

BERTRAM, A. 1996: Entwicklung neuer Verfahren der physikalischen
Unkrautregulierung für den Freilandgartenbau. Endbericht des gleichnamigen
Forschungsvorhabens: Institut für Landtechnik an der TU-München/ Weihenstephan

B UNKRAUTBEKÄMPFUNG MIT WASSERDAMPF/LUFT GEMISCHEN

1. Einleitung und Problemstellung

Neben der Unkrautbekämpfung im Voraufbau und zwischen den Reihen ist die selektive Unkrautbekämpfung in der Reihe eine "Stärke" der Abflammttechnik. Grundlegende Voraussetzung für die Anwendung dieses Verfahrens ist ein ausreichender Unterschied in der Größe und im morphologischen Aufbau zwischen der Kulturpflanze und den Unkräutern. Bisher werden dafür offene atmosphärische Gasbrenner (Stabbrenner, IFT - Brenner) eingesetzt. Diese führen aufgrund der langsamen Arbeitsgeschwindigkeit (3-4 km/h) und dem hohen flächenbezogenen Energieeinsatz (40 - 60 kg Flüssiggas/ha) in Verbindung mit einem hohen Gaspreis (2 - 3 DM/kg) zu hohen Verfahrenskosten. Eine Abdeckung der Flamme ist hier nicht möglich. Darüber hinaus erfordert die Anwendung dieses Verfahrens sehr viel Erfahrung beim Anwender. Im Prinzip muß schnell genug gefahren werden, um die Kulturpflanze nicht zu schädigen, aber langsam genug, um die Unkräuter noch abzutöten. In der Literatur finden sich zu diesem Zusammenhang keine Ergebnisse, da ein methodischer Ansatz zur Untersuchung der "Selektivität" der thermischen Verfahren fehlt. Deshalb konnte die Frage, ob eine weitergehende gerätetechnische Optimierung der "selektiven" Unkrautbekämpfung möglich ist, bisher nicht beantwortet werden.

Aus den Ergebnissen zur geräte- und verfahrenstechnischen Optimierung der thermischen Unkrautbekämpfung lassen sich sowohl thermodynamische Ansätze für eine entsprechende Optimierung eines Gerätes, als auch methodische Ansätze für eine Überprüfung der "Selektivität" ableiten (A, Kap.5.1.4, 5.3, 6.1):

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 Brenner 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.

Das Ziel dieses Teils der Arbeit war es, die aus den Ergebnisse der Berechnungen mit dem thermo-

dynamischen Modell abgeleiteten Hypothesen zu überprüfen und daraus gerätetechnische Schlußfolgerungen für eine entsprechende Gerätetechnik abzuleiten.

Damit ergibt sich folgende Gliederung:

- Für die meßtechnische Überprüfung dieser Hypothese ist Überprüfung des Wassergehaltes im Gasstrom ein meßtechnisch bisher ungelöstes Problem. Aus den thermodynamischen Zusammenhängen läßt sich aber ein meßtechnischer Ansatz zur Bestimmung des Mischungsverhältnisses von Wasserdampf zu trockener Luft ableiten.
- Im nächsten Schritt erfolgt die Überprüfung des thermodynamischen Modells durch einen Vergleich des errechneten und des gemessenen Erwärmungsverhaltens eines Meßkörpers in einem heißen Gasstrom. Diese Versuche werden im Heißluftwindtunnel durchgeführt.
- Im dritten Teil der Arbeit wird auf der Basis des methodischen Ansatzes Speed(Dose)/Response der Zusammenhang zwischen der Fahrgeschwindigkeit (flächenbezogenem Energieeinsatz) und dem Bekämpfungserfolg für ein Gerätekonzept mit erhöhtem Wassergehalt im Heißluftstrom erarbeitet und mit den anderen Gerätekonzepten verglichen.
- Im vierten Teil der Arbeit wird auf der Basis der Ergebnisse des Gerätevergleiches eine vergleichende Bewertung der "Selektivität" der verschiedenen Gerätekonzepte vorgenommen.
- Im letzten Teil der Arbeit werden auf der Basis der bisherigen Ergebnisse die gerätetechnischen Anforderungen an die Gerätetechnik für die Unkrautbekämpfung mit Wasserdampf/Luft Gemischen abgeleitet.

2. Material und Methode

Für die Versuche am Heißluftwindtunnel wurde ein Meßkörper eingesetzt. Die meßtechnische Überprüfung eines mit Wasserdampf/Luft Gemischen arbeitenden Gerätes erfolgte auf der Versuchstrecke und mit dem Einsatz von Testpflanzen.

2.1 Ableitung eines meßtechnischen Ansatzes zur Bestimmung des Mischungsverhältnisses von Wasserdampf zu Luft in einem heißen Gasstrom

Ein zentrales Problem der Untersuchung von Wasserdampf/Luft Gemischen ist die reproduzierbare Einstellung und die meßtechnische Überprüfung des Mischungsverhältnisses. Die reproduzierbare Einstellung des Wassergehaltes ist sehr aufwendig und konnte in Rahmen der hier vorgestellten Versuche nur bedingt durchgeführt werden. Dies machte die Erarbeitung einer Methode zur meßtechnischen Überprüfung des tatsächlichen Wassergehaltes im heißen Gasstrom notwendig. Aus den thermodynamischen Zusammenhängen läßt sich ein meßtechnischer Ansatz zur Bestimmung des Mischungsverhältnisses von Wasserdampf zu trockener Luft ableiten. Grundlage dafür war die Simulationen mit dem thermodynamischen Modell. Für die Erklärung der Methode wird in einem ersten Schritt das Erwärmungsverhalten eines Meßkörpers während einer thermischen Behandlung mit einem heißen Gasstrom bei unterschiedlichen Wassergehalten im heißen Gasstrom errechnet (Abb. 71).

Ist der Wassergehalt im heißen Gasstrom höher als die Sättigungsfeuchte bei der aktuellen Meßkörpertemperatur, findet der Wärmeintrag durch Konvektion und Kondensation statt. Mit steigendem Wassergehalt im heißen Gasstrom kommt es zu einer schnelleren Erwärmung des Meßkörpers. Im Verlaufe der Erwärmung des Meßkörpers übersteigt die Sättigungsfeuchte der aktuellen Meßkörpertemperatur die aktuelle Feuchte des Gasstromes. Das auf dem Meßkörper auskondensierte Wasser beginnt zu verdunsten. Die dafür notwendige Verdampfungswärme wird in dieser Phase ausschließlich durch Konvektion dem Meßkörper zugeführt. Der Wärmestrom durch Strahlung ist aufgrund des niedrigen Temperaturniveaus und der Höhe der anderen Wärmeübertragungsmechanismen in diesem Fall vernachlässigbar klein. In dieser Phase stehen der Wärmeintrag durch Konvektion und die Wärmeabgabe durch Verdunstung im Gleichgewicht. Das Temperaturniveau dieses Plateaus hängt bei gegebener konvektiver Wärmestromdichte nur vom Wassergehalt des heißen Gasstromes ab. Je höher der Wassergehalt des heißen Gasstromes ist, desto höher ist die Gleichgewichtstemperatur. Es kommt zu keiner Änderung der Temperatur des Meßkörpers. Ist das gesamte vorher auskondensierte Wasser wieder verdunstet, steigt die Meßkörpertemperatur, bedingt durch den Wärmeintrag durch Konvektion wieder an. Je höher der Wassergehalt im heißen Gasstrom ist, desto schneller ist auch die Erwärmung des Meßkörpers. Dies gilt aber nur bis zu einem bestimmten

Temperaturniveau.

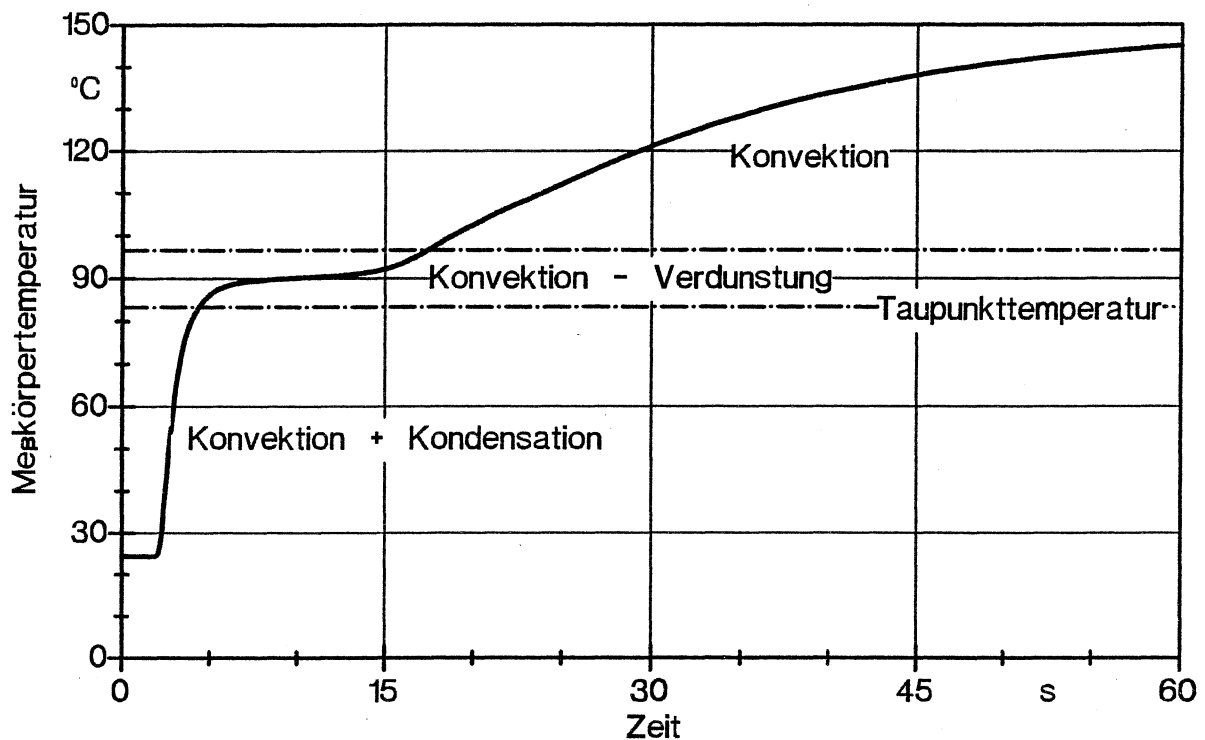


Abb. 71: Erwärmungsverhalten eines Meßkörpers während einer thermischen Behandlung mit einem heißen Luftstrom ($T_{\text{Luft}}: 150 \text{ °C}$, $v_{\text{Luft}}: 2,5 \text{ m/s}$, $x_{\text{Luft}}: 0,89 \text{ kg/kg}$)

Bildet man das Differential der Temperaturverläufe erhält man die Geschwindigkeit des Temperaturanstieges. Diese ist über die Stoffkennwerte des Meßkörpers direkt verknüpft mit der Nettowärmestromdichte. Trägt man die Nettowärmestromdichte in den Meßkörper in Abhängigkeit von der aktuellen Meßkörpertemperatur auf ergibt sich folgender Zusammenhang (Abb. 72).

Es läßt sich deutlich der Temperaturbereich, in dem ein Wärmeintrag durch Kondensation stattfindet, erkennen. Bei einem Wassergehalt von $0,01 \text{ kg/kg}$ findet der Wärmeintrag ausschließlich durch Konvektion statt. Bei höheren Wassergehalten kommt zu diesem Wärmeintrag durch Konvektion zusätzlich der Wärmeintrag durch Kondensation hinzu. Dieser findet aber nur solange statt, bis die Sättigungsfeuchte bei Meßkörpertemperatur die aktuelle Feuchte im heißen Luftstrom übersteigt. Dieser Punkt ist durch den Schnittpunkt der Funktion mit der Nettowärmestromdichte ($0,01 \text{ kg/kg}$) bei ausschließlichem Wärmeintrag durch Konvektion zu erkennen (Taupunkttemperatur). Exakt bei dieser Temperatur ist der Wärmeintrag durch Kondensation 0. Anschließend geht die Nettowärmestromdichte gegen 0. Der Wärmeintrag durch Konvektion und der Wärmeabtrag durch Verdunstung stehen im Gleichgewicht. Erst wenn das gesamte vorher auskondensierte Wasser wieder verdunstet ist, kann die Meßkörpertemperatur weiter ansteigen.

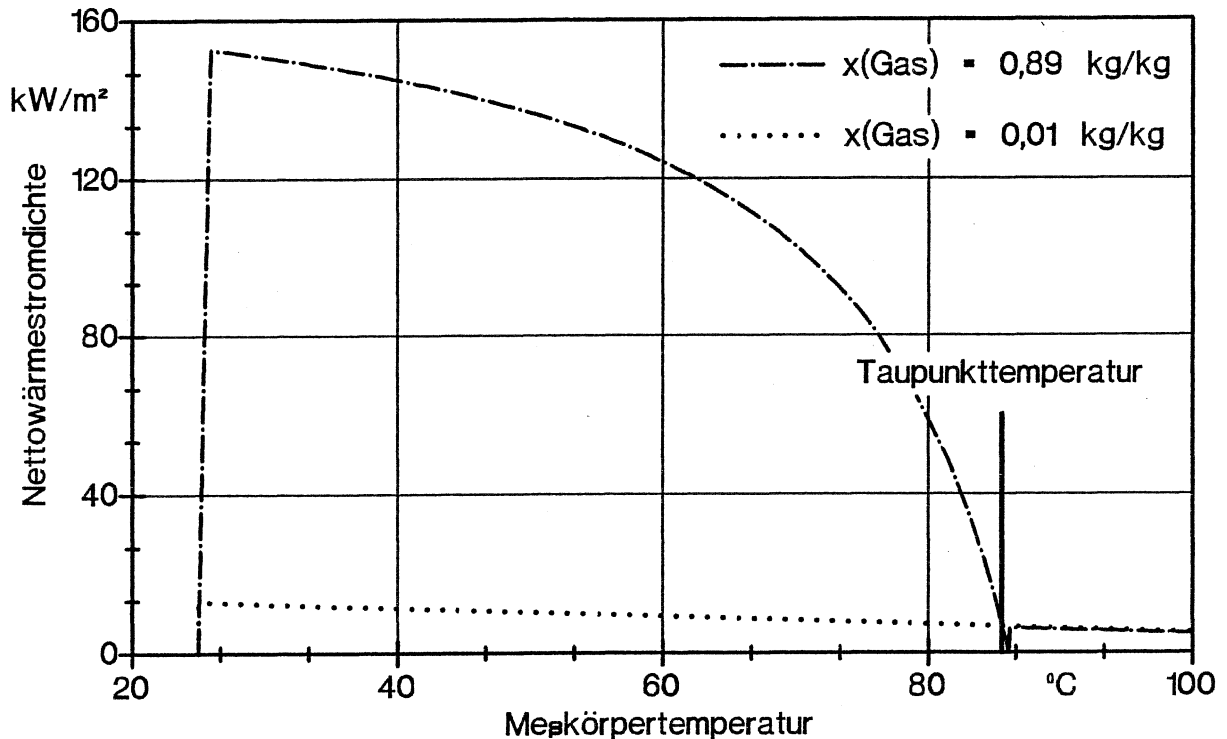


Abb. 72: Nettoärmestromdichte in einen Meßkörper während einer thermischen Behandlung mit einem heißen Luftstrom bei unterschiedlichen Wassergehalten im Luftstrom ($T_{\text{Luft}}: 150 \text{ °C}$, $v_{\text{Luft}}: 2,5 \text{ m/s}$)

Für die meßtechnische Bestimmung des Wassergehaltes im heißen Luftstrom ist der Schnittpunkt der Funktion mit der Nettoärmestromdichte ($0,01 \text{ kg/kg}$) bei ausschließlichem Wärmeintrag durch Konvektion mit der Funktion der Nettoärmestromdichte bei zusätzlichem Wärmeintrag durch Kondensation von entscheidender Bedeutung. Hier ist die Sättigungsfeuchte bei Meßkörpertemperatur gleich der tatsächlichen Feuchte im heißen Luftstrom (Taupunkttemperatur). Für die Bestimmung des Schnittpunktes muß die konvektive Wärmestromdichte des heißen Luftstromes vorher gemessen werden. Dazu reicht es, das Erwärmungsverhalten des Meßkörpers ohne zusätzliche Anhebung des Wassergehaltes zu messen. Aufgrund des sehr niedrigen Wassergehaltes in der Umgebungsluft kommt es zu keinem Wärmeintrag durch Kondensation. Über die Meßkörpertemperatur beim Schnittpunkt der Funktionen läßt sich der tatsächliche Wassergehalt ableiten (Abb. 73).

Die Taupunkttemperatur steigt mit zunehmender Lufttemperatur an. Da die Lufttemperatur an der Meßkörperoberfläche gleich der Meßkörpertemperatur ist, läßt sich aus der Temperatur des Schnittpunktes der Funktionen der aktuelle Wassergehalt im heißen Luftstrom auslesen.

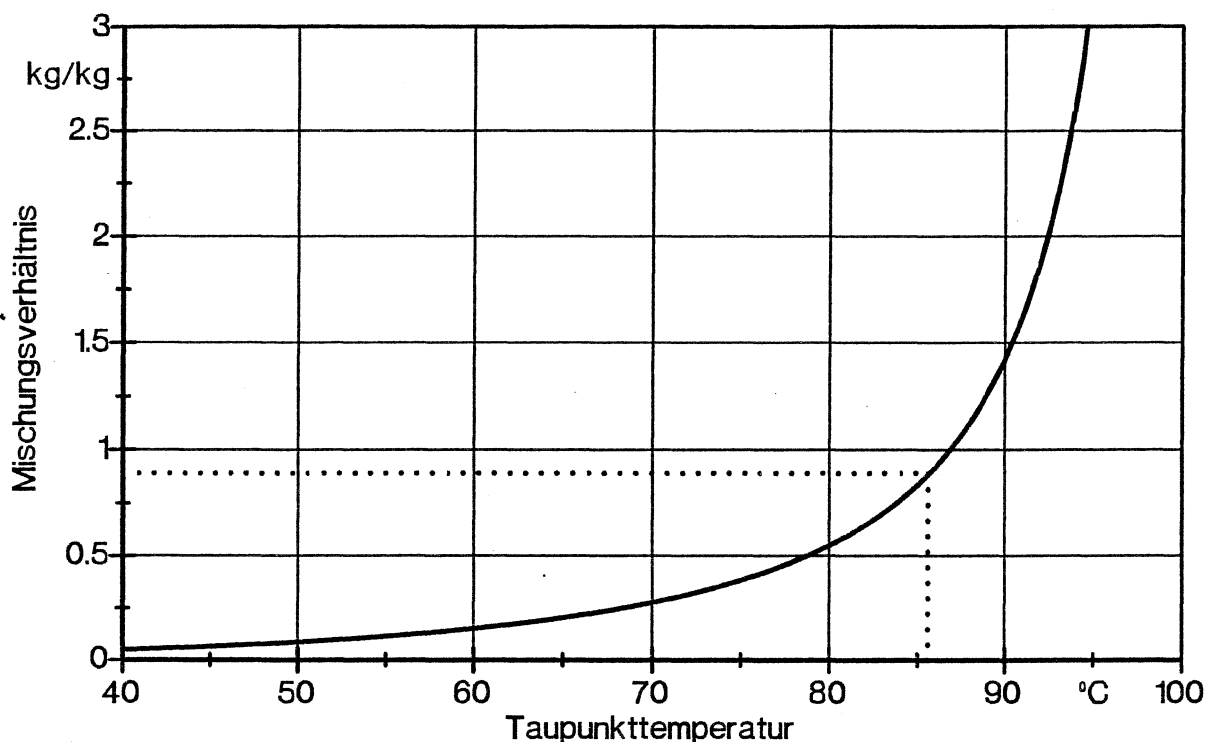


Abb. 73: Mischungsverhältnis von Wasserdampf zu trockener Luft in Abhängigkeit von der Taupunkttemperatur

Die Genauigkeit der Methode hängt in erster Linie von der Genauigkeit der Temperaturmessung ab. Durch eine hohe Wärmeleitfähigkeit des Meßkörpermaterials soll der Fehler bedingt durch den Temperaturgradienten zwischen der Meßkörperoberfläche und dem Thermoelement minimiert werden. Der Temperaturanstieg im Meßkörper muß einerseits so schnell sein, daß während der thermischen Behandlung die Schnittpunkttemperatur erreicht wird, andererseits muß sie so langsam sein, daß eine ausreichende Anzahl von Meßwerten zur Abbildung des Temperaturverlaufes erfaßt wird. Da der konvektive Wärmeübergangskoeffizient von den Stoffkennwerten der Luftkomponenten abhängt, ergibt sich durch die Erhöhung des Wassergehaltes eine Veränderung des konvektiven Wärmeübergangskoeffizienten. Der dadurch verursachte Fehler wird mit zunehmendem Wassergehalt im heißen Luftstrom größer. Die tatsächliche Wärmestromdichte durch Konvektion verläuft etwas niedriger. Aufgrund des sehr steilen Abfalls der Wärmestromdichte durch Kondensation in diesem Temperaturbereich verschiebt sich der Schnittpunkt bei Berücksichtigung dieses Zusammenhanges nur sehr wenig.

2.2 Ableitung der Hypothese zur "Selektivität" der thermischen Unkrautbekämpfung mit Wasserdampf/Luft Gemischen

Aus den dargestellten thermodynamischen Zusammenhängen läßt sich auch die Hypothese für die hohe "Selektivität" von Wasserdampf/Luft Gemischen ableiten. Prinzipielle Voraussetzung für die selektive thermische Unkrautbekämpfung in der Reihe ist ein ausreichender Unterschied im morphologischen Aufbau und in der Größe zwischen der Kulturpflanze und dem Unkraut.

Die Kulturpflanze muß im Bereich der thermischen Behandlung den morphologischen Aufbau einer thermisch "toleranten" Pflanze aufweisen. Die maximale Höhe der thermischen Behandlung läßt sich durch eine entsprechende Strömungsführung wenige Zentimeter über der Bodenoberfläche einschränken. Bis zu dieser Höhe müssen die empfindlichen Bereiche der Kulturpflanze von unempfindlichen Gewebeteilen (Hüllblätter, Wachsicht, Borke, e.c) umgeben sein. Eine Erwärmung dieser Gewebeteile darf die Kulturpflanze in der Qualität des Produkts zum Erntezeitpunkt nicht beeinträchtigen. Dies ist in der Regel bei einem sehr kleinen Wachstumsstadium der Unkräuter gegeben. Für eine tiefergehende Erwärmung der Kulturpflanze dominiert der Einfluß der Wärmeleitung. Die geringe Wärmeleitfähigkeit des pflanzlichen Gewebes hat zur Folge, daß für eine ausreichende Erwärmung und damit Schädigung tieferer Gewebeschichten eine lange Behandlungsdauer notwendig ist.

Das Unkraut muß eine höhere thermische Empfindlichkeit als die Kulturpflanze aufweisen. Das bedeutet, daß der Abstand zwischen der Pflanzenoberfläche und dem Schädigungsort sehr klein sein muß. Trotz der vergleichsweise geringen Wärmeleitfähigkeit des pflanzlichen Gewebes wird das Unkraut auch bei einer sehr kurzen Behandlungsdauer abgetötet.

Gerätetechnisch wird dieser Unterschied durch eine hohe Nettowärmestromdichte und eine kurze Behandlungsdauer ausgenutzt. Im Prinzip muß so schnell gefahren werden, daß es in den empfindlichen Teilen der Kulturpflanze zu keiner schädlichen Erwärmung kommt, aber gleichzeitig so langsam, daß die Unkräuter noch abgetötet werden.

Durch den Einsatz von Wasserdampf/Luft Gemischen kommt es durch die hohe Wärmestromdichte der Kondensation zu einer sehr schnellen Erwärmung der Randbereiche der Pflanze bis zur Gleichgewichtstemperatur. Die Höhe der Gleichgewichtstemperatur bestimmt nun die Höhe der Wärmeleitung ins Pflanzeninnere. Durch einen niedrigen Wassergehalt kann die Wärmeleitung ins Pflanzeninnere verringert und damit die thermische Belastung der Kulturpflanze vermindert werden. Der Wassergehalt muß aber hoch genug sein, um im Randbereich der Pflanzenorgane eine Gewebetemperatur von mindestens 60 °C (A, Kap.4.3) zu gewährleisten. Diese reicht aus, die thermisch empfindlichen Unkräuter abzutöten. Bereits bei einem Wassergehalt von 0,18 kg/kg erfolgt bis zu

einer Oberflächentemperatur von 60 °C ein zusätzlicher Wärmeeintrag durch Kondensation (Abb. 73).

2.3 Testpflanzen

Um die Ergebnisse der meßtechnischen Gerätüberprüfung mit den entsprechenden Ergebnissen offenen Stabbrenners, des optimal abgedeckten Stabbrenners und des Low Temperature Weeders einordnen zu können, mußten exakt die gleichen Testpflanzen verwendet werden. Deshalb wurden in diesen Versuchen die Mungbohne (*Vigna radiata* (L.) var. *radiata*), 2 Laubblätter) und der Weizen (*Triticum aestivum* L.), Entwicklungsstadium 14 - 16 (ZADOKS et al. 1974)) eingesetzt. Aufgrund ihres deutlich unterschiedlichen morphologischen Aufbaues waren die beiden Testpflanzen für die Untersuchung der "Selektivität" der Geräte geeignet. Die Anzucht der Testpflanzen erfolgte in Jiffy-Pots und es erfolgte für eine weitere Homogenisierung des Versuchsmaterials eine entsprechende Vorsortierung. Ausgewertet wurde auch hier nach 3 Tagen (*Vigna radiata* (L.) var. *radiata*), bzw. nach 2 Wochen (*Triticum aestivum* L.).

2.4 Temperaturmessung (Meßkörper)

Für die meßtechnische Überprüfung des thermodynamischen Modells im Heißluftwindtunnel wurden zylindrische Meßkörper mit einem Durchmesser von 3,2 mm aus Aluminium eingesetzt (A, Kap. 6.1.2). Um den Meßkörper am Schwenkmotor befestigen zu können, wurde er mit einem temperaturbeständigen Epoxidharz Kleber auf ein Glasrohr (d = 3 mm, l = 5 cm) geklebt.

Für die Bestimmung des Wassergehaltes bei der thermischen Unkrautbekämpfung mit dem Low Temperature Weeder mußten nackte Thermolemente (Typ K) mit einem Einzeldrahtdurchmesser von 0,25 mm eingesetzt werden. Der Temperaturanstieg im Meßkörper ist für diesen Fall so langsam, daß während der thermischen Behandlung die Schnittpunkttemperatur nicht erreicht wird.

2.5 Versuchseinrichtungen und Meßaufbau

Die meßtechnische Überprüfung des thermodynamischen Modells und die grundlegenden Arbeiten zur Ableitung der meßtechnischen Bestimmung des Mischungsverhältnisses von Wasserdampf zu Luft erfolgte am Heißluftwindtunnel (A, Kap. 4.1.5.1). Die Dampfzufuhr erfolgte über einen von der Firma Seifert zur Verfügung gestellten Dampfkessel.

Die meßtechnische Überprüfung des mit einem Wasserdampf/Luft Gemisch arbeitenden Low Temperature Weeder (LTW) wurde auf der in einem Gewächshaus errichteten Versuchstrecke mit angetriebenem Gerätetragrahmen durchgeführt. Die Dampfzufuhr erfolgte mit einem Dampfkessel. Für die Temperaturmessung wurde das Meßbrett eingesetzt und als Meßkörper nackte Thermoelementen genommen (A, Kap. 6.1.3).

2.6 Versuchsdurchführung und Auswertung

Für die **meßtechnische Überprüfung des thermodynamischen Modells** wurde der Meßkörper bei unterschiedlichen Wassergehalten im heißen Luftstrom mit dem Schwenkmotor in den Meßspalt des Heißluftwindtunnels gefahren und der Temperaturverlauf aufgezeichnet. Die Dampfzufuhr erfolgte mit einem Dampfkessel und einem wärmeisolierten Schlauch. Der Dampf wurde über ein Anschlußstück in den unteren Teil des Heißluftwindtunnels noch vor den Gleichrichtern eingeleitet. Die Einstellung des Wassergehaltes erfolgte über die Zeitdauer der Dampfeinleitung. Je länger der Dampf eingeleitet wurde, desto höher waren die Wassergehalte im heißen Luftstrom. Durch die Festlegung der Lufttemperatur im Heißluftwindtunnel auf 150 °C wurde eine Kondensation von Wasser im HWT ausgeschlossen. Die Strömungsgeschwindigkeit wurde analog zu den bisherigen Versuchen (A; Kap. 4.1.5, 4.3) mit 2,5 m/s gewählt.

Um die notwendige Zahl der Versuchsfahrten mit dem LTW für die meßtechnische Überprüfung des Zusammenhangs zwischen dem **Bekämpfungserfolg** und der **Fahrgeschwindigkeit** zu beschränken, wurde die optimale Fahrgeschwindigkeit der Varianten in Vorversuchen eingegrenzt. Für jede Variante wurden im Hauptversuch 20 Versuchsfahrten mit unterschiedlichen Fahrgeschwindigkeiten durchgeführt. Pro Versuchsfahrt wurden 8 Pflanzen hinter dem Meßbrett plaziert. Die Auswertung der Ergebnisse erfolgte, analog zu den bisherigen Versuchsanstellungen (ASCARD 1989, 1995) mit Hilfe nicht linearer Regressionsmodelle (A, Kap. 6.1.6). Die Dampfzufuhr erfolgte mit einem Dampfkessel. Über einen wärmeisolierten Schlauch wurde der Dampf unter den LTW eingeleitet. Die Höhe des Wassergehaltes im heißen Luftstrom wurde über die Zeitdauer der Dampfeinleitung variiert. Für eine hohe "Selektivität" der thermischen Behandlung wurden niedrige Mischungsverhältnisse im Bereich zwischen 0,2 kg/kg und 0,5 kg/kg angestrebt. Deshalb mußte die dafür notwendige Zeitdauer der Dampfeinleitung in Vorversuchen eingegrenzt werden. Die Strömungsgeschwindigkeit unter der Abdeckung betrug 2,5 m/s (A; Kap. 6.1.4). Um eine Kondensation des Wasserdampfes im Gerät zu verhindern, wurde die Temperatur des Luftstromes auf 150 °C eingestellt. Für die Messung der konvektiven Wärmestromdichte in die Thermoelemente wurde für beide Testpflanzen eine Versuchsreihe ohne Zufuhr von Wasserdampf gefahren. Anschließend wurde der LTW mit der jeweils eingestellten Fahrgeschwindigkeit über den Meßabschnitt gezogen. Aufgrund

des hohen Gewichts des Dämpfkessels konnte dieser nicht auf dem Gerätetragrahmen befestigt werden. Damit war eine kontinuierliche Einleitung von Wasserdampf während der Versuchsfahrt nicht gegeben.

Für die Einordnung der möglichen Fahrgeschwindigkeit zu den anderen Gerätekonzepten zur thermischen Unkrautbekämpfung erfolgt ein Vergleich der Fahrgeschwindigkeit bei Erreichen eines Bekämpfungserfolges von 95 % (Lethal Speed(95)).

Für die Beurteilung der "Selektivität" der Verfahren wird die thermisch "sensible" Mungbohne als zu bekämpfende Unkrautpflanze und der thermische "tolerante" Winterweizen als zu schonende Kulturpflanze definiert. Folglich muß für die Mungbohne ein möglichst hoher Bekämpfungserfolg (LS(95)) und für den Winterweizen ein möglichst niedriger Bekämpfungserfolg (LS(5)) für den Vergleich der Fahrgeschwindigkeiten herangezogen werden. Eine selektive Unkrautbekämpfung ist in diesem Zusammenhang nur dann möglich, wenn die Fahrgeschwindigkeit für einen Bekämpfungserfolg von 95 % bei der Mungbohne höher ist, als die Fahrgeschwindigkeit für ein Abtöten von 5 % der Weizenpflanzen. Je größer dieser Unterschied ist, desto "selektiver" arbeitet das jeweilige Gerät. Prinzipiell könnte auch der Anteil der abgetöteten Weizenpflanzen bei der Fahrgeschwindigkeit für einen Bekämpfungserfolg von 95 % (Mungbohne) herangezogen werden. Aufgrund der für die Auswertung gewählten Regressionsfunktion ist aber das Vertrauensintervall gerade im Bereich sehr hoher und sehr niedriger Bekämpfungserfolge vergleichsweise hoch (A, Kap. 6.2.3). Die Werte würden sehr exakte Unterschiede ergeben, die statistisch aber nur mit sehr hohen Wiederholungszahlen abzusichern wären. Die Bildung eines Verhältnisses zwischen der LS(95) für die Mungbohne und der LS(05) für den Winterweizen ist ebenfalls denkbar. Für den Anwender ist aber der absolute Unterschied zwischen den beiden Werten von entscheidender Bedeutung. Ein geringer absoluter Unterschied erfordert ein wesentlich exakteres Einhalten der Fahrgeschwindigkeit als ein großer.

2.7 Eingangsgroßen für das thermodynamische Modell.

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 (A, Kap. 6.1.5, Tab. 10).

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 (A, 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.

3. Ergebnisse und Diskussion

Im folgenden Teil werden die Ergebnisse zur meßtechnischen Überprüfung des thermodynamischen Modells und zur meßtechnischen Überprüfung der Gerätekonzepte dargestellt.

3.1 Meßtechnische Überprüfung des thermodynamischen Modells

Für die meßtechnische Überprüfung des thermodynamischen Modells wurde in einem ersten Schritt das Erwärmungsverhalten eines Meßkörpers während einer thermischen Behandlung im Heißluftwindtunnel gemessen und mit den Rechenwerten verglichen (Abb. 74).

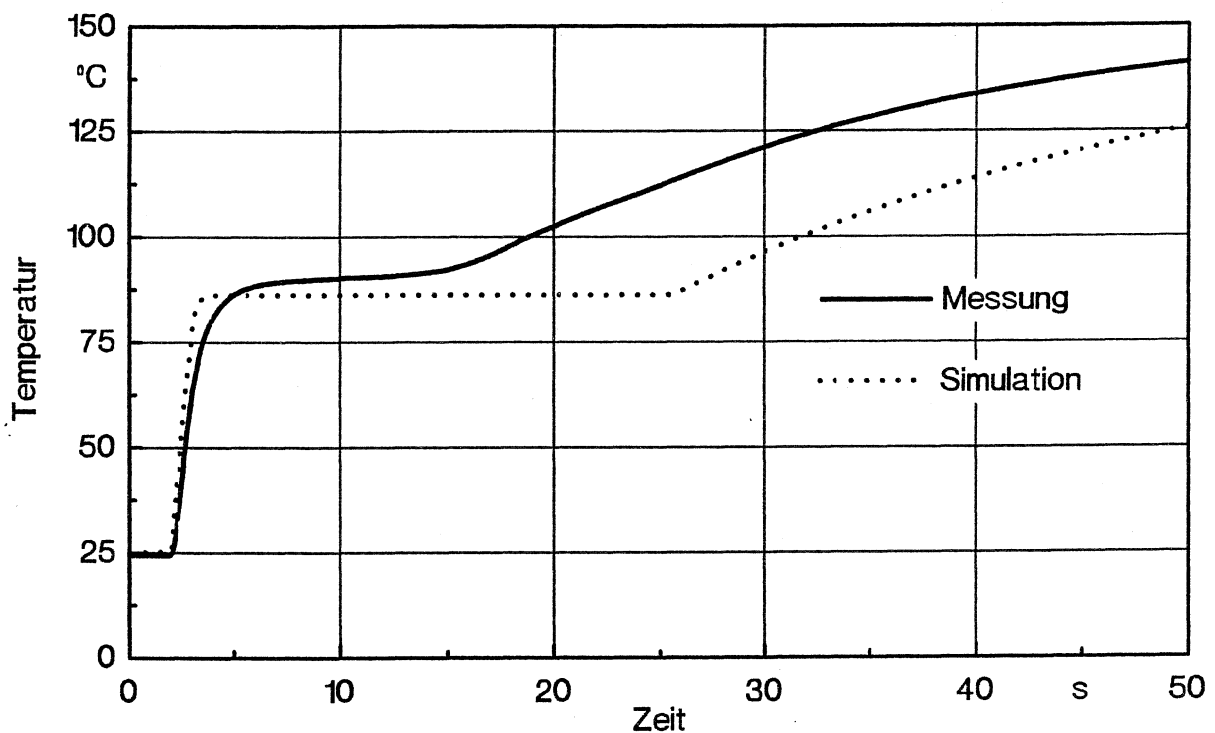


Abb. 74: Vergleich der gerechneten (Thermodynamisches Modell) mit dem gemessenen Erwärmungsverhalten eines Meßkörpers während der thermischen Behandlung im Heißluftwindtunnel ($T_{\text{Luft}} = 150 \text{ °C}$, $v_{\text{Luft}} = 2,5 \text{ m/s}$, $x_{\text{Luft}} = 0,89 \text{ kg/kg}$)

Es zeigt sich, daß der errechnete und der gemessene Temperaturverlauf sich in etwa entsprechen. In beiden Fällen steigt die Meßkörpertemperatur zunächst stark an; danach flacht der Anstieg ab. Während sich bei der errechneten Funktion die Gleichgewichtstemperatur bei 87 °C einstellt, erreicht die gemessene Temperatur das Plateau erst bei 90 °C . Allerdings ist während dieser Phase eine minimale Zunahme der Temperatur zu beobachten. Deutlich unterscheiden sich beide Funktionen in der zeitlichen Dauer der Plateau - Phase. Hier ist die errechnete Dauer nahezu doppelt so

lang wie die gemessene. Der anschließende Temperaturanstieg verläuft wieder ähnlich.

Ein Vergleich der errechneten mit der gemessenen Nettowärmestromdichte in den Meßkörper in Abhängigkeit von der Meßkörpertemperatur zeigt deutliche Unterschiede (Abb. 75).

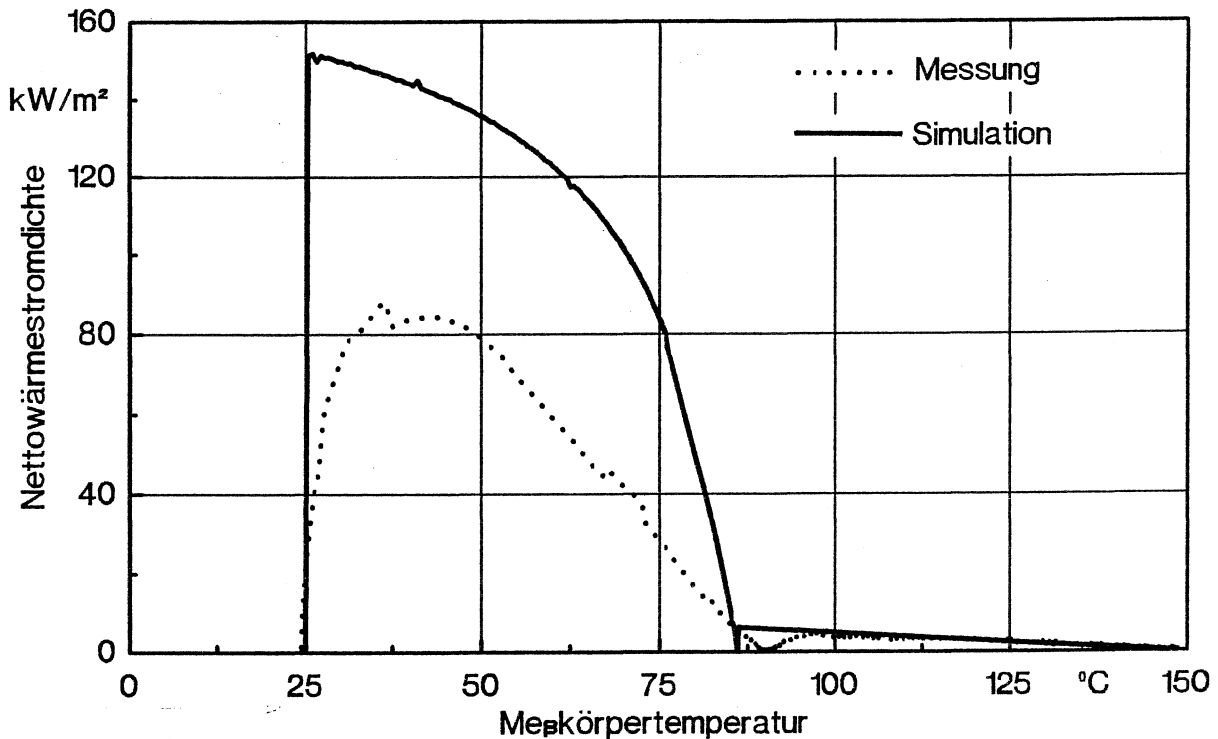


Abb. 75: Vergleich der gerechneten (Thermodynamisches Modell) mit der gemessenen Nettowärmestromdichte in einen Meßkörper während der thermischen Behandlung im Heißluftwindtunnel in Abhängigkeit von der Meßkörpertemperatur ($T_{\text{Luft}} = 150 \text{ °C}$, $v_{\text{Luft}} = 2,5 \text{ m/s}$, $x_{\text{Luft}} = 0,89 \text{ kg/kg}$)

Die errechnete Nettowärmestromdichte ist gerade in der ersten Phase der Erwärmung nahezu doppelt so hoch, wie die gemessene. Durch die Art der Temperaturmessung kann ein Einfluß des Temperaturgradienten von der Meßkörperoberfläche zum Thermoelement nicht ganz ausgeschlossen werden. Dies wird durch den verzögerten Anstieg der gemessenen Nettowärmestromdichte zu Beginn der thermischen Behandlung deutlich. Durch diese Verzögerung ist eine exakte Abbildung des Verlaufes der Nettowärmestromdichte über die Meßkörpertemperatur nicht möglich. Der Wassergehalt für die vergleichende Simulation wurde über die Messung bestimmt. Ein Einfluß des Meßfehlers auf die Schnittpunktbestimmung ist daher gegeben.

Für eine weitergehende Überprüfung des thermodynamischen Modells wurde das Erwärmungsverhalten des Meßkörpers im Heißluftwindtunnel bei unterschiedlichen Wassergehalten im heißen Luftstrom gemessen. Da durch den Wärmeintrag eine Temperaturerhöhung auf mindestens 60 °C

erreicht werden muß, wurde für den Vergleich der Meßergebnisse mit den Rechenwerten die Zeitdauer für einen Temperaturanstieg von 30 °C auf 60 °C herangezogen (Abb. 76).

Bis zu einem Mischungsverhältnis von etwa 0,7 kg/kg ist die errechnete notwendige Zeitdauer länger als die gemessene. Ab einem Mischungsverhältnis von 0,7 kg/kg und größer kehrt sich dieser Zusammenhang um. Der Unterschied zwischen der errechneten und der gemessenen Zeitdauer beträgt bei einem Mischungsverhältnis von 0,1 kg/kg nur 28 % und verringert sich zunehmend. Im Bereich des für die selektive Unkrautbekämpfung interessanten Wassergehaltes zwischen 0,2 kg/kg und 0,5 kg/kg ist der Unterschied kleiner als 10 %. Ab einem Wassergehalt von 0,7 kg/kg steigt der Unterschied kontinuierlich an und beträgt beim höchsten gemessenen Wassergehalt von 4,63 kg/kg bereits 100 %.

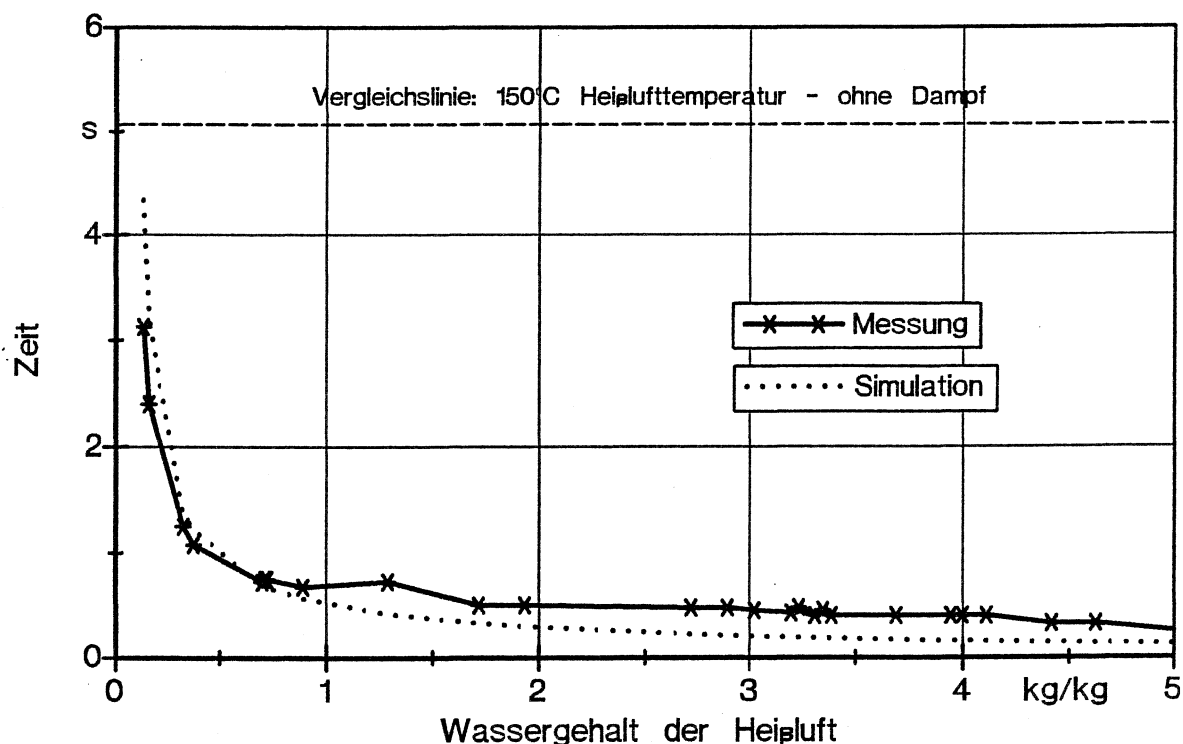


Abb. 76: Vergleich der gerechneten (Thermodynamisches Modell) mit der gemessenen notwendigen Behandlungsdauer eines Meßkörpers in einem heißen Luftstrom (Heißluftwindtunnel) für einen Temperaturanstieg von 30 °C auf 60 °C in Abhängigkeit vom Wassergehalt in der Heißluft

Die Meßwerte zeigen deutlich, daß die Zeitdauer für die Erwärmung des Meßkörpers nicht beliebig verkürzt werden kann. Bis zu einem Mischungsverhältnis von 1,0 kg/kg ist eine deutliche Verkürzung der Zeitdauer für die Erwärmung des Meßkörpers möglich. Eine weitere Steigerung des

Mischungsverhältnisses führt zu einer deutlich geringeren Verkürzung der notwendigen Zeitdauer.

3.2 Geräteüberprüfung (Speed/Response)

Die meßtechnische Überprüfung des Low Temperature Weeder ergab für die Mungbohne (*Vigna radiata* (L.) var *radiata*), 2 Laubblätter) deutlich größere Unterschiede in der Fahrgeschwindigkeit bei vergleichbarem Bekämpfungserfolg zwischen den unterschiedlichen Wassergehalten im Luftstrom (Abb. 77) als für den Winterweizen (*Triticum aestivum* L.), Entwicklungsphase 14 - 16 (ZADOKS et al. 1974)(Abb. 8).

Für die Bekämpfung der Mungbohne konnte die Fahrgeschwindigkeit für einen Bekämpfungserfolg von 95 % (LS(95)) durch die Anhebung des Wassergehaltes im Luftstrom deutlich erhöht werden. Beim LTW ohne Wasserdampfzufuhr wurde die LS(95) bei einer Fahrgeschwindigkeit von 1,1 km/h erreicht. Bei einem Wassergehalt von 0,25 kg/kg konnte die Fahrgeschwindigkeit für den gleichen Bekämpfungserfolg um 155 % auf 2,8 km/h, bei einem Wassergehalt von 0,35 kg/kg um 263 % auf 4,0 km/h gesteigert werden.

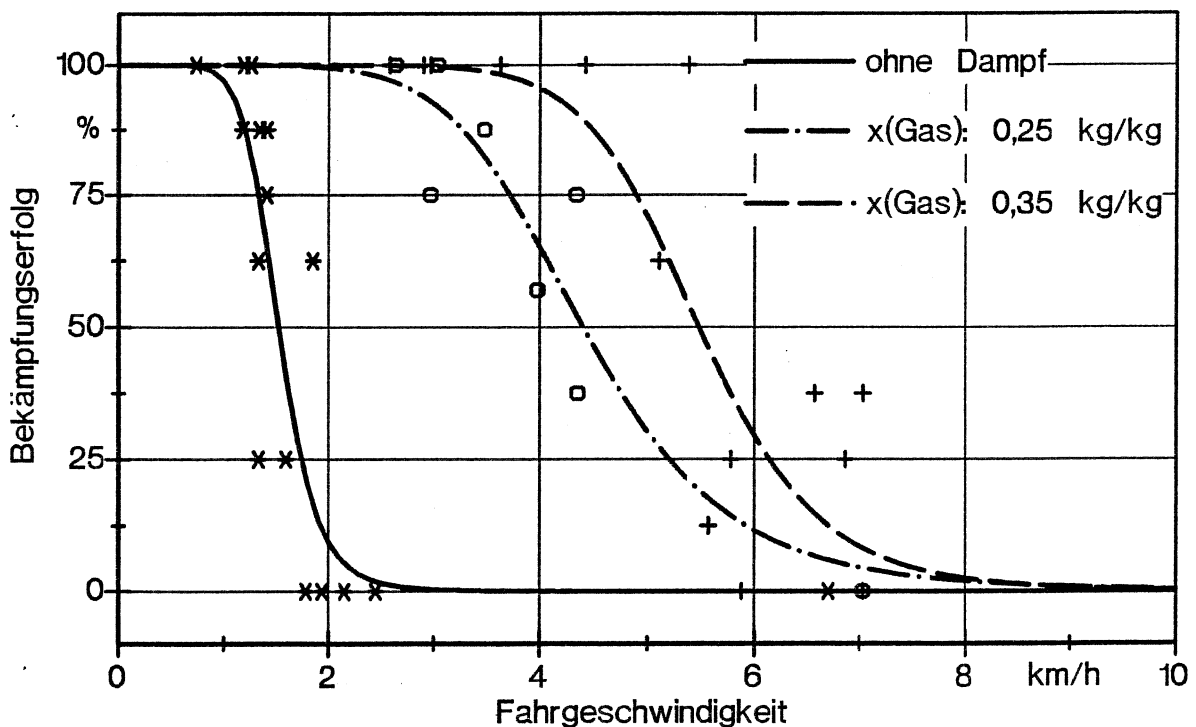


Abb. 77: Bekämpfungserfolg mit dem Gerätekonzept Low Temperature Weeder in Abhängigkeit von der Fahrgeschwindigkeit (Testpflanze: Mungbohne (*Vigna radiata* (L.) var *radiata*), 2 Laubblätter) für verschiedene Wassergehalte in der Heißluft

Für die Bekämpfung des Winterweizens war die Erhöhung der Fahrgeschwindigkeit für einen Bekämpfungserfolg von 95 % (LS(95)) durch die Anhebung des Wassergehaltes im Luftstrom geringer (Abb. 78). Mit dem LTW ohne Wasserdampfzufuhr wurde die LS(95) bei einer Fahrgeschwindigkeit von 0,60 km/h erreicht. Bei einem Wassergehalt von 0,25 kg/kg konnte die Fahrgeschwindigkeit für den gleichen Bekämpfungserfolg um 85 % auf 1,11 km/h, bei einem Wassergehalt von 0,35 kg/kg um 133 % auf 1,40 km/h gesteigert werden.

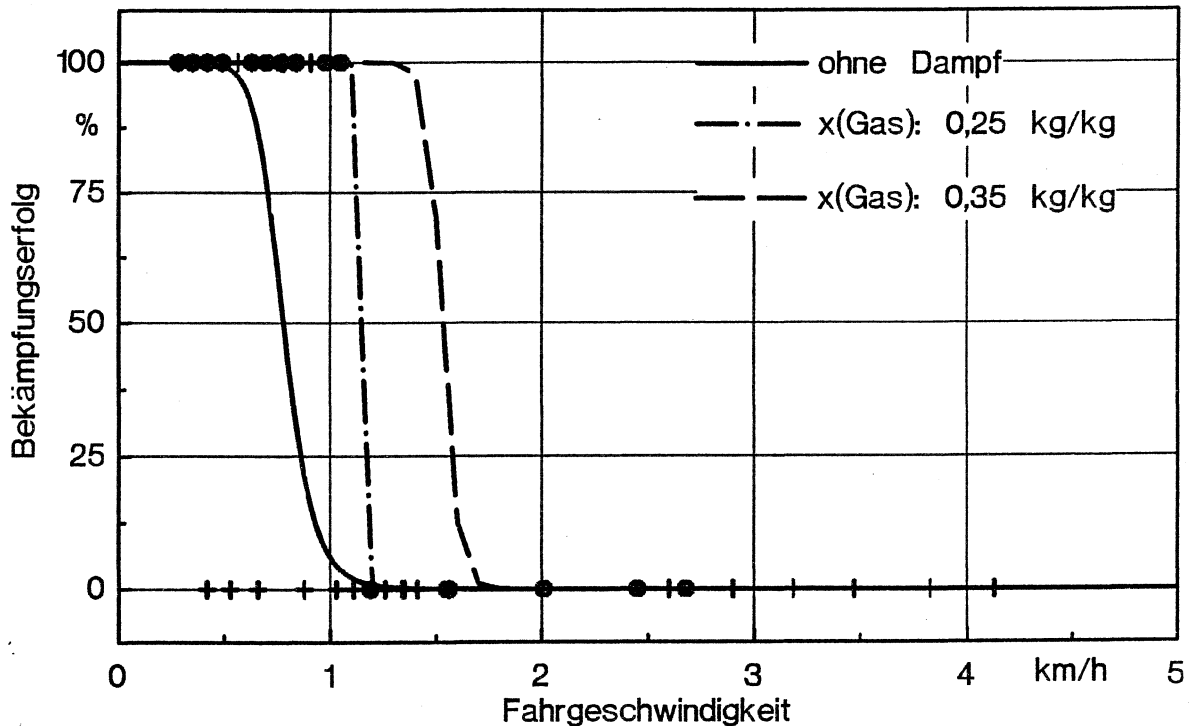


Abb. 78: Bekämpfungserfolg mit dem Gerätekonzept Low Temperature Weeder in Abhängigkeit von der Fahrgeschwindigkeit (Testpflanze: Winterweizen (*Triticum aestivum* L.), Entwicklungsphase 14 - 16 (ZADOKS et al. 1974)) für verschiedene Wassergehalte in der Heißluft

Der Vergleich der Fahrgeschwindigkeit zur Erreichung eines Bekämpfungserfolges von 95 % (LS(95)) mit den Ergebnissen zum offenen Stabbrenner, zum optimal abgedeckten Stabbrenner und zum LTW (A, Kap. 6.2.3) ergibt deutliche Unterschiede sowohl zwischen den Gerätekonzepten, als auch zwischen Testpflanzen (Abb. 79). Der Schwerpunkt dieses Gerätevergleichs liegt auf der Einordnung der LS(95) des mit erhöhten Wasserdampf/Luft Gemischen betriebenen LTW.

Bei der Mungbohne beträgt die LS(95) für den offenen Stabbrenner 1,23 km/h, für den optimal abgedeckten Stabbrenner 4,47 km/h, für den LTW mit einer Arbeitstemperatur von 300 °C 2,03 km/h, für den LTW (150 °C) mit einem Wassergehalt von 0,25 kg/kg 2,80 km/h und für den LTW (150 °C) mit einem Wassergehalt von 0,35 kg/kg 4,00 km/h. Durch die Anhebung des Wasser-

dampf/Luft Gemisches auf 0,35 kg/kg erreichte die LS(95) des LTW trotz sehr niedriger Lufttemperaturen (150 °C) annähernd die LS(95) des optimal abgedeckten Stabbrenners.

Beim Winterweizen beträgt die LS(95) für den offenen Stabbrenner 0,64 km/h, für den optimal abgedeckten Stabbrenner 2,66 km/h, für den LTW mit einer Arbeitstemperatur von 300 °C 1,04 km/h, für den LTW (150 °C) mit einem Wassergehalt von 0,25 kg/kg 1,11 km/h und für den LTW (150 °C) mit einem Wassergehalt von 0,35 kg/kg 1,40 km/h. Durch die Anhebung des Wasserdampf/Luft Gemisches auf 0,25 kg/kg bzw. 0,35 kg/kg erreichte die LS(95) nur sehr niedrige Werte.

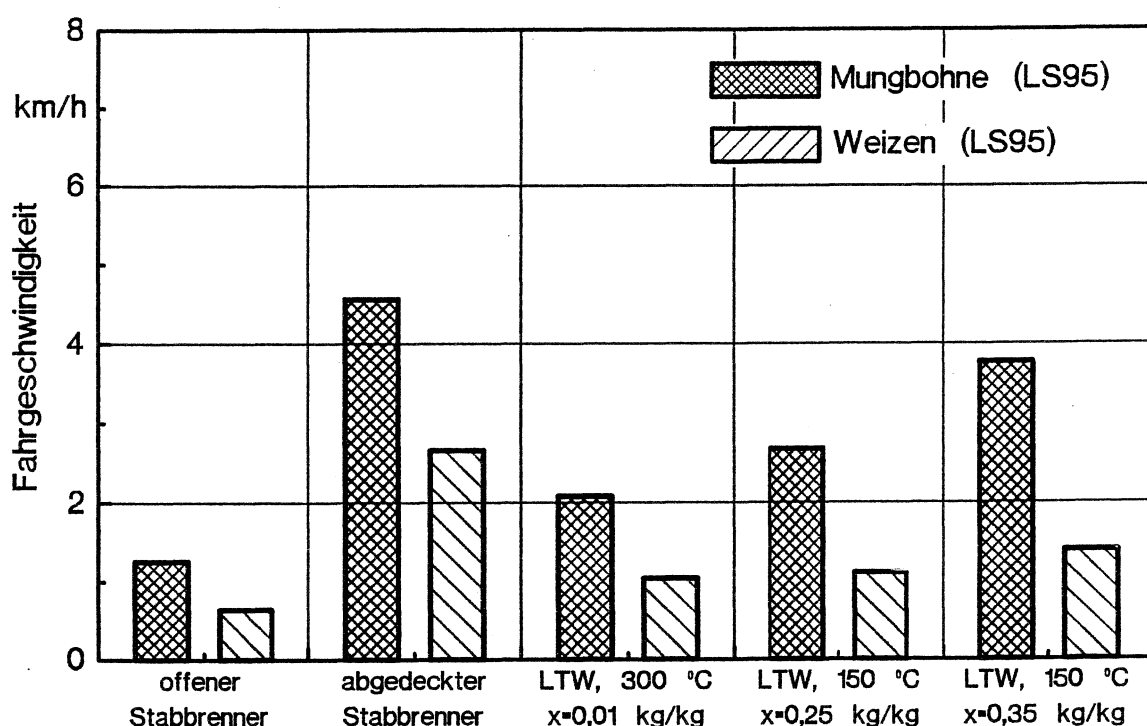


Abb. 79: Fahrgeschwindigkeit zum Erreichen eines Bekämpfungserfolges von 95 % (Letal Speed (95) bei unterschiedlichen Testpflanzen (Winterweizen (*Triticum aestivum* L.), Entwicklungsphase 14 - 16 (ZADOKS et al. 1974), Mungbohne (*Vigna radiata* (L.) var *radiata*), 2 Laubblätter) für verschiedene Geräte zur thermischen Unkrautbekämpfung

Für die vergleichende Beurteilung der "Selektivität" der Geräte wird für die Mungbohne die LS(05) und für den Winterweizen die LS(95) herangezogen (Abb. 80). Eine selektive Unkrautbekämpfung ist in diesem Zusammenhang nur dann möglich, wenn die Fahrgeschwindigkeit für einen Bekämpfungserfolg von 95 % bei der Mungbohne höher ist, als die Fahrgeschwindigkeit für ein Abtöten von 5 % der Weizenpflanzen.

Für den offenen Stabbrenner ist die LS(95) für die Mungbohne deutlich niedriger, als die LS(05) des Weizens. Eine selektive Bekämpfung der Mungbohne bei gleichzeitiger Schonung des Winterweizens ist mit diesem Gerät nicht möglich.

Für den optimal abgedeckten Stabbrenner ist die LS(95) für die Mungbohne ebenfalls deutlich niedriger, als die LS(05) des Weizens. Eine selektive Bekämpfung der Mungbohne bei gleichzeitiger Schonung des Winterweizens ist mit diesem Gerät nicht möglich.

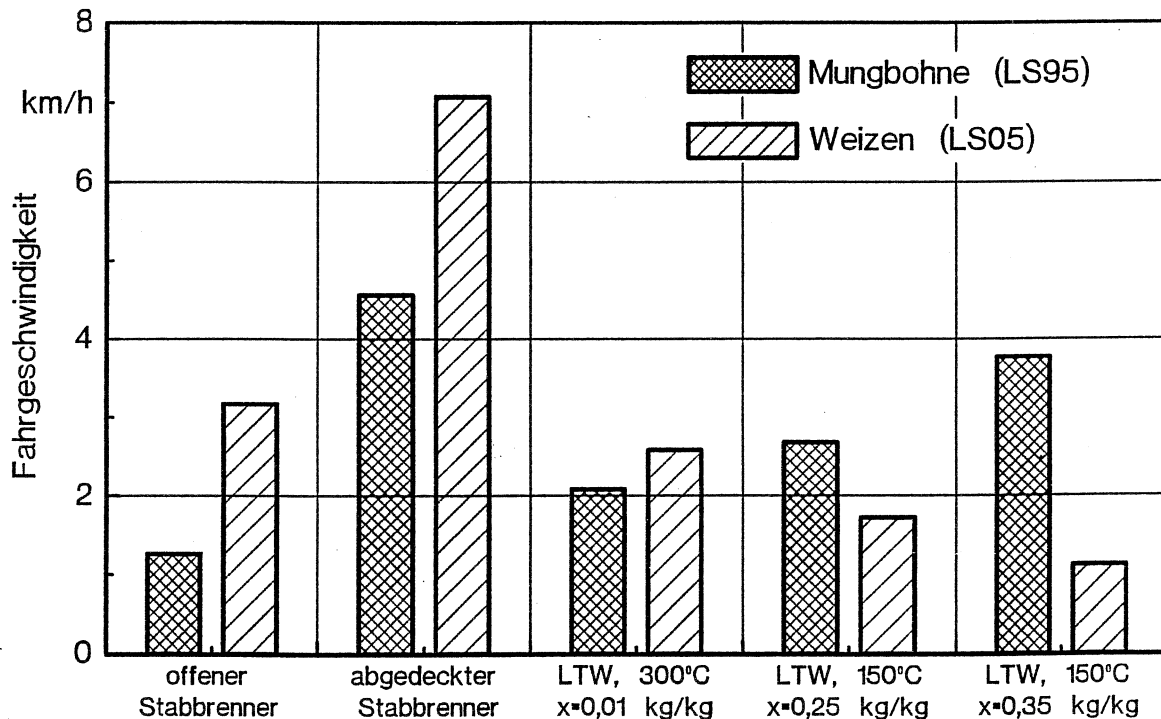


Abb. 80: Fahrgeschwindigkeit zur Erzielung definierter Bekämpfungserfolge (Letal Speed) für unterschiedliche Gerätekonzepte zur thermischen Unkrautbekämpfung bei thermisch unterschiedlich empfindlichen Testpflanzen (Winterweizen (*Triticum aestivum* L.), Entwicklungsphase 14 - 16 (ZADOKS et al. 1974), Mungbohne (*Vigna radiata* (L.) var *radiata*), 2 Laubblätter)

Für den LTW (300 °C) ist die LS(95) für die Mungbohne ebenfalls niedriger, als die LS(05) des Weizens. Eine selektive Bekämpfung der Mungbohne bei gleichzeitiger Schonung des Winterweizens ist mit diesem Gerät nicht möglich.

Für den LTW (150 °C, 0,01 kg/kg) ist die LS(95) für die Mungbohne ebenfalls etwas niedriger, als die LS(05) des Weizens. Eine selektive Bekämpfung der Mungbohne bei gleichzeitiger Schonung des Winterweizens ist mit diesem Gerät nicht möglich.

Für den LTW (150 °C, 0,25 kg/kg) ist die LS(95) für die Mungbohne etwas höher, als die LS(05)

des Weizens. Der absolute Unterschied beträgt hier 1,69 km/h. Eine selektive Bekämpfung der Mungbohne bei gleichzeitiger Schonung des Winterweizens ist mit diesem Gerät möglich.

Für den LTW (150 °C, 0,35 kg/kg) ist die LS(95) für die Mungbohne bereits deutlich größer, als die LS(05) des Weizens. Der absolute Unterschied beträgt hier 2,60 km/h. Eine selektive Bekämpfung der Mungbohne bei gleichzeitiger Schonung des Winterweizens ist mit diesem Gerät möglich

Die Ergebnisse unterstreichen die enorme Wärmeeintragsgeschwindigkeit bereits sehr kleiner Mischungsverhältnisse von Wasserdampf zu Luft im Luftstrom. Sie bestätigen auch in eindrucksvoller Weise die auf der Basis Simulationen mit dem thermodynamischen Modell abgeleiteten Hypothese zur "Selektivität" der thermischen Verfahren, insbesondere der erhöhten "Selektivität" Unkrautbekämpfung mit Wasserdampf/Luft Gemischen. Für das Abtöten der thermische "empfindliche" Mungbohnen (*Vigna radiata (L.) var radiata*), 2 Laubblätter) genügt es, einen Stengelabschnitt unterhalb der ersten Laubblätter oberflächlich auf 60 °C zu erwärmen (A, Kap.4.3). Aufgrund der geringen notwendigen Schädigungstiefe führt die sehr schnelle Erwärmung der äußersten Randschicht durch den Wärmeintrag durch Kondensation bereits zum Absterben der Gesamtpflanze. Die untersuchten Wassergehalte im Luftstrom lagen über den für ein Erreichen von 60 °C notwendigen 0,18 kg/kg (B, Kap.2.2). Für das Abtöten der thermisch "toleranten" Weizenpflanzen (*Triticum aestivum L.*), Entwicklungsphase 14 - 16 (ZADOKS et al. 1974)), mußte in der Mitte des oberen Teiles der untersten Blattscheide die Schädigungstemperatur von 60 °C erreicht werden (A, Kap.4.3). Damit kommt dem Wärmetransport durch Leitung eine erhöhte Bedeutung zu. Da die Gleichgewichtstemperatur der Oberfläche der in diesem Bereich befindlichen Hüllblätter beim Einsatz der Wasserdampf/Luft Gemische im Vergleich zu den anderen Gerätekonzepten niedriger ist, wird auch die Wärmeleitung ins Pflanzeninnere vermindert. Dies führt für das Abtöten des Winterweizens zwangsläufig zu hohen notwendigen Behandlungsdauern und damit zu niedrigen Fahrgeschwindigkeiten.

3.3 Schlußfolgerungen für die Geräteauslegung

Die Ergebnisse zur meßtechnischen Überprüfung der Geräte zur thermischen Unkrautbekämpfung bestätigen die Eignung niedriger Wasserdampf/Luft Gemische für eine hohe "Selektivität" der thermischen Unkrautbekämpfung. Dabei konnte mit einem Mischungsverhältnis von 0,35 kg/kg eine vergleichsweise hohe LS(95) (Mungbohne: 3,8 km/h) erreicht werden. Aufgrund der thermodynamischen Zusammenhänge kann davon ausgegangen werden, daß eine weitere Erhöhung des Mischungsverhältnisses eine weitere Erhöhung der LS(95) (Mungbohne) zur Folge hat. Da aber auch die schwer bekämpfbaren Unkräuter von der damit verbundenen Erhöhung der "Selektivität"

des Gerätes profitieren, sollte der Wassergehalt im Luftstrom nur soweit angehoben werden, daß ein für den Anwender ausreichender "Sicherheitsabstand" zwischen der ausreichenden Bekämpfung der Unkräuter und der Schädigung der Kulturpflanze gegeben ist. Eine möglichst hohe Fahrgeschwindigkeit ist ökonomischen Gründen und aus Gründen einer ausreichenden Schlagkraft bei engen Witterungsfenstern aber durchaus wünschenswert. Darüber ermöglicht die damit verbundene Erhöhung der Wärmeintragungsgeschwindigkeit auch eine Verkürzung der "wirksamen" Gerätelänge und damit eine kompaktere Bauweise der Geräte.

Unter Berücksichtigung der thermodynamischen Zusammenhänge lassen sich aus den Ergebnissen des meßtechnischen Gerätevergleiches folgende, allgemeine Anforderungen an die Auslegung eines mit Wasserdampf/Luft Gemischen arbeitenden Gerätekonzeptes ableiten:

- Ein angepaßtes Mischungsverhältnis im Bereich von mindestens 0,35 kg/kg
- Eine möglichst niedrige Lufttemperatur (etwas höher als die Taupunkttemperatur des gewählten Mischungsverhältnisses)
- Eine ausreichend hohe Strömungsgeschwindigkeit ($> 2,5$ m/s), um auch ein Anströmen der Pflanzen bei einer etwas rauheren Bodenoberfläche zu gewährleisten

Für die Erzeugung des Mischungsverhältnisses gibt es zwei gerätetechnische Ansätze:

Gerätekonzept 1 (direkt): Das Wasser wird direkt in einen durch Verbrennung erzeugten heißen Luftstrom eingesprüht. Die im Luftstrom enthaltene sensible Verbrennungswärme wird zum Teil in latente Wärme umgewandelt. Mischungsverhältnis, Temperatur und Strömungsgeschwindigkeit kann bei diesem gerätetechnischen Ansatz nicht unabhängig voneinander eingestellt werden. Das maximal mögliche Mischungsverhältnis wird bei diesem Gerätekonzept durch die Art des Brennstoffes definiert (Flüssiggas: $x_{\max} = \text{ca. } 2$ kg/kg). Die Gastemperatur nach Einstellung des Mischungsverhältnisses wird durch das gewählte Mischungsverhältnis und durch die Brennstoffart festgelegt. Aufgrund der thermodynamischen Zusammenhänge garantiert nur eine niedrige Gastemperatur eine geringe thermische Belastung der Kulturpflanze. Wird der Gasstrom auf einen Wert unter 100 °C abgekühlt, ergibt sich ein relativ hohes Mischungsverhältnis.

Gerätekonzept 2 (indirekt): Die Dampferzeugung erfolgt separat in einem Heizkessel. Die Einstellung des Mischungsverhältnisses erfolgt durch das Einblasen von Luft in den Dampfstrom. Um ein Auskondensieren von Wasser beim Einblasen der Luft mit Umgebungstemperatur zu vermeiden muß die Luft vorgeheizt werden. Aufgrund der geringen spez. Wärmekapazität von Luft ist der mit der Auskondensierung von Wasserdampf verbundenen Energieverlust vergleichsweise gering. So

könnte das Vorheizen der Luft eventuell entfallen. Bei diesem gerätetechnischen Ansatz können das Mischungsverhältnis, die Temperatur und die Strömungsgeschwindigkeit des Gases unabhängig voneinander eingestellt werden. Die Bereitstellung des Dampfes darf im Gegensatz zu den im Gartenbau verwendeten Dämpfkesseln keine langen Füll- und Aufheizzeiten erfordern. Nur so kann ein flexibler Einsatz dieser Gerätetechnik gewährleistet werden.

Die Art der Applikation des Wasserdampf/ Luft Gemisches hängt vom morphologischen Aufbau der Kulturpflanze ab:

Applikation 1 (Quer): Sind nur die in unmittelbarer Nähe des Bodens befindlichen Teile thermisch "tolerant", darf der Gasstrom auch nur in diesem Bereich die Pflanze umströmen. Der darüber befindliche Teil darf auf keinen Fall mit dem Wasserdampf/Luft Gemisch in Berührung kommen. In diesem Fall muß die Applikation des Wasserdampf/Luft Gemisches analog den offenen Stab-brennern (A, Kap. 2.2.2) über entsprechende Düsen quer zur Fahrtrichtung und in einem Winkel von ca. 45° zum Boden in die Reihe erfolgen. Die notwendige Behandlungsdauer wird in diesem Fall über eine ausreichende Länge der Applikationseinrichtung sichergestellt.

Applikation 2 (Längs): Die Taupunkttemperatur steigt mit zunehmender Lufttemperatur an. Da die Lufttemperatur an der Meßkörperoberfläche gleich der Meßkörpertemperatur ist, läßt sich aus der Temperatur des Schnittpunktes der Funktionen der aktuelle Wassergehalt im heißen Gasstrom auslesen. Führt eine thermische Behandlung der gesamten Kulturpflanze zu keinerlei Qualitätseinbußen beim Ernteprodukt, so vereinfacht sich die Applikationstechnik. In diesem Fall werden die Düsen unter einer langen und flachen Abdeckung gegen die Fahrtrichtung gerichtet (A, Kap.5.2, 6.2.1). Bei einem niedrigen Temperaturniveau des Gasstromes kann dafür eine temperaturbeständige Kunststoffplane, wie sie beim Dämpfen von Erde verwendet werden, eingesetzt werden. Es muß nur dafür gesorgt werden, daß der Dampf möglichst lange unter der Abdeckung bleibt. Dieselbe Applikationstechnik kann auch für die thermische Unkrautbekämpfung im Vorauflauf und zwischen den Reihen verwendet werden.

Der flächenbezogene Energieeinsatz hängt vom Gerätekonzept, Applikationstechnik, Unkrautbestand, Bodenparametern und von den Klimafaktoren ab. Es kann aber davon ausgegangen werden, daß er nicht höher als der flächenbezogene Energieeinsatzes optimierter Abflamngeräte ist.

Beide gerätetechnischen Ansätze sind auch für die Unkrautbekämpfung im Vorauflauf und zwischen den Reihen geeignet. Da für dieses Verfahren eine möglichst geringe "Selektivität" gefordert wird, ist für eine entsprechend lange Abdeckung und eine deutliche Erhöhung des Mischungsverhältnisses zu sorgen. Damit ergibt sich für die Unkrautbekämpfung mit Wasserdampf/Luft Gemischen ein