrt war aufgrund der kurzen Zeitdauer und der im Verhältnis zur großen Masse des LTW geringen Heizleistung nicht möglich. Deshalb wurde der flächenbezogene Gaseinsatz aus der Fahrgeschwindigkeit und der installierten Heizleistung errechnet.

Der Vergleich der Ergebnisse erfolgte bei einem Bekämpfungserfolg von (Lethal Dose (95)), 50 % (LD(50)) und 5 % (LD(05))

Im **thermodynamischen Modell** wurde die optimale Fahrgeschwindigkeit zum vollständigen Abtöten des modifizierten Modellpflanzenbestandes (LS(100)), der flächenbezogene Gaseinsatz (LD(100)) und die entsprechende Temperaturerhöhung im Meßkörper (LT(100)) errechnet. Eine Streuung des Wärmeeintrages über die Arbeitsbreite wurde im Rechenmodell ebensowenig abgebildet wie eine Streuung der maßgeblichen Einflußfaktoren des Pflanzenmaterials. Deshalb liegt der Schwerpunkt der Auswertung beim Vergleich der erzielten Unterschiede in der Fahrgeschwindigkeit (flächenbezogener Gaseinsatz) für einen definierten Bekämpfungserfolg.

6.2 Ergebnisse und Schlußfolgerungen

Im folgenden Teil werden die Ergebnisse der meßtechnischen Überprüfung der verschiedenen Gerätekonzepte dargestellt.

6.2.1 Einfluß der Strömungsrichtung auf den Wärmeeintrag

6.2.1.1 Offener Stabbrenner

Bei der niedrigsten untersuchten Fahrgeschwindigkeit von 1,4 km/h ist bei der Variante "offener Stabbrenner" die Temperaturerhöhung (Mittelwert über die Arbeitsbreite) in den Meßkörpern für beide Brennrichtungen gleich (Abb. 52).

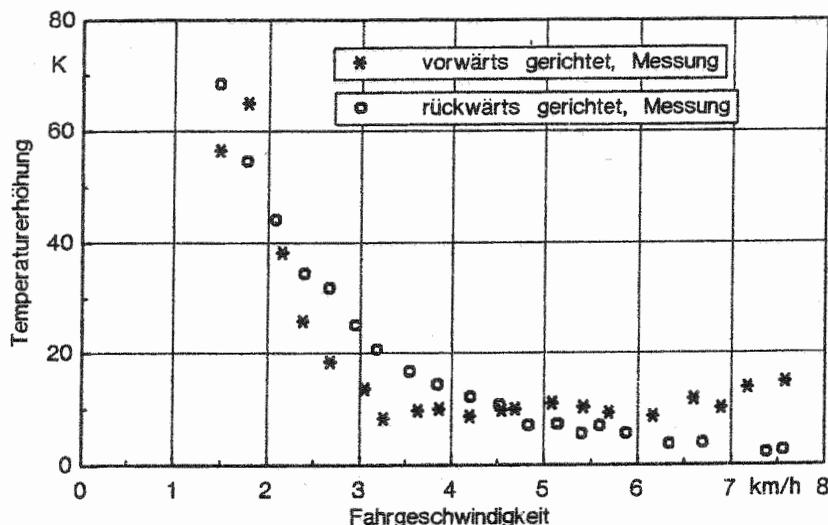


Abb. 52: Offener Stabbrenner: Temperaturerhöhung in den Meßkörpern (Mittel über die Arbeitsbreite) in Abhängigkeit von der Fahrgeschwindigkeit für unterschiedliche Arbeitsrichtungen (Brenner: Gasdurchsatz 13,7 kg/hm, Winkel 45°. Höhe 10 cm)

Mit zunehmender Fahrgeschwindigkeit verringert sich bei dem rückwärts gerichteten Brenner (gegen die Fahrtrichtung) die Temperaturerhöhung in den Meßkörpern kontinuierlich. Die Meßwerte beim vorwärts gerichteten Brenner (in Fahrtrichtung) verringern sich ebenfalls bis zu einer

Fahrgeschwindigkeit von etwa 3,5 km/h. Danach bleiben sie trotz steigender Fahrgeschwindigkeit in etwa gleich. Zwischen 1,7 km/h und 4,5 km/h ist die Temperaturerhöhung in den Meßkörpern bei Flammenaustritt in Arbeitsrichtung höher als beim Flammenaustritt gegen die Arbeitsrichtung. Ab einer Fahrgeschwindigkeit von 4,5 km/h erreicht der vorwärts gerichtete Brenner höhere Temperaturdifferenzen in den Meßkörpern als der rückwärts gerichtete.

Ein deutlicheres Bild der Zusammenhänge liefert die "effektive" Temperaturerhöhung in Abhängigkeit von der Fahrgeschwindigkeit (Abb. 53). Beim rückwärts gerichteten Brenner nimmt die "effektive" Temperaturerhöhung mit zunehmender Fahrgeschwindigkeit kontinuierlich ab. Die "effektive" Temperaturerhöhung des vorwärts gerichteten Brenners ist bei 1,4 km/h identisch mit der des rückwärts gerichteten Brenners, nimmt dann ab, erreicht zwischen 3 km/h und 4 km/h ein Minimum und steigt dann kontinuierlich an. Ab etwa 4,5 km/h ist die Effektivität des vorwärts gerichteten Brenners höher als die des rückwärts gerichteten Brenners.

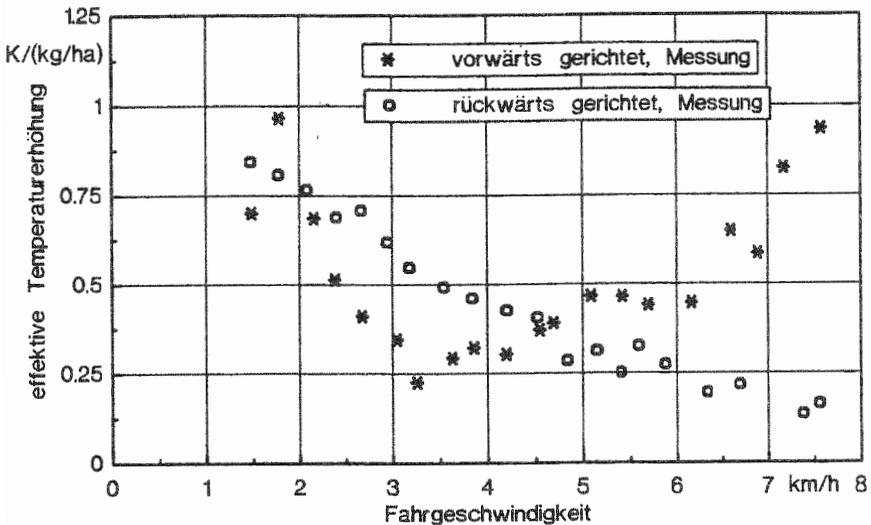


Abb. 53: Offener Stabbrenner: "effektive" Temperaturerhöhung in den Meßkörpern (Mittel wert über die Arbeitsbreite) in Abhängigkeit von der Fahrgeschwindigkeit für unterschiedliche Arbeitsrichtungen (Brenner: Gasdurchsatz 13,7 kg/hm, Winkel 45°, Höhe 10 cm)

Bei einem vorwärts gerichteten Brenner kommt es scheinbar durch den entgegen der Strömungsrichtung arbeitenden Fahrtwind zu einer starken Verkürzung der Flammenlänge in Bodennähe. Diese Verringerung der "wirksamen" Gerätelänge überwiegt in einem Geschwindigkeitsbereich von 1,7 km/h bis etwa 3,5 km/h den Vorteil durch die Erhöhung der Strömungsgeschwindigkeit relativ

zu den Meßkörpern. Ab etwa 3,5 km/h führt eine weitere Geschwindigkeitserhöhung nicht mehr zu einer entsprechenden Verkürzung der Flammenlänge. Jetzt beginnt sich der Vorteil der Erhöhung der Strömungsgeschwindigkeit relativ zu den Meßkörpern durchzusetzen.

Geht man von einer praxistüblichen notwendigen Fahrgeschwindigkeit zwischen 2 km/h und 4 km/h für den offenen Stabbrenner aus (HOFFMANN 1989, Herstellerangaben), so ist für den **offenen Stabbrenner** eine **rückwärtige Brennerstellung** zu empfehlen. Der offene Brenner wurde deshalb im anschließenden Gerätevergleich mit einem entgegen der Fahrtrichtung gerichteten Brenner eingesetzt.

6.2.1.2 Abgedeckter Stabbrenner

Mit zunehmender Fahrgeschwindigkeit verringert sich bei dem rückwärts gerichteten Brenner der Gerätevariante "abgedeckter Stabbrenner" die Temperaturerhöhung in den Meßkörpern kontinuierlich (Abb. 54).

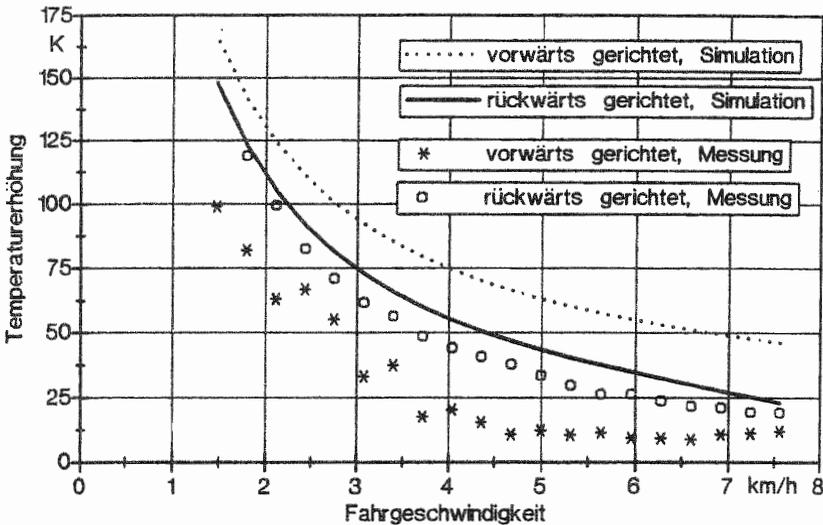


Abb. 54: Abgedeckter Stabbrenner: Gemessene (Mittelwert über die Arbeitsbreite) und errechnete (thermodynamisches Modell) Temperaturerhöhung in den Meßkörpern in Abhängigkeit von der Fahrgeschwindigkeit für unterschiedliche Arbeitsrichtungen (Brenner: Gasdurchsatz 13,7 kg/hm, Winkel 30°, Höhe 6 cm, Abdeckung: Länge 1,5 m, Höhe (vorn) 17 cm, Höhe (hinten) 7 cm)

Die Meßwerte für den vorwärts gerichteten Brenner verringern sich ebenfalls bis zu einer Fahrgeschwindigkeit von etwa 5 km/h. Danach bleiben sie trotz steigender Fahrgeschwindigkeit in etwa gleich. Der vorwärts gerichtete Brenner erreichte dabei durchwegs niedrigere Werte als der rückwärts gerichtete Brenner. Im Bereich zwischen 1,4 km/h und 2,7 km/h sind die Meßwerte aber nur geringfügig kleiner. Der rechnerische Vergleich der Brennerrichtungen zeigt den umgekehrten Zusammenhang.

Ein deutlicheres Bild der Zusammenhänge liefert auch hier die "effektive" Temperaturerhöhung in Abhängigkeit von der Fahrgeschwindigkeit (Abb. 55). Beim rückwärts gerichteten Brenner nimmt die "effektive" Temperaturerhöhung mit zunehmender Fahrgeschwindigkeit nur leicht ab. Das Modell errechnet hier einen ähnlichen Zusammenhang. Die "effektive" Temperaturerhöhung beim vorwärts gerichteten Brenner ist durchwegs niedriger als die beim rückwärts gerichteten. Im Bereich von 1,4 km/h bis 2,7 km/h ist sie aber nur geringfügig kleiner. Danach fällt sie deutlich ab. Zwischen 4,5 km/h und 6,2 km/h bleibt sie dann gleich um anschließend wieder etwas anzusteigen. Das Modell errechnet einen kontinuierlichen Anstieg der effektiven Temperaturerhöhung.

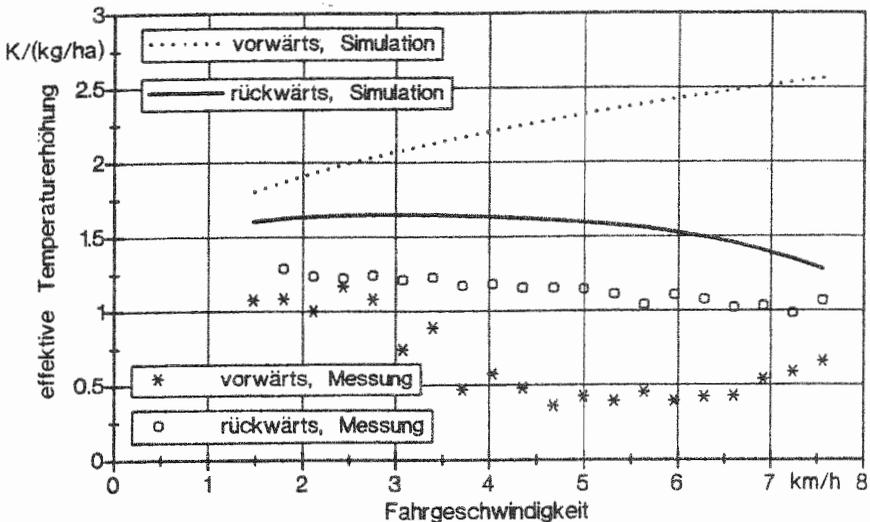


Abb. 55: Abgedeckter Stabbrenner: Gemessene (Mittelwert über die Arbeitsbreite) und errechnete (thermodynamisches Modell) "effektive" Temperaturerhöhung in den Meßkörpern in Abhängigkeit von der Fahrgeschwindigkeit für unterschiedliche Arbeitsrichtungen (Brenner: Gasdurchsatz 13,7 kg/hm, Winkel 30°, Höhe 6 cm, Abdeckung: Länge 1,5 m, Höhe (vorn) 17 cm, Höhe (hinten) 7 cm)

Der Verlauf der absoluten und der "effektiven" Temperaturerhöhung in den Meßkörpern in Abhängigkeit von der Fahrgeschwindigkeit zeigt beim abgedeckten Brenner einen ähnlichen Zusammenhang wie beim offenen Brenner. Der im Modell errechnete Vorteil für einen vorwärts gerichteten Brenner durch die Erhöhung der Strömungsgeschwindigkeit relativ zu den Meßkörpern konnte sich nicht durchsetzen. Wegen der sehr flachen und an den Seiten dichten Abdeckung ist ein Unterschied in der Verbrennungsqualität nicht auszuschließen. Der vorwärts gerichtete Brenner muß seine Verbrennungsluft gegen die Fahrgeschwindigkeit ansaugen. Beim rückwärts gerichteten Brenner dagegen wird das Ansaugen der Verbrennungsluft durch den Fahrtwind zusätzlich unterstützt. Der Verlauf der "effektiven" Temperaturerhöhung zeigt beim offenen Stabbrenner deutliche Parallelen zu dem beim offenen Stabbrenner. Eine Verkürzung der "wirksamen" Gerätelänge durch den Fahrtwind kann für den vorwärts gerichteten Brenner trotz Abdeckung nicht ausgeschlossen werden. Der Vorteil der Erhöhung der Strömungsgeschwindigkeit relativ zu den Meßkörpern wird auch hier erst bei höheren Fahrgeschwindigkeiten sichtbar.

Aufgrund der Versuchsergebnisse wurde der **abgedeckte Stabbrenner** im anschließenden Gerätevergleich mit einem **vorwärts gerichteten Brenner** eingesetzt.

6.2.1.3 Low Temperature Weeder

Mit zunehmender Fahrgeschwindigkeit nimmt beim **Low Temperature Weeder** die Temperaturerhöhung in den Meßkörpern (Mittelwert über die Arbeitsbreite) erwartungsgemäß ab (Abb. 56). Bei dem vorwärts gerichteten Gebläsestrom erreicht der LTW durchwegs größere Temperaturerhöhungen als beim rückwärts gerichteten. Der Unterschied wird mit zunehmender Fahrgeschwindigkeit größer. Das Modell errechnet einen ähnlichen Zusammenhang.

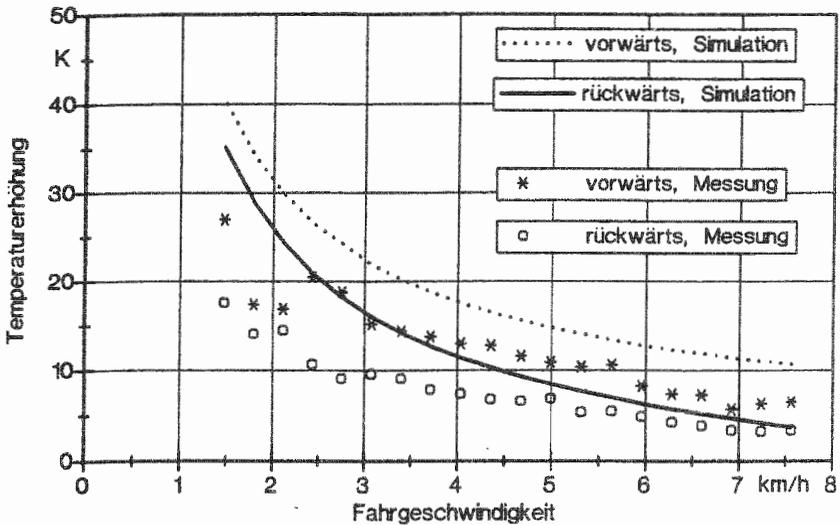


Abb. 56: Low Temperature Weeder (LTW): Gemessene (Mittelwert über die Arbeitsbreite) und errechnete (thermodynamisches Modell) Temperaturerhöhung in den Meßkörpern in Abhängigkeit von der Fahrgeschwindigkeit für unterschiedliche Arbeitsrichtungen (Heizleistung 8 kWh/hm, Abdeckung: Arbeitstemperatur 300°C, Strömungsgeschwindigkeit 2.5 m/s, Länge 2 m, Höhe 20 cm)

Ein deutlicheres Bild der Zusammenhänge liefert die "effektive" Temperaturerhöhung in Abhängigkeit von der Fahrgeschwindigkeit (Abb. 57). Die "effektive" Temperaturerhöhung ist bei einem vorwärts gerichteten Gebläsestrom durchweg höher als bei einem rückwärts gerichteten. Beim rückwärts gerichteten Gebläsestrom bleibt die "effektive" Temperaturerhöhung mit zunehmender Fahrgeschwindigkeit nahezu unverändert. Der im Modell errechnete leichte Anstieg kann nicht nachgewiesen werden. Beim vorwärts gerichteten Gebläsestrom bleibt die "effektive" Temperaturerhöhung ebenfalls mit steigender Fahrgeschwindigkeit gleich. Der im Modell errechnete leichte Abfall bildete sich in den Meßergebnissen nicht ab.

Der im Modell errechnete Vorteil eines vorwärts gerichteten Gebläsestromes durch die Erhöhung der Strömungsgeschwindigkeit relativ zu den Meßkörpern konnte in den Versuchen nachgewiesen werden. Das druckstabile Gebläse verhindert hier im Gegensatz zum strömungsdynamisch sehr labilen Gerätekonzept "Abflammen" eine Verkürzung der "wirksamen" Gerätelänge. Eine Beeinflussung der "wirksamen" Gerätelänge durch den Fahrtwind kann aufgrund der Simulationsergebnisse auch für den LTW nicht ganz ausgeschlossen werden.

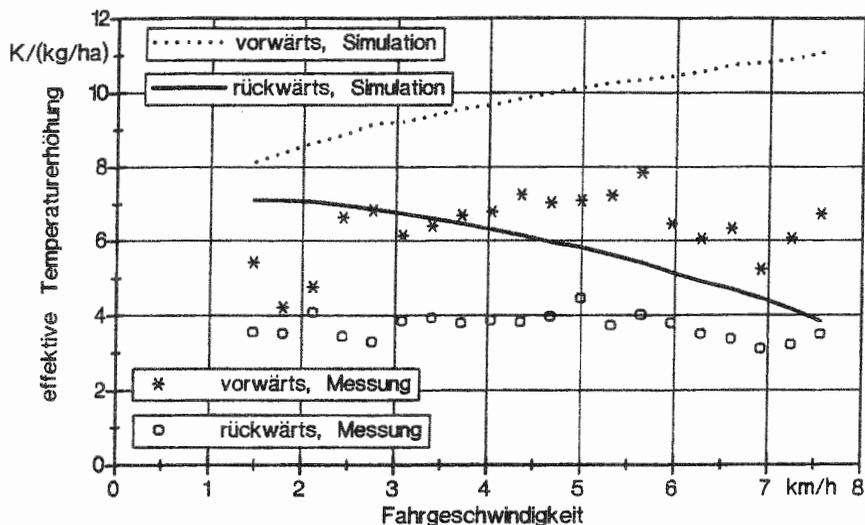


Abb. 57: Low Temperature Weeder (LTW): Gemessene (Mittelwert über die Arbeitsbreite) und errechnete (thermodynamisches Modell) "effektive" Temperaturerhöhung in den Meßkörpern in Abhängigkeit von der Fahrgeschwindigkeit für unterschiedliche Arbeitsrichtungen (Heizleistung 8 kWh/hm, Abdeckung: Arbeitstemperatur 300°C, Strömungsgeschwindigkeit 2,5 m/s, Länge 2 m, Höhe 20 cm)

Aufgrund der Versuchsergebnisse wurde der LTW im anschließenden Gerätevergleich mit einem in Fahrtrichtung gerichteten Gebläsestrom eingesetzt.

6.2.2 Gleichmäßigkeit des Wärmeeintrages über die Arbeitsbreite

Die 20 Versuchsfahrten mit dem **offenen Stabbrenner** wurden mit einer Fahrgeschwindigkeit von 2,6 km/h (Vako: 0,17 %) durchgeführt. Die mittlere Temperaturerhöhung über alle Versuchsfahrten betrug 20,2 K.

Beim offenen Stabbrenner war die Temperaturerhöhung in den Meßkörpern sowohl über die Arbeitsbreite (mittlerer Vako: 40,0 %) als auch über die Wiederholungen (Tab.13) sehr unterschiedlich (Abb. 58).

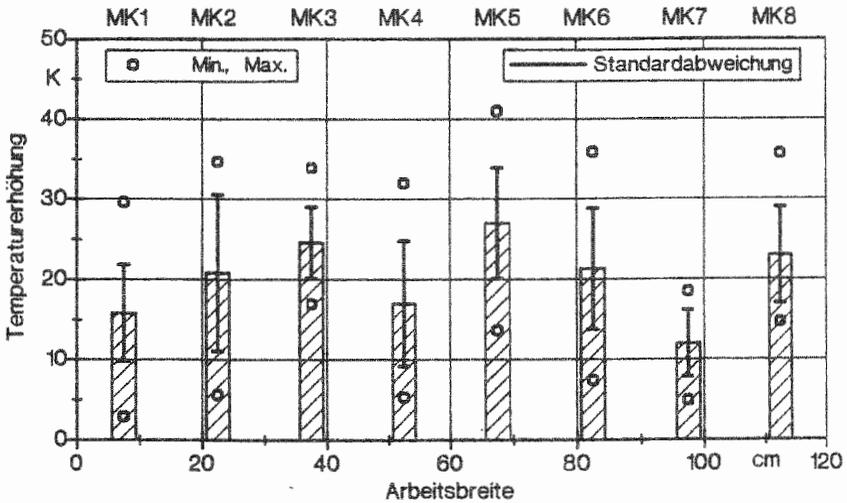


Abb. 58: Offener Stabbrenner: Verteilung der Temperaturerhöhung in den Meßkörpern über die Arbeitsbreite, (20 Wiederholungen, Fahrgeschwindigkeit 2,2 km/h, Brenner: Gasdurchsatz 13,7 kg/hm, Winkel 45°(rückwärts), Höhe 10 cm)

Die Ungleichmäßigkeit über die Arbeitsbreite war hier in erster Linie auf einen verringerten Wärmeeintrag in den Randbereichen (Meßkörper 1, 8) zurückzuführen. Zusätzlich traten Streuungen im mittleren Bereich der Flammenfront auf. Dabei kam es zu regelrechten "Aussetzern", von denen bis auf die Randbereiche (Meßkörper 1, 8) mehr oder weniger alle Meßkörper betroffen waren. Der Mittelwert über die Arbeitsbreite wies dagegen eine deutlich geringere Streuung auf (Vako: 11,2 %).

Tab. 13: Offener Stabbrenner: Temperaturerhöhung in den Meßkörpern über die Arbeitsbreite (20 Wiederholungen, Fahrgeschwindigkeit 2,2 km/h, Brenner: Gasdurchsatz 13,7 kg/hm, Winkel 45° (rückwärts), Höhe 10 cm)

Meßkörper	ΔT_{Mittel} [K]	ΔT_{Min} [K]	ΔT_{Max} [K]	Vako. [%]
MK1	21,8	2,9	29,6	38,2
MK2	20,8	5,6	34,7	45,0
MK3	24,6	17,0	33,9	18,0
MK4	17,6	5,3	32,0	45,9
MK5	27,0	13,7	41,0	25,6
MK6	21,3	7,4	35,9	35,2
MK7	12,0	4,9	18,5	34,8
MK8	23,0	14,7	35,7	25,9
Mittelwert über die Arbeitsbreite	20,2	17,0	24,3	11,2

Die 20 Versuchsfahrten mit dem **abgedeckten Stabbrenner** wurden mit einer Fahrgeschwindigkeit von 4,9 km/h (Vako: 0,18 %) durchgeführt. Die mittlere Temperaturerhöhung über alle Versuchsfahrten betrug 26,7 K.

Beim abgedeckten Stabbrenner war die Streuung der Temperaturerhöhung in den Meßkörpern sowohl über die Arbeitsbreite (mittlerer Vako: 27,1 %) als auch über die Wiederholungen deutlich geringer als beim offenen Stabbrenner (Abb. 59).

Die Ungleichmäßigkeit über die Arbeitsbreite war auch hier in erster Linie auf einen verringerten Wärmeeintrag in den Randbereichen (Meßkörper 1, 8) zurückzuführen. Zusätzlich traten Streuungen im mittleren Bereich der Flammenfront auf. Die Streuung über die Wiederholungen waren deutlich geringer, als beim offenen Stabbrenner. "Aussetzer" wie beim offenen Stabbrenner traten nicht auf. Die Abdeckung hatte also eine Vergleichmäßigung der Wärmeübertragungsleistung über die Arbeitsbreite und die Arbeitsdauer zur Folge. Auch hier weist der Mittelwert über die Arbeitsbreite eine deutlich geringere Streuung auf (Vako 2,8 %).

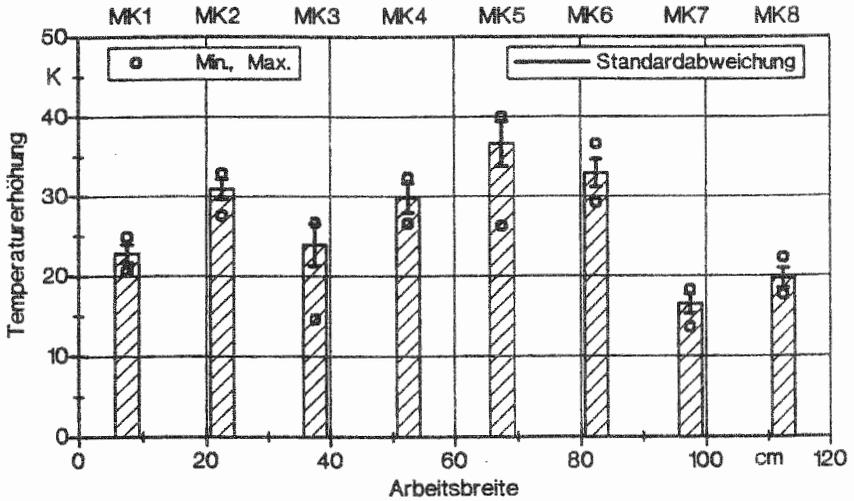


Abb. 59: Abgedeckter Stabbrenner: Verteilung der Temperaturerhöhung in den Meßkörpern über die Arbeitsbreite, (20 Wiederholungen, Fahrgeschwindigkeit 4,9 km/h, Brenner: Gasdurchsatz 13,7kg/hm, Winkel 30°(rückwärts), Höhe 6 cm, Abdeckung: Länge 1,5 m, Höhe (vorn) 15 cm, Höhe (hinten) 7 cm)

Tab. 14: Abgedeckter Stabbrenner: Temperaturerhöhung in den Meßkörpern Arbeitsbreite, (20 Wiederholungen, Fahrgeschwindigkeit 4,9 km/h, Brenner: Gasdurchsatz 13,7kg/hm, Winkel 30°(rückwärts), Höhe 6 cm, Abdeckung: Länge 1,5 m, Höhe (vorn) 15 cm, Höhe (hinten) 7 cm)

Meßkörper	ΔT_{Mittel} [K]	$\Delta T_{\text{Min.}}$ [K]	$\Delta T_{\text{Max.}}$ [K]	Vako. [%]
MK1	22,8	20,6	24,9	4,9
MK2	30,9	27,6	32,9	4,2
MK3	23,9	14,6	26,7	11,1
MK4	29,8	26,6	32,4	6,3
MK5	36,6	26,3	40,0	7,7
MK6	32,9	29,6	36,6	5,3
MK7	16,5	13,6	18,3	7,6
MK8	19,7	17,7	22,3	6,3
Mittelwert über die Arbeitsbreite	26,7	24,9	27,6	2,8

Die 20 Versuchsfahrten mit dem LTW wurden mit einer Fahrgeschwindigkeit von 2,5 km/h (Vako: 0,20 %) durchgeführt. Die mittlere Temperaturerhöhung über alle Wiederholungen betrug 22,9 K.

Beim LTW war die Streuung der Temperaturerhöhung in den Meßkörpern sowohl über die Arbeitsbreite (mittlerer Vako: 16,7 %) als auch über die Wiederholungen (Tab.15) am geringsten (Abb. 60).

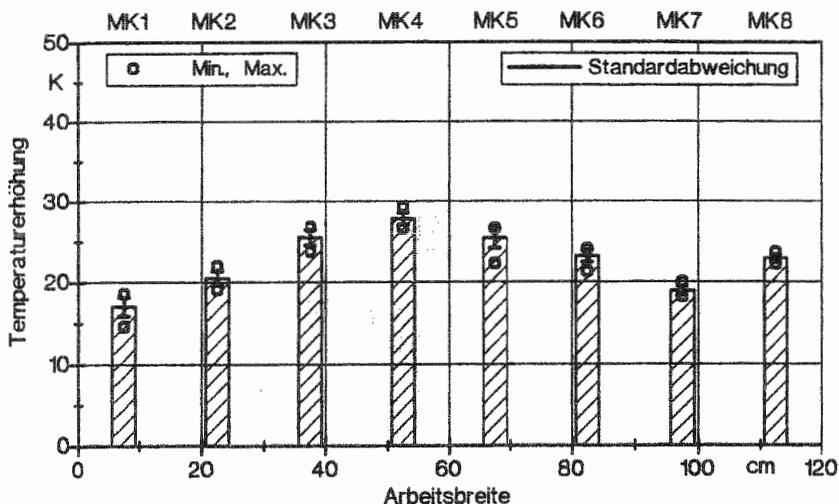


Abb. 60: LTW (Low Temperature Weeder): Verteilung der Temperaturerhöhung in den Meßkörpern über die Arbeitsbreite, (20 Wiederholungen, Fahrgeschwindigkeit 2,5 km/h, Heizleistung 8 kWh/hm, Abdeckung: Arbeitstemperatur 300 °C, Strömungsgeschwindigkeit 2,5 m/s (vorwärts), Länge 2 m, Höhe 20 cm)

Der Wärmeeintrag war in der Mitte am höchsten und fiel in der Tendenz zu den Rändern hin ab. Dieser Verlauf wurde nur durch den Meßkörper 8 am rechten Rand unterbrochen. Dieser wies im Gegensatz zum linken Rand (Meßkörper 1) einen erhöhten Wärmeeintrag auf. "Aussetzer" wie beim offenen Stabbrenner traten auch hier nicht auf. Der Mittelwert über die Arbeitsbreite wies über die Wiederholungen die mit Abstand geringste Streuung auf (Vako 2,0 %).

Tab. 15: LTW (Low Temperature Weeder): Temperaturerhöhung in den Meßkörpern über die Arbeitsbreite, (20 Wiederholungen, Fahrgeschwindigkeit 2,5 km/h, Heizleistung 8 kWh/hm, Abdeckung: Arbeitstemperatur 300 °C, Strömungsgeschwindigkeit 2,5 m/s (vorwärts), Länge 2 m, Höhe 20 cm)

Meßkörper	ΔT_{Mittel} [K]	ΔT_{Min} [K]	ΔT_{Max} [K]	Vako. [%]
MK1	17,0	14,6	18,6	6,8
MK2	20,5	19,1	22,0	4,1
MK3	25,5	23,8	26,8	3,7
MK4	27,8	26,6	29,3	2,7
MK5	25,4	22,3	26,6	4,8
MK6	23,2	21,3	24,1	3,3
MK7	18,9	18,2	20,0	2,9
MK8	22,9	22,2	23,7	2,0
Mittelwerte über die Arbeitsbreite	23,4	21,8	24,5	3,7

Bei den untersuchten Geräten war die Gleichmäßigkeit des Wärmeeintrages über die Arbeitsbreite sehr unterschiedlich (Tab. 16). Die geringste Streuung wies der LTW, die höchste Streuung der offene Brenner auf. Bei der Gleichmäßigkeit der Wärmeübertragungsleistung über die Wiederholungen ergab sich ein ähnliches Bild. Die mit Abstand größte Streuung an den einzelnen Meßkörpern wies der offene Brenner auf. Hier kam es zu regelrechten "Aussetzern". Zu den geringsten Streuungen an den einzelnen Meßkörpern kam es bei den Versuchsfahrten mit dem LTW.

Die Verbrennungsdynamik einer offenen Flamme führt in Bodennähe offensichtlich zu sehr unterschiedlichen Wärmeübertragungsleistungen. Eine Abdeckung über dem Brenner trägt hier zur Vergleichmäßigung der Strömungsverhältnisse bei. Die Strömungsdynamik beim LTW wird in erster Linie durch die Art der Luftführung beeinflusst. Das relativ druckstabile Gebläse trägt zu einer weiteren Vergleichmäßigung der Wärmeübertragungsleistung bei. Interessanterweise wies der Mittelwert über die Arbeitsbreite bei allen drei Varianten eine deutlich geringere Streuung, als die Streuung an den einzelnen Meßkörpern auf. Dies läßt sich nur dadurch erklären, daß eine Erhöhung der Strömungsgeschwindigkeit und damit der Wärmeübertragungsleistung an einem Meßort eine Verminderung der Strömungsgeschwindigkeit an einem anderen Ort zur Folge hatte.

Tab. 16: Gleichmäßigkeit des Wärmeeintrages in die Meßkörper (Variationskoeffizient) über die Arbeitsbreite für verschiedene Geräte zur thermischen Unkrautbekämpfung

	Vako. [%] (Mittelwert)	Vako. [%] (Maximalwert)	Vako. [%] (Minimalwert)
offener Stabbrenner	40,0	68,6	23,9
abgedeckter Stabbrenner	26,9	31,4	23,1
LTW	15,9	20,3	11,1

6.2.3 Vergleich der ausgeführten Gerätekonzepte

Der Vergleich der ausgeführten Gerätekonzepte erfolge auf der Basis der methodischen Ansätze Speed (Dose) / Response und Temperaturmessung. Für die Überprüfung des thermodynamischen Modells wurden die Ergebnisse anschließend mit den Rechenergebnissen verglichen.

6.2.3.1 Speed (Dose)/ Response

Testpflanze Mungbohne (*Vigna radiata* (L.) var. *radiata*): Die Geräte unterschieden sich hinsichtlich der **Fahrgeschwindigkeit** zum Erreichen eines vergleichbaren **Bekämpfungserfolgs** deutlich (Abb. 61, Tab. 17). Die notwendige Fahrgeschwindigkeit für einen Bekämpfungserfolg von 5 % (LS(05)) wurde mit dem offenen Stabbrenner bei 3,23 km/h, mit dem LTW bei 3,51 km/h und mit dem abgedeckten Stabbrenner bei 7,55 km/h erreicht. Für einen Bekämpfungserfolg von 50 % (LS(50)) mußte bei der Mungbohne (*Vigna radiata* (L.) var. *radiata*) mit dem offenen Stabbrenner 1,99 km/h, mit dem LTW 2,67 km/h und mit dem abgedeckten Stabbrenner 5,81 km/h gefahren werden. Ein Bekämpfungserfolg von 95 % (LS(95)) wurde mit dem offenen Stabbrenner bei 1,23 km/h, mit dem LTW bei 2,03 km/h und mit dem abgedeckten Stabbrenner bei 4,47 km/h erreicht.

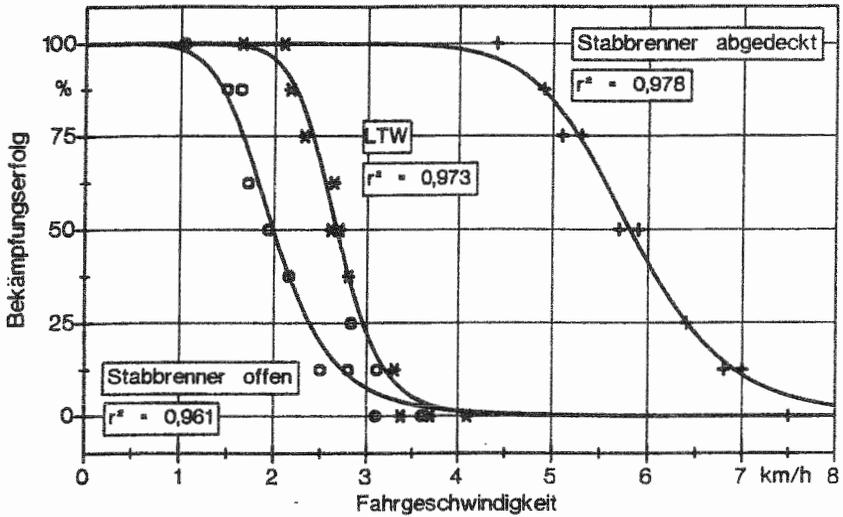


Abb. 61: Bekämpfungserfolg (Testpflanze: Mungbohne (*Vigna radiata* (L.) var. *radiata*), 2 Laubblätter) in Abhängigkeit von der Fahrgeschwindigkeit für verschiedene Geräte zur thermischen Unkrautbekämpfung

Tab. 17: Regressionsanalyse: Fahrgeschwindigkeit zur Erreichung definierter Bekämpfungserfolge (Testpflanze: Mungbohne (*Vigna radiata* (L.) var. *radiata*), 2 Laubblätter) für verschiedene Gerätekonzepte

	LS(05) [km/h]	LS(50) [km/h]	LS(95) [km/h]	b [-]
offener Stabbrenner	3,23	1,99	1,23	6,09
Vertrauensintervall (95 %)	2,73 - 4,12	1,88 - 2,09	0,98 - 1,44	4,33 - 7,86
abgedeckter Stabbrenner	7,55	5,81	4,47	11,2
Vertrauensintervall (95 %)	7,06 - 8,31	5,70 - 5,92	4,06 - 4,78	8,67 - 13,75
LTW	3,51	2,67	2,03	10,7
Vertrauensintervall (95 %)	3,24 - 3,97	2,62 - 2,73	1,79 - 2,20	7,84 - 13,6

Während die LS(50) durchweg die geringste Intervallbreite aufweist, wird diese für die LS(05) und die LS(95) deutlich größer.

Die Mungbohnen weisen in allen drei Varianten einen mittleren Durchmesser von 2,1 mm auf. Die Streuung des Stengeldurchmessers war bei allen drei Varianten ähnlich. (offener Stabbrenner: Vako 8,0 %, abgedeckter Stabbrenner: Vako 8,5 %, LTW: Vako 8,4 %). Damit lag allen drei Versuchen ein einheitliches Pflanzenmaterial zugrunde.

Der für die Steilheit der Funktion verantwortliche Faktor b ist beim offenen Stabbrenner mit 6,09 niedriger als beim abgedeckten Stabbrenner ($b=11,2$) und beim LTW ($b=10,7$). Der niedrige Wert des offenen Stabbrenners läßt sich aufgrund des einheitlichen Pflanzenmaterials nur durch vergleichsweise geringe Gleichmäßigkeit des Wärmeeintrages über die Gerätebreite erklären.

Vergleicht man den offenen mit dem abgedeckten Stabbrenner, so erhöht sich für die LS05 die optimale Fahrgeschwindigkeit um 134 %, für die LS50 um 192 % und für die LS95 um 263 %. Die Zunahme der optimalen Fahrgeschwindigkeit ist in der Gesamtheit auf die Abdeckung zurückzuführen. Der mit zunehmendem Bekämpfungserfolg größer werdende Unterschied läßt sich auf die Vergleichmäßigung des Wärmeeintrags über die Arbeitsbreite (Kap. 6.2.2) zurückführen.

Vergleicht man den offenen Stabbrenner mit dem LTW, so kann mit dem LTW für einen Bekämpfungserfolg von 5 % (LS05) 9 % schneller, für einen Bekämpfungserfolg von 50 % um 34 % und für einen Bekämpfungserfolg von 95 % (LS95) um 65 % schneller gefahren werden. Auch hier wird der Unterschied mit zunehmendem Bekämpfungserfolg größer.

Vergleicht man den LTW mit dem abgedeckten Stabbrenner, so kann mit dem abgedeckten Stabbrenner zum Erreichen der LS05 115 %, zum Erreichen der LS50 118 % und zum Erreichen der LS95 um 120 % schneller gefahren werden. Die bezüglich des abgedeckten Stabbrenners vergleichsweise niedrige optimale Fahrgeschwindigkeit des LTW ist auf die niedrige Auslegung zurückzuführen.

Ein Vergleich der gemessenen Fahrgeschwindigkeit zur Erreichung der verschiedenen Bekämpfungserfolge mit den mittels thermodynamischen Modell errechneten Werten ergab eine recht gute Übereinstimmung (Abb. 62).

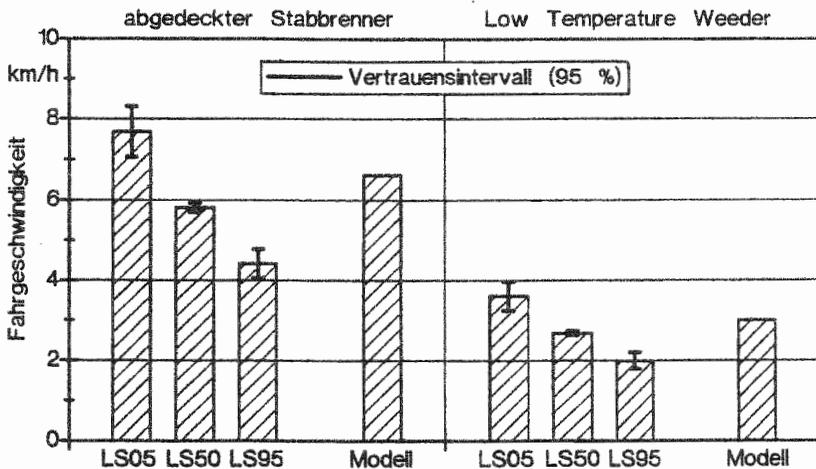


Abb. 62: Vergleich der gemessenen mit den errechneten Fahrgeschwindigkeiten zur Erreichung definierter Bekämpfungserfolge (Testpflanze: Mungbohne (*Vigna radiata* (L.) var *radiata*), 2 Laubblätter) für verschiedene Geräte zur thermischen Unkrautbekämpfung

Für den abgedeckten Brenner errechnete sich eine optimale Fahrgeschwindigkeit von 6,62 km/h, für den LTW von 2,99 km/h. Die errechneten optimalen Fahrgeschwindigkeiten (LS(100)) liegen demnach für beide Geräte zwischen der LS(50) und der LS(95). Der abgedeckte Brenner erlaubte zum Erreichen der Schädigungstiefe von 0,05 mm eine um 122 % höhere Fahrgeschwindigkeit.

Vergleicht man die relativen Unterschiede zwischen den gemessenen Fahrgeschwindigkeiten zum Erreichen des gleichen Bekämpfungserfolges so ergibt sich für die LS(05) eine um 115 % höhere, für die LS(50) eine um 117 % höhere und für die LS(95) eine um 120 % höhere optimale Fahrgeschwindigkeit.

Der Vergleich des über die gemessene Fahrgeschwindigkeit errechneten flächenbezogenen Gaseinsatzes zur Erreichung definierter Bekämpfungserfolge mit den mittels thermodynamischen Modell errechneten Werten ergab eine relativ gute Übereinstimmung (Abb. 63).

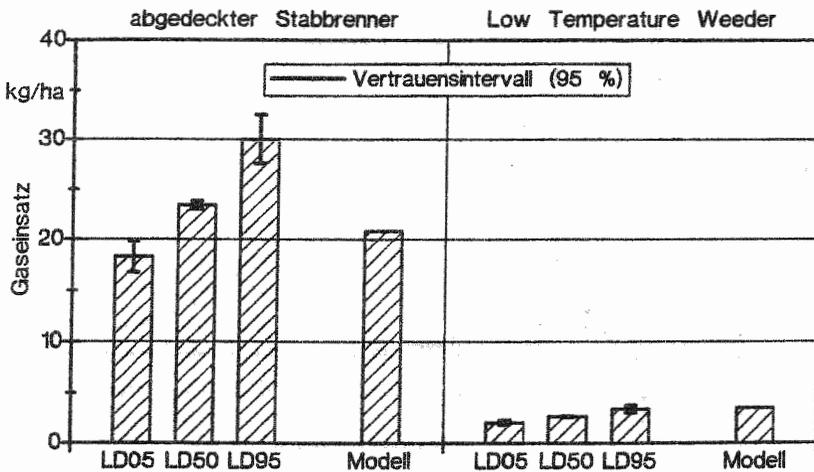


Abb. 63: Vergleich des gemessenen (Testpflanze: Mungbohne (*Vigna radiata* (L.) var. *radiata*), 2 Laubblätter) mit dem errechneten flächenbezogenen Gaseinsatz zur Erreichung definierter Bekämpfungserfolge für verschiedene Geräte zur thermischen Unkrautbekämpfung

Für den abgedeckten Brenner errechnete sich ein flächenbezogener Gaseinsatz von 20,8 kg/ha. Der Rechenwert liegt zwischen der LD(05) und der LD(95). Für den LTW errechnet sich ein flächenbezogener Gaseinsatz von 3,4 kg/ha. Damit liegt dieser Wert minimal über der LD(95). Der abgedeckte Stabbrenner benötigte zum Erreichen einer Schädigungstiefe von 0,05 mm einen 512 % höheren flächenbezogenen Gaseinsatz. Vergleicht man die relativen Unterschiede zwischen den gemessenen flächenbezogenen Gaseinsatzes zum Erreichen des gleichen Bekämpfungserfolges so ergibt sich für die LD(05) einen um 797 %, für die LD(50) einen um 789 % und für die LD(95) einen um 786 % höheren flächenbezogenen Gaseinsatz. Der etwas höhere Rechenwert deutet darauf

hin, daß die im Prototyp installierte Heizleistung nicht zum Ausgleich der während der Versuchsfahrt stattgefundenen Wärmeübergänge ausreichte.

Testpflanze Winterweizen (*Triticum aestivum* L.): Auch beim Weizen (*Triticum aestivum* L.) als Testpflanze unterschieden sich die Geräte hinsichtlich der **Fahrgeschwindigkeit** zum Erreichen eines vergleichbaren Bekämpfungserfolges deutlich (Abb. 64, Tab. 19).

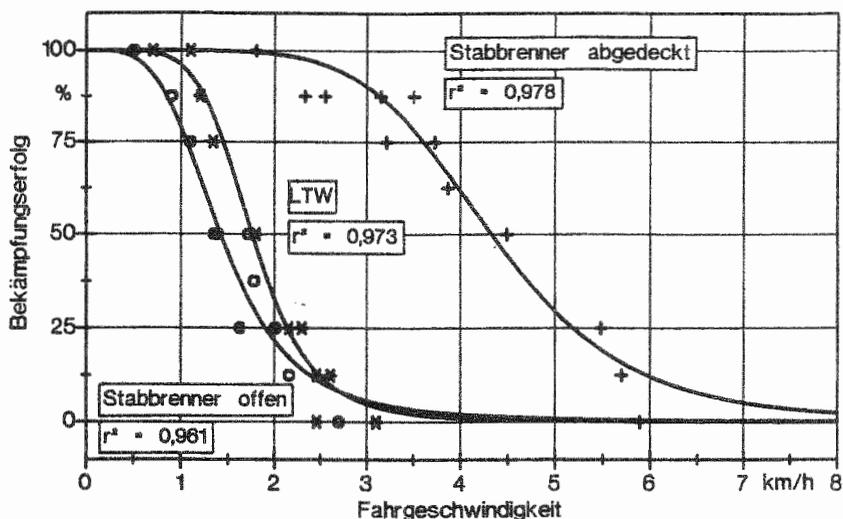


Abb. 64: Bekämpfungserfolg (Testpflanze: Winterweizen (*Triticum aestivum* L.), Entwicklungsphase 14 - 16 (ZADOKS et al. 1974)) in Abhängigkeit von der Fahrgeschwindigkeit für verschiedene Geräte zur thermischen Unkrautbekämpfung

Die notwendige Fahrgeschwindigkeit für einen Bekämpfungserfolg von 5 % (LS(05)) betrug mit dem offenen Stabbrenner 3,1 km/h, mit dem LTW 2,54 km/h und mit dem abgedeckten Stabbrenner 7,03 km/h. Für einen Bekämpfungserfolg von 50 % (LS(50)) konnte mit offenen Stabbrenner 1,42 km/h, mit dem LTW 1,76 km/h und mit dem abgedeckten Stabbrenner 4,33 km/h gefahren werden. Ein Bekämpfungserfolg von 95 % (LS(95)) wurde mit dem offenen Stabbrenner bei 0,64 km/h, mit dem LTW bei 1,04 km/h und mit dem abgedeckten Stabbrenner bei 4,33 km/h erreicht.

Während die LS(50) die durchweg geringste Intervallbreite aufweist, sind die Intervallbreiten für die LS(05) und die LS(95) deutlich größer.

Der Winterweizen wies an der Spitze der untersten Blattscheide in allen drei Varianten einen mittleren Durchmesser von 2,2 mm auf. Die Streuung des Stengeldurchmessers war bei allen drei Varianten deutlich höher als die Streuung des Stengeldurchmessers bei der Mungbohne. (Variationskoeffizient: offener Stabbrenner 17,8 %, abgedeckter Stabbrenner 15,2 %, LTW 17,7 %). Damit lag den Versuchen ein einheitliches Pflanzenmaterial zugrunde.

Der für die Steilheit der Funktion verantwortliche Faktor b betrug für den offenen Brenner 3,75, für den abgedeckten Brenner 6,07 und für den LTW 5,60. Da den Versuchen ein einheitliches Pflanzenmaterial zugrunde lag kann auch hier der niedrige Wert des offenen Stabbrenners nur durch die vergleichsweise geringe Gleichmäßigkeit des Wärmeeintrages erklärt werden (Kap. 6.2.2).

Vergleicht man den offenen mit den abgedeckten Stabbrenner, so erhöht sich für die LS05 die optimale Fahrgeschwindigkeit um 127 %, für die LS50 um 205 % und für die LS95 um 315 %. Die Zunahme der optimalen Fahrgeschwindigkeit ist auch hier allein auf die Abdeckung zurückzuführen. Der mit zunehmendem Bekämpfungserfolg größer werdende Unterschied läßt sich durch die Vergleichmäßigung des Wärmeeintrages über die Arbeitsbreite interpretieren (Kap. 6.2.2).

Vergleicht man den offenen Stabbrenner mit dem LTW, so beträgt die LS05 82 %, die LS50 124 % und die LS95 163 % der optimalen Fahrgeschwindigkeit des offenen Stabbrenners. Der mit zunehmendem Bekämpfungserfolg größer werdende Unterschied läßt sich auch hier durch die beim LTW größere Gleichmäßigkeit des Wärmeeintrages über die Arbeitsbreite erklären (Kap. 6.2.2).

Vergleicht man den LTW mit dem abgedeckten Stabbrenner, so kann mit dem abgedeckten Stabbrenner zum Erreichen der LS05 um 177 %, zum Erreichen der LS50 um 146 % und zum Erreichen der LS95 um 156 % schneller gefahren werden. Die bezüglich des abgedeckten Stabbrenners vergleichsweise niedrige optimale Fahrgeschwindigkeit des LTW ist auf die niedrige Auslegung zurückzuführen.

Tab. 18: Regressionsanalyse: Fahrgeschwindigkeit zur Erreichung definierter Bekämpfungserfolge (Testpflanze: Winterweizen (*Triticum aestivum* L.), Entwicklungsphase 14 - 16 (ZADOKS et al. 1974)) für verschiedene Gerätekonzepte

	LS(05) [km/h]	LS(50) [km/h]	LS(95) [km/h]	b [-]
offener Stab- brenner	3,10	1,42	0,64	3,75
95 % Vertrau- ensintervall	2,34 - 5,06	1,31 - 1,53	0,39 - 0,85	2,46 - 5,04
abgedeckter Stabbrenner	7,03	4,33	2,66	6,07
95 % Vertrau- ensintervall	5,90 - 9,23	4,07 - 4,58	2,03 - 3,16	4,21 - 7,93
LTW	2,54	1,76	1,04	5,60
95 % Vertrau- ensintervall	1,42 - 3,66	1,66 - 1,86	0,83 - 1,21	4,31 - 6,89

Ein Vergleich der gemessenen **Fahrgeschwindigkeit** zur Erreichung der verschiedenen **Bekämpfungserfolge** mit den mittels dem **thermodynamischen Modell** errechneten Werten ergab eine recht gute Übereinstimmung (Abb. 65).

Für den abgedeckten Brenner errechnete sich eine optimale Fahrgeschwindigkeit von 4,39 km/h, für den LTW von 2,09 km/h. Die errechneten optimalen Fahrgeschwindigkeiten liegen demnach für beide Geräte zwischen der LS(05) und der LS(95). Der abgedeckte Brenner erlaubte zum Erreichen der einer Schädigungstiefe von 0,05 mm eine um 110% höhere Fahrgeschwindigkeit. Vergleicht man die relativen Unterschiede zwischen den gemessenen Fahrgeschwindigkeiten zum Erreichen des gleichen Bekämpfungserfolges so ergibt sich für die LS(05) eine um 176 % höhere, für die LS(50) eine um 146 % höhere und für die LS(95) eine um 155 % höhere optimale Fahrgeschwindigkeit.

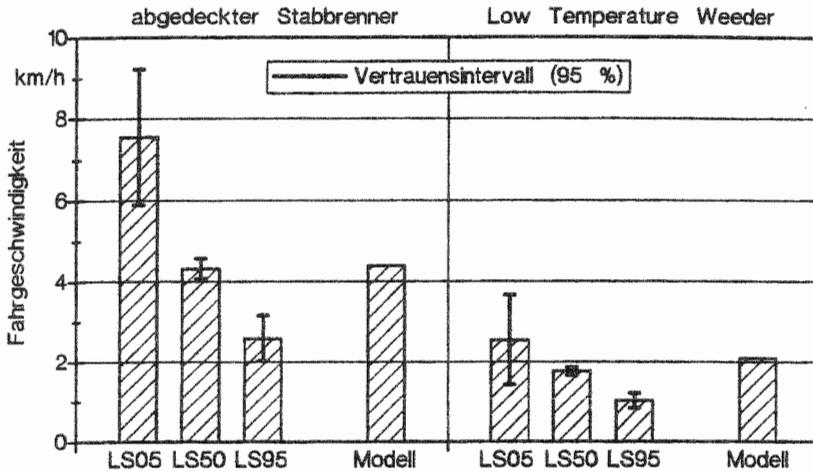


Abb. 65: Vergleich der gemessenen (Testpflanze: Winterweizen (*Triticum aestivum* L.), Entwicklungsphase 14 - 16 (ZADOKS et al. 1974)) mit den errechneten Fahrgeschwindigkeiten zur Erreichung definierter Bekämpfungserfolge für verschiedene Geräte zur thermischen Unkrautbekämpfung

Der Vergleich des über die gemessene Fahrgeschwindigkeit errechneten **flächenbezogenen Gaseinsatzes** zur Erreichung definierter **Bekämpfungserfolge** mit den mittels **thermodynamischen Modell** errechneten Werten ergab eine sehr gute Übereinstimmung (Abb. 66).

Die Geräte unterschieden sich hinsichtlich des flächenbezogenen Gaseinsatzes erheblich. Für den abgedeckten Brenner errechnete sich ein flächenbezogener Gaseinsatz von 31,3 kg/ha, für den LTW von 4,4 kg/ha. Die Rechenwerte liegen zwischen der LD(05) und der LD(95). Der abgedeckte Stabbrenner benötigte zum Erreichen einer Schädigungstiefe von 0,05 mm einen 611 % höheren flächenbezogenen Gaseinsatz. Vergleicht man die relativen Unterschiede zwischen den gemessenen flächenbezogenen Gaseinsatzes zum Erreichen des gleichen Bekämpfungserfolges, so ergibt sich für die LD(05) einen um 663 %, für die LD(50) einen um 679 % und für die LD(95) einen um 667 % höheren flächenbezogenen Gaseinsatz.

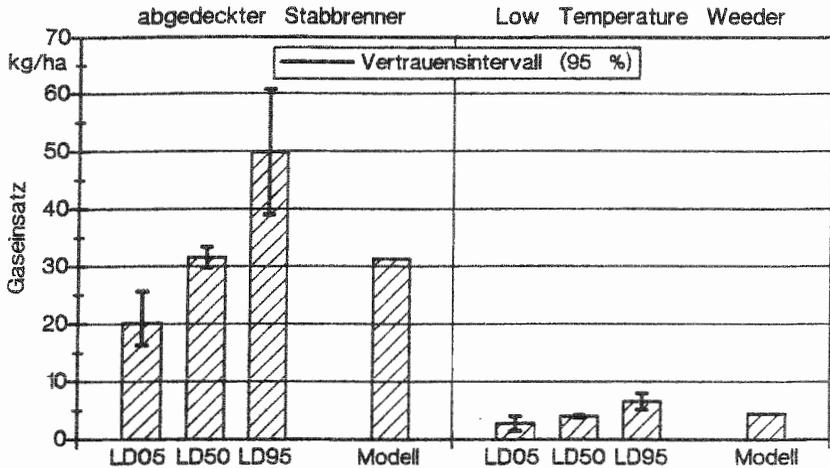


Abb.66: Vergleich des gemessenen (Testpflanze: Winterweizen (*Triticum aestivum* L.), Entwicklungsphase 14 - 16 (ZADOKS et al. 1974)) mit dem errechneten flächenbezogenen Gaseinsatz zur Erreichung definierter Bekämpfungserfolge für verschiedene Geräte zur thermischen Unkrautbekämpfung

6.2.3.2 Temperaturmessung (Meßkörper)

Testpflanze Mungbohne (*Vigna radiata* (L.) var. *radiata*): Die mittlere Temperaturerhöhung in den Meßkörpern für einen Bekämpfungserfolg von 5 % (LT(05)) betrug für den offenen Stabbrenner 16,4 K, für den LTW 16,4 K und für den abgedeckten Stabbrenner bei 14,0 K 50 %. Für einen Bekämpfungserfolg von 50 % (LT(50)) betrug die mittlere Temperaturerhöhung in den Meßkörpern beim offenen Stabbrenner 28,7 K, beim LTW 21,9 K und beim abgedeckten Stabbrenner 21,3 K (Abb. 67, Tab. 18). Ein Bekämpfungserfolg von 95% (LT(95)) wurde für den offenen Stabbrenner bei einer mittleren Temperaturerhöhung von 50,2 K, für den LTW bei 27,6 K und für den abgedeckten Stabbrenner bei 32,4 K erreicht.

Vergleicht man die relativen Unterschiede, so unterschieden sich die Geräte bezüglich der LT05 nur geringfügig. Der Einfluß der Gleichmäßigkeit des Wärmeeintrags über die Arbeitsbreite ist hier gering. Mit zunehmendem Bekämpfungserfolg wird aber auch hier der Einfluß der Gleichmäßigkeit

des Wärmeeintrags über die Arbeitsbreite sichtbar (Kap. 6.2.2). Bei einem Bekämpfungserfolg von 95 % wurde in Bezug auf den offenen Stabbrenner beim abgedeckten Stabbrenner eine um 35 %, beim LTW eine um 45 % niedrigere mittlere Temperaturerhöhung in den Meßkörpern gemessen.

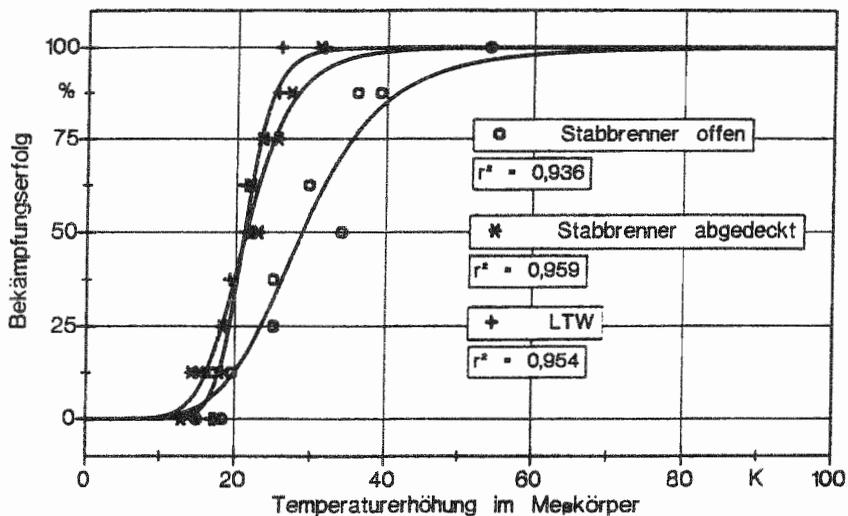


Abb. 67: Bekämpfungserfolg (Testpflanze: Mungbohne (*Vigna radiata* (L.) var. *radiata*), 2 Laubblätter) in Abhängigkeit von der Temperaturerhöhung im Meßkörper (Mittelwert über die Arbeitsbreite) für verschiedene Geräte zur thermischen Unkrautbekämpfung

Tab. 19: Regressionsanalyse: Temperaturerhöhung in den Meßkörpern (Mittelwert über die Arbeitsbreite) beim Erreichen definierter Bekämpfungserfolge (Testpflanze: Mungbohne (*Vigna radiata* (L.) var. *radiata*), 2 Laubblätter) mit verschiedenen Geräten zur thermischen Unkrautbekämpfung

	LT(05) [K]	LT(50) [K]	LT(95) [K]	b [-]
offener Stabbrenner	16.4	28.7	50.2	5.27
95 % Vertrauensintervall	10.8 - 20.6	26.5 - 30.9	39.8 - 75.8	3.29 - 7.25
abgedeckter Stabbrenner	14.0	21.3	32.4	7.02
95 % Vertrauensintervall	11.2 - 16.0	20.5 - 22.1	28.3 - 40.5	4.86 - 9.18
LTW	16.4	21.9	27.6	11.64
95 % Vertrauensintervall	13.9 - 18.0	20.4 - 21.7	24.6 - 32.0	7.60 - 15.7

Während die LS(50) durchweg die geringste Intervallbreite aufweist, wird diese für die LS(05) und die LS(95) deutlich größer.

Für einen geringen Bekämpfungserfolg (LS(05)) wurde bei alle drei Geräte eine ähnliche mittlere Temperaturerhöhung in den Meßkörpern gemessen. Für höhere Bekämpfungserfolge (LS(50), LS(95)) wurden beim offenen Stabbrenner deutlich höhere Werte als beim abgedeckten Stabbrenner und den LTW gemessen. Der für die Steilheit der Regressionsfunktion verantwortliche Faktor b beträgt beim offenen Stabbrenner 5.27, beim abgedeckten Stabbrenner 7.02 und beim LTW 11.6. Die Unterschiede lassen sich aufgrund des einheitlichen Pflanzenmaterials nur durch den ungleichmäßigen Wärmeeintrag über die Arbeitsbreite erklären (Kap. 6.2.2).

Der Vergleich der gemessenen Temperaturerhöhung in den **Meßkörpern** (Mittelwert über die Arbeitsbreite) beim Erreichen der verschiedenen **Bekämpfungserfolge** mit den mittels **thermodynamischen Modell** errechneten Werten ergibt einen deutlich anderen Zusammenhang (Abb. 68).

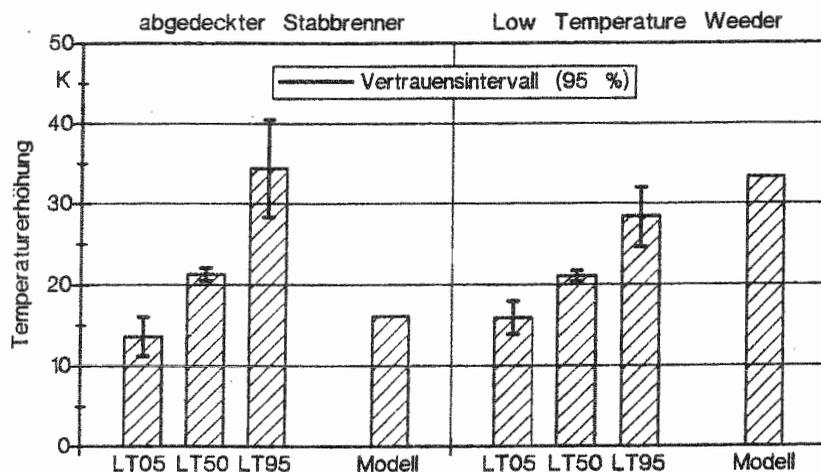


Abb. 68: Vergleich der Temperaturerhöhung in den Meßkörpern (Mittelwert über die Arbeitsbreite) bei der Erreichung definierter Bekämpfungserfolge (Standardunkraut: Mungbohne (*Vigna radiata* (L.) var. *radiata*), 2 Laubblätter) mit verschiedenen Geräten zur thermischen Unkrautbekämpfung

Für den abgedeckten Brenner errechnete sich eine Temperaturerhöhung in den Meßkörpern von 16,1 K, für den LTW von 33,3 K. Während der Rechenwert für den abgedeckten Brenner im Bereich zwischen der LS(05) und der LS(95) liegt, befindet sich der Rechenwert für den LTW etwas über der LS(95). Für den abgedeckten Brenner errechnete sich im Vergleich zum LTW eine um 52 % niedrigere Temperaturerhöhung in den Meßkörpern. Vergleicht man die relativen Unterschiede zwischen den gemessenen Temperaturerhöhungen zum Erreichen des gleichen Bekämpfungserfolges so ergibt sich für die LS(05) eine um 15 % niedrigere, für die LS(50) eine um 3 % niedrigere und für die LS(95) eine um 17 % höhere optimale Fahrgeschwindigkeit.

Testpflanze Winterweizen (*Triticum aestivum L.*): Die mittlere Temperaturerhöhung in den Meßkörpern für einen Bekämpfungserfolg von 50 % (LT(50)) betrug für den offenen Stabbrenner 42,7 K, für den LTW 30,7 K und für den abgedeckten Stabbrenner 33,3 K (Abb. 69, Tab. 20).

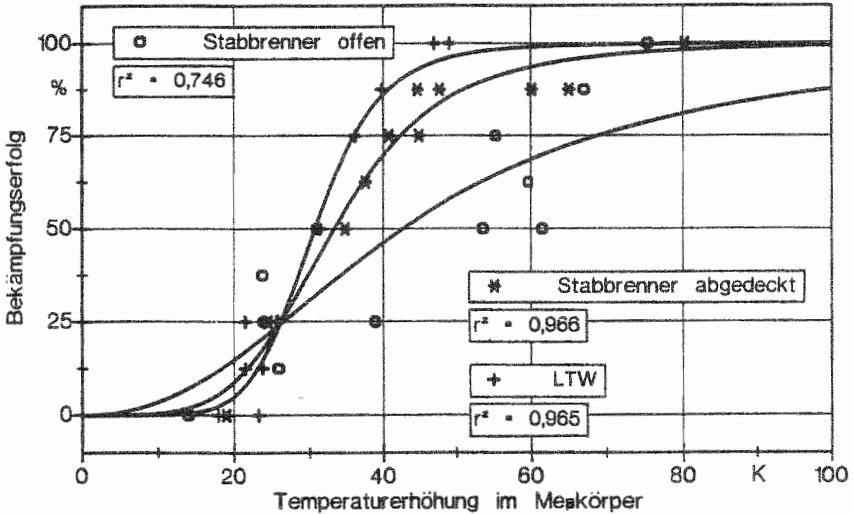


Abb. 69: Bekämpfungserfolg (Testpflanze: Winterweizen (*Triticum aestivum L.*), Entwicklungsphase 14 - 16 (ZADOKS et al. 1974)) in Abhängigkeit von der Temperaturerhöhung im Meßkörper (Mittelwert über die Arbeitsbreite) für verschiedene Gerätekonzepte

Ein Bekämpfungserfolg von 95 % (LT(95)) wurde für den offenen Stabbrenner bei einer mittleren Temperaturerhöhung von 153,6 K, für den LTW bei 47,1 K und für den abgedeckten Stabbrenner bei 63,4 K erreicht. Ein Bekämpfungserfolg von 5 % (LT(05)) wurde für den offenen Stabbrenner bei einer mittleren Temperaturerhöhung von 11,9 K, für den LTW bei 20,0 K und für den abgedeckten Stabbrenner bei 17,5 K erreicht.

Während die LT(50) durchweg die geringste Intervallbreite aufweist, wird diese für die LT(05) und die LT(95) deutlich größer.

Mit Ausnahme der LT(05) sind die Werte für den offenen Stabbrenner deutlich höher, als bei den Vergleichsgeräten. Der abgedeckte Stabbrenner und der LTW unterscheiden sich bezüglich der LT(05) und der LT(50) kaum. Erst für einen hohen Bekämpfungserfolg wurden die Unterschiede deutlicher. Der für die Steilheit der Funktion verantwortliche Faktor b betrug beim offenen Stab-

brenner 2,30, beim abgedeckten Stabbrenner 4,57 und beim LTW 6,89. Die Unterschiede lassen sich auch hier durch den unterschiedlich ungleichmäßigen Wärmeeintrag der Geräte über die Arbeitsbreite erklären (Kap. 6.2.2).

Im Vergleich zur Mungbohne weisen die Ergebnisse der Regressionsanalyse beim Winterweizen eine deutlich größere Intervallbreite (95 % Vertrauensintervall) auf. Dies kann durch die größere Variabilität des Pflanzenmaterials interpretiert werden. In der Tendenz findet sich aber auch hier der Einfluß der Gleichmäßigkeit des Wärmeeintrags über die Arbeitsbreite wieder. Die geringsten Unterschiede finden sich bezüglich der LT05. Hier ist der Einfluß der Gleichmäßigkeit des Wärmeeintrags über die Arbeitsbreite am geringsten. Bei einem Bekämpfungserfolg von 95 % wurde in Bezug auf den offenen Stabbrenner beim abgedeckten Stabbrenner ein um 49 % niedrigerer, beim LTW ein um 69 % niedrigere mittlere Temperaturerhöhung gemessen.

Tab. 20: Regressionsanalyse: Temperaturerhöhung in den Meßkörpern (Mittelwert über die Arbeitsbreite) beim Erreichen definierter Bekämpfungserfolge (Testpflanze: Winterweizen (*Triticum aestivum* L), Entwicklungsphase 14 - 16 (ZADOKS et al. 1974)) mit verschiedenen Geräten zur thermischen Unkrautbekämpfung

	LT(05) [K]	LT(50) [K]	LT(95) [K]	b [-]
offener Stabbrenner	11,9	42,7	153,6	2,3
95 % Vertrauensintervall	1,50 - 21,8	33,0 - 52,4	37,2 - 634,2	0,975 - 3,63
abgedeckter Stabbrenner	17,5	33,3	63,4	4,57
95 % Vertrauensintervall	12,7 - 21,5	31,1 - 35,6	51,4 - 86,8	3,30 - 5,84
LTW	20,0	30,7	47,1	6,89
95 % Vertrauensintervall	16,1 - 23,2	29,1 - 32,3	40,6 - 58,4	4,98 - 8,80

Der Vergleich der gemessenen Temperaturerhöhung in den **Meßkörpern** (Mittelwert über die Arbeitsbreite) beim Erreichen der verschiedenen **Bekämpfungserfolge** mit den mittels des **thermodynamischen Modells** errechneten Werten zeigte einen etwas anderen Zusammenhang (Abb. 70). Für den abgedeckten Brenner errechnete sich eine Temperaturerhöhung in den Meßkörpern von 34,8 K, für den LTW von 44,8 K. Die errechneten Temperaturerhöhungen liegen für beide

Geräte zwischen der LS(05) und der LS(95). Für den abgedeckten Brenner errechnete sich im Vergleich zum LTW eine um 22 % niedrigere Temperaturerhöhung in den Meßkörpern. Vergleicht man die relativen Unterschiede zwischen den gemessenen Temperaturerhöhungen beim Erreichen des gleichen Bekämpfungserfolges so ergibt sich für die LT(05) eine um 12% niedrigere, für die LT(50) eine um 8 % höhere und für die LT(95) eine um 35 % höhere optimale Fahrgeschwindigkeit.

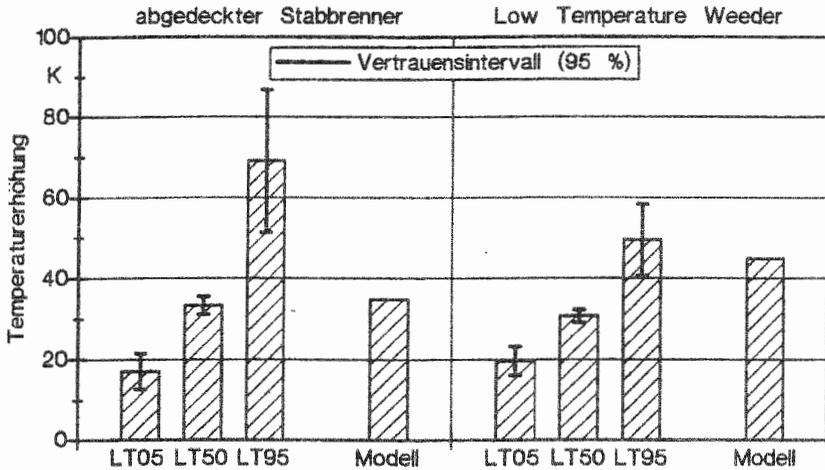


Abb. 70: Vergleich der gemessenen (Testpflanze: Winterweizen (*Triticum aestivum* L.), Entwicklungsphase 14 - 16 (ZADOKS et al. 1974)) mit der errechneten Temperaturerhöhung in den Meßkörpern (Mittelwert über die Arbeitsbreite) zur Erreichung definierter Bekämpfungserfolge mit verschiedenen Geräten zur thermischen Unkrautbekämpfung

7 Diskussion und Schlußfolgerungen

Ziel der vorliegenden Arbeit ist es, geräte- und verfahrenstechnische Ansätze für die Erhöhung der Fahrgeschwindigkeit und die Minimierung des flächenbezogenen Gaseinsatzes zu erarbeiten. Im folgenden Teil werden die Ergebnisse aus den Modellrechnungen und die Ergebnisse aus dem Gerätevergleich mit dem Stand des Wissens diskutiert. Die Diskussion gliedert sich in vier Abschnitte:

- Im ersten Abschnitt werden die Auswirkungen der verschiedenen Einflußfaktoren auf die optimale Fahrgeschwindigkeit und den flächenbezogenen Gaseinsatz mit dem Stand des Wissens diskutiert und die entsprechenden Schlußfolgerungen für die Optimierung der Geräte- und Verfahrenstechnik gezogen.
- Im zweiten Abschnitt werden die optimierten Gerätekonzepte auf der Basis der Rechenergebnisse und auf der Grundlage des meßtechnischen Gerätevergleichs eingeordnet.
- Im dritten Abschnitt werden aus dem Gerätevergleich Schlußfolgerungen für die Methoden zur meßtechnischen Überprüfung von Geräten zur thermischen Unkrautbekämpfung (Speed (Dose)/Response, Temperaturmessung (Meßkörper)) gezogen.
- Im letzten Abschnitt erfolgt eine abschließende Bewertung des thermodynamischen Modells als methodischer Ansatz zur geräte- und verfahrenstechnischen Optimierung der thermischen Unkrautbekämpfung.

7.1 Einflußfaktoren auf die optimale Fahrgeschwindigkeit und den flächenbezogenen Gaseinsatz bei der thermischen Unkrautbekämpfung mit dem Gerätekonzept "Abflammen"

Die Simulationen mit dem thermodynamischen Modell haben gezeigt, daß die optimale Fahrgeschwindigkeit und der flächenbezogene Gaseinsatz zur Bekämpfung eines Unkrautbestandes von der eingesetzten Gerätetechnik, vom Pflanzenbestand und von den klimatischen Ausgangsbedingungen beeinflußt werden. Darüber hinaus wurden im meßtechnischen Gerätevergleich der Einfluß der Gleichmäßigkeit des Wärmeeintrags über die Arbeitsbreite untersucht und die Rechenergebnisse zum Einfluß der Strömungsrichtung der heißen Gase überprüft. Der Einfluß des Bodens war nicht Gegenstand der Untersuchungen. Aus dem Vergleich der meßtechnisch erarbeiteten Ergebnisse mit den entsprechenden Modellrechnungen lassen sich aber wichtige Schlußfolgerungen zum Einfluß des Bodens ableiten.

Das Ziel einer thermischen Behandlung ist das Abtöten eines Pflanzenbestandes in einem Arbeitsgang. Der Einfluß der Pflanzen, auf die optimale Fahrgeschwindigkeit und den flächenbezogenen Gaseinsatz ist erheblich. Deshalb werden die entsprechenden Zusammenhänge in diesem Kapitel zuerst diskutiert.

7.1.1 Einfluß der Pflanzen

Der Einfluß der Pflanzen läßt sich auf einen morphologisch unterschiedlichen Aufbau der Einzelpflanze und unterschiedliche Strukturmerkmale des Unkrautbestandes zurückführen.

7.1.1.1 Morphologischer Aufbau der Einzelpflanze

Pflanzenart und Wachstumsstadium beeinflussen die optimale Fahrgeschwindigkeit und den flächenbezogenen Gaseinsatz einer thermischen Behandlung (HOFFMANN 1989). Die Versuche im Heißluftwindtunnel haben gezeigt, daß für das thermische Abtöten in einem Arbeitsgang ein lebenswichtiger oberirdischer Teil der Pflanze auf 60 °C erwärmt werden muß. Damit gewinnt die Größe und die morphologische Struktur der Einzelpflanze an Bedeutung.

Im thermodynamischen Modell werden die Pflanzen durch einen zylindrischen Körper abgebildet. Die Pflanzengröße wird durch den Zylinderdurchmesser variiert. Die unterschiedliche thermische Empfindlichkeit wird durch unterschiedliche notwendige Schädigungstiefen abgebildet. Als notwendige Schädigungstiefe wird der Abstand des lebenswichtigen Pflanzenteiles von der Pflanzenoberfläche, also dem Ort des Wärmeeintrages definiert. Thermisch empfindliche Pflanzenteile (z. B. Blätter) zeichnen sich durch eine geringe notwendige Schädigungstiefe aus. Thermisch "tolerante" Pflanzenteile erfordern eine hohe Schädigungstiefe. Hier führt ein Abtöten der Randbereiche nicht zum Absterben der Gesamtpflanze. Die Wärmestromdichte durch Wärmeleitung ist im Verhältnis zur temperaturwirksamen Nettowärmestromdichte in die Pflanze sehr klein. Dies hat zur Folge, daß mit zunehmender notwendiger Schädigungstiefe der Einfluß der Wärmeleitung auf die notwendige Behandlungsdauer an Bedeutung gewinnt. Da die Behandlungsdauer durch die gerätespezifische "wirksame Gerätelänge" definiert wird, kann die notwendige lange Behandlungsdauer nur durch eine entsprechend langsame Fahrgeschwindigkeit erreicht werden. In den Standarddatensätzen betrug der Unterschied in der notwendigen Schädigungstiefe zwischen der thermisch "sensiblen" und der thermisch "toleranten" Modellpflanze nur 0,95 mm. Dieser Unterschied führte zu teilweise gegensätzlichen Ergebnissen bei der Bewertung von geräte- und verfahrenstechnischen Einflußfaktoren. Im Praxiseinsatz ist mit einem sehr heterogenen Unkrautbestand hinsichtlich des morphologischen Aufbaues der Einzelpflanzen und der

Wachstumsstadien zu rechnen. Für die vollständige Bekämpfung eines Unkrautbestands in einem Arbeitsgang bestimmt die thermisch "toleranteste" Pflanze die optimale Fahrgeschwindigkeit. Für die Vorauflaufbehandlung und die thermische Unkrautbekämpfung zwischen den Reihen sind den Simulationen mit den thermisch "toleranten" Modellpflanzen (Schädigungstiefe "Mitte") ein höherer Stellenwert einzuräumen, als den Simulationen mit den thermisch "sensiblen" (Schädigungstiefe 0,05 mm). Für die selektive Unkrautbekämpfung in der Reihe ist ein ausreichend großer Unterschied der optimalen Fahrgeschwindigkeit zwischen dem thermisch "sensibleren" Unkraut und dem thermisch "toleranteren" Kulturpflanze eine entscheidende Voraussetzung. In der Modellpflanze läßt sich dieser Unterschied durch die Wahl der notwendigen Schädigungstiefe abbilden. Die Simulationen zum Einfluß der physikalischen Systemparameter des wärmeübertragenden Gasstromes auf die notwendige Behandlungsdauer haben gezeigt, daß sich dieser Unterschied durch die Erhöhung der temperaturwirksamen Nettowärmestromdichte vergrößern läßt. Die mit Abstand am größten Spielräume ergeben sich durch die Erhöhung des Wassergehaltes im Gasstrom. In einem weiteren Versuch soll deshalb der Einfluß eines erhöhten Wassergehaltes im Gasstrom auf die Selektivität einer thermischen Behandlung untersucht werden.

Für den meßtechnischen Gerätevergleich auf der Grundlage des methodischen Ansatzes Speed (Dose)/Response wurden mit der Mungbohne (*Vigna radiata* (L.) var *radiata*) und dem Winterweizen (*Triticum aestivum* L.) zwei morphologisch sehr unterschiedliche Pflanzen eingesetzt. Der Schädigungsort, der zum Absterben der Gesamtpflanze führte, wies bei beiden Pflanzen eine zylindrische Form auf. Der Zylinderdurchmesser unterschied sich nur geringfügig. Die optimale Fahrgeschwindigkeit zum Erreichen des gleichen Bekämpfungserfolges war bei allen Gerätekonzepten beim Winterweizen deutlich niedriger als bei der Mungbohne. Dieses Ergebnis läßt sich auf eine unterschiedliche notwendige Schädigungstiefe zurückführen. Während bei der Mungbohne eine oberflächliche Erwärmung des Stengels auf 60°C zum Abtöten der Gesamtpflanze genügte, mußte beim Winterweizen die unterste Blattscheide vollständig durchwärmt werden. Durch das Vertrocknen des irreversibel geschädigten Gewebes verklebte die Blattscheide derart, daß ein erneuter Durchtrieb von Blättern verhindert wurde.

Große Pflanzen führen zu niedrigen optimalen Fahrgeschwindigkeiten und hohen flächenbezogenen Gaseinsätzen. Bei einer sehr geringen notwendigen Schädigungstiefe (0,05 mm) ist der Einfluß der Pflanzengröße deutlich geringer, als wenn das gesamte Pflanzengewebe durchwärmt werden muß.

ASCARD (1995) ermittelte auf der Basis der Speed (Dose)/Response große Unterschiede zwischen verschiedenen Unkrautarten. Pflanzenarten mit einem ungeschützten Vegetationspunkt wie *Chenopodium album*, *Stellaria media* und *Urtica urens* konnten mit deutlich höheren Arbeitsgeschwindigkeiten und niedrigeren flächenbezogenen Gaseinsätzen bekämpft werden als *Capsella bursa-pastoris* und *Chamomilla sueveolens*, die einen vergleichsweise geschützten

Vegetationspunkt aufwiesen. Geschützt heißt in diesem Zusammenhang, daß die direkte Anströmung des Vegetationspunktes durch eine Reihe entsprechend angeordneter Blätter entweder erschwert, oder vollständig verhindert wird. Damit ist ein Wärmestrom in die Oberfläche des Vegetationspunktes vermindert oder nur über Leitung durch die Hüllblätter möglich. *Poa annua* weist einen gut geschützten Vegetationspunkt knapp über oder unterhalb der Bodenoberfläche auf. Diese Pflanzenart konnte nicht vollständig in einem Arbeitsgang bekämpft werden.

Verfahrenstechnisch ist die Pflanzengröße nur über den Behandlungszeitpunkt zu beeinflussen. Die Behandlung muß zu einem möglichst kleinen Wachstumsstadium der Pflanzen, also möglichst frühzeitig erfolgen. Große Pflanzen weisen bei gleicher Anzahl eine höhere Pflanzenmasse auf als kleine. Damit gewinnt die Frühzeitigkeit der Behandlung zusätzlich an Bedeutung.

7.1.2.2 Bestandsstruktur

Die für die thermische Unkrautbekämpfung wichtigen Strukturmerkmale eines Pflanzenbestandes sind die **Bestandsdichte** und die **Bestandszusammensetzung**.

Eine hohe Bestandsdichte (kg/m^2) führt zu niedrigen optimalen Fahrgeschwindigkeiten und hohen flächenbezogenen Gaseinsätzen. Dieses Ergebnis steht im Einklang mit den von ASCARD (1995) auf der Basis der Speed (Dose)/Response erarbeiteten Resultate.

Verfahrenstechnisch ist die Pflanzendichte kaum zu beeinflussen, muß aber bei der Festlegung der Fahrgeschwindigkeit berücksichtigt werden.

Im Gegensatz zu den Versuchen mit Testpflanzen muß in der Praxis mit sehr heterogenen Unkrautbeständen gerechnet werden. Ist das vollständige Abtöten des Pflanzenbestandes das Ziel der thermischen Behandlung, bestimmt die thermisch "toleranteste" Pflanze die optimale Fahrgeschwindigkeit. Diese Problematik verschärft sich mit zunehmender Pflanzengröße.

Verfahrenstechnisch kann diese Problematik nur durch eine frühzeitige Behandlung entschärft werden.

7.1.1 Einfluß der Gerätetechnik

Die Ergebnisse zeigen, daß ein großer Spielraum für gerätetechnische Verbesserungen besteht. Nicht immer lassen sich die Forderungen nach einer höheren Fahrgeschwindigkeit bei gleichzeitiger

Reduzierung des flächenbezogenen Gaseinsatzes vereinen.

7.1.1.1 Luftüberschuß der Verbrennung

Eine Verringerung des Luftüberschusses der Verbrennung erhöht die optimale Fahrgeschwindigkeit und verringert den flächenbezogenen Gaseinsatz. Während bei einer minimalen notwendigen Schädigungstiefe von 0,05 mm der berechnete Effekt noch deutlich ausfiel, war er bei einer großen notwendigen Schädigungstiefen geringer.

Dieser Zusammenhang erklärt sich aus der damit verbundenen Erhöhung der maximalen Verbrennungstemperatur. Bei den Simulationen wurde davon ausgegangen, daß die bisher eingesetzten atmosphärischen Brenner mit einem erhöhten Luftüberschuß der Verbrennung arbeiten. Eine Verringerung des Luftüberschusses der Verbrennung ist durch den Einsatz von Gebläseburnern zu erreichen.

Aus der Literatur liegen keine Ergebnisse zu diesem Zusammenhang vor.

7.1.1.2 Gasdurchsatz am Brenner

Eine Erhöhung des Gasdurchsatzes am Brenner führt zu einer Erhöhung der optimalen Fahrgeschwindigkeit. Bei einer minimalen notwendigen Schädigungstiefe von 0,05 mm führte eine Verdoppelung des Gasdurchsatzes am Brenner zu einer Erhöhung der optimalen Fahrgeschwindigkeit um etwas mehr als 100 % und damit zu einer entsprechenden Verringerung des flächenbezogenen Gaseinsatzes. Ist eine hohe Schädigungstiefe erforderlich, so fällt die mögliche Erhöhung der optimalen Fahrgeschwindigkeit deutlich geringer aus. Hier steigt der flächenbezogene Gaseinsatz mit steigendem Gasdurchsatz am Brenner deutlich an.

Dieser Zusammenhang wurde durch andere Versuchsansteller mehrfach bestätigt (LILJEDAHL et al. 1964, PARKER et al. 1965, ANDERSON et al. 1967, LIEN et al. 1967, MATTHEWS und SMITH 1971, Castille und GHESQUIERE 1985, KEPNER et al. 1987, PARISH 1989a, RAHKONEN und VANHALA 1993, ASCARD 1995).

ASCARD (1995) stellte auf der Grundlage der Speed (Dose)/Response mit zunehmendem Gasdurchsatz am Brenner eine Zunahme des flächenbezogenen Gaseinsatzes fest. Bei kleinen Pflanzen war diese Zunahme geringer als bei großen. Unterstellt man, daß mit zunehmendem Pflanzenwachstum die notwendige Schädigungstiefe zunimmt und eine oberflächliche Erwärmung für ein Abtöten

der verwendeten Pflanzen nicht ausreicht, bestätigt das thermodynamische Modell dieses Ergebnis.

Eine deutliche Erhöhung des Gasdurchsatzes am Brenner ist nur durch den Einsatz leistungsfähigerer Brenner möglich.

7.1.1.3 Brennerrichtung

Ein vorwärts gerichteter Brenner führt zu einer höheren Fahrgeschwindigkeit und zu einem niedrigeren flächenbezogenen Gaseinsatz, als ein rückwärts gerichteter. Während der Effekt bei einer geringen notwendigen Schädigungstiefe von 0,05 mm noch sehr deutlich ausfällt, wird er mit zunehmender Schädigungstiefe geringer.

Im thermodynamischen Modell wird davon ausgegangen, daß der damit verbundene Vorteil der Erhöhung der Strömungsgeschwindigkeit relativ zu den Pflanzen über die gesamte "wirksame" Gerätelänge umgesetzt wird. Die meßtechnische Überprüfung dieses Einflußfaktors im Versuchstand hat gezeigt, daß ein vorwärts gerichteter Brenner sowohl für einen offenen, als auch für einen abgedeckten Stabbrenner aber zu einer Verkürzung der "wirksamen" Gerätelänge führt, was den theoretischen Vorteil der Brennerausrichtung aufhebt. Ein prinzipieller Nachweis dieses Effektes gelang aber bei der meßtechnischen Überprüfung des Low Temperature Weeders. Der Prototyp war mit einem druckstabilen Radialventilator für eine aktive Strömungsführung ausgerüstet. Hier führte ein vorwärts gerichteter Gasstrom durchweg zu einem höheren Wärmeeintrag in die Meßkörper, als ein rückwärts gerichteter. Der Vorteil der Erhöhung der Strömungsgeschwindigkeit relativ zu den Pflanzen konnte sich beim LTW (druckstabiler Radialventilator) im Gegensatz zum strömungsdynamisch labilen Stabbrenner (atmosphärischer Brenner) durchsetzen.

ASCARD (1995) verglich auf der Basis der Speed (Dose)/Response die Arbeitsgeschwindigkeit unterschiedlicher Gerätevarianten bei gleichem Bekämpfungserfolg. Ein untersuchtes Gerät wies dabei eine Brennerstellung in Fahrtrichtung auf. Es konnte in diesen Versuchen keine erhöhte Fahrgeschwindigkeit gegenüber den Geräten mit vorwärts gerichtetem Brenner nachgewiesen werden.

7.1.1.3 Emissionsverhältnis des Gaskörpers

Eine Erhöhung des Emissionsverhältnisses des Gaskörpers führt nur zu einer geringfügigen Veränderung der optimalen Fahrgeschwindigkeit und des flächenbezogenen Gaseinsatzes. Während für eine minimale notwendige Schädigungstiefe von 0,05 mm eine minimale Erhöhung der optimalen

Fahrgeschwindigkeit errechnet wurde, führte eine hohe notwendige Schädigungstiefe sogar zu einer geringfügigen Verringerung der optimalen Fahrgeschwindigkeit und damit des flächenbezogenen Gaseinsatzes.

Aus den bisherigen Arbeiten liegen keine Ergebnisse zu diesem Zusammenhang vor.

7.1.1.4 Einfluß der Gestaltung der Abdeckung

Die konstruktive Gestaltung der Abdeckung übt einen großen Einfluß auf die optimale Fahrgeschwindigkeit und den flächenbezogenen Gaseinsatz aus. Einflußfaktoren sind die **Länge**, die **Höhe** und der **k-Wert** der Abdeckung:

Eine **Verlängerung der Abdeckung** führt zu einer Erhöhung der optimalen Fahrgeschwindigkeit und einer Verringerung des flächenbezogenen Gaseinsatzes. Mit zunehmender notwendiger Schädigungstiefe wird der Effekt deutlicher.

Durch die Verlängerung der Abdeckung wird die Einwirkdauer des heißen Gasstromes auf die Pflanzen erhöht.

Dieses Ergebnis wird durch Arbeiten von HANSEN (1969), LUTTRELL und GORDON (1969), VRIESMA (1985) und STOREHEIER (1991) bestätigt. Für einen Gasdurchsatz am Brenner von 12 kg/(h m) war eine Abdeckungslänge von 1,5 m ausreichend. Eine weitere Verlängerung der Abdeckung hatte nur einen minimalen Effekt. Dieses Resultat deckt sich mit den auf der Basis der Temperaturmessung (Thermoelemente) erarbeiteten Ergebnissen von STOREHEIER (1991).

Eine **Verringerung der Höhe der Abdeckung** führt zu einer Erhöhung der optimalen Fahrgeschwindigkeit und zu einer Verringerung des flächenbezogenen Gaseinsatzes.

Eine **Abflachung der Abdeckung** zum Ende hin erhöht ebenfalls die optimale Fahrgeschwindigkeit und verringert den flächenbezogenen Gaseinsatz.

Mit zunehmender notwendiger Schädigungstiefe nehmen beide Effekte ab.

Durch die Verringerung der Höhe der Abdeckung insgesamt bzw. durch die Abflachung zum Ende der Abdeckung wird die Strömungsgeschwindigkeit der Gase und damit die temperaturwirksame Nettowärmestromdichte in die Pflanzen erhöht.

Diese Ergebnisse decken sich mit den auf der Basis der Temperaturmessung (Thermoelemente) erarbeiteten Ergebnissen von STOREHEIER (1991).

Eine gute Isolierung der Abdeckung erhöht geringfügig die optimale Arbeitsgeschwindigkeit und verringert dementsprechend nur leicht den flächenbezogenen Gaseinsatz. STOREHEIER (1991) führte auf der Basis von Thermoelementmessungen Versuche zu diesem Zusammenhang durch. Er konnte keinen Einfluß der Isolierung nachweisen. In diesem Zusammenhang wurden allerdings keine Angaben über die Art und das Ausmaß der Isolierungsmaßnahme gemacht.

7.1.1.5 Gleichmäßigkeit des Wärmeeintrags über die Arbeitsbreite

Eine Vergleichmäßigung des Wärmeeintrags über die Arbeitsbreite erhöht die optimale Fahrgeschwindigkeit und verringert den flächenbezogenen Gaseinsatz.

Die meßtechnische Überprüfung der Gerätekonzepte hat gezeigt, daß die Gleichmäßigkeit des Wärmeeintrags über die Arbeitsbreite der Geräte ein wichtiger Einflußfaktor ist. Für das vollständige Abtöten eines Unkrautbestandes in einem Arbeitsgang muß im Prinzip so langsam gefahren werden, daß am Ort des geringsten Wärmeeintrags noch ausreichend Energie in die thermisch "toleranteste" Pflanze eingetragen wird.

Gerätetechnisch ist auf saubere Brennerdüsen zu achten. Eine geringfügige Verengung eines Düsenquerschnitts durch Schmutz und Ablagerungen aus dem Verbrennungsprozeß verringert an dieser Stelle den Gasdurchsatz und damit den Wärmeeintrag. Bei der meßtechnischen Überprüfung der Geräte konnte darüber hinaus eine vergleichmäßigende Wirkung einer Abdeckung nachgewiesen werden.

In der Literatur finden sich keine Ergebnisse zu diesem Zusammenhang.

7.1.3 Einfluß von Klimafaktoren

Eine hohe Gewebeausgangstemperatur erhöht die optimale Fahrgeschwindigkeit und verringert den flächenbezogenen Gaseinsatz.

In den bisherigen Arbeiten wurde dieser Zusammenhang nicht berücksichtigt. Meßtechnisch ist die exakte Erfassung der Gewebeausgangstemperatur nicht ganz unproblematisch. Sie muß nicht mit der Temperatur der Umgebungsluft übereinstimmen (RASCHKE 1956). Eine direkte Messung der

Gewebetemperatur ist aber schwierig, da auch hier aufgrund der thermodynamischen Zusammenhänge an jeder Stelle eine andere Temperatur herrschen kann. Vergleichende Versuche zum Einfluß der Geräte- und Verfahrenstechnik sollten deshalb unter gleichen Witterungsbedingungen durchgeführt werden.

Verfahrenstechnisch ist die Gewebeausgangstemperatur nur über die Wahl des Behandlungszeitpunktes zu beeinflussen. Wenn möglich sollte die Behandlung bei hoher Einstrahlung und hohen Lufttemperaturen durchgeführt werden.

7.1.4 Einfluß von Bodenparametern

Der Boden beeinflusst als Pflanzenstandort die optimale Fahrgeschwindigkeit und den flächenbezogenen Gaseinsatz erheblich. Einflußfaktor ist hier die Rauigkeit der Bodenoberfläche.

Wie stark der Einfluß der Oberflächenrauigkeit des Bodens ist, hängt von den zu bekämpfenden Pflanzen und vom verwendeten Gerätekonzept ab. Die Ergebnisse aus dem Gerätevergleich auf der Basis der Speed (Dose)/Response, den Temperaturmessungen (Meßkörper) und den Rechenergebnissen des thermodynamischen Modells unterstreichen diesen Zusammenhang. Der Schädigungsort lag für beide Pflanzenarten mehrere Zentimeter über dem Boden. Hier bildete das thermodynamische Modell den Unterschied in der optimalen Fahrgeschwindigkeit zum Erreichen definierter Bekämpfungserfolge zwischen dem abgedeckten Brenner und dem LTW sehr gut ab. Der Meßkörper erfaßte dagegen den Wärmeeintrag unmittelbar am Boden bis zu einer Höhe von 1 cm. Hier unterscheiden sich Meßergebnisse und Rechenergebnisse deutlich. Die Rechenergebnisse für den LTW sind vergleichsweise etwas zu hoch, die für den abgedeckten Stabbrenner vergleichsweise zu niedrig.

Ein ähnlicher Zusammenhang konnte beim Vergleich der errechneten mit den gemessenen Temperaturerhöhungen in den Meßkörpern in Abhängigkeit von der Fahrgeschwindigkeit ermittelt werden. Der Rechenwert lag durchgehend über dem Meßwert. Die prozentuale Abweichung des Meßwertes vom Rechenwert war aber beim LTW deutlich größer als beim abgedeckten Stabbrenner.

Dieses Resultat läßt sich durch eine unterschiedliche Dicke der Grenzschicht am Boden erklären. Dieser Zusammenhang konnte im thermodynamischen Modell nicht abgebildet werden. Die Grenzschichtdicke am Boden wird von der Höhe der Abdeckung und vom Winkel der Strömungsrichtung zum Boden beeinflusst (Kap 4.1.2). Eine flachere Abdeckung führt zu dünneren Grenzschichten und umgekehrt. Ein steilerer Brennerwinkel hat ebenfalls eine dünnere Grenzschicht zur Folge.

Turbulenzen und der thermische Auftrieb können aber zu einer Verkürzung der "wirksamen" Gerätelänge führen, so daß der Vorteil des höheren temperaturwirksamen Nettowärmestromdichte durch den Nachteil der Verkürzung der Behandlungsdauer wieder aufgehoben wird.

Die Höhe der Abdeckung betrug beim abgedeckten Stabbrenner am Anfang 17 cm und flachte zum Ende hin auf 7 cm ab. Beim LTW betrug die Höhe der Abdeckung durchgehend 20 cm. Damit ergibt sich für den LTW eine dickere Grenzschicht zum Boden als beim abgedeckten Stabbrenner.

Diese komplexen Interaktionen zwischen Gerät, Boden und Höhe des Schädigungsortes an der Pflanze können im thermodynamischen Modell nicht abgebildet werden. Eine meßtechnische Überprüfung der Zusammenhänge ist daher zwingend notwendig.

Gerätetechnisch ist eine möglichst flache Abdeckung zu fordern.

Aus verfahrenstechnischen Gesichtspunkten ist für eine möglichst ebene Bodenoberfläche zum Zeitpunkt der thermischen Behandlung zu sorgen. Dieses Ergebnis deckt sich mit den Empfehlungen von HOFFMANN (1989).

7.2 Schlußfolgerungen für die Gerätekonzepte

Aus den Ergebnissen lassen sich optimierte Gerätekonzepte für eine schlagkräftige und sparsame thermische Unkrautbekämpfung ableiten. Die verschiedenen gerätetechnischen Optimierungsansätze lassen unterschiedliche Mehrkosten gegenüber den bisher eingesetzten Ausführungen des Gerätekonzeptes "Abflammen" erwarten. Für eine ökonomische Bewertung der verschiedenen gerätetechnischen Veränderungen müssen die über die Einsatzfläche erzielten Einsparungen an variablen Kosten den entsprechenden Mehrkosten für die Anschaffung (Fixkosten) gegenübergestellt werden. Die Einsparung an variablen Kosten ist eine betriebspezifische Größe. Eine aussagekräftige ökonomische Bewertung der möglichen gerätetechnischen Veränderungen würde den Rahmen dieser Arbeit sprengen. Für die notwendige Klärung dieser Zusammenhänge muß auf weiterführende (Kap. 8) Arbeiten verwiesen werden.

7.2.1 Gerätekonzept "Abflammen"

Für die thermische Unkrautbekämpfung mit dem Gerätekonzept "Abflammen" ergeben sich aus den Ergebnissen der Simulationen hinsichtlich der Erhöhung der optimalen Fahrgeschwindigkeit und der Minimierung des flächenbezogenen Gaseinsatzes eine Reihe geräte- und verfahrenstechnischer

verfahrenstechnischer Ansatzpunkte.

Bei der Unkrautbekämpfung im Vorauflauf und zwischen den Reihen ist die Anbringung einer Abdeckung über der Flamme zwingend notwendig. In den Versuchen zum Gerätevergleich konnte für beide Testpflanzen eine Erhöhung der optimalen Fahrgeschwindigkeit um nahezu 300 % nachgewiesen werden. Darüber hinaus verbessert sie die Gleichmäßigkeit des Wärmeintrags über die Arbeitsbreite. Während der Wärmeeintrag beim strömungsdynamisch sehr labilen offenen Stabbrenner in Bodennähe extrem streut, wirkt eine optimal gestaltete Abdeckung über der Flamme auch hier vergleichmäßigend. Die Abdeckung sollte möglichst niedrig sein und zum Ende hin abflachen. Eine gute Isolierung dient nicht nur der Verringerung der Verluste, sondern schützt auch den Anwender vor Verletzungen. Um zusätzliche Abluftverluste zu den Seiten zu vermeiden, sollte die Abdeckung möglichst dicht zum Boden abschließen. Es ist dafür zu sorgen, daß die atmosphärischen Brenner unter diesen Bedingungen noch ausreichend Verbrennungsluft ansaugen können. Dies kann durch Zumischung der Verbrennungsluft bereits in der Zuleitung (IFT-Brenner) und durch eine entsprechend große Öffnung am Anfang der Abdeckung erfolgen. Um das Durchströmen der Abdeckung nicht zu behindern, ist auf eine entsprechend große Öffnung am Ende der Abdeckung zu achten. Die Länge der Abdeckung ist dem Gasdurchsatz am Brenner anzupassen.

Eine weitere Steigerung der optimalen Fahrgeschwindigkeit und damit der Schlagkraft der Geräte ist nur durch eine Erhöhung des Gasdurchsatzes am Brenner zu erreichen. Bei atmosphärischen Brennern müssen dafür größere Düsen eingesetzt oder die Düsenanzahl erhöht werden. Konstruktiv muß auch hier auf eine ausreichende Zumischung von Verbrennungsluft geachtet werden. Der erhöhte flächenbezogene Gaseinsatz kann durch eine entsprechende Verlängerung der Abdeckung zum Teil kompensiert werden. Insgesamt muß aber gerade bei Pflanzen mit einer großen notwendigen Schädigungstiefe mit einem erhöhten flächenbezogenen Gaseinsatz gerechnet werden. Die Auslegung der Brenner erfolgt nach der angestrebten Fahrgeschwindigkeit und der auszubringenden Gasmenge.

Der Einsatz von Gebläsebrennern ermöglicht eine weitere Erhöhung der optimalen Fahrgeschwindigkeit und eine entsprechende Verringerung des flächenbezogenen Gaseinsatzes. Gerade bei einem hohen Gasdurchsatz am Brenner und einer entsprechend langen und flachen Abdeckung kann der Gebläsebrenner für die Sicherstellung einer optimalen Verbrennung notwendig werden. Darüber hinaus erlaubt der Gebläsebrenner auch die Verwendung anderer, weitaus billigerer Energieträger als Flüssiggas. Das würde dazu beitragen, die variablen Verfahrenskosten zusätzlich zu verringern. Denkbar wäre der Einsatz von Heizöl oder Rapsöl.

7.2.2 Gerätekonzept "Low Temperature Weeder"

Trotz aller Optimierungsmaßnahmen entweicht am Ende der Abdeckung ein mehr oder minder großer Teil der eingesetzten Verbrennungsenergie. Eine weitergehende Optimierung der thermischen Unkrautbekämpfung hinsichtlich der Minimierung des flächenbezogenen Gaseinsatzes ist nur durch eine Veränderung des Gerätekonzepts möglich. Der "Low Temperature Weeder" (LTW) stellt ein neuartiges Gerätekonzept zur thermischen Unkrautbekämpfung dar. Er arbeitet mit einem heißen Gasstrom, der mit Hilfe eines druckstabilen Radialgebläses in einem gut isolierten Blechkanal im Kreis herumgeführt wird. Der Kreislauf ist nur zum Boden hin offen. Auf der Vorder- und der Rückseite und zu den Seiten schließt die Abdeckung zum Boden hin möglichst dicht ab. Die Wärmezeugung erfolgt mit einem modulierenden Gebläsebrenner in einer offenen Brennkammer im oberen Teil des Kreislaufs. Durch die Entkoppelung von Gasdurchsatz und Strömungsgeschwindigkeit der Gase ist es möglich, die Strömungsgeschwindigkeit und damit die konvektive Wärmestromdichte unabhängig vom Gasdurchsatz am Brenner zu erhöhen.

Für die Wärmeströme bei einer thermischen Unkrautbekämpfung mit dem LTW ergibt sich folgendes Bild: Die heißen Gase durchströmen die zum Boden hin offene Abdeckung. Dabei wird ein Teil der in der Verbrennungsluft enthaltenen Wärmeenergie auf die Pflanzen und in den Boden übertragen. Der nicht übertragene Rest wird im Gegensatz zu den bisherigen Gerätekonzepten zum Ort der Wärmezeugung zurückgeführt und durch den Gebläsebrenner wieder auf die Arbeitstemperatur erhitzt. Weitere Verluste treten durch die Wärmeabgabe durch die Abdeckung und durch das Entweichen der mit dem Gebläsebrenner in den Kreislauf eingebrachten Abgase auf. Die Abgase werden mit maximaler Verbrennungstemperatur in den Kreislauf eingebracht und entweichen durch den Spalt zum Boden mit momentaner Arbeitstemperatur.

Die tatsächlich notwendige Brennerleistung zur Erreichung der Arbeitstemperatur hängt bei gegebener Verbrennung von der Abkühlung des Gasstromes beim Durchströmen der zum Boden hin offenen Abdeckung ab. Eine "lastabhängige" und damit sparsame Betriebsweise des LTW erfordert den Einsatz eines modulierenden Brenners.

Der LTW wurde im thermodynamischen Modell abgebildet und mit einer optimierten Variante des Gerätekonzeptes "Abflammen" hinsichtlich der optimalen Fahrgeschwindigkeit und des flächenbezogenen Gaseinsatzes verglichen. Der LTW ermöglicht fast durchweg deutlich höhere **Fahrgeschwindigkeiten** als das mit einem Gebläsebrenner ausgerüstete Gerätekonzept "Abflammen". Allerdings ist die optimale Fahrgeschwindigkeit zum Abtöten eines definierten Modellpflanzenbestandes für beide Gerätekonzepte nur eine Frage der Auslegung. Aufgrund der errechneten Ergebnisse kann die für den LTW gewählte Auslegung als ausreichend bezeichnet werden. Der Energiespareffekt des Gerätekonzeptes "LTW" kam genau dann zum tragen, wenn für

für das Vergleichsgerät (Gebläsebrenner) ungünstige Voraussetzungen herrschten. Große Modellpflanzen in Verbindung mit einer hohen notwendigen Schädigungstiefe zwangen das Gerätekonzept "Abflammen" zu einer langsamen Fahrgeschwindigkeit. Da bei diesem Gerätekonzept der flächenbezogene Gaseinsatz über den festen Gasdurchsatz am Brenner an die Fahrgeschwindigkeit gekoppelt ist, ergaben sich zwangsläufig hohe Gaseinsätze zur Erreichung des Behandlungszieles. Beim Gerätekonzept "LTW" ist der flächenbezogene Gaseinsatz von der Fahrgeschwindigkeit entkoppelt. Bei niedriger Last muß über den Gebläsebrenner weniger Energie zum Erreichen der Arbeitstemperatur zugeführt werden. Dies erfordert eine entsprechende Regelung des modulierenden Gebläsebrenners. Die Auslegung des Gebläsebrenners hängt von der angestrebten Fahrgeschwindigkeit ab. In den Simulationen wurde ein lastabhängiger Gasdurchsatz am Brenner von 5,5 kg/hm (72,1 kW/m) bis 19,8 kg/hm (259,4 kW/m) errechnet. Damit ist für den modulierenden Gebläsebrenner ein Stellbereich von 1 : 3,6 erforderlich.

Die meßtechnische Überprüfung eines ausgeführten Prototypen und der Vergleich der Ergebnisse mit den errechneten Werten ergab eine gute Übereinstimmung hinsichtlich des Bekämpfungserfolges der eingesetzten Testpflanzen. Der Prototyp wies im Gerätevergleich die höchste Gleichmäßigkeit des Wärmeintrans über die Arbeitsbreite auf. Aufgrund der Rechenergebnisse ist für die Erzielung einer ausreichend hohen Fahrgeschwindigkeit eine wirksame Gerätelänge von 2 m, eine Strömungsgeschwindigkeit von 6 - 8 m/s und eine Arbeitstemperatur von 400 °C ausreichend. Um auch in unmittelbarer Bodennähe eine hohe Nettowärmestromdichte zu garantieren, muß die Strömungsführung unter der am Boden offenen Abdeckung verbessert werden. Ein Einsatz von Leitblechen, die die Luft zum Boden drücken könnte hier weiterhelfen.

7.3 Methoden zur meßtechnischen Überprüfung von Gerätekonzepten zur thermischen Unkrautbekämpfung

Für die meßtechnische Überprüfung der Geräte haben sich sowohl der methodische Ansatz der Speed (Dose)/Response als auch die Temperaturmessung bewährt.

7.3.1 Speed (Dose)/Response

Der methodische Ansatz der Speed (Dose)/Response ermöglicht eine vergleichende Beurteilung des Bekämpfungserfolges. Die notwendige Standardisierung wird durch den Einsatz von Testpflanzen erreicht. In den Versuchen wurden dafür zwei verschiedene Pflanzenarten (Mungbohne (*Vigna radiata* (L.) var. *radiata*), Winterweizen (*Triticum aestivum* L.)) eingesetzt. Für einen vergleichbaren Bekämpfungserfolg mußte beim Winterweizen deutlich langsamer gefahren werden

Mungbohne. Die Ableitung einer Empfehlung für eine optimale Fahrgeschwindigkeit im Praxiseinsatz ist damit nicht möglich. Die relativen Unterschiede zwischen den Geräten blieben aber in etwa erhalten. Der methodische Ansatz der Speed (Dose)/Response hat sich bei den Versuchen zum Gerätevergleich bewährt. Für eine hohe Qualität der Ergebnisse ist ein möglichst einheitliches Pflanzenmaterial zwingend notwendig. In den Versuchen wurden deshalb die Testpflanzen einzeln in Jiffy - Pots angezogen und anschließend sortiert. Für die Festlegung der dafür notwendigen Parameter wurde vom maßgeblichen Schädigungsort ausgegangen. Beim Weizen war dies der Durchmesser des oberen Teils der untersten Blattscheide, bei der Mungbohne der Durchmesser des Stengelabschnittes zwischen den Keimblättern und den Laubblättern. Die deutlich höher Streuung des Parameters beim Weizen führte zu höheren Streuungen bei den Versuchsergebnissen und letztlich zu größeren Vertrauensintervallen bei den Vergleichswerten. Dieses Ergebnis unterstreicht die Wichtigkeit einer möglichst weitgehenden Standardisierung der Testpflanze unter Berücksichtigung des Schädigungsortes. Für beide Pflanzen lag der Schädigungsort mehrere Zentimeter über dem Boden. Aufgrund der Ergebnisse des Gerätevergleichs und der Untersuchungen von ASCARD (1995) kann nicht ausgeschlossen werden, daß für Pflanzen, deren Schädigungsort näher an der Bodenoberfläche liegt, etwas andere relative Unterschiede ermittelt worden wären. Dieser Einfluß der Testpflanze auf das Versuchsergebnis ist bei der Auswahl der Pflanzenart und des Wachstumsstadiums unbedingt zu beachten.

7.3.2 Temperaturmessung

Der methodische Ansatz der Temperaturmessung ermöglicht eine vergleichende Beurteilung der Wärmeübertragungsleistung in der jeweiligen Meßhöhe über dem Boden. Er erfordert einen deutlich geringeren Arbeitsaufwand als der methodische Ansatz der Speed (Dose)/Response und ist einfacher zu Standardisieren. Durch den Einsatz standardisierter Meßkörper wurde die Methode weiterentwickelt. Dabei haben sich zylindrische Körper aus Aluminium mit einem Durchmesser von 2 mm bewährt. Die Temperaturmessung erfolgt mit einem mittig im Meßkörper angebrachten Thermoelement. Aufgrund der dadurch verzögerten Erwärmung genügt der bei der Überfahrt mit dem Gerät zur thermischen Unkrautbekämpfung gemessene Temperaturanstieg zur vergleichenden Beurteilung des Wärmeeintrages am Meßort. Die Auswertung der Temperatursumme kann entfallen. Aufgrund des mehr oder minder ungleichmäßigen Wärmeeintrages über die Arbeitsbreite Geräte müssen mehrere Meßkörper über die Arbeitsbreite verteilt werden. Es konnte in der Tendenz bei gleichem Bekämpfungserfolg und gleicher Testpflanze für unterschiedliche Gerätekonzepte eine ähnliche Temperaturerhöhung in den Meßkörpern nachgewiesen werden. Die Ableitung einer optimalen Fahrgeschwindigkeit für die Praxis ist aber auch hier aufgrund der hohen Variabilität der Unkräuter hinsichtlich Art und Wachstumsstadien nicht möglich.

7.4 Thermodynamisches Modell

Die Ergebnisse zeigen die Möglichkeiten des methodischen Ansatzes der Systemanalyse und Simulation für die geräte- und verfahrenstechnische Optimierung der thermischen Unkrautbekämpfung. Durch das damit erreichte Verständnis der maßgeblichen thermodynamischen Zusammenhänge konnten zielgerichtete geräte- und verfahrenstechnische Maßnahmen hinsichtlich der Erhöhung der optimalen Fahrgeschwindigkeit und der Verringerung des flächenbezogenen Gaseinsatzes abgeleitet werden. Die Erkenntnisse zum Einfluß der Pflanzen führten darüber hinaus zu einem besseren Verständnis der Möglichkeiten und der Grenzen der methodischen Ansätze zur meßtechnischen Überprüfung von Geräten zur thermischen Unkrautbekämpfung.

Der Wärmeeintrag findet innerhalb eines sehr kurzen Zeitraumes statt. In Verbindung mit der vergleichsweise geringen Wärmeleitfähigkeit des pflanzlichen Gewebes kommt es während der Behandlung zu instationären Temperaturprofilen. Dies zwingt zu einer dynamischen Strukturierung des Modells. Für eine hohe Qualität der Ergebnisse ist eine möglichst exakte Abbildung der thermodynamischen Zusammenhänge zwingend notwendig. Die Genauigkeit der gewählten Rechenansätze kann im Einzelfall nicht beurteilt werden. Es kann davon ausgegangen werden, daß insbesondere die Rechenansätze für den konvektiven Wärmeübergangskoeffizienten, für das Emissionsverhältnis des Gaskörpers und für den Wärmeeintrag durch Kondensation die wahren Zusammenhänge nur näherungsweise beschreiben. Die Versuche im Heißluftwindtunnel und der meßtechnische Gerätevergleich zeigen aber, daß das Modell sowohl die Größenordnung des Wärmeeintrags, als auch die relativen Unterschiede des Wärmeeintrages zwischen den Gerätekonzepten gut beschreibt.

Die Ergebnisse zum meßtechnischen Vergleich der Gerätekonzepte zeigen aber auch deutlich die Grenzen der Systemanalyse. Nicht alle wichtigen Einflußfaktoren lassen sich im thermodynamischen Modell abbilden:

Hier wären an erster Stelle die Interaktionen zwischen dem heißen Gasstrom und dem Boden zu nennen. Oberflächenprofil und Rauigkeit des Bodens und das ungleichmäßige Feuchte-, Temperatur- und Strömungsprofil innerhalb des Gasstromes sind in ihrer Auswirkung auf den Wärmeeintrag in die Pflanzen mathematisch kaum zu beschreiben. In den Versuchen zur meßtechnischen Überprüfung der Geräte konnte ein mehr oder minder ungleichmäßiger Wärmeeintrages über die Arbeitsbreite gemessen und dessen Auswirkung auf die optimale Fahrgeschwindigkeit nachgewiesen werden. Dieser konnte aber aufgrund der sehr ebenen Bodenoberfläche auf geräte-technische Einflußfaktoren zurückgeführt werden. Als "wirksame" Gerätelänge wurde die Länge des Gasstromes in Pflanzenhöhe definiert. Eine je nach Gerätekonzept und Meßhöhe unterschiedliche "wirksame" Gerätelänge ist aus den oben genannten Gründen sehr wahrscheinlich,

Die Pflanzen werden während der Überfahrt durch den heißen Gasstrom mehr oder weniger stark zum Boden gedrückt. Wird der Stengel nicht mehr senkrecht angeströmt, verringert sich der konvektive Wärmeübergangskoeffizient und damit der Wärmeeintrag in diesem Bereich.

Der Fahrtwind verursacht bei den vorwärts gerichteten atmosphärischen Brennern eine starke Verkürzung der "wirksamen" Gerätelänge. Dieser Zusammenhang wird im thermodynamischen Modell nicht berücksichtigt. Die Verkürzung der "wirksamen" Gerätelänge überwiegt in einem weiten Geschwindigkeitsbereich den Vorteil der Erhöhung der Strömungsgeschwindigkeit relativ zu den Pflanzen. Beim strömungsdynamisch stabileren Low Temperature Weeder setzt sich dieser Vorteil dagegen durch.

Diese Einflußfaktoren müssen meßtechnisch untersucht werden. In den Versuchen haben sich die methodischen Ansätze Speed (Dose)/Response und die Temperaturmessung bewährt.

8 Weiterführende Arbeiten

Die Berechnungen mit dem thermodynamischen Grundmodul ergaben eine deutliche Verkürzung der zum Abtöten der Modellpflanze notwendigen Behandlungsdauer durch erhöhte Wassergehalte im wärmeübertragenden Gasstrom. Der dabei zugrunde liegende Wärmeeintrag durch Kondensation stellt einen überaus interessanten Ansatz für eine thermische Unkrautbekämpfung insbesondere der selektiven Unkrautbekämpfung in der Reihe (bei entsprechender Eignung der Kultur) dar. Es hat sich gezeigt, daß eine hohe Nettowärmestromdichte eine zwingende Voraussetzung für die optimale Ausnutzung des morphologischen Unterschiedes zwischen der Kulturpflanze und dem Unkraut ist. Bisher werden dafür offene Brennern eingesetzt. Aus den Simulationen zum Einfluß der physikalischen Systemparameter des wärmeübertragenden Gasstromes läßt sich eine Eignung von Wasserdampf/Luft Gemischen für diesen Zweck ableiten. Die extrem hohe Nettowärmestromdichte durch Kondensation in Verbindung mit der Reduzierung der maximalen Temperatur der Pflanzenoberfläche führt zu einer hohen Selektivität des Verfahrens. Für die meßtechnische Überprüfung dieser Hypothese ist die Standardisierung und Überprüfung des Wassergehaltes im Gasstrom ein meßtechnisch bisher ungelöstes Problem.

Die verschiedenen gerätetechnischen Optimierungsansätze lassen unterschiedliche Mehrkosten gegenüber den bisher eingesetzten Geräten erwarten. Deshalb ist im nächsten Schritt eine ökonomische Bewertung der gerätetechnischen Ansätze zwingend notwendig. Für eine ökonomische Bewertung der verschiedenen gerätetechnischen Veränderungen müssen die, über die jährliche Einsatzfläche erzielten Einsparungen an variablen Kosten (Arbeitszeit, Mittelkosten) den eventuell höheren Fixkosten (Anschaffung, Reparatur) gegenübergestellt werden. Die jährliche Einsatzfläche ist eine betriebsspezifische Größe. Ein umfassender Überblick über mögliche Einsatzflächen im ökologischen und im integrierten Anbau ist eine unabdingbare Voraussetzung für die Entscheidung des Konstrukteurs für entsprechend angepaßte Gerätekonzepte.

Zusammenfassung

Die Richtlinien für den Integrierten Anbau von Obst und Gemüse in der Bundesrepublik Deutschland fordern einen verstärkten Einsatz nicht-chemischer Verfahren der Unkrautregulierung. Die Abflammtchnik ist ein thermisches Verfahren der Unkrautbekämpfung, bei dem die Pflanzen mittels einer Flüssiggasflamme erwärmt und abgetötet werden. Die Stärken der Abflammtchnik sind die Unkrautbekämpfung im Voraufbau bei langsam keimenden Kulturen und die selektive Unkrautbekämpfung in der Reihe bei entsprechender Eignung der Kulturpflanze. Die Schwächen der Abflammtchnik liegen in den hohen Verfahrenskosten. Neben einer zu geringer Auslastung der Geräte sind die niedrige Fahrgeschwindigkeit und der hohe flächenbezogene Gaseinsatz (Flüssiggas) bei hohen Gaspreisen die Hauptursache.

Für eine zielgerichtete geräte- und verfahrenstechnische Optimierung der thermischen Verfahren ist neben standardisierten Methoden zur meßtechnischen Überprüfung der Geräte eine genaue Kenntnis der thermodynamischen Zusammenhänge unbedingt erforderlich. Auf der Basis des methodischen Ansatzes der Systemanalyse und Systemsimulation wurden entsprechende geräte- und verfahrenstechnische Ansätze für eine Erhöhung der Fahrgeschwindigkeit und eine Verminderung des flächenbezogenen Gaseinsatzes erarbeitet. Auf der Basis der methodischen Ansätze erfolgte anschließend eine meßtechnische Überprüfung des Modells und der ausgeführten Gerätekonzepte.

Verfahrenstechnik: Die optimale Fahrgeschwindigkeit und der flächenbezogene Gaseinsatz wird nicht nur von der eingesetzten Gerätetechnik, sondern auch vom Unkrautbestand, vom Klima und vom Boden beeinflusst. Die Pflanzen sollten zu einem möglichst frühen Wachstumsstadium bekämpft werden. Dies gilt besonders für thermisch schwer bekämpfbare Pflanzen. Bei einer hohen Unkrautdicke muß etwas langsamer gefahren werden als bei einer niedrigen. Die Bodenoberfläche sollte zum Behandlungszeitpunkt möglichst eben sein. Bei der Saatbettbereitung und beim anschließenden Säen ist deshalb auf eine gleichmäßige Rückverdichtung der Bodenoberfläche zu achten. Die Behandlung sollte zu einem Zeitpunkt hoher Einstrahlung und hoher Lufttemperatur durchgeführt werden.

Gerätekonzept "Abflammen": Für die nicht-selektive Unkrautbekämpfung im Voraufbau und zwischen den Reihen ist eine Abdeckung über dem Brenner unbedingt erforderlich. Sie sollte möglichst niedrig und lang sein und zum Ende hin zusätzlich abflachen. Eine gute Isolierung dient nicht nur der Verringerung der Verluste, sondern schützt den Anwender vor Verletzungen. Um zusätzliche Abluftverluste zu den Seiten zu vermeiden, sollte die Abdeckung möglichst dicht zum Boden abschließen. Die Abdeckung muß auf der Vorder- und der Rückseite offen sein, damit die atmosphärischen Brenner unter diesen Bedingungen noch ausreichend Verbrennungsluft ansaugen

können. Der Brenner sollte in diesem Fall gegen die Fahrtrichtung (rückwärts) gerichtet werden.

Um eine hohe Gleichmäßigkeit des Wärmeeintrages über die Arbeitsbreite zu gewährleisten, müssen beim atmosphärischen Brenner die Düsen regelmäßig gereinigt und gegebenenfalls ausgewechselt werden.

Eine deutliche Steigerung der optimalen Fahrgeschwindigkeit ist nur durch eine Erhöhung des Gasdurchsatzes am Brenner möglich. Bei atmosphärischen Brennern ist dies über eine Erhöhung der Düsenanzahl und über die Wahl größerer Düsenquerschnitte möglich. Eine Erhöhung des Gasdurchsatzes am Brenner führt aber zwangsläufig zu einer Erhöhung des flächenbezogenen Gaseinsatzes. Dieser kann durch eine entsprechende Verlängerung der Abdeckung teilweise kompensiert werden.

Der Einsatz von Gebläsebrennern ermöglicht eine weitere Erhöhung der optimalen Fahrgeschwindigkeit und eine entsprechende Verringerung des flächenbezogenen Gaseinsatzes. Gerade bei einem hohen Gasdurchsatz am Brenner und einer entsprechend langen und flachen Abdeckung kann der Gebläsebrenner für die Sicherstellung einer optimalen Verbrennung notwendig werden. Darüber hinaus erlaubt der Gebläsebrenner auch die Verwendung anderer, weitaus billigerer Energieträger (Diesel / Heizöl, Rapsöl / RME) als Flüssiggas. Das würde dazu beitragen, die variablen Kosten zusätzlich zu verringern.

Neues Gerätekonzept - Low Temperature Weeder: Trotz aller Optimierungsmaßnahmen entweicht am Ende der Abdeckung des Gerätekonzeptes "Abflammen" ein mehr oder minder großer Teil der eingesetzten Verbrennungsenergie. Eine weitergehende Optimierung hinsichtlich des flächenbezogenen Gaseinsatzes ist nur durch eine grundlegende Veränderung des Gerätekonzeptes möglich. Der Low Temperature Weeder (LTW) stellt ein neuartiges Gerätekonzept zur thermischen Unkrautbekämpfung dar. Er arbeitet mit einem heißen Gasstrom, der mithilfe eines druckstabilen Radialventilators in einem gut isolierten Blechkanal im Kreis herumgeführt wird. Der Kreislauf ist nur zum Boden hin offen. Die Wärmeerzeugung erfolgt mit einem modulierenden Gebläsebrenner in einer offenen Brennkammer im oberen Teil des Kreislaufes. Eine trotz der niedrigen Arbeitstemperatur (300 °C - 400 °C) ausreichend hohe Fahrgeschwindigkeit wird durch eine entsprechende Gerätelänge (2 m) und eine hohe Strömungsgeschwindigkeit (6 - 8 m/s) sichergestellt.

Der am Ende der am Boden offenen Abdeckung noch heiße Gasstrom wird im Gegensatz zum Gerätekonzept "Abflammen" zum Ort der Wärmeerzeugung zurückgeführt und durch den Gebläsebrenner wieder auf Arbeitstemperatur aufgeheizt. Die tatsächlich notwendige Brennerleistung zum Erreichen der Arbeitstemperatur hängt bei gegebener Verbrennung von der Abkühlung des Gasstromes beim Durchströmen der zum Boden hin offenen Abdeckung ab. Die Simulationsrechnungen haben gezeigt, daß gegenüber dem optimierten Gerätekonzept "Abflammen"

bis zu 50 % an Energie eingespart werden können.

Meßtechnische Überprüfung: Die meßtechnische Überprüfung der Gerätekonzepte kann auf der Basis der methodischen Ansätze Temperaturmessung und Speed (Dose)/Response erfolgen. Der Versuchsumfang und die Qualität der Ergebnisse werden entscheidend vom Grad der Standardisierung der Einflußfaktoren bestimmt.

Temperaturmessung: Der methodische Ansatz der Temperaturmessung ermöglicht eine vergleichende Beurteilung der Wärmeeintragsleistung in der jeweiligen Meßhöhe. Er erfordert einen geringeren Arbeitsaufwand als der methodische Ansatz der Speed (Dose)/Response und ist einfacher zu Standardisieren. Durch den Einsatz standardisierter Meßkörper wurde die Methode weiterentwickelt. Aufgrund des mehr oder minder ungleichmäßigen Wärmeeintrages der verschiedenen Geräte über die Arbeitsbreite müssen mehrere Meßkörper über die Arbeitsbreite verteilt werden. Es konnte in der Tendenz bei gleichem Bekämpfungserfolg und gleicher Testpflanze für unterschiedliche Gerätekonzepte eine ähnliche Temperaturerhöhung in den Meßkörpern nachgewiesen werden. Ein allgemeiner Rückschluß von der gemessenen Temperaturerhöhung auf den Bekämpfungserfolg ist aufgrund der hohen Variabilität der Unkräuter hinsichtlich Art und Wachstumsstadien nicht möglich.

Speed (Dose)/Response: Der methodische Ansatz der Speed (Dose)/Response ermöglicht eine vergleichende Beurteilung des Bekämpfungserfolges. Die notwendige Standardisierung wird durch den Einsatz von Testpflanzen erreicht. Eine Verallgemeinerung der für die jeweilige Testpflanze ermittelten optimalen Fahrgeschwindigkeiten ist aufgrund der hohen Variabilität der Unkräuter hinsichtlich Art und Wachstumsstadien nicht möglich.

Thermodynamisches Modell: Die Ergebnisse zeigen die Möglichkeiten und Grenzen des methodischen Ansatzes der Systemanalyse und Simulation für die geräte- und verfahrenstechnische Optimierung der thermischen Unkrautbekämpfung. Durch das damit erreichte Verständnis der maßgeblichen thermodynamischen Zusammenhänge konnten zielgerichtet geräte- und verfahrenstechnische Maßnahmen hinsichtlich der Erhöhung der optimalen Fahrgeschwindigkeit und der Verringerung des flächenbezogenen Gaseinsatzes abgeleitet und bereits am Computer überprüft werden. Die Erkenntnisse zum Einfluß der Pflanzen führten darüber hinaus zu einem besseren Verständnis der Möglichkeiten und der Grenzen der methodischen Ansätze zur meßtechnischen Überprüfung von Geräten zur thermischen Unkrautbekämpfung. Nicht alle Einflußfaktoren konnten im thermodynamischen Modell abgebildet werden. Diese Einflußfaktoren müssen meßtechnisch untersucht werden. In den Versuchen haben sich dafür die methodischen Ansätze Speed (Dose)/Response und die Temperaturmessung bewährt.

10 Summary

The guidelines of Integrated Production demand the reinforcement of physical methods for weed control. Flaming, a method to kill plants by heating, is mainly used for pre-emergence weeding and selective post-emergence weeding in the row. The main problems, however, are high operation costs. The main reasons are the low driving velocity and the high gas consumption (liquid gas).

A prerequisite for the technical optimization of thermal weed control is the knowledge of the fundamental thermodynamic principles. The task of the presented paper was to work out technical solutions to increase driving velocity and to decrease gas consumption. In a first step, different technical solutions were examined by simulation with a thermodynamic model of flaming. In a second step optimized implements were compared on the basis of standardized methods (Speed (Dose)/Response, Temperature measurement).

Operation technic: Driving velocity and gas consumption are influenced not only by the implement but by the weed, the climate and the soil. The influence of the weed demands treatment in an early growing stage. The weed density has to be considered when choosing the driving velocity. The surface of the soil should be plain. For this reason it is important to smooth the surface after sowing. High air temperature and high sun radiation during the thermal treatment permit a higher working velocity and consequently a lower gas consumption.

Flaming: For pre-emergence weeding it is important to cover the burner. The cover should be as flat and long as possible and flatten towards the end. A good insulation decreases the loss of energy and protects the user. The sides should reach the soil in order to keep the flame under the cover as long as possible. To ensure a sufficient combustion, front and back of the cover have to be open. The burners have to be directed contrary to the driving direction. To guaranty a uniform heat transfer across the working width, the nozzles of the burners have to be checked regularly.

In order to increase further the driving velocity the power of the burners has to be increased. This can be reached by raising the number of the nozzels and/or by using bigger nozzles. Raising the power of the burner, however, leads to a higher gas consumption of the operation. This negative effect can be diminished using a very long cover.

Using fan burners instead of atmospheric burners increase working velocity and decrease gas consumption. Especially for burners with a high power it could be necessary to use fan burners in order to ensure a sufficient combustion. Further more a fan burner permits the use of other, cheaper kinds of fuel. This contributes to a further reduction of the variable costs of the operation.

New implement - Low Temperature Weeder: Despite of all technical optimization, only a part of the energy can be transferred during the thermal treatment by flaming. A further decrease of the gas consumption can be achieved only by a fundamental change of the technical concept of the implement. The Low Temperature Weeder (LTW) presents a new technical concept for thermal weed control: The hot gas, powered by a fan, streames in a circle of well insulated metallic pipes. The circle is open only to the soil. The gas stream is heated to a temperature of only 300 to 400 °C by a modulated fan burner, which is set in the upper part of the implement. A sufficient working velocity is achieved by a long cover (2m) and by a high floating velocity (6 - 8m/s) of the gas. The hot gas stream does not leave the cover at the end. It flows back to fun burner and is reheated to the aimed temperature. The actual cooling of the gasstream defines the necessary power of the burner. The simulations with the thermodynamic model proved an increase of gas consumption up to 50 % compared to an optimized flamer.

Measuring Methods: For the comparison of the implements two standardized methods were used (Speed (Dose)/Response, Temperature measurement). The knowledge and the standardization of the influencing factors is a necessary prerequisite for a satisfactory quality of the results.

Temperature measurement: This method enables to compare the heat transfer of different implements. It demands a lower employment of labor and a simpler standardization than the other method (Speed (Dose)/Response). The method was improved by using standardized sensors. In consequence of the more or less inequal heat transfer across the working width, several sensors have to be used. For equal testplants and equal weed control effect, an almost equal temperature increase in the sensors could be measured. A conclusion, however, cannot be drawn from the measuring results to the weed control effect on the field. The main reason is the high variability of the weed.

Speed (Dose)/Response: This method enables to compare the weed control effect of different implements. The necessary standardization is achieved by using uniform testplants. For this method too, a conclusion from the results to the weed control effect on the field cannot be drawn.

Thermodynamic model: The results show the possibilities and limits of applying the thermodynamic model for the optimization of thermal weed control. It allows to examine many different technical solutions concerning their effect on the driving velocity and the gas consumption of the operation. The knowledge of the influence of the weed leads to a better understanding of the possibilities and limits of the measuring methods to compare the implements for thermal weed control. However, it was not possible to consider all influencing factors for the thermodynamic model. These factors have to be examined with the standardized measuring methods.

Literaturverzeichnis

- ANONYM 1969: Unkrautbekämpfung mit BP-Gas 1969. Informationsschrift der BP-Aktiengesellschaft.
- ANDERSON, R. L., C. M. HANSEN, C. THOMAS, J. Hull 1967: Flame for weed control - A progress report. Proceedings of the 4th Annual Symposium on Thermal Agriculture, Kansas City, USA, 22-25.
- ASCARD, J. 1988: Termisk ogräsbekämping. Flaming för ogräsbekämping och blastdödning. Swedish University of Agricultural Sciences, Department of Agricultural Engineering, Report 130.
- ASCARD, J. 1989: Thermal weed control in seeded onions. 30th Swedish Crop Protection Conference. Weeds and weed control. Reports Vol 2. Swedish University of Agricultural Sciences, Department of Agricultural Engineering, 35-50.
- ASCARD, J. 1992: Flaming for weed control: effect of plant size and density on dose response. Proceeding of the 9th International Symposium on the Biology of Weeds, Dijon, France. ANPP Annales, 163-172.
- ASCARD, J. 1995: Thermal weed control by flaming: Biological and technical aspects. Swedish University of Agricultural Sciences, Department of Agricultural Engineering, Report 200
- BAGGETTE, T. L. 1946: Flame cultivation and other mechanization of cotton in the Yazoo Mississippi Delta. Agricultural Engineering, 411-414 und 422.
- BERG, E. und F. KUHLMANN 1993: Systemanalyse und Simulation für Agrarwissenschaftler und Biologen. Ulmer, Stuttgart.
- BEUERMANN, H. 1985: Experimentelle Überprüfung der thermischen Unkrautbekämpfung bei den Gemüsearten Möhren, Rote Beete und Zwiebel unter besonderer Berücksichtigung der Fahrgeschwindigkeit und deren Wirkung auf die Unkräuter und die bodennahe Temperatur. Diplomarbeit Fachhochschule Osnabrück, Fachbereich Gartenbau.
- CASINI, P., P. CALAMAJ, P. VECCHIO 1992: Flaming for weed control in sunflower (*Helianthus annuus* L.): results of a four year research. Proceedings of the 13th International Sunflower Conference, Pisa, Italy, 64-73.
- CASTILLE, C. und P. GHESQUIÈRE 1985: Flame weeding trials on seeded onions. Proceedings of the International Meeting of Flame Cultivation for Weed control, Namur, Belgien, 26-33.
- CHAPPELL, W.E. und J.W. DANIELL 1966: Flame cultivation studies in soybeans and corn in Virginia. Proceedings of the 3th Annual Symposium on Thermal Agriculture, NLGPA: 42 - 43.

- CHAPPELL, W.E. und T.C. ELLWANGER 1969: Control of weeds in direct seeded crops by pre-emergence flaming. Proceedings of the 6th Annual Symposium on Thermal Agriculture. NGPA: 25 - 26.
- DANIELL, J.W., W. E. CHAPPELL, H. B. COUCH 1969: Effect of sublethal and lethal temperatures on plant cells. *Plant Physiology* **44**, 1684-1689.
- EDWARDS, F. E. 1964: History and progress of flame cultivation. Proceedings of the 1th Annual Symposium on Research on Flame Weed Control, Memphis, USA, 3-6.
- ENGEL, R. 1968: Versuche zur Unkrautbekämpfung durch Abflammen im Weinbau. *Der deutsche Weinbau, Sonderausgabe* 3, 526.
- ESTLER, M. 1989: Aktuelle landtechnische Aspekte der Unkrautbekämpfung. Vorträge zur Jahrestagung der Landtechnik Weihenstephan, 47-55.
- FITZGERALD L. W., L. E. ANDERSON, G. H. LARSON 1964: Flame cultivation of corn and grain sorghum. Proceedings of the 1th Annual Symposium on Research on Flame Weed Control. NGPA: 22 - 24.
- GEIER, B. 1987: Systeme der Abflammtchnik und mögliche Arbeitersparnis. In: HOFFMANN, M. und B. GEIER: Beikrautregulierung statt Unkrautbekämpfung: Methoden der mechanischen und thermischen Regulierung. *Alternative Konzepte* **58**, C. F. Müller, Karlsruhe, 143-149.
- GERSTEN, K. 1989: Einführung in die Strömungsmechanik. 5. Auflage. Vieweg, Braunschweig, Wiesbaden.
- GMIELINSKI, V. 1984: Abschnitt G. In: VDI Wärmeatlas, Berechnungsblätter für den Wärmelübergang. 4. Auflage. VDI, Düsseldorf.
- HANSEN, C. M. 1969: Dessicating potato vines with flame. Proceedings of the 6th Annual Symposium on Thermal Agriculture. Atlanta, USA, NGPA und NPGLA, 37-38.
- HEGE, H. 1990: Thermische Unkrautbekämpfung. *Gemüse* **7**, 344-346.
- Hinz, 1963: Silikate. VEB Verlag für Bauwesen, Berlin.
- HOFFMANN, M. 1975: Maisunkräuter Abflammen ?. *DLZ* **26**, 3, 154.
- HOFFMANN, M. 1989: Abflammtchnik. *KTBL-Schrift* **331**, Landwirtschaftsverlag, Münster-Hiltrup.
- HOLMØY, R. und K. STOREHEIER 1995: Flaming: Fundamental knowledge and practical use in selective weed control. Proceedings of the 9th International Symposium on Challenges for Weed Science in a Changing Europe. EWRS, Budapest, Hungary, 299-309.

- KEPNER, R. A., R. BAINER, E. L. BARGER 1978: Principles of Farm Machinery. AVI Publishing Company Inc., Westport, CT, USA.
- KLOOSTER, J. J. 1983: Thermische onkruidbestrijding, een interessant alternatief (Summary: Thermal weed control, an interesting alternative). *Landbouw-mechanisatie* **34**, 8, 787-789.
- KRAUS, R. 1971: Verbesserung der Anbau-Sicherheit. *Deutsche Baumschule* **23**, 3, 73-77.
- LEVITT, J. 1980: Response of plants on environmental stresses. 2. Auflage. Band 1, Academic Press. New York, USA.
- LIEN, R. M., J. B. LIJEDAHL, P. R. ROBBINS 1967: Five year's research in flame weeding. Proceedings of the 4th Annual Symposium on Thermal Agriculture. Kansas City, USA, NGPA, 6-20.
- LIJEDAHL, J. B., J. L. WILLIAMS, K. J. ALBRECHT 1964: The use of flame cultivation for the control of weeds in field crops. Purdue University, Agricultural Experiment Station, Lafayette, USA. Research Progress Report **108**.
- LOHUIS, H. 1990: Mechanische Unkrautbekämpfung kommt wieder. *Pflanzenschutz-Praxis* **2**, 14-16.
- LUTTRELL, D. H. und S. E. BENNETT 1968: Flaming equipment for thermal control of the alfalfa weevil. Proceedings of the 5th Annual Symposium on Thermal Agriculture. Memphis, USA, 24-25.
- LUTTRELL, D. H. und V. GORDON 1969: Thermal analysis of hooded and non-hooded alfalfa flammers. Proceedings of the 6th Annual Symposium on Thermal Agriculture. Atlanta, USA, 24-25.
- MARTIN, H. 1984: Instationäre Wärmeleitung in ruhenden Körpern. In: VDI Wärmeatlas. Berechnungsblätter für den Wärmeübergang. 4. Auflage, VDI, Düsseldorf.
- MARTINEAU, J. R., J. E. SPECHT, J. H. WILLIAMS, C. Y. SULLIVAN 1979: Temperature tolerance in soybeans, first evaluation of a technique for assessing cellular membrane thermostability. *Crop Science* **19**, 75-78.
- MATTHEWS, E. J. und H. SMITH 1971: Water shielded high speed flame weeding of cotton. Proceedings of the 8th Annual Symposium on Thermal Agriculture, Dallas, USA, NGPA, 23-25.
- MAXEY, P. E. 1965: Weed control by flaming and the effect on yield and sucrose content of sugar beets. *Butane - Propane News* **27**, 4, 46-48.
- MEYER PITTROFF, R. und H. J. RIEß 1984: Stoffwerte von Kohlendioxid. Abschnitt Db13-Db17 in: VDI Wärmeatlas, Berechnungsblätter für den Wärmeübergang. 4. Auflage, VDI, Düsseldorf.

- MOHR, H. und P. SCHOPFER 1992: Pflanzenphysiologie. 2. Auflage, Data Becker, Düsseldorf.
- NEMMING, A. 1994: Costs of flaming. *Acta Horticulturae* **372**, 205 -212.
- PARISH, S. 1989: Investigations into thermal techniques for weed control. Proceedings of the 11th International Congress on Agricultural Engineering, Dublin, Irland, 2151-2156.
- PARISH, S. 1990a: A procedure for assessing flame treatments under controlled conditions. *Veröffentlichungen der Bundesanstalt für Agrarbiologie Linz/Donau* **20**, 189-196.
- PARISH, S. 1990b: The flame treatment of weed seedlings under controlled conditions. In: *Crop protection in organic and low input agriculture*. BCPC Monographs **45**, 193-196.
- PARKER, R. E. et al 1965: Flame cultivation equipment and techniques. United States Department of Agriculture, Washington D.C., Production Research Report **86**.
- PERUMPRAL, J. et al 1966: Temperature Patterns of Flame Cultivator Burners. Purdue Agricultural Experimental Station, USA. Research Bulletin **820**
- PREUSCHEN, R. 1968: Unkrautbekämpfung durch Abflammen. *DLG-Mitteilungen* **83**, 841-843.
- RAHKONEN, J. und P. VANHALA 1993: Response of a mixed weed stand to flaming and use of temperature measurements in predicting weed control efficiency. *Communications of the Fourth International Conference I.F.O.A.M., Dijon, France*, 167-171.
- RASCHKE, K. 1956: Über die physikalischen Beziehungen zwischen Wärmeübergangszahl, Strahlungsaustausch, Temperatur und Transpiration eines Blattes. *Planta* **48**, 200-238.
- RICHTER, W. und S. MICHELFELDER 1984: Wärmestrahlung in Brennräumen. Abschnitt Kd in: *VDI Wärmeatlas, Berechnungsblätter für den Wärmeübergang*. 4.Auflage, VDI, Düsseldorf.
- SCHWIER, K. 1984: Stoffwerte von Luft. Abschnitt Db8-Db12 in: *VDI Wärmeatlas, Berechnungsblätter für den Wärmeübergang*. 4.Auflage, VDI, Düsseldorf.
- STOREHEIER, K. 1991: Termisk ugrasbekjempelse (Summary: Thermal weed control). Agricultural University of Norway, Department of Agricultural Engineering, Ås, Norway, **18**.
- STRAUB, J. 1984: Stoffwerte von Wasser. Abschnitt Db1-Db7 in: *VDI Wärmeatlas, Berechnungsblätter für den Wärmeübergang*. 4.Auflage, VDI, Düsseldorf.
- STREIBIG, J.C 1988: Herbicide Bioassay . *Weed Research* **28**, 479-484.
- STREIBIG J.C., M. RUDEMO, J. E. JENSEN 1993a: Dose-response Curves and Statistical Models. In: *STREIBIG, J.C. und P. KUDSK : Herbicide Bioassay*. Boca Raton, USA. CRC Press. 29-55.

- STREIBIG, J.C. JENSEN J. E., M. OLOFSDOTTER, H. HAAS, CHR. ANDREASEN, E. LAWAEZT 1993b: Testing hypothesis with dose-response curves. Proceedings of the 8th EWRS Symposium, Braunschweig, Germany, 423-431.
- SUTCLIFFE, J. 1977: Plants and Temperature. The Institute of Biology's Studies in Biology 86, Edward Arnold, London.
- TANTAU, H.-J. 1983: Heizungsanlagen im Gartenbau. Eugen Ulmer, Stuttgart.
- VESTER, J. 1985: New experience with flame cultivation for weed control. Proceedings of the International Meeting on Flame Cultivation for Weed control, Namur, Belgien, C.R.A.B.E. Opprebais, Belgium, 10-20.
- VESTER, J. 1986: Auswirkung des Abflämmens auf Kultur und Unkraut. Statens Plante-avisforsoeg, Denmark, 250-261.
- VESTER, J. 1987: Flammebehandling til bekæmpelse af ukrudt. Slutrapport for 1985-1986. Teknologistyrelseprojekt (Flame weeding for weed control. Final report 1986-87), Department of weed control, Slagelse, Denmark.
- VESTER, J. 1988: Flame cultivation for weed control, 2 years results. Proceedings of a Meeting of the EC Expert Weed Control in Vegetable Production. Balkema, Rotterdam/Brookfield, 153-167.
- VESTER, J. 1990: Flammebehandling, behandlingsintensitet og ukrudtseffekt (Summary: Flame treatment - Intensity and effect on weeds). Nordic postgraduate course in plant production science. Eleventh course: Weeds and weed control. Garpenberg, Sweden, 1-17.
- VORTMEYER, D. 1984: Gasstrahlung, Strahlung von Gasgemischen; Staubstrahlung. Abschnitt Kc in: VDI Wärmeatlas, Berechnungsblätter für den Wärmeübergang, 4.Auflage, VDI, Düsseldorf.
- VRIESMA, B. 1985: Evaluatie van en onderzoek naar mogelijke verbeteringen van de thermische onkruidbestrijdingstechniek. (Evaluation of an investigation into possible improvements of thermal weed control technique). Afstudeerscriptie. (IMAG, Wageningen), Arnhem, Netherlands.
- WEISS, A. 1977: Algorithms for the calculation of moist air properties on a hand calculator. Transactions of the ASAE, 1133-1136.
- WHITNEY, J.D 1968: Flaming Weeds and Grasses in Young Nonbearing Citrus Trees. Proceedings of the 5th Annual Symposium on Thermal Agriculture, NGPA, 57-62.
- ZIEGLER, H. 1991: Physiologie. In: STRASBURGER, E. 1991: Lehrbuch der Botanik, 33.Auflage, Gustav Fischer, Stuttgart, 215-483.
- ZADOKS, J. C., T. T. CHANG, C. F. KONZAK et al. 1974: A decimal code for the growth stages of cereals. Weed research 14, 415-421.