STUDIENARBEIT
an der
TECHNISCHEN UNIVERSITÄT BRAUNSCHWEIG
Institut für Landmaschinen

Abflammtechnik für das Vorauflaufverfahren

Grundlagen, Theorie und Messungen

Guntram Sauermann 1990

Mit 82 Abbildungen

Das Werk ist urheberrechtlich nicht geschützt. Die somit nicht begründeten Rechte, insbesondere die der Übersetzung, des Nachdrucks, der Entnahme von Abbildungen, der Funksendung, der Wiedergabe auf photomechanischem oder ähnlichem Wege und der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen, gehen, auch bei nur auszugsweiser Verwertung, in die Verantwortung der Leserin über. Die Vergütungsansprüche des § 54, Abs. 2 UrhG werden mit Sicherheit nicht wahrgenommen.

Der
Gärtnerei

Distel

ein
herzliches

Dankeschön!

0. Inhalt

0.1. Dank I
0.2. Inhaltsverzeichnis II
0.3. Gliederung IV

1. Einleitung

1.1. Mit Agrochemie zur Agroindustrie 1
1.2. Der ökologische Landbau 2

2. Landwirtschaftliche Grundlagen

2.1. Beikräuter und ihre Probleme 4
2.2. Regulierungsmaßnahmen im Verbund 5
2.3. Abflammgeräte im Überblick 8
2.4. Das Vorauflaufverfahren (Themeneingrenzung und Anforderungsliste) 12

3. Technische Grundlagen

3.1. Der Energieträger Flüssiggas 15
3.2. Verbrennung und Feuerung 19
3.3. Brennertechnik 24
3.4. Sicherheitstechnik 28

4. Rechenmodelle

4.1. Größenordnungen, Parameter und Einflüsse 31
4.2. Energiebilanz und Wirkungsgrad 36
4.3. Das Abflammgerät als Wärmetauscher 43
4.4. Strömungstechnische Betrachtung 47
4.5. Theorie zum Pflanzentod 51

5. Versuch zum Pflanzentod

5.1. Temperaturverlauf am Brenner 62
5.2. Versuchsaufbau 70
5.3. Versuchsdurchführung 75
5.4. Auswertung und Vergleich mit Rechenmodell 78

6. Erste Messungen am Gerät

6.1. Gerätebeschreibung 82
6.2. Meßaufbau und Verlauf der Messungen 84
6.3. Meßdiagramme 88
6.4. Auswertung 92

7. Veränderungen am Gerät

7.1. Rückgriff auf Rechenmodelle und Messungen 94
7.2. Isolation 97
7.3. Windschutz 100

8. Weitere Messungen am Gerät

8.1. Verlauf der Messungen 103
8.2. Meßdiagramme 104
8.3. Auswertung 108

9. Resümee und Ausblick

9.1. Biologische und technische Systeme - ein lösbarer Widerspruch? 111
9.2. Bemerkungen zur Meßtechnik 114
9.3. Zusammenfassung 116
9.4. Offene Fragen, ungelöste Aufgaben und die Zukunft der Abflammtechnik . 118

10. Anhang

10.1. Diagramme und Daten 120
10.2. Verwendete Zeichen 134
10.3. Kommentiertes Literaturverzeichnis 136
10.4. Nützliche Adressen 140
10.5. Bilanzen (Zeit, Geld, Energie) 143
10.6. Bewertung "Nicht-technischer Ziele" 145

0.3. Gliederung

Diese Gliederung der Studienarbeit soll der LeserIn die Möglichkeit geben, innerhalb kürzester Zeit einen Überblick über die bearbeiteten Fragestellungen zu bekommen. Dabei versuche ich möglichst die Verbindungen und Abhängigkeiten der einzelnen Kapitel untereinander darzustellen, und somit die strikte Reihenfolge, dem ein Inhaltsverzeichnis immer unterworfen ist, aufzubrechen.

In der **Einleitung** folge ich kurz der landwirtschaftlichen Entwicklung bis zu ihrem heutigen Spektrum an Technisierung, Computerisierung und Chemiesierung. Die sich daraus ergebenden Abhängigkeiten der ErzeugerInnen von landwirtschaftlichen Produkten sind dann die Ausgangssituation für den ölologischen Landbau. Die Lösungsvorschläge von dieser Seite werde ich kurz skizzieren.

Da ich bei der Einarbeitung in das Thema sehr schnell feststellen mußte, wie wenig ich als Maschinenbauer von der Landwirtschaft verstehe, halte ich es für dringend geboten einige **Landwirtschaftliche Grundlagen** zu erläutern. Zunächst gehe ich auf den Unterschied zwischen Unkräutern und Beikräutern ein und darauf, welche Regulierungsmethoden hier bekannt sind. Eine Methode ist nun das Abflammen, das ich anhand der verschiedenen erhältlichen Geräte einführen werde. Um einen abarbeitbaren Arbeitsumfang für die Studienarbeit zu bekommen, beschränke ich mich dann im folgenden auf das Abflammen im Vorauflaufverfahren.

Da es sehr schwierig ist zwei Kapitel parallel zu bearbeiten, folgen nun die **Technischen Grundlagen.** Da es sich um ein Verfahren dreht, das mit Hilfe einer offenen Propangasflamme den unerwünschten Pflanzen auf dem Acker zu Leibe rückt, ist es dringend notwendig, sich über den Verbrennungsvorgang und die verschieden Feuerungstechniken zu informieren. Die Frage "Was ist Flüssiggas und wie verhält es sich?" schließt sich sofort an. Ein Überblick über verschiedene Brennerbauarten und Anmerkungen zur Sicherheitstechnik im Umgang mit flüssiggasbetriebenen Arbeitsgeräten beenden das Kapitel.

Die Informationen aus den Grundlagen-Kapiteln ist der Ausgangspunkt für die einzelnen **Rechenmodelle**, die ich benuzt habe. Nachdem die Parameter am Gerät eingeführt sind, folgen die Energiebilanz und der Wirkungsgrad. Dadurch ist es möglich, sich eine Vorstellung von den Größenordnungen dieses Gerätes zu machen. Der Versuch, die Strömungen der Abgase und den Wärmeaustauschmechanismus mathematisch zu beschreiben, mündet in die grundlegende Fragestellung: "Wie lange muß die Pflanze einer bestimmten Umgebungstemperatur ausgesetzt sein, damit sie abstirbt?"

Die bereits angesprochene "grundlegende Fragestellung" konnte ich durch Literaturstudien nicht erschöpfend beantworten. Deshalb gibt es den **Versuch zum Pflanzentod**. Mit Hilfe eines einfachen Versuchsaufbaues komme ich der Antwort ein Stück weit näher.

Mit den **Ersten Messungen am Gerät** habe ich das Ziel verfolgt, das mir zur Verfügung stehende Gerät "thermisch" zu erfassen. Wie ich dabei vorgegangen bin und welche Ergebnisse sich eingestellt haben, ist Thema dieses Abschnitts.

Die Erkenntnisse aus den Messungen am Gerät und dem Versuch zum Pflanzentot führen nach einem Rückgriff auf die Rechenmodelle zu den **Veränderungen am Gerät**. Isolation und Maßnahmen zum Windschutz der Flamme stehen hier im Vordergrund.

Mit **Weiteren Messungen am Gerät** dokumentiere ich die thermischen Auswirkungen der Veränderungen.

Resumee und Ausblick öffnen wieder den Blick für den größeren Zusammenhang. Die alte Frage, ob sich technische und biologische Systeme so zusammenfügen lassen, daß die Auswirkungen erträglich bleiben, werde auch ich nicht erschöpfend beantworten. Allerdings will ich ein paar Anstöße dazu geben. Bemerkungen zur Meßtechnik scheinen mir besonders wichtig, da sie doch einen entscheidenden Grundpfeiler dieser Studienarbeit darstellt. Die Zusammenfassung stellt die Ausgangsfragen und die Ergebnisse nochmals direkt nebeneinander. Im letzten Abschnitt beschäftige ich mich dann damit, all das anzusprechen, was ich nicht erschöpfend bearbeiten konnte. Die neu entstandenen Fragen und ein vorsichtiger Blick in die Zukunft der Abflammtechnik.

Neben den unvermeidlichen Datenbergen findet sich im **Anhang** ein kommentiertes Literaturverzeichnis, das NeueinsteigerInnen hoffentlich von Nutzen ist. Meine eigenen Bilanzen der Studienarbeit beziehen sich in erster Linie auf die eingesetzte Zeit, aber auch auf Geld und Energie. Was ich unter "Nicht-technischen Zielen" verstehe, möge jede LeserIn selbst nachblättern.

Ich wünsche viel Spaß und die nötige Geduld beim Lesen!

1. Einleitung

1.1. Mit Agrochemie zur Agroindustrie

Ein kurzes Aufblinken im Pressespiegel scheint der einzig wahrnehmbare Effekt gewesen zu sein, als vor genau einem Jahr die EG-Richtlinie in Kraft trat, die die Höchstwerte für Biozide im Trinkwasser festlegt [27].

Ungefähr ein Zehntel der Wasserwerke konnte diese Qualität nicht sicherstellen und arbeitet seither mit Ausnahmegenehmigungen. Die Tendenz der Verseuchung ist allerdings steigend, denn die Gifte sind jahrzehntelang im Boden unterwegs bis wir sie als bunten Cocktail im Trinkwasser auffinden.

Zweifelsohne sind als Hauptverursacher die landwirtschaftlichen Betriebe auszumachen. Gibt es denn eine paradoxere Situation? Gerade die Produktionsstätten, die Nahrung für die Bevölkerung erzeugen, beteiligen sich an der schleichenden Vergiftung des Trinkwassers und der eigenen Produktionsgrundlage, dem Boden.

Mit einer simplen Schuldzuweisung ist es allerdings nicht getan, schon gar nicht aus dem geheizten Zimmer heraus. Wie also kommt es zu dieser Situation?

Wenn ich die Entwicklung der Landwirtschaft in diesem Jahrhundert betrachte, so fällt am meisten auf, daß die Zahl der in der Landwirtschaft arbeitenden Menschen stark abgenommen hat. Mit Hilfe von ausgefeilten Techniken, dem Einsatz von Düngemitteln und synthetischen Giften ist jedoch die Produktmenge im ganzen kräftig angewachsen. Der Wirtschaftsmensch nennt das Produktivitätssteigerung und ist glücklich. Und das ist auch schon des Pudels Kern. Die Produktivität hat sich zum alleinigen Kriterium entwickelt, ob ein Verfahren oder eine Anbaumethode sinnvoll ist. Damit fällt alles andere unter den Tisch. Abhängigkeiten der Bauern von der Großindustrie, katastrofaler Preisverfall, weiterer Arbeitsplatzabbau, Monopolisierung, Vergiftung von Bauer und Bäuerin, negative Energiebilanz, alarmierender Artenverfall, rote Listen für Flora und Fauna, ... die Liste läßt sich beliebig verlängern.

Mit einem Wort beschrieben klingt das so: Agroindustrie

In einer Industriegesellschaft wird auch die Landwirtschaft vereinnahmt, muß auch sie sich in die "gottgegebenen" Mechanismen der Wirtschaftseliten einfügen.

Gerade der Bauernstand ist weltweit vertreten. Die Konsequenz ist, daß die Bauern hier mit den Bauern weltweit konkurrieren müssen. Mit Billigstpreisen und Anbaumethoden, die kein Pardon kennen. Dritte Welt hautnah mitten unter uns.

So linear und kurzfristig die Agroindustrie auch denkt, sie wird noch genug anrichten bevor sie abgelöst wird, denn das Versprechen, alle Probleme technisch zu lösen ist nach wie vor sehr verlockend.

1.2. Der ökologische Landbau

Technisch sind die Probleme der Landwirtschaft sicherlich nicht zu lösen. Auch die besten satellitengesteuerten Vollerntemaschienen werden die Schraube nach unten nicht stoppen, sondern lediglich noch beschleunigen.

Was dann?

Noch einmal ein Blick in die Geschichte. Als zu Beginn des Jahrhunderts der Einsatz von synthetischen Stoffen in der Landwirtschaft zu boomen begann, entstanden sofort Bewegungen, die die Gefahren erkannten. Die Zerstörung der ländlichen Struktur, die erbarmungslose Abhängigkeit von Zulieferern und Abnahmeinstitutionen wurde bereits erahnt. Heute kommt auf Grund der hochwertigen Analytik auch noch die Vergiftung als schlagendes Argument hinzu. Unter der Sammelbezeichnung "ökologischer Landbau" finden sich die verschiedensten Gruppen, deren mitgliederstärkste Organisationen biologisch-dynamisch oder organisch-biologisch produzieren. Der jeweilige Vertriebs- und Markenname lautet DEMETER und BIOLAND.

Wo liegt der Unterschied zur Agroindustrie?

Er liegt im Weltbild. Das Weltverständnis des ökologischen Landbaus stützt sich auf biologische Systeme. Boden, Pflanzen, Tier und der Mensch bewegen sich in denselben Grenzen und sind aufeinander angewiesen. Alle Ausgangsstoffe sind gleichzeitig die neuen Eingangsstoffe. Eine einzelne Zielgröße existiert nicht. Vielmehr handelt es sich um sensible Gleichgewichtsbedingungen, in die der Mensch deshalb nur behutsam und vorsichtig steuernd eingreifen darf [29].

Das drückt sich durch kleinräumige Bewirtschaftung aus, durch Ökologie vor kurzlebiger Ökonomie, durch eigene Vermarktung der Produkte, durch Information und Kontakt zu EndverbraucherIn, ...

Der Unterschied liegt nicht im Einsatz von Technik. Die Bedeutung von technischen Geräten für die Landwirtschaft wird keinesfalls in Frage gestellt. Allerdings geht es um die Art der Technik und ihre Anwendung. Ist sie dazu ausgelegt, die ProduzentIn in Ihrer Arbeit zu unterstützen oder diktiert die Maschine den weiteren Arbeitstakt? Erhöht sich neben der Produktivität nicht unverhältnismäßig der Energieeinsatz? Wächst die Abhängigkeit von Geldgebern und Technikspezialisten?

Die englischen Begriffe "intermediate technology" und "appropriate technology" [28] versuchen all das zu fassen. Eine Technik, die sozial verträglich, die ökologisch vertretbar ist, die den lokalen Gegebenheiten entspricht.

Und auf diesem Gebiet stecken wir leider noch in den Kinderschuhen. Obwohl die Zeichen schon lange Zeit auf Sturm stehen, ist die Reaktion äußerst zaghaft. Kaum ein technisches Institut beschäftigt sich mit "neuer" Technik, die den "neuen" sozialen Strukturen angemessen ist. Der Mut, den Schritt über die eigenen Fachgrenzen zu wagen, ist noch immer viel zu klein. Merkwürdig, daß auf anderen technischen Gebieten, wie z.B. der Rüstung oder atomaren Energieversorgung, die abenteuerlichsten Ideen gewagt und verfolgt werden. Warun nicht einmal in eine andere Richtung schwenken, sich auf das Naheliegendste stürzen.

In diesem Sinn sehe ich meine Aufgaben als Technikus als Teil einer gesamten Umwälzung der Sozialstrukturen und der damit einhergehenden Werte. Die Technik ist sicherlich nicht die Lösung, aber sie kann eine Lösungsfindung mit unterstützen.

Ob die Abflammtechnik hier einen Beitrag leisten kann, wird sich wohl in nächster Zukunft erweisen.

2. Landwirtschaftliche Grundlagen

2.1. Beikräuter und ihre Probleme [1]

Das Wort "Unkraut" ist weit verbreitet und leuchtet selbst dem noch ein, der Petersilie und Schnittlauch im Blumenkasten auf der Fensterbank sprießen läßt. Hier handelt es sich eindeutig um Pflanzen, die an einer Stelle wachsen, an der sie nicht wachsen sollen. Sie treten in Konkurrenz zur gehegten und gepflegten Kulturpflanze, um derenwegen der ganze Aufwand betrieben wird. Um die Produktion zu maximieren, muß dem Unkraut der Kampf angesagt werden, Vernichtung steht auf dem Programm. Als Ziel steht der artenreine, saubere Acker vor Augen, dessen Bestellung und Ernte vollkommen unproblematisch ablaufen.

Seit einiger Zeit machen jedoch Beikräuter und Wildkräuter dem Unkraut den Lebensraum streitig. Doch welchen Sinn macht es, neue Begriffe zu prägen, um die gleichen Pflanzen beschreiben?

Durch die Wortwahl soll ausgedrückt werden, daß diese Pflanzen mehr sind als nur am falschen Platz. Aus ökologischer Sicht gesehen erfüllen die wilden Beikräuter eine ganze Reihe von wichtigen Funktionen:

- Durch die Vielfalt der Kräuter auf dem Acker neben der Kulturpflanze entsteht eine Pflanzengemeinschaft, die ein ökologisch stabiles und somit gesundes System bildet.
- Die Fähigkeit, den Boden schnell zu bedecken, schüzt z.B. nach der Ernte vor Erosion und Vertrocknung des Bodens.
- Die Blütenpollen sind vielfach Grundnahrung für Insekten, speziell der Bienen, deren Produkt Honig wir nur allzugern genießen.
- Einige Beikräuter sind in der Lage, den Boden und die darin enthaltenen Nährstoffe so aufzuschließen, daß auch die Kulturpflanzen diese Quellen nutzen können.
- Beikräuter sind oft extreme Spezialisten und können somit als Zeigerpflanzen fungieren. Huflattich weist auf stauende Nässe im Boden hin, die Brennessel dagegen bevorzugt sehr stickstoffhaltige Böden. Echte Kamille ist nur da zu finden, wo die Bodengare wenig fortgeschritten ist.

Aus diesen Beispielen ist zu ersehen, daß es heute die dringlichste Aufgabe ist, die Bedeutung der Beikräuter im Kreislaufsystem der Landwirtschaft zu erkennen. Inzwischen sind bereits viele Beikräuter ausgerottet oder sind vom Aussterben bedroht. Die Auswirkungen auf das Gleichgewicht des Öko-Systems sind schon jetzt äußerst bedenklich.

Natürlich sind auch die Beikräuter auf den ersten Blick Konkurrenten für die Kulturpflanze, aber die Maßnahme heißt nun Regulierung und lernen, Kompromisse einzugehen.

2.2. Regulierungsmaßnahmen im Verbund

Wenn nun von Regulierung die Rede ist, so umfaßt das immer eine ganze Reihe von Maßnahmen, die gut aufeinander abgestimmt sein müssen.

Eine Voraussetzung dafür ist die biologisch-ökologische Kenntnis über das Wachstumsverhalten der Beikräuter. Handelt es sich um Samenbeikräuter oder Wurzelbeikräuter? Das ist wichtig für die Wahl der späteren Maßnahmen. Denn z.B. durch das Zerschneiden von Wurzelbeikräutern und dem gleichzeitigen Bodenlockern durch Grubberschare vermehren sich die Kräuter. Ein rechtzeitiges Abschneiden von Samenbeikräutern dagegen verhindert deren Aussaat und somit die Verschleppung ins nächste Jahr.

Der Keimzeitpunkt der Beikräuter ist von Bedeutung, denn in diesem Stadium sind Pflanzen besonders empfindlich und somit auch leicht zu schädigen.

Vorbeugende Maßnahmen sind immer allen anderen vorzuziehen. Dazu gehören ein gesunder Boden und die richtige Fruchtfolge. Auf diese Weise läßt sich auch an die hartknäckigen und sonst nur schwer zugänglichen Wurzelunkräuter herankommen.

Nachdem der Aufwand für die Regulierung mit dem dabei zu erwartenden Nutzen abgewogen ist, erfolgen die direkten Maßnahmen, fast immer in Form des Maschineneinsatzes.

Drei Bausteine sind jedoch für die erfolgreiche Regulierung auch hier erforderlich:

Viel Geduld - Wissen und Erfahrung - richtige Maschine

Eine einzelne Voraussetzung, nur ein Teil also, wird keinen Erfolg bescheren. Die richtige Maschine wird schnell zur falschen Maschine, wenn sie zur falschen Zeit eingesetzt wird. Dann entsteht mehr Schaden als Nutzen.

Im Laufe der Jahre ist eine kaum zu übersehende Vielzahl an Maschinen entwickelt worden, die sich für die Beikrautregulierung eignen. Je nachdem, ob die Kulturpflanzen in einer Reihe stehen oder nicht, zu welchem Zeitpunkt sie eine Bearbeitung verkraften können, usw. ist der Einsatz eines speziellen Geräts erforderlich.

Um einen ersten Überblick und Einblick zu erlangen habe ich die folgende Systematik entwickelt [27].

• Zunächst finden sich links verschiedenste *Verfahren* um Pflanzen (=Beikräuter) zu schädigen, bzw. abzutöten. Soweit sinnvoll habe ich diese in weitere Untergruppen unterteilt. Eine Pflanze kann durch *unterirdische* oder *oberirdische* Geräteeinwirkung *zerkleinert* werden. Die bezweckte Folge dabei ist, daß die Pflanze *stirbt.*

• Die einzelnen Verfahren können von verschiedenen *Geräten* verwirklicht werden. Dabei erfüllen manche Geräte auch mehrere Einzelverfahren. Ein *Hackgerät zerkleinert* durch die Schar, *legt* die Pflanze durch *Herausziehen* aus dem Boden *frei, verschüttet* andere oder *gräbt* sie ein.

• Auf der X-Achse habe ich die Wachstumsstadien von *Beikraut* (durch Dreieck gekennzeichnet) und *Kulturpflanze* (durch Ellipse gekennzeichnet) innerhalb eines Jahreszyklus angedeutet. Durch die Zuordnung von Geräten und Wachstumsstadium ergibt sich damit ein für das Gerät spezifischer Einsatz- und Wirkzeitraum, der hier schraffiert eingezeichnet ist.

Beispiel: Der *Hackstriegel* zieht die Pflanze aus dem Boden. Eingesetzt wird er kurz vor der *Saat* der Kulturpflanze bis kurz vor deren *Auflaufen.* Danach darf sie auf keinen Fall verletzt werden. In einem späteren Stadium ist die Pflanze widerstandfähig genug zum wiederholten Striegeln. Ab einer bestimmten Höhe leidet sie jedoch unter dem Rahmen des Striegels. Nach der *Ernte* und der *Bodenbearbeitung* kann das gerade aufgelaufene Kraut weggestriegelt werden.

2 weitere Ziele habe ich mit dieser Systematik verfolgt:

• Verfahrenslöcher entdecken! D.h. eine Überprüfung durchzuführen, ob nicht noch vollkommen neue oder abgewandelte Verfahren zur Regulierung eingesetzt werden können. Wenn es *Verletzungsmöglichkeiten* durch *thermische* Hitzeeinwirkung mit dem *Abflammgerät* gibt, wieso dann bitte kein *Einfriergerät*? Lassen sich Pflanzen auch zerreiben oder wegblasen?

• Geräte optimieren, d.h. nur durch eine möglichst exakte Beschreibung der Verfahren (≙ was das Gerät eigentlich macht), läßt sich der gewünschte Effekt gezielt weiterentwickeln. Wenn das Gerät tatsächlich schneiden soll, dann müssen auch entsprechend scharfe Schneiden zur Verfügung stehen.

Dieser erste Versuch einer Systematik ist mit Sicherheit noch deutlich zu verbessern. Allein die Vielfalt der verschiedenen Kulturpflanzen und ihrer begleitenden Beikraüter machen eine daraufhin ausgelegte Verfeinerung sicherlich notwendig. Hier ist das Ziel, zunächst die prinzipiellen Möglichkeiten aufzuzeigen, die in solch einer Systematik liegen.

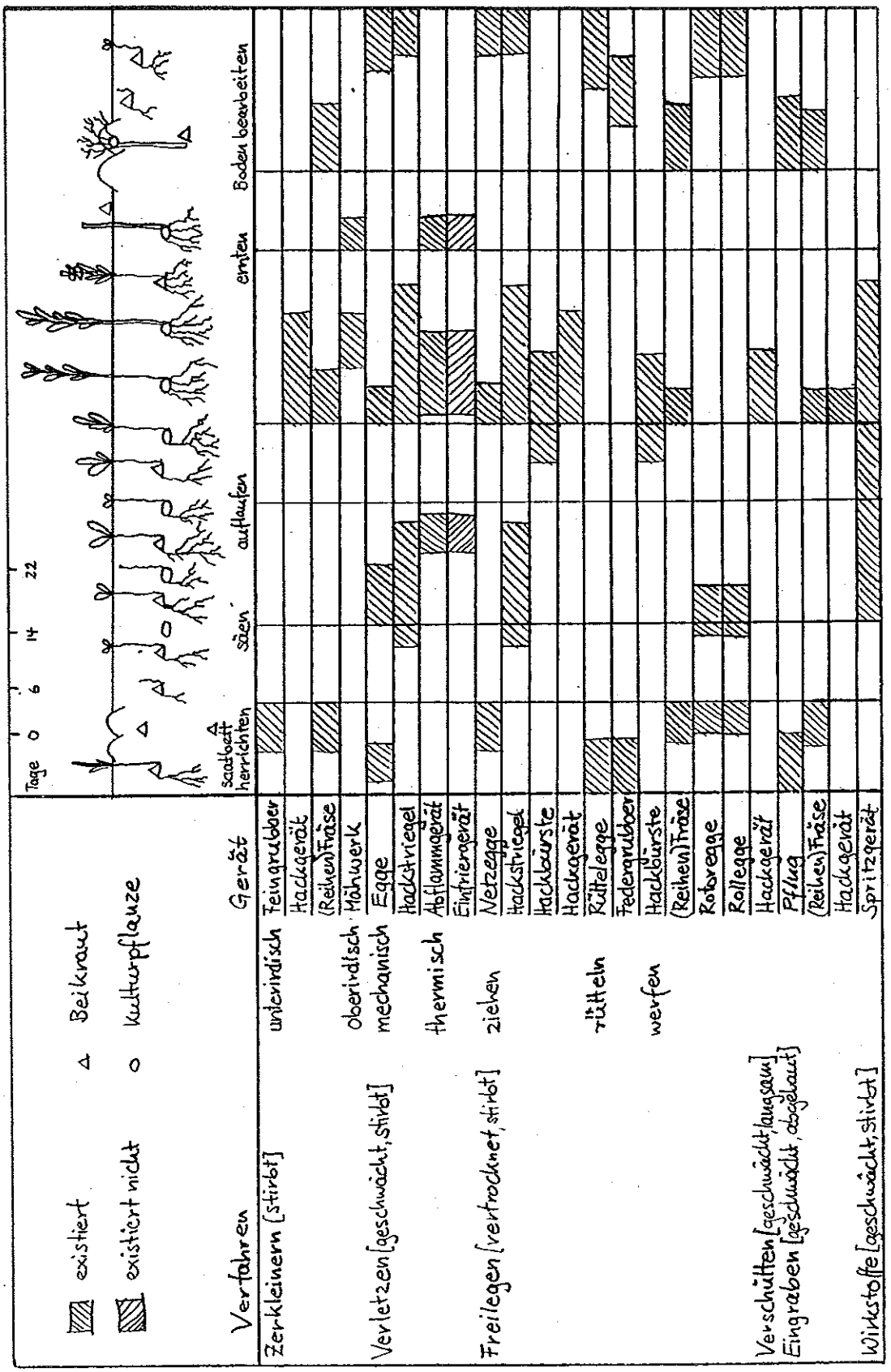


Bild 2 - 1: Technische Verfahren der Beikrautregulierung [27, S. 8]

2.3. Abflammgeräte im Überblick

Unter Abflammgeräten werden zur Zeit all die Geräte zusammengefaßt, die ausgelegt sind, den Beikräutern durch Hitze den Garaus zu machen. Im Unterschied zur "mechanischen Regulierung" wird hier von "thermischer Regulierung" gesprochen.

Zunächst zu den biologischen Wirkungsweisen dieser Geräte [8 S.11]:

Ob mensch ein Ei hartkocht oder Gemüse blanchiert, der Haupteffekt, der hier zugrunde liegt, ist derselbe: die verschiedenen Eiweiße, die wichtiger Bestandteil lebendiger Zellen und Systeme sind, verändern sich durch die Energieeinwirkung. Sie denaturieren wenn in der Pflanze 40°-60°C herrschen [12, S. 547] und können ihre Funktionen nicht mehr erfüllen, der Organismus stirbt. Außerdem gibt es Vermutungen, daß die zerstörten Eiweiße in Folge als Zellgift wirken und dadurch den Pflanzenorganismus zusätzlich schädigen. Bei sehr schneller und heftiger Erwärmung auf Temperaturen um 100°C (in der Pflanze) führt die Ausdehnung und das Verdampfen der Zellflüssigkeit zum Platzen und Absterben der Pflanzenzelle.

Auf jeden Fall muß die Pflanze so stark geschädigt werden, daß sie sich nicht mehr ernähren kann und durch fortlaufende Verdunstung innerhalb von zwei bis drei Tagen austrocknet.

Bei der Abflammung wird das Beikraut also nicht verbrannt (Abbrennen), sondern erscheint unmittelbar nach der Wärmeeinwirkung äußerlich unbeschädigt. Vielfach beobachtet man nur, daß die Blätter - bedingt durch die zerrissenen Zellstrukturen - im Vergleich zu unbehandelten Pflanzen welker aussehen.

Als Sofort-Kontrolle bietet sich die sogenannte "Fingerdruckprobe" an [8 S.16]. Preßt mensch mit leichtem Druck ein Blatt zwischen Daumen und Zeigefinger, so deutet eine bleibende dunkelgrüne Druckstelle eine ausreichende Zellstrukturzerstörung an. Diese Kontrolle ist leicht durchzuführen, erfordert aber auch reichlich Erfahrung, denn so eindeutig, wie mensch sich das vorstellt, ist der Befund dann doch nicht immer. Allerdings gibt es bis heute keine andere Methode der Sofort-Kontrolle.

Die thermodynamische Fragestellung nach den Temperaturen um und in der Pflanze werde ich in den Kapiteln *4.5. Theorie zum Pflanzentod* und *5. Versuch zum Pflanzentod* aufgreifen und näher beleuchten.

Welche Geräteausführungen gibt es?

Als Strukturierungsmerkmale bieten sich eine Reihe von grundsätzlichen Unterschieden an.

- Energieübertragung

Um die Todesration an Energie in die Pflanze zu übertragen, gibt es zwei Möglichkeiten:

Entweder durch Strahlung (Infrarotstrahlung), die von einem heißen Körper ausgeht und die dazwischenbefindliche Luft so gut wie nicht erwärmt. Die winterliche Sonne oder die sommerliche Grillpartyglut sind bekannte Beispiele dafür. Nachteilig wirkt sich aus, daß es Schattenzonen gibt, die nicht erfaßt werden, und daß der strahlende Körper zuerst einmal aufgeheizt werden muß. HOFFMANN spricht hier von indirekter Abflammung.

Oder durch Konvektion, bei der ein vorbeiströmendes heißes Gas Energie durch Wärmeübertragung an die Pflanze abgibt. Das heiße Gas ergibt sich als Abgas bei der Verbrennung von z.B. Propan und Luft. Hoffmann spricht hier von direkter Abflammung.

- Energiebereitstellung

Die nötige Energie wird heute ausschließlich durch den Energieträger Flüssiggas bereitgestellt. Unterschiede gibt es hier allerdings in Bezug auf den Verdampfungsort des Flüssiggases. Sowohl die Verdampfung in der Flasche mit dem resultiernden "Betrieb aus der Gasphase", als auch die Verdampfung direkt am Brenner, dem "Betrieb aus der Flüssigphase", sind je nach Gerät gebräuchliche Bauformen.

- Einsatzgebiete

Von der Bauform unterscheiden sich spezielle Geräte für das Vorauflaufverfahren bereits sehr deutlich von allen anderen. Der Versuch, die Energieträger möglichst lange am Boden zu halten, führt zu langen Schutzabdeckungen, die sich über die gesamte Beetbreite erstrecken.

Soll dagegen zwischen den Reihen gearbeitet werden, so ist meistens eine verstellbare Parallelogrammführung anzutreffen, die sich auf das jeweilige Einsatzgebiet anpassen läßt.

Um auch selektiv in der Reihe arbeiten zu können ist ein erhöhter Aufwand für die Erkennung der Kulturpflanze und das schnelle Kurzzeitabflammen von Nöten, der sich im Geräteaufbau wiederspiegelt.

Kombigeräte, die möglichst viele Funktionen erfüllen können, und Bodenentseuchungsgeräte sind weitere Bauformen.

- Bedienungsart

Die kleinsten Abflammgeräte bestehen aus der Flüssiggasflasche mit daran angeschlossenem Brenner und werden per Hand über den Boden geführt. Von kleinen Führungsrädern, über schubkarrenartige Gefährte spannt sich dann der Bogen bis zum Schlepperanbaugerät. Je größer die Bauform, desto eher sind auch weitere Bauelemente zur automatischen Zündung, Flammüberwachung, Flaschentemperierung usw. anzutreffen.

Die folgenden drei Bilder stellen eine kleine Auswahl an ausgeführten Geräten dar.

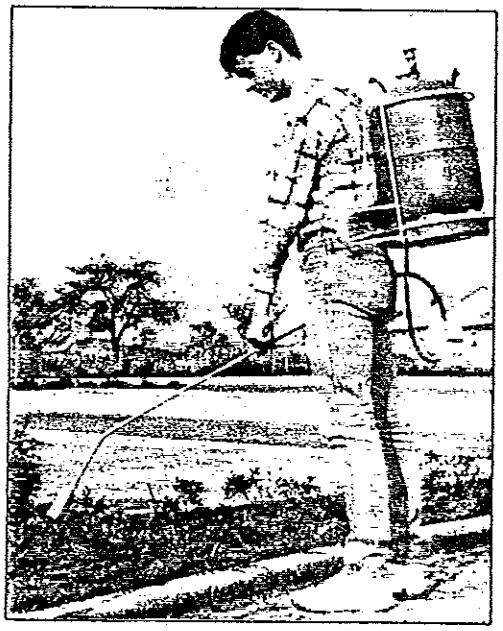


Bild 2 - 2: Handgeführtes Rückentragegerät mit Gasphasenentnahme.
Einfacher, robuster Aufbau mit Handregelventil und Stabbrenner.
Einsatz an schwer zugänglichen oder kleinen Flächen,
z.B. Gewächshaus, und bei nassem Acker, der keinen Maschineneinsatz mehr zuläßt (≙ Notmaßnahme). (Bild: Reinert) [8, S. 45]

Für weitere Informationen zu diesem Themenkomplex und auch der Geschichte des Abflammens ist es empfehlenswert in HOFFMANNs Buch "Abflammtechnik" [8] nachzublättern. Darin ist auch ein sehr ausführliches Kapitel über den Einsatz in den verschiedensten Kulturen enthalten, ein Thema, das ich als Maschinenbauer in dieser Studienarbeit getrost aussparen werde.

Bild 2-3: Prototyp eines Abflammgerätes des Gartenbauamtes Berlin Tiergarten.
Schubkarren mit Warmwasserbad und Stabbrennern.
Einsatz in der kommunalen Wege- und Sportanlagenpflege. [8, S. 84]

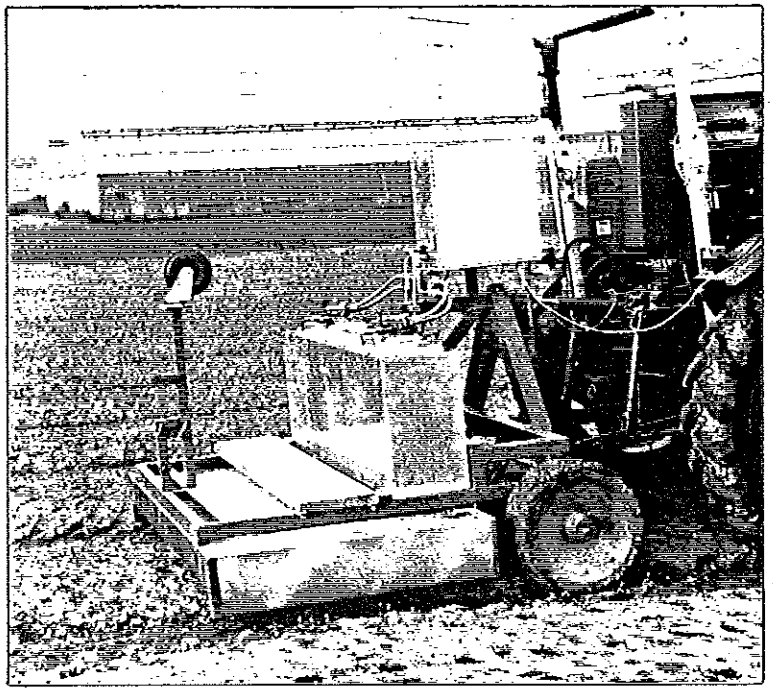


Bild 2 - 4: Heckanbaugerät für das Vorauflaufverfahren.
Ausgereiftes Modell mit elektrischer Zündung und Flammüberwachung, isolierte Abdeckhaube und Warmwasserbad. [25]

2.4. Das Vorauflaufverfahren (Themeneingrenzung und Anforderungsliste)

DieTasache, daß ich bei der Palette der Abflammethoden und Abflammgeräte ausgerechnet beim Vorauflaufverfahren gelandet bin, hat einen Grund. Die Bioland-Gärtnerei "Distel" im Kaiserstuhl, bei der ich den praktischen Teil meiner Studienarbeit durchgeführt habe, verfügt über ein Vorauflaufgerät. Im gegenseitigen Einvernehmen hatten wir uns darauf geeinigt, daß ich daher an und mit diesem vorhandenen Gerät arbeiten werde.

Doch was bedeutet eigentlich Vorauflaufverfahren?

Eine vereinfachte Darstellung der zeitlichen Wachstumsabläufe auf dem Acker habe ich bereits im Kapitel *2.3. Regulierungsmaßnahmen im Verbund* vorgestellt. Ich greife sie jetzt noch einmal auf.

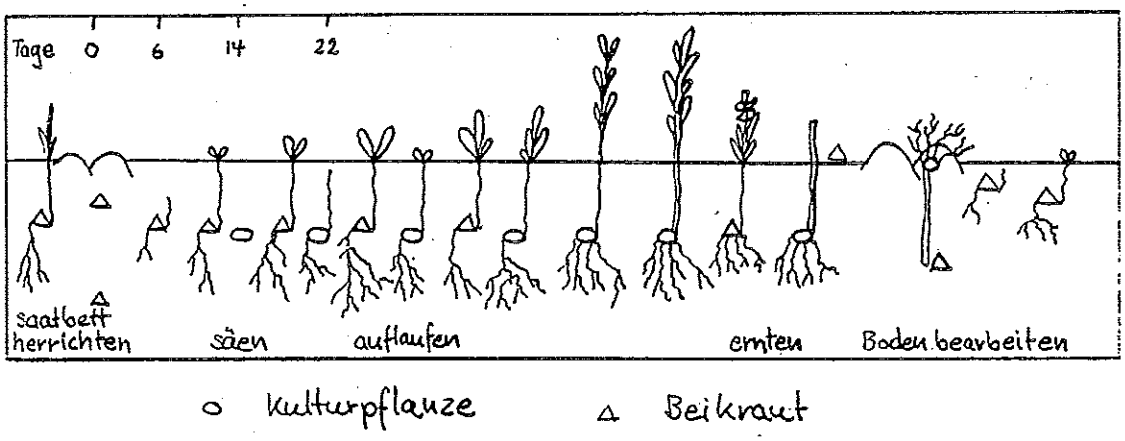


Bild 2 - 5: Pflanzenwachstum in einem Jahr

Zunächst ein Blick auf das Beikraut, das in der Darstellung durch einen dreieckigen Samen kenntlich gemacht ist:

Das Herrichten des Saatbetts erfolgt z.B. durch Pflügen, Eggen und Walzen. Die auf dem Acker stehenden Beikräuter werden dadurch ausgerissen oder verschüttet. Gleichzeitig werden Samen, die sich im Boden befinden, zum Keimen angeregt.

Nun kommt die Kulturpflanze ins Spiel, dargestellt durch den runden Samen. Nach der Saat bemüht sich der Keimling möglichst rasch die Bodenoberfläche zu durchbrechen, um sich die weiteren Wachstumskräfte von der Sonne abzufangen. Dieses erste Spitzen der Keimlinge wird auch "Auflaufen" genannt. Die Saat ist damit aufgelaufen. Je nach dem, ob das Säen direkt nach der Saatbettbereitung erfolgt ist und wie lange die Kulturpflanze zum Auflaufen benötigt, hat das Beikraut bereits einen erheblichen Wachstumsvorsprung. In den weiteren Tagen bedeckt das Beikraut immer mehr Fläche und verdrängt die Kulturpflanze. Im schlimmsten Fall bedeutet das den Verlust der Ernte.

Hält mensch sich nun vor Augen, daß eine Propangasflamme oder die Hitzestrahlung eines Infrarotgitters nicht weiß, wer Freund oder Feind ist, sprich: nicht zwischen Beikrautkeimling und Kulturpflanzenkeimling unterscheiden kann, so gibt es nur einen sinnvollen Einsatzzeitpunkt des Abflammgeräts: Vor dem Auflaufen der Kulturpflanze, also das "Vorauflaufverfahren". Dabei ist anzumerken, daß die Keimlinge kleiner als 5 cm sind und ihre Masse 50 g pro m^2 nicht übersteigt.

Die Hitzewirkung darf ausschließlich die Beikräuter treffen, denn sonst ist es notwendig, erneut auszusäen. Ist der Zeitpunkt gut abgepaßt und das Abflammen richtig ausgeführt, sterben die Beikräuter ab, und die Kulturpflanze erhält ihrerseits einen Wachstumsvorsprung vor der nächsten Beikrautgeneration.

Vorauflauf hat damit den Vorteil, nicht selektiv arbeiten zu müssen. Die gesamte Fläche kann und muß bearbeitet werden. Dagegen muß der Abflammzeitpunkt sinnvoll gewählt werden. Natürlich weiß die erfahrene BäuerIn oder GärtnerIn, wann die Saat auflaufen wird. Das Abflammen so kurz davor wie möglich ist natürlich optimal. Allerdings muß immer bedacht werden, daß durch Regen der Acker nicht befahrbar und somit abflammbar ist. Da ein halber Tag nach dem Auflaufen bereits das Aus bedeutet, ist es manchmal sinnvoll, zwei oder mehrere Abflammarbeitsgänge durchzuführen, um erfolgreich zu sein. Diese Überlegungen sind jedoch einzig von der Konstellation des Ackers, von den gewählten Arbeitsgängen, von den Kulturpflanzen und der Risikobereitschaft abhängig. Das verwendete Abflammgerät bleibt das gleiche.

Obwohl das Kapitel *3. Technische Grundlagen* zunächst für alle Abflammgeräte gültig ist, beschränke ich mich ab jetzt auf die Technik der Vorauflaufgeräte. Sie bilden einen eigenständigen Bereich, der in einer Studienarbeit abzudecken ist. Des weiteren beschränke ich mich auf Geräte mit offener Flamme, die aus der Gasphase arbeiten, da ich ein solches zur Verfügung hatte. Obwohl ich auch mit Handgeräten gearbeitet habe, werde ich in erster Linie auf die Schlepperanbaugeräte eingehen. Eine genaue technische Beschreibung "meines Gerätes" findet sich im Kapitel *6.1. Gerätebeschreibung.*

Nach einer ersten Einarbeitung in das Thema "Abflammen im Vorauflaufverfahren" habe ich zusammen mit Mitarbeitern der Gärtnerei eine Anforderungsliste erstellt, die zum Ausdruck bringt, welche Fragestellungen ich im weiteren bearbeiten würde. Zu diesem Zeitpunkt war noch nicht klar, welche Veränderungen am bestehenden Gerät sinnvoll und notwendig sein würden. Auch war es in der mir zur Verfügung stehenden Zeit nicht möglich, alle Punkte zur vollen Zufriedenheit zu bearbeiten.

Das Gerät soll folgenden Kriterien und Anforderungen genügen [5]:

Festforderungen:

- Arbeitsgeschwindigkeit 4 Km/h
- Funktion durch einmaliges Abflammen gewährleistet
- Dabei 98% der Beikräuter abgetötet
- Vorauflaufverfahren auf Beetbreite
- Maximalanbaulänge (Wendefähigkeit) 1,2 m
- Zuverlässige Zündeinrichtung

Mindestforderungen:

- Sicherheitskonzept (Idiotensicher)
- Arbeitslänge pro Einsatz bis zu 10 Beeten à 100 m
- Flächentoleranz des gewalzten Beetes 5 ± 2 cm
- Windstabilität
- Keine erhöhte Schlepperbelastung

Wünsche:

- Gasverbrauch reduzieren (CO_2- Problematik, Klima)
- Spar- oder Stoppflamme

Einige der genannten Punkte sind sicherlich erst verständlich, wenn mensch mehr über das Abflammen erfahren hat. Es ist deshalb sinnvoll, die Anforderungen im Hinterkopf zu behalten bis sie im entsprechenden Kapitel auftauchen, oder bisweilen zurückzublättern.

3. Technische Grundlagen

3.1. Der Energieträger Flüssiggas

Wieso sich Flüssiggas als Energieträger für Abflammgeräte durchgesetzt hat, zeigt BOLDT [10] an folgenden Vorteilen auf:

- Verflüssigung bei geringem Druck, wodurch sich das Volumen auf ca. 1/260 verkleinert wird
- dadurch sind ausreichende Gasmengen in relativ kleinen Behältern verfügbar
- bei unveränderter (Normal-) Temperatur herrscht konstanter Druck, bis der letzte Tropfen verdampft ist
- durch wiegen der Behälter ist der Verbrauch leicht feststellbar
- so gut wie keine Explosionsgefahr
- sehr saubere, rauch- und geruchslose Verbrennung
- ungiftig, nicht wassergefährdend und somit umweltfreundlich
- der Bezug von Flüssiggas ist durch ein gut ausgebautes Handelsnetz stets gewährleistet

Da ich im Kapitel *4. Rechenmodelle* mehr über die physikalischen und brenntechnischen Eigenschaften von Flüssiggas wissen muß, um mit ihnen zu rechnen zu können, ist hier der Platz für eine ausführliche Betrachtung dieses Energieträgers [15, 16].

Unter dem Begriff "Flüssiggas" werden Propan (C_3H_8), Butan (C_4H_{10}) und deren Gemische zusammengefaßt.

Diese einfach strukturierten Kohlenwasserstoffe sind unter normalen atmosphärischen Bedingungen gasförmig. Wie jedes andere Gas läßt sich auch Flüssiggas (unterhalb der kritischen Temperatur) durch Druckerhöhung und/oder Temperatursenkung verflüssigen. Da die Verflüssigung bereits in Temperatur- und Druckbereichen einsetzt, die sehr nahe am Normzustand liegen, kommt es zu dem eigenwilligen Namen Flüssiggas.

Genauen Aufschluß über den Zusammenhang zwischen Temperatur und Druck gibt die Dampfdruckkurve.

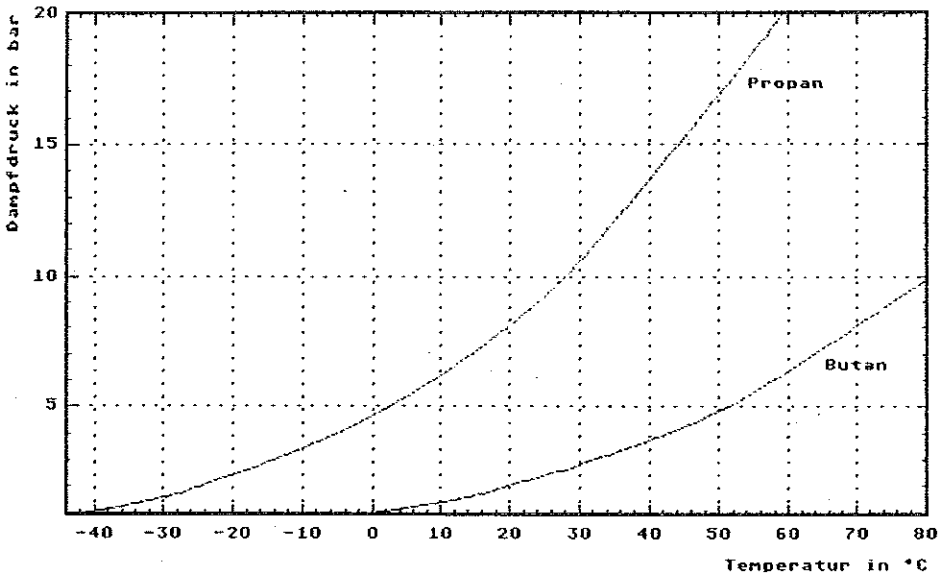


Bild 3 - 1: Dampfdruckkurve für Propan und Butan [15, S. 7]

Die Kurve gilt für den Fall, daß sich in einem Behälter Propan (oder Butan) sowohl als Flüssigkeit, als auch als Gas befindet. Dieser Zustand heißt Siedezustand und gilt für abgefüllte Flaschen, außer sie sind überfüllt oder leer. Es existiert dann für jede Temperatur genau ein bestimmter Druck. Jede Temperaturänderung bedingt daher eine sofortige Druckänderung und umgekehrt.

Bei einer annähernd konstanten Außentemperatur ist demzufolge ein konstanter Behälterdruck zu erwarten.

Das ändert sich jedoch, wenn aus dem Behälter Gas entnommen wird (das entspricht dem "Betrieb aus der Gasphase"). Was passiert? Das zurückgebliebene Gas in der Flasche füllt nun das gesamte Volumen aus. Der Druck, den das Gas auf die Flüssigkeit ausübt, fällt also ab. Damit weicht der Zustand von der Dampfdruckkurve ab. Die momentan überhöhte Temperatur der Flüssigkeit, bezogen auf den vorhandenen Gasdruck, bewirkt, daß soviel Flüssigkeit verdampft, bis sich das alte Gleichgewicht wieder eingestellt hat.

Bild 3 - 2: Betrieb aus der Gasphase (a) und aus der Flüssigphase (b)

Nun kommt aber hinzu, daß der Phasenübergang viel Wärmeenergie benötigt. Um sich aus dem Verband der Flüssigkeit loszureißen, entzieht ein Molekül den umliegenden Molekülen Wärme (spezfische Verdampfungswärme). Die verbleibende Flüssigkeit wird also kälter. Wenn diese Abkühlung nicht durch Wärme von außen ausgeglichen werden kann, fällt die Temperatur bei stetiger Gasentnahme ab. Das bedeutet zwingend auch einen Druckabfall. Fällt der Druck bis unter den Außendruck (normal 1013 mbar), dann kann kein weiteres Gas mehr aus dem Behälter entnommen werden.

In der Praxis zeigt sich dieser Zustand durch die Reif- und Schneebildung von gefrorenem Kondenswasser auf dem Behälter. Je leerer die Flasche ist, desto kleiner ist die in der Flüssigkeit gespeicherte Wärmemenge, desto schneller kommt es zu Vereisungen.

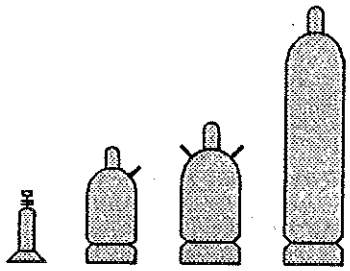
Um einen optimalen Betrieb zu gewährleisten, mischen die Abfüllfirmen von Flüssiggas Propan und Butan. In heißeren Ländern wird hauptsächlich Butan abgefüllt, da eine Erwärmung bis 60°C noch keine drucktechnischen Probleme hervorruft. In kälteren Regionen wäre dagegen der Betrieb im Winter nicht mehr möglich. Deshalb findet sich in der BRD fast ausschließlich Propan in den Flaschen.

Das Problem der Gasentnahme und der Vereisung der Flaschen taucht beim "Betrieb aus der Flüssigphase" nicht auf, da die Flüssigkeit erst direkt am Verbrennungsort verdampft wird. Dazu auch Kapitel *3.3. Brennertechnik.*

In der Tabelle auf Seite 23 sind die wichtigsten physikalischen Daten von Propan zusammengefaßt. Die Definitionen der verbrennungstechnisch relevanten Parameter, z.B. Zündtemperatur, sind im Kapitel *3.2. Verbrennung und Feuerung* nachzulesen.

Da ich bereits des öfteren von Behältern und Flaschen geredet habe, ist es an der Zeit, diese vorzustellen. Von Kleinst-Flaschen, über Flüssiggas-Fässer, bis zum ober- und unterirdisch installierten Tank ist die Auswahl groß. Da Abflammgeräte jedoch mobil sein müssen und gleichzeitig große Menge an Flüssiggas benötigen, bleiben in der Praxis nur die 11 Kg-Kleinflasche und die 33 Kg-Großflasche für den Einsatz übrig. Durch die Kombination mehrerer Flaschen, dann Flaschenbatterie genannt, kann die nötige Flüssiggasmenge mitgeführt werden.

Neben der Übersicht über die Behälter ist hier auch noch ein Anhaltswert für die Entnahmeleistung angegeben. Eine Flaschenbatterie hat durch ihre größere Masse natürlich auch eine höhere Entnahmeleistung. Bis zu einem gewissen Grad kann dadurch ein Warmwasserbad für die Flaschen ersetzt werden.



	Kleinst-	Klein-		Groß- Flaschen
Füllung	425 g	5 kg	11 kg	33 kg
Rauminhalt (ca.) - Liter	1	11,8	27,2	79
Leergewicht (ca.) - kg	1,8	6,6	13,1	35,5
Außendurchmesser - mm	84	229	300	318
Gesamthöhe (Länge) - mm	320	505	600	1290
Prüfüberdruck - bar	225	30	30	30
Entnahmeleistung aus der Gasphase:				
ununterbrochene Entnahme - kg/h		0,2	0,3	0,6
Entnahme mit 50 % Unterbrechungen - kg/h		0,5	0,8	1,8
stoßweise Entnahme (20 min) - kg/h		1,5	2,0	3,0

Bild 3 - 3: Daten zu Flüssiggasflaschen

Am Schluß dieses Kapitels will ich noch auf die Umweltverträglichkeit dieses Energieträgers eingehen.

Anfangs wurde bereits erwähnt, daß die sehr saubere, rauch- und geruchlose Verbrennung zu den Vorteilen zählt. Das ist zunächst vollkommen richtig. Die Kohlenwasserstoffe verbrennen bei ordnungsgemäßer Feuerung praktisch vollständig zu Kohlendioxid (CO_2) und Wasser (H_2O). Staub, Schwefeldioxid (SO_2), Kohlenmonoxid (CO) und organische Verbindungen treten nur in verschwindenden Spuren auf.

Trotzdem muß ich die Frage stellen, woher das Flüssiggas eigentlich stammmt?

Es fällt bei der Förderung von Erdöl und Erdgas an und wurde dort bis vor kurzem schlichtweg abgefackelt. Des weiteren entsteht es bei der Rohölverarbeitung in den Raffinerien. Daraus ist zweierlei zu schließen: Flüssiggas ist ein fossieler Brennstoff und trägt wie alle anderen fossielen Brennstoffe zum Anstieg des CO_2-Gehalts in der Luft bei. Die bevorstehende Klimakatastrophe wird also gefördert. Zum Anderen ist die Produktion direkt an den Ölverbrauch gekoppelt. Die "saubere" Verbrennung von Flüssiggas ist somit durch die "schmutzige" Verbrennung von Benzin und Diesel teuer erkauft. Eine Lösung der Umweltprobleme ist deshalb im Zusammenhang mit Flüssiggas nicht spruchreif.

Solange das Flüssiggas allerdings nur abgefackelt wird, mag es recht und billig sein, die Anwendung in speziellen Bereichen zuzulassen, für die es zur Zeit keine anderen technischen Lösungen gibt. Dazu gehört wohl auch die Abflammtechnik.

3.2. Verbrennung und Feuerung

Ich will hier nicht den Eindruck erwecken, daß es möglich ist, das Kapitel Verbrennung und Feuerung auch nur annähernd vollständig auf wenigen Seiten darzustellen. Ich beschränke mich deshalb auf die Teilaspekte, die für die Abflammtechnik eine wichtige Rolle spielen. Für intensivere Studien empfehle ich das Buch "Verbrennung und Feuerungen" von RUDOLF [18], aus dem ich die meisten Passagen zitiere.

Von Verbrennung wird gesprochen, wenn der chemische Grundvorgang der Oxidation von Brennstoffen betrieben wird, um die damit verbundene Wärmeentwicklung zu nutzen. Der gasförmige Brennstoff, hier z.B. Propan, reagiert mit dem Luftsauerstoff und hinterläßt Kohlendioxid (CO_2) und Wasser-(H_2O) Dampf. Dieser Prozeß läßt sich in vier Teilvorgängen beschreiben:

1. Mischung von Brennstoff und Oxidationsmittel

Die Mischung beider Ströme soll so vollkommen sein, daß alle Brennstoffmoleküle bzw. bei sauerstoffarmer Verbrennung alle Sauerstoffmoleküle reagieren können. Bis in kleinste Raumelemente mit der Größenordnung der freien Weglänge der Moleküle muß deshalb ein stöchiometrisches Mischungsverhältnis herrschen, bzw. die Moleküle müssen überall im Verhältnis der Gesamtströme der Reaktionspartner vorliegen. Zu fette Gemische, d.h. der Brennstoff findet nicht ausreichend Sauerstoff zur Verbrennung vor, beginnen zu rußen und damit energetisch und ökologisch ungünstig zu verbrennen. Der Zeitbedarf dieses Teilvorgangs liegt bei den meisten technischen Anlagen zwischen 10^{-1} und 10 Sekunden und ist größer als der Zeitbedarf von Zündung und Reaktion.

2. Erwärmung beider Reaktionspartner auf Zündtemperatur

Ein orientierendes Maß für die zur Einleitung der Reaktion nötige Aktivierungsenergie ist die Zündtemperatur. Auf diese Temperatur müssen Brennstoff und Oxidationsmittel bzw. ihr Gemisch erwärmt werden, damit die Reaktion einsetzen kann. Wird eine Verbrennungsreaktion in Gang gesetzt, so muß den Reaktionspartnern die Zündenergie von außen her zugeführt werden, z.B. durch ein Zündholz, einen Glühdraht, einen elektrischen Funken oder eine Hilfsflamme.

Sobald die Reaktion eingeleitet ist, soll die Zündenergie aus der Reaktionszone entnommen werden. In einem Rückkopplungsvorgang wird ein stetiger Teilstrom von Energie an die zuströmenden Reaktanden geleitet, um diese zu aktivieren. Als Transportmechanismen kommen in Betracht: Leitung, molekularer Stofftransport (Diffusion), makroskopischer Stofftransport (Konvektion) und Strahlung.

3. Verbrennungsreaktionen und Wärmeentwicklung

Als Flamme bezeichnet mensch den Teil eines Stoffstromes aus Brennstoff, Oxidationsmittel und Abgas, in dem Verbrennungsreaktionen stattfinden. Mensch versucht, dieses Reaktionsfeld räumlich abzugrenzen, indessesn läßt sich eine Grenzfläche zwischen Flammenraum und Umgebung oft nur annähernd angeben, da die Reaktionen sehr langsam abklingen. Die anscheinend naheliegende Abgrenzung mit Hilfe der Leuchterscheinungen, die den meisten Verbrennungsreaktionen eigen sind, ist unsicher, da auch diese langsam abklingen.

4. Wärmeabgabe aus der Flamme bzw. den Abgasen an Wärmegut oder Umgebung

Direkt nach der Verbrennungsreaktion liegt also ein heißes Abgas vor, das seine Wärmeenergie wiederum durch Leitung, Diffusion, Konvektion oder Strahlung an die Umgebung abgeben kann. Das ist letztendlich der erwünschte Effelt der Verbrennung. Besonders ist darauf hinzuweisen, daß die Flamme bereits einen intensiven Strahler bilden kann. Je größer der Kohlenstoffanteil im Brennstoff ist, desto intensiver die Strahlung. Eine Wasserstoff-Flamme strahlt dagegen fast nicht.

Diese vier Teilvorgänge können in verschiedenster Weise zusammenwirken, ihre Kombination bestimmt die Eigenschaft technischer Anlagen.

Die größten Unterschiede entstehen durch die Anordnung des langsamen Vorgangs 1, Mischung von Brennstoff und Luft. Verlegt mensch diesen Vorgang vor den Feuerraum, so beeinflußt sein Zeitbedarf den Hauptvorgang der Reaktion nicht mehr, Zündung und Reaktion werden geschwindigkeitsbestimmend. Diese Flammen heißen **Vormischflammen.** Findet die Mischung im Feuerraum statt, so wird sie geschwindigkeitsbestimmend. Flammen dieser Art heißen **Diffusionsflammen,** da die Mischung durch einen Diffusionsvorgang bewirkt wird.

Innerhalb der Abflammtechnik kommen ausschließlich Brenner (siehe auch Kapitel *3.3. Brennertechnik)* zum Einsatz, die mit einer teilweisen Vormischung arbeiten. Aus diesem Grund werde ich im folgenden nur auf die Brenneigenschaften von Gemischen für Vormischflammen eingehen.

- Zündgrenzen

Brennstoff-Luft-Gemische sind nur dann zündfähig, wenn ihre Zusammensetzung zwischen zwei Grenzwerten, den "Zündgrenzen" liegt. Zündgrenzen sind somit Grenzwerte des Mischungsverhältnisses, d.h. der Konzentration von Brennstoff im Gemisch mit Luft. Mensch unterscheidet eine "untere" Zündgrenze im luftreichen und eine "obere" Zündgrenze im brenngasreichen Mischungsgebiet. Zündet mensch ein Gemisch, das außerhalb der Zündgrenzen liegt, z.B. mit einem elektrischen Funken, so tritt nur kurzfristig in der Nähe des Funkens eine Reaktion auf, die Hauptmasse des Gemisches bleibt unverbrannt.

Trotz der großen Bedeutung der Zündgrenzen für die Verbrennungstechnik und für Sicherheitsfragen gibt es kein genormtes Meßverfahren. Allerdings hat sich die Apparatur von Coward und Jones weitgehend durchgesetzt. Da die Apparatur einen entscheidenden Einfluß auf das Meßergebnis hat, sollte sie immer mitangegeben werden, wenn Angaben über die Zündgrenzen gemacht werden. Die Verwertung dieser experimentell gewonnenen Grenzen für eine technische Anwendung unter bisweilen vollkommen anderen Voraussetzungen muß wohl mit Hilfe langer Erfahrung unternommen werden.

- Zündtemperatur und Mindestzündenergie

Wie die Zündgrenzen werden auch die Zündtemperatur und die Mindestzündenergie durch spezielle Versuchaufbauten ermittelt.

Dabei beschreibt die Zündtemperatur, ab welcher Temperatur ein stöchiometrisches Gemisch von selbst zündet und verbrennt. Ein Verfahren dazu ist in der DIN 51 794 festgelegt. Die Angaben in der Literatur schwanken jedoch sehr und die Aussagekraft ist begrenzt. Sicherheitstechnisch interessiert die untere Grenze der möglichen Zündung (z.B. durch vorgewärmte Verbrennungsluft bei Vormischbrennern).

Die Mindestzündenergie wird ermittelt, indem der Zündvorgang (elektrischer Funke) mit steigender Energie solange wiederholt wird, bis Zündung eintritt.

- Löschabstand

In der Nähe großer Feststoffmassen kann keinem Reaktion stattfinden, da diese Massen die freiwerdende Wärme aufnehmen und ableiten und somit den Abbruch der Reaktionskette bewirken. Der Abstand, innerhalb dessen keine Reaktion stattfindet, heißt Löschabstand. Auch hier ist das verwendete Meßverfahren von Bedeutung und sollte immer zusätzlich angegeben werden. Die technischen Konsequenzen sind, daß Flammen nicht an den Brennern anliegen können und daß eine Flanmmenfortpflanzung durch enge Spalte oder Gitter hindurch nicht möglich ist.

- Flammengeschwindigkeit und Stabilität

Als Flammen- oder Zündgeschwindigkeit bezeichnet mensch die Geschwindigkeit, mit welcher sich eine Verbrennungsfront in einem Brennstoff-Luft-Gemisch fortpflanzt. Im einfachsten Fall findet diese Ausbreitung in einem ruhenden Gemisch statt, die Flammenfront hätte bei Abwesenheit äußerer Kräfte die Form einer Kugelschale, deren Durchmesser stetig zunimmt. Der technisch ungleich häufigere Fall besteht in der Verbrennung strömender Gemische, wobei Strömungsgeschwindikeit und Flammengeschwindigkeit so kombiniert werden, daß ortsfest brennende Flammen entstehen, meist in der Form eines über dem Brennerrohr sitzenden Kegels.

Ist die Flamme ortsfest, so wird sie auch "stabil" genannt. Die dazugehörige Theorie geht davon aus, daß in einem Punkt die Strömungs- und die Flammengeschwindigkeit gleich groß und entgegengerichtet sein muß. Wird die Ausströmgeschwindigkeit gesteigert, so erreicht mensch schließlich die "Abhebegrenze". Die Flamme entfernt sich vom Brenner und erlischt bei weiterer Steigerung der Brennstoffzufuhr. Bei stetiger Erniedrigung der Ausströmgeschwindigkeit besteht die Möglichkeit des "Rückschlagens", die Flamme wandert im Brenner stromauf und erreicht im Fall des Bunsenbrenners schließlich die Düse, an welcher sie in Form einer Diffusionsflamme weiterbrennt.

- Doppelflammen (Innen- und Außenkegel)

Verbrennt mensch in einfachen Rohr- oder Düsenbrennern ein stöchiometrisches oder sauerstoffreiches Gemisch aus Brennstoff und Oxidationsmittel, so entsteht im allgemeinen eine Reaktionszone von wenigen Zehntelmillimetern Dicke, welche etwa die Gestalt eines geometrischen Hohlkegels hat, der auf dem Brennerrohr aufsitzt. Bei der Verbrennung luftarmer Gemische entsteht ebenfalls ein Brennkegel. Das aus der Reaktionszone austretende Gemisch enthält jedoch immer noch brennbare Substanz. Diese brennt zusammen mit eindiffundierender Umgebungsluft in Form einer Diffusionsflamme, die in diesem Fall Sekundärflamme, Außenflamme oder Außenkegel genannt wird. Der Kegel, in dem das Gemisch verbrennt, heißt Innen- oder Primärkegel. Das zwischen den beiden Flammen strömende Gemisch aus Abgas und unverbranntem Frischgas heißt Zwischengas.

Eine sehr anschauliche Versuchsapparatur dazu ist das Spaltrohr nach Smithells. Um auch luftarme Vormischflammen ohne Störung durch den Außenkegel beobachten zu können, verhindert ein Mantelgefäß den Luftzutritt zur Brennstelle der Vormischflamme. Zur Beobachtung enthält das Rohr Fenster. Das aus dem "Innenkegel" austretende, noch brennbare Zwischengas kann am Austritt des Apparates entzündet werden.

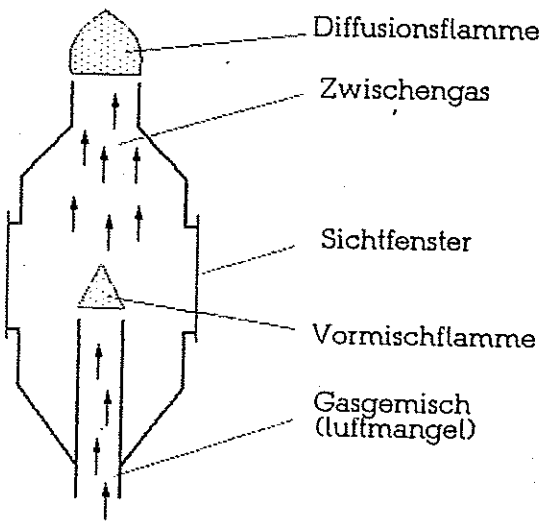


Bild 3 - 4: Spaltrohr nach Smithells

Je größer die Strömungsgeschwindigkeit des Gasgemisches ist, desto länger bildet sich der Hohlkegel der Flammenfront aus. Die unterschiedlichen Größen von Innen- und Außenkegel ergeben sich aus dem Mischungsverhältniß der Vormischung.

Physikalische Eigenschaften	Einheit	Propan
Dichte, flüssig bei 0°C	$kg\,l^{-1}$	0,53
bei 15°C	$kg\,l^{-1}$	0,51
Dichte, gasförmig, Normzustand	$kg\,m^{-3}$	1,97
Dichteverhältnis zu Luft, gasförmig	Luft = 1	1,55
Siedepunkt bei 1,013 bar	°C	- 42
Verdampfungswärme bei 0°C	$KJ\,kg^{-1}$	378,58
Kritische Temperatur	°C	96,8
Kritischer Druck	bar	42,56
Kritische Dichte	$kg\,l^{-1}$	0,220
Spezifische Wärme, flüssig bei 0°C	$KJ\,kg^{-1}\,K^{-1}$	2,43
Spezifische Wärme, gasförmig, Normzustand	$KJ\,m^{-3}\,K^{-1}$	3,22
Brennwert (oberer Heizwert)	$MJ\,kg^{-1}$	50,337
Heizwert (unterer Heizwert)	$MJ\,kg^{-1}$	46,343
Sauerstoffbedarf, theoretisch	$m_n^3\,m_n^{-3}$	5,104
Luftbedarf, theoretisch	$m_n^3\,m_n^{-3}$	24,36
Zündgrenze in Luft	Vol.-%	2,1 - 9,5
Flammengeschwindigkeit, max, mit Luft	$cm\,s^{-1}$	47,2
Verbrennungstemperatur, max, mit Luft	°C	1925
Verbrennungstemperatur, max, mit O_2	°C	2850
Abgasmenge, feucht	$m_n^3\,m_n^{-3}$	26,244
Abgasmenge, trocken	$m_n^3\,m_n^{-3}$	22,3

Bild 3 - 5: Tabelle physikalischer Daten von Propan [15, S. 6 / 16, S. 105-107]

Der **Normzustand** eines Gases ist gekennzeichnet durch die Zustandsgrößen:

- Normtemperatur $T_n = 273{,}15\,K \triangleq 0°C$
- Normdruck $p_n = 1{,}01325$

Der **Brennwert** eines Gases bezieht sich auf die gesamte Wärme, die bei vollständiger Verbrennung eines Kubikmeters Gas frei wird, wenn das bei der Verbrennung entstandene Wasser flüssig vorliegt (kondensiert).

Der **Heizwert** ist genau um die Wärmemenge kleiner als der Brennwert, die in dem bei der Verbrennung entstandenen Wasser enthalten ist. Es liegt als Wasserdampf vor.

Ein **stöchiometrisches** Mischungsverhältnis liegt vor, wenn Brennstoff und Oxidationsmittel genau in den Mengen vorhanden sind, daß sie sich theoretisch vollkommen gegenseitig aufbrauchen.

3.3. Brennertechnik

Da ich mich auf die Vormischflammen beschränke, stelle ich das dazugehörige technische Prinzip anhand des klassischen Bunsenbrenners vor. Alle anderen technischen Ausführungen sind dann lediglich besondere Varianten.

Die in Kapitel *3.2. Verbrennung und Feuerung* angesprochenen vier Schritte einer Verbrennung finden sich technisch ausgeführt am Brenner.

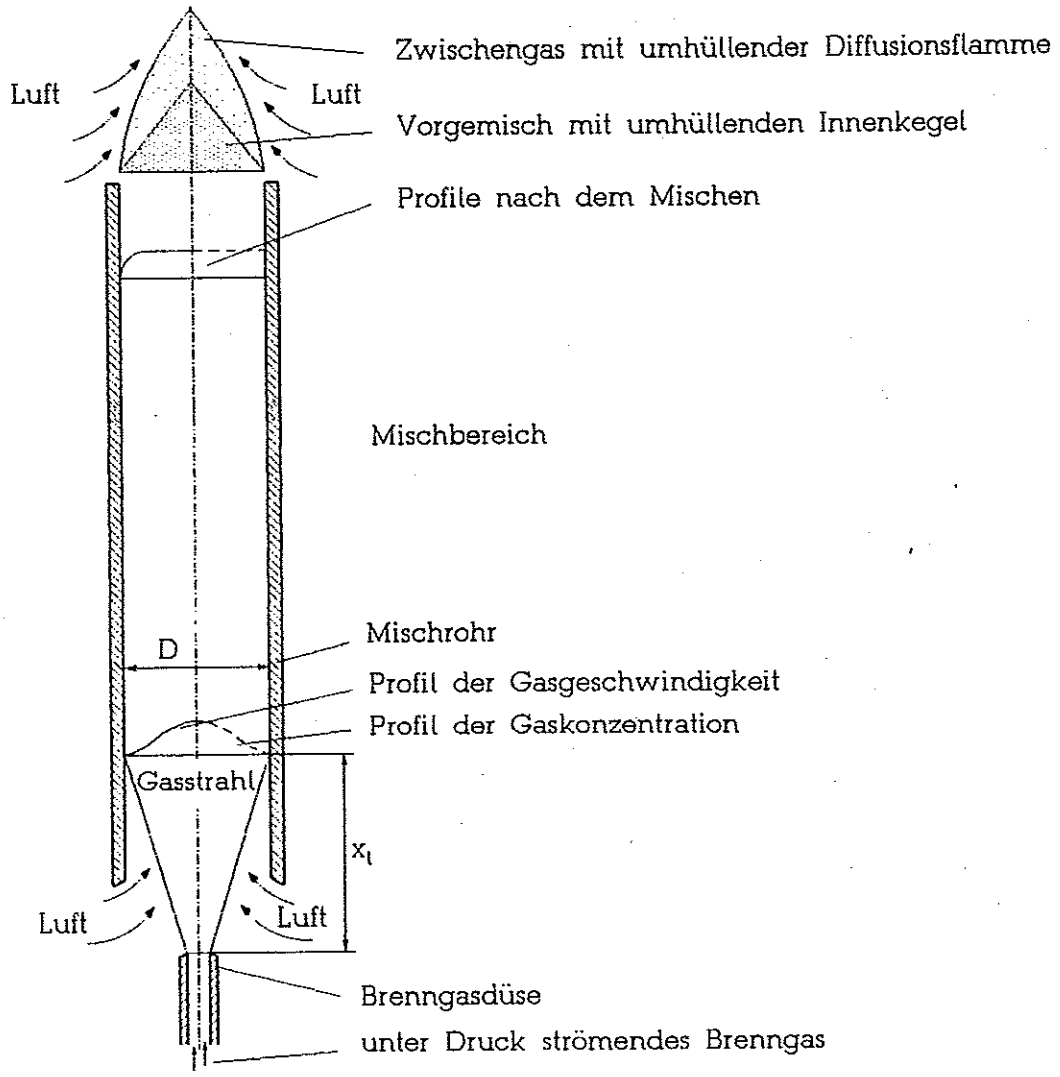


Bild 3 - 6: Aufbau des Bunsenbrenners

Wie bereits erwähnt, spielt die Mischung von Brennstoff und Oxidationsmittel eine sehr wichtige Rolle. In der hier dargestellten einfachsten Form liegt die Brennstoffdüse vor dem beidseitig offenen Mischrohr. Der aus der Düse unter erhöhtem Druck ausströmende Gasstrahl breitet sich nach den Gesetzen des Freistrahls aus und saugt dabei Umgebungsluft an. Das Gas reißt also die Luft mit. Bis zur Ebene im Abstand x_t vom Düsenmund nimmt der Massenstrom zu. Das Freistrahlprofil der Gasgeschwindigkeit (links und durchgezogen) wandelt sich im Mischrohr allmählich in das Profil der Rohrströmung um. Die anfangs ungleichmäßige Gaskonzentration (rechts und gestrichelt) geht in eine gleichmäßige Mischung über. Um diese vollständige Mischung zu erreichen, ist eine Mischrohrlänge von etwa 6 D notwendig. Durch die Variation von Gasdruck, Düsenquerschnitt, Mischrohrquerschnitt und Luftzufuhr lassen sich verschiedenste Brennerkonfigurationen herstellen.

Dieses Bunsenprinzip wird auch Injektor- oder Venturi-Prinzip genannt und steht für selbstansaugende oder atmosphärische Brenner.

Wird der Brennstoff und das Oxidationsmittel unter erhöhtem Druck in das Mischrohr eingebracht, so spricht mensch von Gebläsebrennern. Der erhöhte technische Aufwand eines Gebläses, bzw. Druckluft, zahlt sich durch bessere Regelungsmöglichkeiten der Primärluftzufuhr und damit höheren Temperaturen aus. In der Abflammtechnik werden sie allerdings so gut wie nicht eingesetzt.

Nach der Mischung der Reaktionspartner erfolgt die Erwärmung und die sich anschließende Verbrennungsreaktion im Bereich des Innenkegels der Flamme.

Aus der sich darüber ausbildenden Diffusionsflamme treten die Abgase, die ihre Wärmeenergie an das Wärmegut oder die Umgebung abgeben.

Verschiedene Bauformen:

Aus der großen Vielfalt von möglichen Brennern stelle ich nur zwei etwas ausführlicher dar, da sie prinzipielle Unterschiede verdeutlichen und in der Produktion für Abflammgeräte eingesetzt werden:

- Rund- oder Topfbrenner
- Stab- oder Exaktbrenner

• Rund- oder Topfbrenner

Bereits der Name verrät, daß die Abweichungen zum Bunsenbrenner nicht sehr groß sein können. So findet sich dann auch eine Gasdüse vor dem Mischrohr, das duch seitliche Schlitze die Luftzufuhr gestattet. Da diese Brennerbauform ein Standardteil für verschiedenste Einsatzgebiete ist und die Handlichkeit nur durch einen kleinen Bauraum erreicht wird, ist das Mischrohr stark verkürzt. Um die Stabilität der Flamme auch bei höheren Strömungsgeschwindigkeiten zu gewährleisten, sind um die zentrale Flamme etliche kleine "Halteflammen" angeordnet, die durch entsprechende Bohrungen mit Gas versorgt werden.

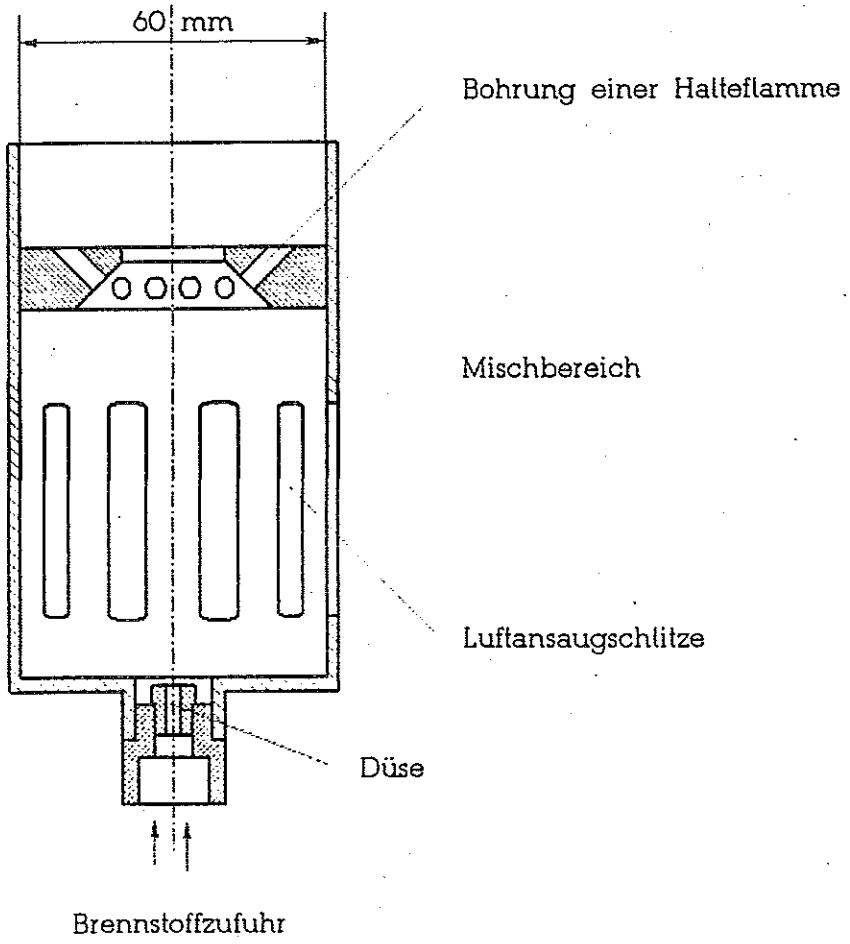


Bild 3 - 7: Aufbau des Topfbrenners

Diese Brenner zeichnen sich durch einfache, robuste Bauweise aus. Düsendurchmesser und Topfdurchmesser sind aufeinander abgestimmt und sollten nicht verändert werden. Damit läßt sich der Gasverbrauch einzig über den Gasdruck einstellen. Wedemeyer hat in seiner Arbeit für einen Topfbrenner mit Düsendurchmesser 2,2 mm bei einem Arbeitsdruck von 1,5 bar einen Gasdurchsatz von 6,45 Kg/h gemessen.

Die sich ergebende "gebündelte Flammenform" [8, S. 41] ist besonders für eine starke punktuelle Erwärmung geeignet, wie sie für die Einzelpflanzenbekämpfung (Disteln, stumpfblättriger Ampfer) eingesetzt werden.

• Stab- oder Exaktbrenner

Die Bauform dieses Brenners zielt bereits auf die Abflammtechnik. Obwohl Luftansaugbereich und Mischrohr extrem verkürzt sind, handelt es sich auch hier um einen Injektorbrenner. Hier sind mehrere Düsen innerhalb eines Brenners zusammengefaßt und formen damit einen breiten, flachen Brennermund. Diese "Flammenbürste" [8, S. 41] erzeugt eine gleichmäßige Temperaturverteilung und große Windstabilität. Um den Gasdurchsatz in Grenzen zu halten, haben die Düsen einen Durchmesser von 0,5 mm. Nach Wedemeyer verbraucht ein 500 mm langer Brenner mit 17 Düsen bei 1,5 bar Arbeitsdruck 8,4 Kg/h.

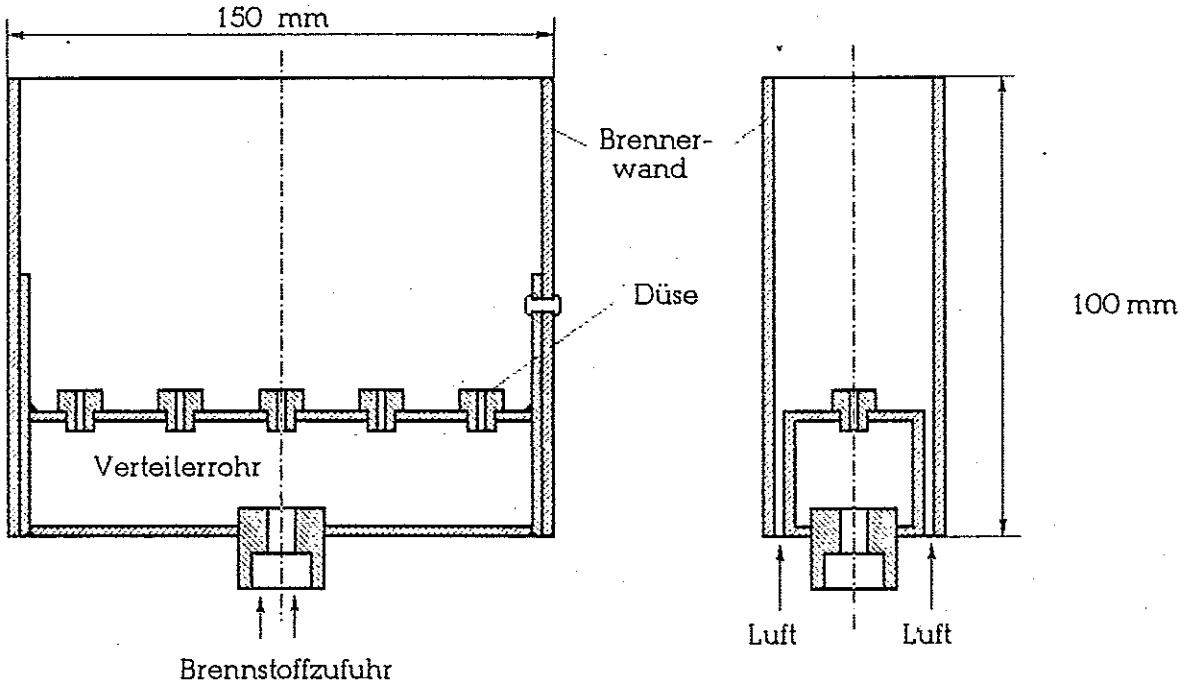


Bild 3 - 8: Aufbau des Stabbrenners

Durch die Wahl der geeigneten Brennerbreite und durch eine Drehung um die Brennerachse, läßt sich jede gewünschte Breite abflammen. Das hat seine besondere Bedeutung bei Reihenbearbeitung oder selektivem Abflammen.

• Weitere Brenner

Alle Brenner, die das Flüssiggas aus der "Flüssigphase" verbrennen, tun das auch nur indirekt. Dem Mischrohr ist in diesem Fall eine Verdampferkammer vorgeschaltet, in der sich der Phasenübergang vollzieht. Danach gleichen sich die Systeme wieder. Die Energie für die Verdampfung wird durch Wärmeleitung von der Flamme an die Verdampferkammer transportiert. Es bietet sich daher an, die Verdampferkammer in die direkte Nähe der Flamme zu plazieren.

Die Infrarotwärmestrahler, auch Strahlungsplatten genannt, basieren ebenfalls auf dem Injektorprinzip. Allerdings ist die Verbrennung so angelegt, daß die frei werdende Energie direkt in den strahlenden Körper übergehen kann.

3.4. Sicherheitstechnik

Obwohl der Sicherheitstechnik ein hoher Stellenwert zukommt, gehe ich im Rahmen dieser Studienarbeit nur sehr kurz darauf ein. Das ist mit dadurch begründet, daß die Abflammtechnik noch keine eigenständigen Verordnungen kennt, und somit die Prüfverfahren nur sehr allgemein beschrieben werden.

Zunächst gibt es die Unterscheidung in zwei Hauptgruppen:

1. Die gastechnische Prüfung durch den "Deutschen Verein des Gas- und Wasserfaches e.V." (DVGW).

Der DVGW prüft sowohl Einzelteile (z.B. Schläuche, Druckregler), als auch vollständige Geräte und vergibt dafür das Prüfzeichen und eine Prüfnummer, die im halbjährlich erscheinenden "Prüfzeichen Verzeichnis" [26] veröffentlicht werden. Um die Sicherheit der Gasinstallationen auf einem hohen Standard zu halten ist es deshalb sinnvoll und notwendig, in Geräten nur solche Teile zu verwenden, die bereits eine Prüfnummer besitzen.

Bei der eigentlichen Prüfung der Geräte stehen die Funktionsprüfung in Form von Dichtigkeit, Gasdurchsatz, Bennsicherheit und Zündung, Verbrennungsgüte, Flammenlänge und Dauertest im Vordergrund. [21]

Die von DVGW und DVFG (Deutscher Verband Flüssiggas e.V.) gemeinsam herausgegebenen "Technische Regeln Flüssiggas" (TRF 1988) [16] drücken noch einmal deutlich aus, was es bedeutet, sich am "Stand der Technik" zu orientieren. Zunächst ist dieses Werk nur für immobile Installationen mit einem Nenndruck von 50 mbar gedacht, viele Grundlagen und Hinweise sind jedoch auch auf die Abflammtechnik anzuwenden.

Des weiteren gibt es natürlich noch eine Unmenge von DIN-Vorschriften. Exemplarisch benenne ich hier nur DIN 8543 T 4 [20], die sich mit Handbrennern für Brenngas und angesaugte Luft auseinandersetzt.

Nach dieser Aufzählung der Prüfungsinstitutionen folgt nun noch die Aufzählung der potentiellen Gefahrenquellen:

- Flüssiggasbehälter: Die Flaschen dürfen sich nicht über 40°C erwärmen, da sowohl die Flaschen, als auch die nachfolgenden Aggregate, wie Schläuche und Druckregler, nicht für Drücke überhalb 15 bar ausgelegt sind.

- Schläuche: Diese flexiblen Gasleitungen sind besonders gefährdet abzureißen, hängen zu bleiben oder durchzuschmoren. Durch die UV-Strahlung der Sonne wird das Material porös und brüchig. Schläuche sollten deshalb regelmäßig überprüft werden und möglichst wenig zum Einsatz kommen. Meistens gibt es technische Lösungen, die auf Schläuche verzichten können.

• Ventile, Rohrverbindungen: Alle Verbindungsstellen und alle Aggregate sind potentielle Undichtigkeiten. Auch die Verwendung von geprüften Materialien macht eine regelmäßige Dichtigkeitsprüfung (z.B. mit Seifenwasser) keinesfalls überflüssig.

• Falls mehrere Flaschen eingesetzt werden, ist unbedingt ein zentrales Ventil anzubringen, das eine schnelle Abriegelung des Gasflusses ermöglicht. Die einzelnen Flaschenventile allein sind dafür ungeeignet.

• Je nach Gerätegröße und Ausstattung sollten Gasmangelsicherungen, automatische Zündung und Flammenwächter installiert werden. Diese Aggregate sind ebenfalls regelmäßig auf ihre Funktion zu prüfen.

Alle diese Punkte laufen letztendlich auf das unkontrollierte Ausströmen von Flüssiggas hinaus. Dabei ist folgendes anzumerken:

• Solange ein Flämmchen oder eine Flamme an einer Leckage brennt, besteht kaum akute Gefahr. Die Gaszufuhr muß unterbrochen und die Undichtigkeit behoben werden. Also nicht die Flamme löschen ohne die Gaszufuhr zu beenden!

• Problematisch dagegen ist eine Leckage ohne Flamme. Das austretende Gas vermischt sich mit Luft und bildet ein explosives Gemisch (Siehe auch Kapitel *3.2. Verbrennung und Feuerung, • Zündgrenzen).* Da das Gas spezifisch schwerer ist als Luft, bleibt es am Boden liegen oder kriecht in Senken und Vertiefungen. Je nach den Örtlichkeiten kann dann durch einen elektrischen Funken, eine glimmende Zigarette oder ähnliches eine Verbrennung ausgelößt werden, die sich bis zur Explosion steigert. Geschlossene, schlecht durchlüftete Räume sind daher grundsätzlich zu meiden.

2. Die unfallschutztechnische Prüfung durch den Hauptverband der gewerblichen Berufsgenossenschaften

Die Berufsgenossenschaften haben einen großen Katalog an Unfallverhütungsvorschriften zusammengetragen. Die Abflammgeräte lassen sich unter die "Heiz-, Flämm- und Schmelzgeräte für Bau- und Montagearbeiten" einordnen, die in der Vorschrift "VBG 43" [23] erfaßt werden.

Die Prüfung erfolgt in erster Linie in Hinsicht auf die Unfallgefahr für die BetreiberIn des Gerätes. In §5(2) heißt es z.B. "Brenner müssen so beschaffen oder angeordnet sein, daß sie gefahrlos gezündet werden können." §41 legt fest daß Handbrenner nur aus der Gasphase betrieben werden dürfen. Natürlich wird auch darauf geachtet, daß heiße Flächen vor Berührung abgesichert und gekennzeichnet sind. Weitere Kriterien sind die Verletzungsgefahr durch scharfe Kanten und Spitzen, sowie mögliche Quetschungen durch bewegliche Teile usw.

HOFFMANN weist in seinen Kapitel "Sachgerechter Geräteeinsatz" [8, S. 34] noch auf weitere wichtige Verhaltensweisen hin:

- Auslaufendes, flüssiges Flüssiggas verdunstet bei normalen Umgebungsdruck und Umgebungstemperatur sofort. Die dazu nötige Verdunstungswärme entzieht das Gas der direkten Umgebung. Falls es dabei zu Hautkontakt kommt, kann es zu Erfrierungen kommen.

- Wegen der hohen Temperatur von Flüssiggasflammen kann es auf der menschlichen Haut zu Verbrennungen dritten Grades kommen. Es ist beim Betrieb der Abflammgeräte für den Flammenbereich entsprechende Vorsicht geboten.

- Das Abflammgerät darf nur eingesetzt werden, wenn in der Umgebung keine Brandgefahr besteht. Stoppelrückstände und Altgrasbüschel, die nach der Saatbettbereitung noch übrig geblieben sind, sind im allgemeinen unproblematisch. Windrichtung und -stärke beachten!

- Rauchverbot beim Umgang mit Flüssiggas!

4. Rechenmodelle

4.1. Größenordnungen, Parameter und Einflüsse

Einigen LeserInnen wird es wahrscheinlich ähnlich ergehen wie mir, als ich gerade dabei war, mich in das Thema "Abflammtechnik" einzuarbeiten. Natürlich hatte ich bereits einen mit Flüssiggas betriebenen Campingkocher benutzt, doch die Vorstellung für ein Abflammgerät waren eher vage. Da ich kein funktionierendes Gerät zum Anfassen hinten einkleben kann, werde ich mich bemühen, durch einige beispielhafte Berechnungen die Größenordnungen zu verdeutlichen. Diese Theorie kann jedoch kein Ersatz für das praktische Erleben des Abflammens sein.

Da die genauere Beschreibung des von mir verwendeten Abflammgeräts erst in Kapitel *6.1. Gerätebeschreibung* auftaucht, kann es notwendig werden jetzt kurz vorwegzulesen oder im Zweifelsfalle nachzublättern. Die spezifischen Daten für Propan sind in Kapitel *3.1. Der Energieträger Flüssiggas* in einer Tabelle gesammelt.

- Mittlere Leistungsabgabe

Aus der Literatur [3] und aus Gesprächen mit Betreibern von Abflammgeräten ist zu erfahren, daß beim flächigen Abflammen mit ca. 4 km/h, wie es das Vorauflaufverfahren in meinem Fall darstellt, ein durchschnittlicher Verbrauch von 40 - 60 kg Propan pro Hektar entsteht.

Wieviel ist das nun?

Bei einer Spurbreite b = 1,7 m und einer Fläche A = 1 ha ergibt sich eine zu fahrende Arbeitslänge l.

$$l = \frac{A}{b} \qquad (4 \cdot 1)$$

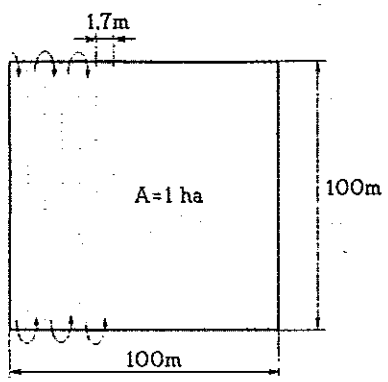


Bild 4 - 1: Bearbeitung von einem Hektar

Mit der Arbeitsgeschwindigkeit $v = 4\,km/h = 1{,}11\,m\,s^{-1}$ errechnet sich die Arbeitszeit t, die nötig ist, um den Hektar zu befahren.

$$t = \frac{l}{v} = \frac{A}{b \cdot v} \qquad (4 \cdot 2)$$

Die freiwerdende Wärmeenergie Q ist das Produkt aus Brennstoffverbrauch $B = 50\,kg$ und Heizwert $H_u = 46{,}343\,MJ/kg$.

$$Q = B \cdot H_u \qquad (4 \cdot 3)$$

Daraus ergibt sich nun die durchschnittliche Leistung P.

$$P = \frac{Q}{t} = \frac{B \cdot H_u \cdot v \cdot b}{A} \qquad (4 \cdot 4)$$

$$P = \frac{50\,kg \cdot 46{,}343 \cdot 10^3\,kJ\,kg^{-1} \cdot 11{,}1\,m\,s^{-1} \cdot 1{,}7\,m}{10^4\,m^2} = 437\,kW$$

Diese Leistungsklasse entspricht bereits einem LKW mit ca. 200 PS. Der Unterschied besteht allerdings darin, daß die Verbrennung durch eine offene Flamme erfolgt und nicht so schön im gekapselten Motor.

- Ausgebreitete Energiemenge

Die zu beantwortende Frage lautet hier: Wieviel Wasser ($T_1 = 20°C$) kann mit den 50 kg Propan, die pro Hektar eingesetzt werden, zum kochen ($T_2 = 100°C$) gebracht werden?

Die Wärmemenge Q ist definiert als:

$$Q = m_w \cdot c_w \cdot \Delta\vartheta \qquad [6] \qquad (4 \cdot 5)$$

Dabei ist: spezifische Wärmekapazität $c_w = 4{,}18\,kJ\,kg^{-1}\,K^{-1}$
Temperaturdifferenz $\Delta\vartheta = T_2 - T_1 = 80\,K$
m_w ist die gesuchte Masse des Wassers.

$$m_w = \frac{Q}{c_w \cdot \Delta\vartheta} = \frac{B \cdot H_u}{c_w \cdot \Delta\vartheta} \qquad (4 \cdot 6)$$

$$m_w = \frac{50\,kg \cdot 46{,}343 \cdot 10^3\,kJ\,kg^{-1}}{4{,}18\,kJ\,kg^{-1}\,K^{-1} \cdot 80\,K} = 6929\,kg$$

Da Wasser ungefähr eine Dichte von $\rho = 1\,kg\,dm^{-3}$ hat, sind nahezu 7000 Liter Wasser am kochen. Werden die 7000 Liter allerdings wieder über den Hektar verteilt, ergibt sich eine aufgeheizte Wasserschicht der Höhe h_w.

$$h_w = \frac{V_w}{A} = \frac{m_w}{\rho \cdot A} \tag{4·7}$$

$$h_w = \frac{6929\,kg}{10^3\,kg\,m^{-3} \cdot 10^4\,m^2} = 6{,}929 \cdot 10^{-4}\,m = 0{,}7\,mm$$

Vergleicht mensch nun die riesige Wassermasse von 7 t mit der lächerlichen Höhe von nicht einmal 1 mm, so ist daraus zu schließen, daß speziell beim Abflammen die Bezugsgrößen eine sehr entscheidende Rolle spielen. Allerdings läßt sich auch bereits erahnen, welche Folgen Tau oder ein kürzlich niedergegangener Regen auf das Abflammergebnis haben.

- Abgasvolumen

So wie bei der Wasserstandsbetrachtung gehe ich auch beim Abgas vor. Es ist interessant zu wissen, unter was für einer Abgasglocke sich der Acker nach dem Abflammen befindet, wenn das Abgas am Boden bliebe.

Die Propanmasse $m_P = 40\,kg$ hat im Normalzustand ein Volumen V_P.

$$V_P = \frac{m_P}{\rho_P} \tag{4·8}$$

Dabei ist: Dichte von Propan $\rho_P = 1{,}97\,kg\,m^{-3}$

Mit dem Abgasverhältnis $a_{Pf} = 26{,}244\,m^3\,m^{-3}$ wird beschrieben, wieviel m^3 feuchtes Abgas V_{Af} pro m^3 verbranntem Propan anfällt. Daraus:

$$V_{Af} = a_{Pf} \cdot V_P = \frac{a_{Pf} \cdot m_P}{\rho_P} \tag{4·9}$$

$$V_{Af} = \frac{26{,}244\,m^3\,m^{-3} \cdot 50\,kg}{1{,}97\,kg\,m^{-3}} = 666\,m^3$$

Diese $666\,m^3$ füllen einen Würfel mit 9 m Kantenlänge oder etwa ein Reihenhaus.

Welche Höhe h_{Af} hat dagegen der Abgasteppich auf dem Acker?

$$h_{Af} = \frac{V_{Af}}{A} \tag{4·10}$$

$$h_{Af} = \frac{666\ m^3}{10^4\ m^2} = 6{,}66 \cdot 10^{-2}\ m = 7\ cm$$

Vorsicht ist geraten, denn dieser Wert berechnet sich aus dem Normalzustand der Abgase. Direkt nach der Verbrennung hat das Abgas jedoch Temperaturen zwischen 700°C und 900°C. Da der Umgebungsdruck gleich bleibt, kann von einer "isobaren Zustandsänderung" gesprochen werden. Hier gilt:

$$\frac{V_{A1}}{T_{A1}} = \frac{V_{A2}}{T_{A2}} \qquad [6] \tag{4·11}$$

Dabei ist:

Abgastemperatur, normal	$T_{A1} = 0°C = 273{,}15\ K$
Abgastemperatur, heiß	$T_{A2} = 800°C = 1073{,}15\ K$
Abgasvolumen, normal	$V_{A1} = V_{Af} = 666\ m^3$
Abgasvolumen, heiß	V_{A2}

$$V_{A2} = \frac{V_{A1} \cdot T_{A2}}{T_{A1}}$$

$$V_{A2} = \frac{666\ m^3 \cdot 1073{,}15\ K}{273{,}15\ K} = 2617\ m^3$$

$$h_{A2} = \frac{V_{A2}}{A} \tag{4·12}$$

$$h_{A2} = \frac{2617\ m^3}{10^4\ m^2} = 0{,}2617\ m = 26\ cm$$

Mit diesen Werten ist es möglich sich ein ungefähres Bild davon zu machen, welche Stoff- und Energiemengen beim Abflammen im Vorauflaufverfahren umgesetzt werden. Ich weise allerdings darauf hin, daß es sich hier um grobe Anhaltswerte handelt.

Welche Parameter gilt es nun besonders zu beachten und wie sind sie von bestimmten Einflüssen abhängig? Die folgende stichwortartige Aufzählung soll dazu einen ersten Eindruck vermitteln.

- Fahr- oder Arbeitsgeschwindigkeit

Je größer sie ist, desto größer ist auch die Arbeitsleistung. Bei kleinen Flächen schlägt jedoch in erster Linie die Rüstzeit und der Weg bis zum Einsatzort zu Buche. Je schneller, desto kälter für die Pflanzen.

- Gasverbrauch

Eine vollkommen offenen Flamme benötigt für vergleichbare Abflammerfolge mehr Gas als eine abgeschirmte Flamme. Das Abgas ist CO_2-haltig, schlecht für das Klima (siehe auch Kapitel *3.1. Der Energieträger Flüssiggas*). Allerdings fallen bei der Narungsmittelproduktion wesentlich größere Abgasmengen durch den nötigen und unnötigen Transport an. Zuverlässiges Abflammen hat deshalb Vorrang vor Energiesparen.

- Temperatur in der Pflanze

Entscheidend für das Absterben derselben.

- Pflanzenhöhe, -dichte, -art

Das sind letztlich die entscheidenden Punkte für den Wärmeübergang in die Planze und die Wärmeleitung in der Pflanze. Große und kleine, dicke und dünne, behaarte und nackte, ovale und gezackte, wasserarme und wasserreiche, das ist nur ein Teil der Variationsbreite. Ziel kann sein, gewisse Grenzwerte für z.B. den Wärmeübergangskoeffizienten zu erarbeiten.

- Einwirkzeit auf die Pflanze

Zusammen mit der Abgastemperatur und dem Wärmeübergangskoeffizienten ergibt sich die tatsächlich übertragbare Wärmemenge. Sie ist durch die Arbeitsgeschwindigkeit und Flammenabschirmung beeinflußbar.

- Witterung und Umgebungstemperatur

Wie bereits weiter oben gezeigt, haben diese Faktoren großen Einfluß. Nicht zu vergessen ist, daß heiße Tage das geschädigte Beikraut vollends vertrocknen und absterben helfen. Feuchte Tage bewirken das Gegentei, es kommt zur Regeneration.

- Windeinflüsse

Eine offen brennende Flamme ist extrem störanfällig durch zusätzliche Luftströmungen. Abgasstauungen und das Verblasen der Flamme beeinträchtigen das Abflammergebnis beträchtlich.

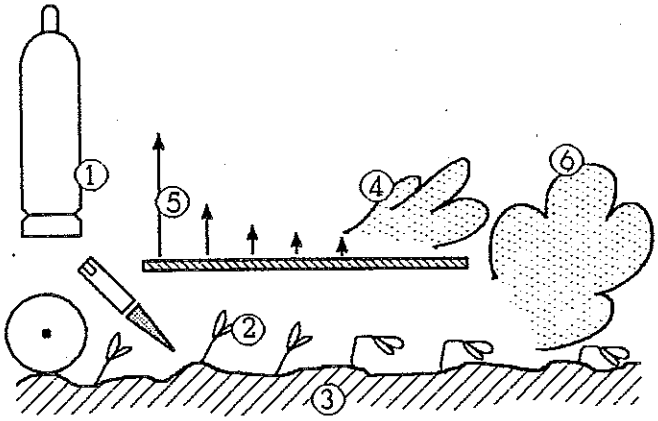
- Bodenstruktur

Ein gewalztes Saatbett ist vorzuziehen. Bodenunebenheiten und Erdklumpen bieten "Verstecke" für die Pflanzen und bremsen die Strömungsgeschwindigkeit der Abgase, weitere Staugefahr.

4.2. Energiebilanz und Wirkungsgrad

Bevor ich mich damit auseinandersetze, wie Verbesserungen an einem Gerät für das Vorauflaufverfahren aussehen könnten, folge ich zunächst den Spuren der Wärmeenergie, die bei der Verbrennung frei wird. Energiebilanz heißt das Motto.

Die folgende Prinzipskizze verdeutlicht, welche Stellen genauer zu betrachten sind. Das Stützrad, der Brenner und die Abdeckplatte stellen das Abflammgerät dar. Die mit Zahlen gekennzeichneten Gebilde stehen für die Orte, die Wärme aufnehmen.



1 Propangasflasche
2 Beikraut
3 Erde
4 erhizte Umluft
5 Plattenstrahlung
6 austretendes Abgas

Bild 4 - 2: Schematischer Aufbau zur Energiebilanz

Um die Rechnung übersichtlicher zu gestalten, werden alle Energiemengen auf eine Quadratmeter bezogen. Als Ausgangswert dient dabei wieder der durchschnittliche Flüssiggasverbrauch von 50 kg pro Hektar Ackerfläche (siehe auch Kapitel *4.1. Größenordnungen*). B_P ist die Brennstoffmasse für 1 m^2. Alle anderen Werte sind Schätzungen oder Mittelwerte (aus eigenen Messungen entnommen, Kapitel *6. und 8. Messungen am Gerät*). Das macht sich natürlich bei Temperaturverteilungen und Wärmekapazitäten bemerkbar, ist aber für meine Zwecke sinnvoll. Die Umgebungstemperatur setze ich auf $T_U = 10°C$. Abweichungen vom Normzustand werden nicht konsequent berücksichtigt.

$$50\,kg\,ha^{-1} = 5 \cdot 10^{-3}\,kg\,m^{-2} = 5\,g\,m^{-2} \quad \Longrightarrow \quad B_P = 5\,g$$

0. Gesamtenergie

Bei der Verbrennung von B_P wird die Wärmemenge Q_P frei.

$$Q_P = B_P \cdot H_u \tag{4·13}$$

Dabei ist:
Heizwert $H_u = 46{,}343 \cdot 10^3\ \mathrm{kJ\ kg^{-1}}$

$$Q_P = 5 \cdot 10^{-3}\ \mathrm{kg} \cdot 46{,}343 \cdot 10^3\ \mathrm{kJ\ kg^{-1}} = 231{,}72\ \mathrm{kJ}$$

1. Propangasflasche

Die Verdampfungsenergie Q_V (siehe auch Kapitel *3.1. Der Energieträger Flüssiggas*) kann bis zu einem bestimmten Maß aus der Umgebungsluft entnommen werden. Da aber die geziehlte Zuführung die Zuverlässigkeit erhöht, nehme ich diesen Posten mit in die Energiebilanz auf.

$$Q_V = B_P \cdot r_P \tag{4·14}$$

Dabei ist:
spezifische Verdampfungswärme von Propan $r_P = 378{,}58\ \mathrm{kJ\ kg^{-1}}$

$$Q_V = 5 \cdot 10^{-3}\ \mathrm{kg} \cdot 378{,}58\ \mathrm{kJ\ kg^{-1}} = 1{,}89\ \mathrm{kJ}$$

2. Beikraut

Das Beikraut findet den sicheren Tod, wenn es durch und durch eine Temperatur von $T_T = 60°C$ aufweist (dazu auch Kapitel *2.4. Das Vorauflaufverfahren* und *5. Versuch zum Pflanzentod*). Die Obergrenze für den Beikrautbestand liegt bei $m_B = 50\ \mathrm{g}$. Da eine Pflanze zum überwiegenden Anteil aus Wasser besteht, kann das Beikraut in erster Näherung als Wasser betrachtet werden. Q_B ist dann die Todesdosis an Wärme für die Beikräuter auf einem Quadratmeter Acker.

$$Q_B = c_B \cdot m_B \cdot \Delta\vartheta_B \qquad \Delta\vartheta_B = T_T - T_B$$

$$Q_B = c_B \cdot m_B \cdot (T_T - T_B) \tag{4·15}$$

Dabei ist:
Temperatur des Beikrauts $T_B = T_U = 10°C$
spezifische Wärmekapazität von Beikraut $c_B = c_w = 4{,}18\ \mathrm{kJ\ kg^{-1}\ K^{-1}}$ [9, S. 8]

$$Q_B = 4{,}18\ \mathrm{kJ\ kg^{-1}\ K^{-1}} \cdot 0{,}05\ \mathrm{kg} \cdot 50\ \mathrm{K} = 10{,}45\ \mathrm{kJ}$$

3. Erde

Da die Flamme direkt auf den Boden gerichtet ist, dringt die Wärmeenergie Q_E in die Erde ein. BOLDT hat in seinen Versuchen eine Erwärmung in der Tiefe $h_E = 5\,mm$ von bis zu 5 K gemessen. Die Temperatur der Bodenoberfläche hatte sich dagegen um 100 K gesteigert [10, S. 30/31]. Da wegen der schlechten Wärmeleitung von Erde von einem sehr steilen Temperaturgradienten ausgegangen werden muß, bleibt nur, die mittlere Temperaturdifferenz $\Delta\vartheta_E$ abzuschätzen. Der Boden wird als Tonboden angesehen, da ich über keine genaueren Stoffwerte für Ackerboden verfüge.

$$Q_E = c_E \cdot m_E \cdot \Delta\vartheta_E$$

$$m_E = \rho_E \cdot V_E$$
$$V_E = h_E \cdot A$$

$$Q_E = c_E \cdot \rho_E \cdot h_E \cdot A \cdot \Delta\vartheta_E \qquad (4\cdot16)$$

Dabei ist:

spezifische Wärmekapazität von Erde	$c_E = 0{,}88\,kJ\,kg^{-1}\,K^{-1}$	[10, S. 6]
Dichte von Erde	$\rho_E = 1450\,kg\,m^{-3}$	[10, S. 6]
Höhe der Wärmeeinflußzone	$h_E = 0{,}005\,m$	
mittlere Temperaturdifferenz in der Erde	$\Delta\vartheta_E = 25\,K$	

$$Q_E = 0{,}88\,kJ\,kg^{-1}\,K^{-1} \cdot 1450\,kg\,m^{-3} \cdot 0{,}005\,m \cdot 1\,m^2 \cdot 25\,K = 159{,}5\,kJ$$

4. Erhitzte Umluft

Auf Grund der Fahrgeschwindigkeit und aus natürlicher Konvektion ergibt sich ein über die Abdeckplatte streichender Umluftstrom. Die Wärmemenge Q_U, die diese Umluft während der Bearbeitungszeit von $1m^2$ aufnimmt, kann mit Hilfe der Wärmeübergangszahl α berechnet werden. Da mir keine genaueren Angaben zu den Strömungsverhältnissen vorliegen, kann ich nur die Größenordnung abschätzen.

$$Q_U = \alpha_D \cdot A \cdot \Delta\vartheta_U \cdot t \qquad (4\cdot17)$$

$$t = \frac{A}{b \cdot v} \qquad (4\cdot18)$$

$$\Delta\vartheta_U = T_D - T_U$$

$$Q_U = \alpha_D \cdot A \cdot (T_D - T_U) \cdot t \qquad (4\cdot19)$$

Dabei ist:

Wärmeübergangszahl Platte-Umluft	$\alpha_U = 50\,W\,m^{-2}\,K^{-1}$
Temperatur der Abdeckplatte	$T_D = 400°C$
Breite des Abflammgerätes	$b = 1{,}7\,m$
Arbeitsgeschwindigkeit	$v = 1{,}1\,m\,s^{-1}$

$$t = \frac{1\,m^2}{1{,}7\,m \cdot 1{,}1\,m\,s^{-1}} = 0{,}53\,s$$

$$Q_U = 50\,W\,m^{-2}\,K^{-1} \cdot 1\,m^2 \cdot (400°C - 10°C) \cdot 0{,}53\,s = 10{,}34\,kJ$$

5. Plattenstrahlung

Wie jeder Körper sendet auch die Abdeckplatte Temperaturstrahlung aus. Mit Hilfe der "Stefan-Bolzmann-Gleichung" läßt sich die abgestrahlte Energie Q_S erfassen. Da die Temperatur des strahlenden Körpers in der vierten Potenz eingeht, ist die verwendente mittlere Temperatur T_S nur ein Anhaltswert.

$$Q_S = \dot{q}_S \cdot A \cdot t \qquad (4 \cdot 20)$$

$$\dot{q} = \varepsilon \cdot C_S \cdot \left(\frac{T_S}{100}\right)^4 \qquad (4 \cdot 21)$$

$$Q_S = \varepsilon \cdot C_S \cdot \left(\frac{T_S}{100}\right)^4 \cdot A \cdot t \qquad (4 \cdot 22)$$

Dabei ist:

Emissionsverhältnis für Eisen, stark verrostet	$\varepsilon = 0{,}85$	[19, S. 120]
Strahlungskonstante des schwarzen Körpers	$C_S = 5{,}67\,W\,m^{-2}\,K^{-4}$	[19, S. 119]
Temperatur der Abdeckplatte	$T_S = T_D = 400°C = 673{,}15\,K$	

$$Q_S = 0{,}85 \cdot 5{,}67\,W\,m^{-2}\,K^{-4} \cdot \left(\frac{673{,}15\,K}{100}\right)^4 \cdot 1\,m^2 \cdot 0{,}53\,s = 5{,}24\,kJ$$

6. Austretendes Abgas

Alle bisher ausgerechneten kJ sind aus dem bei der Verbrennung entstandenen Abgas abgezwackt. Die Energie Q_A it also der letzte Rest, der dem Abgas geblieben ist, wenn es am Ende der Abdeckplatte erscheint.

$$Q_A = c_A \cdot m_A \cdot \Delta\vartheta_A \qquad (4\cdot23)$$

$$m_A = m_P + m_L$$

$$m_L = \rho_L \cdot V_L = \frac{\rho_P}{D_n} \cdot L_{min} \cdot V_P = m_P \cdot \frac{L_{min}}{D_n}$$

$$m_A = m_P + m_P \cdot \frac{L_{min}}{D_n} = m_P \cdot \left(1 + \frac{L_{min}}{D_n}\right)$$

$$\Delta\vartheta_A = T_A - T_U$$

$$m_P = B_P$$

$$Q_A = c_A \cdot B_P \cdot \left(1 + \frac{L_{min}}{D_n}\right) \cdot (T_A - T_U) \qquad (4\cdot24)$$

Dabei ist:

spezifische Wärmekapazität vom Abgas	$c_A = c_{L,250} = 1{,}034\ kJ\ kg^{-1}\ K^{-1}$	[19, S.198]
Theoretischer Luftbedarf von Propan	$L_{min} = 24{,}36\ m^3\ m^{-3}$	
Dichteverhältnis Luft zu Propan	$D_n = 1{,}55$	
Temperatur der austretenden Abgase	$T_A = 450°C$	

$$Q_A = 1{,}034\ kJ\ kg^{-1}\ K^{-1} \cdot 5 \cdot 10^{-3}\ kg \cdot \left(1 + \frac{24{,}36}{1{,}55}\right) \cdot (450°C - 10°C) = 38{,}03\ kJ$$

Die folgende Tabelle gibt eine Übersicht über alle berechneten Größen.

Wärmeenergie	in kJ	in %
0. Q_P	231,72	100
1. Q_V	1,89	1
2. Q_B	10,45	5
3. Q_E	159,5	69
4. Q_U	10,34	4
5. Q_S	5,24	2
6. Q_A	38,03	16
$\Sigma Q_{1,6}$	225,45	97
ΔQ	6,27	3

Bild 4 - 3: Tabelle zur Energiebilanz

Die Summe der berechneten Wärmeenergien $\Sigma Q_{1,6}$ entspricht nicht ganz der bei der Verbrennung freiwerdenden Energie Q_p. Nun ist es allerdings nicht so, daß ich es versäumt habe, das verbleibende ΔQ durch geschicktere Auswahl der mittleren Temperatur der Erderwärmung zu vermeiden. Ich lasse diese Differenz bewußt stehen, um nochmal deutlich zu machen, daß die angenommenen und geschätzen Parameter und Stoffkonstanten innerhalb einer großen Bandbreite schwanken können.

Um die verschiedenen Größenordnungen sichtbar zu machen, bietet sich ein Flußbild an.

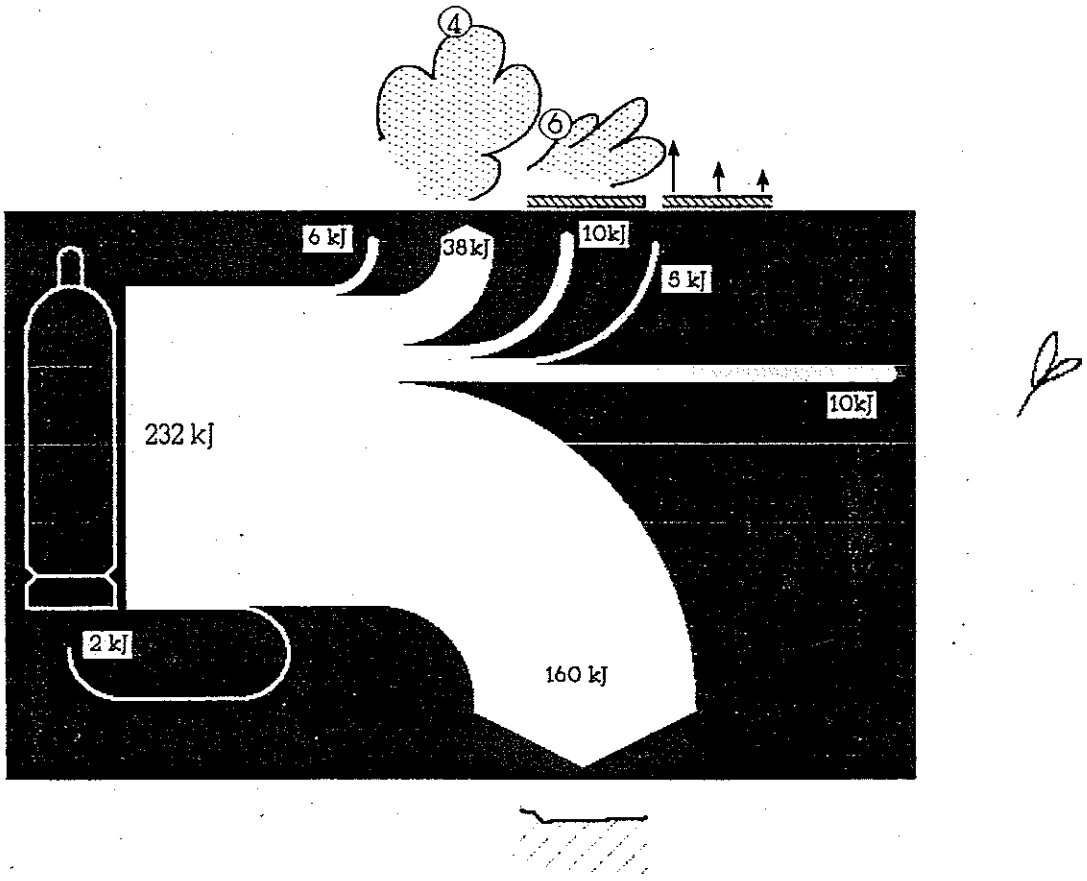


Bild 4 - 4: Flußbild der Wärmeenergie

Auf den ersten Blick ist sofort zu erkennen, daß nur die Bodenerwärmung und das restliche Abgas eine tatsächliche Rolle spielen. Das eine Prozent für die Verdampfung und die Verluste an der Abdeckplatte scheinen geradezu vernachlässigbar. Tatsächlich ist jedoch zu bedenken, daß hier die einzigen Verbesserungsquellen auszumachen sind. Dazu siehe auch Kapitel *7. Veränderungen am Gerät.*

Als Abschluß noch der Versuch, einen Wirkungsgrad zu bestimmen:

Ausgehend von der aufgewandten Energie Q_P und der für das Absterben der Beikräuter nötigen Energie Q_B ergibt sich der Wirkungsgrad η.

$$\eta = \frac{Q_B}{Q_P} \tag{4·25}$$

$$\eta = \frac{10{,}45\,\text{kJ}}{231{,}72\,\text{kJ}} = 0{,}045 = 4{,}5\,\%$$

Dieser Wirkungsgrad ist aus technischer Sicht korrekt berechnet und gleichzeitig extrem niedrig. Da kann mensch sich schon fragen, ob so ein Gerät überhaupt sinnvoll sein kann. Dagegen ist zu setzen, daß die Anwendung des Vorauflaufabflammens eine immense Anzahl an Arbeitsstunden und Geräteeinsatz unnötig macht. Um tatsächlich verschiedene Verfahren zu beurteilen, müßte der Gesamtwirkungsgrad von der Saatbettbestellung bis zur Ernte erstellt werden. Der hier berechnete Wirkungsgrad soll jedoch zu Geräteverbesserungen und prinzipiellen Neulösungen aufmuntern.

4.3. Das Abflammgerät als Wärmetauscher

Im Grunde genommen ist jede Flamme ein Wärmetauscher. Die im Abgas enthaltene Wärmeenergie wird zu einem bestimmten Anteil an die Umgebung abgegeben, ausgetauscht. Das besondere ist allerdings, daß die Wärmequelle am selben Ort sitzt wie der Wärmetauscher.
Da ich den Begriff "Wärmetauscher" weiter benutzen werde, ist es sinnvoll, das Abflammgerät mit Hilfe einiger Idealisierungen auf dem Papier in einen solchen umzuwandeln.
Ich erinnere an den Geräteaufbau, wie er im Kapitel *4.2. Energiebilanz und Wirkungsgrad* bereits verwendet wurde.

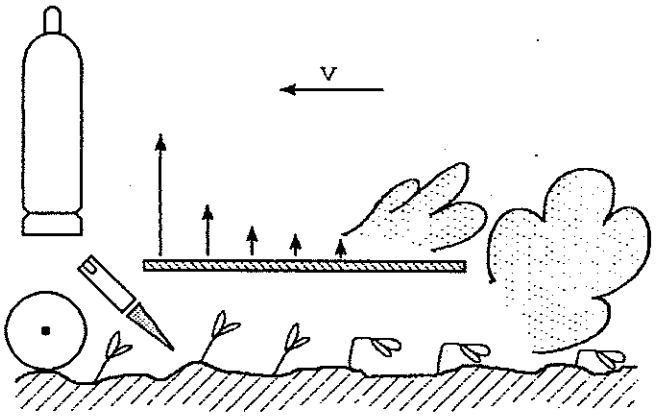


Bild 4 - 5: Schematischer Aufbau des Abflammgerätes

Der erste Schritt besteht darin, das Gerät nur noch auf den "heißen" Teil zu reduzieren. Gleichzeitig wird der Erdboden optimal eingeebnet und die Pflanzen fallen weg. Das ist deshalb zulässig, da aus dem vorhergehenden Kapitel ersichtlich wurde, daß der Löwenanteil der Energie auf den Boden übertragen wird (siehe speziell das *Flußbild* auf Seite 41).

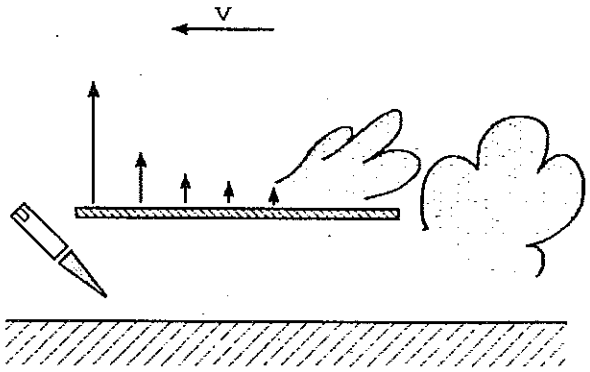


Bild 4 - 6: Der "heiße" Teil des Abflammgerätes

Bislang war ein wichtiger Punkt, daß sich das Abflammgerät gegenüber dem Erdboden mit einer bestimmten Arbeitsgeschwindigkeit v bewegt. Für die Betrachtung als Wärmetauscher genügt es dagegen, wenn der Boden als Trennplatte verstanden wird. Auf der unteren Seite des Bodens wird die Wärme entsprechend kontinuierlich abgeführt. (In einem Versuchsstand könnte das durch wasserdurchströmte Rohre simuliert werden.)

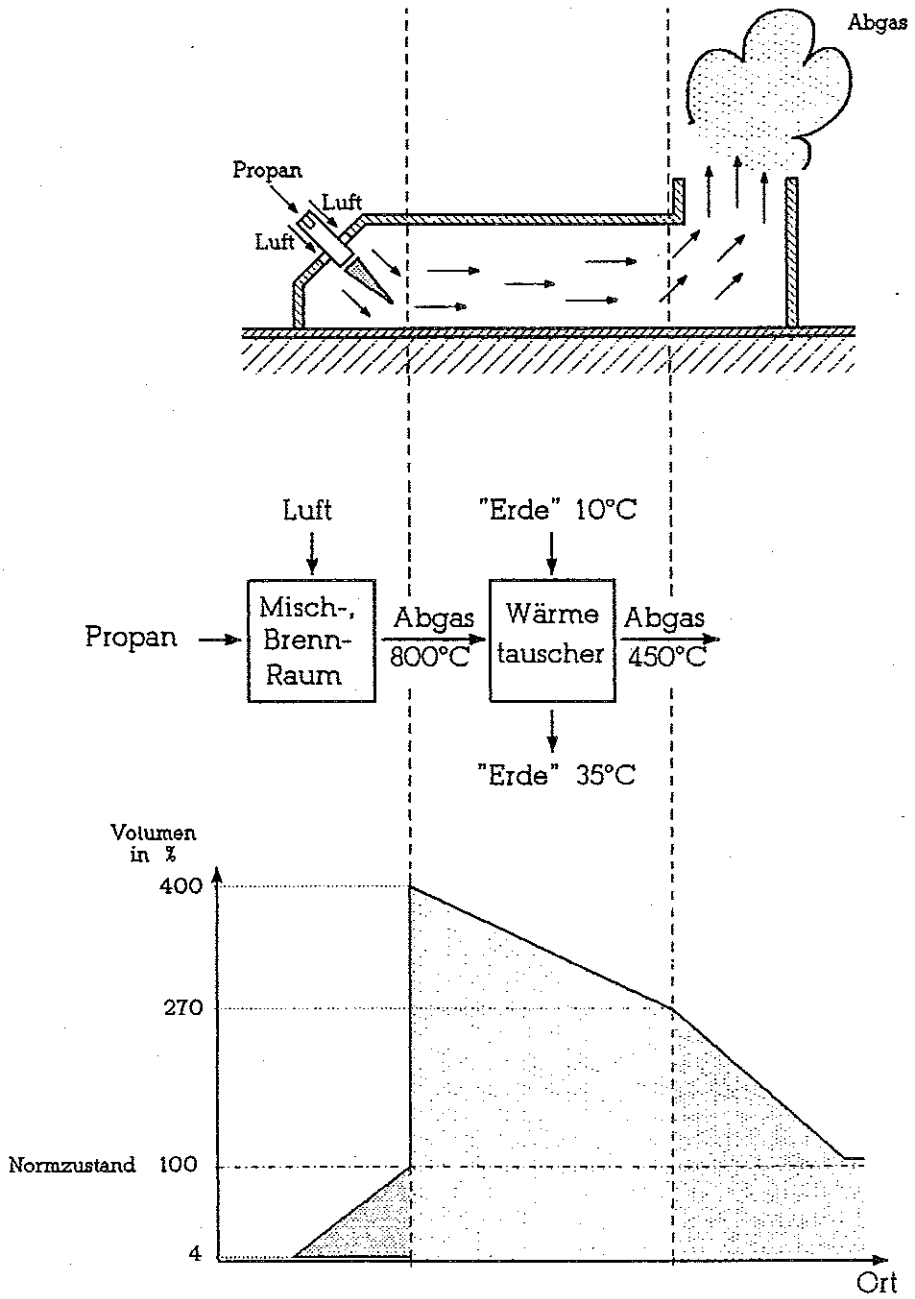


Bild 4 - 7: Der "ideale" Wärmetauscher

Da das Gerät nun fest steht, kann ich auch die "Undichtigkeiten" beseitigen. Vor dem Brenner bleiben Luftspalte und am Ende der Abdeckplatte sorgt ein "Mini-Kamin" für den Austritt der Abgase aus dem Wärmetauscher. Somit ist der Verbrennungs- und Austauschvorgang weitgehend vor Außeneinflüssen, wie z.B. dem Wind, geschützt.

Die Wärmeverluste an der Abdeckplatte lasse ich der Übersichtlichkeit halber weg.

Die eingezeichneten Pfeile stehen für die Grund-Strömungsrichtung von Brennstoff, Luft und Abgas. Allerdings muß ich darauf hinweisen, daß damit nicht automatisch von einer laminaren Strömung ausgegangen werden kann. Vielmehr erzeugt die Flamme ein sehr turbulentes Strömungsfeld, das sich durch den Wärmetauscher bewegt.

Im obigen Diagramm ist die Entwicklung der Volumina innerhalb des Abflammgerätes linearisiert dargestellt.

Zunächst saugt das Propan (4 % des stöchiometrischen Mischgases) die Umgebungsluft an. Auf die Aufspaltung der Vormischflamme (siehe Kapitel *3.2. Verbrennung*) verzichte ich. Die Verbrennung erfolgt beim Erreichen der vollständigen Mischung (hier 100 %) und ist durch einen Volumensprung auf 400 % kenntlich gemacht. Durch die freiwerdende Hitze nimmt das Volumen der Abgase um das 4-fache zu. Die Abgase verlassen damit den Misch- und Brennraum und gelangen in den Wärmetauscher. In diesem Bereich wird soviel Energie abgegeben, daß sich das Volumen auf etwa 270 % verringert. Der "Boden" wärmt sich dagegen auf. Wenn das Abgas dann den Wärmetauscher verläßt, kühlt es sich sehr schnell an der Umgebungsluft auf die Ausgangstemperatur ab. Da die Abgase jedoch ein etwas größeres Volumen als die beiden Eingangsgase zusammen haben, bleibt der Wert bei leicht über 100 % (betrachtet im Normzustand).

Diese reduzierte Modellvorstellung soll zwei Dinge verdeutlichen:

- Die eigentliche Arbeit des Abflammgerätes besteht darin, eine bestimmte Wärmemenge an die Pflanzen weiterzugeben. Der dazu benötigte Wärmetauscher ist zunächst von der Wärmequelle zu trennen. Andere Energieträger oder andere Wärmetauscherideen könnten die tatsächliche räumliche Trennung sinnvoll oder notwendig machen.

- Um den Wärmetauscher optimal zu betreiben, muß einerseits dem Abgas die Möglichkeit gegeben werden, einen großen Teil seiner Wärme an die Pflanzen (und natürlich auch an den Boden) abzugeben. Dabei nimmt die Temperaturdifferenz, und damit die treibende Kraft des Wärmeübergangs, ab, die Verweilzeiten werden überproportional länger. Andererseits muß das Abgas den Wärmetauscher zügig durchqueren, damit sich kein Stau im Misch- und Brennraum einstellt (dazu Kapitel *4.4. Strömungstechnische Betrachtung*). Besonders die selbstansaugenden Vormischflammen reagieren hier sehr heftig, da sie den Mischvorgang und die weitere Abgasströmung durch den Stömungsimpuls des Propans bestreiten müssen.

4.4. Strömungstechnische Betrachtungen

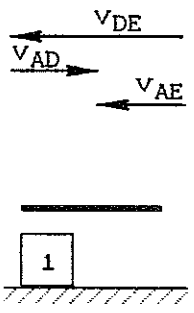
Aus Kapitel *4.3. Das Abflammgerät als Wärmetauscher* geht bereits hervor, daß erst die optimale Strömung der Abgase durch den Wärmetauscher die erwünschte Wärmeübertragung ermöglicht.

Ich werde mich nun allerdings nicht mit Fragen nach turbulenten Zonen und deren Verhalten beschäftigen, da das den Rahmen dieser Studienarbeit sprengen würde. Vor allem interessiert mich die Staufrage. Wie müssen Arbeitsgeschwindigkeit und Abgasgeschwindigkeit aufeinander abgestimmt sein, damit es nicht zum Stau oder sogar zum Verlöschen der Flamme kommt? Ein Abgasstau führt zu mangelhafter Verbrennung und stark schwankenden Hitzebereichen, die unterschiedlich schnell strömen. Dadurch wird die Zuverlässigkeit der Abflammarbeit vermindert. Wie lange bleibt das Abgas unter der Abdeckplatte?

Um den Lösungen dieser Fragen etwas näher zu kommen, greife ich wieder auf eine Modellvorstellung zurück. Ich betrachte nur den "Wärmetauscher", bestehend aus dem Erdboden, dem Abgas und der Abdeckplatte.

Um die kontinuierliche Bewegung von Abdeckplatte und Abgas sichtbar zu machen, betrachte ich fünf aufeinanderfolgende Zeitpunkte (Z1 - Z5). Die zum jeweiligen Zeitpunkt "entstehende" Abgaswolke ist durch die zugehörige Ziffer gekennzeichnet. So ist verfolgbar, wo sich z.B. "Wolke 1" zum Zeitpunkt Z4 befindet. Die ersten 5 verschiedenen Fälle unterscheiden sich durch die Relativgeschwindigkeit des Abgases gegenüber der Abdeckplatte v_{AD}. Fall Nummer 6 entspricht Nummer 5, weist aber eine größere Wolke auf. Die Geschwindigkeit der Abdeckplatte gegenüber dem Erdboden v_{DE} ist für alle Fälle die gleiche.

Die Relativgeschwindigkeiten entsprechen folgender Beziehung:



$$v_{AD} + v_{DE} = v_{AE}$$

Abdeckplatte (D)
Abgas (A)
Erdboden (E)

Bild 4 - 8: Begriffsfestlegung für Strömungsbetrachtung

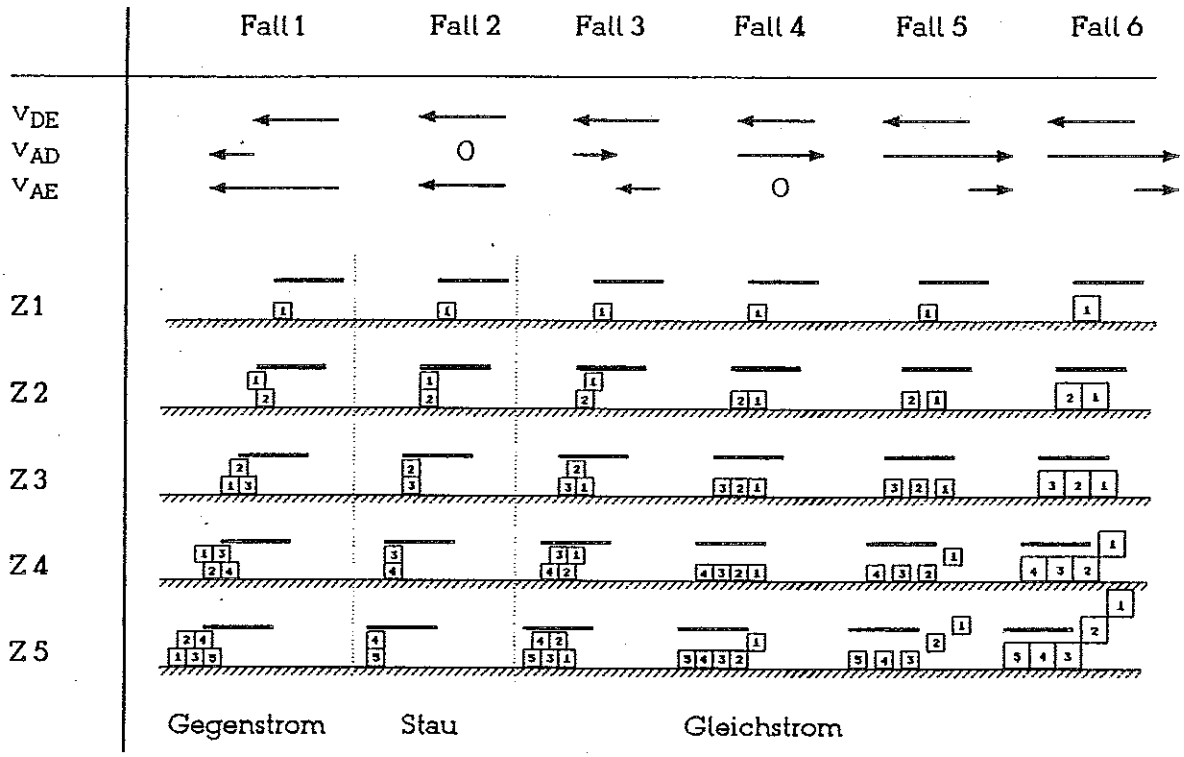


Bild 4 - 9: Die "Abgaswolken" im Wärmetauscher

Fall 2:

Das Abgas strömt zwar aus, bewegt sich aber mit der Abdeckplatte mit. Die aufeinanderfolgenden Wolken lagern sich übereinander und behindern die Verbrennung. Die Abgase bleiben zwar unter der Platte, aber der Boden wird nur sehr kurzfristig erwärmt, da die Sammelwolke sofort weiterzieht. Das ist die extremste Form des Staus.

Fall 3:

Das Abgas bewegt sich gegenüber der Abdeckplatte nach hinten, gegenüber dem Erdboden jedoch nach vorne. Es bildet sich ein Wärmepolster unter der Platte, das sich langsam nach hinten durcharbeitet. Immer noch Staugefahr.

Fall 4:

Wie beim "Eierlegen" bleiben die Abgaswölkchen auf ihrem Platz und bilden einen Wärmeteppich. Sie verweilen ein Maximum an Zeit auf dem Boden und tauschen dabei ihre Energie aus.

Fall 5:

Die "Lücken" zwischen den Wolken veranschaulichen, daß das Abgas jetzt sehr schnell durch den Wärmetauscher strömt. Bevor es noch richtig an Wärmetauschen denken kann, ist es bereits wieder draußen. Der Boden ist auf der ganzen Länge der Abdeckplatte relativ hohen Temperaturen ausgesetzt.

Fall 6:

Um die Lücken zu schließen gibt es die Möglichkeit, mehr Abgas pro Zeiteinheit zu erzeugen. Damit werden die Temperaturen noch höher, der Gasverbrauch pro Fläche steigt und die Staugefahr nimmt wieder zu.

Fall 1:

Die Geschwindigkeit der Abgase hat die gleiche Richtung wie die Geschwindigkeit der Abdeckplatte. Damit wandern die Wolken in Arbeitsrichtung unter der Platte heraus. Durch die Vergrößerung der Geschwindigkeit v_{AD} lassen sich die Fälle F 3, F 4 usw spiegelgleich erzeugen.

F1 ist der Funktion nach ein Gegenstrom-Wärmetauscher. Die bereits etwas abgekühlten Wolken treffen auf den "kalten" Boden. Die "neue, heiße" Wolke trifft auf den durch die vorangegangenen Wolken vorgewärmten Boden. Es ergeben sich also immer Temperaturdifferenzen zwischen dem Boden und dem darüber strömenden Abgas. Das ist für die optimale Wärmeübertragung vorteilhaft. Sinnvollerweise müßte der Aufbau des Geräts geändert werden. Der Brenner müßte am hinteren Ende der Platte angebracht sein, damit die Platte ihre Funktion erfüllen kann, nämlich das Abgas am Boden zu halten. Dabei entsteht das Problem, daß die austretenden Abgase den Schlepper und den Schlepperfahrer beeinträchtigen. Des weiteren muß sichergestellt werden, daß der Brenner nicht einen Teil des Abgases im Vorbeifahren gleich wieder ansaugt. Für eine Gegenstrom-Abflammgerät müßte also ein vollkommen abgeändertes technisches Konzept erarbeitet werden.

Bei F3 – F 6 handelt es sich um das Gleichstrom-Prinzip. Die höchste Temperatur des Abgases und die niedrigste Temperatur des Bodens treffen aufeinander. Am deutlichsten wird das bei F4. Die Temperaturdifferenz wird kleiner indem sich die Bodentemperatur immer mehr der darüber liegenden Abgastemperatur angleicht. Die verbleibende Temperaturdifferenz gegenüber dem "kalten" Boden wird dabei verschenkt. Je schneller sich allerdings das Abgas über den Boden bewegt, desto weniger Energie kann es in der verbleibenden Zeit abgeben. Ob Gegen- oder Gleichstrom fällt dann nicht so sehr ins Gewicht. Speziell für das Abflammen mit "niedrigen" Temperaturen wäre allerdings das Gegenstromprinzip vorzuziehen.

Für das vorliegende Konzept ist die Einstellung zwischen F5 und F6 anzustreben. Eine etwas abgesenkte Abdeckplatte sorgt dafür, die Lücken zu schließen. Allerdings darf das nicht soweit betrieben werden, daß sich wiederum Staus bilden.

Auf eines muß allerdings noch hingewiesen werden. Ich habe den idealen, reibungsfreien Fall für die sich bewegende Abgaswolke angenommen. Das ist jedoch tatsächlich nur ideal. Die Gasreibung an der Abdeckplatte und am rauhen Erdboden erzeugt Turbulenzen, die die Strömung des Abgases stetig verringern. Es muß also mit etwas erhöhten Ausströmgeschwindigkeiten gearbeitet werden, damit das Gas nicht vor dem Austritt "hängenbleibt" und dort einen Rückstau hervorruft. Der Einsatz eines Luftgebläses mit den entsprechenden Brennern scheint hier von großem Vorteil.

4.5. Theorie zum Pflanzentod

Wenn mensch das erste Mal auf die Abflammtechnik stößt, kommt sofort die Frage auf, wie das denn nun eigentlich funktioniert, daß die Pflanzen absterben. Aus der Literatur ist zu entnehmen, was bereits in Kapitel *2.3. Abflammgeräte im Überblick* steht. Das Eiweiß denaturiert, die Zellen platzen, die Pflanze vergiftet sich selbst. Genauere Angaben über die äußeren Bedingungen, die herrschen müssen, damit es zu diesen Prozessen in der Pflanze kommt, finden sich allerdings wenig. WAWRA schreibt [3, S. 38]: "Biologische Grundlage der Abflammwirkung auf Pflanzen ist die Tatsache, daß pflanzliches Eiweiß bei kurzzeitigen Temperaturen zwischen 50 und 60°C koaguliert, also gerinnt." Dazu WALTER [17, S. 86]: "Je nach Pflanzenart sind die Dauer und Höhe der Wärmeeinwirkung verschieden. Die Temperatur sollte aber mindestens 50 bis 70°C in der Pflanzenzelle erreichen." Auch HOFFMANN hält sich sehr zurück [8, S. 14/15]: "Nach einem noch genauer zu definierenden Temperatur-Zeit-Gesetz muß die Temperatureinwirkung ausreichend lange und intensiv erfolgen. .... Während in einem Falle bei jungen, dünnwandigen Zellen eine Erwärmung auf 94°C während der Dauer von 1/10 s zur Einleitung des Zelltodes als ausreichend angesehen wird, werden an anderer Stelle 110°C bei 1/10 s Einwirkungsdauer empfohlen. Es wird auch angeführt, daß Borkenzellen wegen ihrer starken Wärmeisolationsfähigkeit eine Temperatur bis zu 310°C während der Dauer einer Sekunde vertrügen."

Immerhin taucht der Begriff Temperatur-Zeit-Gesetz auf. Allerdings ist nicht angegeben, mit Hilfe welcher Versuchsaufbauten und Meßverfahren die angegebenen Temperaturen ermittelt wurden, was unter "kurzzeitig" zu verstehen ist. Außerdem nützen die Temperaturen in der Pflanze der AnwenderIn wenig, da sie ja mit den Temperaturen der Umgebung, sprich dem heißen Abgas, hantiert. HOFFMANN argumentiert, daß der PraktikerIn sowieso nur die sofortige Überprüfung durch die Fingerdruckprobe zur Verfügung steht. Die Unterschiede zwischen den Temperatur-Zeit-Gesetzen der verschiedenen Pflanzen seien zu groß, um daraus verwertbare Erkenntnisse zu ziehen.

Ich halte es jedoch für notwendig, zumindest zu versuchen, dem Temperatur-Zeit-Gesetz durch eine Modellrechnung und deren experimentellen Überprüfung näher zu kommen. Denn nur durch diese Information läßt sich entscheiden, ob z.B. "Niedertemperaturverfahren" zum Einsatz kommen könnten. Der technische Aufwand für eine Temperaturregelung unter der Abdeckplatte ist eventuell auch noch tragbar.

Die Essenz aus dem bis hier Ausgeführten heißt für mich daher:

Eine Pflanze stirbt, wenn sich ihre Zellen einmal auf ca. 60°C erwärmt haben. Die Wärmeenergie, die diese Temperaturerhöhung bewirkt, wird vor allem durch Konvektion vom Abgas auf die Pflanze übertragen. Wie lange die Pflanze dabei einer bestimmten Temperatur ausgesetzt werden muß, läßt sich durch das Temperatur-Zeit-Gesetz beschreiben. Der Versuch, dieses Gesetz zu formulieren, ist das Thema dieses Kapitels.

Die Fragestellung läßt sich in drei Schritte zerlegen.

- Wie läßt sich der **Wärmeübergang** vom Abgas auf die Pflanzenoberfläche beschreiben?

- Wie läßt sich die **Wärmeleitung** von der Pflanzenoberfläche bis in die Pflanzenmitte beschreiben?

- Welche **Wärmemenge** muß auf und in die Pflanze übertragen werden, damit sie ausreichend geschädigt ist?

Wärmeübergang

Der Wärmeübergang vom bewegten Abgas mit der mittleren Temperatur T_A auf die Blattoberfläche mit der Temperatur T_B wird folgendermaßen definiert:

$$Q_\alpha = \alpha \cdot A \cdot (T_A - T_B) \cdot t \qquad (4\cdot26)$$

In Worten: Wenn eine Temperaturdifferenz zwischen Abgas und Blattoberfläche vorhanden ist, dann geht während der Zeit t die Wärmemenge Q_α vom Abgas auf die Blattoberfläche A über. Der Wärmeübergangskoeffizient α ist ein Maß dafür, wie gut der Energieaustausch funktioniert.

Dabei gibt es die entscheidende Bedingung, daß die Temperaturen sich nicht verändern. Das Abgas verfügt also über ausreichend große Wärmereserven und die Blattoberfläche führt die Wärme sofort ins unbegrenzte Innere weiter. Das ist der Fall der stationären Wärmeübertragung.

Tatsächlich liegt hier jedoch ein instationärer Vorgang vor. Ziel ist es ja gerade, die Pflanze inclusive Oberfläche aufzuheizen und somit ihre Temperatur entscheidend zu erhöhen. Da die absolute Zieltemperatur der Pflanze jedoch immer noch relativ niedrig gegenüber der Abgastemperatur ist und da die instationäre Rechnung ungleich komplizierter und aufwendiger ist (es handelt sich dabei um eine Differenzialgleichung), werde ich zunächst überprüfen, ob die stationär berechneten Werte nicht doch hinreichend aussagefähig sind.

Wärmeleitung

Die Weiterleitung der Wärmeenergie von der Blattoberfläche bis zur Blattmitte läßt sich wie folgt beschreiben:

$$Q_\lambda = \frac{\lambda}{s} \cdot A \cdot (T_{Bo} - T_{Bm}) \cdot t \qquad (4 \cdot 27)$$

In Worten: Wenn eine Temperaturdifferenz zwischen Blattoberfläche und Blattmitte vorhanden ist, dann wird innerhalb der Zeit t die Wärmemenge Q_λ von der Blattoberfläche A über den Abstand s bis zur Blattmittenfläche A weitergeleitet. Die Wärmeleitfähigkeit λ ist ein materialspezifisches Maß dafür, wie schnell die Wärmeenergie weitergeleitet wird.

Die Einschränkungen dieser Beschreibung sind mit denen des Wärmeüberganges identisch.

Wärmemenge

Die Definition der Wärmemenge wurde bereits in Kapitel *4.1. Größenordnungen* verwendet:

$$Q_c = c \cdot m \cdot (T_T - T_B) \qquad (4 \cdot 28)$$

In Worten: Um die Pflanzenmasse m von der Pflanzentemperatur T_B auf die "Todestemperatur" T_T aufzuheizen, ist die Wärmemenge Q_c notwendig. Die spezifische Wärmekapazität c ist ein materialspezifisches Maß für die Wärmespeicherung.

Hier ist anzumerken, daß die genannten Temperaturen Mittelwerte sind und eine ungleichmäßige Temperaturverteilung innerhalb der Masse nicht berücksichtigen.

Bevor ich die drei Gleichungen ineinander einsetze, um den gesamten Vorgang zu beschreiben, stelle ich das Pflanzenmodell vor, das zugrunde liegt.

Aus dem Pflanzenblatt schneide ich ein quaderförmiges Stück heraus, das durch die Blatthöhe und die Deckelfläche definiert ist. Das Blattstück wird von oben und unten mit Abgas umströmt. Die zur Erwärmung des Blattestückes notwendige Wärmeenergie Q_c wird übertragen und bis zur Mitte weitergeleitet.

Um den Wärmetransport "stationärer" zu gestalten, nehme ich eine Umformung vor.

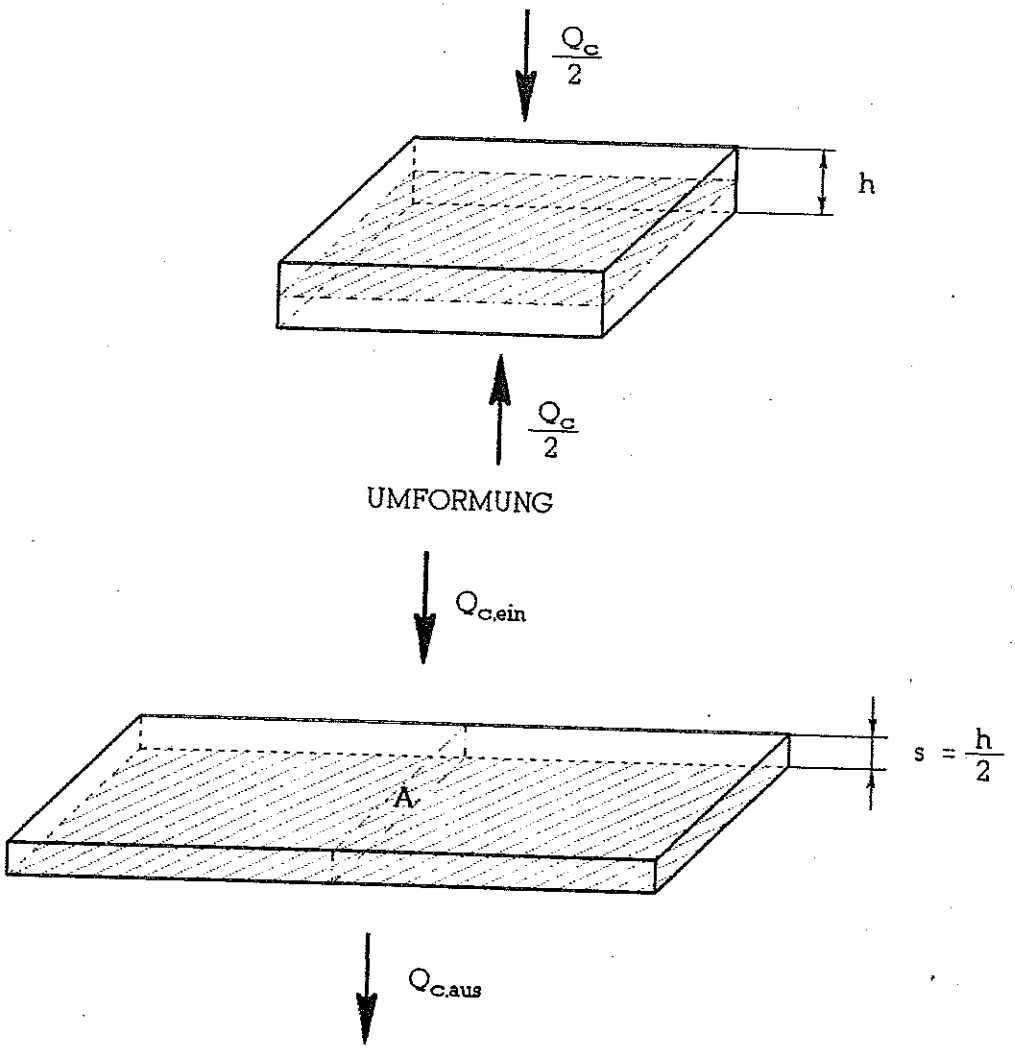


Bild 4 - 10: Modell zur Umformung eines Blattstückes

Das Blattstück wird in der Mitte durchgetrennt und bildet somit eine geschlossene Fläche A.

Die Frage lautet nun: Wie lange dauert es bei bestimmten Temperaturdifferenzen, bis die Wärmemenge Q_c auf die Außenfläche A übertragen und anschließend durch das Blatt der Wandstärke s geleitet wird. Oder: Wenn das letzte Joule der Wärmemenge Q_c die Strecke s überwunden hat und an der "Blattmitte" erscheint, wird die Stoppuhr angehalten.

Dabei wird die Abgastemperatur auf der Blattoberfläche und die "innere" Temperatur auf der Blattmittelfläche als konstant angesehen. Es ergibt sich also ein stationärer "Versuchsaufbau", der nur ein sehr grobes Modell der tatsächlich auftretenden Vorgänge darstellt. Dafür ist die Berechnung sehr einfach, und die Ergebnisse liegen, was das Abflammen betrifft, "auf der sicheren Seite". Denn die stationär berechneten Zeiten sind sicherlich länger als die durch instationäre Rechnunug zu erwartenden.

Mit Hilfe der Dichte ρ läßt sich die Wärmemenge Q_c als Funktion der Wandstärke s darstellen.

$$Q_c = c \cdot m \cdot (T_T - T_B) \tag{4·29}$$

$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{m}{A \cdot s} \tag{4·30}$$

$$Q_c = c \cdot \rho \cdot A \cdot s \cdot (T_T - T_B) \tag{4·31}$$

Der Wärmeübergang und die Wärmeleitung können zum Wärmedurchgang zusammengefaßt werden.

$$Q_k = k \cdot A \cdot (T_A - T_B) \cdot t \tag{4·32}$$

Dabei ergibt sich der Wärmedurchgangskoeffizient k zu:

$$\frac{1}{k} = \frac{1}{\alpha} + \frac{s}{\lambda} \tag{4·33}$$

$$k = \frac{\alpha \cdot \lambda}{\lambda + \alpha \cdot s} \tag{4·34}$$

$$Q_k = \frac{\alpha \cdot \lambda}{\lambda + \alpha \cdot s} \cdot A \cdot (T_A - T_B) \cdot t \tag{4·35}$$

Die durch den Wärmedurchgang übertragene Wärmemenge Q_k soll genau der Wärmemenge Q_c entsprechen, die die "Todesdosis" für das Pflanzengewebe darstellt.

$$Q_k = Q_c \tag{4·36}$$

$$\frac{\alpha \cdot \lambda}{\lambda + \alpha \cdot s} \cdot A \cdot (T_A - T_B) \cdot t = c \cdot \rho \cdot A \cdot s \cdot (T_T - T_B) \tag{4·37}$$

Das Ziel dieser ganzen Berechnung ist ein Zusammenhang zwischen der Abgastemperatur T_A und deren Einwirkzeit t. Deshalb auflösen nach T_A:

$$T_A = \frac{c \cdot \rho \cdot s \cdot (\lambda + \alpha \cdot s) \cdot (T_T - T_B)}{\alpha \cdot \lambda} \cdot \frac{1}{t} + T_B \qquad (4 \cdot 38)$$

Auf den ersten Blick fällt auf, daß die Formel ohne die Blattfläche A auskommt. Die Rechenergebnisse sind damit auf jede Blattgröße übertragbar. Ebenfalls deutlich zu erkennen ist die Vielzahl der Parameter, die zusätzlich noch temperaturabhängig sind. Ist es da überhaupt möglich, Aussagen zu treffen, die über das am Anfang des Kapitels Zitierte hinausgehen?

Deshalb folgende **Einschränkung**:

Ich will nicht alle Parameter so genau erfassen, daß dann ein für jede Pflanze spezifisch richtiges Temperaturgesetz dabei herauskommt. Ich versuche einen Grenzwert zu finden, der die gängigen Verhältnisse beim Vorauflaufverfahren zum Audsdruck bringt. Er soll beschreiben, welche Mindestemperatur des Abgases bei einer bestimmten Verweilzeit nötig ist. Deshalb wähle ich die Parameter so aus, daß sie eher "auf der sicheren Seite" liegen. Die Überprüfung ist im Kapitel *5. Versuch zum Pflanzentod* dokumentiert.

Wahl der Parameter

- Die Pflanze wird als wässrig verstanden
  - ⟹ spezifische Wärmekapazität $c = c_w = 4{,}181\ \mathrm{kJ\,kg^{-1}\,K^{-1}}$ [19, S. 199]
  - ⟹ Dichte $\rho = \rho_w = 988{,}0\ \mathrm{kg\,m^{-3}}$, [19, S. 199]
- Die Wärmeleitfähigkeit liegt zwischen Wasser und Holz
  - ⟹ Wärmeleitfähigkeit $\lambda = \lambda_{Holz} \ldots \lambda_w = 0{,}25 \ldots 0{,}64\ \mathrm{W\,m^{-1}\,K^{-1}}$ [19, S. 199]
- Die mittlere Blatthöhe habe ich selbst gemessen: h = 0,1 mm
  - ⟹ Wandstärke $s = 0{,}5 \cdot h$ $s = 0{,}5 \cdot 0{,}1\ \mathrm{mm} = 0{,}5 \cdot 10^{-4}\ \mathrm{m}$
- Die Pflanzentemperatur wird der Umgebungstemperatur gleichgesetzt. Sowohl für die "Todestemperatur", als auch für den Wärmeübergangskoeffizienten gibt es so gut wie keine zuverlässigen Anhaltspunkte. Die einzigen Werte stammen aus den Versuchen der Ökologen aus den 50er bis 60er Jahren. Dabei ist allerdings anzumerken, daß die Intention dieser Versuche natürlich nicht das Abflammen betraf. Die betrachteten Temperaturen sind wesentlich niedriger und die betrachteten Zeiträume wesentlich länger. Hier spielen dann Reparaturmaßnahmen der Pflanzen gegen die Hitzeschäden bereits eine Rolle. Allerdings wird festgestellt, daß die Pflanzen bei länger anhaltenden (in diesem Fall 5 min) Umgebungstemperaturen von ca. 45°C die Photosynthese und den Stoffwechsel einstellen. Die irreversible Zerstörung, also der Tod der Pflanze, liegt bei Werten unter 60°C. Diese Versuche wurden z.B. von ALEXANDROV durchgeführt und sind auch bei GATES [12, S. 547] nachzulesen.

RASCHKE hat sich bemüht, Werte für die Wärmeübergangskoeffizienten von Pflanzenblättern zu ermitteln, um damit z.B. auf den Wärmeaustausch eines Baumes bei verschiedenen Windstärken hochzurechnen. Unter anderem wurden sehr detaillierte Messungen an "Löschpapierblättern" verschiedenster Formen und Größen im Windkanal durchgeführt. Neben Form, Größe und Oberflächenbeschaffenheit ist die Strömungsgeschwindigkeit ein Hauptfaktor für den Wert des Wärmeübergangskoeffizienten. Bei Geschwindigkeiten zwischen $v = 0{,}1 \ldots 10\,\mathrm{m\,s^{-1}}$ und Blattabmessungen zwischen $l = 0{,}5 \ldots 30\,\mathrm{cm}$ von Blättern einer Form ermittelt RASCHKE Koeffizienten zwischen 7 und $200\,\mathrm{W\,m^{-2}\,K^{-1}}$ [11, S. 205].

⟹ Todestemperatur für Pflanzen $T_T = 60°C$

⟹ Wärmeübergangskoeffizient ($v = 3\,\mathrm{m\,s^{-1}}$, $l = 1{,}0\,\mathrm{cm}$) $\alpha = 100\,\mathrm{W\,m^{-2}\,K^{-1}}$

Damit ist die Funktion, die das Temperatur-Zeit-Gesetz darstellt, ausreichend bestimmt. Um sie auszuwerten, ist es jedoch notwendig, sinnvolle Intervallgrenzen für Zeit und Temperatur zu wählen.

Wahl der Zeit- und Temperaturbereiche

• Für eine umfassende Betrachtung der Schädigung von Pflanzen durch Wärme, betrachte ich den Bereich von 0°C (etwas niedriger als die Umgebungstemperatur $T_U = 10°C$) bis 800°C (eine realistische Temperatur der Propangasflamme bei Verbrennung mit Umgebungsluft).

• Die Wahl eines ausreichenden Zeitintervalls ist etwas aufwendiger. Die Verweilzeit t, in der eine Pflanze einer bestimmten Abgastemperatur ausgesetzt ist, ergibt sich aus der Kombination der Länge l des Wärmetauschers und aus seiner Geschwindigkeit v gegenüber dem Erdboden.

$$t = \frac{l}{v} \tag{4·39}$$

Die maximale Geschwindigkeit auf dem Acker liegt ungefähr bei $v = 5\,\mathrm{km\,h^{-1}} = 1{,}4\,\mathrm{m\,s^{-1}}$. Der kürzeste Wärmetauscher ist eine offene Flamme mit einer Länge von ungefähr $l = 10\,\mathrm{cm} = 0{,}1\,\mathrm{m}$. Damit ergibt sich:

$$t_1 = \frac{0{,}1\,\mathrm{m}}{1{,}4\,\mathrm{m\,s^{-1}}} = 0{,}07\,\mathrm{s}$$

Nicht die minimalste, aber eine gängige Arbeitsgeschwindigkeit liegt bei etwa $v = 2\,\mathrm{km\,h^{-1}} = 0{,}56\,\mathrm{m\,s^{-1}}$. Durch die Wendefähigkeit ist die Länge des Wärmetauschers im Heckanbau auf $l = 1\,\mathrm{m}$ beschränkt. Damit ergibt sich:

$$t_2 = \frac{1\,\mathrm{m}}{0{,}56\,\mathrm{m\,s^{-1}}} = 1{,}79\,\mathrm{s}$$

Von diesen Ergebnissen ausgehend, entscheide ich mich für das Zeitintervall $0\,\mathrm{s} \le t \le 2\,\mathrm{s}$.

Für alle weiteren Betrachtungen gelten die nun festgelegten Parameter. Falls einzelne Werte variiert werden, gebe ich das jeweils gesondert an.

Der Zusammenhang zwischen Abgastemperatur und der Verweil- oder Einwirkzeit ist im folgenden Diagramm graphisch dargestellt.

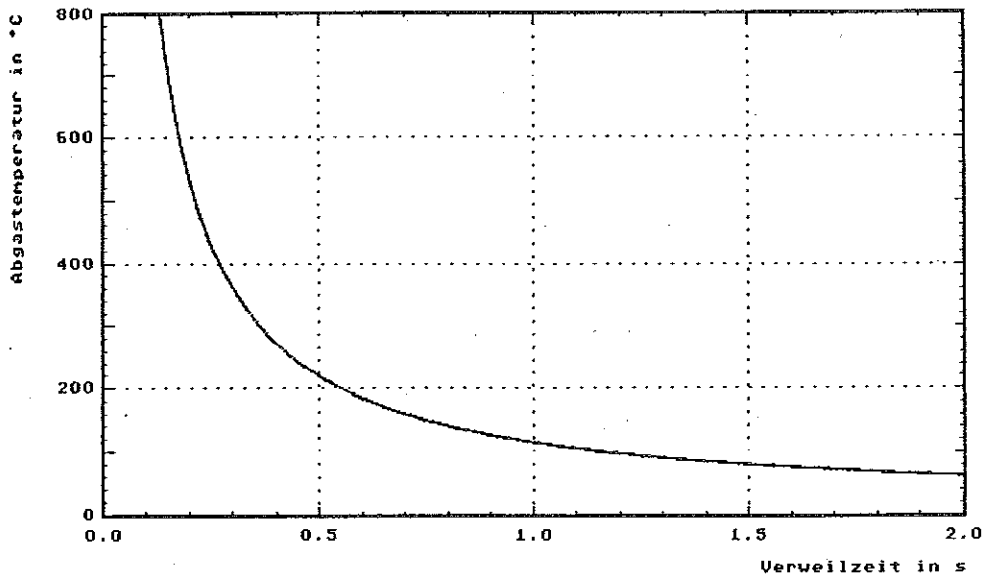


Bild 4 – 11 : Darstellung der Temperatur-Zeit-Abhängigkeit des Pflanzentodes

Beschreibung: Bei kurzen Verweilzeiten von ca. 0,1 s muß die Pflanze mindestens 800°C Abgastemperatur ausgesetzt sein, um die vernichtende Dosis aufnehmen zu können. Stehen nur 200°C zur Verfügung, muß die Zeit bereits auf 0,6 s erhöht werden. Bei deutlich längeren Zeiten, läuft die Kurve gegen $T_B = 10°C$. Das ist natürlich nicht mehr sinnvoll, denn eine Umgebungstemperatur von $T_A = 15°C$ wird die Pflanze niemals auf die nötigen 60°C erwärmen. Zustande kommt diese Annäherung durch die Formulierung des Gesetzes. In die Gleichung geht nur die zu übertragende Wärmemenge Q_c ein. Bei sehr langen Zeiten wird diese in sehr kleinen Energiebröckelchen übertragen. Die absolute Temperatur diese Bröckelchens ist damit jedoch nicht beschrieben.

Daß die Stichstärke der Funktion etwas dicker ist, hat einen Grund. Die Funktion ist eine Überlagerung von verschiedenen, aber sehr ähnlichen Funktionen. Was steckt dahinter?

Die Wärmeleitfähigkeit λ habe ich als Bereich $0{,}25 \ldots 0{,}64\ W\,m^{-1}\,K^{-1}$ angegeben, da keine exakten Werte vorliegen. Was folgt für die Funktionswerte, wenn die Intervallgrenzen eingesetzt werden?

Zur Erinnerung einen Blick auf die Gleichung.

$$T_A = \frac{c \cdot \rho \cdot s \cdot (\lambda + \alpha \cdot s) \cdot (T_T - T_B)}{\alpha \cdot \lambda} \cdot \frac{1}{t} + T_B \qquad (4 \cdot 40)$$

Der durch die Wärmeleitfähigkeit betroffenen Term daraus lautet:

$$\frac{\lambda + \alpha \cdot s}{\lambda} \qquad (4 \cdot 41)$$

Werden nun die zwei Intervallgenzen für λ eingesetzt, so ergibt sich:

für $\lambda_{min,Holz}$ $$\frac{0{,}25\ W\ m^{-1}\ K^{-1} + 100\ W\ m^{-2}\ K^{-1} \cdot 0{,}5 \cdot 10^{-4}\ m}{0{,}25\ W\ m^{-1}\ K^{-1}} = \frac{0{,}255}{0{,}25} = 1{,}02$$

für $\lambda_{max,Wasser}$ $$\frac{0{,}64\ W\ m^{-1}\ K^{-1} + 100\ W\ m^{-2}\ K^{-1} \cdot 0{,}5 \cdot 10^{-4}\ m}{0{,}64\ W\ m^{-1}\ K^{-1}} = \frac{0{,}645}{0{,}64} = 1{,}008$$

Deutlich zu erkennen ist, daß die durch die verschiedenen Wärmeleitfähigkeiten bewirkte Funktionsstreckung extrem klein ist. Sie liegen deshalb im Diagramm so gut wie aufeinander. Hier liegt also der Fall vor, daß durch die sehr geringe Wandstärke des Blattes, der Zeitanteil für die Wärmeleitung praktisch unter den Tisch fällt.

Um nicht unnötigen mathematischen Ballast mit herumzuschleppen, formuliere ich deshalb die Temperatur-Zeit-Abhängigkeit ohne Wärmeleitung:

$$Q_A = Q_c$$

$$\alpha \cdot A \cdot (T_A - T_B) \cdot t = c \cdot \rho \cdot A \cdot s \cdot (T_T - T_B) \qquad (4 \cdot 42)$$

$$T_A = \frac{c \cdot \rho \cdot s \cdot (T_T - T_B)}{\alpha} \cdot \frac{1}{t} \qquad (4 \cdot 43)$$

Diese Funktion ist bereits im obigen Diagramm enthalten. Sie ist allerdings nicht von den beiden Funktionen mit Wärmeleitung zu unterscheiden.

Bevor ich das nächste Kapitel beginne, das sich mit tatsächlich gemessenen Werten beschäfigt, will ich noch den Einfluß, und damit die Bedeutung von Wärmeübergangskoeffizienten und Blattdicke anhand von weiteren Diagrammen verdeutlichen.

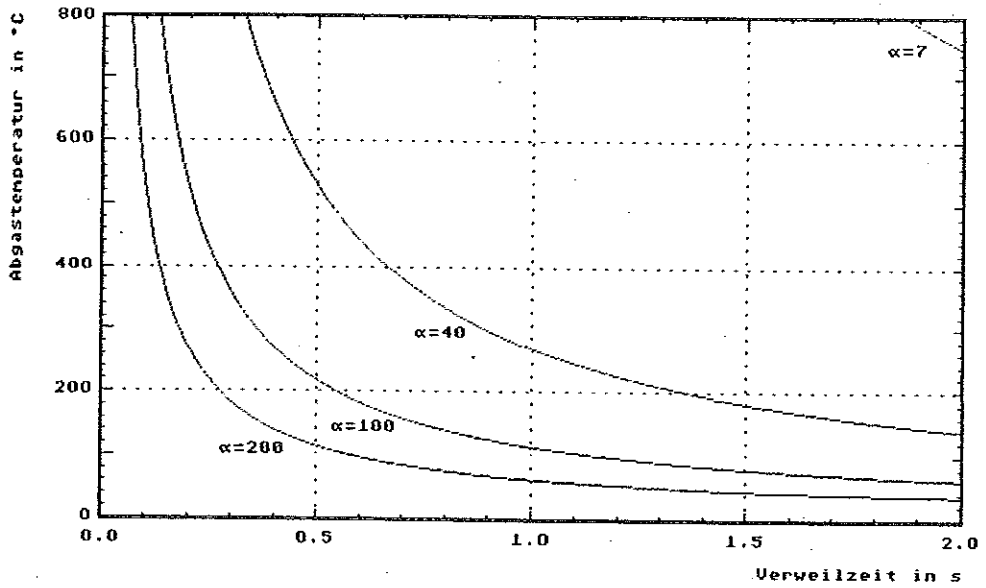


Bild 4 - 12: Abhängigkeit vom Wärmeübergangskoeffizienten

Die von RASCHKE ermittelte Bandbreite der Wärmeübergangskoeffizienten ist hier wiedergegeben. Mit wachsendem α kann die Temperatur niedriger, oder die Zeit kürzer gewählt werden. Bei einem $\alpha = 0{,}7\,W\,m^{-2}K^{-1}$ handelt es sich um große Blätter und nahezu Stillstand der Strömung. Die anderen Werte sind allerding durchaus währen des Abflammens zu erreichen. Bei einer Temperatursteigerung durch höheren Gasdurchsatz (siehe auch Kapitel *4.4. Strömungstechnische Betrachtung*) erhöht sich die Stömungsgeschwindigkeit, und damit der Wärmeübergangskoeffizient. Eine konsequente Maßnahme wäre deshalb die Einführung eines temperatur- und strömungsabhängigen α.

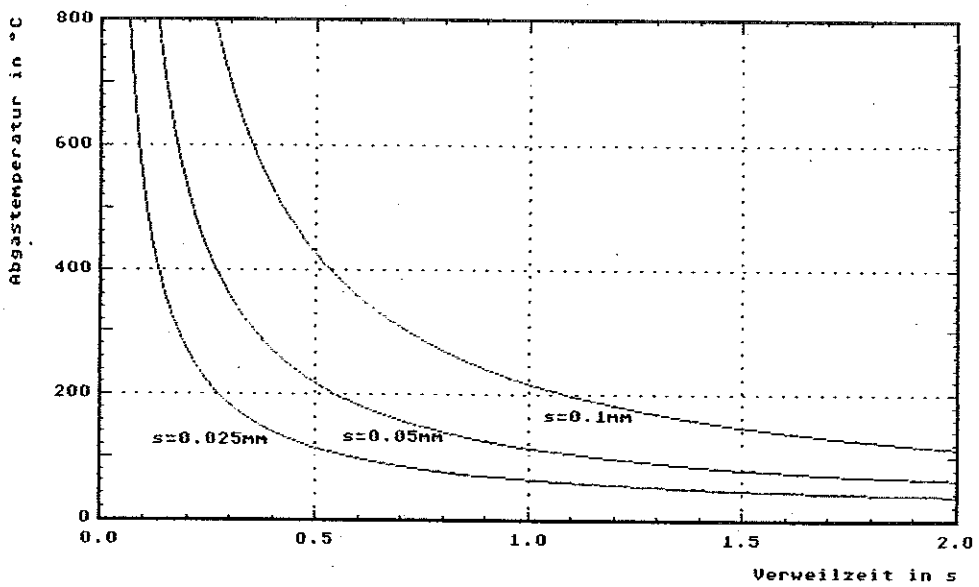


Bild 4 - 13: Abhängigkeit von der Blattstärke s

Da die Wandstärke auf dem Bruchstrich liegt, verhält sie sich gerade entgegengesetzt wie der Wärmeübergangskoeffizient. Je dünner das Blatt, desto weniger Energie muß pro Fläche übertragen werden, desto schneller geht es. Dabei ist anzumerken, daß es nötig ist, die Blätter tatsächlich zu vermessen. Mit der Annahme, daß 1 mm bereits sehr dünn sei [10, S. 33], kommt mensch bereits in vollkommen andere Größenordnungen, in denen dann auch die Wärmeleitung wieder eine zunehmend wichtige Rolle spielt.

Abgesehen von allen Ungenauigkeiten und Vereinfachungen; ist diese Formulierung eines Temperatur-Zeitgesetzes eine erste Hilfe, sich in die beim Abflammen wichtigen Parameter hineinzudenken.

5. Versuch zum Pflanzentod

5.1. Temperaturverlauf am Brenner

Aus den Überlegungen zur "Theorie zum Pflanzentod" (siehe Kapitel *4.5.*) ergab sich die Forderung nach Messungen, die die Aussagekraft der Theorie bewerten. Da ich dazu passende Messungen nicht in der Literatur vorgefunden habe, fiel die Entscheidung, eigene "Versuche zum Pflanzentod" durchzuführen.

Die Zielsetzung lautet: Bei welcher Umgebungstemperatur und welcher Einwirkzeit sterben die Beikräuter ab?

Die erste Schwierigkeit besteht nun darin, eine Umgebungstemperatur zu erzeugen, die folgende Bedingungen erfüllt:

- Regelbar von 200°C bis 800°C
- Konstante Temperatur innerhalb der vorgesehenen Versuchszeit
- Wärmeübertragung durch Konvektion, möglichst keine Strahlung
- Strömungsgeschwindigkeiten, die denen des Abflammens entsprechen

Das naheliegendste ist, hier einen Flüssiggasbrenner einzusetzen. Damit sind die Konvektion und die Strömungsgeschwindigkeit bereits sehr gut vergleichbar. Mir stand zudem noch ein Modell des Stabbrenners mit drei Düsen zur Verfügung. Damit ist die Vergleichbarkeit gut zu erreichen. Es bleibt die Frage nach der Temperaturhöhe und der Temperaturkonstanz.

Um einen Versuchsaufbau zu erarbeiten, kommt zuerst der Blick auf das Gerät:

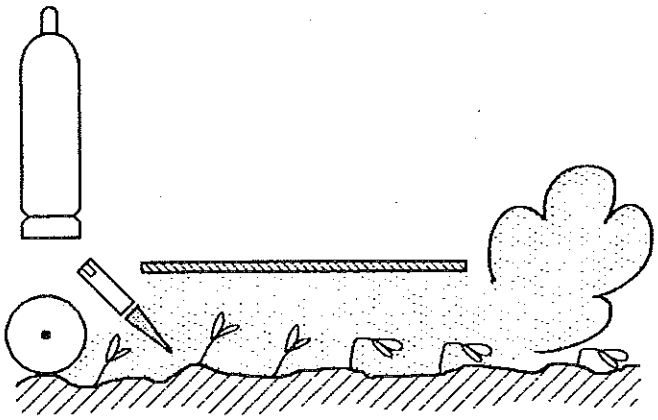


Bild 5 - 1: Brenner und Abgaswolke im Abflammgerät

Vom gesamten Gerät betrachte ich jetzt nur noch den Brenner, die Abgaswolke und die angezielte Pflanze. Die Brennerstellung, mit ca. 45° auf den Boden gerichtet, hat zur Folge, daß die Abgaswolke auf Grund ihrer niedrigeren Dichte sofort nach dem Verbrennungsvorgang nach oben steigt.

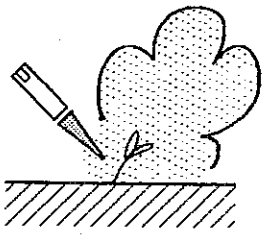


Bild 5 - 2: Brenner, Abgaswolke und Pflanze als Gruppe

Die aus dem Gasdruck resultierende Strömung wird also teilweise durch die "Dichteströmung" aufgehoben. Da bereits die Verbrennung sehr turbulent und ungleichmäßig abläuft, ist es nahezu unmöglich, Punkte zu finden, die über mehrere Sekunden, geschweige denn Minuten, eine konstante Temperatur aufweisen. Die Einflüsse durch Wind oder anderweitig hervorgerufene Störströmungen verschlimmern die Situation zusätzlich.

Als konstante Temperatur bezeichne ich hier Schwankungen, die die Grenzen von -25°C bis +25°C innerhalb von 1-2 min nicht deutlich überschreiten. Nähere Ausführungen zum Meßverfahren finden sich im Kapitel *9.2. Bemerkungen zur Meßtechnik.*

Um eine konstante Temperatur zu erreichen, habe ich deshalb den Brenner horizontal montiert und weitgehenst vom Wind abgeschirmt. So sieht der Versuchsaufbau aus:

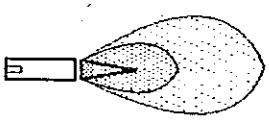


Bild 5 - 3: Horizontaler Brenner, idealisiert

Die verschiedenen Graustufen der Abgaswolke stellen die auftretenden Temperaturbereiche dar. Durch die Gasmenge und den Abstand der Pflanze vom Brenner läßt sich eine Temperatur auswählen.

Leider ist dieses Bild zu stark idealisiert. Eine realistischere Einschätzung gibt daher das nächste Bild:

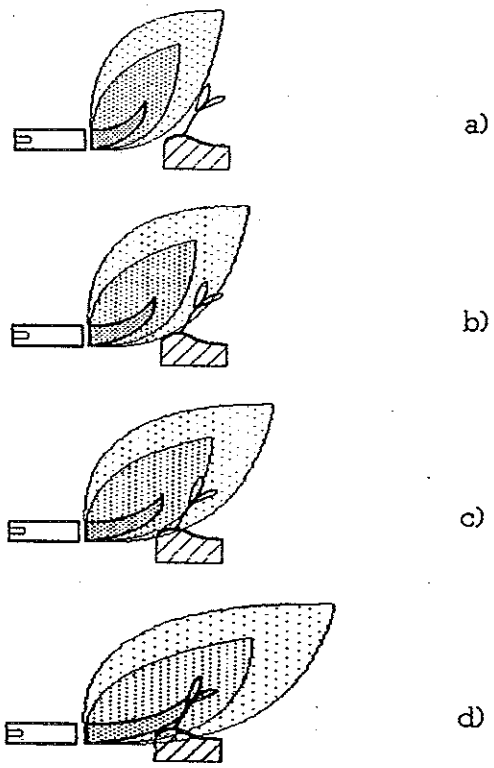


Bild 5 - 4: Pulsieren der Abgaswolke

Die horizontale Gasströmung wird auch bei diesem Aufbau sofort von der vertikalen "Dichteströmung" beeinflußt. Erstaunlich war für mich die relativ scharfe Randabgrenzung der Temperatur nach "unten" und "vorne". Dieser Effekt ist auch bei einem Gasfeuerzeug beobachtbar.

Überlagert ist diese scharfe Abgrenzung von den turbulenten Verbrennungsvorgängen und einem von mir beobachteten Pulsieren der Flamme und des Abgases. Es ist mir nicht gelungen, genau zu klären, woher dieses Pulsieren stammt. Meine Vermutungen gehen allerdings dahin, daß Flammendruck und Druckregler der Gasflasche sich gegenseitig auf- und abregeln. Die zulässigen Regelabweichungen für Druckregelgeräte liegen bei 15 %, die Hysterese bei 10 % des Ausgangsdrucks [30, S. 4]. Andere Erklärungen sind jedoch auch denkbar. Die Meßeinrichtung selbst ist unverdächtig, da das Pulsieren bei einem Heißluftföhn nicht auftrat.

Das Pulsieren hat zur Folge, daß eine Pflanze, die sich in einem bestimmten Abstand vom Brenner durch die Abgase bewegt, verschiedenen Temperaturbereichen ausgesetzt ist (siehe Bild oben). Durch die erwähnte scharfe Randabgrenzung, besonders der hohen Temperaturen, erfährt die Pflanze, oder zunächst der Meßpunkt, ein regelrechtes Wechselbad. Für einen nachvollziehbaren Versuch also denkbar schlechte Bedingungen.

Um das Pulsieren in den Griff zu bekommen, habe ich deshalb versucht, die Abgaswolke zu glätten.

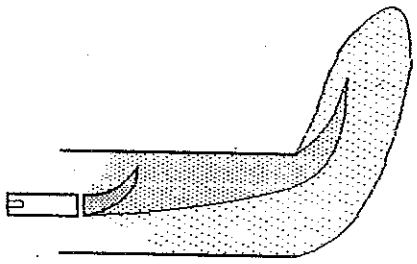


Bild 5 - 5: Brenner mit Rohrverlängerung

Das obige Bild zeigt die "Rohrversion". Die Abgase werden gezwungen ein Rohr, in diesem Fall ein Ofenrohr mit 13 cm Durchmesser, zu durchströmen. Das Meßergebnis von Versuch B01 zeigt das folgende Diagramm:

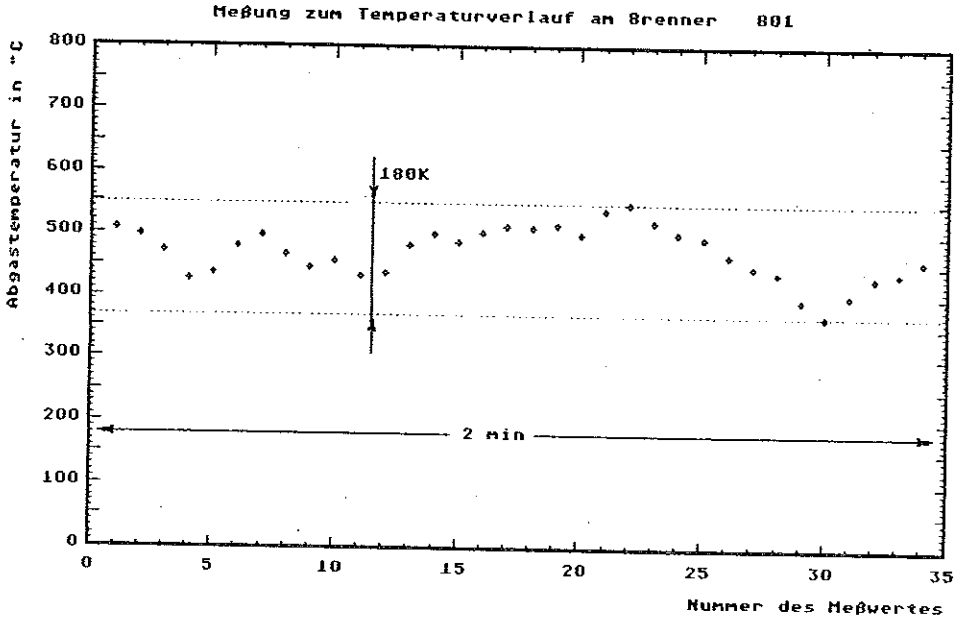


Bild 5 - 6: Brenner mit kurzem Rohr (l = 250 mm)

Trotz des Rohres und einer guten Windabschirmung bewegen sich die Temperaturen noch in einem Intervall von 180 K. Der größte "Sprung" tritt dabei innerhalb von ca. 30 s auf.

Mit verschiedenen Rohrlängen haben sich tatsächlich Verbesserungen eingestellt. Des weiteren habe ich im Rohr ein Drahtgeflecht eingebaut, das die Abgase zusätzlichverwirbeln soll. Gleichzeitig wirkt der Draht auch wie ein Puffer. Heißeres Abgas gibt Energie ab, kühleres Abgas nimmt Energie auf. Auch diese Maßnahme zeigte gewisse Erfolge.

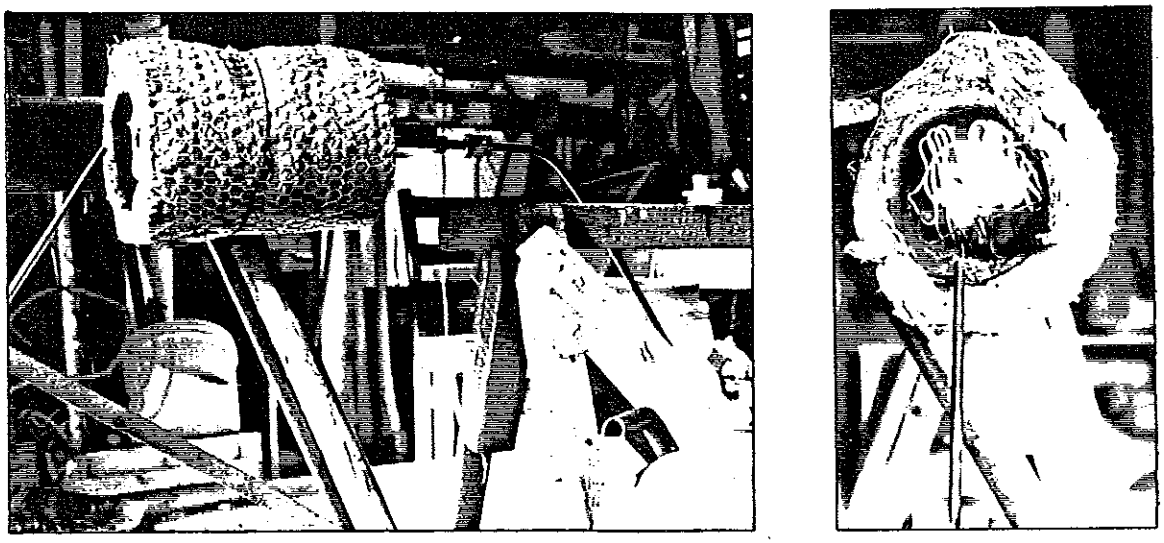


Bild 5 - 7: Meßaufbau für Brennertest mit Blick auf Drahtgeflecht

Die starke Temperaturschichtung ist im obigen Bild besonders deutlich zu sehen. Während das Drahtgitter im oberen Bereich glüht, ist der untere Bereich nicht davon betroffen.

Der Preis für die Glättung war jedoch hoch. Die der Strömung entgegengesetzten Widerstände bringen das Abgas nahezu zum Stillstand und das Rohr benötigt eine sehr lange Zeit, bis es einen stationären Zustand erreicht. Die Konsequenz waren daher die Isolierung des Rohres und eine Belüftung des Brenners durch ein Gebläse. Die sich einstellenden Ergebnisse waren nun durchaus akzeptabel.

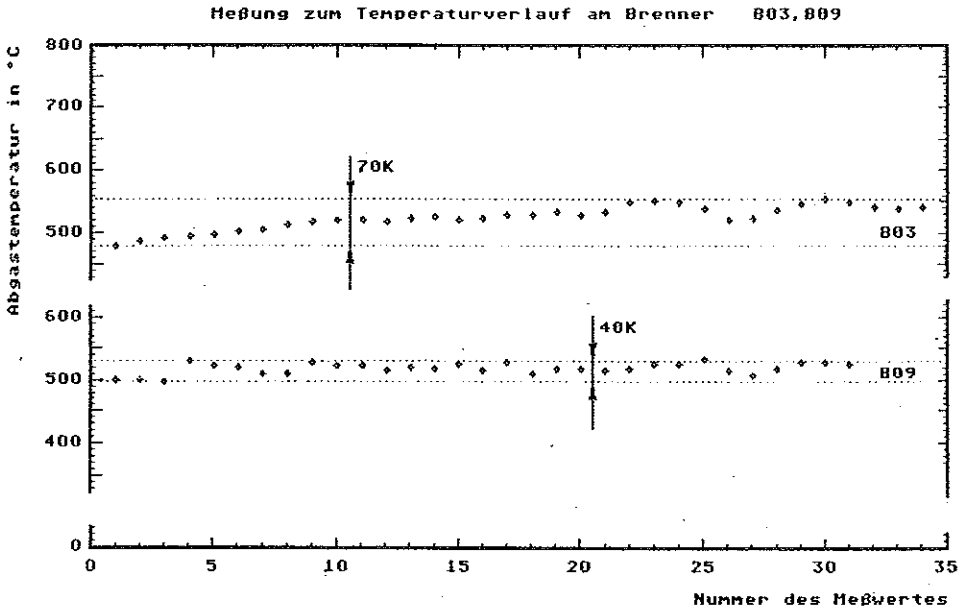


Bild 5 - 8: B03: langes Rohr (l = 1000 mm) und Drahtgeflecht
B09: kurzes Rohr (l = 250 mm), Drahtgeflecht und Gebläse (Föhn)

Beide Ergebnisse überzeugen in ihrer Temperaturkonstanz. Allerdings war es durch das lange Rohr einerseits und die zusätzlich eingeblasenen Luft andererseits nicht mehr möglich, Temperaturen um die 800°C zu erreichen.

Die Betrachtungen beziehen sich zudem nur auf einen Meßpunkt. Die unterschiedlichen Verläufe von zwei Meßpunkten, die nur einen Abstand von 10 mm aufweisen, zeigt das nächste Diagramm:

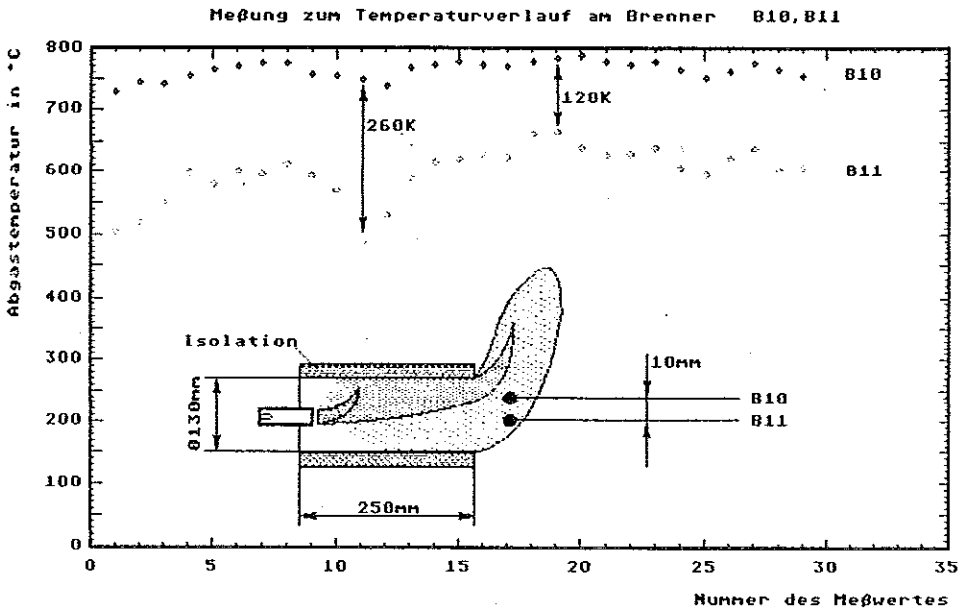


Bild 5 - 9: Brenner mit kurzem, isolierten Rohr und Drahtgeflecht

Berücksichtigt mensch die Ausmaße einer Pflanze und die Positionierungsgenauigkeit, so entsteht wiederum das bekannte Wechselbad. Einen Versuchsaufbau mit horizontalem Brenner habe ich deshalb verworfen.

Nach etlichen Überlegungen, den Versuch völlig zu streichen, habe ich mich entschlossen, noch eine weitere Alternative auszuprobieren. Der "Vertikalbrenner", wie er im folgenden Bild dargestellt ist.

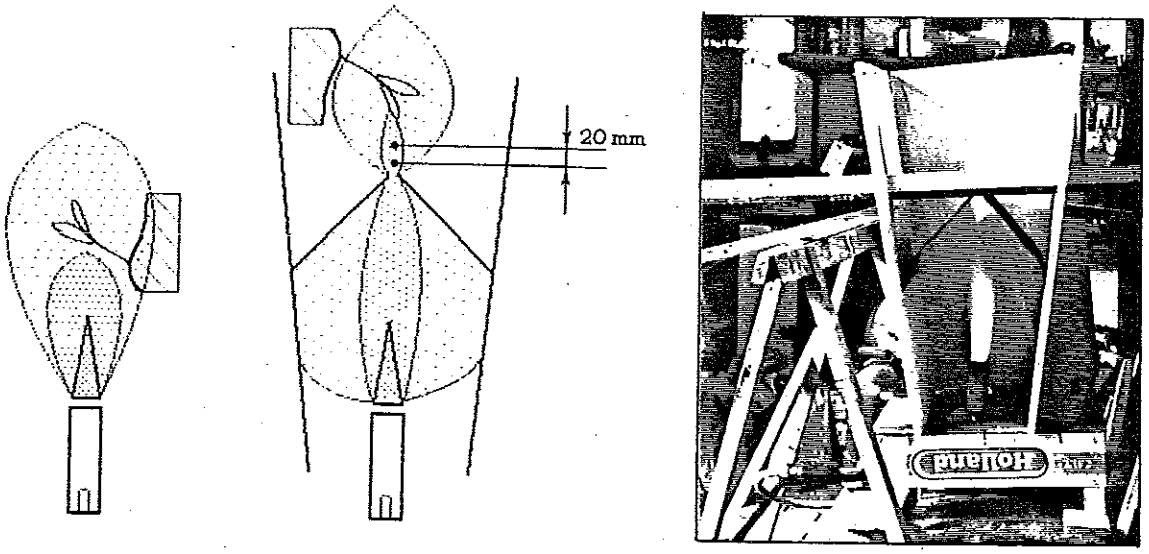


Bild 5 - 10: Vertikale Brennerstellung: a) ungeschützte Flamme
b) Windschutz und Abgasleitbleche
c) Versuchsaufbau mit Feuerdämmplatten

Wie sieht es mit der Temperatur bei diesem Aufbau aus? Dazu das nächste Diagramm mit Meßwerten von zwei Meßpunkten, die einen vertikalen Abstandvon 20 mm haben.

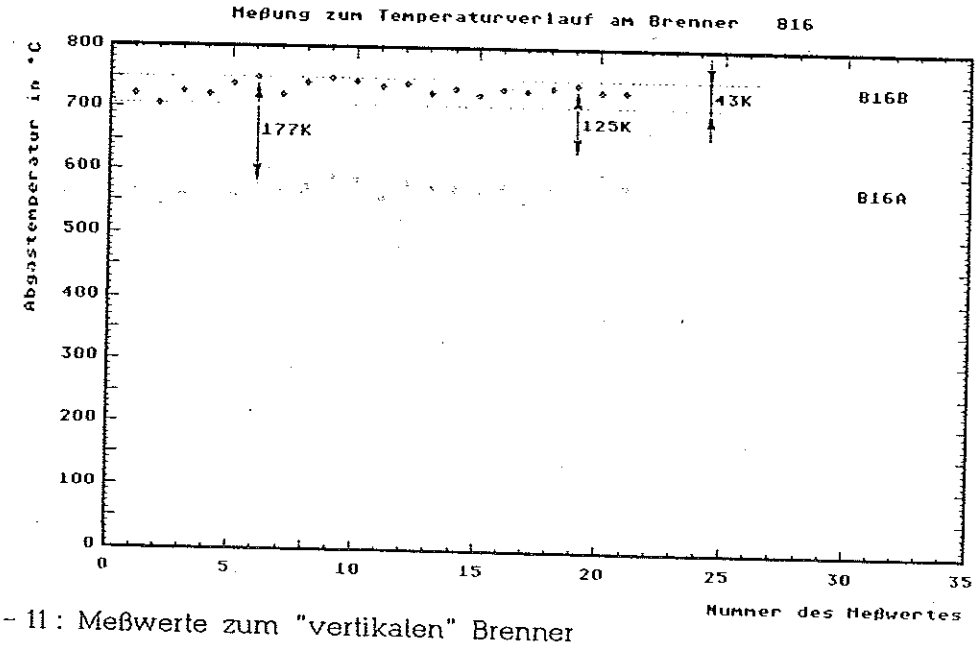


Bild 5 - 11: Meßwerte zum "vertikalen" Brenner

Die Temperaturen sind ausreichend konstant. Die absoluten Werte von nahezu 800°C sind erreichbar. Der dennoch verbliebene Temperaturunterschied von über 100 K bei einem Abstand von nur 20 mm ist kaum zu vermeiden. Eventuell würde eine besser ausgetüftelte Abgasleitung das starke Auffächern der Wolke, sobald sie durch den Spalt der Abgasleitbleche hindurch strömt, verhindern. Allerdings kommt dann sofort wieder das Strömungs-Stillstands-Problem zu Tage.

Die Pflanzen müssen um 90° gedreht durch den Abgasstrom tranportiert werden.

Das Hauptargument gegen diesen Versuchsaufbau ist die bereits sehr fortgeschrittene Veränderung der Abflammbedingungen gegenüber dem Feldeinsatz. Die Pflanze befindet sich in einer ihr ungewohnten Lage, und die Strömung der Abgaswolke ist sicherlich wesentlich anders. Für mich blieb zu diesem Zeitpunkt die Entscheidung zwischen:

- mangelnde Temperaturkonstanz und eingeschränkte Praxisnähe
- gute Temperaturkonstanz und verschwindend geringe Praxisnähe

Ich habe mich für die zweite Option entschieden, da ein Versuch zum Temperatur-Zeit-Gesetz ohne vernünftige Temperaturwerte ohne relevante Aussagekraft bleiben muß.

5.2. Versuchsaufbau

Der Versuch hat das Ziel, das mit Annahmen zurechtgezimmerte Temperatur-Zeit-Gesetz, das ich in Kapitel *4.5. Theorie zum Pflanzentod* aufgestellt habe, mit Meßdaten zu kommentieren. Für diese Meßdaten ist es daher außerordentlich wichtig, daß die Temperatur- und Zeitmessung innerhalb eines definierten Toleranzrahmens bleibt. Das vorangegangene Kapitel *5.1. Temperaturverlauf am Brenner* ist deshalb so ausführlich. Bevor ich den vollständigen Versuchsaufbau beschreibe, ist es notwendig, auch der Zeitmessung einige Zeilen zu widmen.

Beim Abflammen auf dem Acker bewegt sich das Abflammgerät gegenüber den Beikräutern. Wie aus Kapitel *4.4. Strömungstechnische Betrachtungen* hervorgeht, bewegt sich meist auch die Abgaswolke gegenüber den Pflanzen. Für einen Versuch, bei dem die Temperaturen möglichst konstant bleiben sollen, ist diese Konstellation sehr ungeeignet. Allein durch die Bewegung des Brenners und die sich daraus ergebenden Turbulenzen in der Umgebung nehmen die Temperaturschwankungen bis zu einem unerträglichen Maß zu. Die Konsequenz ist daher, die Relativbewegung durch einen feststehenden Brenner und bewegliche Pflanzen herbeizuführen.

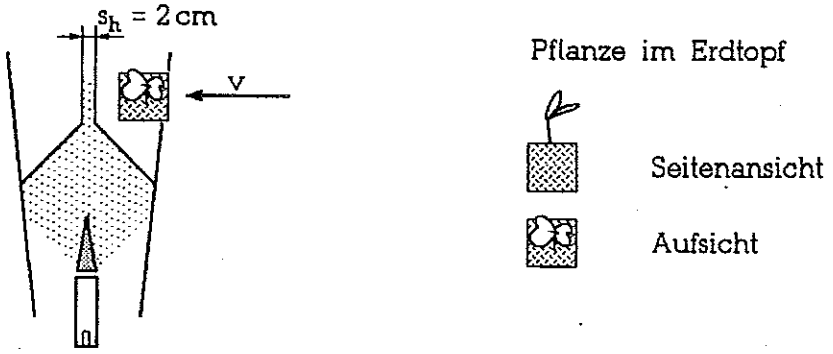


Bild 5 - 12: Relativbewegung zwischen Pflanze und Abgas

Als notwendige Vereinfachung nehme ich an, daß der "Abgasstrahl", der aus dem Spalt s_h zwischen den Abgasleitblechen austritt, seine Form behält. Dadurch ergibt sich die Möglichkeit, die Verweilzeit t_h der Pflanze im Abgas durch die "Pflanzengeschwindigkeit" v einzustellen. Die mathematische Beschreibung lautet:

$$t_h = \frac{s_h}{v} \qquad (5\cdot1)$$

Ich habe den folgenden Aufbau gewählt, um verschiedene definierte Geschwindigkeiten v zu realisieren.

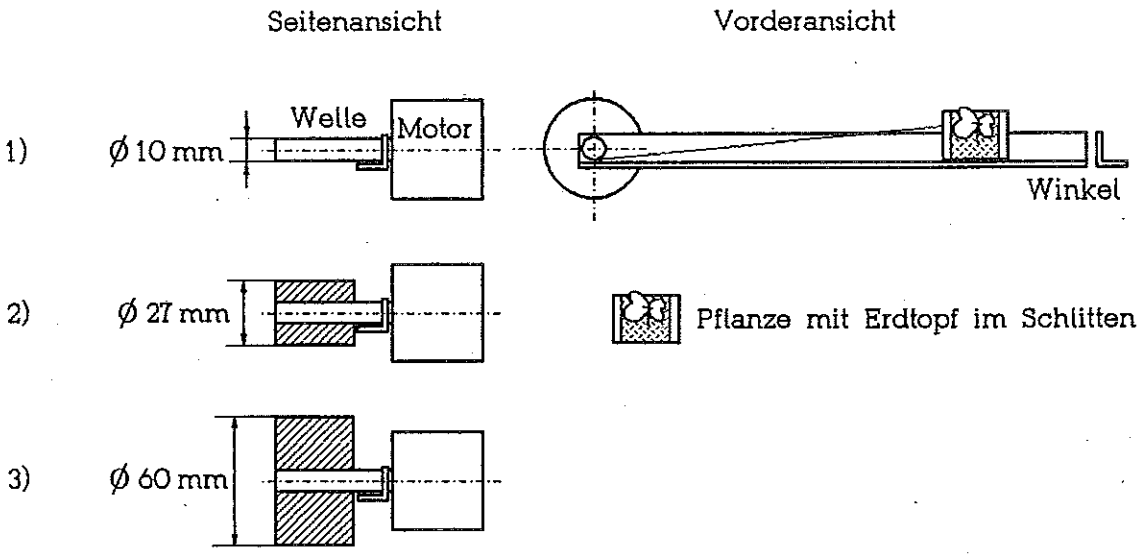


Bild 5 - 13: Skizze des Schlittenantriebs

Die im Erdtopf sitzende Pflanze wird in einem Schlitten auf einem Winkel entlanggezogen. Am Ende des Winkels ist ein eletrischer Motor (Scheibenwischermotor) befestigt, auf dessen Welle der Zugdraht aufgewickelt wird. Die Versionen 1), 2) und 3) zeigen die verschiedenen eingesetzten Wellendurchmesser d. Weitere Variationen ergeben sich durch die Schnellaufstufe des Motors und den Einsatz von 12 bzw 6 V. Es ergeben sich also vier unterschiedliche Drehzahlen n. Daraus folgt für die Verweilzeit t_h:

$$t_h = \frac{s_h}{v}$$

$$v = 2 \cdot \pi \cdot r \cdot n = \pi \cdot D \cdot n \qquad (5\cdot2)$$

$$t_h = \frac{s_h}{\pi \cdot D \cdot n} \qquad (5\cdot3)$$

Die ermittelten Drehzahlen lauten:

Schnell 12 V	Langsam 12 V	Schnell 6 V	Langsam 6 V
$1{,}0\ s^{-1}$	$0{,}71\ s^{-1}$	$0{,}44\ s^{-1}$	$0{,}34\ s^{-1}$

Kombiniert mit den Wellendurchmessern ergeben sich 12 Geschwindigkeiten, die in der nächsten Grafik dargestellt sind.

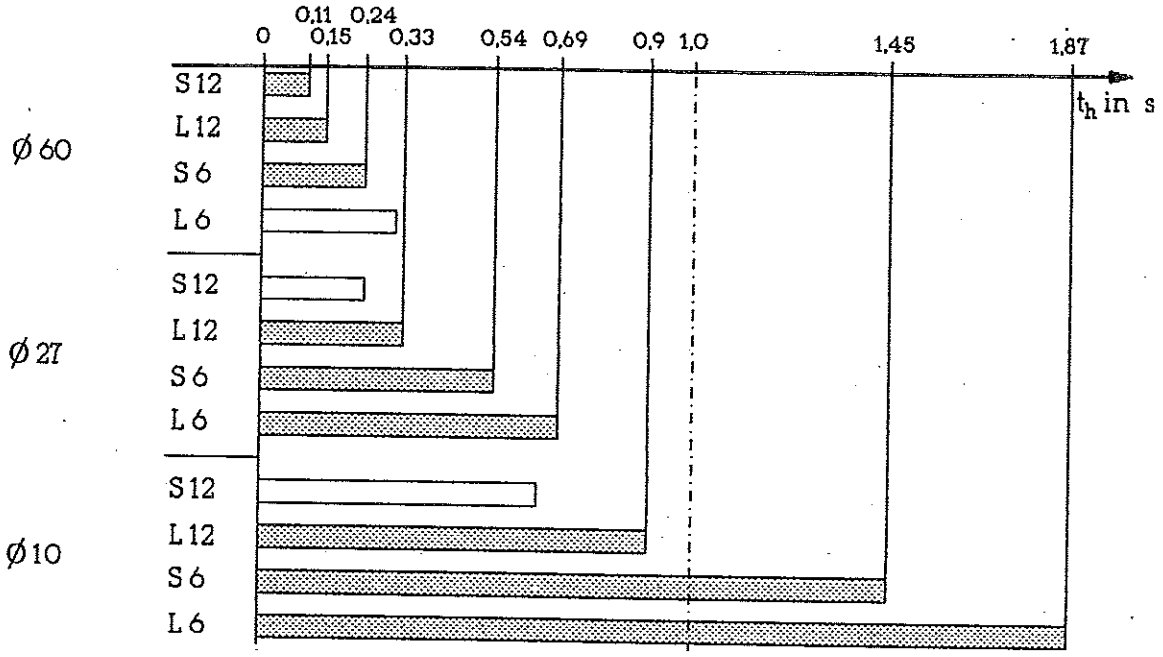
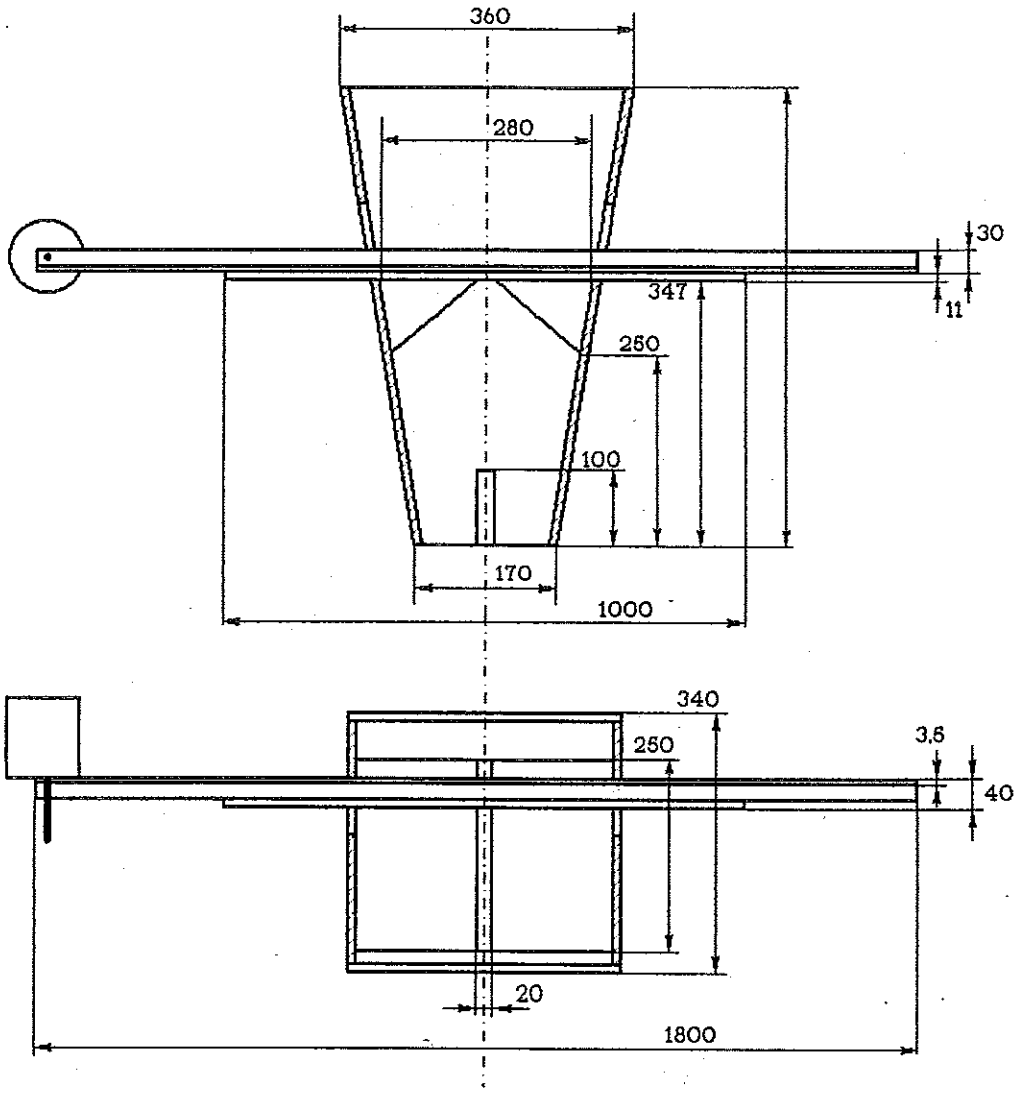


Bild 5 - 14: Auswahl von 9 Verweilzeiten

Um das geforderte Zeitintervall von $0\,s \leq t_h \leq 2\,s$ (siehe dazu Kapitel *4.5. Theorie zum Pflanzentod*) durch den Versuch abzudecken, entscheide ich mich für die grau unterlegten Einzelzeiten. Mit 9 Varianten hält sich dabei der Aufwand für die Versuche in durchführbaren Grenzen.

An dieser Stelle weise ich bereits darauf hin, daß die Interpretation dieser errechneten Verweilzeit nicht ganz einfach ist. Die Spaltbreite s_h ist die Hauptfehlerquelle. Für einen Vergleich innerhalb einer Meßreihe ist das jedoch weniger von Bedeutung, da sich für jedes Ergebnis ungefähr der gleiche Fehler ergibt.

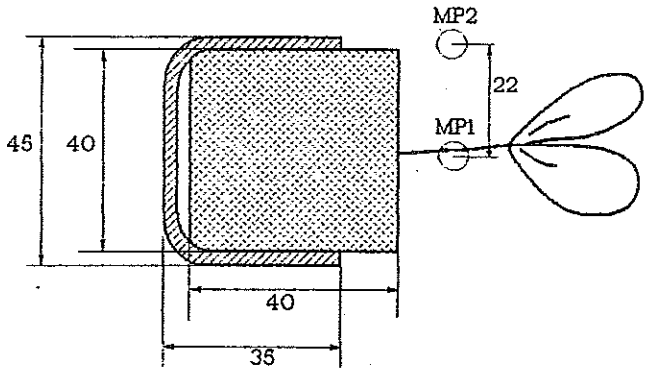
Die folgenden Bilder geben die Hauptabmessungen des gesamten Versuchsaufbaues wieder. Die Abgasleitbleche wurden aus einem Ofenrohr gefertigt. Als Windschutz und Trägerkonstruktion habe ich 10 mm Feuerdämmplatten verwendet. Um die Kosten möglichst gering zu halten, habe ich auf eine dauerhafte Lösung verzichtet. Der somit entstandene "Bausatz" kann mit zwei Böcken schnell aufgestellt werden und hält den Versuchsbelastungen stand.



Alle Angaben in mm. Nicht alle Längen Maßstabsgetreu.

Bild 5 - 15: Hauptabmessungen des Versuchsaufbaues

Der als Schiene eingesetzte Aluwinkel 30 x 3,5 liegt auf einem 11 mm starken Flacheisen auf. Das Flacheisen erhöht durch sein Gewicht die Stabilität der Konstruktion und dämpft die Temperatur gegenüber dem Aluwinkel. Die Abgasleitbleche stehen unter leichter Spannung am Flacheisen an. Wie aus der Aufsicht zu erkennen ist, lassen die Abgasleitbleche noch einen Spalt zur vorderen und hinteren Feuerdämmplatte. Diese zusätzlichen Durchlässe sind notwendig, damit es im Feuerraum nicht zu größeren Stauungen kommt. Der Hitzespalt von nur 20 mm reicht für die Abgasmenge nicht immer aus.



Schlittenlänge : 420 mm

Bild 5 - 16: Schnitt durch den Pflanzenschlitten

Jede Pflanze wurde in einen eigenen Erdtopf mit Kantenlänge l = 40 mm gesät. Jeweils 9 Töpfe werden in einen Schlitten eingezwängt.

Die Position der zwei Thermoelemente ist als MP1 und MP2 eingezeichnet. Dabei ist MP1 der ausschlaggebende Meßpunkt, da er direkt im Bereich des Pflanzenstengels die Temperatur mißt.

Einen etwas realistischeren Eindruck gibt das folgende Bild:

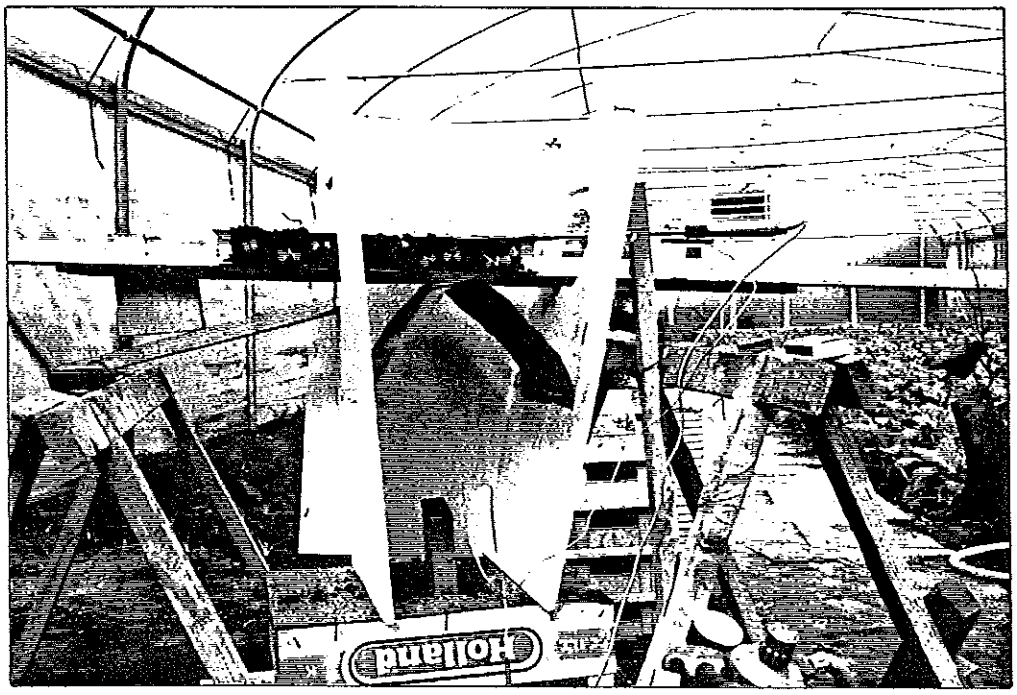


Bild 5 - 17 : Offener Versuchsstand mit Pflanzen

5.3. Versuchsdurchführung

Um einen möglichst reibungslosen Versuchsablauf zu gewährleisten, habe ich folgende Vorbereitungen getroffen:

- Ausarbeiten eines Meßprotokolls (siehe Kapitel *10.1. Diagramme und Daten*)
- Aufbau des Versuchs im Gewächshaus, somit Windstille
- Bereitstellung der Pflanzen: Nach Absprache mit dem Gärtner Thomas Wedemeyer wurden ca. 600 Samen in Erdtöpfen zum Keimen gebracht. Diese Arbeit hat mir die Gärtnerei Distel abgenommen. Es handelt sich dabei um "Stielmus", das schnell keimt und trotzdem eine hinreichende Ähnlichkeit mit wildwachsenden Beikräutern besitzt. Am Versuchstag waren die Keimlinge 8 Tage alt und ca. 30 mm hoch.
- Eine volle 11 kg Propangasflasche stand bereit.
- Zwei Pflanzenschlitten für jeweils 9 Pflanzen waren vorhanden.

Da die Durchführung des Versuches nicht von mir allein zu bewerkstelligen war, wurde ein Team gebildet (siehe nächstes Bild).

Bild 5 - 18: Das TEAM: Stefan mit Versuchsobjekt, Uwe, Guntram

Der Versuchsablauf ergibt sich dann bereits aus der Dreierbesetzung:

- Stefan beschickt jeweils einen Schlitten mit 9 Pflanzen, legt ihn in die Schiene und befestigt den Draht.
- Uwe führt das Protokoll, überwacht und regelt die Temperatur durch den Druckregler. Er gibt die nächste Kombination aus Wellendurchmesser und Motorbeschaltung an Guntram weiter. Pro Versuch schreibt Uwe mindestens vier Temperaturwerte auf.
- Guntram stellt die Schlittengeschwindigkeit ein, gibt das Startsignal und schaltet den Motor ein und aus. Die Zeitdifferenz und die zurückgelegte Strecke des Schlittens werden gemessen und an Uwe weitergegeben.
- Der Schlitten wird vom Draht abgehängt und von Uwe und Stefan bewertet. Der erste Befund teilt den Zustand der Pflanzen in "verbrannt", "tot", "beschädigt", "angeknackst" und "lebendig" ein.
- Während des nächsten Versuchs nimmt Stefan die "abgeflammten" Keimlinge aus dem Schlitten und stellt sie geordnet und nummeriert in eine Kiste.

Einen Eindruck vermittelt das folgende Bild:

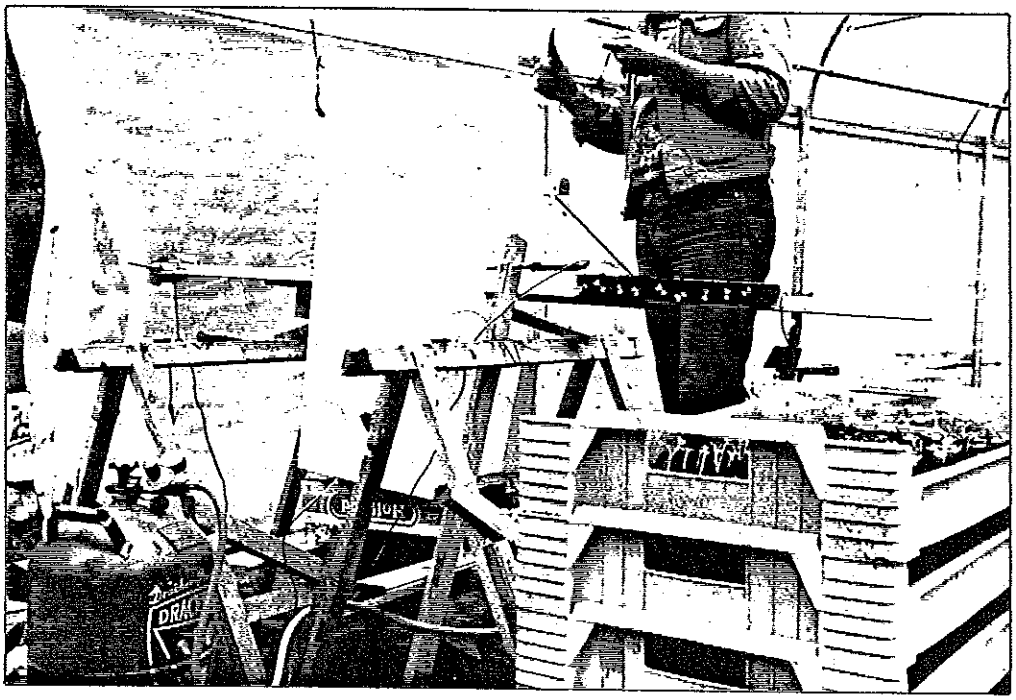


Bild 5 - 19: Der Versuch ist in vollem Gange
Im Vordergrund die "frischen" Keimlinge in den gestapelten Kisten.

Insgesamt haben wir 54 Versuche mit jeweils 9 Pflanzen durchgeführt. Dabei haben wir zu einer fest eingestellten Temperatur (so konstant wie möglich) zunächst alle verschiedenen Geschwindigkeiten variiert. Schon sehr bald war zu sehen, daß bei hohen Temperaturen und langen Verweilzeiten die Pflanzen immer mehr zerkocht werden. Sie sind aber genauso tot, wie die bei kürzenen Zeiten abgeflammten Exemplare. Wir haben deshalb bei offensichtlichem Tod die Temperaturstufe beendet. Einen Überblick über die Reihenfolge der 54 Versuche gibt das nächste Diagramm. Dabei ist anzumerken, daß die Temperaturen die "Solltemperaturen" darstellen. Die Auswertung basiert dann natürlich auf den tatsächlich gemessenen Temperaturen. Die angestrebten 800°C konnten wir leider nicht erreichen.

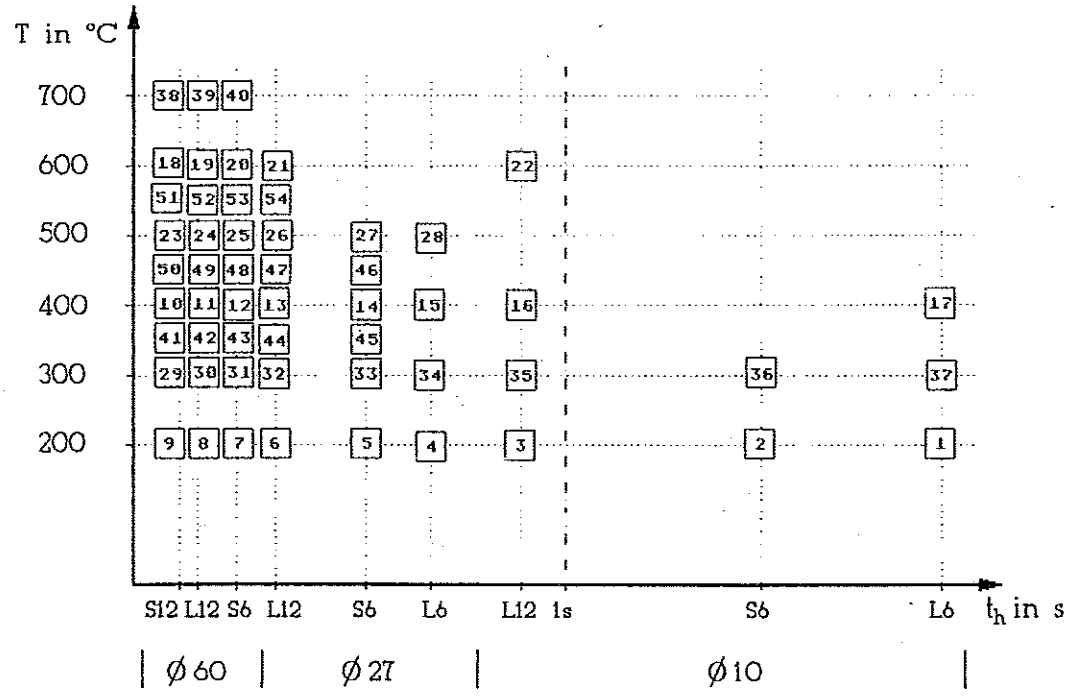


Bild 5 - 20: Reihenfolge der Einzelversuche

Bereits unmittelbar nach dem Abflammen konnten wir deutliche Unterschiede bei den Pflanzen feststellen. Das folgende Bild zeigt den Zustand der Keimlinge. Einge sind bereits völlig erschlafft am Boden, andere stehen noch voll im Saft.

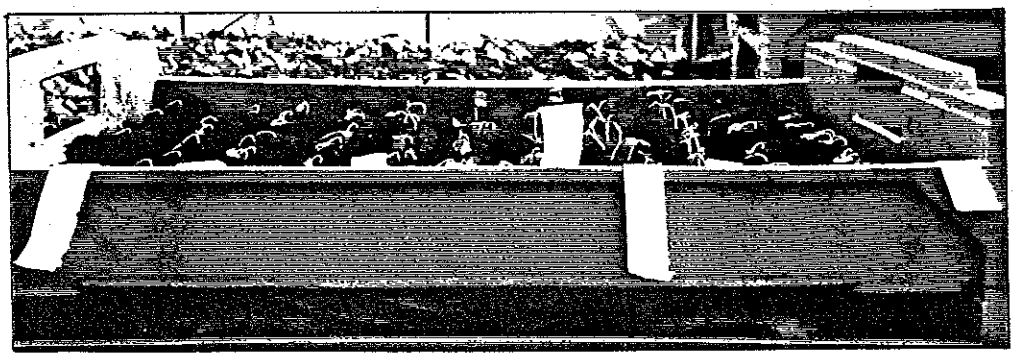


Bild 5 - 21 : Pflanzen unmittelbar nach dem Abflammen

5.4. Auswertung und Vergleich mit Rechenmodell

Bei der Auswertung der Versuche gibt es drei relevante Größen:

1) Die Abgastemperatur, die tatsächlich auf die Pflanze eingewirkt hat.

2) Die Verweilzeit, die die Pflanze tatsächlich dem Abgas ausgesetzt war.

3) Der Zustand, den die Pflanze nach dem Abflammen hat.

In den folgenden Zeilen werde ich darstellen, welche Kriterien ich angewendet habe, um die oben genannten Größen zu bestimmen. Andere, meißt kompliziertere Verfahren, sind sicherlich ebenfalls anwendbar.

1) Abgastemperatur

Im Kapitel *5.1. Temperaturverlauf am Brenner* habe ich bereits ausführlich beschrieben, daß die "wahre" Temperatur sehr schwierig festzustellen ist. Für die Auswertung habe ich nur die Werte von Meßpunkt 1 verwendet, also die direkt am Pflanzenstengel gemessenen. Die während der Versuche aufgeschriebenen Temperaturen unterliegen demnach wieder Schwankungen. Als Beispiel soll hier der Temperaturverlauf für die Soll-Temperatur 400°C dienen.

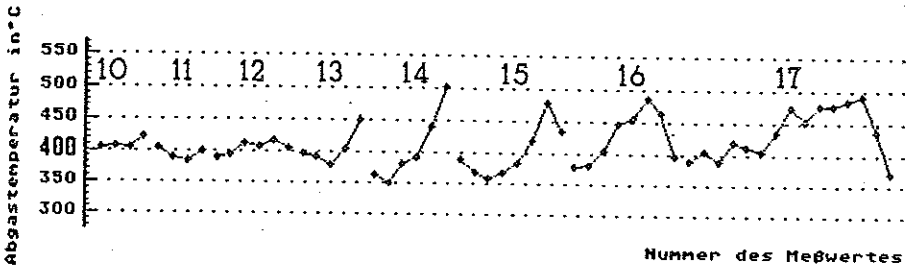


Bild 5 - 22: Temperaturverlauf bei Soll-Temperatur 400°C

Deutlich zu sehen ist, daß die Schwankungen von Versuch 10 bis 17 zunehmen. In erster Linie dürfte das auf die längere Verweilzeit und damit längere Meßzeit zurückzuführen sein. Die Frage stellt sich also, welcher Wert hier gewählt werden soll? Als einfachsten Weg habe ich den aritmetischen Mittelwert gebildet. Um zusätzlich noch eine Aussage zu den Schwankungen machen zu können, ist es sinnvoll, z.B. die Standardabweichung σ mit anzugeben. Innerhalb des Intervalls 2σ liegen dann 70% der Werte, wenn sie "normalverteilt" sind. Einige Verläufe sind ganz augenfällig nicht normalverteilt. Um die Auswertung aber nicht noch weiter zu komplizieren, nehme ich diese Fehler in Kauf. Das folgende Diagramm zeigt für jeden Versuch das zugehörige Intervall 2σ:

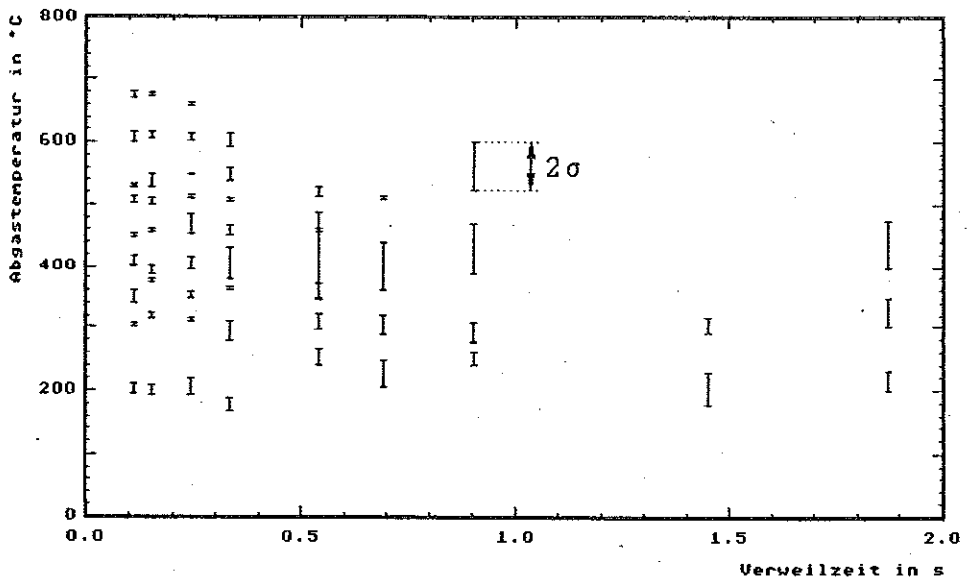


Bild 5 - 23: Die Verteilung der Standardabweichungen

Bei den weiteren Betrachtungen des Zustandes der Pflanzen wird sich noch zeigen, daß die großen Intervalle alle weit von der Grenzlinie zwischen Leben und Tod liegen. Bedenke ich jetzt noch die generelle Meßproblematik und die unkontrollierbaren Einflüsse wie Feuchtigkeit und Wärmeübergangskoeffizient, dann scheint es mir gerechtfertigt, im weiteren nur noch die Mittelwerte eines Versuchs anzugeben.

2) Verweilzeit

Die Zeit- und Wegmessungen während der Versuche waren als Kontrolle gedacht. Auf diese Weise ist es möglich nachzurechnen, ob die Sollzeiten tatsächlich mit den Einstellungen am Motor übereinstimmen. Da die Messungen mit einer Sekundenstoppuhr und durch Beobachtug erfolgte, können sie nur sehr grob sein. Die Überprüfung ergab jedoch trotzdem eine erstaunlich gute Übereinstimmung. Da der "Hitzespalt" (siehe *5.2. Versuchsaufbau*) bei der gesamten Rechnung sehr stark eingeht, halte ich mich bei der Auswertung an die errechneten "Sollzeiten". Entscheidend ist für mich, daß der Aufbau für alle 54 Versuche der gleiche war und somit auch die Werte zumindest untereinander aussagekräftig bleiben.

3) Pflanzenzustand

Das Ziel des Versuches ist festzustellen, bei welchem Temperatur-Zeit-Verhältnis eine Pfanze zugrunde geht oder nicht. Es gibt also am Ende nur tot oder lebendig. Um statistisch genauer zu sein, habe ich jeweils 9 Pflanzen den gleichen Verhältnissen ausgesetzt. Den Befund, d.h. in welchem Zustand sich eine Pflanze befindet, habe ich dreimal aufgenommen. Direkt nach dem Abflammen, ca. 4 Stunden nach dem Abflammen und 2 Tage nach dem Abflammen. Bei den meisten Pflanzen war die Zuordnung sehr leicht. Sie waren entweder vollkommen vertrocknet oder noch unberührt. Auch innerhalb der 9-er-Gruppe gab es dabei kaum Differenzen. Interessant ist jedoch, daß sich etliche Keimlinge nach zwei Tagen erholt hatten und erneut zu treiben begannen, obwohl sie sehr schwer geschädigt waren. Auffällig war auch, daß viele durch die Beschädigung des Stengels zu Tode gekommen sind.

Für die Endbewertung bilde ich drei Gruppen:

- Alle 9 Pflanzen sind eindeutig abgestorben
- Zumindest eine der 9 Pflanzen ist abgestorben
- Alle 9 Pflanzen sind eindeutig lebendig

Das folgende Bild zeigt die Zuordnung der Versuche zu jeweils einer dieser Gruppen.

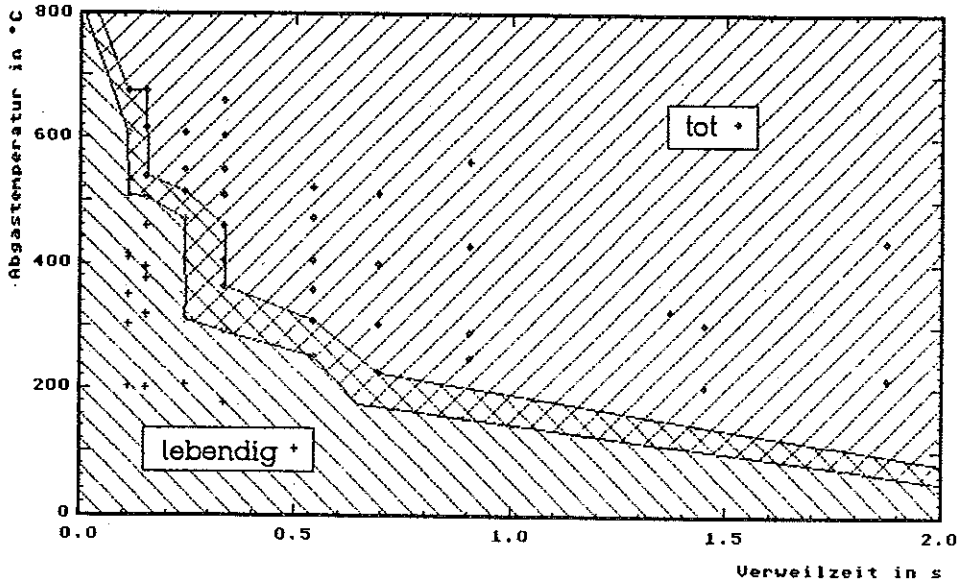


Bild 5 - 24: Überlappung der Bereiche "tot" und "lebendig"

Die "Grenzlinien" sind lineare Verbindungen der niedrigsten "Alle-9tot-Werte" auf der einen Seite und der "Mindestens-1 er-tot-Werte" auf der anderen Seite. Lediglich die Endwerte sind von mir geschätzt.

Damit ist die direkte Auswertung abgeschlossen. Allerdings steht der Vergleich mit dem in Kapitel *4.5. Theorie zum Pflanzentof* aufgestellten Temperatur-Zeit-Gesetz noch an.
Die Gleichung dafür lautet:

$$T_A = \frac{c \cdot \rho \cdot s \cdot (T_T - T_B)}{\alpha} \cdot \frac{1}{t} \qquad (5\cdot4)$$

Die Parameter wähle ich wie in Kapitel *4.5. Theorie zum Pflanzentod* beschrieben. Das folgende Diagramm enthält das "Temperatur-Zeit-Gesetz" und die im Versuch ermittelten Werte.

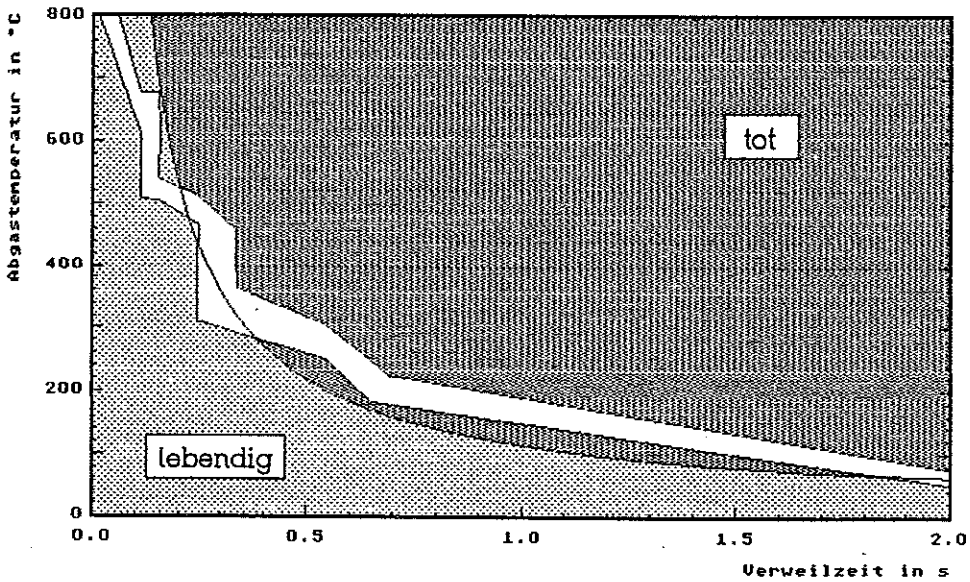


Bild 5 - 25: Übereinstimmung von Theorie und Praxis

Der blitzförmige Überlappungsbereich ist dem vorhergehenden Diagramm entnommen. Die Kurve ist durch die verschiedenen Graustufen etwas herausgehoben. Die Übereinstimmung der beiden Gebilde ist relativ groß. Da ich die Bereiche unter 200°C und über 700°C nicht im Versuch gemessen habe, ist es müßig zu spekulieren, ob die Werte dieser Bereiche wohl an der Kurve liegen würden oder nicht. Allerdings haben die Keimlinge bei 700°C alle den Tod gefunden. Die nach oben hin unendliche Hyperbel des "Gesetzes" hat mit Sicherheit ein reales Ende, da die Verweilzeiten in der Praxis nicht beliebig kurz werden können.

Da ich nicht über eine größere Anzahl solcher Versuchsergebnisse verfüge, kann ich keine Aussagen darüber machen, ob sich verschiedene Pflanzensorten, verschiedene Feuchtigkeiten usw. deutlich vom obigen Bild unterscheiden würden. Das ist eine ausfüllende Aufgabe für eine weitere Studienarbeit. Daß es möglich ist, einen relativ zuverlässigen Grenzwert für das Temperatur-Zeit-Verhalten von Keimlingen rechnerisch nachzuvollziehen, scheint mir allerdings deutlich gezeigt.

6. Erste Messungen am Gerät

6.1. Gerätebeschreibung

Wie ein Abflammgerät aussehen kann, habe ich bereits im Kapitel *2.3. Abflammgeräte im Überblick* erwähnt. Das Gerät, das ich von der "Gärtnerei Distel" zur Verfügung hatte, ist ein Eigenbau und macht es nötig, den Geräteaufbau genauer zu beschreiben.

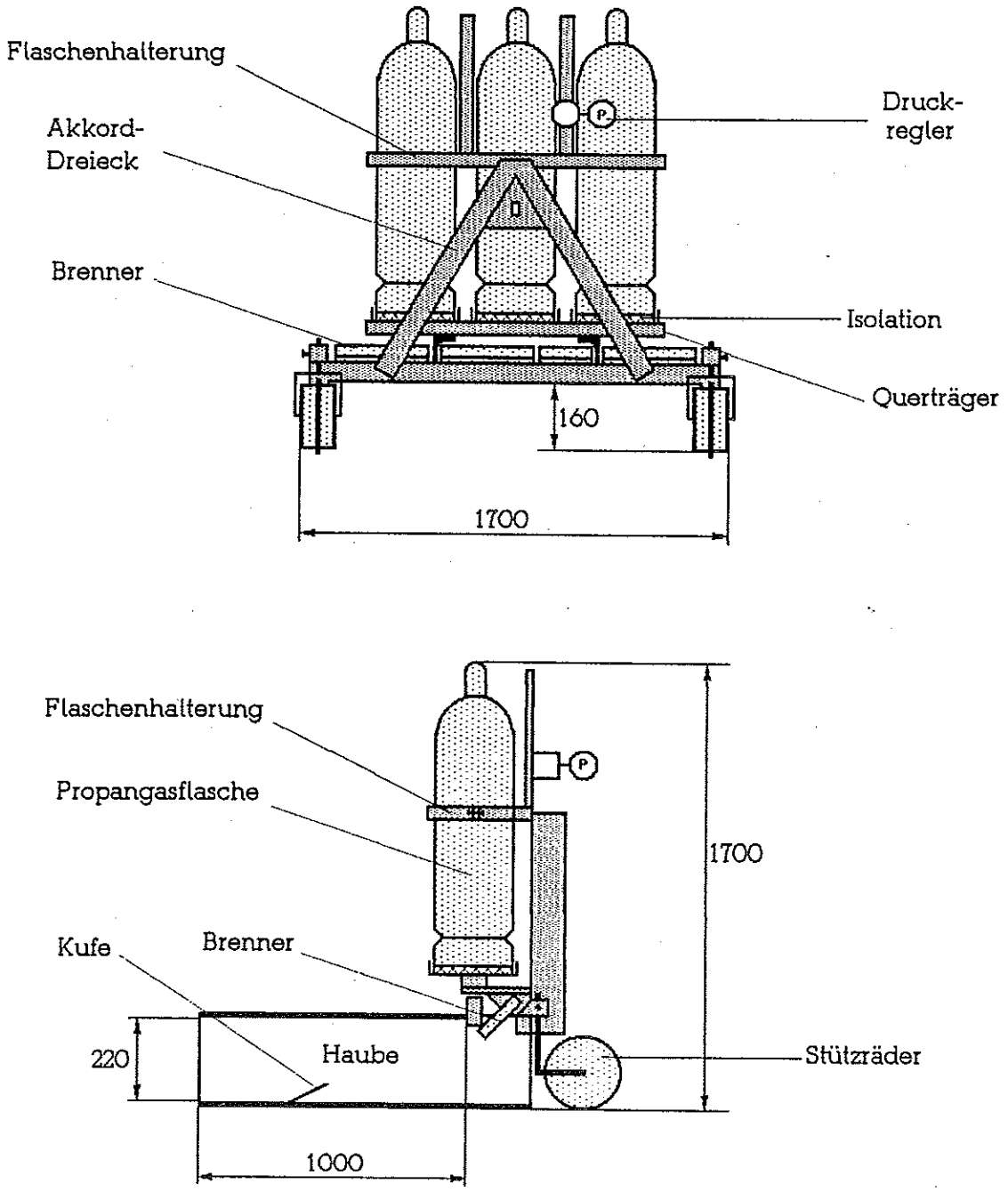


Bild 6 - 1: Vorder- und Seitenansicht des "Distel"-Gerätes (Skizze)

Die dunkelgrauen Teile der vorangestellten Skizze geben die Rahmenkonstruktion an.

Zwischen zwei parallel liegenden Vierkantrohren sind die Brenner montiert. Diese Hauptfunktionsgruppe wird durch ein Akkorddreieck an den Schlepper angekuppelt.

Die drei 33 kg Propangasflaschen stehen auf einer Isolationsschicht. Diese ist wiederum über einen Querträger und zwei stabile Winkel mit der Hauptfunktionsgruppe verbunden. Damit ist sichergestellt, daß sich die Flaschen nicht durch Wärmeleitung aus der Brennerregion unkontrolliert erhitzen können. Am oberen Ende des Akkorddreiecks sind die Flaschen durch eine verschraubte Flaschenhalterung gesichert.

Die Haube oder Abdeckplatte ist eine durch Winkel versteifte Blechkonstruktion, die das heiße Abgas daran hindert, sofort vom Boden aufzusteigen. Die Höhe der Haube über dem Boden wird durch die Stützräder eingestellt, die in der Schlepperspur laufen. Am Ende der Haube sind auf jeder Seite Kufen angebracht, die das Versinken der Blechkonstruktion in den Boden verhindern. Wenn das Gerät nur auf den Rädern steht und durch die Schlepperhydraulik in der entsprechenden Position gehalten wird, werden die Kufen nicht benötigt. Um das gesamte Gerät per Hydraulik über den Acker schweben zu lassen, wird ein Schlepper benötigt, der das große Moment des Geräts verkraftet. Als Nachteil ist dabei jedoch zu bemerken, daß die Abdichtung der Haube zum Boden schlechter wird.

Die Gasinstallation habe ich der Übersichtlichkeit halber nicht mehr in die Skizze eingezeichnet. Die Flaschen sind durch kurze Schläuche an eine zentrale Leitung gekoppelt. Diese Leitung führt über den Druckregler zu einer Ringleitung, die die Brenner versorgt. Vor und nach dem Druckregler sind Gashähne eingesetzt, die das Schnellabschalten ermöglichen. Der Regler hat eine Kapazität von 60 kg/h, einen maximalen Eingangsdruck von 16 bar und einen maximalen Ausgangsdruck von 6 bar. Alle Leitungen sind verschraubt und fest installiert.

Die Brennerbatterie besteht aus vier Stabbrennern mit insgesammt 48 Düsen vom Durchmesser Ø 0,5 mm. Der Düsenabstand beträgt 30 mm. Die Zündung erfolgt durch eine externe Flamme.

6.2. Meßaufbau und Verlauf der Messungen

Welches Ziel verfolge ich mit den Messungen am Gerät?

Aus der Literatur konnte ich nicht entnehmen, welche Temperaturen sich bei einem Vorauflaufgerät mit Haube einstellen. Daß die Temperatur ein sehr entscheidender Wert ist, geht jedoch aus Überlegungen und Versuchen hervor (siehe Kapitel *5. Versuch zum Pflanzentod*). Ob es sinnvolle Maßnahmen gibt, den Gasverbrauch zu reduzieren, die Temperaturen zu erhöhen oder ähnliches, kann ich nur dann entscheiden, wenn ich mir ein Bild von den Temperaturverläufen am Gerät selbst mache.

Um ein Temperaturbild zu bekommen, müssen vier Parameter beachtet werden:

1) Ort des Temperaturfühlers unter der Haube

2) Gasdruck am Brenner und damit die verbrannte Gasmenge pro Zeit

3) Strömungsgeschwindigkeit des Abgases gegenüber dem Gerät

4) Arbeitsgeschwindigkeit des Gerätes gegenüber dem Boden

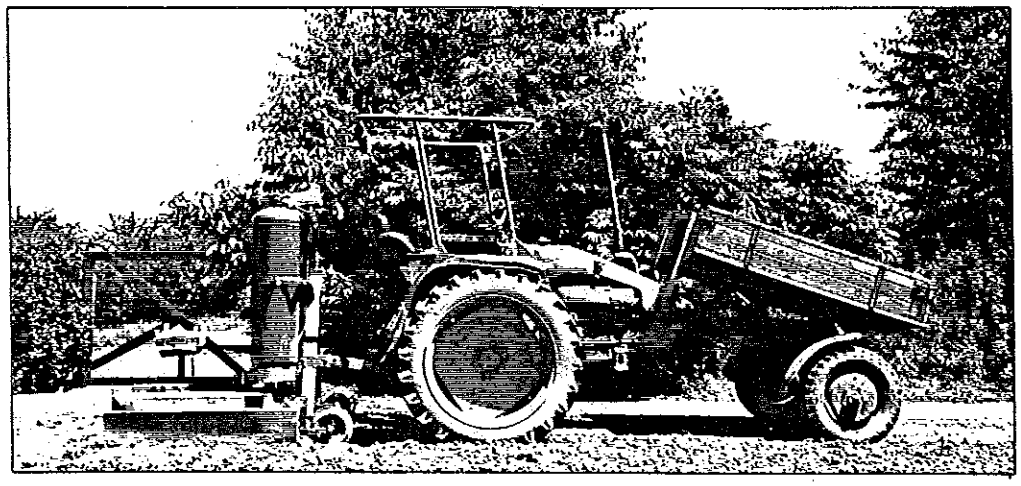


Bild 6 - 2: Abflammgerät "Distel" mit Schlepper auf dem Acker

Das obige Bild zeigt die Kombination von Abflammgerät und Schlepper, mit der ich die Versuche durchgeführt habe. Die Pritsche des Schleppers ist hochgeklappt, um die Sicht auf die Spur und damit die Spurführung zu erleichtern.

1) Ort des Temperaturfühlers

Voraussetzung für eine Positionierungsvorrichtung der Thermofühler ist eine schnelle, einfache Handhabung. Eine zusätzlich sehr billige Lösung zeigt die folgende Skizze.

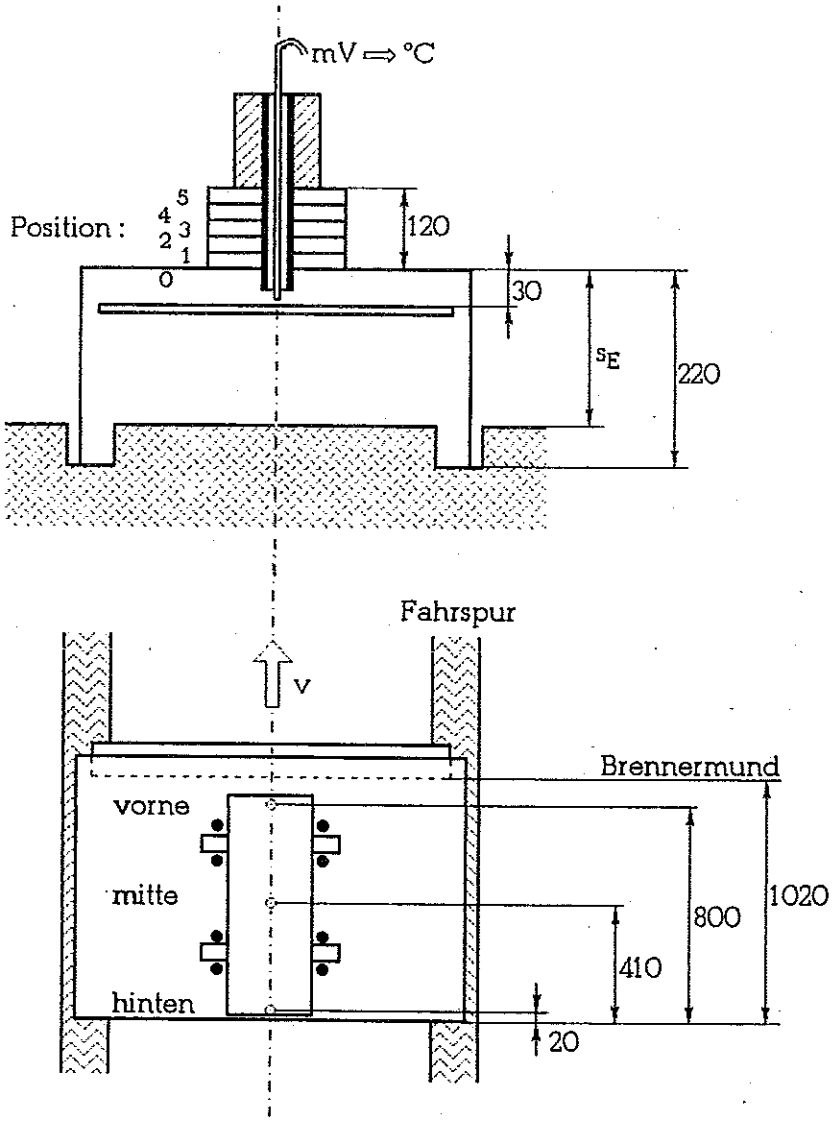


Bild 6 - 3: Mögliche Orte der Temperaturfühler

Um die einzelnen relativ kleinen Details ersichtlich zu machen, habe ich die Skizze stark verzerrt. Die Funktion sollte aber trotzdem noch zu erkennen sein.

Die Deckfläche des Geräts hat je nach Fahrspurtiefe einen Abstand s_E von der Erdoberfläche. Auf der Deckfläche liegt längs ein Holzbalken, der drei Messingröhrchen in sich trägt. Sie reichen durch vorgesehenen Bohrungen der Deckfläche in die "heiße Zone" hinein. Die Thermofühler werden durch die Röhrchen gesteckt und sind somit vor Verletzungen geschützt. Das entspricht der Position 0. Bis zu 5 Dachlattenstücke können unter den Holzbalken gelegt werden, um weiter 5 definierte Positionen zu erreichen. Die Dachlatten sind durch aufgeschweißte Rundeisen vor Verschiebungen in Fahrtrichtung gesichert. Mit zwei Handgriffen ist so die Position von drei Thermofühlern (vorne, mitte, hinten) gezielt veränderbar.

Vor jeder Messung muß die Spurtiefe gemessen werden, denn die Positionen 0 und 1 sind anfällig dafür, daß der Fühler durch die Erde gezogen wird. Dadurch kann er beschädigt werden. Die Ergebnisse sind außerdem nicht zu verwenden.

Ich hatte zu Beginn vorgesehen, den Holzbalken auch an einer Seite positionieren zu können. Um aber die Versuchs- und Datenflut nicht noch mehr anwachsen zu lassen, habe ich darauf verzichtet.

2) Gasdruck

Der von mir aufgeschriebene Gasdruck ist vom Druckregler während des Abflammens abgelesen. Hier gilt, daß die Werte der einzelnen Versuche untereinander vergleichbar sind. Den Druckabfall durch offenen Ventile und Rohrleitungen konnte ich nicht berücksichtigen. Die jeweils verbrauchte Gasmenge habe ich nicht ermittelt, da der Aufwand, die Flaschen auszubauen und zu wiegen, zu groß ist. Der absolute Gasverbrauch ist auch keine direkte Zielgröße meiner Versuche.

3) Strömungsgeschwindigkeit

Es dürfte mit zum Schwierigsten gehören etwas über die turbulenten Strömungen unter der Haube auszusagen. Ich hatte weder die Ausrüstung noch die Zeit, mich dieser Frage zu widmen.

4) Arbeitsgeschwindigkeit

Ich habe für die einzelnen Versuche die Zeit gestoppt, die nötig war, um das Beet der Länge l = 95 m abzuflammen. Die Geschwindigkeit ist aus diesen Werten berechnet.

Mit Versuchsprotokollen (siehe Kapitel *10.1. Diagramme und Daten*) gewappnet haben die Schlepperfahrerin und ich insgesamt 30 Versuche durchgeführt. Davon 22 innerhalb der ersten Meßreihe und weitere 8 nach den Veränderungen am Gerät (siehe auch gleichnamiges Kapitel *8.1.*).

Die digitalen Anzeigegeräte habe ich etwas erhöht über der Haube in einer Kiste untergebracht. Dadurch waren sie nicht der aufsteigenden Hitze ausgesetzt, und ich konnte die Werte besser aufnehmen. Für diese Tätigkeit mußte ich ebenfalls auf der Haube stehen. Um nicht allzu heiße Füße zu bekommen, habe ich mich auf eine durch Balken erhöhte und isolierte Stahlplatte gestellt. Je nach eingestelltem Gasdruck mußte ich jedoch nach spätestens zwei Versuchen den Versuchsaufbau durch Löschen vor dem Verbrennen "retten". Das Hauptproblem neben der als sehr störend empfundenen Hitze durch Strahlung und Konvektion, war das Ablesen der Anzeigen. Bei Geschwindigkeiten bis zu 4 km/h erfordert es bereits einiges an Übung und Standvermögen, nicht von der Haube zu fallen, die Werte abzulesen und die Werte leserlich mit der rechten Hand in das von der linken Hand gehaltene Protokoll einzutragen. Aber es geht. Eine automatische

Aufzeichnung und eventuell noch mehr Thermofühler wären bestimmt eine gewisse Erleichterung, waren aber nicht vorhanden und hätten den Aufwand für meine Zwecke übertrieben anwachsen lassen.

Auf dem folgenden Bild läßt sich der Meßaufbau erkennen. Der Holzbalken mit den Thermofühlern befindet sich in Position 0, d.h. es sind keine Dachlattenstücke untergelegt..

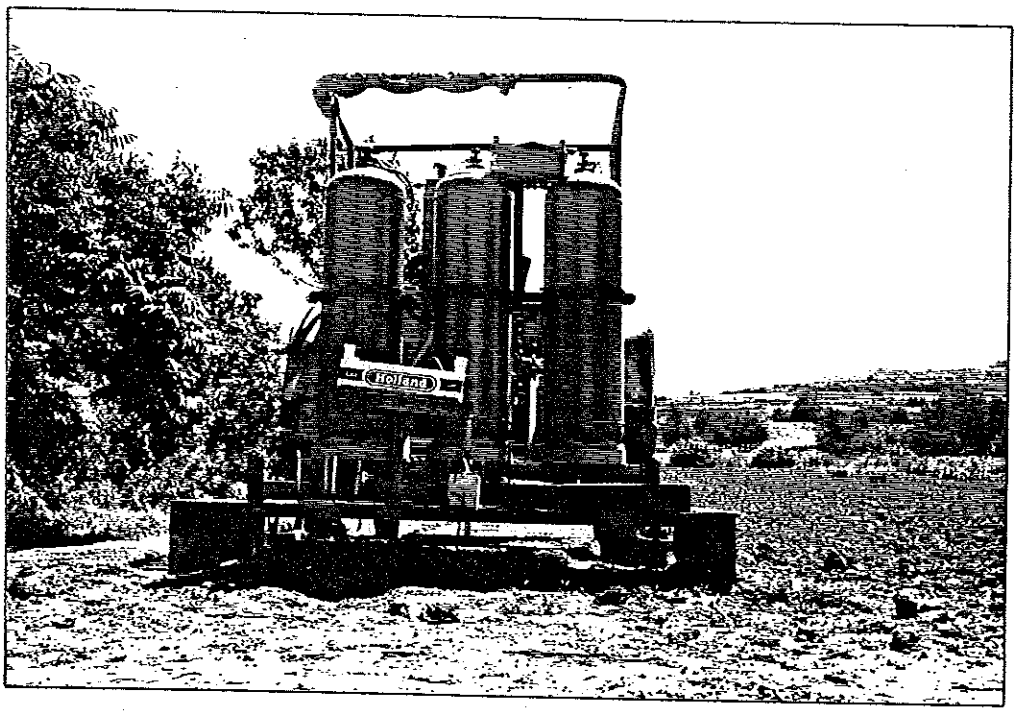


Bild 6 - 4: Abflammgerät mit Meßvorrichtung von hinten

Mit ein wenig Kopfwackeln kann sich die LeserIn ein Bild davon machen, wie es funktioniert, die Meßwerte während des "Ackerritts" abzulesen.

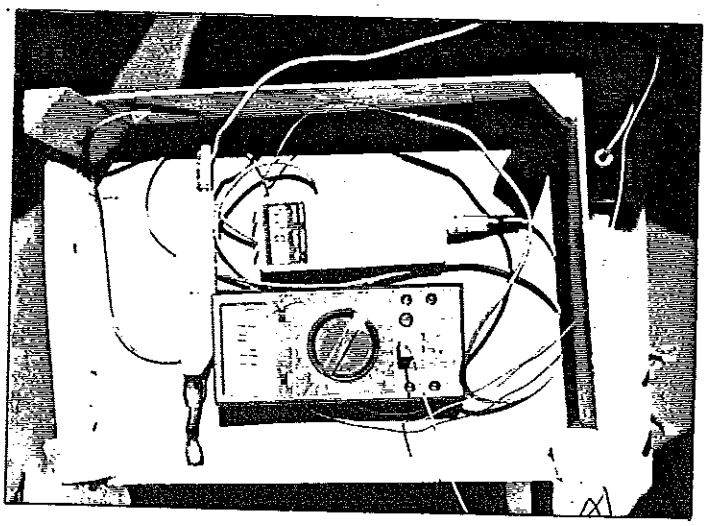


Bild 6 - 5: Blick auf die angeschlossenen Digitalmeßgeräte

6.3. Meßdiagramme

Die in diesem Kapitel zu besprechenden Meßdiagramme stellen eine gezielte Auswahl dar. Weiteres Datenmaterial ist im Kapitel *10.1. Diagramme und Daten* zu finden.

Folgende Abkürzungen werden von mir verwendet:

• Versuchsnummer:	Nr.: 1 ... 30	⇨	01 ... 30
• Gasdruck:	1,0 bar	⇨	0
	1,4 bar	⇨	4
	1,8 bar	⇨	8
• Position der Thermofühler:	Position 0 ... 5	⇨	0 ... 5
	vorne	⇨	v
	mitte	⇨	m
	hinten	⇨	h
• Arbeitsgeschwindigkeit:	3,5 ... 3,9 km/h	⇨	4
	1,3 km/h	⇨	1
	0 km/h	⇨	0

Die Bezeichnung 08/4/3/h/4 meint innerhalb des Versuchs Nr. 8, der mit 1,4 bar und einer Geschwindigkeit von 3,5 km/h gefahren wurde, den hinteren Meßfühler in der Position 3.

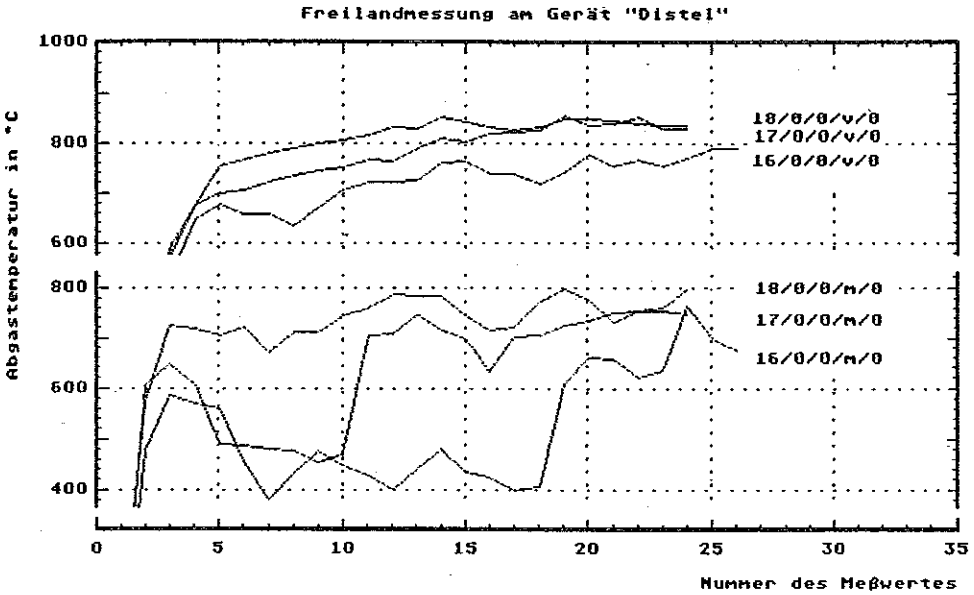


Bild 6 - 6: Übereinstimmung der Meßwerte bei Wiederholung des Versuchs

Die Versuche 16, 17 und 18 wurden mit feststehendem und windabgeschirmten Gerät durchgeführt. Alle anderen Parameter sind identisch. Die Übereinstimmug der Meßwerte ist jedoch vorne und hinten extrem unterschiedlich. Es ist schwer zu sagen, ob die Sprünge am mittleren Fühler durch Turbulenzen und Aufwärmprozesse ausreichend erklärt werden können. Auf jeden Fall sollten diese Kurven im Hinterkopf bleiben, wenn ich die weiteren Meßergebnisse vorstelle.

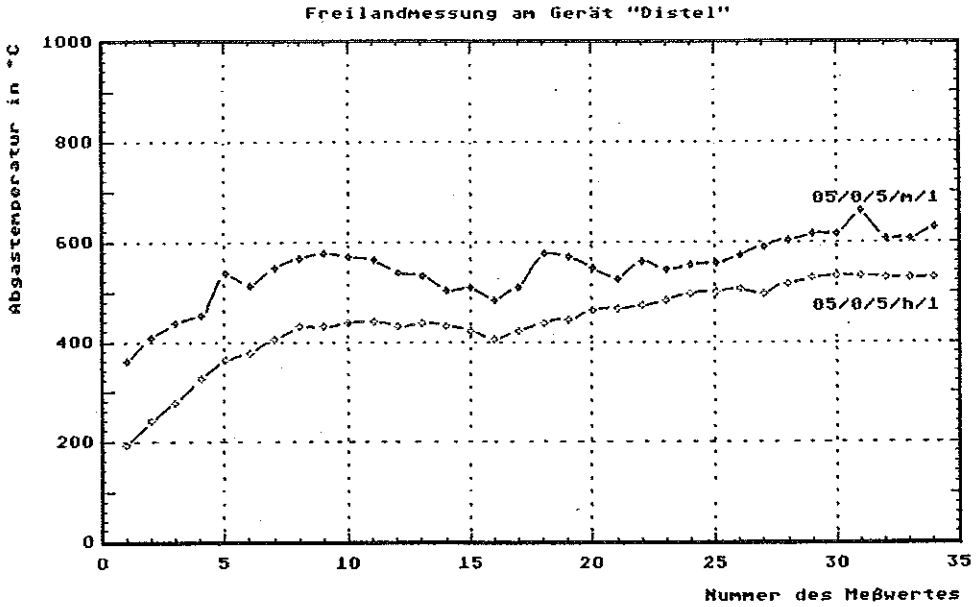


Bild 6 - 7: Kontinuierlich ansteigende Temperaturen

Das langsame Ansteigen der Temperatur liegt nicht an der Trägheit der Meßausrüstung. Vielmehr ist zu erkennen, daß die Temperatur bis zum Ende der Messung noch kein Maximum erreicht hat, also noch kein stationärer Zustand erreicht ist.

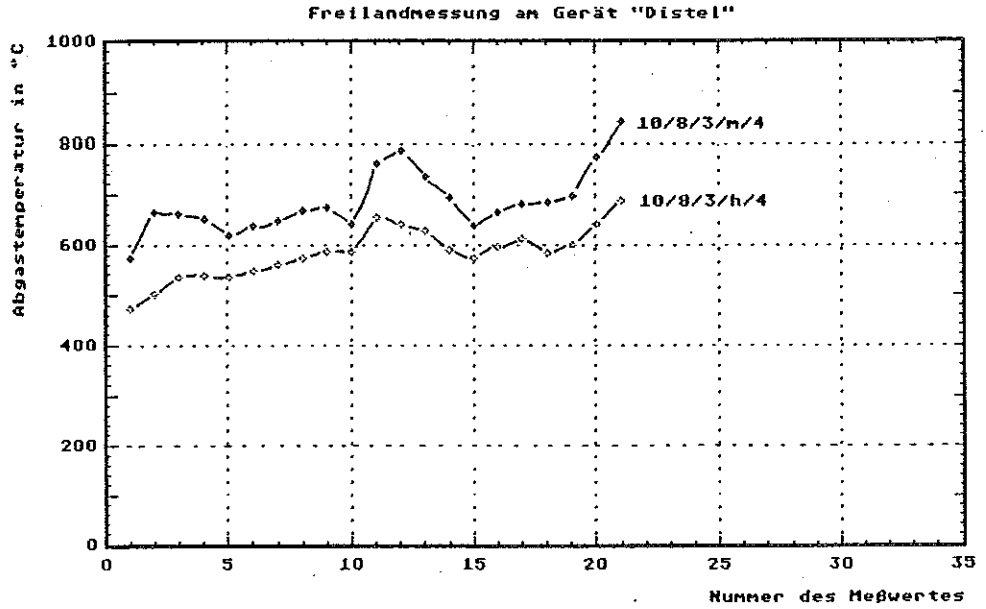


Bild 6 - 8: Schwingungen im Temperaturverlauf

Der Temperaturverlauf ist bei allen Messungen wellenförmig. Bereits in Kapitel *5.1. Temperaturverlauf am Brenner* war es mir nicht möglich, eine schlüssige Erklärung für dieses Phänomen zu finden. Wahrscheinlich scheint mir jedoch eine Rückkopplung zwischen Druckregler und dem sich aufbauenden Flammenumgebungsdruck.

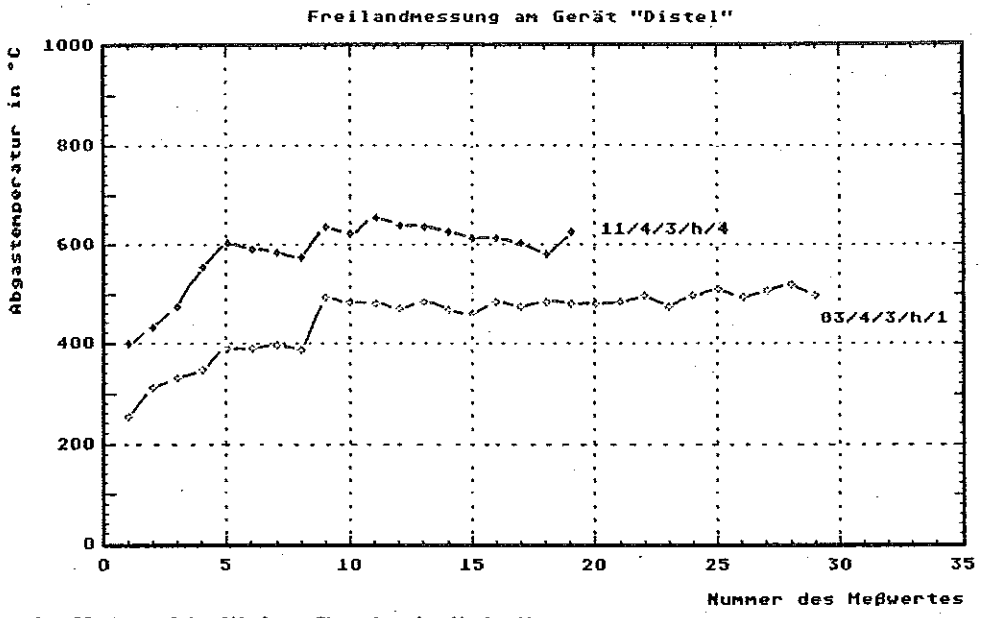


Bild 6 - 9: Unterschiedliche Geschwindigkeiten

Werden alle Parameter bis auf die Geschwindigkeit konstant gehalten, so zeigt sich in diesem Fall eine deutlich höhere Temperatur bei höherer Geschwindigkeit. Bei anderen Vergleichen ergibt sich genau das erwartete Gegenteil. Für ein haltbare Aussage müßten mehrere Vergleichswerte vorhanden sein.

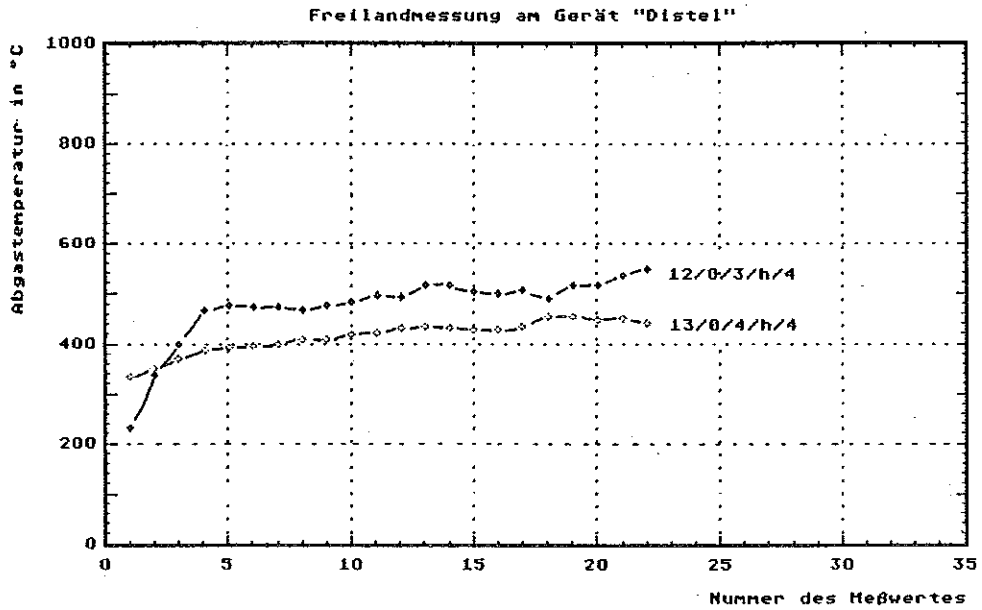


Bild 6 - 10: Unterschiedliche Positionen

Position 3 liegt näher am Boden als Position 4. Trotzdem ist Position 3 am Ende der Haube noch immer heißer als Position 4. Die Tendenz geht auch bei anderen Vergleichen dahin, daß eine "kopfstehende" Temperaturschichtung vorhanden ist.

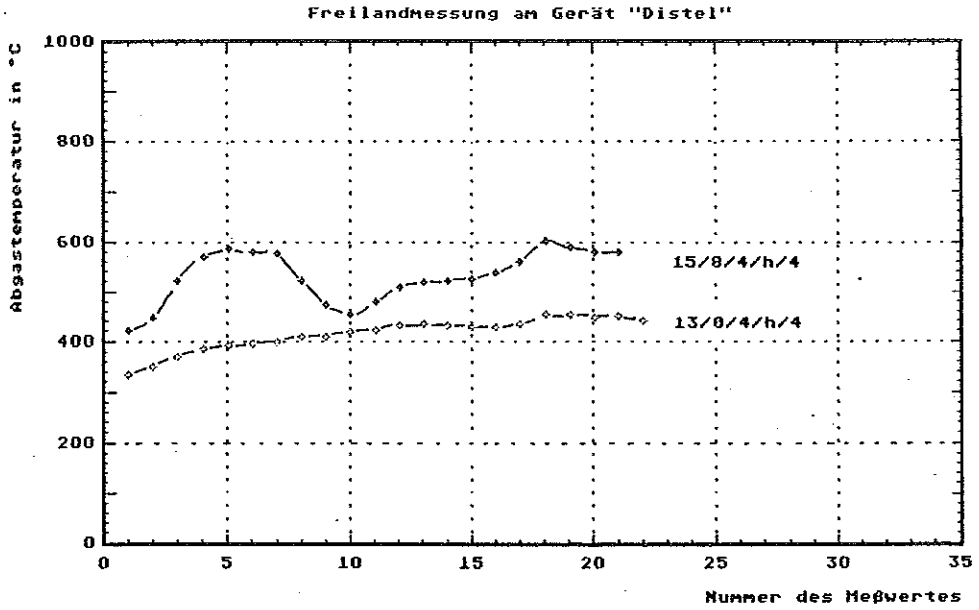


Bild 6 - 11 : Unterschiedliche Drücke

Je größer der Gasdruck ist, desto stärker ausgeprägt sind die Sprünge und Schwingungen des Verlaufs. Zudem kommt, daß die Temperaturen steigen und die Differenz zwischen "mitte" und "hinten", die bei kleinen Drücken bei ca. 200 K liegt, immer mehr verschwindet. Die Temperaturen gleichen sich also auf höherem Niveau an.

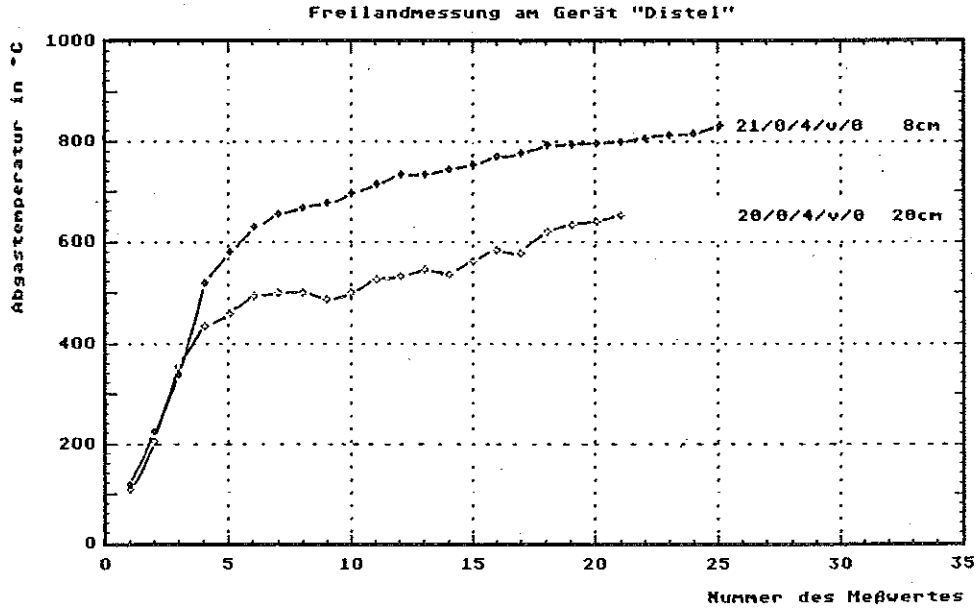


Bild 6 - 12: Unterschiedliche Abgasaustrittsquerschnitte

Diesen Messungen liegen wieder Versuche mit feststehendem Gerät zugrunde. Um eine Aussage zur Strömung machen zu können, habe ich den Lufteintrittsquerschnitt vor den Brennern verringert. Am Ende der Haube habe ich aus Lehm eine "Mauer" errichtet, die die Abgase zwingt nach oben zu strömen. Der damit verbleibende Austrittsquerschnitt ist dann von 20 cm auf 8 cm reduziert worden. Der Effekt ist eine deutliche Temperatursteigerung und eine leichte Glättung der Schwingung.

6.4. Auswertung

Das Ziel der "ersten Messungen" ist die Erfassung der Temperaturverläufe am Gerät "Distel". Inwieweit ist mir das gelungen?

Die Anzahl von 22 Versuchen ist für eindeutige Aussagen vielleicht nicht ganz ausreichend. Die verschiedenen Tendenzen, die ich festgestellt habe, sind jedoch belegbar.

- Bei allen Temperaturverläufen ist zu bedenken, daß sich das Gerät zunächst aufheizt, bis ein stationärer Zustand zwischen Wärmeproduktion (Verbrennung) und Wärmeabgabe (Konvektion, Strahlung) erreicht ist. Die Wiederholbarkeit von einzelnen Versuchen wird dadurch erschwert. Das vollständige Abkühlen des Geräts vor dem folgenden Versuch ist aufwendig und zeitraubend. Außerdem entspricht das nicht der Praxis. Wenn mehrere Beete hintereinander abgeflammt werden, wird keine GärtnerIn zwischendurch warten, bis das Gerät wieder kalt ist.

- Zusätzlich sind alle Verläufe durch "Schwingungen" gekennzeichnet. Da die Höhe der Schwingungen mit zunehmendem Druck ansteigt, liegt der Schluß nahe, daß sehr turbulente Verhältnisse vorliegen, die wiederum eine Wiederholung des Versuches erschweren. Die von mir erhoffte einfache "Temperaturschichtung" hat sich nicht eingestellt. Durch die aufgeheizte oberste Erdschicht und den Wärmeaustausch der Haube kommt es sogar eher dazu, daß die Temperaturen in Bodennähe höher sind als die weiter oben. Eine Temperaturdifferenz von 200 K zwischen "mitte" und "hinten" ist so gut wie immer zu beobachten. Der Wärmeaustausch zwischen Abgas und Umgebung funktioniert also sichtlich.

- Die Bewertung unterschiedlicher Geschwindigkeiten ist sehr problematisch. Ein Vergleich der Versuche zeigt kein einheitliches Bild. Mit Hilfe von bekannten Abgasströmungsgeschwindigkeiten wäre es möglich, das Verhalten näher zu analysieren. Dazu gibt es im Kapitel *4.3. Das Abflammgerät als Wärmetauscher* weitere Anregungen. Bei konstantem Druck und damit konstanter Abgasmenge dürften sich die Temperaturen nicht allzu stark ändern. Allerdings bewegt sich das Abgas gegenüber dem Boden jeweils unterschiedlich. Es kommt zu verschiedenen Grenzschichtbildungen bei der Strömung und damit auch beim Wärmeaustausch. Zusammengefaßt ist das im Wärmeübergangskoeffizienten, der für die Beschreibung des Abkühlvorganges herangezogen wird. Auf diese Fragestellung kann ich im Rahmen der Studienarbeit aber nicht mehr eingehen.

- Die Variation der Abgasaustrittsquerschnitte hat das Ziel, die Staufähigkeit der Verbrennung abzuschätzen. Bei diesem Meßaufbau muß sich der Brenner die Luft durch einen relativ engen Spalt ansaugen. Das Abgas muß sich dann unter der Haube bewegen und am Ende wiederum durch einen relativ engen Spalt austreten. Die Messungen haben bestätigt, daß eine Verbrennung ohne Stau möglich ist, und daß dabei die Temperaturen steigen.

Resümee:

Die Erfassung der Temperaturen ist sehr aufwendig und teilweise nicht reproduzierbar. Der Einblick in die Größenordnungen ist jedoch gelungen und erlaubt es, daraus Schlüsse für Veränderungen am Gerät zu ziehen.

7. Veränderungen am Gerät

7.1. Rückgriff auf Rechenmodelle und Messungen

Die Erkenntnisse aus den theoretischen Überlegungen, Rechenmodellen und den erfolgten Messungen sollen dazu genutzt werden, Veränderungen am Gerät vorzunehmen, von denen ich eine Verbesserung der Abflammergebnisse erwarte.

Mit der Zielvorgabe, daß die Arbeitsgeschwindigkeit ca. 4 km/h auf dem Acker erreichen soll, ergibt sich folgendes Bild:

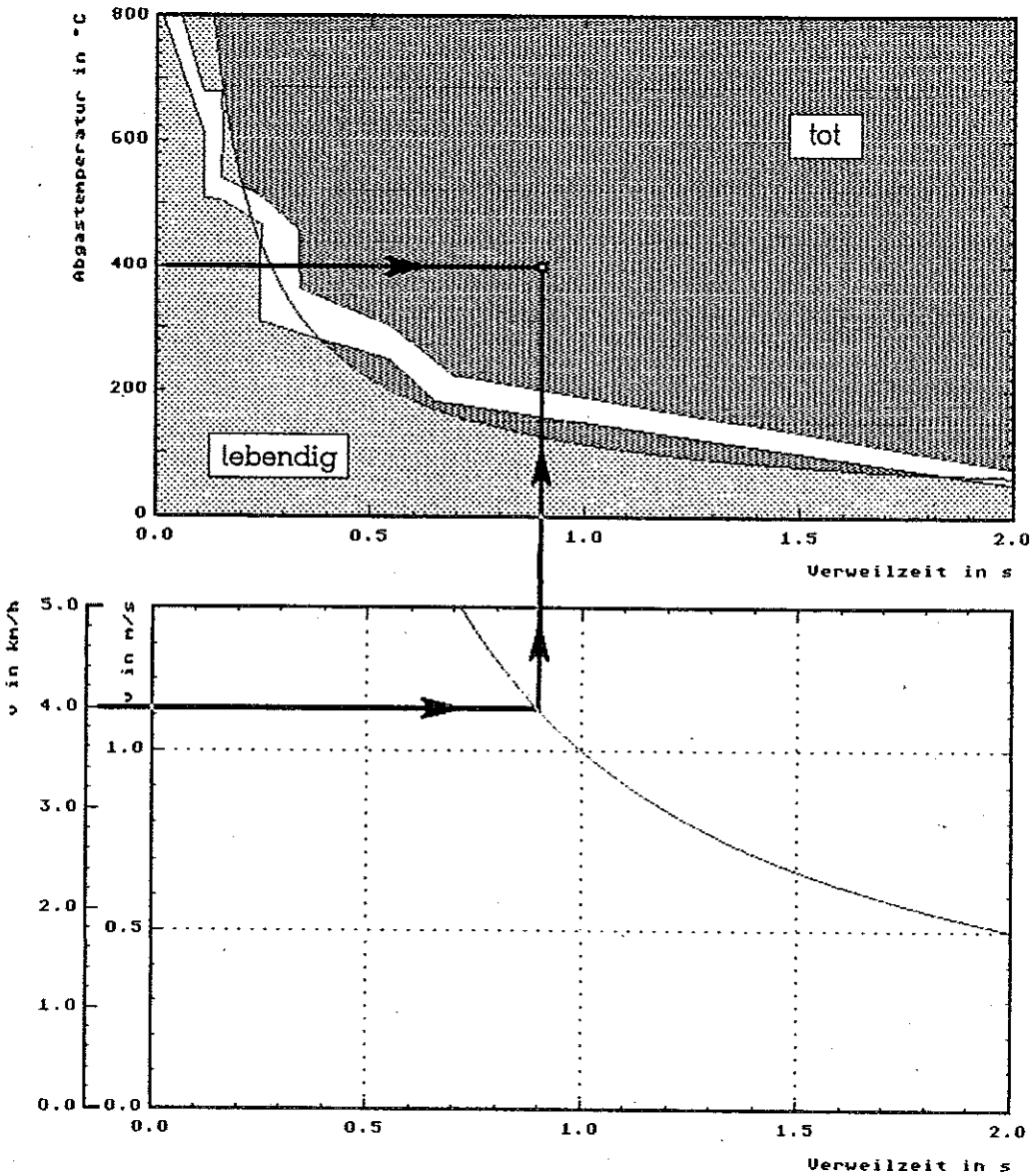


Bild 7 - 1: Arbeitspunkt nach "ersten Messungen"

Die Kurve im unteren Diagramm beschreibt die Verweilzeit in Abhängigkeit der Geschwindigkeit bei einer Haubenlänge von $l = 1{,}0\,m$.

$$v = \frac{l}{t} \qquad (7\cdot1)$$

Die erreichte Verweilzeit beträgt demnach 0,9 s.

Die niedrigsten Abgaswerte am hinteren Ende der Haube betragen ca. 400°C. Um "auf der sicheren Seite" zu bleiben, nehme ich diesen Wert als Durchschnittswert an, und gelange so zu einem Arbeitspunkt, der deutlich innerhalb der "Todesregion" liegt. Um das Abflammergebnis zu verbessern und zuverlässiger zu machen, gibt es nur die Möglichkeit, den Arbeitspunkt noch weiter nach oben zu verschieben. Eine Verschiebung nach rechts ist nur durch langsameres Fahren oder eine längere Haube zu realisieren. Die Konstruktion einer längeren Haube, die die Wendefähigkeit des Schleppers nicht beeinträchtigt, führt zwangsläufig zu einer Konstruktion, die nach vorn unter den Schlepper reicht. Die dabei zu erwartenden Komplikationen beim Ankuppeln, die Verminderung der Haubenbreite, damit sie zwischen die Schlepperspur paßt und die Temperaturbelastung für den Schlepper sammt FahrerIn machen dieses Ansinnen jedoch zunichte.

Wo gilt es anzupacken, um die Temperaturführung zuverlässiger und auf höherem Niveau zu halten ohne mehr Gas zu verbrennen?

- Sehr wichtig scheint mir in diesem Zusammenhang die festgestellte Aufwärmphase des Gerätes. Um die Zuverlässigkeit für die gesamte Beetlänge zu gewährleisten, muß die aufzuwärmende Masse verringert werden.

- Die in Kapitel *4.2. Energiebilanz und Wirkungsgrad* beschriebenen Verluste durch Strahlung und Konvektion an der Haube sind nicht sehr groß im Vergleich zur der Wärmemenge, die im Boden bleibt. Trotzdem ist hier ein Potential von 6-12% vorhanden, das nicht verschenkt werden muß.

- Aus den Messungen hat sich ergeben, daß die Abgasströmung bis zu einem gewissen Maß durch Verengung des Austrittquerschnitts behindert werden kann, ohne daß sich ein unakzeptabler Stau bildet. Das folgende Bild zeigt eine Möglichkeit diesen Effekt auszunutzen. Das Schema entspricht dem im Kapitel *4.4. Strömungstechnische Betrachtung* vorgestellten.

Der als **Fall 4** bezeichnete Zustand stellt den Abgasteppich dar, der sich gegenüber dem Boden nicht bewegt ($v_{AE} = 0$). Die Geschwindigkeit der Abdeckplatte gegenüber dem Boden v_{DE} und die Geschwindigkeit des Abgases gegenüber der Abdeckplatte v_{AD} heben sich auf.

Fall 7 geht von den gleichen Voraussetzungen aus ($v_{AE} = 0$). Die Abdeckplatte liegt jedoch näher am Boden. Wenn die gleiche Menge Abgas erzeugt wird, gibt es zwei Möglichkeiten. Entweder das "neu" entstehende Abgas zwingt das "alte" dazu, sich schneller unter der Abdeckplatte zu bewegen, oder es kommt zum Stau.

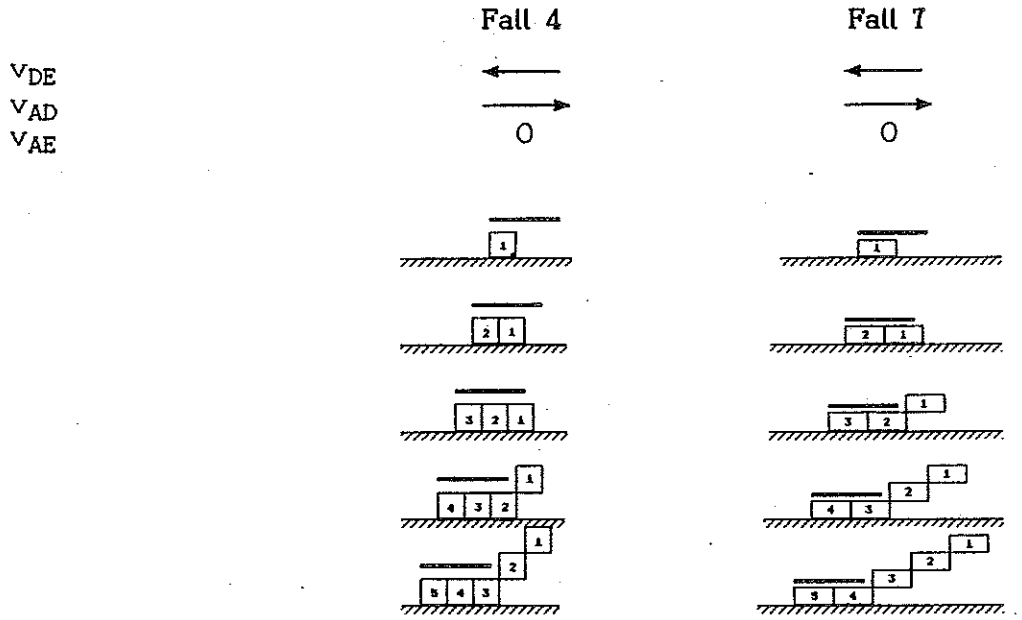


Bild 7 - 2: Die "Abgaswolken" im veränderten Wärmetauscher

Der Stau ist natürlich nicht angestrebt. Das "schnelle Abgas" ist jedoch zu bevorzugen, denn dadurch erhöht sich der Wärmeübergangskoeffizient, das Abflammen wird zuverlässiger.

• Ein viel zu wenig beachteter Punkt ist die Störung der Abgasströme durch den von außen angreifenden Wind. Bei meinen Messungen ist es nicht möglich genau einzuordnen, ob die Schwingungen zum Teil durch den Wind verursacht werden. Tatsache ist jedoch, daß bei starkem Wind bisweilen sogar die Flamme ihre Richtung ändert, sprich: unter dem Schlepper austritt. Dieser Zustand ist sowohl unangenehm und bisweilen gefählich, als auch für das Abflammen nicht brauchbar. Es muß also ein Weg gefunden werden, damit der Wind nicht mehr ungehindert unter der Abdeckplatte hindurch blasen kann.

Aus diesen Überlegungen heraus habe ich zwei Maßnahmen ergriffen:

1) Isolation der Abdeckplatte von innnen

Durch diese Maßnahme sollen mehrere Punkte auf einmal gelößt werden. Die aufzuwärmende Masse verschwindet hinter der Isolation. Die Verluste über der Abdeckplatte werden reduziert. Die effektive freie Höhe des Abgasquerschnitts wird verringert.

2) Windschutz vorne und hinten

Ein wirksamer Windschutz ermöglicht, daß der Abflammvorgang weitestgehend von den äußeren Bedingungen unabhängig ist.

7.2. Isolation

Die Isolation muß folgendes gewährleisten:

- Ausreichend niedrige Wärmeleitung bei bis zu 50 mm Dicke
- Niedriges Gewicht und Wärmekapazität
- Temperaturbeständigkeit bis über 1000°C
- Gute Temperaturwechselbeständigkeit
- Gute Verarbeitbarkeit im kalten Zustand
- Keine biologisch bedenklichen Inhaltsstoffe wie Asbest
- Ausreichende Festigkeit gegen die Schwingungsbelastung

Nachdem ich bei den Vorversuchen am Brenner die Erfahrung gemacht habe, daß Glaswolle tasächlich unter ätzender Rauchbildung abbrennt, und auch die im Handel verfügbaren Steinwollematten durch organische Kleber gebunden sind, habe ich nach anderem Material gesucht und es auch gefunden.

Unter dem Namen "FIBERFRAX Durablanket" [30] wird eine Matte vertrieben, die folgendermaßen beschrieben wird: "Fiberfrax Durablanket ist eine feste, leichte und flexible Matte, hergestellt aus langen Fiberfrax Keramikfasern. Die über Kreuz gelegten Fasern sind mechanisch verkettet und dies ergibt eine reißfeste Matte. In Durablanket sind keinerlei organische Binder enthalten."

Der Schmelzpunkt liegt bei 1760°C, die Dichte beträgt $2{,}73\,g\,cm^{-3}$ und die spezifische Wärme bei 1093°C entspricht $1{,}130\,kJ\,kg^{-1}\,K^{-1}$.

Die Festigkeit gegen die Schwingungsbelastung läßt sich nicht abschätzen. Hier kann nur der Langzeitversuch Aufschluß über das Verhalten geben. Da die absoluten Einsatzzeiten des Abflammgerätes allerdings nicht sehr lang sind, besteht die begründete Annahme, daß die Isolation nicht übermäßig schnell zerstört wird.

Daß die Wärmeleitfähigkeit für meine Zwecke ausreicht, zeige ich im folgenden anhand einer kurzen Berechnung.

Die Gleichung zur Beschreibung der Wärmeleitung lautet:

$$Q_\lambda = \frac{\lambda}{s} \cdot A \cdot (T_h - T_k) \cdot t \qquad (7\cdot 2)$$

Der hier entscheidende Term ist $\frac{\lambda}{s}$, da die Fläche A der Platte, die Temperaturdifferenz (T_h - T_k) zwischen heißer und kalter Seite der Platte und die Zeit t zunächst als konstannt betrachtet werden können.

Für die Abdeckplatte aus Eisen gilt: $\lambda = 52\,W\,m^{-1}\,K^{-1}$ [19, S.190]
$s = 0{,}002\,m$

$$\frac{\lambda}{s} = \frac{52\,W\,m^{-1}\,K^{-1}}{0{,}002\,m} = 26\,000\,W\,m^{-2}\,K^{-1}$$

Für die Isolationsschicht gilt: $\lambda = 0{,}26\,W\,m^{-1}\,K^{-1}$ [30]
$s = 0{,}0254\,m$

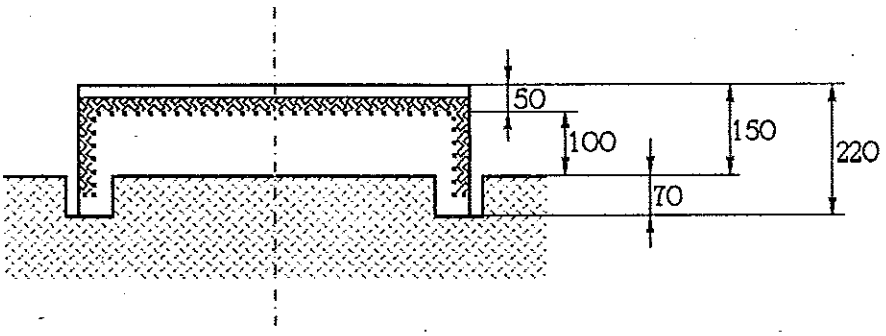
$$\frac{\lambda}{s} = \frac{0{,}26\,W\,m^{-1}\,K^{-1}}{0{,}0254\,m} = 10{,}2\,W\,m^{-2}\,K^{-1}$$

Damit liegt zwischen dem Wärmetransport der Abdeckplatte und dem der Isolationsschicht ein Faktor von:

$$\frac{\text{Abdeckplatte}}{\text{Isolationsschicht}} = \frac{26\,000\,W\,m^{-2}\,K^{-1}}{10\,W\,m^{-2}\,K^{-1}} = 2\,600$$

Die zu erwartende Erhöhung der Temperatur bei isolierter Abdeckplatte geht nur minimal in das Gesamtergebnis ein. Da sich die Außentemperatur dagegen auf jeden Fall drastisch vermindert, wird die Konvektion und die Strahlung der Platte stark reduziert. Damit nimmt der Wärmedurchgang weiter ab. Eine genauere Berechnung halte ich im weiteren nicht für nötig.

Die anschließenden Bilder zeigen die erfolgten Isolationsmaßnahmen.



Isolationsmaterial
..... Wellengitter, Seitenansicht

Bild 7 - 3: Maße an der isolierten Haube

Um die Isolationsmatten unter der Haube am vorgesehenen Platz zu halten, habe ich ein geflochtenes Wellengitter mit Maschenweite 40 × 40 angeschweißt. Da dieses Gitter einem erheblichen Temperaturwechsel unterliegt, habe ich nur jedes zweite Drahtende festgeschweißt. Durch die geflochtene Struktur kann somit ein großer Teil der entstehenden Thermospannungen durch die unbehinderte Ausdehnung des Drahtes aufgefangen werden.

Der Bereich, der direkt an die Brenner anschließt, ist mit doppelter Materialstärke, also 50 mm, isoliert. An den anderen Stellen liegt die Matte auf dem Gitter auf und läßt noch einen zusätzlich isolierenden Luftspalt zur Abdeckplatte.

Bei einer mittleren Spurtiefe von 70 mm schrumpft der verbleibende Abgasquerschnitt von 150 mm auf 100 mm zusammen. Damit soll die Beschleunigung des Abgases erreicht werden.

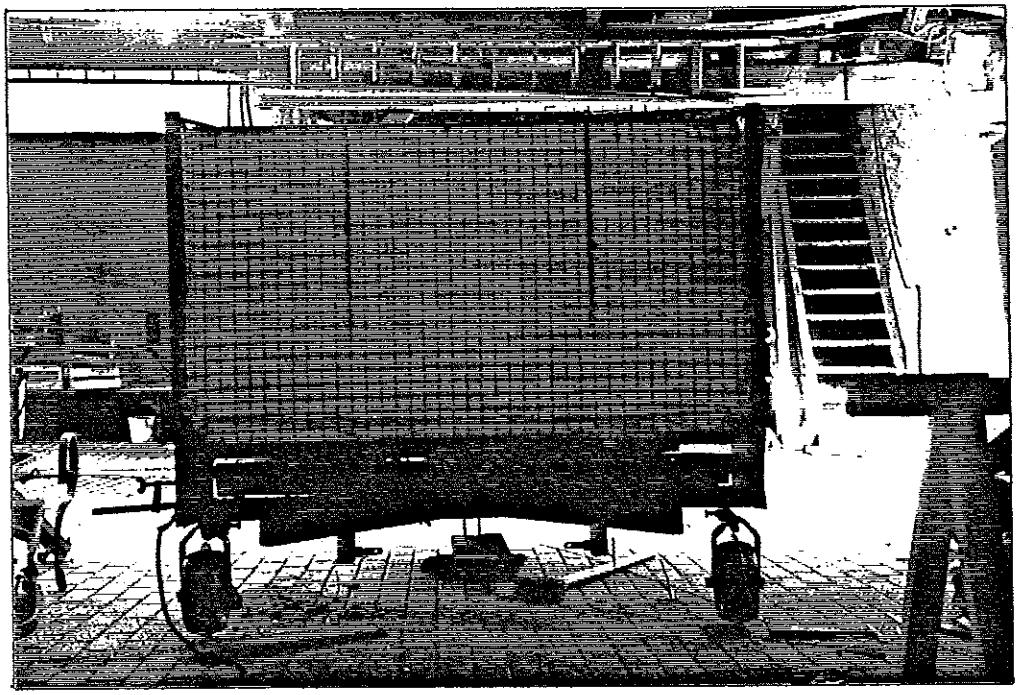


Bild 7 - 4: Blick unter die isolierte Haube

Das obige Bild zeigt das Wellengitter und läßt den doppelt isolierten Bereich hinter dem Brenner erkennen.

7.3. Windschutz

Der Windschutz muß folgendes gewährleisten:

- Abschirmung des Wärmetauschers gegen Wind
- Geringe Masse
- Einstellbarkeit des Abstandes zum Boden, da die Spurtiefe variiert
- Robuste Ausführung, da landwirtschaftliches Gerät

Im Kapitel *4.3. Das Abflammgerät als Wärmetauscher* habe ich das Abflammgerät als Wärmetauscher idealisiert. Das folgende Bild zeigt die vom angreifenden Wind unabhängige Strömungsführung der Abgase.

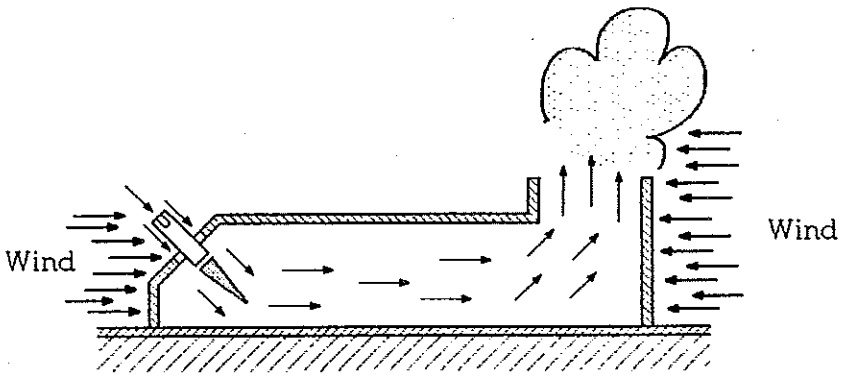


Bild 7 - 5: Windgeschützter, idealer Wärmetauscher

Das reale Abflammgerät bewegt sich allerdings über den Acker und darf deshalb keine Verbindung zum Boden haben. Jedes Entlangkratzen ist bereits zu viel, da die empfindlichen Keimlinge direkt unter der oberen Krume liegen und leicht beschädigt werden können.

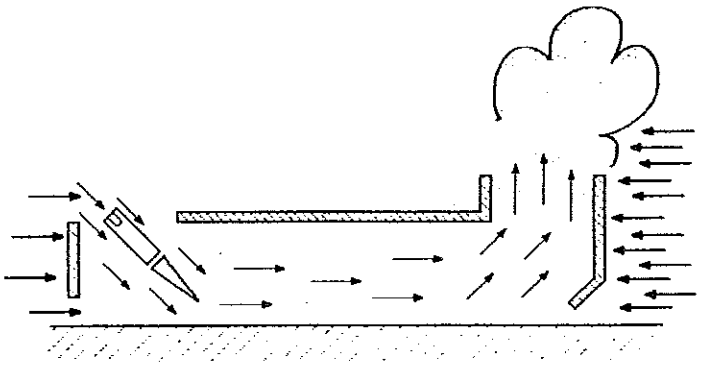


Bild 7 - 6: Aufbau des Abflammgerätes mit vorderem und hinterem Windschutz

Wie soll der in der oberen Skizze dargestellte Windschutz realisiert werden?

Da der Wind von vorne das Abgas kurzzeitig beschleunigt ist er nicht wünschenswert für eine gleichmäßige Temperaturführung. Allerdings wird er durch den Schlepper bereits abgebremst und bringt zusätzlich Sauerstoff unter die Haube. Deshalb habe ich mich entschlossen an der Front des Geräts ein einfaches Blech anzuheften, das ausreichend Abstand zum Boden läßt. Der Brenner saugt die nötige Luft von oben an. Das folgende Bild veranschaulicht diese einfache Lösung.

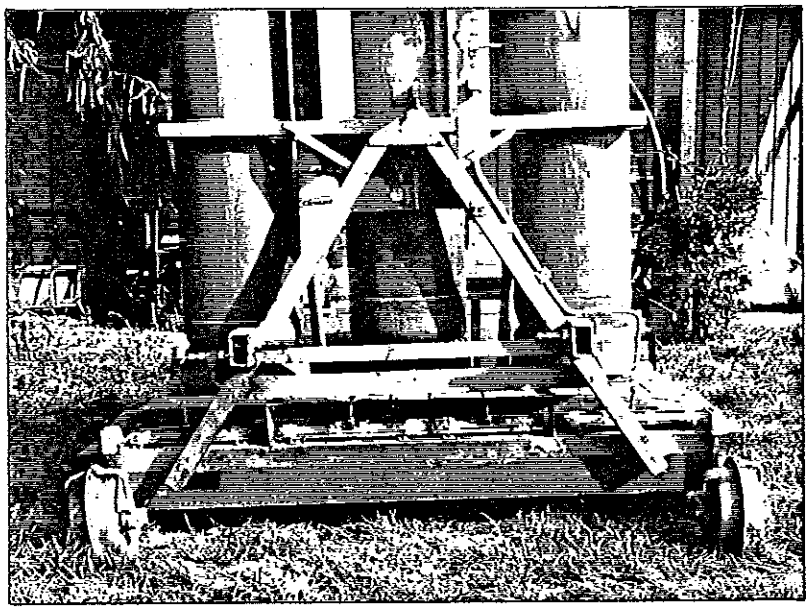


Bild 7 - 7: Vorderer Windschutz aus angeheftetem Blech

Das Ende des Wärmetauschers hat dagegen einem Angriff durch den Wind nichts entgegenzusetzen. Ich habe zwei mögliche Konstruktionen entworfen. Die im nächsten Bild gezeigte Seitenansicht kann durch eine Parallelogrammführung schnell in die gewünschte Höhe gebracht werden.

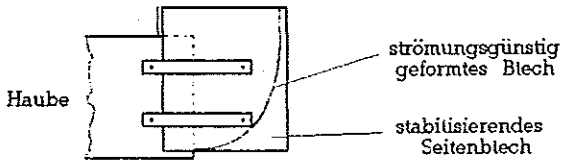


Bild 7 - 8: Verstellbarer Windschutz mit Parallelogrammführung

Die Lagerung muß stabil und rüttelfest sein. Der Fertigungsaufwand und die zu erwartenden Klappergeräusche sind die Hauptgründe, daß ich diese Version verworfen habe.

Die zweite, verwirklichte Konstruktion kommt ohne direkt bewegliche Teile aus.

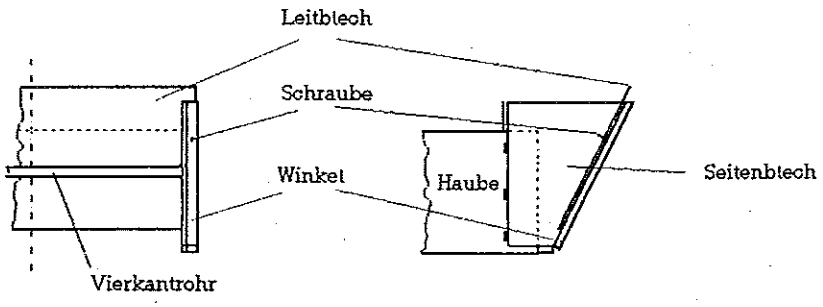


Bild 7 - 9: Verstellbarer Windschutz durch Wahl der Bohrung

Zwei abgeknickte Winkel sind an die jeweilige Seite des Haubenendes geschweißt. Ein Vierkantrohr verbindet beide Winkel und stabilisiert sie. Das Abgasleit- und Windschutzblech liegt auf den Winkeln und dem Vierkantrohr auf. Befestigt ist es durch zwei an den Winkeln angeschweißte Schrauben. Da mehrere Bohrungen im Blech vorgesehen sind, läßt sich die Höhe einstellen. Das ist etwas aufwendig in der Benutzung, kann jedoch kaum zerstört werden. Die Seiten sind durch Bleche abgedichtet, die die Konstruktion zusätzlich stabilisieren.

Einen Eindruck von diesem "Abgaskamin" vermittelt das nächste Bild.

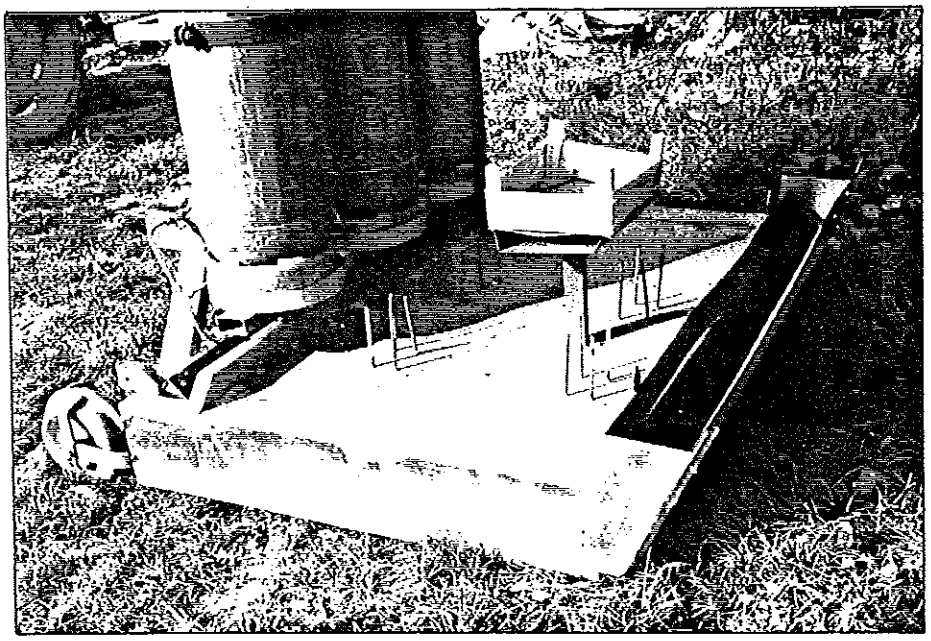


Bild 7 - 10: Hinterer Windschutz als Blechkamin

8. Weitere Messungen am Gerät

8.1. Verlauf der Messungen

Welches Ziel verfolge ich mit den "weiteren Messungen am Gerät"?

Die im Kapitel *7. Veränderungen am Gerät* beschriebenen Maßnahmen Isolation und Windschutz sollen die Zuverlässigkeit des Abflammgerätes erhöhen. Eine Möglichkeit den Nachweis dafür zu erbringen, ist die Aufnahme der Temperaturverläufe. Das habe ich gemacht. Ich weise jedoch darauf hin, daß die gemessenen Temperaturverläufe nicht als endgültiger Abflammtest gewertet werden dürfen. Hierzu müßten gezielte Beobachtungen auf Beeten mit Beikrautbesatz durchgeführt werden.

Der Meßaufbau entspricht für die Versuche Nr. 23 bis Nr. 30 genau dem in Kapitel *6.2. Meßaufbau und Verlauf der Messungen* beschriebenen.

Der erste Anlauf für einen Versuch endete mit einem schnellen Abbruch. Ich hatte die Spurtiefe unterschätzt. Das Leitblech des hinteren Windschutzes bekam Bodenkontakt und bevor wir die Situation überblickten, hatte sich die Haube bereits mit Erde aufgefüllt und 4 m Beet waren säuberlich abgehobelt.

Dieses Ergebnis zeigt, daß der Windschutz ein gewöhnungsbedürftiges Teil ist, das von der SchlepperfahrerIn viel Augenmaß erfordert.

Nachdem ich das Blech um eine Bohrung nach oben verschoben hatte, verliefen alle weiteren Versuche vollkommen unproblematisch.

Bei niedrigen Drücken konnte ich teiweise gelbe Flammen beobachten. Die Verbrennung verlief dann hörbar in Schüben ab.

Alle Versuche wurden in Position 0 durchgeführt. Damit ist die Vergleichbarkeit leichter. Durch die Reduzierung des Abgasquerschnittes ist die horizontale Temperaturverteilung sowieso nur bedingt interessant. Da sich das Beikraut mit Vorliebe unmittelbar am Boden aufhält, ist die Position O auch die relevanteste für das Abflammergebnis.

Hauptproblem waren die doch etwas unerwartet hohen Temperaturen. Aus Angst um die Thermofühler habe ich deshalb einzelne Versuche abgebrochen, bevor das gesamte Beet abgefahren war.

Die in den ersten Versuchen festgestellte Hitzewallung und Hitzestrahlung von der Haube aus hat sich auf Null reduziert. Selbst nach etlichen Versuchen war die Haube außen gerade gut "handheiß", also ca. 70°C. Durch diese Verbesserung macht das Aufnehmen der Werte richtig Spaß. Die fehlende Hitzebelastung wurde aber durch die erhöhten Geschwindigkeiten wieder wett gemacht.

Die erste, schnelle Auswertung auf dem Acker hinterließ einen so günstigen Eindruck, daß ich auf eine weitere Versuchsreihe verzichtet habe.

8.2. Meßdiagramme

Die in diesem Kapitel zu besprechenden Meßdiagramme stellen eine gezielte Auswahl dar. Weiteres Datenmaterial ist im Kapitel *10.1. Diagramme und Daten* zu finden.

Folgende Abkürzungen werden von mir verwendet:

• Versuchsnummer:	Nr.: 1 ... 30	⇨	01 ... 30
• Gasdruck:	1,0 bar	⇨	0
	1,4 bar	⇨	4
	1,8 bar	⇨	8
	2,2 bar	⇨	2
	2,6 bar	⇨	6
• Position der Thermofühler:	Position 0 ... 5	⇨	0 ... 5
	vorne	⇨	v
	mitte	⇨	m
	hinten	⇨	h
• Arbeitsgeschwindigkeit:	5,0 ... 7,7 km/h	⇨	6
	4,0 ... 4,9 km/h	⇨	5
	3,5 ... 3,9 km/h	⇨	4
	1,3 km/h	⇨	1
	0 km/h	⇨	0

Die Bezeichnung 08/4/3/h/4 meint innerhalb des Versuchs Nr. 8, der mit 1,4 bar und einer Geschwindigkeit von 3,5 km/h gefahren wurde, den hinteren Meßfühler in der Position 3.

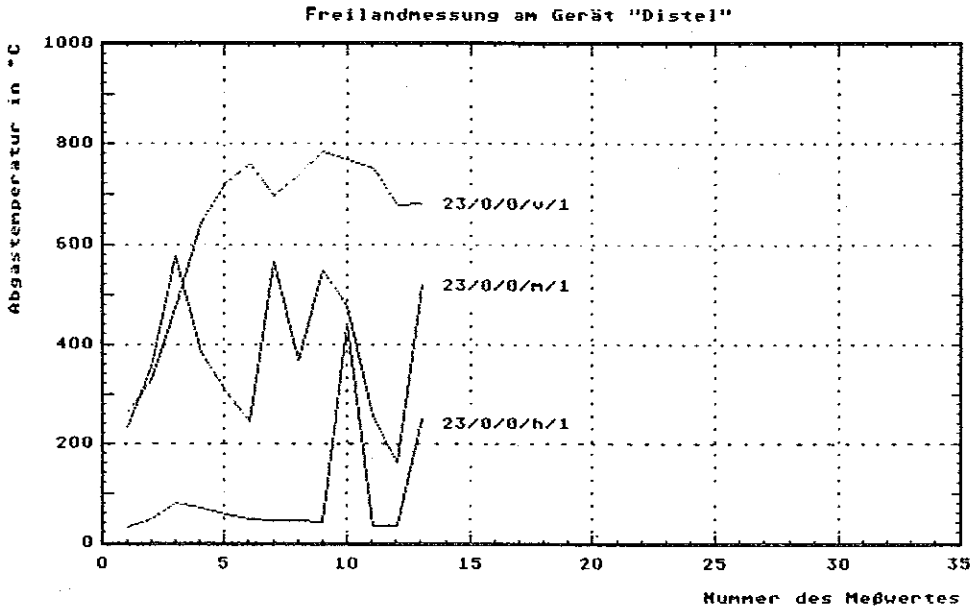


Bild 8 - : Schlechte Verbrennung bei niedrigem Druck

Ein Beispiel für zu niedrige Abgasgeschwindigkeiten. Stau ist die Folge.

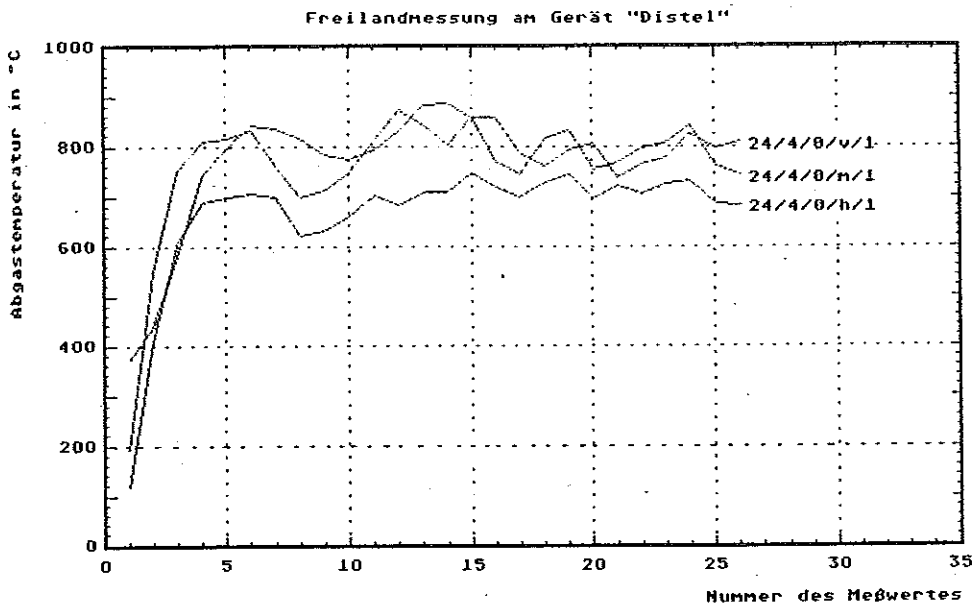


Bild 8 - 2: Temperaturverlauf bei 1,4 bar Gasdruck

Gegenüber Versuch Nr. 23 ist die deutliche Verbesserung des Temperaturverlaufs zu erkennen. Alle drei Positionen laufen annähernd parallel, etwas hoppelig zwar, aber auf hohem Temperatur - Niveau.

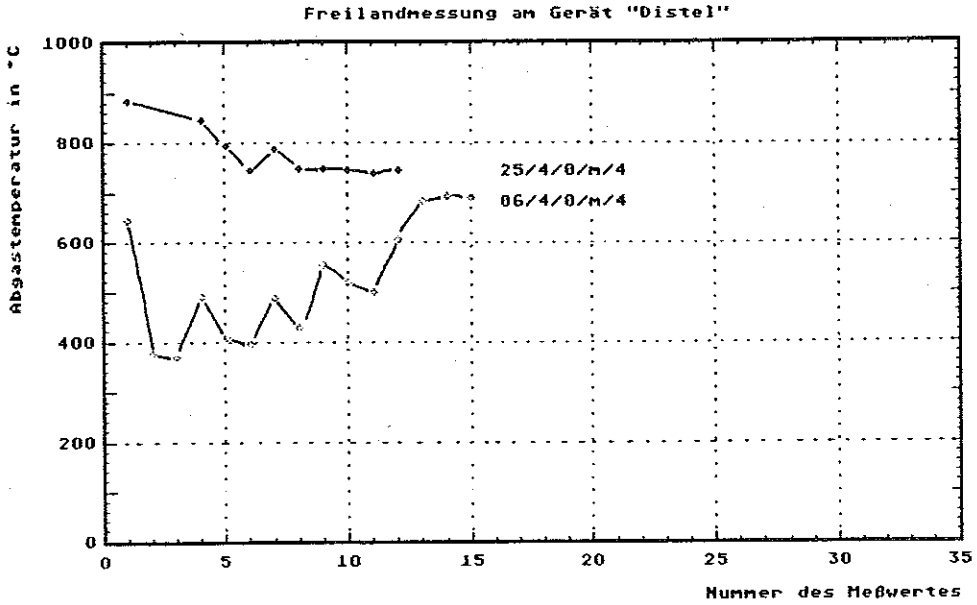


Bild 8 - 3: Vergleich der Erwärmung zwischen "alt" und "neu"

Das hier aufgegriffene Extrem ist nicht immer vorzufinden. Das "alte" Gerät wärmt sich langsam auf, während das "neue" Gerät sich auf seine Endtemperatur "abkühlt". Daß diese Endtemperatur über der "alten" liegt, ist noch durch Schwankungen erklärbar.

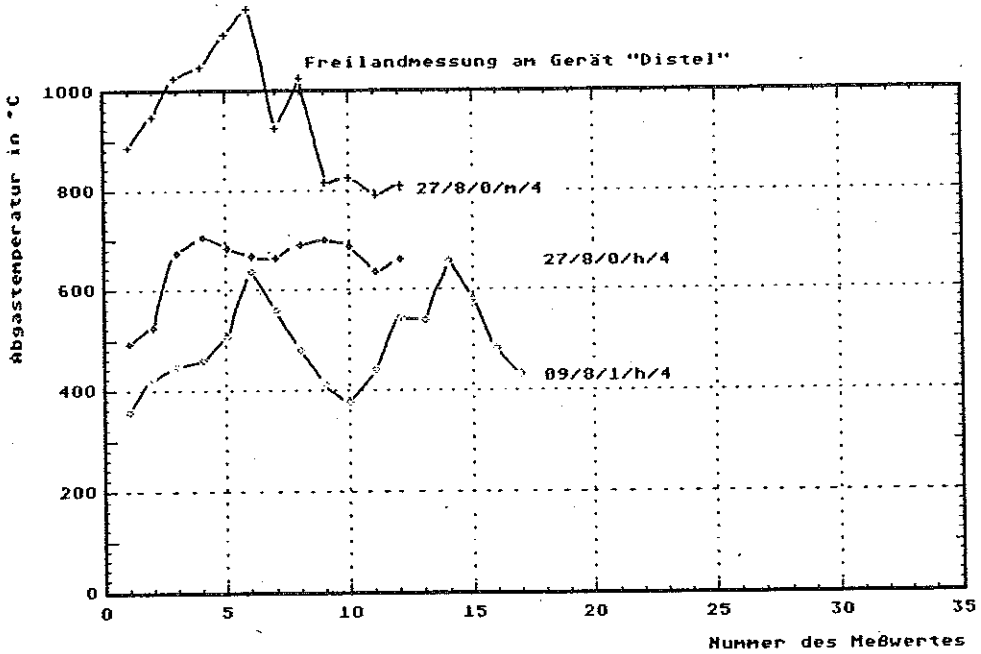


Bild 8 - 4: Vergleich der Schwingungen zwischen "alt" und "neu"

Die Höhe der Schwingungen ist bei Versuch 27 deutlich geringer als bei Nr. 9. Das Temperaturniveau ist zusätzlich um ungefähr 200 K angestiegen. Die höchsten Temperaturen habe ich für die mittlere Position gemessen.

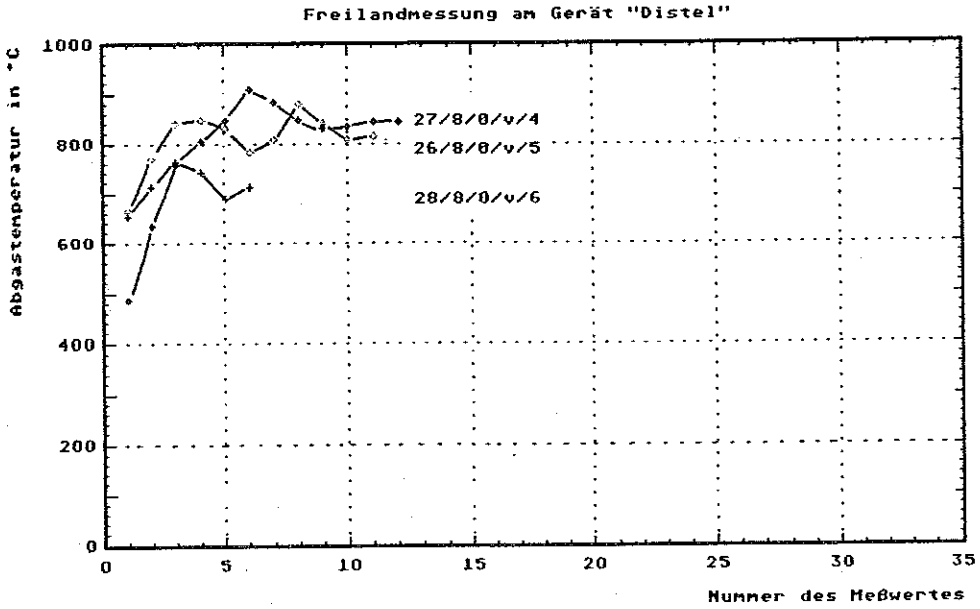


Bild 8 - 5: Vergleich verschiedener Geschwindigkeiten

Je höher die Geschwindigkeit, desto "kälter" wird es unter der Haube. Allerdings ist zu beachten, daß die Temperaturdifferenzen nicht sehr groß sind und auf hohem Temperatur - Niveau auftreten. Versuch 28 wurde mit 7,7 km/h durchgeführt: keine realistische Geschwindigkeit für den Acker.

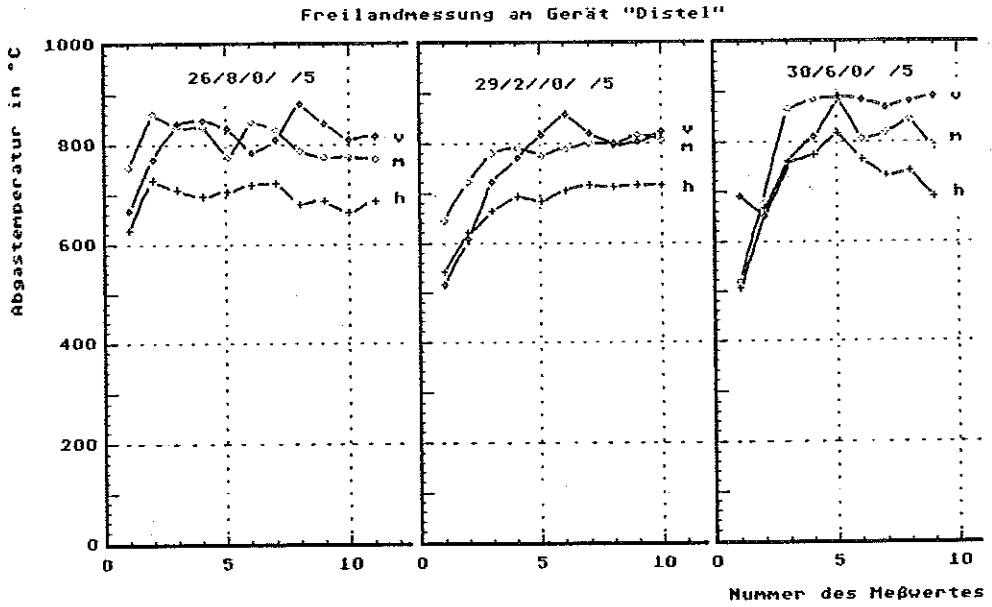


Bild 8 - 6: Vergleich verschiedener Drücke

Die drei nebeneinandergestellten Diagramme zeigen jeweils die gemessenen Positionen vorne, mitte und hinten. Die Temperaturen bewegen sich zwischen 700°C und 900°C und haben fast übereinstimmende Verläufe. Die vordere und die mittlere Position wechseln sich mit den Temperaturmaxima ab. Die Position hinten ist die "kälteste".

8.3. Auswertung

Das Ziel der "weiteren Messungen" ist festzustellen, ob, und wenn ja, welche Veränderungen in den Temperaturverläufen sich nach den Veränderungen am Gerät ergeben haben.

Auch hier gilt wieder, daß 8 Versuche nur eine Tendenz aufzeigen können!

- Bei einem Druck von 1,0 bar kommt es zum Stau, die Verbrennung ist unvollständig, die Temperaturen sind zu niedrig. Bei gleichem Druck war das Gerät vor der Veränderung noch funktionsfähig. Bereits in Kapitel *7.1. Rückgriff auf Rechenmodelle und Messungen* habe ich beschrieben, daß die "neue" Version höhere Strömungswiderstände als die "alte" aufzuweisen hat. Der kleinere Abgasquerschnitt, das Wellengitter unter der Isoliermatte und die Windschutzbleche sind der Grund dafür.

In der nächsten Druckstufe ist dieses Problem bereits nicht mehr anzutreffen. Die oben erwähnten Überlegungen haben sich also als richtig erwiesen. Das Abflammgerät muß mit mindestens 1,4 bar betrieben werden (dieser Wert gilt zunächst nur für das Gerät "Distel", andere Gassysteme und andere Aufbauten führen zu anderen Werten).

- Die Glättung der Schwingungen und ein höheres Temperaturniveau ist erreicht worden. Eine langsame Erwärmung konnte ich nicht mehr feststellen. Inwieweit diese Erfolge entweder der Isolation oder dem Windschutz zuzuschreiben sind, weiß ich nicht zu sagen. Die durch den geringeren Abgasquerschnitt erzwungene höhere Abgasgeschwindigkeit ist für das Abflammergebnis sicherlich von Vorteil. Daß die Abgastemperaturen beim Austritt aus dem Wärmetauscher deutlich über 600°C liegen, ist allerdings wieder ein Hinweis darauf, wieveiel Energie bei diesem Verfahren buchstäblich in die Luft entlassen wird.

- Die durchgeführte Steigerung der Geschwindigkeit auf 7,7 km/h läßt folgenden Schluß zu: Der Einfluß der Arbeitsgeschwindigkeit auf die Temperaturen unter der Haube ist beinahe zu vernachlässigen. Damit ist es möglich, den Brenner mit Haube als stabile Wärmequelle zu betrachten und die Verweilzeiten mit Hilfe der Arbeitsgeschwindigkeit zu bestimmen. Die Austrittstemperaturen des Abgases lege ich als Maßstab fest. Durch die höheren Temperaturen, die weiter vorne unter der Haube auftreten, liege ich insgesamt bestimmt "auf der sicheren Seite".

- Trotz der konsequenten Erhöhung des Druckes auf 2,6 bar ist die dadurch erreichte Erhöhung der Temperaturen kaum festzustellen. Laut HOFFMANN [8, S. 43] geht der Druck als Faktor unter der Wurzel ($\sqrt{p}$) in den Gasverbrauch ein. Die Differenz von 1,8 bar auf 2,6 bar entspricht damit einem zusätzlichen Gasverbrauch von 20 %. Die einzige Erklärung scheint mir deshalb, daß die maximale Temperatur bereits bei ca. 800°C erreicht ist. Das zusätzlich verbrannte Gas erhöht "nur" noch die Abgasgeschwindigkeit. Dieser Punkt ist nicht zu vernachlässigen, denn dadurch wird der Wärmeübergangskoeffizient maßgeblich mitbestimmt. Ob sich jedoch der erhöhte Energieeinsatz tatsächlich auszahlt, muß erst noch belegt werden.

Resumee:

Das folgende Bild zeigt anschaulich die erreichte Verbesserung.

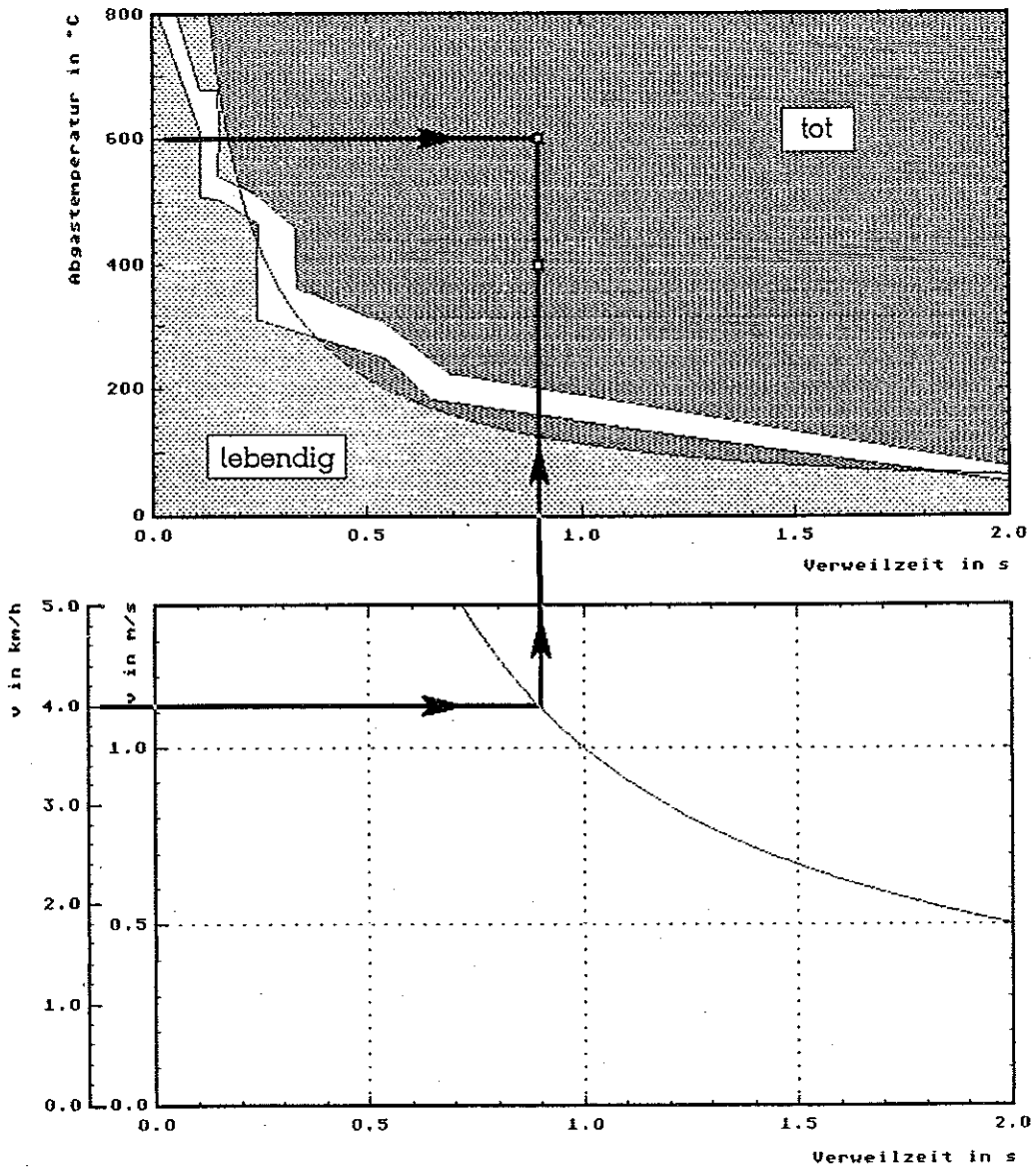
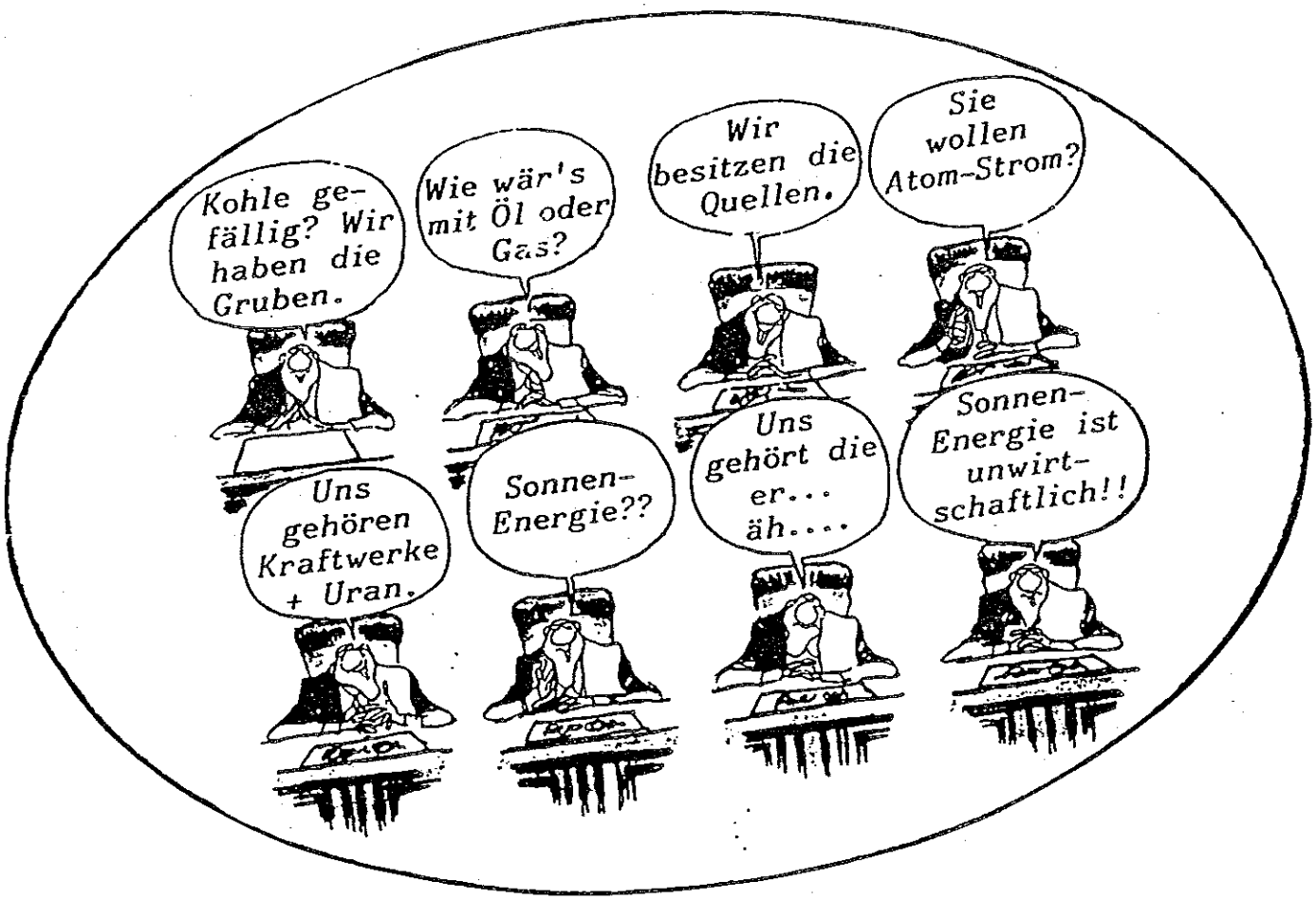


Bild 8 - 7: Arbeitspunkt nach "weiteren Messungen"

Die gemessenen Temperaturen am Ende der Haube liegen ausschließlich über 600°C. Damit ist der Arbeitspunkt ein Stück weiter in die "Todesregion" gerückt. Gute Reserven sowohl zur Zeit- als auch zur Temperaturachse sind damit vorhanden. Schwankungen der Außentemperatur, der Luft- und Bodenfeuchte und die Größe der Pflanzen sollten damit abgedeckt sein. Erneute Messungen zu dieser Frage sind jedoch zur endgültigen Beurteilung notwendig.

Ich habe zeigen können, daß die meßtechnische Erfassung des Abflammgeräts und die mathematische Modellierung der Abflammsituation möglich ist und für das Vorauflaufverfahren nützliche Erkenntnisse bringt.


Kohle gefällig? Wir haben die Gruben.
Wie wär's mit Öl oder Gas?
Wir besitzen die Quellen.
Sie wollen Atom-Strom?
Uns gehören Kraftwerke + Uran.
Sonnen-Energie??
Uns gehört die er... äh....
Sonnen-Energie ist unwirtschaftlich!!

9. Resümee und Ausblick

9.1. Biologische und technische Systeme - ein lösbarer Widerspruch?

Wo ist da der Wiederspruch? So wird sich vielleicht manche LeserIn fragen.

Was hat das überhaupt mit einer Studienarbeit im Fachbereich Maschinenbau zu tun? Diese Frage kommt einigen LeserInnen bestimmt ebenfalls in den Sinn.

Tatsächlich werde ich im Rahmen dieser Studienarbeit keine umfassende Besprechung zu diesem Thema liefern. Allerdings gibt es zwei wichtige Gründe für mich, den Widerspruch zu benennen.

- Die Landtechnik ist ein geradezu klassisches Gebiet, in dem biologische und technische Systeme aufeinanderprallen. Heute mehr als je zuvor!

- Wenn es diesen Widerspruch gibt, dann ist es ein MUSS, daß sich die VordenkerInnen und PlanerInner der technischen Systeme, sprich die MaschinenbauerInnen, intensiv damit auseinandersetzen. Ist die Maschine erst bei der BenutzerIn angekommen, ist es für Korrekturmaßnahmen bereits oft zu spät.

Wo liegt der Unterschied zwischen biologischen und technischen Systemen?

VESTER [29, S. 140] faßt den wichtigsten Aspekt zusammen:

> Ein biologischer Organismus entsteht aus einer einzelnen Keimzelle durch deren Teilung und Vermehrung. Dabei wirken die Kräfte der Umwelt ebenso prägend mit wie die steuernden Impulse der Erbanlagen, die schließlich den fertigen Organismus ergeben.
>
> Ein technisches Gerät entsteht dagegen durch Vorfertigung aller Einzelteile, die bereits in ihrer Endform hergestellt werden. Teile, die dann genau nach Plan zu größeren Konstruktionseinheiten zusammengesetzt und schließlich zum fertigen Gerät verbunden werden.

Der biologische Organismus zeichnet sich also durch Vielfalt in der Erscheinung und ständige Veränderung aus. Beim Beikraut auf dem Acker heißt das: Gestern noch nichts zu sehen, heute ein grüner Flaum auf dem Acker, und morgen schon alles mit großen, kleinen, dicken und dünnen Blättern zugedeckt.

Wie reagieren wir darauf?

Ein Abflammgerät, betrieben mit enormen Energiemengen, wälzt sich über Beete und Flure. Die Vielfalt der Beikräuter wird durch eine überhohe Grenztemperatur (siehe dazu Kapitel *5. Versuch zum Pflanzentod*) zerkocht. Die plumpe Konstruktion kann nicht den "Freund" vom "Feind" unterscheiden und steht stille, wenn die feinen Düsen durch kleine Bröselchen blockiert sind.

Durch geschickte Manipulation der Kulturpflanzen werden hitzeresistente Sorten eingesetzt, die Maschine durch elegante Konstruktionen leichter und betriebssicherer gestaltet. Das ist eine Lösung des Konflikts!?!

Es lassen sich noch unzählige andere Beispiele aufzählen. Von der Kartoffelnormgröße, die zum Kartoffelvollernter paßt, über kunstdüngerabhängige Hybridgetreide bis zum rosigen Streßschwein mit ein, zwei Rippen mehr.

All diesen Entwicklungen liegen mindestens die folgenden zwei Ideen zugrunde:

- Die Versorgung mit dem Lebensnotwenigen muß sicher und möglichst komfortabel gewährleistet werden.

- Mit Hilfe von Forschung und Technik lassen sich biologische Systeme in den Griff kriegen und vorteilhaft nutzen.

Der erste Gedanke ist sicherlich berechtigt, obwohl die Begriffe "sicher" und "komfortabel" noch weiterer Diskussion bedürften. Die zweite These hat sich dagegen eigentlich schon lange als gescheitert erwiesen. Würden sich "die Wissenschaft" und "die Technik" an ihren eigenen Maßstäben messen, müßten sie sich sofort selbst auflösen. Die weltweiten Mißstände und die sich häufenden, hausgemachten Katastrophen geben einen traurigen Abglanz davon (dazu auch Kapitel *1.1. Mit Agrochemie zur Agroindustrie*).

Wir wollen das aber nicht wahrhaben, denn damit kommen die Grundfesten unseres Denkens und Handelns ins Wanken. Wir investieren also ein weiteres Mal in Forschung und Technik, um den Beweis zu erbringen, der prinzipiell nicht führbar ist. Aber was tut der Mensch nicht alles, um seine Wirklichkeit zu retten!?!

Das folgende Bild veranschaulicht diese Vorgehensweise.
(Jetzt ist Transferleistung gefragt!)

Jede Forschungsrichtung beschäftigt sich mit einem Aspekt dieses Bildes. Die einen zählen die dunklen Quadrate, die anderen dafür die helleren. Die einen stellen das Verhältnis von Höhe zu Breite fest, während die anderen eine Häufigkeitsverteilung samt Standardabweichung errechnen. Es lassen sich nahezu beliebig viele, interessante Themen bearbeiten.

Aber - werden wir tatsächlich erfahren, was es mit diesem Forschungsobjekt auf sich hat? Wer tritt ein paar Schritte zurück, um die Gesamtheit aufzunehmen?

Nun antworte niemand, daß das nicht die Aufgabe der Forschungsgruppe sei!

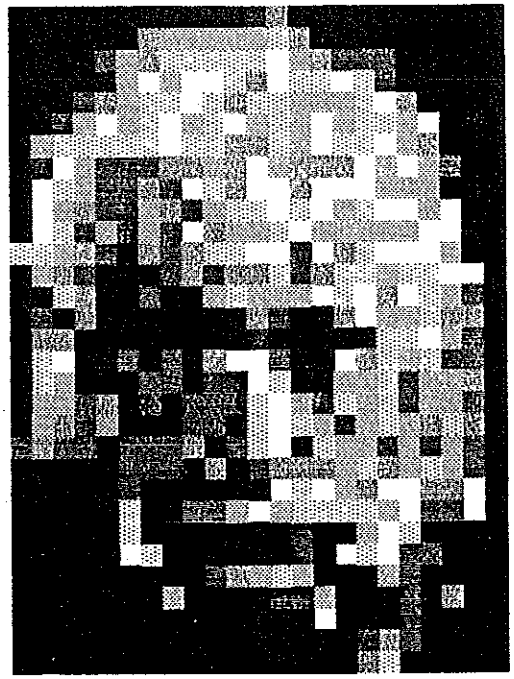


Bild 9 - 1 : Wer ist's ? [32, S.12]

Ich bin weder Forschungs- noch Technikfeind. Das läßt sich zumindest an der vorausgehenden Studienarbeit belegen. Ich bin jedoch überzeugt, daß wir vollkommen andere Wege für Forschung und Technik finden müssen. Das schließt durchaus bereits gewonnene Erkenntnisse und Arbeitsmethoden mit ein. Das Ziel für die Arbeit muß allerdings neu formuliert werden (wenn es zur Zeit überhaupt ein formuliertes Ziel gibt).

Die ein oder andere LeserIn wird jetzt nachbohren, welche Ziele und Wege ich denn anzubieten habe? Wie soll denn das funktionieren?

Einfach ist es bestimmt nicht. Aber hat uns denn die Schwierigkeit, die Atombombe zu basteln oder auf den Mond zu fliegen davon abgehalten, eine Idee zu verwirklichen? Wo sind all die immer wieder beschworenen, erfinderischen Geister, die sich richtig dahinter klemmen? Hier gibt es zwar noch keine Lorbeeren zu holen, aber ausreichend zu tun.

Einige Hinweise, wie die Ziele aussehen könnten, gibt z.B. SCHUMACHER [28] in seinem Buch "Die Rückkehr zum menschlichen Maß". Auch VESTER [29], einige Zukunftsforscher, verschiedenste BürgerInnen- und Berufsorganisationen und viele andere haben sich bereits damit beschäftigt. Von der kommunalen Selbstverwaltung bei der Energiewirtschaft bis zu grundlegenden Fragen des Weltwirtschaftsystems muß alles unter einen Hut gebracht werden.

Der in der Kapitelüberschrift benannte Widerspruch ist also ein sehr elementarer, der an den "letzten Nerv" geht. Das will ich hier zu bedenken geben.

9.2. Bemerkungen zur Meßtechnik

Um Temperaturen bis 1200°C in relativ kurzer Zeit zu messen, gibt es die verhältnismäßig preiswerte Möglichkeit, Thermoelemente einzusetzen. Das habe ich getan. Allerdings war ich vor einige Fragen gestellt.

- Die drei von mir verwendeten Chromnickel-Nickel Thermoelemete hatten verschiedene Außendurchmesser (Ø 1 mm, Ø 1,5 mm, Ø 3,0 mm). Das entspricht jeweils einer anderen Kapselung und einer anderen spezifischen Wärmekapazität des Thermofühlers.

- Die drei von mir verwendeten, digitalen Meßgeräte stammen von verschiedenen Herstellern. Nur zwei davon haben eine Anzeige in °C.

Ich war deshalb genötigt, die abgelesenen mV-Einheiten der Thermospannung in °C-Temperaturen umzurechnen. Da ich bei den Messungen keine Vergleichsstelle mit 0°C (≙ Eiswasser) mitführen konnte, habe ich 20°C als Bezugspunkt gewählt. Das folgende Diagramm zeigt die Abhängigkeit der Temperatur von der Thermospannung.

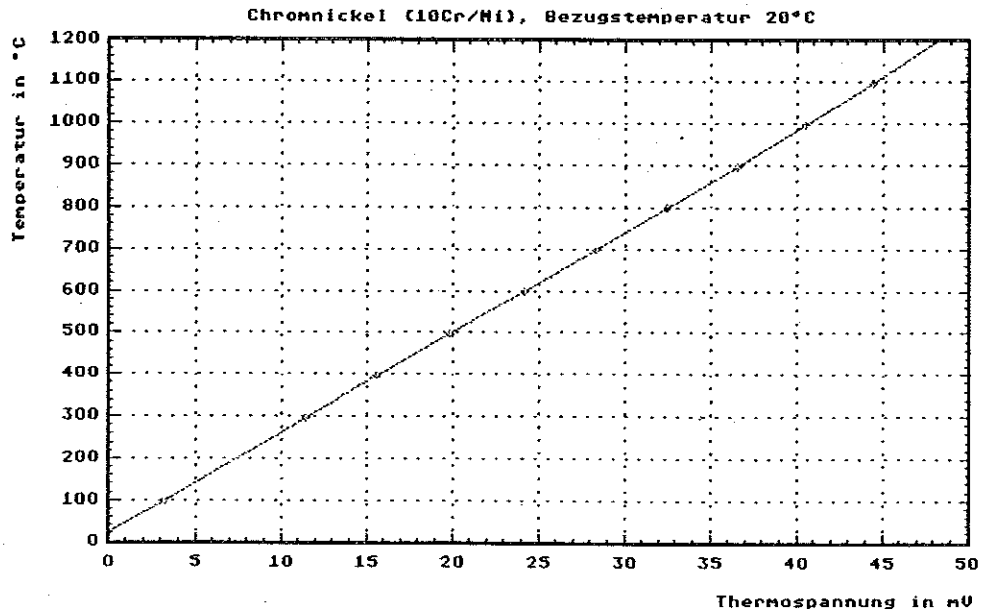


Bild 9 - 2: Temperatur und Thermospannung

- Die Kalibrierung der Meßfühler und der Meßgeräte habe ich überprüft. Vergleichende Messungen in Eiswasser und kochendem Wasser haben übereinstimmende Werte ergeben. Ein Fühler hat eine konstante Abweichung von 4 K, die ich jedoch bei der absoluten Höhe der Temperaturen vernachlässige.

• Die zu erwartenden verschiedenen Anspechzeiten auf Temperaturschwankungen, verursacht durch die unterschiedlichen Durchmesser der Fühler, habe ich an den Temperaturverläufen nicht feststellen können. Die Thermoelemente waren entweder flink genug, oder ich war langsam genug beim Ablesen.

• Alle digitalen Werte habe ich abgelesen und aufgeschrieben. Da die Anzeige jedoch permanent wechselt, habe ich folgendes System angewendet, um vergleichbare Ergebnisse zu bekommen. Der Wert, den ich mit dem ersten Blick auf das Meßgerät erkennen kann, wird aufgeschrieben. Ich habe erst gar nicht versucht Mittelwerte abzuschätzen oder konstante Werte abzuwarten. Deshalb gebe ich bei der Auswertung immer einen ganzen Temperaturverlauf an. Bei zwei Meßgeräten liegt also immer eine Zeitspanne zwischen zwei Werten desselben Fühlers. Sie ergibt sich aus der Zeit, die ich brauche, um Wert1 aufzuschreiben plus der Zeit, um den Wert des zweiten Fühlers aufzunehmen und aufzuschreiben. Anhand der Versuche auf dem Acker habe ich festgestellt, daß diese Zeitdifferenz sehr konstant ist, denn die Anzahl der aufgenommenen Meßwerte war für eine bestimmte Zeitspanne fast gleich. Bei drei Temperaturverläufen ergeben sich zwingender Weise größere Zeitspannen zwischen den Werten und damit bei gleicher Zeit weniger Werte. Die Werte der verschiedenen Fühler liegen also tatsächlich nicht zeitgleich, sondern immer zwischen denen des anderen Fühlers. Trotzdem halte ich die gewählte Darstellung und die Betrachtung der "Nummer des Meßwertes" als Zeitachse für angebracht.

Die Ausstattung ist somit sicherlich nicht die allerbeste für meine Zwecke gewesen. Eine größere Anzahl von Thermoelementen, die "gleichzeitig" von einem Computer abgefragt werden, ergibt weit genauere Resultate. Die daraus folgende Flut an zu verarbeitenden Daten ist jedoch ungeheuerlich. Da die Kosten für solch einen Meßaufbau außerdem vollkommen andere Größenordnungen erreichen, habe ich mich mit meiner Version zufrieden gegeben.

Durch die Installation der Thermofühler in der Abgaswolke habe ich einen "quasi-stationären" Zustand ausgemessen. Bei dieser Konstellation geht die Wärmekapazität des Fühlers nicht mehr in das Ergebnis ein. Sobald jedoch die Verweilzeiten kürzer werden, stellt sich die Frage, was eigentlich außer der Wärmekapazität und dem Wärmeübergangskoeffizienten gemessen wird. Aus diesem Grund habe ich auf alle Versuche verzichtet, die zum Ziel haben, die Temperatur aufzunehmen während die Abgaswolke über den Fühler hinwegzieht.

9.3. Zusammenfasung

Mit dieser Studienarbeit habe ich mich zunächst in das Thema Abflammtechnik eingearbeitet. Die relevanten Fragestellungen dazu lauten:

- Wieso ist Abflammen nötig?
- Was muß ich über den Landbau wissen?
- Was muß ich über Flüssiggas, Verbrennung und Brennertechnik wissen?

Die Kapitel *2. Landwirtschaftliche Grundlagen* und *3. Technische Grundlagen* stellen eine Zusammenstellung von diesem Grundwissen dar, das vornehmlich aus Literaturquellen stammt.

Nach diesem Block gehe ich der Frage nach, ob sich die Vorgänge des Abflammens modellieren und rechnerisch erfassen lassen?

Die Energiebilanz zeigt, daß nur ein sehr kleiner Anteil, ca. 4,5%, der eingesetzten Energie tatsächlich in den Beikräutern ankommt. Der Erdboden und das noch heiße Abgas dagegen beinhalten zusammen 85%.

Die allgemeine Betrachtung des Abflammgerätes als Wärmetauscher führt zur Abgasströmung. Die optimale Strömungsführung ist demnach ein entscheideder Faktor für die Funktion des Gerätes.

Die Generalfrage taucht nun im Anschluß daran auf. Welche Abgastemperaturen müssen in der direkten Umgebung der Beikräuter herrschen, damit diese absterben? Zunächst bearbeite ich diese Frage rein theoretisch, indem ich ein sehr einfaches Temperatur-Zeit-Gesetz formuliere, das diese Abhängigkeit durch einen Grenzwert beschreibt. Durch einen Versuch gelingt es mir zu belegen, daß die Rechnung und die Praxis in meinem Fall durchaus zu vergleichbaren Ergebnissen kommt. Hier ist jedoch anzumerken, daß für eine allgemeinere Gültigkeit weitere Versuche durchgeführt werden müssen, die die Parameter "Luftfeuchtigkeit" und "Alter der Pflanzen" berücksichtigen.

Inwieweit sind die Ergebnisse aus Versuch und Rechnung auf den Acker zu übertragen? Das ist die nächste Frage.

Das Gerät "Distel" habe ich bei unterschiedlichen Gasdrücken und Arbeitsgeschwindigkeiten vermessen. Als Ergebnis ist festzuhalten, daß die Temperaturverläufe innerhalb von 200 K schwanken, daß eine Erwärmung des Geräts zu beobachten ist und das Abgas beim Austritt am Ende der Haube eine Temperatur von 400 - 600°C aufweist. Höhere Drücke führen zu höheren Temperaturen. Die Schwankungen nehmen jedoch ebenfalls zu. Der Arbeitsgeschwindigkeit kann kein bestimmter Einfluß zugeordnet werden.

Der Rückgriff auf die Rechenmodelle und die Messungen läßt zwei Maßnahmen sinnvoll erscheinen:

Die Haube wird von innen isoliert. Damit werden die Verluste geringer, der Aufwärmvorgang kürzer und die Abgasströmung schneller. Ein zusätzlich angebrachter Windschutz hält störende Umwelteinflüsse von der Verbrennung und Strömung fern. Der Abflammvorgang verläuft gleichmäßiger und damit zuverlässiger.

Die anschließenden weiteren Messungen am veränderten Gerät bestätigen die getroffenen Maßnahmen. Das Temperaturniveau steigt an. Die Arbeitsgeschwindigkeit zeigt keinen Einfluß auf die Temperaturverläufe unter der Haube. Durch die Steigerung des Druckes ist keine weitere Erhöhung der Temperaturen zu erreichen.

Der Vergleich mit Versuch und Rechnung weist darauf hin, daß die Veränderungen tatsächlich eine Steigerung der Zuverlässigkeit für das Abflammergebnis erbringen. Dabei ist allerdings zu bedenken, daß sich diese Aussagen nur auf die gemessenen Temperaturen beziehen. Auch wenn die Reduktion des Abflammens auf ein Temperatur-Zeit-Gesetz als zulässig belegt ist, bedarf es noch der Tests in der Praxis.

Im Kapitel *9.1. Biologische und technische Systeme - ein lösbarer Widerspruch* gehe ich auf die grundsätzliche Problematik ein, in der sich alle befinden, die mit Hilfe der Technik die Natur zum Nutzen der Menschen umgestalten.

Im Anschluß an diese Zusammenfassung steht das Kapitel *9.4. Offene Fragen, ungelöste Aufgaben und die Zukunft der Abflammtechnik.*

9.4. Offene Fragen, ungelöste Aufgaben und die Zukunft der Abflammtechnik

Ganz egal, wann eine Arbeit abgebrochen wird, die neuaufgetauchten Fragestellungen lassen sich nicht vermeiden. Aber auch bereits bekannte Fragen bleiben schon genug. Die mir wichtig erscheinenden Punkte zähle ich auf, um die Studienarbeit in einen Rahmen zu stellen, an dem andere Anschluß für weitere Arbeiten finden können.

• Speziell in meiner Arbeit habe ich das Problem, daß nicht ganz klar ist, ob die in Versuchen ermittelten Werte (Kapitel *5. Versuch zum Pflanzentod*) tatsächlich auf die Praxis übertragbar sind. Der Versuchsaufbau entspricht nicht den Gegebenheiten auf dem Acker. Die Ergebnisse stimmen jedoch mit der Theorie überein und lassen auf eine Übertragbarkeit hoffen. Die Überprüfung auf dem Acker ist allerdings nicht ganz einfach, da die Parameter dort noch schwieriger zu erfassen sind.

• Die Auswertung der in Kapitel *8. Weitere Messungen am Gerät* beschriebenen Versuche hat gezeigt, daß die Strömungsführung noch nicht optimal eingestellt werden kann. Die Verwendung von belüfteten Brennern an Stelle der selbstansaugenden Brenner in Kombination mit einer Druckregelung ist eine interessante Vorstellung. Falls sich, wie oben erwähnt, die Abgastemperatur als geeigneter Parameter zur Erfolgskontrolle des Abflammvorgangs herausstellt, ist eine entsprechende temperaturgeführte Regelung vorstellbar.

• Das Abflammen ist ein im Vergleich umweltfreundliches Verfahren, um die Beikräuter zu regulieren. Trotzdem darf nicht vergessen werden, daß die von chemischen Verfahren bekannte und gefürchtete Resistenz auch hier eine Rolle spielen kann. Es ist durchaus vorstellbar, daß die Pflanzen, die jeweils gerade noch davongekommen sind, auf die Dauer Möglichkeiten hervorbringen, höheren Temperaturen auch länger zu widerstehen. Daher scheint ein möglichst vollständiges Abflammen, das nicht an der ausgereizten Grenze arbeitet auf längere Zeit hin sicherer. Noch wichtiger ist jedoch, daß verschiedene Regulierungsmaßnahmen angewendet werden. Dann kann sich die Pflanze nicht so einfach daran gewöhnen.

• So umweltfreundlich das Verfahren auch erscheint, in Kapitel *3.1. Der Energieträger Flüssiggas* habe ich bereits erklärt, daß die Energie in keinen Kreislauf eingebunden ist, und daß das entstehende Kohlendioxid weiter das Klima aufheizt. Betrachtet mensch erst weltweite Dimensionen, so wird klar, daß das Abflammen kein Verfahren werden darf und sein kann, das jeder landwirtschaftliche Betrieb großflächig einsetzt. Es kann also nicht der einfache Ersatz für übliche Spritzmittel sein, sondern fordert ein gleichzeitiges Umstellen der Produktionsweise. Hierzu habe ich einige erste Überlegungen im Kapitel *1.2. Der ökologische Landbau* aufgezeigt.

• Der eingesetzte Energieträger hat einen anderen Charakter, wenn er in einen Kreislauf eingebunden ist. Dafür kommen heute zwei Stoffe in Frage: Biogas, sprich Methan, das aus gärenden Fäkalien und organischen Stoffen gewonnen werden kann und Wasserstoff, der durch Elektrolyse aus Wasser abgespalten wird. Unabdingbar ist jedoch, daß der dafür notwendige elektrische Strom ebenfalls aus einer erneuerbaren (regenerativen) Energiequelle stammt. Das heißt in erster Linie mit Wasserkraft, Windkraft oder Photovoltaik. Die Erzeugung ist prinzipiell direkt auf dem landwirtschaftlichen Betrieb möglich. Hier stehen organische Stoffe in großen Mengen zur Verfügung, und auch für Solarpanels ist ausreichend Platz. Wichtige Voraussetzung ist eine überschaubare und handhabbare Technik, deren Sicherheit nichts zu wünschen übrig läßt. Die Wirtschaftlichkeit wird sich allerdings nur einstellen, wenn die konventionellen Energiequellen, die stark subventioniert die Umwelt belasten, mit einer "umfassenden" Wirtschaftlichkeitsanalyse belegt werden.

• Die Abflammtechnik wird über kurz oder lang an die Schwelle des "High-Tech" gelangen. Die Frage nach dem richtigen Weg muß dann wieder gestellt werden. Von der Mustererkennung, die es erlaubt, zwischen Kulturpflanze und Beikraut zu unterscheiden, bis zu einer Regelung wie ich sie bereits weiter oben angesprochen habe, spannt sich der Bogen. Die Technik, die dann zum Einsatz kommen muß, ist für die BenutzerIn unüberschaubar. Die Frage nach Reparatur und Preis führt fast zwangsläufig wieder in den Teufelskreis der Agroindustrie: billiger mehr zu produzieren, Arbeitsplätze abzubauen, hohe Investitionen, Entfremdung vom Produkt usw. Der andere Weg liegt auch hier in einer neuen Strukturierung der landwirtschaftlichen Produktion, die eine Umstrukturierung der Industriegesellschaft im Ganzen nötig macht.

Ich habe Fragen angerissen, die Stoff genug ergeben für lange Diskussionen. Wichtig ist, daß dabei alle zu Wort kommen. Die Menschen, die auf dem Acker abflammen, die Menschen, die die Geräte konzipieren und fertigen, die Menschen, die die Früchte des Ackers verzehren und die Menschen, die in der Zukunft auf dieser Erde wandeln wollen.

10.1. Diagramme und Daten

Auf den folgenden Seiten sind die Werte der Freilandmessungen und der Kontrollmessungen zum Pflanzentodversuch in Diagrammen wiedergegeben. Ein Protokollmuster, mit dem die Daten jeweils aufgenommen wurden, ist ebenfalls abgedruckt.

Übersicht über alle 30 Freilandmessungen am Gerät "Distel"

v in km/h \ p in bar	2,6	2,2	1,8	1,4	1,0	Position
5,0 ... 7,7 (6)						5
						4
						3
						2
						1
			28			0
4,0 ... 4,9 (5)						5
						4
						3
						2
						1
	30	29	26			0
3,5 ... 3,9 (4)						5
			15	14	13	4
			10	11	12	3
						2
			09	07	08	1
			27	06 25		0
1,3 ... 3,4 (1)						5
				02	05	4
						3
				03	04	2
						1
				01 24	23	0
0,0 (0)						5
					20 -21-	4
						3
						2
						1
			19		18 17 16 -22-	0

Versuchsprotokoll für Freilandmessung:

	v	m	k
Nr [1] Dat [25 6]			
	13,1	764	643
Gang [II] [1 2 X 4]	25,5	780	665
Drehzahl [~500]	24,1	771	688
	28,1	745	673
T_u 24°C	28,9	737	600
	29,7	806	719
s 95 m	29,3	827	733
t 4 min 20 s	29,7	842	756
v 0,35 m/s	29,4	852	746
	29,2	843	739
p 1,4 bar	28,5	760	716
	29,4	822	754
b [L X]	29,7	815	706
	33,6	797	1151
h [X 1 2 3 4 5]	Anhalten		
a 16 cm hinten – 25 cm vorne			

Folgende Abkürzungen werden von mir verwendet:

- Versuchsnummer: Nr.: 1 ... 30 ⇨ 01 ... 30
- Gasdruck: 1,0 bar ⇨ 0
  1,4 bar ⇨ 4
  1,8 bar ⇨ 8
  2,2 bar ⇨ 2
  2,6 bar ⇨ 6
- Position der Thermofühler: Position 0 ... 5 ⇨ 0 ... 5
  vorne ⇨ v ⇨ +
  mitte ⇨ m ⇨ •
  hinten ⇨ h ⇨ ◦
- Arbeitsgeschwindigkeit: 5,0 ... 7,7 km/h ⇨ 6
  4,0 ... 4,9 km/h ⇨ 5
  3,5 ... 3,9 km/h ⇨ 4
  1,3 km/h ⇨ 1
  0 km/h ⇨ 0

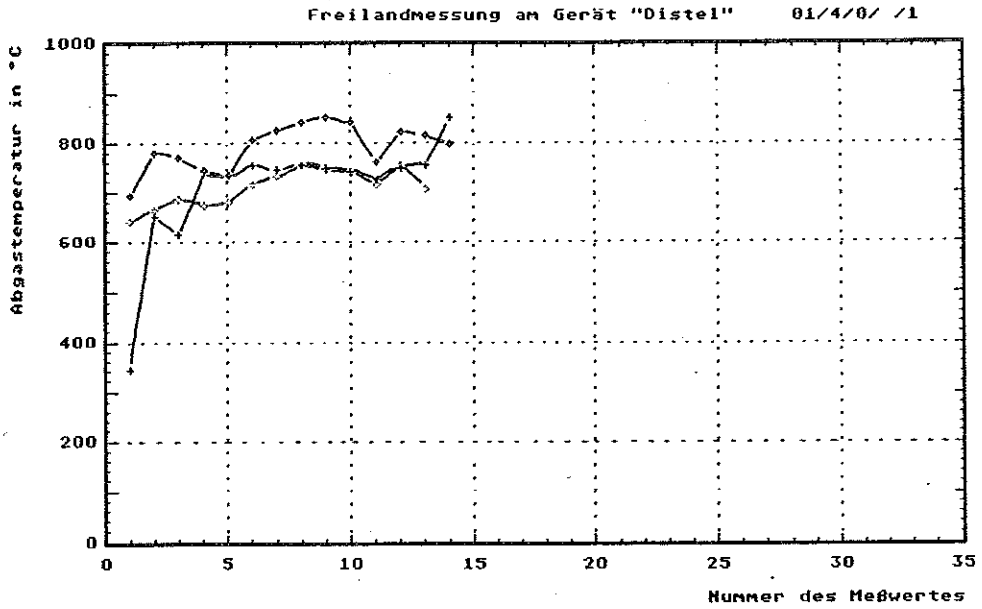
Position 3

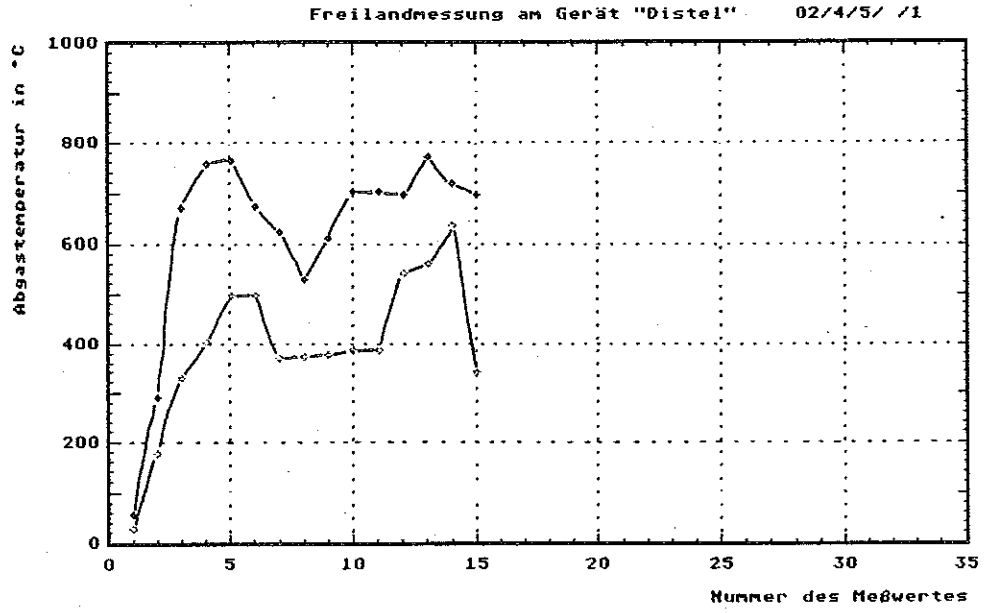
⇓

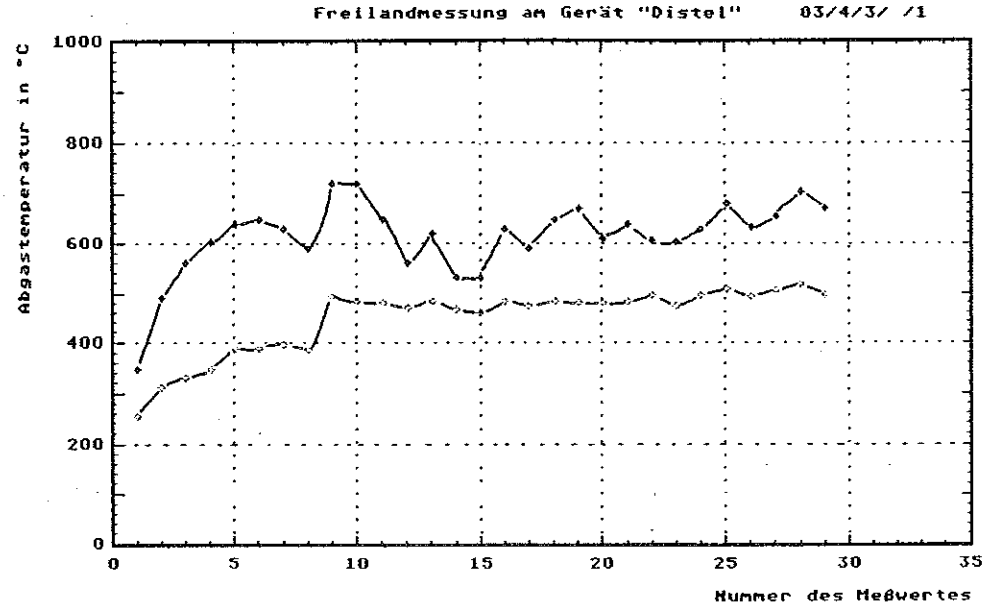
Versuchs Nr. 8 ⇨ 08/4/3/h/4 ⇦ Geschwindigkeit 3,5 km/h

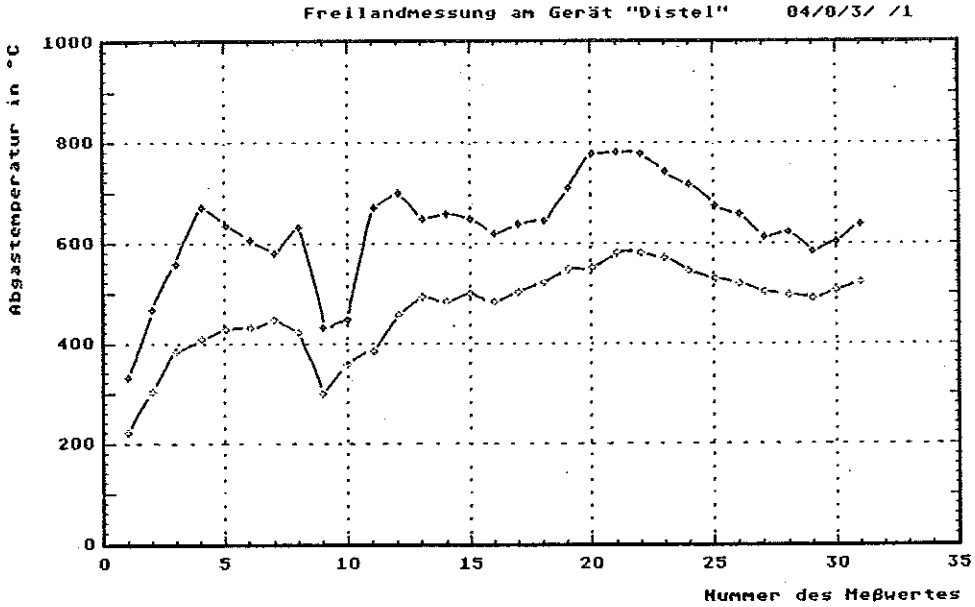
⇑ ⇑

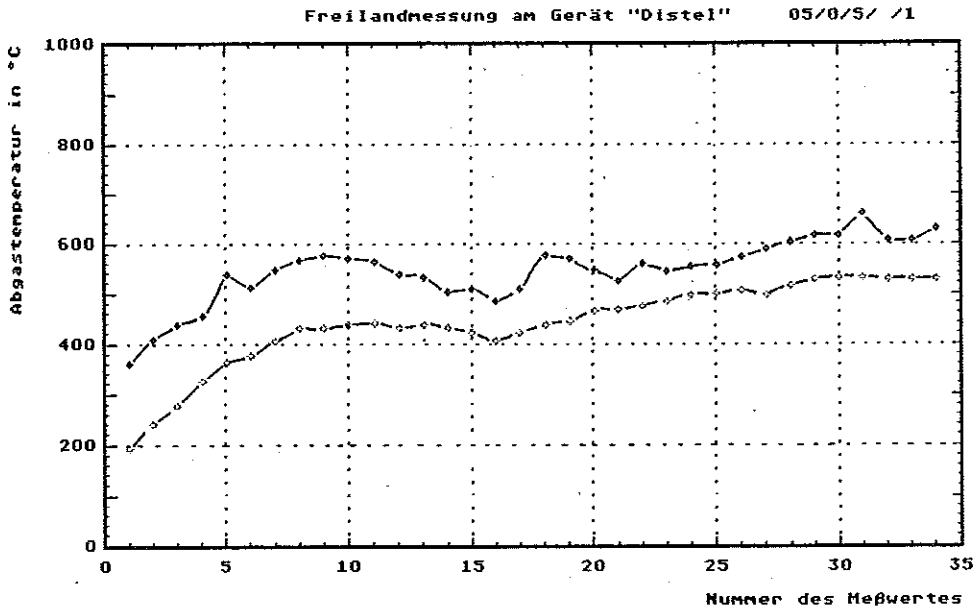
1,4 bar hinterer Meßfühler

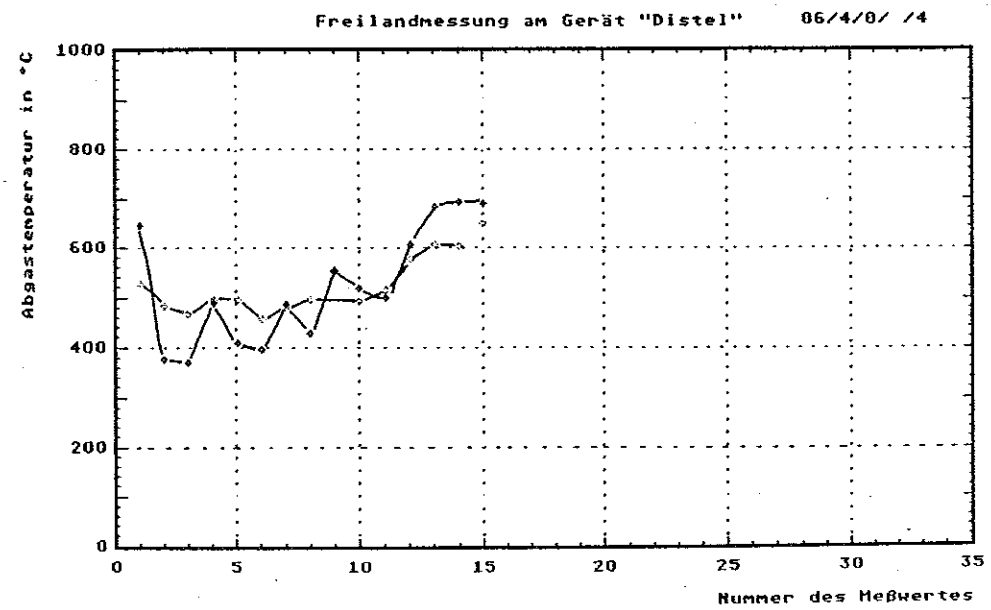

Freilandmessung am Gerät "Distel" 01/4/0/ /1
Abgastemperatur in °C
1000
800
600
400
200
0
0
5
10
15
20
25
30
35
Nummer des Meßwertes

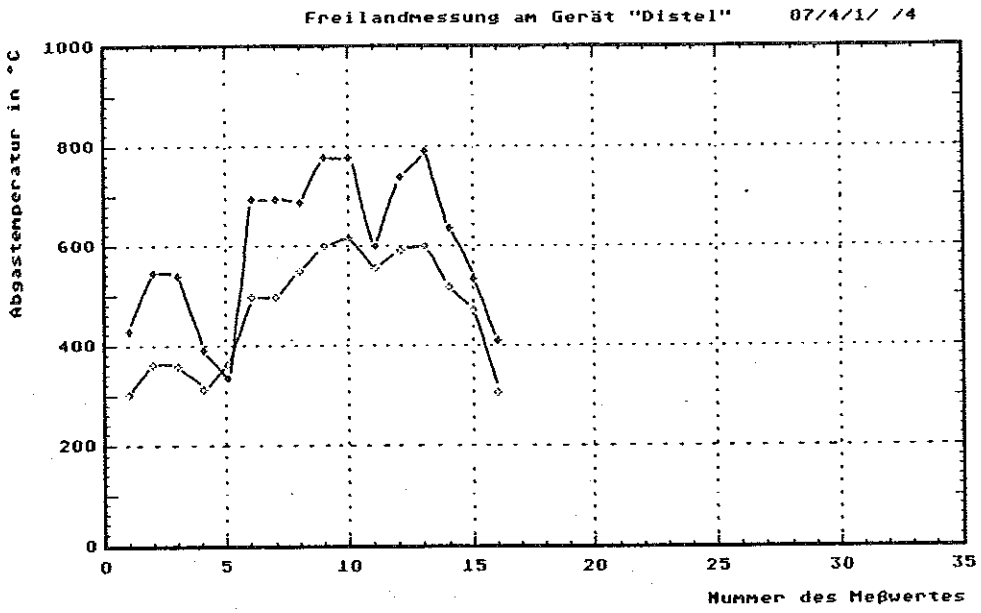

Freilandmessung am Gerät "Distel" 02/4/5/ /1
Abgastemperatur in °C
1000
800
600
400
200
0
0
5
10
15
20
25
30
35
Nummer des Meßwertes

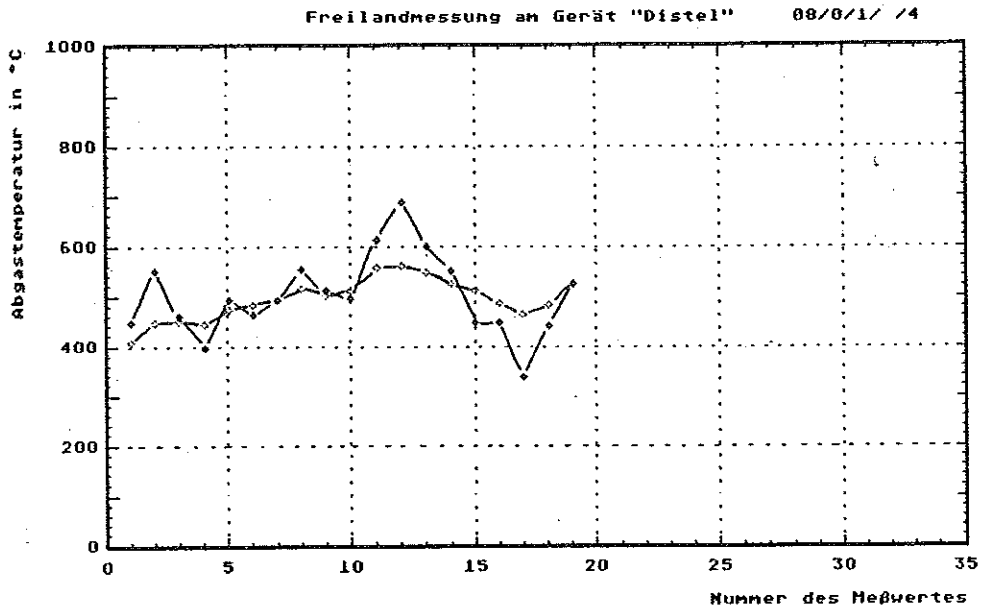

Freilandmessung am Gerät "Distel" 03/4/3/ /1
Abgastemperatur in °C
1000
800
600
400
200
0
0
5
10
15
20
25
30
35
Nummer des Meßwertes

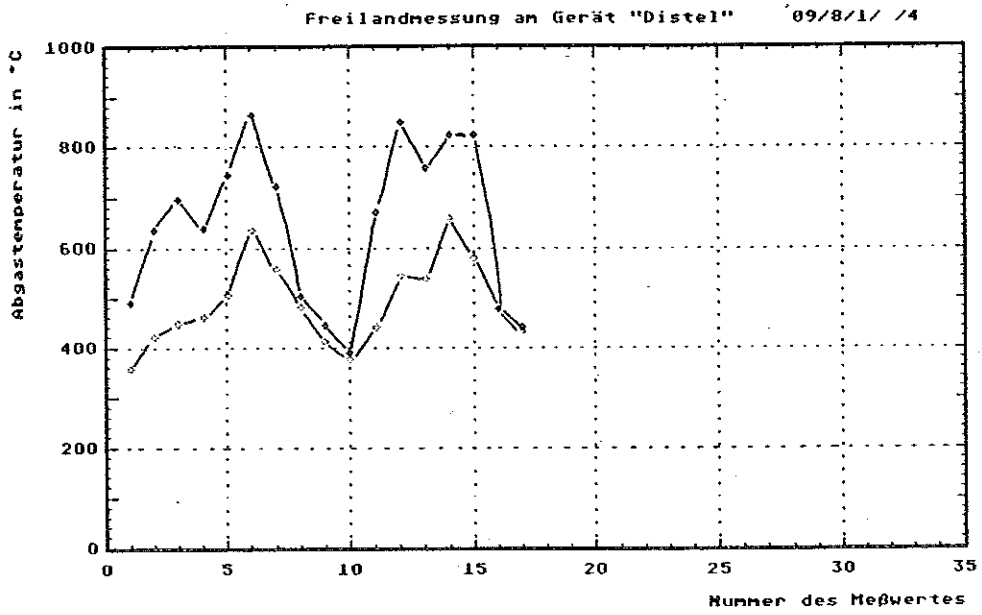

Freilandmessung am Gerät "Distel" 04/0/3/ /1
Abgastemperatur in °C
1000
800
600
400
200
0
0
5
10
15
20
25
30
35
Nummer des Meßwertes

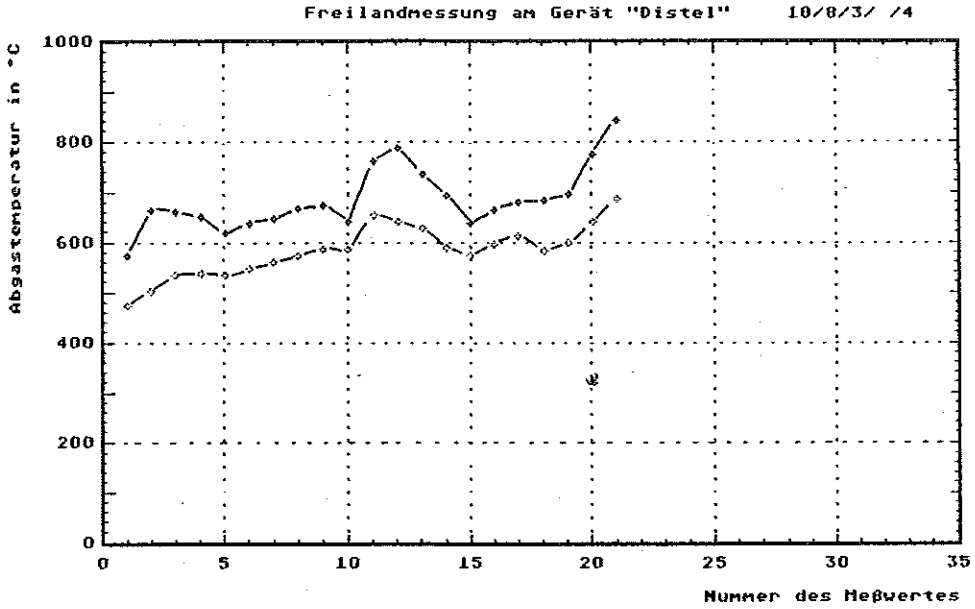

Freilandmessung am Gerät "Distel" 05/0/5/ /1
Abgastemperatur in °C
1000
800
600
400
200
0
0
5
10
15
20
25
30
35
Nummer des Meßwertes

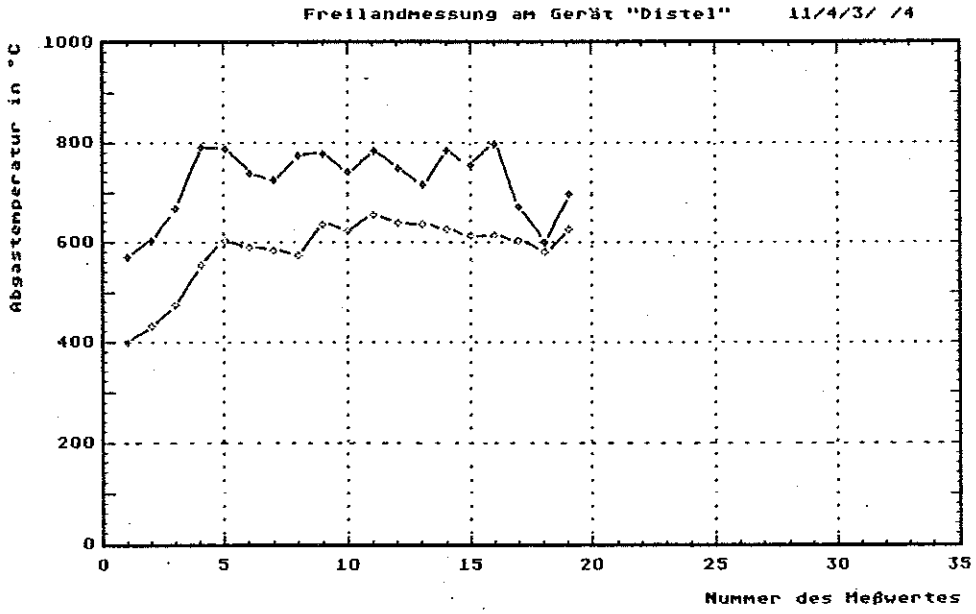

Freilandmessung am Gerät "Distel" 06/4/0/ /4
Abgastemperatur in °C
1000
800
600
400
200
0
0
5
10
15
20
25
30
35
Nummer des Meßwertes

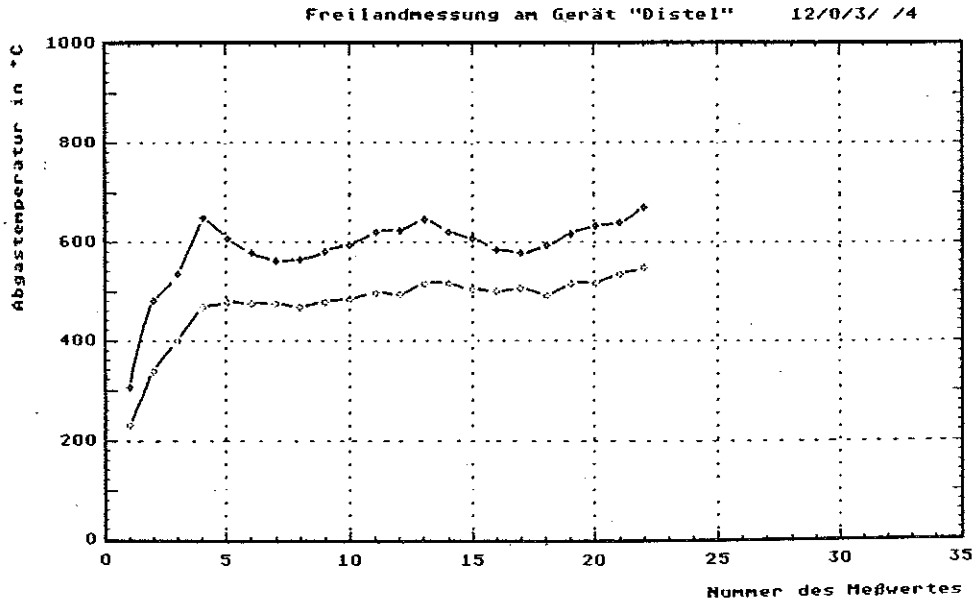

Freilandmessung am Gerät "Distel" 07/4/1/ /4
Abgastemperatur in °C
1000
800
600
400
200
0
0
5
10
15
20
25
30
35
Nummer des Meßwertes

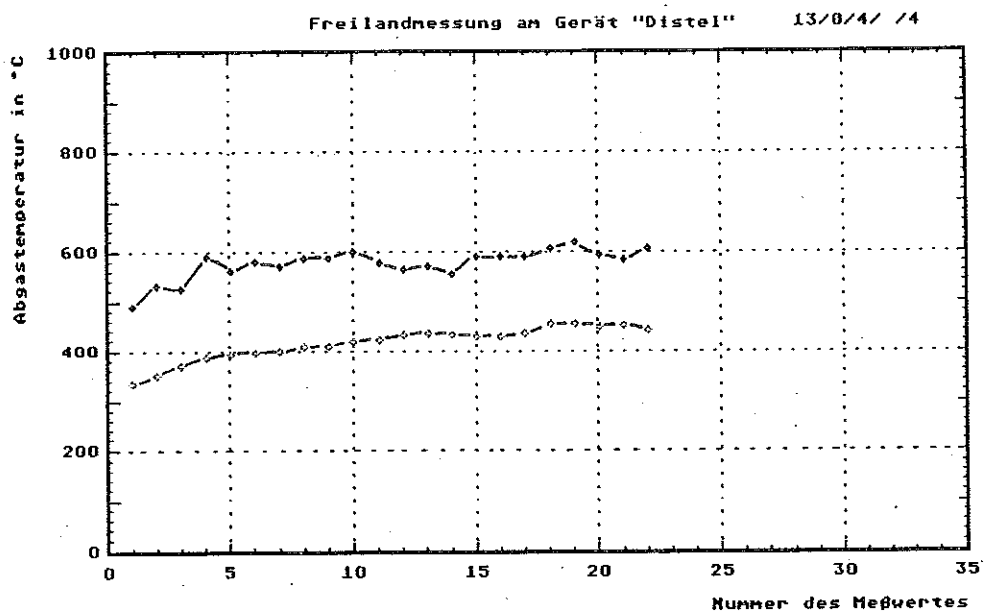

Freilandmessung am Gerät "Distel" 08/0/1/ /4
Abgastemperatur in °C
1000
800
600
400
200
0
0
5
10
15
20
25
30
35
Nummer des Meßwertes

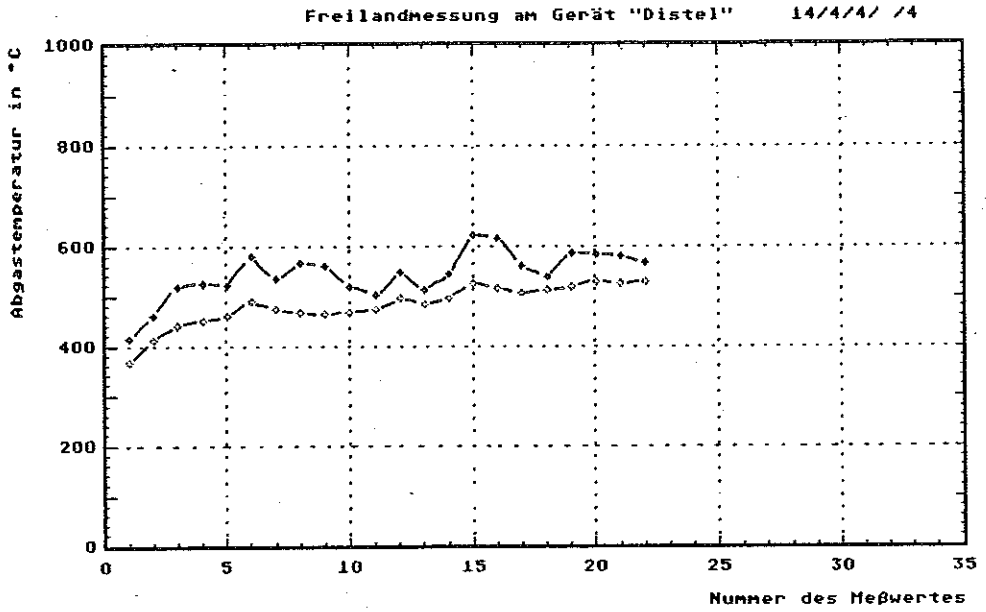

Freilandmessung am Gerät "Distel" 09/8/1/ /4
Abgastemperatur in °C
1000
800
600
400
200
0
0
5
10
15
20
25
30
35
Nummer des Meßwertes

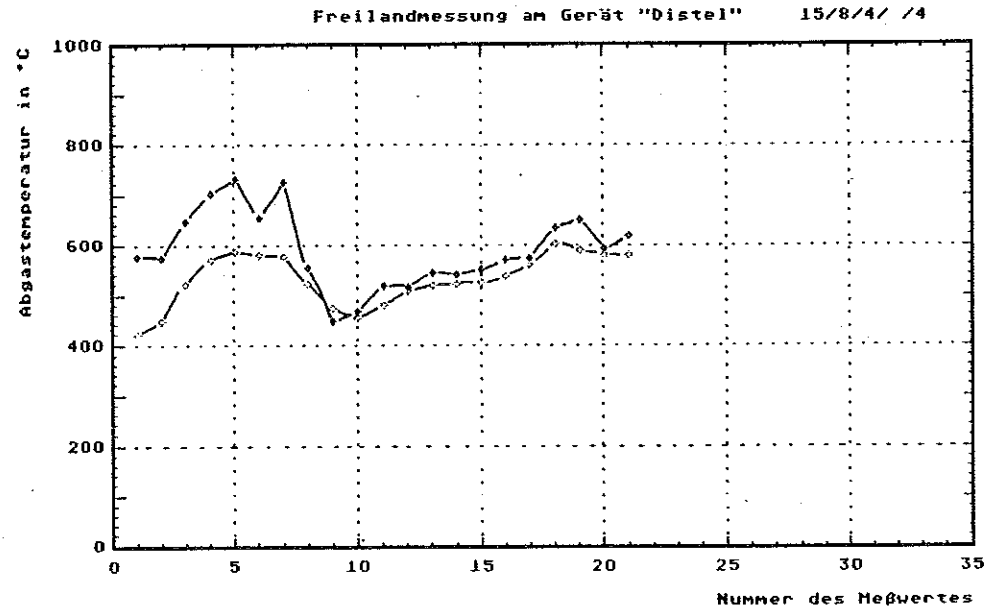

Freilandmessung am Gerät "Distel" 10/8/3/ /4
Abgastemperatur in °C
1000
800
600
400
200
0
0
5
10
15
20
25
30
35
Nummer des Meßwertes

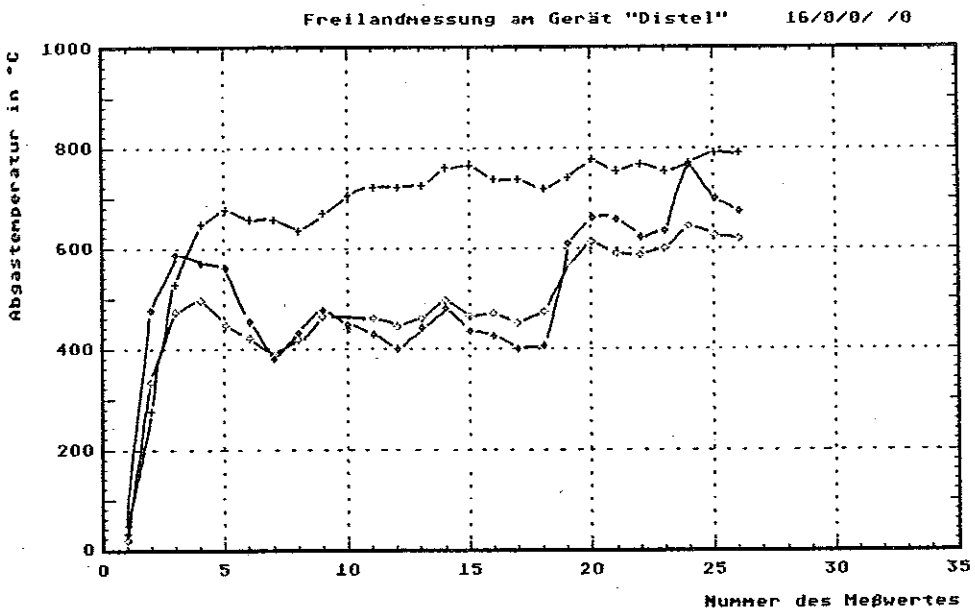

Freilandmessung am Gerät "Distel" 11/4/3/ /4
Abgastemperatur in °C
1000
800
600
400
200
0
0
5
10
15
20
25
30
35
Nummer des Meßwertes

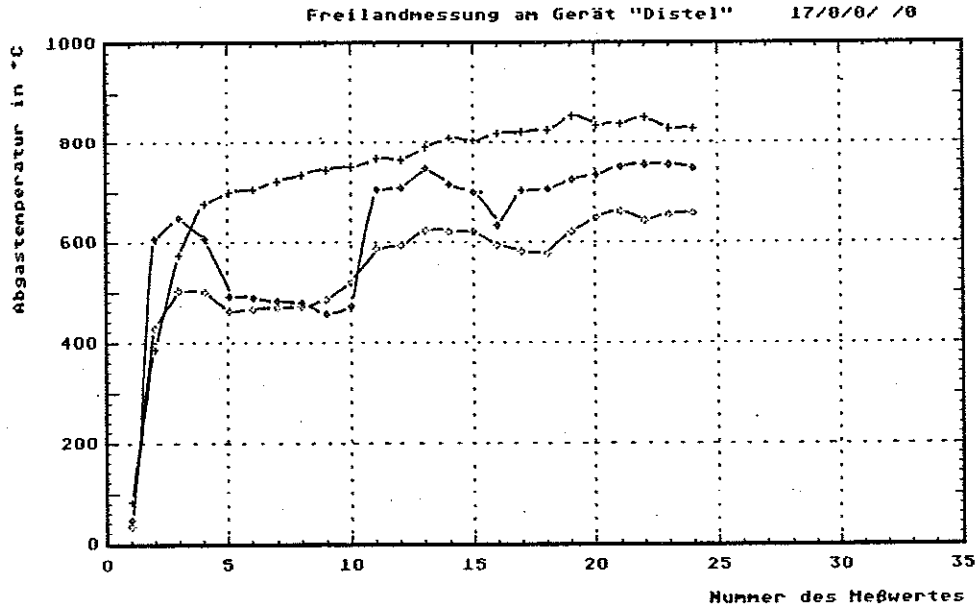

Freilandmessung am Gerät "Distel" 12/0/3/ /4
Abgastemperatur in °C
1000
800
600
400
200
0
0
5
10
15
20
25
30
35
Nummer des Meßwertes

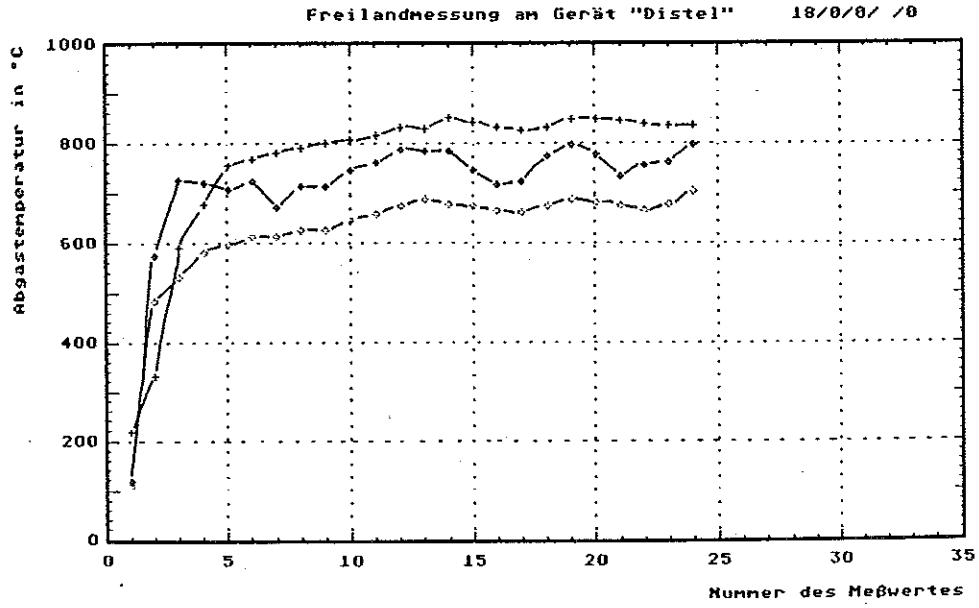

Freilandmessung am Gerät "Distel" 13/8/4/ /4
Abgastemperatur in °C
1000
800
600
400
200
0
0
5
10
15
20
25
30
35
Nummer des Meßwertes

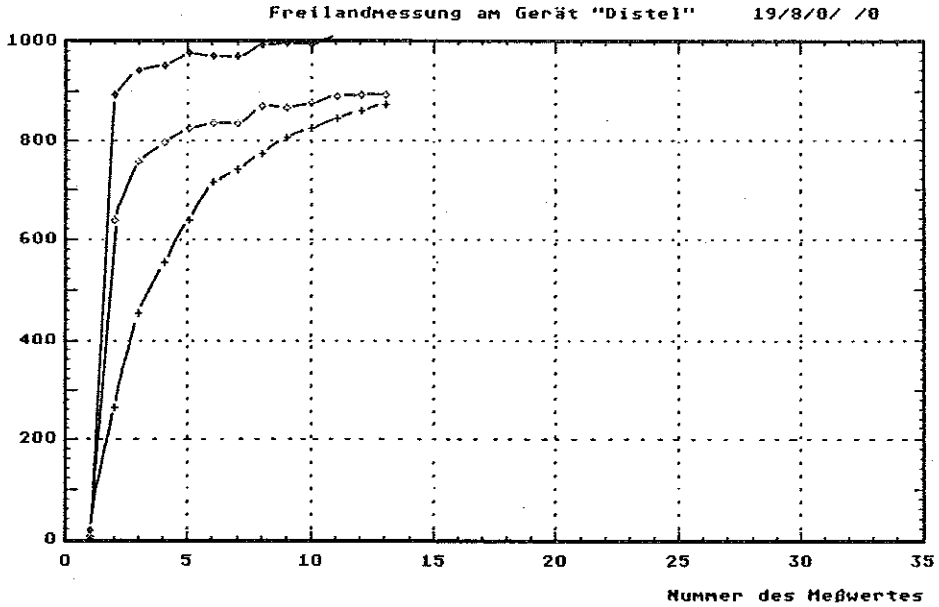

Freilandmessung am Gerät "Distel" 14/4/4/ /4
Abgastemperatur in °C
1000
800
600
400
200
0
0
5
10
15
20
25
30
35
Nummer des Meßwertes

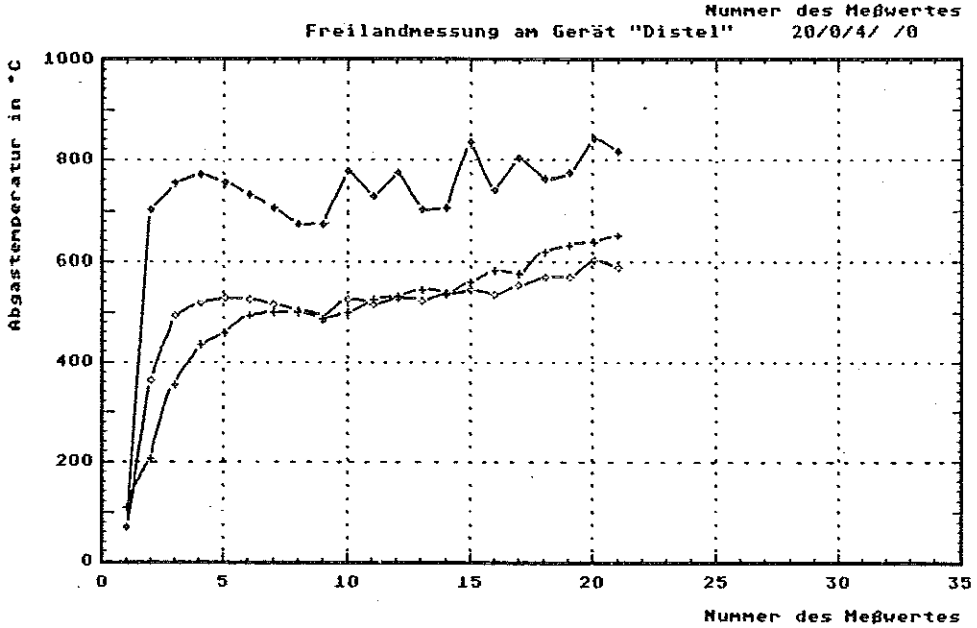

Freilandmessung am Gerät "Distel" 15/8/4/ /4
Abgastemperatur in °C
1000
800
600
400
200
0
0
5
10
15
20
25
30
35
Nummer des Meßwertes

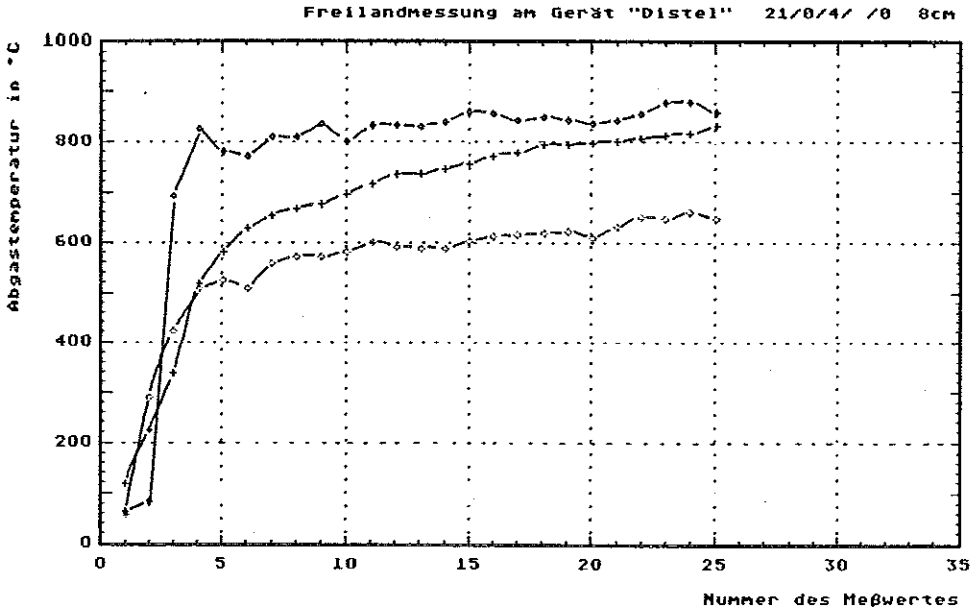

Freilandmessung am Gerät "Distel" 16/0/0/ /0
Abgastemperatur in °C
1000
800
600
400
200
0
0
5
10
15
20
25
30
35
Nummer des Meßwertes

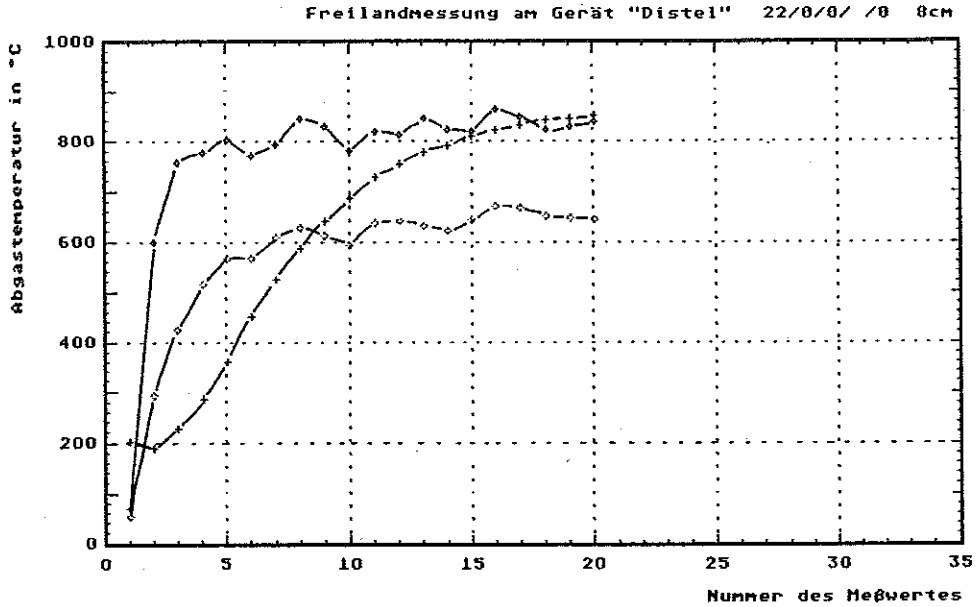

Freilandmessung am Gerät "Distel" 17/0/0/ /0
Abgastemperatur in °C
1000
800
600
400
200
0
0
5
10
15
20
25
30
35
Nummer des Meßwertes

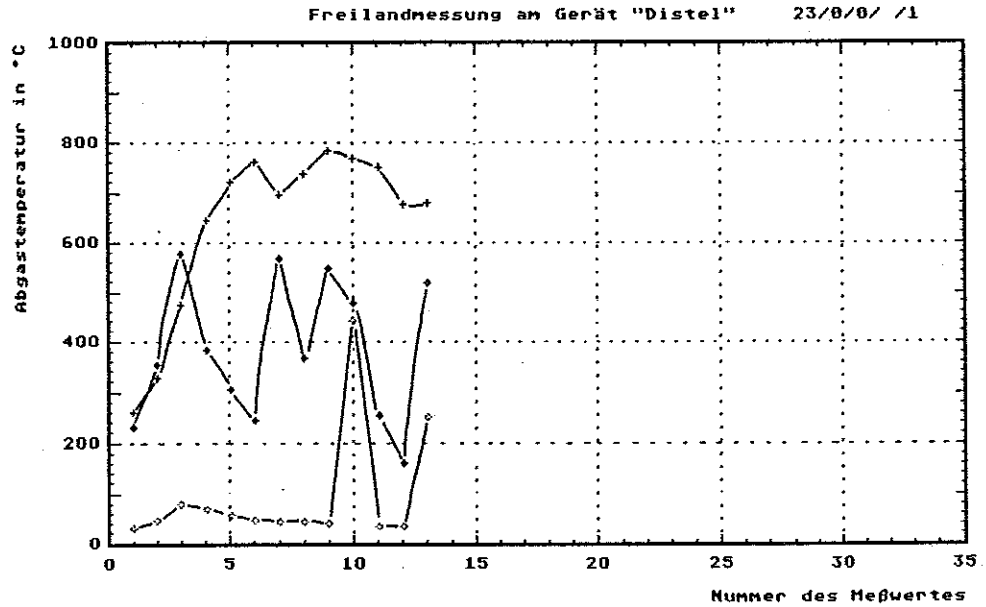

Freilandmessung am Gerät "Distel" 18/0/0/ /0
Abgastemperatur in °C
1000
800
600
400
200
0
0
5
10
15
20
25
30
35
Nummer des Meßwertes

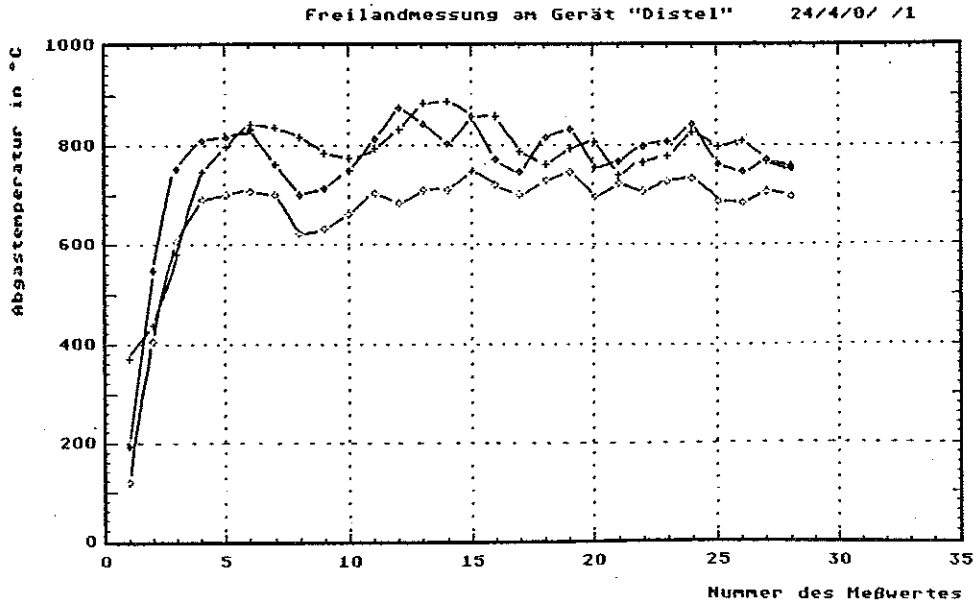

Freilandmessung am Gerät "Distel" 19/8/0/ /0
1000
800
600
400
200
0
0
5
10
15
20
25
30
35
Nummer des Meßwertes

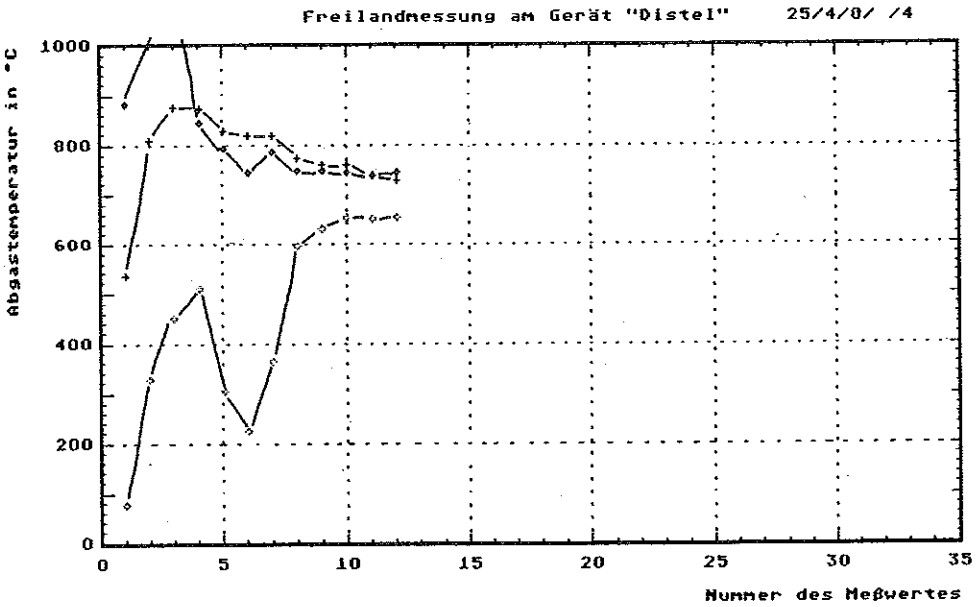

Freilandmessung am Gerät "Distel" 20/0/4/ /0
Abgastemperatur in °C
1000
800
600
400
200
0
0
5
10
15
20
25
30
35
Nummer des Meßwertes

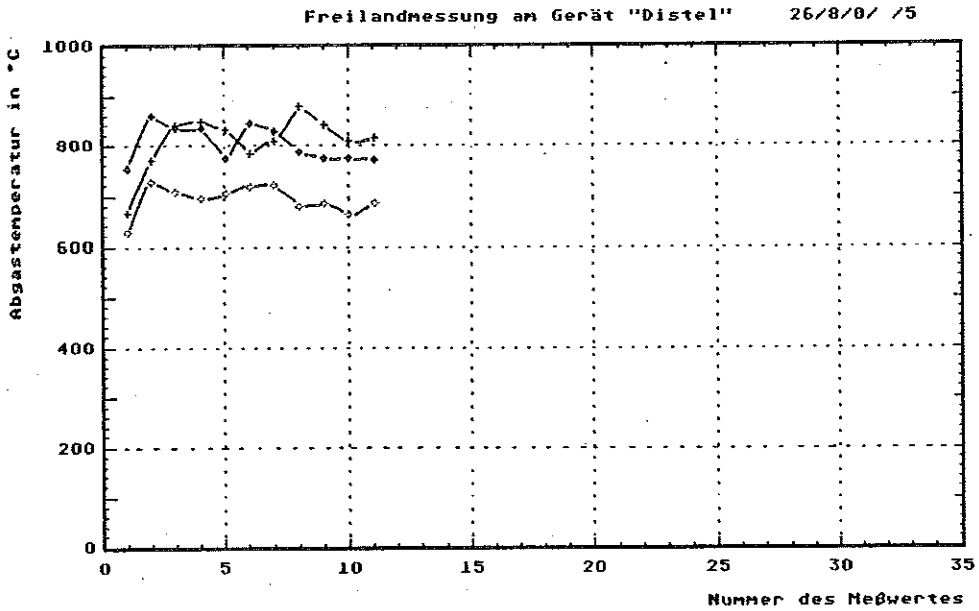

Freilandmessung am Gerät "Distel" 21/0/4/ /0 8cm
Abgastemperatur in °C
1000
800
600
400
200
0
0
5
10
15
20
25
30
35
Nummer des Meßwertes

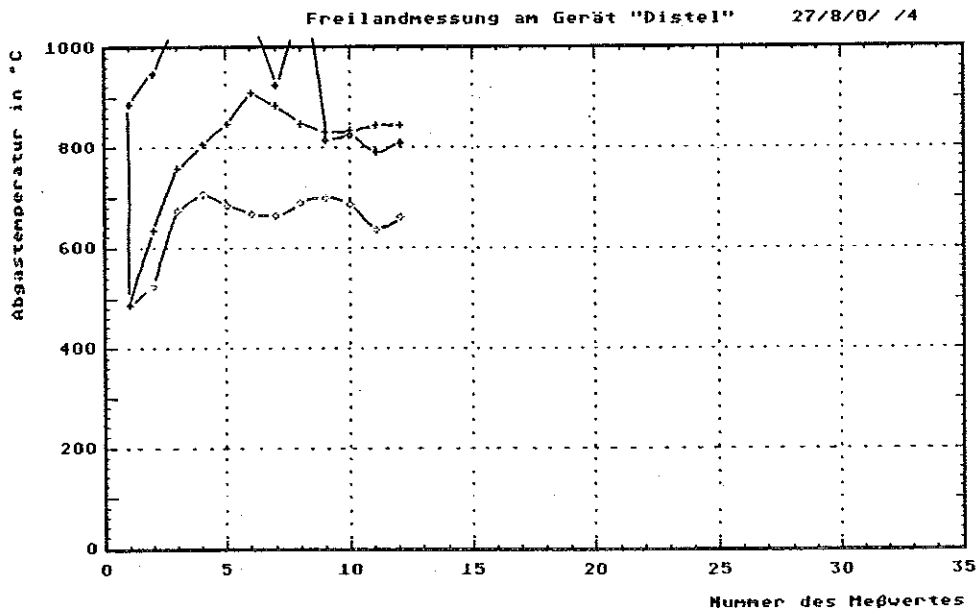

Freilandmessung am Gerät "Distel" 22/0/0/ /0 8cm
Abgastemperatur in °C
1000
800
600
400
200
0
0
5
10
15
20
25
30
35
Nummer des Meßwertes

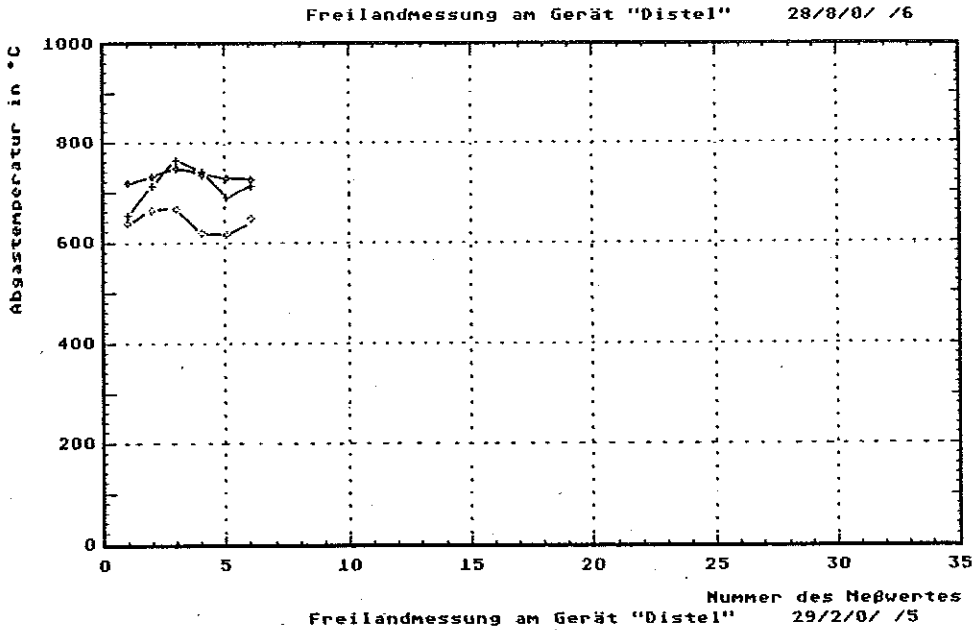

Freilandmessung am Gerät "Distel" 23/0/0/ /1
Abgastemperatur in °C
1000
800
600
400
200
0
0
5
10
15
20
25
30
35
Nummer des Meßwertes

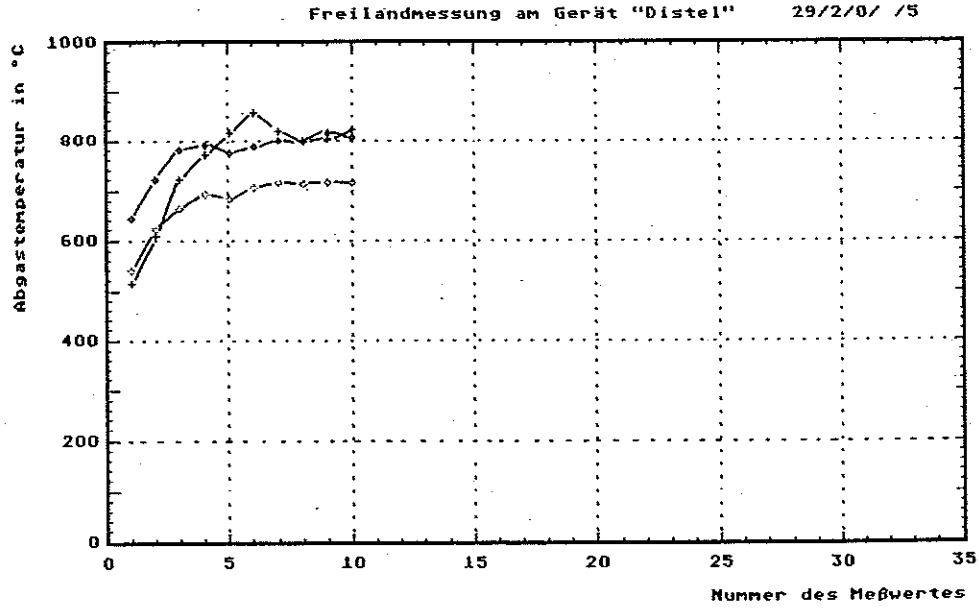

Freilandmessung am Gerät "Distel" 24/4/0/ /1
Abgastemperatur in °C
1000
800
600
400
200
0
0
5
10
15
20
25
30
35
Nummer des Meßwertes

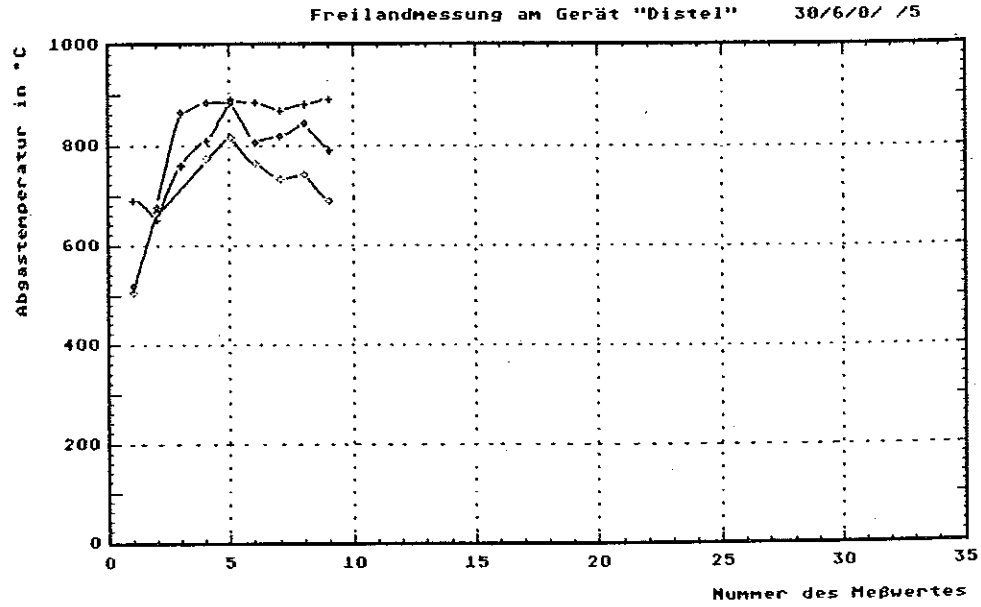

Freilandmessung am Gerät "Distel" 25/4/0/ /4
Abgastemperatur in °C
1000
800
600
400
200
0
0
5
10
15
20
25
30
35
Nummer des Meßwertes


Freilandmessung am Gerät "Distel" 26/8/0/ /5
Abgastemperatur in °C
1000
800
600
400
200
0
0
5
10
15
20
25
30
35
Nummer des Meßwertes


Freilandmessung am Gerät "Distel" 27/8/0/ /4
Abgastemperatur in °C
1000
800
600
400
200
0
0
5
10
15
20
25
30
35
Nummer des Meßwertes


Freilandmessung am Gerät "Distel" 28/8/0/ /6
Abgastemperatur in °C
1000
800
600
400
200
0
0
5
10
15
20
25
30
35
Nummer des Meßwertes


Freilandmessung am Gerät "Distel" 29/2/0/ /5
Abgastemperatur in °C
1000
800
600
400
200
0
0
5
10
15
20
25
30
35
Nummer des Meßwertes


Freilandmessung am Gerät "Distel" 30/6/0/ /5
Abgastemperatur in °C
1000
800
600
400
200
0
0
5
10
15
20
25
30
35
Nummer des Meßwertes

Protkoll für Versuch zum Pflanzentod:

Versuchsprotokoll vom 25.9.,90 laufende Nummer 05

05T1	05T2
T_1	T_2
245	172
247	191
269	217
260	218
237	157
$\bar{x}$ 252	191
σ 13	27

Dateiname

Motoreinstellung 10 (5) 12 (27) L (6) 60

Solltemperatur 200°C

$t_{Schlitten}$ = 0:28

$S_{Schlitten}$ = 1000 mm

S_{Hitze} = 20 mm

$t_{Hitze} = \frac{t_{Schlitten} \cdot S_{Hitze}}{S_{Schlitten}} = 0{,}56$

Pflanzenart Stielmus

Pflanzenalter ab Saat 17.9., 8 Tage

Pflanzengröße, form 7

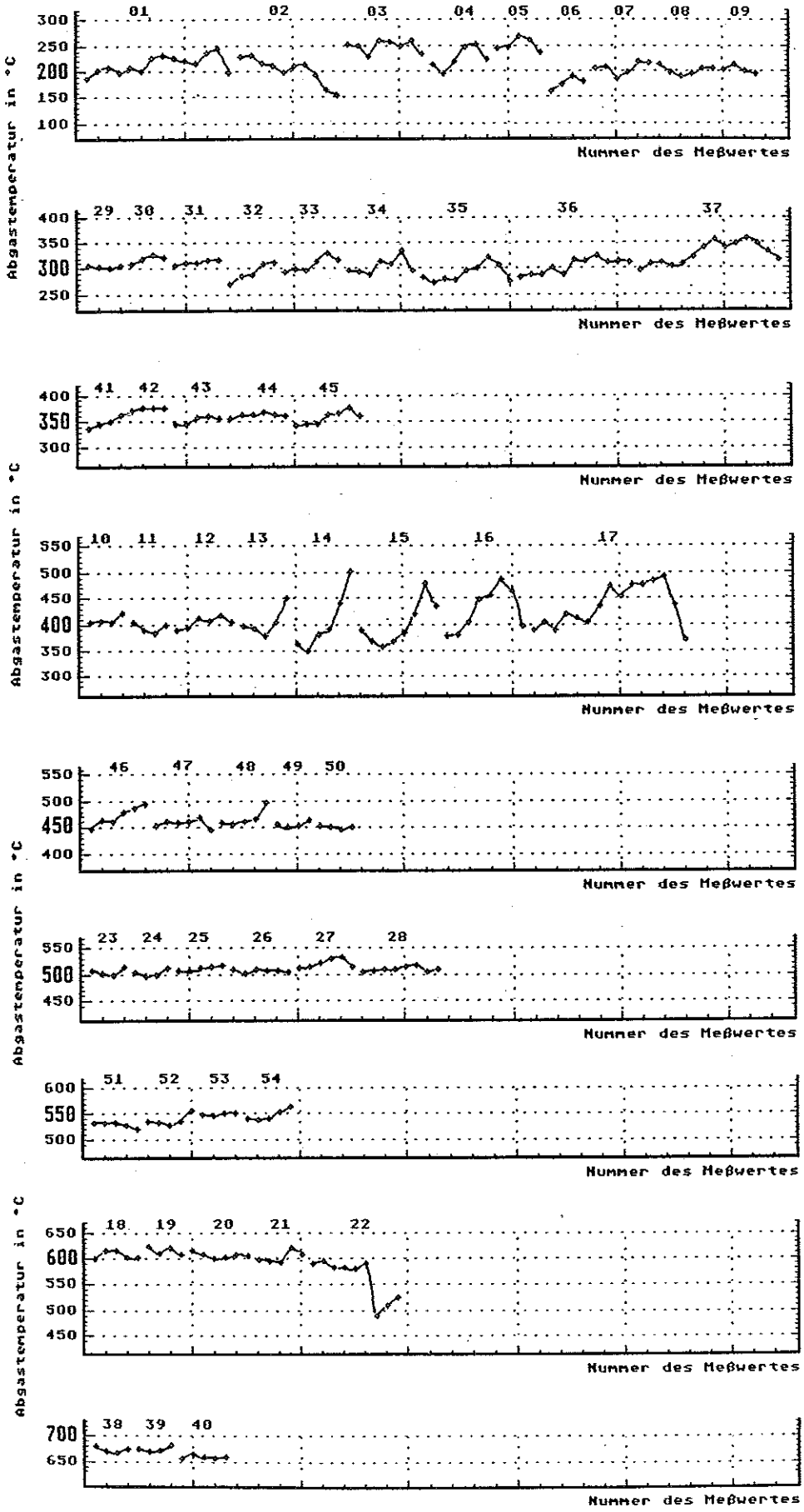
Befund
verbrannt
tot
beschädigt
angeknackst
lebendig

äußerer Rahmen

/ direkt nach der Hitzebelastung
\ endgültiger Befund

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
v										
t			○	○	⊘	⊘	⊘	⊘	⊘	
b	/	/	/	⊘	X		/	/	/	
a			\							
l	⊘	⊘								

Die folgenden Diagramme geben die während der einzelnen Versuche gemessenen Temperaturen wieder. Die angestrebte "Solltemperatur" ist durch größere Ziffern hervorgehoben. Die verbundenen Werte gehören jeweils zu dem Versuch, dessen Nummer darüber angegeben ist.


Abgastemperatur in °C
Nummer des Meßwertes
01 02 03 04 05 06 07 08 09
29 30 31 32 33 34 35 36 37
41 42 43 44 45
10 11 12 13 14 15 16 17
46 47 48 49 50
23 24 25 26 27 28
51 52 53 54
18 19 20 21 22
38 39 40

10.2. Verwendete Zeichen

Formelzeichen	Bedeutung	Einheiten
A	Fläche	m^2
B	Brennstoffverbrauch, absolut / Brennstoffmasse	kg
C_S	Strahlungskonstante	$W\,m^{-2}\,K^{-4}$
D	Dichteverhältnis	1
D	Durchmesser	m
H_u	Heizwert	$J\,kg^{-1}$
L_{min}	Luftbedarf, theoretisch	$m^3\,m^{-3}$
P	Leistung	W
Q	Wärmeenergie	J
T	Temperatur, absolut	K
T	Temperatur, Celsius	°C
V	Volumen	m^3
a	Abgasverhältnis	$m^3\,m^{-3}$
b	Spurbreite	m
c	Wärmekapazität, spezifisch	$J\,kg^{-1}\,K^{-1}$
h	Höhe	m
k	Wärmedurchgangskoeffizient	$W\,m^{-2}\,K^{-1}$
n	Drehzahl	s^{-1}
p	Druck	bar
$\dot{q}$	Wärmestromdichte	$W\,m^{-2}$
r	Radius	m
s	Wandstärke	m
t	Zeit	s
v	Geschwindigkeit	$m\,s^{-1}$
α	Wärmeübergangskoeffizient	$W\,m^{-2}\,K^{-1}$
ε	Emissionsverhältnis	1
η	Wirkungsgrad	1
$\Delta\vartheta$	Temperaturdifferenz	K
λ	Wärmeleitfähigkeit	$W\,m^{-1}\,K^{-1}$
ρ	Dichte	$kg\,m^{-3}$

Indices	Bedeutung
A	Abgas
B	Beikraut
D	Deckplatte
E	Erde
L	Luft
P	Propan
S	Strahlung
T	Tod
U	Umgebung
V	Verdampfen
c	bezogen auf Wärmekapazität
f	feucht
h	heiß
k	kalt
k	bezogen auf Wärmedurchgang
n	Normzustand
w	Wasser
α	bezogen auf Wärmeübergang
λ	bezogen auf Wärmeleitung

10.3. Kommentiertes Literaturverzeichnis

Die vom Autor angefügten Kommentare sind durch die kleine Schrift kenntlich gemacht!

[1] Hoffmann Manfred/Geier Bernward (Hrsg.): Beikrautregulierung statt Unkrautbekämpfung, Methoden der mechanischen und thermischen Regulierung, Verlag C.F. Müller, Karlsruhe 1987, Alternative Konzepte 58, ISBN 3-7880-9742-6

Referateband der II. Internationalen Konferenz zu Fragen der mechanischen und thermischen Unkrautbekämpfung vom 3. bis 5.3.1986. Organisiert durch IFOAM, Gesamthochschule Kassel/Witzenhausen und Fachhochschule Weihenstephan/Triesdorf.

[2] Institut für Technik im Gartenbau Weihenstephan: Thermische Unkrautbekämpfung, Literaturübersicht, Stand 1.6.1989

Die Liste umfaßt 53 Veröffentlicheungen und Firmenschriften zum Thema Unkraut, Unkrautbekämpfung, Flüssiggas und vergleichende Studien.

[3] Wawra Andreas: Heißes Eisen: Abflammtechnik, Mechanik und Hitze statt Chemie, Deutscher Gartenbau 1/1990

Auszüge aus KTBL-Schrift 331/Hoffmann und kurzer Vergleich der Geräte von Reinert und Eisenkolb

[4] Dubbel: Taschenbuch für den Maschinenbau, 15. Auflage, Springer Verlag, Berlin Heidelberg 1983, ISBN 3-540-12418-7

[5] Ehrlenspiel Klaus: Checklisten zum methodischen Konstruieren, Lehrstuhl für Konstruktion im Maschinenbau, TU-München 1987

[6] Mende/Simon: Physik, Gleichungen und Tabellen, VEB Fachbuchverlag Leipzig, 6. Auflage 1976

[7] Wedemeyer Thomas: Abflammtechnik und ihre Anwendung im Gemüsebau, Diplomarbeit an der FH-Weihenstephan, Fachbereich Gartenbau, Institut für Technik im Gartenbau, 1984

Brennertechnik und Anwendung im Gemüsebau

[8] Hoffmann Manfred: Abflammtechnik, KTBL-Schrift 331, 4. Auflage 1989, ISBN 3-7843-1784-7

Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e.v., Vertrieb und Auslieferung im Landwitschaftsverlag GmbH, Hülsebrockstr. 2, 4400 Münster-Hiltrup, Tel: 02501/801115, Grundlagenwerk zum Abflammen

[9] Mayinger F./Straub I.: Arbeitsunterlagen zu Vorlesung und Übung Wärme- und Stoffübertragung, TU-München, Lehrstuhl A für Thermodynamik, Ausgabe 1988

[10] Boldt Michael: Untersuchung der Abflammtechnik mit Infrarotbrennern, Diplomarbeit an der FH-Weihenstephan, Fachbereich Gartenbau, Institut für Technik im Gartenbau, 1989
Theoretischer Rechenansatz zu Wärmeübertragung und Wirkungsgraden mit vergleichenden Temperaturmessungen in der Pflanze

[11] Raschke K.: Über die physikalischen Beziehungen zwischen Wärmeübergangszahl, Strahlungsaustausch, Temperatur und Transpiration eines Blattes, Planta, Band 48, Seite 200-238, 1956

[12] Gates David: Biophysical Ecology, Springer-Verlag New York inc., 1980, ISBN 0-387-90414-X
Speziell : Chapter 9: Conduction and Convection, Chapter 15: Temperature and Organisms, Heat Resistance

[13] Reinert, Agrartechnik und Gerätebau: Umweltschonende Pflanzenpflege ist möglich, Firmenschrift
Hersteller von Abflammgeräten nach System Hoffmann

[14] Infrarot Technologien, Görgens Consulting & Trading GmbH: Wildkraut beseitigen, dabei die Umwelt schützen, Firmenschrift
Hersteller und Vertrieb von Abflammgeräten, Agrodynamik

[15] Tyczka GmbH & Co, Flüssiggas, Firmenschrift
Informationen zu Flüssiggas, Dampfdruckkurve, Verbrauchswerte, Sicherheitsvorschriften, Preislisten

[16] DVGW & DVFG: Technische Regeln Flüssiggas, Verlag A. Strobel KG, 1988, ISBN 3-87793-021-2
Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches e.V., Deutscher Verband Flüssiggas e.V., Regeln für die Planung und Erstellung von Flüssiggasverbrauchsanlagen mit Nenndruck von 50 mbar, vor allem Raumheizungen, Tabellen zu Flüssiggas, Rohrauslegung

[17] Walter Sabine: Nicht-chemische Unkrautregulierung, Herausgeber Stiftung Ökologischer Landbau, Kaiserslautern 1989, SÖL—Sonderausgabe Nr. 27, ISBN 3-926104-27-9
Stand der Dinge aber sehr allgemein gehalten, kaum detaillierte Information

[18] Günther Rudolf: Verbrennung und Feuerungen, Springer Verlag Berlin Heidelberg 1974, unveränderter Nachdruck 1984, ISBN 3-540-13256-2
Allgemeine Grundlagen über Verbrennungsvorgänge, speziell Vormischflammen, Wärmeübertragung im Feuerraum, allerdings sehr theoretisch

[19] Wagner Walter: Wärmeübertragung, Vogel Buchverlag Würzburg, 2. überarbeitete Auflage 1988, ISBN 3-8023-0153-6
Knappe Grundlagen der Wärmeübertragung mit Formelsammlung und Anwendungsbeispielen

[20] DIN 8543 Teil 4: Brenner für die Autogentechnik, Entwurf November 1988
Allgemeine Festlegungen zu handgeführten Brennern für Brenngas/angesaugte Luft

[21] DVGW-VP 103: Anforderungen und Prüfungen von Flüssiggas-Handbrennern, Dezember 1986
Anforderungen und Prüfungsmethoden von Brennern

[22] Gschwind Werkzeuge: Abflammtechnik, Firmenschrift
Hersteller von Abflammgeräten, Brenner aus der Flüssigphase

[23] Verband der gewerblichen Berufsgenossenschaften: VBG 43 und Durchführungsanweisungen zur Unfallverhütungsvorschrift , Heiz-, Flämm- und Schmelzgeräte für Bau- und Montagearbeiten, Oktober 1985, Carl Heymanns Verlag KG
Diese Vorschrift kommt den Abflammgeräten am nächsten, enthält jedoch nur sehr allgemeine Informationen

[24] Bathen Volker: Alternative zur Chemie, Flüssiggas 3/90 Seite 21/22
Sehr knapper Artickel, keine Adressen. Flüssiggas ist das Mitteilungsheft des Deutschen Verbandes Flüssiggas e.V.

[25] Eisenkolb Gerhard: Abflammgerät für das Vorauflaufverfahren, Firmenschrift
Hersteller von Abflammgeräten hoher Qualität

[26] DVGW: Prüfzeichen Verzeichnis Gas, 1990, ISSN 0935-6355
Verzeichnis der vom DVGW anerkannten und nach DIN registrierten Gasgeräte und Materialien

[27] Sauerman Guntram: Der Ökologische Landbau und seine Maschinen, Seminarvortrag am Institut für Landmaschinen - TU Braunschweig, November 1989
Eine kurze Einführung in die Notwendigkeit und die Denkweise des ökologischen Landbaus. Beispiele für Ingenieur-Aufgaben

[28] Schumacher E.F.: Die Rückkehr zum menschlichen Maß, Rowohlt Verlag 1977, ISBN 3-498-06121-6
Originalausgabe unter dem Titel: "Small is beautiful. A study of economics as if people mattered", Alternativen für Wirtschaft und Technik werden vorgestellt. Gilt als Klassiker für eine alternative Denkweise und als einer der bedeutendsten Kritiker der technischen Zivilisation.

[29] Vester Frederic: Unsere Welt - ein vernetztes System, dtv 1983/10118, ISBN 3-423-10118-1
Anhand von alltäglichen Beispielen stellt Vester die verschiedenen Wirkungen und Rückwirkungen innerhalb lebender Systeme anschaulich dar. Eine Einführung in die Kybernetik

[30] Carborundum Werke GmbH: Fiberfrax Durablanket, Firmenschrift, Ausgabe 11/82, 3 Seiten
Detailierte Angaben über das Isolationsmaterial Fiberfrax. Aufgebaut aus Keramikfasern, Schmelzpunkt bei 1760°C

[31] DIN 4811 Teil 4: Druckregelgeräte für Flüssiggas
Definition der Fachausdrücke, Regelverhalten für Ausgangsdrücke

[32] Gomez Peter / Probst Gilbert: Vernetztes Denken im Management, Schweizerische Volksbank, Bern 1987, Die Orientierung Nr. 89
Praxisorientierte Lehr- und Lernanleitungen zum systemorientierten Handeln

[33] Leix H.: Anorg. chem. Experimentierkunst, 1959
Angaben zu Thermoelementen

Weitere Literatur gibt es bei HOFFMANN und im Institut für Technik im Gartenbau, wo ein aktualisiertes Verzeichnis zu allen bekannten Veröffentlichungen zum Thema Abflammtechnik aufliegt.

10.4. Nützliche Adressen

Die gesammelten Adressen sollen es einem interessiertem Menschen erleichtern, die Wege zu kompetenten GesprächspartnerInnen, die sich mit dem Thema "Abflammtechnik" beschäftigen, schnell zu finden.

Boldt, Michael (Diplomarbeit in Weihenstephan)
Meichelbeckstr. 4
8050 Freising
☎ 08161/61796

Bundesverband der Landwirtschaft (Prüfzeichen: "Geprüfte Sicherheit")
Berufsgenossenschaft Kassel
Prüfstelle Unfallverhütung
Weissensteinstr. 72
3500 Kassel
☎ 0561/ 3081228

DVFG (Deutscher Verband Flüssiggas e.V., Verband von Herstellern)
Westerbachstr. 23
6242 Kronberg/Taunus 06173/4077

DVGW (Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches e.V., Prüfzeichen: "DVGW")
Mergenthaleralle 27-29
6236 Eschborn

Eisenkolb, Gerhard (Landw. Spezialmaschinen, Entwicklung und Vertrieb)
Kapellenweg 18
7121 Ingersheim
☎ 07142/20447

Görgens Consulting & Trading GmbH (Infrarot-Technologien, Hersteller, Vertrieb)
Alte Forststr. 37
5000 Köln 91
☎ 0221/862082

Carl Heymanns Verlag KG (Unfallverhütungsvorschriften)
Luxemburgerstr. 449
5000 Köln 41
☎ 0221/460100

Hoffmann, Prof. Manfred (Forschung, Literatur)
Haager Weg 8
8825 Weidenbach
☎ 09826/9693 oder 18226

Institut für Landmaschinen (Betreuung der Studienarbeit)
Technische Universität Braunschweig
Langer Kamp 19 a
3300 Braunschweig
☎ 0531/3912676

Institut für Technik im Gartenbau (Forschung, Betreuung von Diplomarbeiten)
Fachhochschule Weihenstephan / Prof. Hege
8050 Freising
☎ 08161/713369
Ing. Rannertshauser
☎ 08161/714124

Kress & Co GmbH (Umweltschonenede Landtechnik, Hersteller, Vertrieb)
Osterbachstr. 10
7106 Neuenstadt
☎ 06264/7727
Kress, Walter
Haag Hof (Bioland Hof)
☎ 07139/7008

KTBL (Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft, Literatur)
Verlag
Bartningstr. 49
6100 Darmstadt 12
☎ 06151/70010
Vertrieb
Hülsenbrochstr. 2
4400 Münster-Hitrup
☎ 02501/801115

Reinert (Agrartechnik und Gerätebau, Geräte für den thermischen Pflanzenschutz)
Marktplatz 9
8825 Weidenbach-Triesdorf
☎ 09826/226

Sauermann, Guntram (Studienarbeit an der TU-Braunschweig)
Lindenmattenstr. 33
7800 Freiburg
☎ 0761/62923

Stiftung Ökologischer Landbau (Information, Literatur)
Weinstr. Süd 51
6702 Bad Dürkheim
☎ 06322/ 8666

A. Strobel KG (Verlag, Herausgeber von "Flüssiggas", DVFG Mitteilungen)
Zur Feldmühle 9-11
5760 Arnsberg 2
☎ 02931/ 89000

Tyczka GmbH & Co (Vertrieb von Flüssiggas und Zubehör, Literatur)
Harth, Helmut
Hagelstauden 46
7800 Freiburg
☎ 0761/41800

Wedemeyer, Thomas (Diplomarbeit in Weihenstephan, Abflammgerät)
Gärtnerei Distel (Bioland Gärnterei)
Herrenstr. 12
7833 Kiechlinsbergen
☎ 07642/~~6642~~ 4352

Gebr. Werner GmbH (Infrarot, Straßenbau)
Altheimerstr. 109
6660 Zweibrücken
☎ 06332/12071

10.5. Bilanzen

Die meisten schriftlich abgefaßten Arbeiten, die an einer Hochschule oder Uni verfaßt werden, stehen wohlgeordnet in einer Institutsbibliothek. Der Aufwand, der in solch einem Werk steckt, ist jedoch nur selten zu ermessen. Professionelle Literatur ist wenigstens durch den Verkaufspreis in gewisse Größenordnungen einteilbar.

Ich halte es für dringend geboten, daß auch die sogenannte "freie Wissenschaft" ihren Aufwand offenlegt. Dabei geht es nicht darum, möglichst viel Lorbeer durch möglichst viele Arbeitsstunden zu erheischen. Es geht um die Nachvollziehbarkeit. Wieviel Zeit, Energie und Geld (gerne auch weitere Parameter) müssen investiert werden, um zu dem vorgelegten Ergebnis zu kommen? Ganz nebenbei ergibt sich der Effekt, daß mensch sich selbst während der Arbeit besser beobachtet und mit vorhandenen Potentialen umsichtiger wirtschaften kann.

- **Zeit**

Um dieses Ergebnis vorlegen zu könne, habe ich an 114 Tagen im Schnitt 5,3 Stunden gearbeitet. Die Summe von 605 Arbeitsstunden (≙100 %) teilt sich in folgende Untergruppen auf:

Fachliche Theorie, Lesen, Rechnen	117 h	(≙19 %)
Formalkram, Briefe, Computerprogramme	83 h	(≙13 %)
Transport in Auto und Bahn	58 h	(≙10 %)
Praktische Tätigkeit, Versuche, Veränderungen	95 h	(≙16 %)
Auswerten, Zusammenschreiben	252 h	(≙42 %)

Die "Schreibtischarbeiten" weisen damit insgesamt 452 h oder 74 % auf.

Einschließlich Einarbeitung, Versuchsvorbereitung und Durchführung, Prüfungen, Urlaub und Zusammenschreiben, hat sich die Arbeit von Mai bis Dezember 1990 erstreckt.

- **Geld**

Der Ablauf der Studienarbeit hat einen Gesamtumsatz von 1491,66 DM (≙100 %) erbracht.

Davon entfallen 356,83 DM (≙24 %) auf Büromaterial, Bücher und Versuchsaufbauten. Die Kosten für ein Exemplar der Studienarbeit betragten ca. 20,00 DM und sind hier noch nicht miteingerechnet.

Weitere 380,83 DM (≙26 %) hat die Gärtnerei "Distel" in die Renovierung und Veränderung ihres Abflammgerätes gesteckt.

Die restlichen 754,00 DM (≙50 %) habe ich in "Transport" investiert. Fast alle Strecken habe ich im eigenen PKW zurückgelegt, dessen Kosten mit 0,20 DM/100 km sehr niedrig ausgefallen sind. Die Bundesbahn oder ausgeliehene Fahrzeuge sind da bereits spürbar höher zu Buche geschlagen.

- **Energie**

Alles in allem habe ich ca. 3720 km zurückgelegt. Allein 2040 km (≙55 %) waren dabei notwendig, um die verschiedenen Menschen zu treffen, die sich bundesweit mit der Abflammtechnik beschäftigen. Die Entfernung zwischen meiner Wohnung und der Gärtnerei, in der ich die Versuche durchgeführt habe beträgt 40 km. Die häufige Arbeit dort hat eine Kilometersumme von 1680 km (≙45 %) zur Folge.

Den Verbrauch des PKW setze ich bei 6,5 l/100 km an. Die Studienarbeit hat damit 221 Liter Benzin, unverbleit, verbraucht.

Das Abflammen selbst und die durchgeführten Versuche haben schätzungsweise 20 - 30 kg Flüssiggas und einige Liter Diesel erfordert.

Das Auswerten und Zusammenschreiben am Computer, inklusive Beleuchtung, erbrachte eine Stromverbrauch von ungefähr 62 kWh.

Die beschriebene und bedruckte Papiermasse beläuft sich auf 2,5 kg.

10.6. Bewertung "Nicht-technischer Ziele"

Die Bewertung "Nicht-technischer Ziele" steht am Ende der Studienarbeit. Nicht etwa, weil mir dieser Aspekt im Grunde doch uninteressant scheint, sondern weil diese Bewertung nur mit etwas Abstand zum "Hauptteil" durchführbar ist.

Aber - was soll das überhaupt?

Wie in Kapitel *10.5. Bilanzen* geht es auch hier um Nachvollziehbarkeit, geht es um einen umfassenderen Anspruch an die "Wissenschaft". Speziell die TechnikerIn muß sich darüber klar werden, wie sie arbeitet und welche Kriterien dabei zur Anwendung kommen. Die "neutrale" Technik, die nur auf die personenbezogene Anwendung wartet, die gibt es leider - oder zum - Glück nicht!

Die folgenden Abschnitte behandeln also die Aspekte der Studienarbeit, die das "technische" Ergebnis (z.B. daß die Temperaturen berechenbar sind) abrunden.

- **Übersichtliche Darstellung**

Aus Kapitel *10.5. Bilanzen (Zeit)* ist zu entnehmen, daß ich 42% der aufgewendeten Zeit für Auswertung und Zusammenschreiben aufgewendet habe. Dabei hat wiederum das Zusammenschreiben den Löwenanteil abbekommen.

Ein Grund dafür ist sicherlich mein Versuch, die Arbeit lesefreundlich zu gestalten. Darunter ordne ich folgende Aspekte ein:

- Optisch ansprechende Gestaltung (Format und Schrift)
- Viele aussagekräftige Bilder und Skizzen
- Beschreibung von Bildern ohne Umblättern lesbar
- Querverweise auf andere Kapitel
- Ausgewogene Ausdrucksweise (kein "neutrales Wissenschaftsgeschwafel")

Ob ich diese Ziele tatsächlich verwirklichen konnte, müssen die LeserInnen entscheiden. Mir hat das Zusammenschreiben im großen und ganzen Spaß gemacht!

- **Entscheidungen**

Ich habe mich bemüht, die Studienarbeit so niederzuschreiben, daß deutlich wird, wann ich "willkürliche" Entscheidungen getroffen habe. Das zeigt sich besonders bei den Annahmen für Rechenmodelle oder der Vorbereitung von Versuchen. Bereits der Versuchsaufbau ist ja schon eine Bewertung und Entscheidung meinerseits. Ich warne allerdings davor, davon auszugehen, daß ich tatsächlich alle Entscheidungspunkte angesprochen habe. Einige Entscheidungen, die ich unbemerkt "aus dem Bauch heraus" getroffen habe, einige Annahmen, die ich stillschweigend vorausgesetzt habe, sind mir sicherlich "entwischt". Vorsicht ist also nach wie vor geboten!

Ich habe mich redlich bemüht, nach den Regeln der Konstruktionlehre die Arbeit zu planen und durchzuführen. Die Erarbeitung eines Anforderungskatalogs und dessen folgende Abarbeitung war jedoch nicht sehr erfolgreich. Zum einen waren die resultierenden Aufgaben sehr weit gesteckt, zum anderen wurden durch die Versuche ständig neue Fragestellungen angerissen, die wiederum auf die Anforderungen zurückgewirkt haben.

- **Kontakte**

Das Thema "Abflammtechnik" ist in sich bereits interdisziplinär angelegt. Deshalb auch das Kapitel *2. Landwirtschaftliche Grundlagen.* Mir ist dabei wiederholt aufgegangen, wie verschieden die Denkweisen und die Sprachen der einzelnen Gruppen sind und wie wenig wir auf diese Kommunikation vorbereitet sind. Um die entsprechenden Informationen einzuholen, habe ich mich deshalb um verschiedenste Kontakte bemüht. Da wären:

- Assistent (technische Betreuung)
- Gärtnerei "Distel" (Versuche, Information)
- Hersteller (technische Informationen)
- Institute (Gedankenaustausch und Information)
- Biologie (Grundlagen für Pflanzentod)
- Forstwirtschaft (Erfahrung über "Brände" als ökologische Regulierung)
- Prüfstellen (DVGW, Berufsgenossenschaft)

Obwohl einige Kontakte nur sehr kurz waren, habe ich ungeheuer davon profitiert. Wenige Stunden Informationsaustausch lohnen meistens selbst längere Anfahrtswege. Der Informationsfluß mit der Gärtnerei war bisweilen nicht optimal. Das liegt aber einfach daran, daß die Menschen dort neben ihrer täglichen Arbeit nun auch noch auf einen "theoretisierenden Studiosus" eingehen mußten. Theorie und Praxis prallen aufeinander.

Daß mir die Arbeit in der Gärtnerei sehr viel Spaß gemacht hat, inklusive der köstlichen Versorgung zur Mittagszeit, will ich an dieser Stelle ausdrücklich erwähnen.

Betrachte ich die Studienarbeit als einen "Akt der Befreiung" aus den selbsterrichteten Mauern des Maschinenbaustudiums, so deucht sie mir gelungen.

- Zeitplan

"Wie bei allen Studienarbeiten" ist es mir auch bei dieser nicht gelungen den erstellten Zeitplan vollständig einzuhalten. Den Einsatz meiner Kräfte hatte ich mir so vorgestellt:

• Info sammeln, Auswerten, Rechnen	27 %	(32 %)
• Gerät vermessen, Altenativen entwickeln und testen	42 %	(26 %)
• Auswertung und Zusammenschreiben	31 %	(42 %)

In Klammern sind die Größen angegeben, die sich tatsächlich eingestellt haben. Besonders auffällig ist, daß ich die praktischen Tätigkeiten in meiner Planung vollkommen überbewertet habe. Die für jede Schweißnaht und jeden Versuch notwendige Hintergrundarbeit ist offensichtlich zu kurz gekommen.

Dazu kommt, daß ich mit 605 Arbeitsstunden meine Vorstellungen um ca. 20 % überzogen habe. Das resultiert in erster Linie aus den "Versuchen zum Pflanzentod". Diese waren anfänglich nicht vorgesehen. Für eine abgerundete, schlüssige Arbeit waren sie jedoch wichtig.

Durch den Wechsel nach Freiburg, die Eingewöhnung in der Gärtnerei, die eingeschobenen Prüfungen und eine "verdiente Pause" (sprich Urlaub) hat sich alles etwas in die Länge gestreckt. Die Arbeit ist deshalb teilweise sehr stockend abgelaufen. Auch machte sich gegen Ende des Zusammenschreibens eine gewisse "Müdigkeit" bemerkbar, die hoffentlich nicht allzusehr in den letzten Kapiteln durchschlägt.

Die regelmäßig angefertigten Protokolle habe das Zusammenschreiben ungemein erleichtert und beschleunigt. Auch das Festhalten, wann ich wieviel für welchen Arbeitsbereich getan habe, hat mir bei der Koordinierung wesentlich geholfen.

Aus dieser Perspektive gesehen bin ich mit dem Ergebnis zufrieden.