

**Ökologisch verträgliche Schädlingsbekämpfung in
der Vorratswirtschaft durch Eintrag von
Hochfrequenzenergie**

Aktenzeichen der Deutsche Bundesstiftung Umwelt : 10918
Verfasser: Dr.Jütterschenke
ARBES - UMWELT GmbH Thermische Hochfrequenzanwendungen
Köpenicker Str. 325, 12555 Berlin
Projektbeginn 01.09.1998
Laufzeit 12 Monate
Berlin 1999

Inhalt

0.	Zusammenfassung	4
1.	Einleitung	5
2.	Verfahrensbeschreibung des Entwicklungsvorhabens	5
2.1.	Die physikalischen Grundlagen des Verfahrens und seine Wirkprinzipien	5
21.1.	Die dielektrische Erwärmung	5
2.1.1.1.	Leistungsaufnahme in homogenen Materialien	6
2.1.1.2.	Verhältnisse in inhomogenen Materialien	7
2.1.1.3.	Dielektrische Materialparameter von Vorratsgütern und Schädlingen	8
2.1.2.	Thermische Gesichtspunkte	10
3.	Literaturschau	11
3.1.	Übersicht	11
3.2.	Auswertung	13
4.	Der Aufbau der Versuchsanlage	13
4.1.	Aufgaben und Anforderungen	13
4.2.	Die technischen Einrichtungen zur HF-Erzeugung, -Übertragung und Impedanzanpassung	14
4.2.1.	Modifikation der Anpasseinrichtung	15
4.3.	Temperaturmesseinrichtung	18
4.4.	Probengefäße	19
4.5.	Messung der Behandlungszeit	19
5.	Versuchsdurchführung	21
5.1.	Grundlegende Versuche	21
5.1.1.	Beschreibung der grundlegenden Versuche	21
5.1.2.	Auswertung der grundlegenden Versuche	22
5.2.	Experimente zur Getreidesterilisation	23
5.2.1.	Experimente zur Weizenaufheizung	23
5.2.1.1.	Erwärmungsversuche mit einzelnen Weizenkörnern	23
5.2.1.2.	Beispiele zur Weizenaufheizung	24
5.2.1.3.	Bildung von Strombahnen im Weizen	27
5.2.2.	Experimente mit Schadinsekten	29
5.2.2.1.	Adulte Kornkäfer	29
5.2.2.2.	Brutstadien des Kornkäfers	33
5.3.	Diskussion der Ergebnisse	35
6.	Anforderungen an eine kommerzielle Behandlungsanlage	38
6.1.	Besonderheiten von Hochfrequenzanlagen	38
6.2.	Prinzipieller Aufbau	39
6.3.	Energiebedarf	40
7.	Schlussfolgerungen und Ausblick	41
8.	Literaturverzeichnis	43

Abbildungen

Bild 2.1	Volumenstück	6
Bild 2.2	Feldkomponenten	7
Bild 2.3	Relative Dielektrizitätskonstante (RDK) von Kornkäfern und Vorratsgütern als Funktion der Frequenz (Diagramm)	9
Bild 2.4	Verlustfaktor $\tan(\delta)$ von Kornkäfern und Vorratsgütern als Funktion der Frequenz (Diagramm)	9
Bild 2.5	Dielektrizitätskonstante von Weizen als Funktion der Frequenz, Parameter Wassergehalt (Diagramm)	10
Bild 2.6	Verlustfaktor $\tan(\delta)$ von Weizen (logarithmischer Maßstab) als Funktion der Frequenz, Parameter Wassergehalt (Diagramm)	10
Bild 4.1	Blockschaltbild der Versuchsanordnung	15
Bild 4.2	Küvette mit HF-Ersatzschaltung	16
Bild 4.3	Arbeitskondensatorspannung als Funktion der angezeigten HF-Spannung (Diagramm)	17
Bild 4.4	Schaltbild der Anpasseinrichtung (modifizierte Matchbox Hüttinger PFM 3000 A)	17
Bild 4.5	Spannung am Arbeitskondensator in Abhängigkeit von der Verstimmung der Drehkondensatoren C1 und C2 nach Bild 4.4 bei einer Spulengüte von $Q=150$ (Diagramm)	18
Bild 4.6	Messung der Behandlungszeit und Kontrolle der Behandlungsfeldstärke	20
Bild 5.1	Koaxiale Anordnung (Vorversuch)	21
Bild 5.2	Anordnung mit Zentrifugenglas (Vorversuch)	22
Bild 5.3	Erwärmung einzelner Weizenkörner im Arbeitskondensator	23
Bild 5.4	Aufgenommene Erwärmungskurven von Weizenkörnern mit anfänglich unterschiedlichem Wassergehalt bei konstanter äußerer Feldstärke von 200 kV/m in Luft (Diagramm)	24
Bild 5.5	Aufgenommene Erwärmungskurven von Weizen mit 9 % Wassergehalt bei verschiedenen Feldstärken im Weizen (Diagramm)	25
Bild 5.6	Aufgenommene Erwärmungskurven von Weizen mit 13 % Wassergehalt bei verschiedenen Feldstärken im Weizen (Diagramm)	26
Bild 5.7	Aufgenommene Erwärmungskurven von Weizen mit 16 % Wassergehalt bei verschiedenen Feldstärken im Weizen (Diagramm)	26
Bild 5.8	Aufgenommene Erwärmungskurven von Weizen mit 19 % Wassergehalt bei verschiedenen Feldstärken im Weizen (Diagramm)	26
Bild 5.9	Veränderung der RDK von Weizen durch 5 s HF-Behandlung bei 150 kV/m als Funktion der Frequenz (Diagramm)	28
Bild 5.10	Veränderung des Verlustfaktors von Weizen durch 5 s HF-Behandlung bei 150 kV/m als Funktion der Frequenz (Diagramm)	28
Bild 5.11	Gemessene Überlebenszeit von adulten Kornkäfern in Luft als Funktion der Feldstärke (Diagramm)	30
Bild 5.12	Behandlung von Weizen und Insekten im Arbeitskondensator	30

Bild 5.13	Weizenerwärmung während dreier für alle beteiligten Käfer tödlich endenden HF-Behandlungen mit 150 kV/m (Diagramm)	33
Bild 5.14	Behandelte Brutstadien Brut1 bis Brut5 des Kornkäfers	33
Bild 5.15	Behandlung von Kornkäfer-Brutstadien	34
Bild 5.16	Vergleich der gemessenen Überlebensraten verschiedener Entwicklungsstadien von Kornkäfern in Weizen mit 15% Wassergehalt in Abhängigkeit von der Behandlungsfeldstärke	37
Bild 6.1	Prinzip einer kommerziellen Hochfrequenz-Weizenbehandlungsanlage	39
Bild 6.2	Behandlungsraum	40

Fotos

Foto 4.1	Versuchsanordnung mit HF-Generator, geöffneter Matchbox und Oszillograf	15
Foto 4.2	Geöffnete modifizierte Matchbox	17
Foto 4.3	Leerer Arbeitskondensator mit eingelegter Küvette	19
Foto 5.1	Weizenbehandlung im Arbeitskondensator	25
Foto 5.2	In Luft abgetötete Kornkäfer-Imagines	29
Foto 5.3	Kornkäfer in der mit Weizen gefüllten Küvette	31

Tabellen

Tab. 5.1	Auswirkungen der HF-Behandlung auf Weizenproben und Kornkäfer (Imagines)	32
Tab. 5.2	Experimente mit Kornkäfer-Brutstadien	35
Tab. 5.3	Vergleich der gemessenen Überlebensraten verschiedener Entwicklungsstadien von Kornkäfern in Weizen mit 15% Wassergehalt in Abhängigkeit von der Behandlungsfeldstärke	37
Tab. 6.1	Zu erwartende Leistungsparameter kommerzieller Hochfrequenz-Behandlungsanlagen zur Weizenentwesung	41

Abkürzungen

BBA	Biologische Bundesanstalt
HF-	Hochfrequenz- (in Zusammensetzungen)
ISM-Frequenz	für industrielle, wissenschaftliche und medizinische Zwecke freigegebene Frequenz
RDK	relative Dielektrizitätskonstante (dielektrische Materialkonstante)

0. Zusammenfassung

Die Nutzung der dielektrischen HF-Erwärmung zur Entwesung von Getreide käme ohne den Einsatz von gesundheitsschädigenden Wirkstoffen aus und könnte bei befriedigenden Behandlungsergebnissen zukünftig eine Alternative zu chemischen Verfahren darstellen.

Zur Durchführung von orientierenden Behandlungsversuchen wurde das Anpassgerät eines kommerziellen HF-Generators so umgebaut, dass in einem darin untergebrachten Arbeitskondensator mit etwa 50 cm³ Behandlungsvolumen bei einer HF-Leistung von 1 kW und einer Arbeitsfrequenz von 13,56 MHz reproduzierbare elektrische Feldstärken von einigen hundert kV/m (Effektivwert) erzeugt werden konnten.

In einer Reihe von Versuchen wurde die Wirkung verschiedener Feldstärken auf Weizen und darin befindliche Kornkäfer (*Sitophilus granarius* L.) untersucht. Es wurde gefunden, dass innerhalb einer vorgegebenen Behandlungszeit von 8 s Kornkäfer-Imagines bei elektrischen Feldstärken von 200 kV/m in Luft oder in trockenem Weizen mit großer Wahrscheinlichkeit absterben, bei feuchtem Weizen genügten dazu bereits 150 kV/m. Bei geringeren Feldstärken überlebten fast alle Käfer, wiesen aber an ihren Extremitäten Verkrüppelungen auf, die ihre Bewegungsfähigkeit deutlich beeinträchtigten.

Die abtötende Wirkung der HF-Behandlung auf die Brutstadien des Kornkäfers war deutlich geringer. Bei einer Feldstärke von 150 kV/m und einer Einwirkungszeit von 8 s lag die Überlebensrate der Eier bei praktisch 100 %, die der jungen Larven bei etwa 60 % und die der späten Larven und Puppen bei etwa 30 %. Geringere Behandlungsfeldstärken erwiesen sich in Bezug auf die spätere Schlupfrate der Brut als faktisch unwirksam.

Es wurde beobachtet, dass bei Weizenwassergehalten ab 15 % in Abhängigkeit von der Beschaffenheit der Körner (Weizensorte) bei Feldstärken ab 150 kV/m häufig nach etwa 4 s Expositionszeit Hochspannungsüberschläge zwischen den Getreidekörnern auftraten, die zu Verkohlungen und Verklumpungen im Behandlungsgut führten. Die so entstandenen Strombahnen bewirkten dann einen Zusammenbruch der eingestellten Feldstärke. Es wird vermutet, dass dieser unerwünschte Effekt mit der Kondensation von ausgetretenem Wasserdampf auf der Oberfläche der Körner zu tun hat. Wegen der Hochspannungsüberschläge konnten bei den jüngeren Kornkäfer-Brutstadien höhere Feldstärken nicht eingesetzt werden.

Die innerhalb der Behandlungszeit von 8 s unerwünscht, aber zwangsläufig auftretende Miterwärmung des Weizens, die den Energiebedarf des Verfahrens maßgeblich bestimmt, hing sehr stark von dessen Trocknungszustand ab. Bei den oben genannten jeweils zum Abtöten der Imagines notwendigen Feldstärken betrug die gemessene Temperaturerhöhung bei 13 % Weizenwassergehalt etwa 18 Grad und bei 19 % Wassergehalt bis zu 40 Grad.

Aus den experimentell ermittelten Daten wurden Schlüsse auf eine eventuell zu entwickelnde kommerzielle Anlage zur Entwesung von Getreide mit Hochfrequenz gezogen. Dabei wurde als Grundlage ein Körnerwassergehalt von 15 %, der höchste bei der Getreideeinlagerung zulässige und aus Gründen der Energieökonomie zugleich von den Anlieferern angestrebte Wert, angenommen. Bei Verwendung eines Generators mit 200 kW HF-Leistung, bei dem mit einer Stromnetz-Belastung von 400 kW gerechnet werden muss, ergäbe sich damit eine Behandlungsleistung von etwa 12 to Weizen je Stunde.

1. Einleitung

Die Schädlingsbekämpfung im Vorratsschutz erfolgt gegenwärtig größtenteils mit chemischen Mitteln. Die Insektizide haben den Vorteil, dass sie preiswert und wirkungsvoll sind. Ihre Anwendung ist jedoch nicht gefahrlos.

Durch verbesserte Analysemethoden werden zunehmend für die menschliche Gesundheit bedenkliche Rückstände im behandelten Lagergut gefunden. Unsicherheiten über deren Langzeitwirkung und Synergismen mit anderen in geringen Dosen aufgenommenen Chemikalien lassen die Toleranz gegenüber solchen Rückständen ständig sinken.

Das häufig verwendete Methylbromid (Halogenkohlenwasserstoff) gehört außerdem zu den 'Ozonkillern', seine Anwendung ist somit nur noch bis zum Jahr 2010 erlaubt.

In der Beobachtung einer zunehmenden Resistenzbildungen bei den Insekten zeigt sich ein weiterer Nachteil der chemischen Verfahren.

Daraus resultiert eine intensive Suche nach Alternativen zur chemischen Behandlung. Dabei gewinnen die physikalischen Verfahren an Bedeutung.

Die älteste bekannte Methode zur Bekämpfung von Lebensmittelschädlingen ist die Abtötung mittels hoher Temperatur. Die Anwendung hochfrequenter elektromagnetischer Felder (dielektrische Erwärmung) bietet die Möglichkeit, relativ trocknes, homogenes Lagergut rasch und gleichmäßig aufzuheizen. Da Insekten in allen Stadien einen höheren Wassergehalt besitzen als das sie umgebende Vorratsmedium werden sie sich nach den für die dielektrische Erwärmung geltenden Gesetzen stärker erhitzen. Es ist zu erwarten, dass die Abtötung der Lagerschädlinge eintritt, bevor die Vorräte durch Erhitzen merkliche Qualitätsverluste erfahren. Damit wäre auch eine Vernichtung der Insekteneier und -Puppen bei einer einmaligen Behandlung zu erwarten, was bei den derzeit häufig verwendeten Begasungsverfahren nicht immer gesichert ist.

2. Verfahrensbeschreibung des Entwicklungsvorhabens

2.1. Die physikalischen Grundlagen des Verfahrens und seine Wirkprinzipien

2.1.1. Die dielektrische Erwärmung

Bringt man elektrisch wenig leitfähige Materie (unvollkommene Dielektrika) in ein elektrisches Wechselfeld, so nimmt sie aus dem Feld Energie auf und erwärmt sich dadurch.

Dies hat seine Ursache einerseits in Energieumwandlungen, die beim ständigen Wechsel der Ausrichtung der von den Molekülen gebildeten Dipolmomente entstehen, andererseits in Stromflüssen zwischen Bereichen unterschiedlichen Potentials im Feldbereich. In jedem Falle entsteht die Wärme im Dielektrikum selbst unabhängig von dessen thermischen Eigenschaften. Typische unvollkommene Dielektrika sind Holz, Erdboden und Ziegelstein. Auch Vorratsgüter wie Getreide und Lebewesen wie Insekten können zu dieser Stoffgruppe gerechnet werden.

Die Energieaufnahme ist besonders ausgeprägt bei polaren Stoffen, deren Moleküle so beschaffen sind, dass sie auch ohne die Anwesenheit eines äußeren elektrischen Feldes ein Dipolmoment aufweisen. Ein typischer Vertreter polarer Stoffe ist Wasser, das in unterschiedlichen Maße ein Bestandteil der genannten unvollkommenen Dielektrika ist.

Wasser ist auch ein Elektrolyt, bei Anwesenheit von freien Ionen ermöglicht es einen Ladungstransport und damit einen Stromfluss, der seinerseits zur Energieaufnahme im Wechselfeld beiträgt.

Maßgebend für die nach außen erscheinende Wirkung eines Dielektrikums ist seine Permittivitätszahl ϵ , die bei polaren Stoffen besonders groß ist.

Um bei unvollkommenen Dielektrika deren Energieaufnahme zu berücksichtigen ist es üblich, eine komplexe Permittivitätszahl $\epsilon^{\prime} = \epsilon' - j\epsilon''$ anzusetzen.

2.1.1.1. Leistungsumsatz in homogenen Materialien

In einem homogenen unvollkommenen Dielektrikum gelten für ein infinitesimales Volumenstück dV , das sich in einem elektrischen Feld der Stärke E und der Wechselkreisfrequenz ω befindet, mit dem Ansatz der komplexen Permittivität ϵ^{\prime} unabhängig vom Wirkmechanismus des Energieeintrages die folgenden grundsätzlichen Beziehungen:

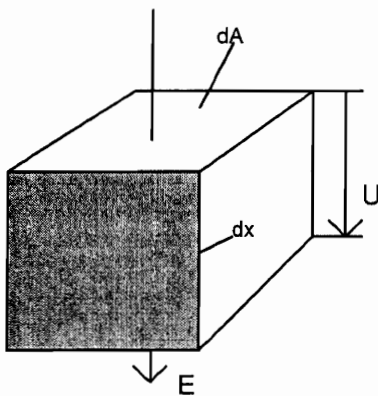


Bild 2.1 Volumenstück

Die komplexe Kapazität C sowie die Spannung U zwischen der oberen und unteren Äquipotenzialfläche errechnen sich zu

$$C^{\prime} = \epsilon^{\prime} \cdot \frac{dA}{dx} \quad U = E \cdot dx.$$

Der komplexer Leitwert zwischen den Äquipotenzialflächen beträgt

$$Y^{\prime} = j \cdot \omega \cdot C^{\prime} = j \cdot \omega \cdot \epsilon^{\prime} \cdot \frac{dA}{dx} + \omega \cdot \epsilon'' \cdot \frac{dA}{dx}.$$

Damit ergibt sich der Wirkleistungsumsatz im Volumenstück $dV = dA \cdot dx$ zu

$$dP = U^2 \cdot \text{Realteil}(Y^{\prime}) = \omega \cdot \epsilon'' \cdot E^2 \cdot dV.$$

Der Imaginärteil der komplexen Permittivität eines Materials, der dielektrische Verlustfaktor ϵ'' , ist demnach maßgebend für den Wirkleistungsumsatz. Bei Stoffen, die aus verschiedenen Komponenten bestehen, hängt sein Wert beträchtlich vom Wasseranteil ab. Im allgemeinen ist bei solchen Materialien bedingt durch die unterschiedlichen dielektrischen Eigenschaften der Komponenten und die verschiedenen Wirkmechanismen des Energieeintrages der dielektrische Verlustfaktor eine nichtlineare Funktion der Wechselfeldfrequenz.

Häufig wird an seiner Stelle der Verlustwinkel δ , der die Abweichung des Phasenwinkels der Impedanz eines mit dem unvollkommenen Dielektrikum gefüllten Kondensators von den idealen -90° , die bei verlustfreien Dielektrika (näherungsweise bei Luft) auftreten würden, benutzt. Zwischen beiden Kennwerten besteht die Beziehung

$$\epsilon'' = \epsilon' \cdot \tan(\delta) \approx \epsilon \cdot \tan(\delta).$$

Darin ist im rechten Teil der Realteil der komplexen Permittivität ϵ' näherungsweise durch deren absoluten Betrag ϵ (Dielektrizitätskonstante) ersetzt worden, was bei relativ geringen Verlusten zulässig ist.

Aus der Gleichung für den Wirkleistungsumsatz ist ersichtlich, dass bei gleicher Feldstärke E und Wechselfeld-Kreisfrequenz ω die Leistungsaufnahme eines Materials seinem dielektrischen Verlustfaktor $\epsilon'' \approx \epsilon \cdot \tan(\delta)$ proportional ist. Da bekannt ist, dass insbesondere wasserhaltige Materialien bedeutend größere dielektrische Verlustfaktoren aufweisen als trockene, ist dies der Ausgangspunkt für das Vorhaben, Schadinsekten in Lebensmittelvorräten durch elektrische Wechselfelder zu bekämpfen. Geht man davon aus,

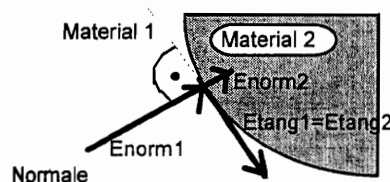
dass diese Lebewesen einen höheren Wasseranteil besitzen als das zur Einspeicherung notwendigerweise relativ trockene Getreide müsste in ihnen auch ein wesentlich größerer Leistungsumsatz stattfinden, der zu ihrer schnellen Aufheizung und dadurch letztlich zu ihrem Tode führt.

2.1.1.2. Verhältnisse in inhomogenen Materialien

Vorratsgüter mit darin befindlichen Schadinsekten sind Gemenge von Körpern unterschiedlicher Form wie Getreidekörner, Käfer, Puppen, Larven, Insekteneier und Lufteinschlüsse. Alle bestehen aus sehr unterschiedlichen Materialien mit unterschiedlichen dielektrischen Eigenschaften. Insbesondere die Insekten sind außerdem auch in sich selbst nicht homogen und haben relativ komplizierte Körperformen.

Ein homogenes elektrisches Feld, wie es sich näherungsweise in einem mit Luft gefüllten Plattenkondensator ausbildet, ist dadurch gekennzeichnet, dass der Vektor der elektrischen Feldstärke, der deren Betrag und Richtung angibt, in diesem Feld ortsunabhängig ist.

Wenn man in ein solches Feld Körper aus Materialien mit unterschiedlichen dielektrischen Eigenschaften bringt gilt grundsätzlich an deren Grenzflächen für die jeweiligen Normalkomponenten E_{norm} und die Tangentialkomponenten E_{tang} der elektrischen Feldstärke die folgende Grenzbedingung :



$$E_{\text{tang1}} = E_{\text{tang2}}$$

$$\frac{E_{\text{norm1}}}{E_{\text{norm2}}} = \frac{\epsilon_2}{\epsilon_1}$$

Bild 2.2 Feldkomponenten

Das Feld stellt sich insgesamt so ein, dass es den grundlegenden Differenzialgleichungen der Elektrotechnik genügt und die obigen Randbedingungen erfüllt. Dazu ist es notwendig, dass der Feldstärkevektor in allen Materialbereichen sowohl seine Größe als auch seine Richtung in Bezug auf das homogene Feld ändert. Diese Feldverzerrung bewirkt im Medium mit der kleineren Permittivität eine Vergrößerung, im Medium mit der größeren Permittivität dagegen eine Verkleinerung der elektrischen Feldstärke.

Da sich die Feldstärke-Komponenten auf die Normale der jeweiligen Grenzfläche beziehen ist verständlich, dass die Feldverteilung nicht nur von den jeweiligen dielektrischen Materialeigenschaften, sondern auch wesentlich von der Form der Materialkörper abhängt.

Überträgt man diese Tatsachen auf das Problem der Insekten im Getreide, so ist erkennbar, dass es für das zu entwickelnde Verfahren ungünstig wäre, wenn die Insekten eine deutlich größere Permittivitätszahl als das sie umgebende Getreide hätten, da dies zu einem Abfall der Feldstärke in ihnen und damit ihrer Leistungsaufnahme (im quadratischen Verhältnis zum Feldstärkeabfall) führen würde. Wegen der Stetigkeit der Tangentialkomponenten ist zu erwarten, dass in Insekten-Extremitäten (Beine, Antennen), die längst der Feldrichtung gedreht sind, besonders hohe Feldstärken auftreten, nicht jedoch, wenn sie quer zur Feldrichtung stehen.

Genauere quantitative Aussagen über die zu erwartenden Energieeinträge bei konkret vorgegebenen Inhomogenitäten lassen sich wegen der gegenseitigen Abhängigkeiten praktisch nur durch Ermittlung des gesamten Feldbildes etwa durch ein Computerprogramm machen. Ein Orientierungswert für die zu erwartende Feldstärkeänderung kann aus einem konstruierten

Sonderfall erhalten werden. So ergibt sich für ein homogenes, kugelförmiges Insekt, das sich in einer unendlich ausgedehnten Umgebung aus homogenem (also ungekörntem) Weizen befindet, unter Ansatz der Messwerte für die relativen Dielektrizitätskonstanten $\varepsilon_{r\text{Weizen}} = 3,3$ und $\varepsilon_{r\text{Insekt}} = 4,5$ nach der für diesen Fall geltenden Beziehung

$$E_{\text{Insekt}} = E_{\text{Weizen}} \cdot \left(1 - \frac{\varepsilon_{r\text{Insekt}} - \varepsilon_{r\text{Weizen}}}{2 \cdot \varepsilon_{r\text{Weizen}} + \varepsilon_{r\text{Insekt}}}\right)$$

ein Abfall der mittleren Insekt-Feldstärke auf 89 % der Weizenfeldstärke, was bei angenommenem gleichem Verlustfaktor von Insekt und Weizen einem Abfall des Leistungseintrages in das Insekt auf 80 % des Leistungseintrages in den Weizen bewirken würde.

2.1.1.3. Dielektrische Materialparameter von Vorratsgütern und Schädlingen

Der für den Leistungseintrag bei gegebener Feldstärke maßgebende dielektrische Materialparameter ist die komplexe Permittivitätszahl $\varepsilon^{\prime} = \varepsilon' - j\varepsilon''$, nachfolgend ausgedrückt durch die relative Dielektrizitätskonstante (RDK) $\varepsilon_r = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} \approx \frac{\varepsilon'}{\varepsilon_0}$ und den Verlustfaktor

$\tan \delta = \frac{\varepsilon''}{\varepsilon'}$. Die Größe $\varepsilon_0 = 8,854 \frac{\text{pF}}{\text{m}}$ ist dabei die absolute elektrische Feldkonstante.

Die Kenntnis dieser Parameter als Funktion der Frequenz gestattet Rückschlüsse auf die Einsetzbarkeit des Verfahrens bei gegebenen Vorratsmaterialien und Schädlingen und macht Optimierungen etwa hinsichtlich der Arbeitsfrequenz möglich.

Die Parameter sind grundsätzlich durch Messung der komplexen Impedanz eines geeichten Kondensators, der mit dem Probematerial gefüllt ist, bestimmbar. Die Bilder 2.3 und 2.4 zeigen die Ergebnisse einiger Messungen, die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführt wurden. Neben einigen typischen Vorratsgütern wurden als typische Schädlinge entsprechend der Empfehlung des Instituts für Vorratsschutz der BBA zunächst lebendige adulte Kornkäfer (*Sitophilus granarius* L.) untersucht. Sie wurden zu diesem Zweck im Zustand der Kältestarre dicht gedrängt in den Messkondensator verbracht, wobei aber Lufteinschlüsse unvermeidlich waren. Lufteinschlüsse beeinflussen infolge der durch sie im Messkondensator verursachten Feldverzerrungen die gemessenen dielektrischen Parameter, was auch ein Vergleich der an Weizenmehl unterschiedlichen Stopfungsgrades ('lose' und 'fest' in den Bildern 2.3 und 2.4) bestimmten Parameter zeigt. Die für Kornkäfer gemessenen Werte sind also streng genommen die Werte eines Kornkäfer-Luftgemisches, wie auch ausgleichend die für Weizen gemessenen Werte die eines Weizenkörner-Luft-Gemisches sind.

Es zeigt sich, dass die RDK (Bild 2.3) der Vorratsgüter praktisch im gesamten erfassten Frequenzbereich von 0,5 MHz bis 30 MHz konstant bei Werten zwischen 3 und 5 liegt. Die Kornkäfer-RDK ist dagegen für Frequenzen unterhalb 10 MHz deutlich größer, oberhalb 10 MHz nähert sie sich den Werten der Vorratsgüter an, bleibt aber mit $\varepsilon_{r\text{Insekt}} = 4,5$ etwas größer als die RDK des bevorzugten Aufenthaltsmediums der Insekten $\varepsilon_{r\text{Weizen}} = 3,3$.

Die Verlustfaktoren (Bild 2.4) der Insekten liegen wie erwartet im gesamten Frequenzbereich deutlich über denen der Vorratsgüter, nähern sich aber im Bereich unter 5 MHz diesen wieder an. Für Frequenzen oberhalb 10 MHz hat der Verlustfaktor der Kornkäfer etwa den fünffachen Wert des Weizen-Verlustfaktors.

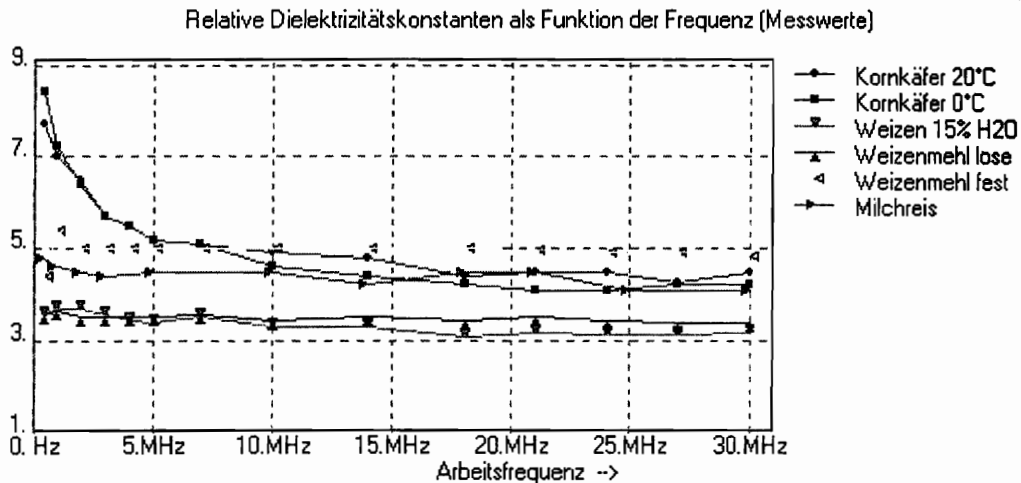


Bild 2.3 Relative Dielektrizitätskonstante (RDK) von Kornkäfern und Vorratsgütern als Funktion der Frequenz

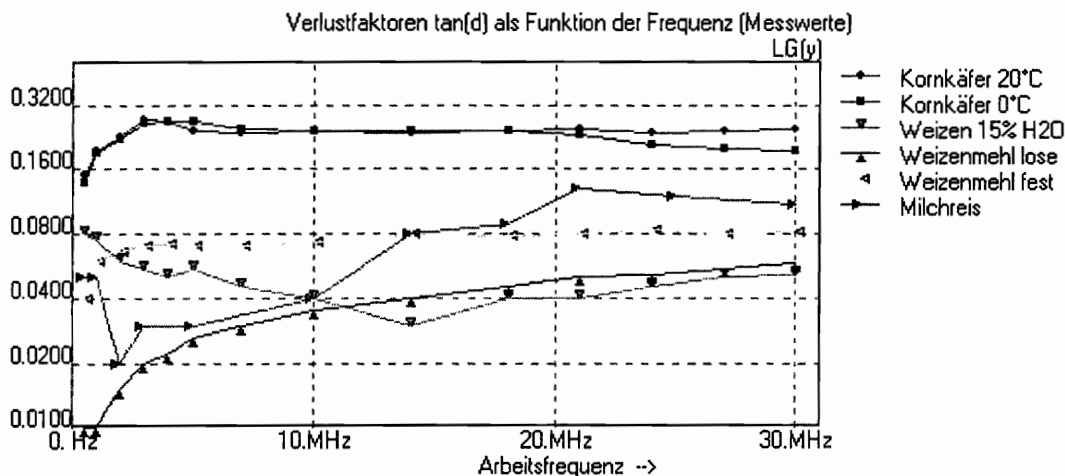


Bild 2.4 Verlustfaktor $\tan(\delta)$ von Kornkäfern und Vorratsgütern (logarithmischer Maßstab) als Funktion der Frequenz

Ein gegenüber den Vorratsgütern größerer Energieeintrag in die Schadinsekten ist zu erwarten, wenn deren RDK möglichst wenig und ihr Verlustfaktor möglichst weit über dem korrespondierenden Wert der Vorratsgüter liegt. Damit lässt sich aus den Messkurven Bild 2.3 und Bild 2.4 ablesen, dass für das angestrebte Verfahren Arbeitsfrequenzen unter 10 MHz relativ ungünstig sind, oberhalb von 10 MHz aber durchaus Erfolgsaussichten bestehen.

Um den Einfluss des Wassergehaltes der Vorratsgüter auf ihre dielektrischen Eigenschaften zu untersuchen wurden entsprechende Messungen an Weizen vorgenommen. Dazu wurden relativ trockene Körner befeuchtet, über 24 Stunden abgelagert und anschließend die dielektrischen Daten sowie der Feuchtegehalt in Gewicht-% bestimmt.

Aus den Messkurven (Bilder 2.5 und 2.6) ist ersichtlich, dass sich bei Zunahme des Wassergehaltes wie zu erwarten sowohl die RDK als auch der Verlustfaktor erhöhen, wobei diese Erhöhung im Frequenzbereich unter 10 MHz besonders stark ausfällt. In Hinblick auf die dielektrischen Parameter werden sich feuchter Weizen und Insekten ähnlicher. Zur effektiven Durchführung des HF-Verfahrens ist deshalb die Begrenzung des Weizenwassergehaltes mindestens auf unter 19 % erforderlich.

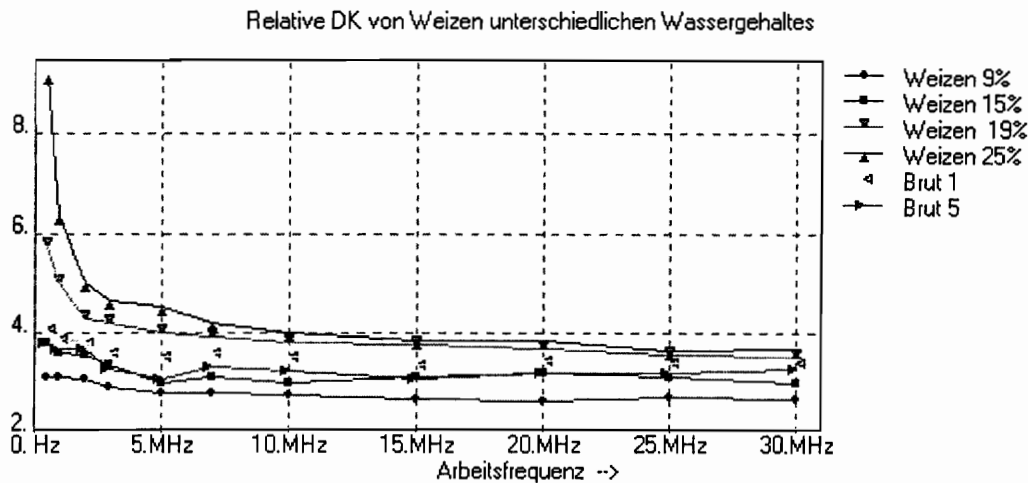


Bild 2.5 Dielektrizitätskonstante von Weizen als Funktion der Frequenz, Parameter Wassergehalt

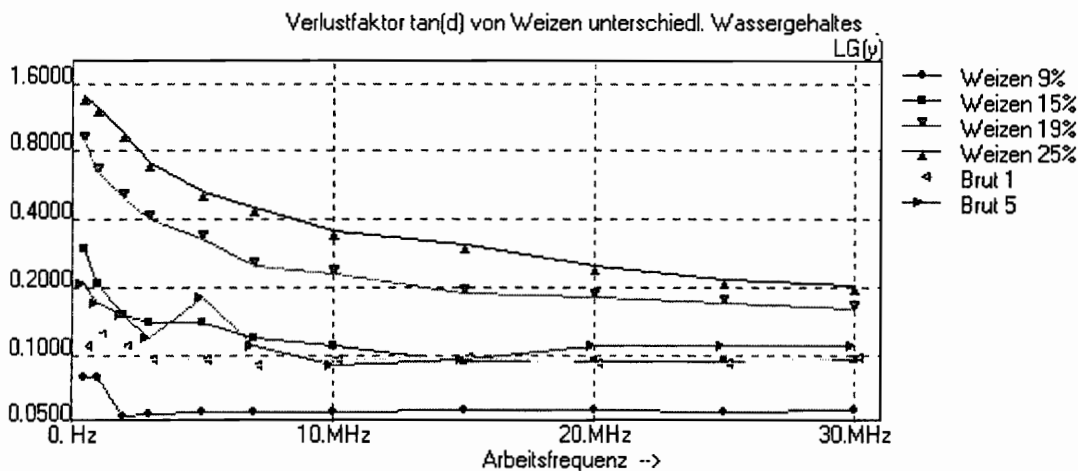


Bild 2.6 Verlustfaktor $\tan(\delta)$ von Weizen (logarithmischer Maßstab) als Funktion der Frequenz, Parameter Wassergehalt.

Die Bilder 2.5 und 2.6 enthalten außerdem die korrespondierenden Messkurven von Weizenproben, die mit Brutstadien des Kornkäfers infiziert waren (Brut 1 und Brut 5, siehe Abschnitt 5.2.2.2) und vor der Infektion einen Wassergehalt von 15 % aufwiesen. Diese Kurven zeigen keine signifikanten Abweichungen gegenüber den entsprechenden Messkurven für nicht infiziertem Weizen mit 15 % Wassergehalt.

2.1.2. Thermische Gesichtspunkte

Neben dem Leistungseintrag im elektrischen Wechselfeld sind für die Aufheizung der Materialien bei der dielektrischen Erwärmung auch thermische Gesetze und Materialkonstanten maßgebend.

Ein wichtiger Materialparameter von Vorratsgütern und Schadinsekten ist der Proportionalitätsfaktor zwischen Leistungsumsatz und Temperaturerhöhung, die spezifische Wärmekapazität c . Sie gibt die Energie an, die benötigt wird, um die Temperatur eines Körpers aus einem Gramm des entsprechenden Materials um ein Grad Kelvin zu erhöhen.

Für Weizen mit einem Wassergehalt von 15 % beträgt ihr Wert $c_{\text{Weizen}} = 2,0 \frac{W_s}{g \cdot \text{grad}}$, für die

Schädlinge sind die entsprechenden Werte unbekannt. Wegen ihres größeren Wassergehaltes

muss damit gerechnet werden, dass der Betrag ihrer Wärmekapazität irgendwo zwischen dem Wert für Weizen und dem deutlich größeren für Wasser ($c_{\text{Wasser}} = 4,19 \frac{\text{Ws}}{\text{g} \cdot \text{grad}}$) liegt, was

bedeutet, dass sie sich bei gleichem Leistungseintrag langsamer erwärmen.

Bei der infolge ihrer deutlich größeren Energieaufnahme zu erwarteten stärkeren Aufheizung der Insekten wird auch ein Temperatenausgleich zwischen diesen Schädlingen und dem sie umgebenden Vorratssmedium entsprechend der Wärmeleitungsgleichung (Diffusionsgleichung) auftreten, der den Temperaturanstieg in den Tieren begrenzt. Dieser für das Verfahren unerwünschte Effekt hängt von der Wärmeleitfähigkeit des die Insekten umgebenden Mediums (Vorratsgut, Luft), von der Größe der Insekten (speziell vom Verhältnis ihres Volumens zu ihrer Oberfläche) sowie von der Zeit ab, die bis zum Erreichen ihrer Letal-Temperatur benötigt wird. Die Wärmeabgabe durch die Insekten kann gering gehalten werden, wenn die Verfahrensparameter so ausgewählt sind, dass diese Zeit möglichst kurz wird. Daher sollte eine möglichst große Leistungsaufnahme der Insekten angestrebt werden, was bei gegebenen dielektrischen Materialparametern nur durch eine möglichst große elektrische Feldstärke erreichbar ist.

3. Literaturschau

3.1. Übersicht

Die Tatsache, dass Insekten in Lagergetreide durch die Einwirkung hochfrequenter elektrischer Felder infolge dielektrische Erwärmung innerhalb kurzer Zeit abgetötet werden können, ist seit langem bekannt. Es lag nahe, diesen Effekt zur Sterilisation des Getreides zu nutzen.

In der Fachliteratur wurden dazu eine Anzahl Berichte mit zum Teil ausführlich dargestellten Untersuchungsergebnissen gefunden.

Vom verwendeten Frequenzbereich des Wechselfeldes her lassen sich dabei grundsätzlich Kurzwellen- (Frequenzbereich 1 MHz...30 MHz) und Mikrowellen- Anwendungen (Frequenzen über 1 GHz) unterscheiden. Beide Anwendungen beruhen auf dem gleichen Wirkprinzip, erfordern jedoch eine deutlich verschiedene Gerätetechnik und die Lösung unterschiedlicher technischer Probleme.

In älteren Veröffentlichungen [1], [2], [3] werden Untersuchungen beschrieben, die den Einfluss von Wechselfeldern zwischen 50 kV/m und 200 kV/m im Kurzwellenbereich (hier 10 MHz...40 MHz) auf sich in Vorratsgütern (Weizen und Kleie) befindliche Reis- Korn- und Mehlkäfer zum Gegenstand haben. In längeren Versuchsreihen wurden solche Insekten zusammen mit Getreidekörnern in kleinen geschlossenen Gefäßen unterschiedlich lange Wechselfeldern verschiedener Stärke ausgesetzt und anschließend die Körnertemperatur sowie die Tötungsrate (durch Auszählen nach einer Stunde und wegen des Nachsterbens geschädigter Insekten nochmals eine Woche nach der HF-Behandlung) bestimmt. Da es wegen der zwangsläufig auftretenden elektromagnetischen Verkopplungen nicht möglich war, die Körnertemperatur mit trägheitsarmen (elektrischen) Sensoren während des Anliegens des elektrischen Feldes zu messen, musste die Endtemperatur aus der nach Abschalten des Feldes aufgenommenen Abkühlungskurve der Körnerprobe extrapoliert werden.

Es wurde beispielsweise festgestellt, dass zum Erreichen einer Tötungsrate von 90 % bei Kornkäfern (eine Stunde nach der HF-Behandlung) eine Erwärmung der Weizenkörner auf etwa 52 °C erforderlich ist. Für die gleiche Tötungsrate, aber bezogen auf eine Zählung eine Woche nach der HF-Behandlung, wäre jedoch eine deutlich geringere Körnererwärmung (auf

ca. 45 °C) notwendig gewesen. Durch Keimversuche wurde belegt, dass derartige Temperaturen keine merkliche Schädigung der Qualität des Weizens bewirken.

Auf unterschiedliche Wirkung der HF-Behandlung bei den verschiedenen Entwicklungsstadien bestimmter Insektenarten wird ebenso hingewiesen wie auf die Gefahr des Auftretens von Spannungsüberschlägen im behandelten Weizen (ab Feldstärken von etwa 190 kV/m), wie sie auch bei den eigenen Untersuchungen beobachtet wurden.

Ein großtechnischer Einsatz des Verfahrens wird in den Arbeiten für möglich gehalten, die ökonomische Betrachtung kommt jedoch auf geschätzte Behandlungskosten von etwa \$1,35 je Tonne behandeltem Weizen, was gegenüber den gängigen Begasungsverfahren als zu teuer angesehen wird.

Ähnliche Experimente mit vergleichbaren Ergebnissen sind in [4] beschrieben, dort wurde wie bei den eigenen Versuchen eine Wechselfeldfrequenz von 13,56 MHz verwendet. Neben Laborversuchen mit kleinen Getreideproben wurde in etwas größerem Maßstab (unter Einsatz von mehreren kW HF-Leistung) mit adulten Reiskäfern verseuchter Weizen behandelt. Betrug die Weizentemperatur am Ende der HF-Behandlung 59 °C..62 °C so wurden bei Probenahmen, die mehr als eine Woche danach erfolgten, keine lebenden Käfer mehr gefunden, bei Endtemperaturen von 54 °C..57 °C waren etwa 90 % der Käfer abgetötet.

Weitere Hinweise über den Einsatz von auf der dielektrischen Erwärmung basierenden Sterilisationsanlagen mit Wechselfeldfrequenzen im Kurzwellenbereich zur Behandlung von Getreide finden sich in [5], zur Behandlung von Gewürzen in [6].

Eine Reihe von Artikeln behandeln den Einsatz von Frequenzen im Bereich > 1GHz (Mikrowellen) zur Schädlingsbekämpfung. In neueren Untersuchungen [7], [8] ist man bestrebt, besonders geeignete Frequenzen in diesem Bereich zu finden, wobei die Untersuchungsmethoden den oben beschriebenen bezüglich der Probengröße und der Bestimmung der Insekten-Mortalität ähneln.

In [7] wird auf einige technische Probleme der Mikrowellenanwendungen (Eindringtiefe, Energiestreuung) eingegangen.

In [8], [13] wird gefunden, dass bei Verwendung von Frequenzen im EHF-Band (extremely high frequency, Millimeterwellen) gegenüber den üblicherweise benutzten Mikrowellenfrequenzen von einigen GHz zur Erzielung gleicher Tötungsraten eine geringere Aufheizung des Getreides notwendig ist. Dies Ergebnis wird mit dem gegenüber den Getreidekörnern höheren Anteil an ungebundenem Wasser in den Insekten erklärt. Die Relaxationsfrequenz des freien Wassers liegt in etwa (temperaturabhängig) in diesem Frequenzbereich, die von gebundenem Wasser in breiter Streuung zwischen 10 MHz und 100 MHz.

Verwendet wurden Frequenzen von 28 GHz [13] und 55 GHz [8], die zur Erzielung einer Tötungsrate von 90 % bei Sitophilus Zeamais notwendige Erwärmung des die Käfer beherbergenden Weizens betrug dabei noch etwa 55 °C gegenüber 63 °C bei 12 GHz. Kürzlich entwickelte leistungsfähige Gyrotron-Oszillatoren mit über 200 kW Ausgangsleistung [13] lassen an eine praktische Anwendung dieser Erkenntnisse denken. Für einen wirtschaftlichen Einsatz sind jedoch noch einige technische Probleme besonders im Zusammenhang mit der geringen Eindringtiefe der Mikrowellen in diesem Frequenzbereich zu lösen.

Eine andere Versuchsanlage, die mit einem Magnetron eine HF-Leistung von etwa 2 kW erzeugte und bei einer Frequenz von 2,375 GHz arbeitete, ist in [9] beschrieben. Dabei wurden für Kornkäfer 100%ige Tötungsraten erreicht, wenn die Anlage so eingerichtet war, dass am Ende der Behandlung Weizentemperaturen von 51 °C gemessen wurden.

Weitere Hinweise auf Getreide-Sterilisationsversuche mit Mikrowellenanlagen finden sich in [10].

In der Arbeit [11] werden Versuche dargestellt, durch Anlegen von Wechselspannungen sehr niedriger Frequenz (1 kHz und 50 kHz) an Lagergetreide ebenfalls eine Abtötung darin enthaltener Mehlkäfer zu erreichen. Die dadurch bei den Insekten erzielten Mortalitäten lagen günstigstenfalls bei 22 %. Das Wirkprinzip beruhte dabei nicht auf der dielektrischen Erwärmung sondern auf der direkten Stromeinwirkung.

3.2. Auswertung

Aus der angegebenen Literatur ist ersichtlich, dass etwa seit 1960 mehrfach von verschiedenen Institutionen Versuche unternommen wurden, das Prinzip der dielektrischen Erwärmung zur Sterilisation von Getreide zu nutzen. Bezüglich der Wechselfeld-Frequenzen wurde praktisch das gesamte derzeit apparativ nutzbare Spektrum (1 kHz bis 55 GHz) eingesetzt. Meist handelte es sich dabei um Laboruntersuchungen an kleinen Proben mit Insekten verseuchten Getreides, in einigen Fällen wurden zeitweise kleinere Versuchsanlagen betrieben. Ein kommerzieller Einsatz derartiger Anlagen ist lediglich zur Pasteurisierung (Abtötung von ca. 80 % aller Mikroorganismen) von Gewürzen bekannt.

Als entscheidendes Problem stellte sich die Tatsache heraus, dass durch die zum Abtöten der Insekten notwendige Wechselfeldstärke ungewollt, aber zwangsläufig und weitgehend unabhängig vom verwendeten Wechselfeld-Frequenzbereich eine Erwärmung des die Schädlinge beherbergenden Getreides eintritt. Bei der Sterilisation größerer Getreidemengen wird die zu deren ungewollter Aufheizung benötigte Energie der entscheidende Kostenfaktor für das Hochfrequenz-Verfahren, obwohl die zum Abtöten der Schädlinge selbst benötigte physikalische Arbeit wegen der vergleichsweise geringen Biomasse der Insekten vernachlässigbar ist.

Alle bekannten Untersuchungsergebnisse besagen, dass diese Aufheizung bei ausreichenden Tötungsraten hinsichtlich der jeweils untersuchten Insekten so gering gehalten werden kann, dass keine nennenswerte Beeinträchtigung der Getreidequalität (Kriterium Keimfähigkeit) eintritt, obwohl die angegebenen Behandlungs- Endtemperaturen zum Teil beträchtlich differieren.

Für Anwendungen im Frequenzbereich von einigen GHz (Mikrowellen) stehen seit einiger Zeit preisgünstige und leistungsstarke HF-Generatoren (Magnetronen) zur Verfügung, was sicherlich auch zu Untersuchungen zum Einsatz solcher Geräte zur Getreidesterilisation motiviert hat. Wegen der relativ geringen Eindringtiefe der Mikrowellenenergie sind hier aber spezielle Anlagenkonstruktionen, die etwa eine flächenhafte Ausbreitung des zu behandelnden Getreides bewirken, erforderlich.

Grundsätzlich bestätigen alle angeführten Veröffentlichungen die Durchführbarkeit des Verfahrens, lassen aber beträchtliche Kostennachteile bei einem eventuellen kommerziellen Einsatz erwarten. Unter zukünftig veränderten ökonomischen Bedingungen könnte dieser Nachteil jedoch an Bedeutung verlieren. In Abwägung der verschiedenartigen technischen Probleme und der beschriebenen Wirksamkeit des Verfahrens erscheint der Wechselfeld-Frequenzbereich zwischen 10 MHz und 50 MHz für zukünftige Anlagen gut geeignet.

4. Der Aufbau der Versuchsanlage

4.1. Aufgaben und Anforderungen

Aufgabe der Versuchseinrichtung ist es, das zur schnellen Abtötung von Schädlingen in verschiedenen Medien erforderliche elektrische Wechselfeld zu erzeugen. Da aus den

Versuchsergebnissen Erkenntnisse für die Konstruktion einer Behandlungsanlage in größerem Maßstab gewonnen werden sollen ist es notwendig, die Feldstärke der Versuchsanlage in weiten Grenzen variieren und messen zu können, wobei Effektivwerte bis zu einigen hundert kV/m erreicht werden müssen.

Die versuchsweise zu behandelnden Insekten müssen mit ihrem Umgebungsmedium in ein Behältnis eingeschlossen werden, um ihre Flucht bei beginnender Erwärmung zu verhindern. Das Behältnismaterial darf zur Vermeidung von Abschirmeffekten praktisch keine elektrische Leitfähigkeit besitzen und sich selbst im HF-Feld nicht nennenswert dielektrisch erwärmen. Die durch das Behältnis hervorgerufenen Verzerrungen des elektrischen Feldes im Arbeitskondensator sollten minimal und leicht kalkulierbar sein. Dies ist beispielsweise dann der Fall, wenn die Wände des Gefäßes aus parallelen Platten eines Materials mit einer RDK bestehen, die wenig von der RDK des umgebenden Mediums abweicht.

Weiterhin ist es erforderlich, ständig die Temperatur von im Feld befindlichen Materialien, zumindest der Vorratsgüter, messen zu können.

4.2. Die technischen Einrichtungen zur HF-Erzeugung, -Übertragung und Impedanzanpassung

Zur Erzeugung der Hochfrequenz wird ein HF-Generator vom Typ PFG 1000 RF mit Matchbox (Anpassgerät) PFM 3000 A der Firma Hüttinger Elektronik GmbH + Co.KG. benutzt. Er arbeitet auf der ISM- Frequenz $13,56\text{MHz} \pm 0,05\%$ quarzstabilisiert.

Im HF-Generator wird die zur Aufrechterhaltung des elektrischen Arbeitsfeldes notwendige Hochfrequenzleistung erzeugt, diese ist zwischen 0 und 1 kW kontinuierlich (in 1W-Schritten) einstellbar.

Die Matchbox ist im Prinzip ein über Fernbedienung abstimmbarer Schwingkreis, der zwischen Arbeitskondensator und HF-Generator angeordnet ist und die komplexe Lastimpedanz des Arbeitskondensators in einen für die Funktion des HF-Generators erforderlichen reellen Widerstand von 50 Ohm transformiert. Die Energieübertragung vom Generator zur Matchbox erfolgt über ein Koaxialkabel mit 50 Ohm Wellenwiderstand.

Zur Übertragung von Steuersignalen und Messwerten zwischen Generator und Matchbox dient ein Lichtwellenleiter-Kabel (Glasfaser). Dadurch werden Einkopplungen des elektromagnetischen Feldes am Ausgang der Matchbox auf die empfindlichen Steuer- und Messkreise weitgehend vermieden.

Wenn die Verluste in den Matchbox-Blindelementen (Spulen und Kondensatoren) vernachlässigbar sind liegt nach erfolgter Abstimmung am Arbeitskondensator diejenige HF-Spannung U , die erforderlich ist, um die am HF-Generator eingestellte Leistung im jeweiligen Wirkwiderstand des Arbeitskondensators in Wärme umzusetzen. Die Abstimmung kann bei Vorliegen der entsprechenden Voraussetzungen (nach Grobgleich der Abstimmelemente) automatisch durch einen in der Matchbox eingebauten Mikrorechner erfolgen. Die Steuerung und Überwachung der Matchbox erfolgt vom Bedienfeld des HF-Generators aus.

Die elektrische Feldstärke im Arbeitskondensator, der die zu behandelnden Materialproben aufnehmen soll, beträgt näherungsweise $E = \frac{U}{d}$ (Bezeichnungen siehe Bild 4.1). Da

Feldstärken von einigen hundert kV/m erzeugt werden sollen, die maximal mit der Matchbox erzeugbare Spannung aber wegen der begrenzten Spannungsfestigkeit der Blindelemente unter 5kV liegt darf der Abstand der Kondensatorplatten nur 1...2 cm betragen, was zur Beschränkung auf kleine Probenvolumina zwingt.

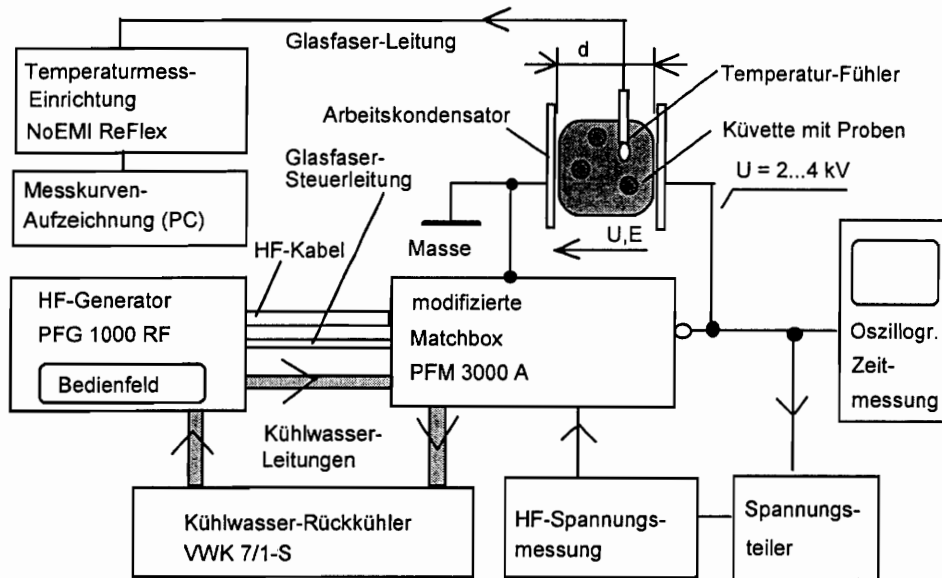


Bild 4.1 Blockschaltbild der Versuchsanordnung

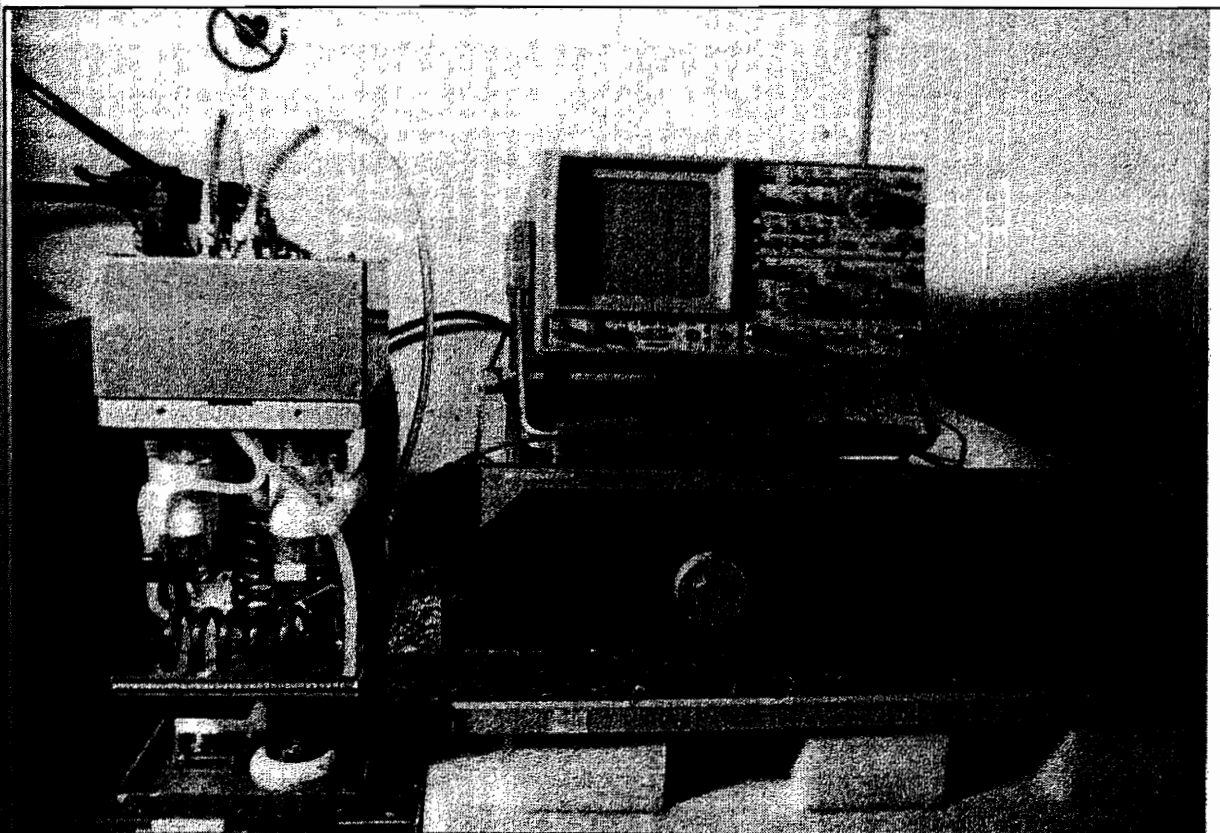
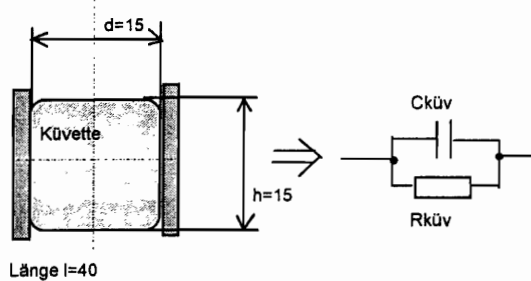


Photo 4.1 Versuchsanordnung mit HF-Generator, geöffneter Matchbox und Oszillograf

2.1. Modifikation der Anpasseinrichtung

Um zu einer schnellen Abtötung der Schädlinge auch unter für sie günstigen Bedingungen, etwa wenn sie von Luft umgeben sind, zu kommen, sind relativ hohe Feldstärken erforderlich. Aus den vorgesehenen Abmessungen der Küvetten und den für Weizen gemessenen

dielektrischen Kennwerten ergibt sich die Größenordnung der Arbeitskondensator-Impedanz zu:



$$C_{Küv} \approx \frac{\epsilon_0 \cdot \epsilon_{Weiz} \cdot l \cdot h}{d} \approx 1,17 \text{ pF}$$

$$R_{Küv} \approx \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot C_{Küv} \cdot \tan \delta_{Weiz}} \approx 200 \text{ kOhm.}$$

Bild 4.2 Küvette mit HF-Ersatzschaltung

Um derartig hochohmige Lasten mit der Hüttinger-Matchbox PFM 3000 A anpassen zu können ist es in jedem Fall erforderlich, die wirksame Arbeitskondensator-Kapazität durch Parallelschaltung eines verlustarmen Hochspannungskondensators (C_z in Bild 4.4) zu vergrößern. Dieser Kondensator darf jedoch nicht zu groß gewählt werden, weil dann die zu seiner Umladung notwendigen Blindströme in Wechselwirkung mit den Verlustwiderständen der Matchbox-Spulen die erreichbare Ausgangsspannung merklich begrenzen.

Um mit einem Parallelkondensator von etwa 25 pF auszukommen war es notwendig, die in der Matchbox eingesetzten wassergekühlten Spulen (L_1 und L_2 in Bild 4.4) zu vergrößern.

Die für nicht zu große Wirkwiderstände R geltende grundsätzliche Beziehung zwischen der am Arbeitskondensator liegende HF-Spannung U und der am HF-Generator eingestellten HF-Leistung P

$$U = \sqrt{P \cdot R}$$

kann für so große Wirkwiderstände wie $R_{Küv}$ nicht mehr zur Abschätzung der maximal erreichbaren Spannung bzw. Feldstärke herangezogen werden. Die erreichbare Spannung wird im vorliegenden Fall durch die Güte der Blindelemente der Matchbox, vornehmlich der nicht versilberten Spulen (Verlustwiderstände R_{v1} , R_{v2} in Bild 4.4), bestimmt. Aus diesem Grunde muss damit gerechnet werden, dass ihre Größe stark von den jeweiligen Umgebungsbedingungen (Temperatur, insbesondere Kühlwassertemperatur) abhängt. Es ist deshalb notwendig, dass sie ständig messtechnisch überwacht und gegebenenfalls vom Mikrorechner des HF-Generators durch Änderung der HF-Generatorleistung korrigiert werden kann. Zu diesem Zweck wird die Arbeitskondensatorspannung über einen kapazitiven Spannungsteiler (C_{t1} , C_{t2} in Bild 4.4) abgegriffen und einem Messfühler zugeführt. Ihre Anzeige erfolgt dann am Bedienfeld des HF-Generators.

Der Zusammenhang zwischen tatsächlicher effektiver Hochfrequenzspannung am Arbeitskondensator und dem in der Digitalanzeige des HF-Generator erscheinenden Zahlenwert wurde durch umfangreiche oszillografische Messungen ermittelt und ist in Bild 4.3 dargestellt.

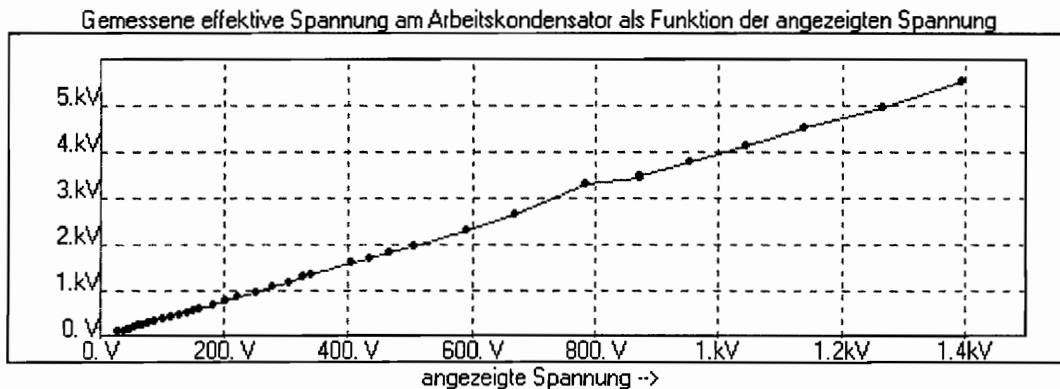


Bild 4.3: Arbeitskondensatorspannung als Funktion der angezeigten HF-Spannung

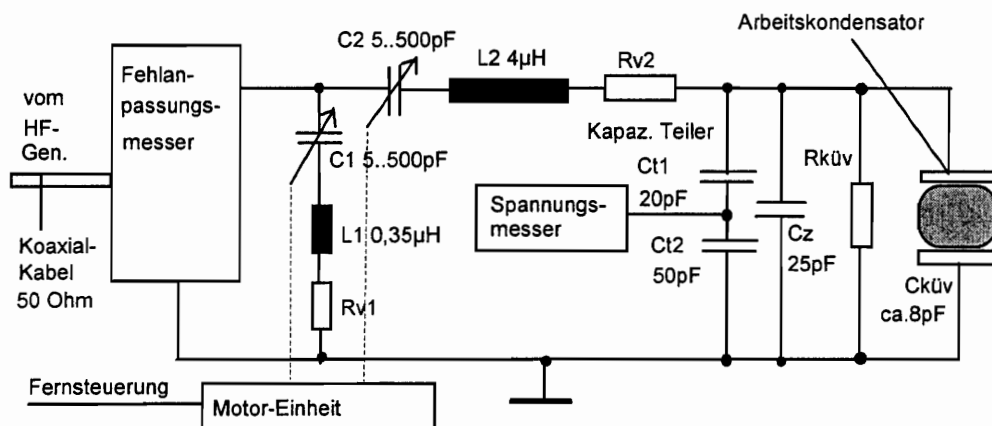


Bild 4.4 Schaltbild der Anpasseinrichtung (modifizierte Matchbox Hüttinger PFM 3000 A)

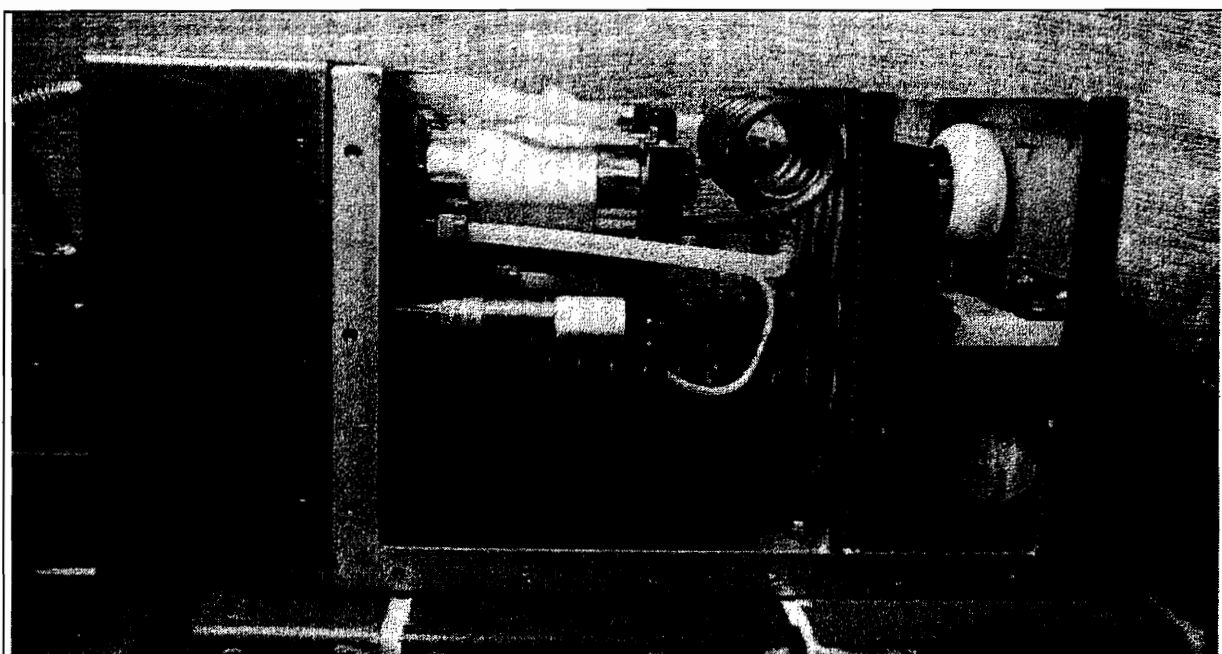


Foto 4.2 Geöffnete modifizierte Matchbox

Experimentelle Untersuchungen haben ergeben, dass bei einer HF-Leistung von 750 W effektive Leerlauf-Ausgangsspannungen von etwa 7 kV erreichbar sind. Die gesamte HF-Leistung muss dabei ebenso wie die im HF-Generator entstehende Verlustwärme durch das Kühlwasser abgeführt werden.

Infolge der relativ hohen Schwingkreisgüten wird die Abstimmung der Matchbox sehr diffizil, weil die Kapazität C1 auf unter 1 pF genau eingestellt werden muss. Dies ist ein Grund, warum keine versilberten und damit verlustärmeren HF-Spulen eingesetzt wurden. Bei der

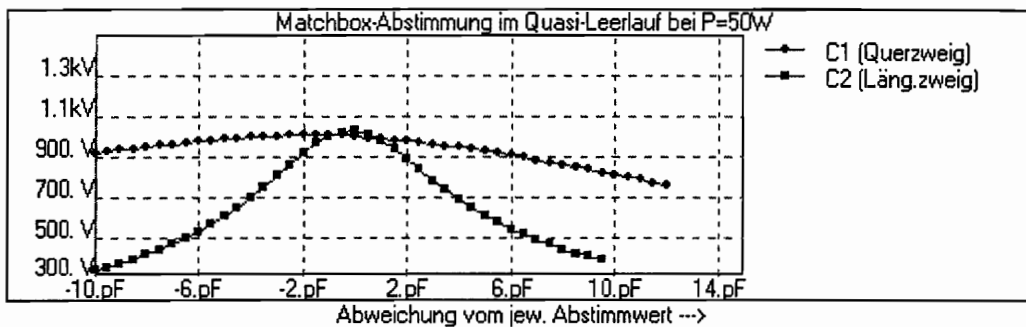


Bild 4.5 Spannung am Arbeitskondensator in Abhängigkeit von der Verstimmung der Drehkondensatoren C1 und C2 nach Bild 4.3 bei einer Spulengüte von $Q=150$

praktischen Arbeit mit der Versuchseinrichtung hat sich gezeigt, dass mit Hilfe der in der Matchbox eingebauten Automatik derartige Abstimmungen möglich sind.

4.3. Temperaturmesseinrichtung

In Anbetracht der vorgesehenen Aufheizzeiten im Sekundenbereich werden an die Reaktionszeit der Temperatursensoren sehr hohe Anforderungen gestellt. Das geringe Probenvolumen (etwa 4 cm^3 Küvetteninhalt) erfordert zudem sehr kleine Fühlerabmessungen und verbietet nennenswerte Wärmeabführungen durch die Temperaturmesseinrichtung.

Wegen des elektrischen Wechselfeldes kommen elektrische Temperaturmessverfahren nicht in Betracht, weil einerseits durch unvermeidliche Strom- und Spannungseinkopplungen von den Elektroden in die Messkreise erhebliche Messfehler entstehen und andererseits allein durch die Anwesenheit von Metallen im Probenraum Feldverzerrungen verursacht werden, die zu Spannungsüberschlägen führen können, zumindest aber eine inhomogene Probenerwärmung bewirken.

Aus diesen Gründen wurde die zwar teure, aber für den vorliegenden Zweck hervorragend geeignete Fiber-Optic-Sensor-Technologie benutzt, deren Wirkprinzip auf der Temperaturabhängigkeit der Lichtreflexion von Galliumarsenid beruht. Die Temperaturfühler der Firma Nortech Fibronic, Inc. ('ULTRA FAST Mini-Probe') haben einen Durchmesser von 1,3 mm (Durchmesser der Zuleitung 0,9 mm), eine Reaktionszeit von etwa 0,5 s und sind auch gegen starke elektromagnetische Felder vollkommen unempfindlich. Die optische Verbindung zwischen Fühler und Auswertungsgerät erfolgt über eine Glasfaser, die problemlos durch Feldbereiche verlegt werden kann.

Die Auswertungsgeräte gestatten mit Hilfe eines Personalcomputers die automatische Aufzeichnung von Messwerten in vorgebbaren festen Zeitabständen ab 2 Sekunden.

4.4. Probengefäße

Als Probengefäße für Experimente mit Insekten in Vorratsgütern wurden Präzisions-Rechteckküvetten aus Quarzglas (Abmessungen $15 \times 15 \times 40 \text{ mm}^3$) verwendet. Quarzglas hat eine RDK von $\epsilon_r = 3,75$ und einen Verlustfaktor $\tan \delta \approx 2 \cdot 10^{-4}$. Die RDK entspricht etwa der von Weizen mit einem Wassergehalt von etwa 15 %. Der Verlustfaktor ist gegenüber den für Vorratsgüter und Insekten gemessenen Werten (Bild 2.3 und Bild 2.4) ausreichend gering.

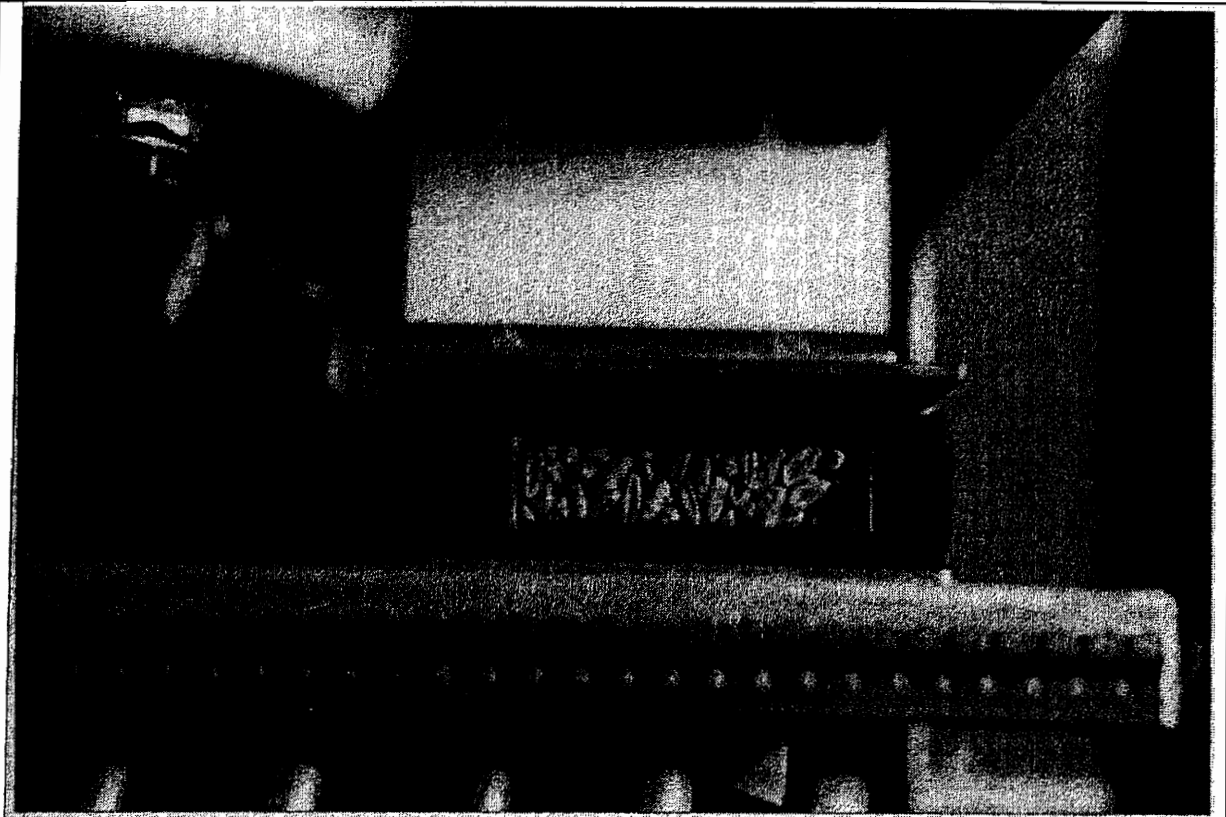


Foto 4.3 Leerer Arbeitskondensator mit eingelegter Küvette

Feldverzerrungen bei Messungen in Luft ließen sich weitgehend vermeiden, wenn die Proben in vorgefertigten Hohlräumen von Schaumpolystyrol untergebracht wurden. Experimente haben gezeigt, dass die dielektrischen Eigenschaften dieses Materials im Rahmen der Genauigkeit der verwendeten Messgeräte für RDK und Verlustfaktor weitgehend denen von Luft entsprechen.

Weizenmengen von 30 g bis 50 g, die mit nicht fluchtfähigen Insektenstadien (Eier, Larven, Puppen) verunreinigt waren, wurden in einem Polyethylen-Beutel, der zwischen den Elektroden des Arbeitskondensators eingefügt war, behandelt. Um zu verhindern, dass durch Lufteinschlüsse etwa an abgerundeten Beutelkanten infolge der dann dort verminderten lokalen Feldstärke Überlebenszonen für Insekten-Brutstadien entstehen, wurden in den Beutel Schaumpolystyrol-Formstücke eingesetzt.

4.5. Messung der Behandlungszeit

Für die vergleichende Auswertung der durchgeführten Messungen ist es wichtig, dass die vorgegebene Behandlungszeit von 8 s sowie die jeweils vorgegebenen Feldstärken innerhalb dieser Zeit möglichst exakt eingehalten werden.

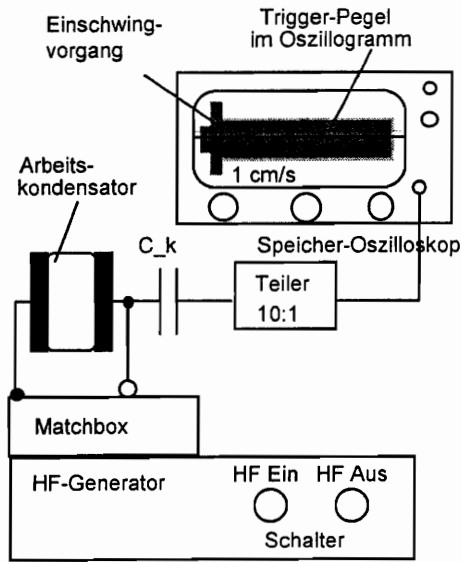


Bild 4.6: Messung der Behandlungszeit und Kontrolle der Behandlungsfeldstärke

Die Kontrolle dieser Parameter erfolgte durch Aufzeichnung einer Folge von Proben der Amplitude der am Arbeitskondensator anliegenden HF-Wechselspannung. Diese Spannung wird dazu über einen sehr kleinen Koppelkondensator C_k und einen Taster einer Digital-Speicheroszilloskop im 'single shot'-Betrieb zugeführt. Die Aufzeichnung beginnt selbständig, wenn die HF-Spannung nach dem Einschalten einen einstellbaren (geringen) Triggerpegel (Bild 4.6) erstmalig überschreitet und endet nach einer Zeit, die durch den gewählten Ablenkfaktor und die Breite der Oszillografen-Bildröhre (10 cm) gegeben ist. Bei einem Ablenkfaktor von 1 cm/s ließ sich die Behandlungszeit anhand des Oszillogramms unter Nutzung der Schalter am Bedienteil des HF-Generators manuell auf etwa 0,1 s genau bemessen.

Die Amplitude der aufgezeichneten Proben-Folge gibt Aufschluss über den zeitlichen Verlauf der Spannung am Arbeitskondensator und damit der Feldstärke in diesem Kondensator im Sekundenbereich.

Eventuelle Einschwingvorgänge der Matchbox-Elektronik (im Bild 4.6 übertrieben dargestellt) oder die später beobachteten Spannungszusammenbrüche infolge der Ausbildung von Strombahnen im behandelten Getreide konnten so dokumentiert werden.

5. Versuchsdurchführung

5.1. Grundlegende Versuche

Um die prinzipiellen Möglichkeiten der Desinfektion von Vorratsgütern mit hochfrequenten elektrischen Feldern in der Praxis zu testen wurden vor Aufbau einer speziellen Versuchsanlage einige Grundsatzversuche durchgeführt.

5.1.1. Beschreibung der grundlegenden Versuche

Als Vorratsgut diente abgelagerter Weizen, als Insekten wurden von der BBA für Land- und Forstwirtschaft, Institut für Vorratsschutz, bereitgestellte Kornkäfer (*Sitophilus granarius* L.) benutzt. Der Weizen hatte einen Wassergehalt von ungefähr 15 %, was dem zulässigen Maximalwert für Lagergetreide entspricht. Als HF-Generator wurde ein auf der ISM-Frequenz 13,56 MHz arbeitender 5 kW-Sender verwendet.

Die ersten Versuche wurden in einer koaxialen Anordnung von Bechergläsern, die mit Kupferfolie umwickelt waren (Bild 5.1), durchgeführt. Die HF-Spannung wurde an zwei Zylinderelektroden, die in einem größeren Gefäß mit trockenem Sand als hochohmigem Lastwiderstand und Energie-Aufnehmer steckten und mit einem 5 kW-Sender verbunden waren, abgegriffen. Als Effektivwert wurde $U_{HF} = 2$ kV gemessen.

Zur Temperaturbestimmung wurden Quecksilberthermometer verwendet.

Für die Feldstärke einer solchen koaxialen Anordnung gilt in Abhängigkeit vom Abstand r von der Mittellinie:

$$E_r = \frac{U_{HF}}{r \cdot \ln\left(\frac{d_o}{d_i}\right)}$$

Mit der gemessenen HF-Spannung ergeben sich damit die Feldstärken am inneren Radius der Weizenfüllung ($r = \frac{d_i}{2}$) zu $E_{ri} = 82 \frac{\text{kV}}{\text{m}}$

und am äußeren Radius ($r = \frac{d_o}{2}$) zu

$$E_{ro} = 41 \frac{\text{kV}}{\text{m}}$$

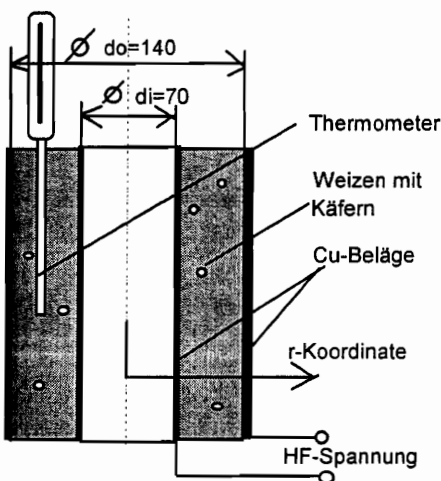


Bild 5.1 Koaxiale Anordnung (Vorversuch)

Mit der angegebenen Versuchsanordnung konnten hinsichtlich der Abtötung von Kornkäfern keine befriedigenden Ergebnisse erzielt werden, obwohl das Getreide in wenigen Minuten bis auf etwa 60 °C aufgeheizt wurde. Bezüglich der Weizentemperatur war ein Gefälle vom inneren zum äußeren Radius von 10 °C...15 °C zu beobachten. Gelegentlich kam es zwischen dem inneren Kupferbelag und anliegenden Weizenkörnern zu Hochspannungsüberschlägen, die zur Schwarzfärbung der beteiligten Körner führte.

Deutlich erfolgreicher verliefen dagegen Versuche mit kleineren Versuchgefäßen, die ebenfalls mit Weizen und Kornkäfern gefüllt in das annähernd homogene Feld eines Plattenkondensators verbracht wurden.

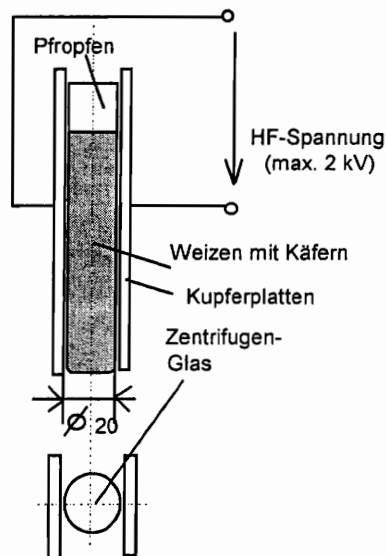


Bild 5.2 Anordnung mit
Zentrifugenglas (Vorversuch)

Verwendet wurden dazu Zentrifugengläser (Durchmesser ca. 2 cm, Höhe ca. 10 cm), die mit einem Wattepfropfen verschlossen wurden, um ein Entweichen der Kornkäfer zu verhindern. Überschlüssig konnten mit dieser Anordnung (Bild 5.2) effektive Feldstärken bis zu $100 \frac{kV}{m}$ erreicht werden.

Bei den Versuchen wurde beobachtet, dass ca. 2...4 Minuten nach Anlegen der HF-Spannung an die Kupferplatten der Tod aller im Glas befindlichen Insekten eintrat. Er trat auch dann ein, wenn nur wenige oder keine Weizenkörner neben den Käfern im Glas waren.

Temperaturmessungen konnten bei diesen Versuchen nicht vorgenommen werden, da Glasfaser-Sensoren zu diesem Zeitpunkt noch nicht zur Verfügung standen, andere Messverfahren aber wegen des geringen Volumens nicht sinnvoll einzusetzen waren.

5.1.2. Auswertung der grundlegenden Versuche

Die Versuche haben gezeigt, dass es prinzipiell möglich ist, Insekten in Vorratsgütern durch dielektrische Erwärmung abzutöten, die Ausarbeitung eines praktikablen Verfahrens aber detaillierte Untersuchungen und den Einsatz spezieller Aufbauten und Messmittel erfordert.

Die anfänglich verwendete koaxiale Anordnung (Bild 5.1) ist unzweckmäßig, weil bei ihr grundsätzlich die elektrische Feldstärke und damit der Leistungseintrag bei der dielektrischen Erwärmung zum äußeren Rand hin abnimmt. Wegen der größeren Oberfläche des Außenzylinders gegenüber dem Innenzylinder ist auch die Wärmeabgabe an die Umgebungsluft im äußeren Bereich größer, was in Zusammenhang mit den relativ langen Aufheizzeiten zu dem großen Temperaturgefälle im behandelten Vorratsgut, das den Schadinsekten Rettungsmöglichkeiten bietet, führt. Die vergleichsweise lange Aufheizzeit hat ihre Ursache in der zu geringen Feldstärke, die ihrerseits durch die begrenzte HF-Spannung und die relativ großen Behältnisabmessungen bedingt war.

Die beobachteten Hochspannungsüberschläge im Getreide standen vermutlich im Zusammenhang mit dem Feldstärke-Maximum im äußeren Randbereich des inneren Zylinders. Unebenheiten im Kupferbelag (auch winzige Löcher, Krater, Falten und ähnliches) könnten diesen Effekt auslösen. Beim vorgesehenen Einsatz noch höherer Feldstärken könnten Spannungsüberschläge zu einem Verfahrensproblem werden.

Bei der zweiten Versuchsanordnung (Bild 5.2) wurde durch die Kupferplatten ein im Wesentlichen homogenes Feld erzeugt, jedoch war es für den angestrebten Insektentod binnen weniger Sekunden noch immer von zu geringer Stärke. Die fehlende Temperaturmessmöglichkeit gestattete keine quantitative Auswertung der Versuche.

Beiden Aufbauten gemeinsam war der Nachteil des Auftretens einer relativ hohen elektrischen Feldstärke auch in der weiteren Umgebung der Versuchsaufbauten, die ihre Ursache in der provisorischen Gewinnung der HF-Spannung an einer ansonsten unnützen Heizer-Last hatte. Diese ungewollte Feldstärke beeinträchtigt die Funktion benachbarter Geräte und kann bei Menschen zu gesundheitlichen Schäden führen, wenn sie sich zu lange in ihrem Wirkungsbereich aufhalten.

5.2. Experimente zur Getreidesterilisation

Mit der eigens aufgebauten Versuchseinrichtung sollen zur Konstruktion einer optimalen Getreide-Sterilisationsanlage notwendige Daten experimentell ermittelt werden. Dazu zählen in erster Linie die zum sicheren Abtöten bestimmter Schädlingsarten innerhalb einer vorgegebenen kurzen Zeit (wenige Sekunden) benötigten Mindestfeldstärken E_{\min} , die der Literatur nicht entnommen werden konnten. Da die Feldstärke im Inneren der Insekten aufgrund fehlender Messmöglichkeiten nicht bestimmt werden kann ist vorgesehen, zunächst Experimente mit Luft als Umgebungsmedium durchzuführen.

Luft nimmt im elektrischen Wechselfeld praktisch keine Energie auf und kann deshalb als ideales Dielektrikum mit der hoch konstanten RDK = 1,00 angesehen werden. Diese Eigenschaften lassen gut reproduzierbare Messergebnisse erwarten.

Der Leistungseintrag in die Käfer bei einer gegebenen Umgebungsfeldstärke (außerhalb der Insekten) ist beim Umgebungsmedium Luft am geringsten, weil alle anderen denkbaren Umgebungsmedien eine $RDK > 1$ haben. Es ist deshalb zu erwarten, dass die in Luft ermittelte, auf eine bestimmte Behandlungszeit bezogene Tötungs-Feldstärke auch in allen anderen üblichen Vorratsmedien für den gleichen Zweck ausreichend ist. Bei längeren Expositionszeiten wäre allerdings zu berücksichtigen, dass die gegenüber Luft deutlich größere Wärmeleitfähigkeit üblicher Vorratsgüter es den Insekten ermöglichen könnte, die in ihnen entstehende Wärme besser abzuführen und damit ihre Überlebenschancen zu verbessern.

Von den in Luft ermittelten Werten ausgehend sind dann weitere Versuche mit Schädlingen in ihren jeweils bevorzugten Umgebungsmedien erforderlich, die auch eine Kontrolle der Aufheizungs-Temperatur dieser Medien enthalten müssen.

5.2.1. Experimente zur Weizenaufheizung

5.2.1.1. Erwärmungsversuche mit einzelnen Weizenkörnern

Zur Erprobung der Leistungsfähigkeit der Experimentieranordnung wurden Versuche zur Bestimmung der Erwärmungskurven einzelner Getreidekörner, die aus Weizenproben mit unterschiedlichen Wassergehalten entnommen wurden, vorgenommen.

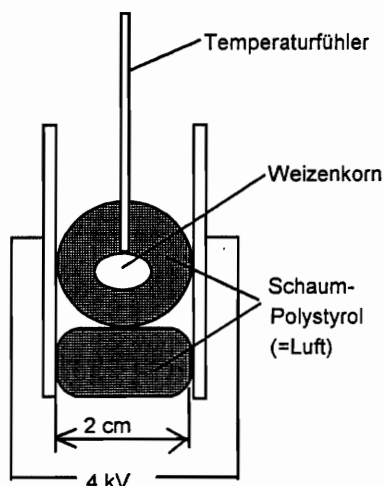


Bild 5.3 Erwärmung einzelner Weizenkörner im Arbeitskondensator

Die Körner wurden dazu zusammen mit einem Temperaturfühler in Schaumpolystyrol eingebettet und für 100 s dem elektrischen Feld ausgesetzt. Das temperaturempfindliche Ende des Glasfaser-Fühlers befand sich dabei auf dem Grund einer Bohrung etwa 0,5 mm tief im Inneren des Kornes.

Die Feldstärke in der Luft bzw. im Schaumpolystyrol (ohne Anwesenheit des Korns) wurde dabei zu 200 kV/m bemessen. Unter diesen Bedingungen stellten sich Feldstärke und Leistungsaufnahme im Inneren des Weizenkorns entsprechend dessen dielektrischen Parametern ein. Bild 5.4 zeigt die mit der Versuchseinrichtung aufgenommenen Temperaturkurven.

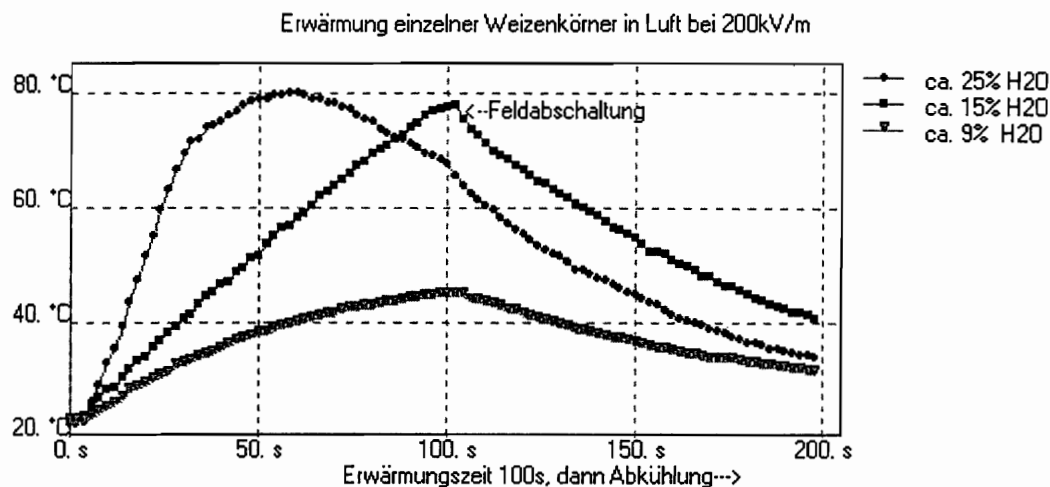


Bild 5.4 Aufgenommene Erwärmungskurven von Weizenkörnern mit anfänglich unterschiedlichem Wassergehalt bei konstanter äußerer Feldstärke von 200 kV/m in Luft. Messraster 2 s.

Sie erstrecken sich über die 100 s Einschaltzeit des Feldes sowie eine nachfolgende Abkühlungszeit von ebenfalls 100 s.

Die Anfangsphasen der Erwärmungskurven demonstrieren den gravierenden Einfluss des Wassergehaltes auf die Leistungsaufnahme. An der Kurve für 25 % Korn-Wassergehalt ist zu erkennen, dass nach etwa 30 s Exposition und einem Temperaturanstieg auf etwa 70 °C die Leistungsaufnahme stark abnimmt, was auf die Veränderung der dielektrischen Eigenschaften des Kornes infolge des eingetretenen Wasserverlustes durch Verdampfung zurückzuführen sein dürfte. Die Kurve für 9 % Korn-Wassergehalt zeigt, dass nach etwa 100 s Erwärmung bei einer Temperatur von etwa 45 °C für das Einzelkorn bereits ein Gleichgewicht zwischen der relativ geringen Leistungsaufnahme und der Wärmeabgabe an die Umgebung eingetreten ist. Der Temperaturabfall nach Abschalten des Feldes entspricht bei allen Kurven etwa dem, der infolge Wärmeableitung aus dem Weizenkorn durch das umgebende Schaumpolystyrol zu erwarten wäre (Wärmeableitung). Dies beweist die Tauglichkeit des verwendeten Glasfaser-Teflon-Temperaturfühlers für derartige Messaufgaben.

Die Ergebnisse demonstrieren auch indirekt die Größenordnung des direkt nicht messbaren Feldstärkeabfalls im Inneren der Getreidekörner. Mit den zuvor gemessenen dielektrischen Daten von Weizen mit etwa 15 Gewicht-% Wassergehalt ($RDK = 3.3$ und $\tan \delta = 0,05$) und unter Annahme homogener kugelförmiger Weizenkörner könnte die Feldstärke innerhalb der Körner zu etwa 110 kV/m, die Leistungsaufnahme zu etwa $1,5 \dots 2 \frac{W}{cm^3}$ und die Temperaturanstiegsgeschwindigkeit bei Vernachlässigung der Wärmeabgabe zu etwa 1..1,2 Grad/s geschätzt werden. Die tatsächlich gemessene Temperaturanstiegsgeschwindigkeit (mittlere Kurve in Bild 5.4) ist mit etwa 0,7 Grad/s noch etwas geringer.

5.2.1.2. Beispiele zur Weizenaufheizung

Die letztlich ungewollte Aufheizung des Getreides bei der HF-Behandlung ist wegen ihres Energiebedarfs ein wichtiger Kostenfaktor für das Verfahren und kann außerdem noch zu Qualitätseinbußen führen. Aus diesen Gründen wurden im Rahmen dieser Arbeit eine Reihe Erwärmungsversuche mit nicht von Schädlingen befallenem Weizen durchgeführt.

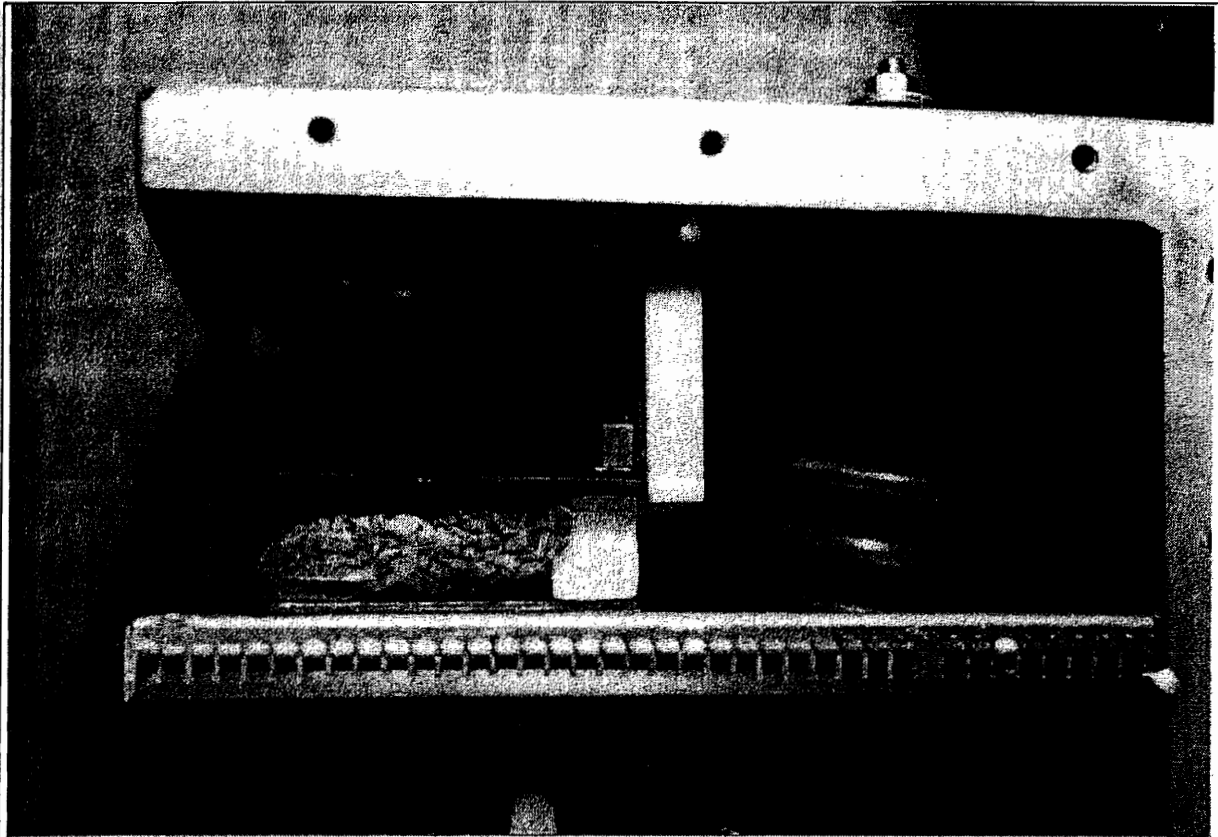


Foto 5.1 Weizenbehandlung im Arbeitskondensator

Die aufgenommene Erwärmungskurven mit Weizen unterschiedlichen Wassergehaltes zeigen die Bilder 5.5 bis 5.8. Um den Einfluss sich verändernder dielektrischer Daten durch Wasserverdampfung möglichst auszuschließen wurde dabei das Feld abgeschaltet, wenn eine Weizentemperatur von etwa 50 °C erreicht war. Den Diagrammen kann die eintretende Weizenerwärmung bei einer vorgegebenen Behandlungszeit entnommen werden. Der zeitliche Abstand zweier Messpunkte beträgt in den genannten Diagrammen immer 2,0 s.

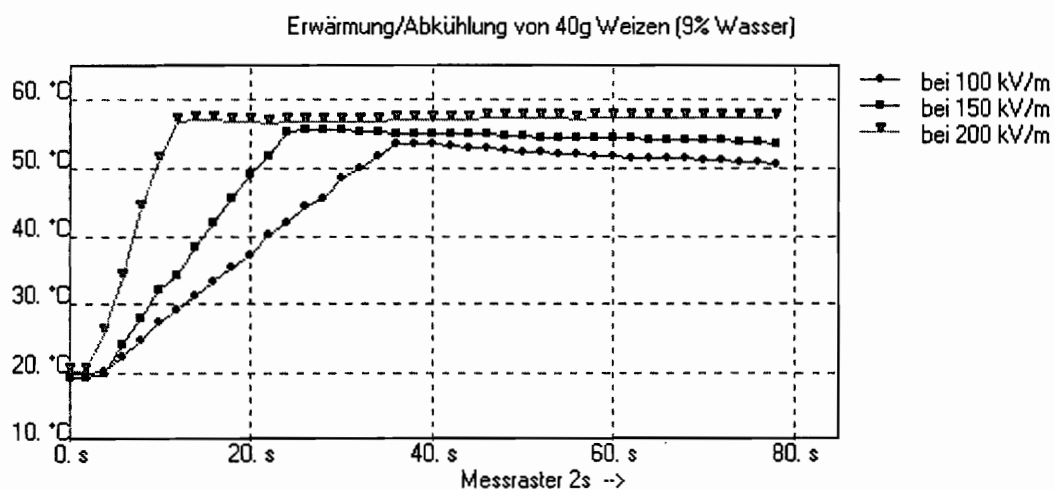


Bild 5.5 Aufgenommene Erwärmungskurven von Weizen mit 9 % Wassergehalt bei verschiedenen Feldstärken im Weizen

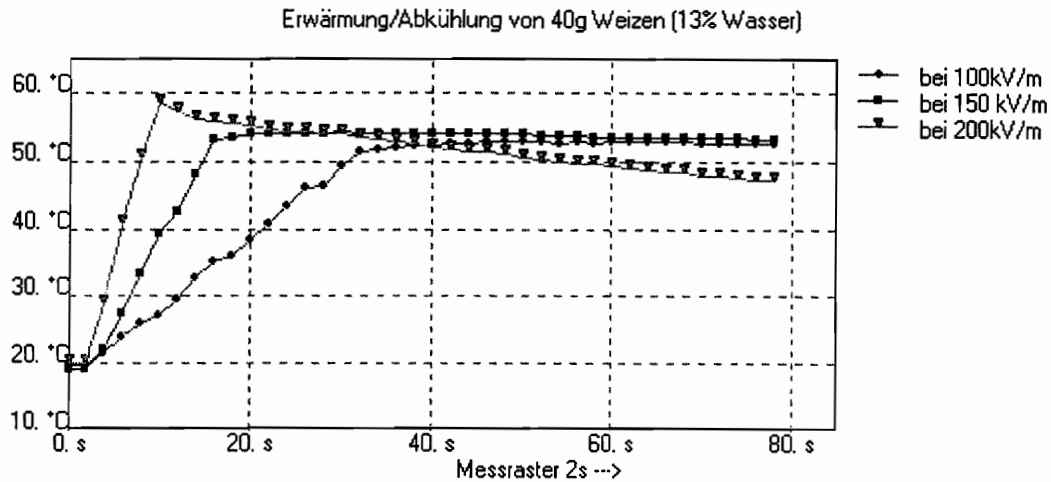


Bild 5.6 Aufgenommene Erwärmungskurven von Weizen mit 13 % Wassergehalt bei verschiedenen Feldstärken im Weizen

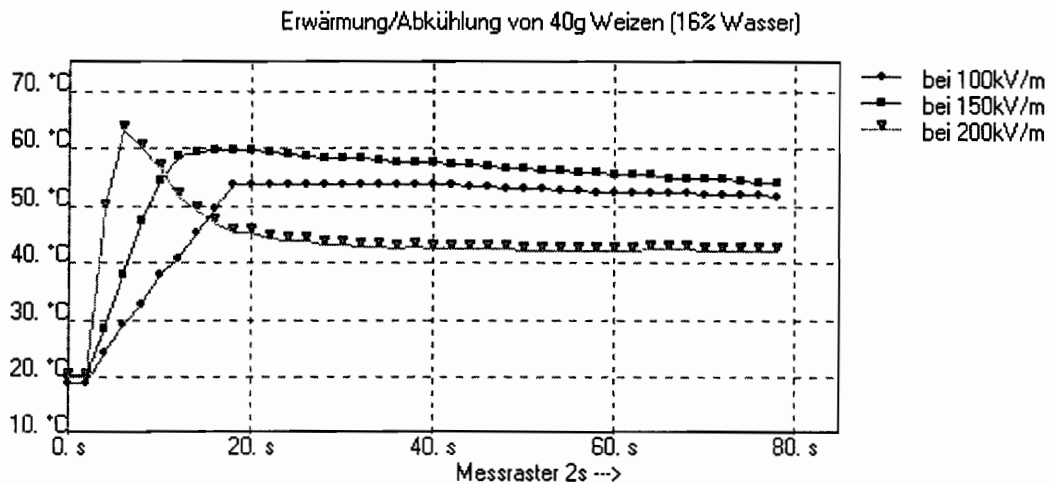


Bild 5.7 Aufgenommene Erwärmungskurven von Weizen mit 16 % Wassergehalt bei verschiedenen Feldstärken im Weizen

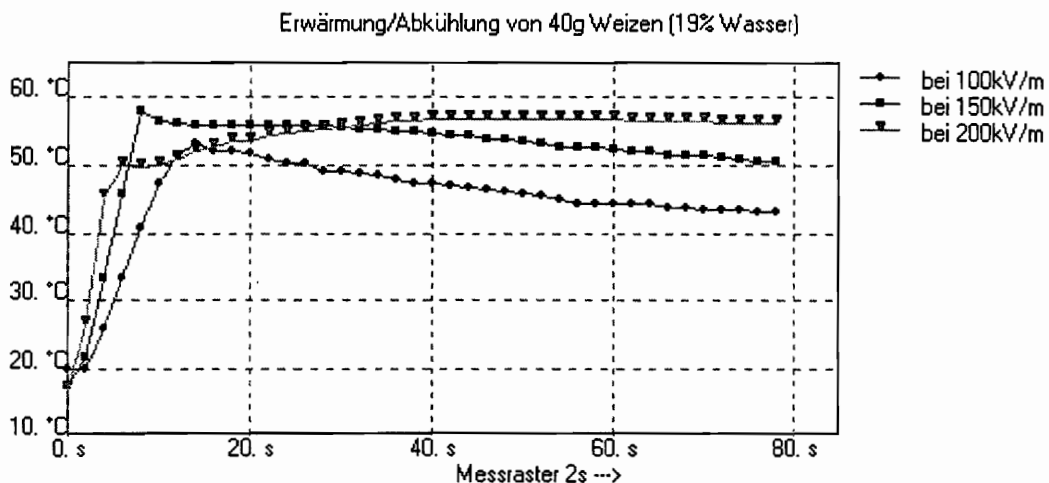


Bild 5.8 Aufgenommene Erwärmungskurven von Weizen mit 19 % Wassergehalt bei verschiedenen Feldstärken im Weizen

Bei Weizenwassergehalten > 9 % (Bilder 5.6 bis 5.8) wurden im Probenvolumen deutlich ungleichmäßige Temperaturverteilungen festgestellt. In den dargestellten Messkurven wirkt

sich dies entweder durch weiteren Temperaturanstieg nach Abschalten des Feldes (in der Nähe der Messstelle befanden sich heißere Stellen) oder durch einen dann eintretenden zeitweise raschen Temperaturabfall (die Umgebung der Messstelle war weniger aufgeheizt) aus. Als Ursache dieser Erscheinung werden mehr oder weniger 'natürliche' Inhomogenitäten der dielektrischen Parameter des Weizens infolge ungleichmäßiger Feuchteverteilung vermutet.

5.2.1.3. Bildung von Strombahnen im Weizen

Bei der Durchführung einiger Erwärmungsexperimente mit Weizen wurden im Verlauf der Aufheizung wenige Sekunden nach Einschalten des Feldes starke Qualmentwicklungen, die mit Geruchsbildungen (Backwaren-Geruch) verbunden waren, festgestellt. Gleichzeitig mit dem Auftreten dieser Erscheinungen wurde am HF-Generator eine bis an das vorgegebene Limit gestiegene Leistungsaufnahme der Weizenprobe angezeigt, die dann wegen der begrenzten Leistungsverfügbarkeit zu einem Zusammenbruch der eingestellten Feldstärke im Arbeitskondensator führte.

Nach kurzzeitigem Abschalten der Hochfrequenzenergie konnte in einem solchen Falle bei der Wiedereinschaltung die voreingestellte Feldstärke im Weizen nicht wieder aufgebaut werden, weil die enorm gesteigerte Leistungsaufnahme bestehen blieb.

Untersuchungen der betroffenen Weizenproben zeigten eine Reihe von Weizenkörnern, deren Oberfläche an einigen Stellen mit einer schwarzen Kruste überzogen waren. Meist bildeten mehrere solcher Körner einen lose zusammenhängenden Klumpen. Auf der Oberfläche der betroffenen Körner waren zugleich auch bräunliche Feuchtigkeitsspuren zu erkennen.

Offensichtlich kommt es unter dem Einfluss des Austritts von Wasserdampf und einer beginnenden Wasserkondensation an einigen kühleren Stellen in der Probe (zumeist sichtbar in der Nähe der sich nicht dielektrisch erwärmenden relativ massiven Kondensatorplatten) zu Hochspannungsüberschlägen zwischen einzelnen Weizenkörnern oder einer Elektrode und Weizenkörnern. Durch den höheren Energieeintrag an der Überschlagstelle verkohlen die beteiligten Körner an ihrer Oberfläche, was offensichtlich ihre elektrische Leitfähigkeit erhöht. Dies zieht nach den Gesetzen des elektrischen Feldes eine Erhöhung der Feldstärke zwischen Körnern in der Nachbarschaft nach sich und in einer Art Lawineneffekt entstehen weitere Überschläge und damit verkohlte Körner. Durch einen solchen Mechanismus könnten die beobachteten Klumpen entstehen, die zeitweise stabile HF-Strombahnen im Weizen bilden und dadurch für die erhöhte Leistungsaufnahme verantwortlich sind.

Da die für die Probe zur Verfügung stehende Leistung durch den HF-Generator begrenzt ist muss es in einem solchen Falle zu einem Absinken der HF-Spannung an den Kondensatorplatten kommen, was im Kontroll-Oszillogramm der Behandlung (siehe Abschn. 4.5.) sichtbar wird. Damit stagniert bzw. reduziert sich zugleich die Aufheizung der nicht von den Überschlägen betroffenen Weizenkörner.

Der Wasseraustritt führt auch zu einer Veränderung der dielektrischen Parameter des Getreides, wie die Bilder 5.9 und 5.10 belegen. Sie zeigen Parameter-Messkurven von Weizen, die unmittelbar vor- und nach einer 5-Sekunden-Behandlung mit 150 kV/m bestimmt worden sind. Messungen der relativen Feuchte der die Weizenkörner umgebenden Luft ergaben sofort nach der Behandlung Werte von 99 % (Endausschlag des Messgerätes).

Die beschriebenen Überschlag-Effekte wurden unter den verwendeten Versuchsbedingungen (maximale Behandlungszeit 8 s, Maximalfeldstärke 200 kV/m) ausschließlich bei Weizenproben mit einem Wassergehalt größer als etwa 15 % und bei Feldstärken größer als 150 kV/m festgestellt. Bei den umfangreichen Experimenten mit Schadinsekten hat sich darüber hinaus gezeigt, dass auch die Beschaffenheit, Form und Größe der Weizenkörner (die

Weizensorte) von erheblichem Einfluss auf die Wahrscheinlichkeit der Bildung von Strombahnen im Weizen ist, wobei größere Körner den unerwünschten Effekt offensichtlich begünstigten.

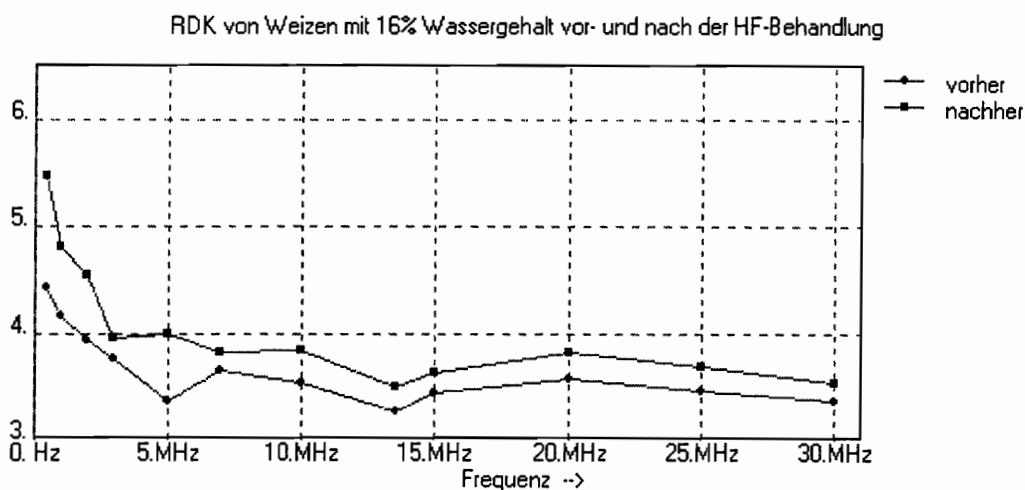


Bild 5.9 Veränderung der RDK von Weizen durch 5 s HF-Behandlung bei 150 kV/m als Funktion der Frequenz

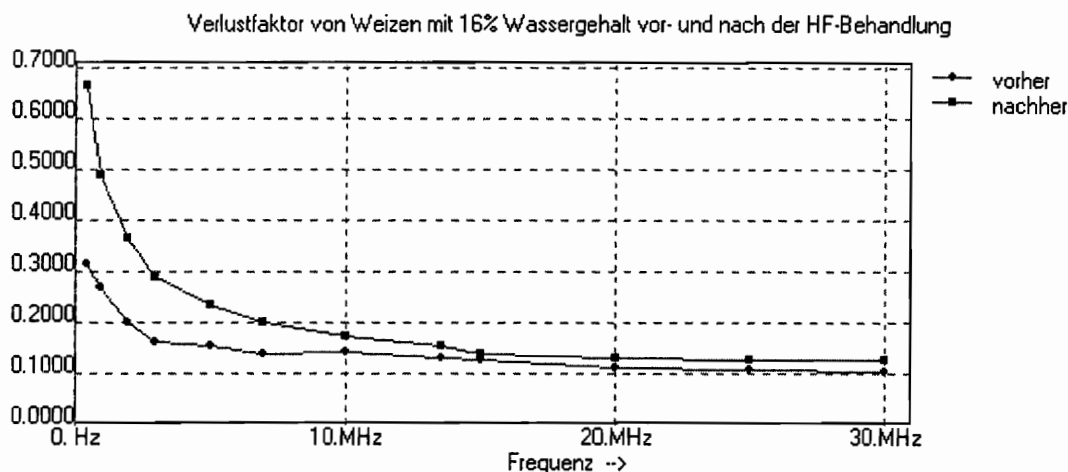


Bild 5.10 Veränderung des Verlustfaktors von Weizen durch 5 s HF-Behandlung bei 150 kV/m als Funktion der Frequenz

Hochspannungsüberschläge im Getreide führen immer zu Verkohlungen einiger Körner und sind schon deshalb bei praktischen Verfahrensanwendungen kaum tolerierbar. Da sie einen Zusammenbruch der Feldstärke im behandelten Weizenvolumen hervorrufen stellen sie auch eine Unterbrechung des Verfahrensablaufes dar. Die entstandenen Körnerklumpen müssen vor Wiedereinschaltung des Feldes aus dem Arbeitskondensator entfernt werden.

Für eine praktische Anwendung des Verfahrens müßten deshalb Wege gefunden werden, das Auftreten solcher Überschläge zu vermeiden.

Ein Ansatz dazu könnte die Verhinderung der Wasserkondensation durch schnelle Abführung des bei der dielektrischen Erwärmung entstehenden Wasserdampfes etwa durch ein Gebläse sein. Versuche mit Weizenproben, die zum besseren Abdampfen als relativ dünne Schichten (etwa 1 cm hoch) behandelt wurden, zeigten eine deutlich verringerte Neigung zu Spannungsüberschlägen. Eine solche Maßnahme würde jedoch eine Austrocknung des Behandlungsgutes und damit eine Erhöhung von dessen Bruchanfälligkeit bewirken, was als Qualitätsminderung angesehen werden muss [14].

5.2.2. Experimente mit Schadinsekten

5.2.2.1. Adulte Kornkäfer

Von allen in der Vorratswirtschaft vorkommenden Materialien hat Luft die kleinste RDK. Im Umgebungsmedium Luft ist daher bei einer gegebenen äußeren elektrischen Feldstärke entsprechend den Grenzbedingungen des elektrischen Feldes (siehe Abschn. 2.1.1.2.) der geringste Energieeintrag in die Insekten zu erwarten. Deren Aufheizung erfolgt dabei ausschließlich durch die in ihnen selbst entstehende Wärme. Die für eine bestimmte, relativ kurze Expositionszeit in Luft ermittelte Abtötungsfeldstärke müsste deshalb eine obere Grenze für die in Vorratsmedien benötigte Mindestfeldstärke darstellen.

Die Experimente in Luft haben auch den Vorteil, dass der Zeitpunkt des Absterben der Käfer durch permanente Beobachtung recht genau ermittelt werden kann.



Foto 5.2 In Luft abgetötete Kornkäfer-Imagines

Bild 5.11 zeigt die experimentell ermittelte Zeiten, in denen adulte Kornkäfer, die sich allseits in Luft befanden, bei gegebener elektrischer Umgebungsfeldstärke abstarben. Als Kriterium dafür wurde das Erstarren jeglicher aktiver Bewegung der Tiere genommen. Feldstärken unter 100 kV/m bewirkten auch nach minutenlanger Behandlungszeit kein Absterben, obwohl die Käfer geschädigt wirkten. Bei Feldstärken über 250 kV/m starben die Käfer in etwa 4 s. Eine weitere Verkürzung der Überlebenszeit durch noch höhere Feldstärkewerte konnte bei den Versuchen nicht erreicht werden.

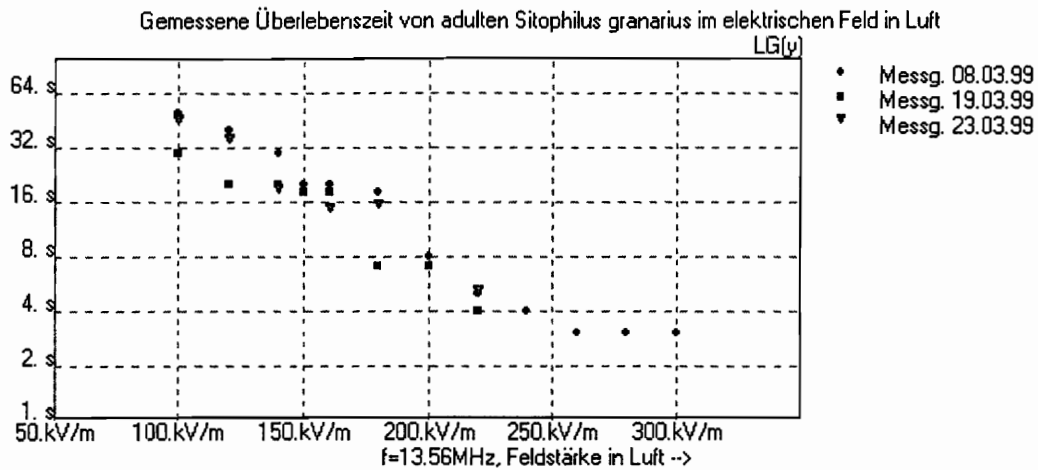


Bild 5.11 Gemessene Überlebenszeit von adulten Kornkäfern in Luft (logarithmische Darstellung) als Funktion der Feldstärke

Für die dabei im Inneren der Insekten auftretenden Temperaturen und Feldstärken können nur grobe Abschätzungen vorgenommen werden. Mit den zuvor gemessenen dielektrischen Daten der Käfer (RDK = 4,5 und $\tan \delta = 0,25$) sowie unter Annahme homogener kugelförmiger Insektenkörper lassen sich bei äußeren 200 kV/m nach den entsprechenden grundlegenden Gesetzmäßigkeiten die Feldstärke innerhalb der Insekten zu etwa 90 kV/m, deren Leistungsaufnahme zu etwa $7 \frac{W}{cm^3}$ und die daraus resultierende Temperaturanstiegsgeschwindigkeit bei Vernachlässigung der konvektiven Wärmeabgabe an die Luft zu etwa 2...3 Grad/s berechnen, was bei der gemessenen Absterbezeit von 8 s auf eine innere Temperaturerhöhung von etwa 20 Grad schließen ließe.

Aus den in Bild 5.11 dargestellten Ergebnissen wurde gefolgert, dass für die weiteren Experimente zur Abtötung von Kornkäfer-Imagines in Weizen und anderen Vorratsgütern bei der vorgesehenen Behandlungszeit von 8 s Feldstärken von weniger als 200 kV/m notwendig sind.

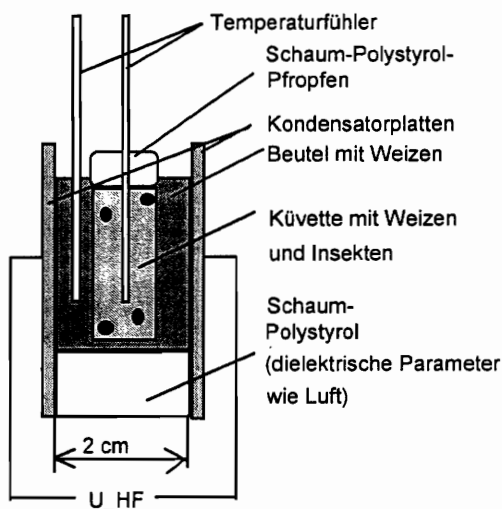


Bild 5.12 Behandlung von Weizen und Insekten im Arbeitskondensator

Bild 5.12 zeigt die verwendete Versuchsanordnung zur HF-Behandlung von mit Kornkäfern versetztem Weizen. Die mit einem Schaumpolystyrol-Pfropfen verschlossene Küvette dient lediglich zur Einschränkung des Aktionsbereiches der Käfer. Da die RDK ihres Wandmaterials (Quarzglas) etwa der RDK von Weizen entspricht sind keine nennenswerten Feldverzerrungen zu erwarten. Bei jedem einzelnen Experiment wurden etwa 30 g Weizen und etwa 15 Kornkäfer-Imagines behandelt.

Zur Kontrolle der entstehenden Erwärmung wurde je ein Glasfaser-Tempersensoren im Getreide innerhalb und außerhalb der Küvette plziert. Signifikante Unterschiede in den beiden angezeigten Temperaturen wurden nicht festgestellt.

Mit einer vorgegebenen Behandlungszeit von 8 s wurden in einer Reihe von Experimenten in Abhängigkeit vom Wassergehalt des Weizens und der elektrischen Feldstärke die in der folgenden Tabelle (Tab. 5.1) dargestellten Auswirkungen auf Vorratsmedium und Insekten beobachtet. Die beschriebenen Wirkungen auf die Käfer entsprechen den Beobachtungen, die bei einer visuellen Inspektion der Proben jeweils etwa 5 Minuten nach Abschluss der Behandlung gemacht wurden.



Foto 5.3 Kornkäfer in der mit Weizen gefüllten Küvette

Die angeführten Werte für die Feldstärke sind Effektivwerte. Als Temperaturerhöhung wurde der über mehrere Experimente gebildete Mittelwert der Differenz zwischen der Weizentemperatur vor der HF-Behandlung und der maximal angezeigten Temperatur am Ende der HF-Behandlung angegeben.

Weizen-Wassergehalt	Feldstärke im Weizen für 8 Sekunden	Temperaturerhöhung im Weizen	Wirkung auf Kornkäfer
9%	100 kV/m	10 °C	keine sichtbare Schädigung
	150 kV/m	15 °C	alle mit Lebenszeichen, teilweise geschädigt
	200 kV/m	28 °C	alle ohne Lebenszeichen
13%	100 kV/m	10 °C	keine sichtbare Schädigung
	150 kV/m	20 °C	alle mit Lebenszeichen, alle geschädigt

Weizen-Wassergehalt	Feldstärke im Weizen für 8 Sekunden	Temperaturerhöhung im Weizen	Wirkung auf Kornkäfer
13%	200 kV/m	35 °C	alle ohne Lebenszeichen
15%	100 kV/m	12 °C	alle mit Lebenszeichen, alle (teilweise stark) geschädigt
	135 kV/m	20 °C	75% ohne Lebenszeichen, Rest (teilweise stark) geschädigt
	150 kV/m	28 °C	alle ohne Lebenszeichen
19%	100 kV/m	20 °C	alle mit Lebenszeichen, teilweise geschädigt
	150 kV/m	35 °C	alle ohne Lebenszeichen

Tab. 5.1 Auswirkungen der HF-Behandlung auf Weizenproben und Kornkäfer (Imagines)

Bei den in Tab 5.1 als geschädigt bezeichneten Käfern waren unter einem Stereomikroskop durchweg verkrüppelte Extremitäten (Antennen und Beine) zu erkennen. Der benannte Grad der Schädigung wurde aus der verbliebenen Beweglichkeit der Tiere abgeleitet.

Stark geschädigte Käfer waren trotz ihrer ständigen Bemühungen nicht mehr in der Lage, sich aus der Rückenlage zu bringen. Weniger geschädigte konnten sich dagegen noch eingeschränkt bewegen, häufig unter sichtbarem Nachschleifen von Extremitäten. Ein signifikantes Absterben geschädigter Käfer innerhalb einer Beobachtungszeitspanne von einem Tag nach der HF-Behandlung wurde nicht festgestellt, über größere Zeiträume wurden Beobachtungen nicht vorgenommen.

Insbesondere bei den geringeren Feldstärken war der Schädigungsgrad der in einer Probe befindlichen Käfer sehr unterschiedlich. So wurden nach einer 8 s-Behandlung von Weizen mit 15 % Wassergehalt mit einer Feldstärke von 135 kV/m sowohl tote als auch geschädigte Tiere gefunden, bei einigen Käfern der Probe waren keine Einschränkungen der Beweglichkeit festzustellen.

Bei einer Weizenfeldstärke von 100 kV/m kam in einer Reihe von Versuchen kein einziger Käfer während der Behandlungszeit zu Tode. Bei Experimenten mit solchen nicht tödlichen Feldstärken wurde beobachtet, dass der Grad der Schädigung der Imagines nach der HF-Behandlung bei Weizensorten mit größeren Körnern deutlich größer war als bei solchen mit kleineren Körnern.

Für die Wirtschaftlichkeit des Verfahrens ist es wichtig, dass sich die Aufheizung des Weizens bei der für die Käfer tödlichen Feldstärke in Grenzen hält. Die starke Abhängigkeit der Weizenaufheizung von dessen Wassergehalt ist aus den Bildern 5.5 bis 5.8 zu ersehen. Sie belegen eindeutig, dass für Wassergehalte über etwa 16 % bei der vorgesehenen Behandlungszeit von 8 s und der notwendigen Weizenfeldstärke von mindestens 150 kV/m leicht zumindest lokale Temperaturerhöhungen von 30 °C bis 40 °C auftreten können.

Für einen Körnerwassergehalt von 15 % zeigt Bild 5.13 während dreier unter gleichen Bedingungen nacheinander durchgeführter 8 s-Behandlungen mit 150 kV/m im

Aufenthaltsbereich der Käfer gemessene Weizen-Temperaturverläufe. Obwohl die Kurven am jeweiligen Behandlungsende eine für inhomogene Erwärmung typische Form haben (siehe Abschnitt 5.2.1.2.) und sich die Maximaltemperaturen um mehr als 10 Grad unterscheiden endete die Behandlungen für alle jeweils beteiligten Käfer tödlich.

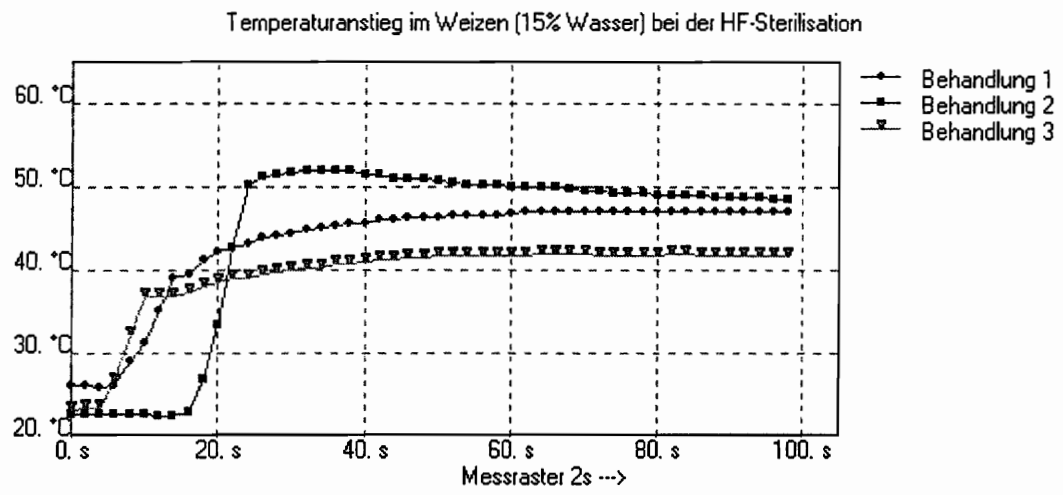


Bild 5.13 Weizenerwärmung während dreier für alle beteiligten Käfer tödlich endenden HF-Behandlungen mit 150 kV/m

5.2.2.2. Brutstadien des Kornkäfers

Neben den Experimenten mit voll ausgebildeten Kornkäfern (Imagines) wurden in Zusammenarbeit mit dem Institut für Vorratsschutz der BBA auch Experimente mit verschiedenen Brutstadien der gleichen Insektenart vorgenommen. Dazu wurden fünf Weizenproben, in deren Körnern sich ausschließlich Insekten eines einzigen Entwicklungsstadiums befanden, angeliefert. Die Herstellung dieser Proben erfolgte beim Kooperationspartner aus durch Kältesterilisation zunächst schädlingsfreiem Weizen, der für etwa vier Tage zur Eiablage mit vermehrungsfähigen Kornkäfern versetzt und danach durch Absiebung wieder von diesen Käfern gereinigt wurde. Da der zeitliche Ablauf der Entwicklung der Brutstadien vom Ei bis zum Imago bei einer konstanten Umgebungstemperatur bekannt ist kann aus der seit der Eiablage vergangenen Zeit auf die in den Körnern der Probe vorhandene Entwicklungsstufe der Kornkäfer geschlossen werden. Bild 5.14 zeigt den Zusammenhang zwischen Entwicklungszeit und Brutstadium für etwa 20 °C nach [12].

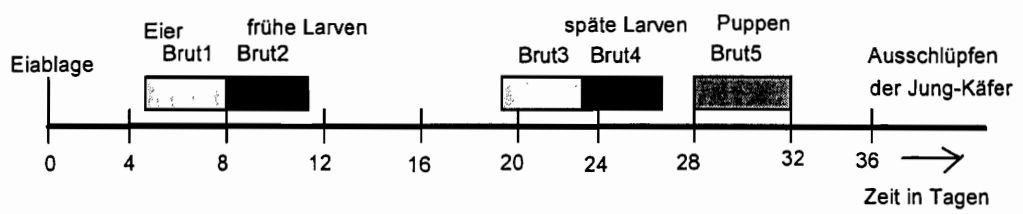


Bild 5.14 Behandelte Brutstadien Brut1 bis Brut5 des Kornkäfers

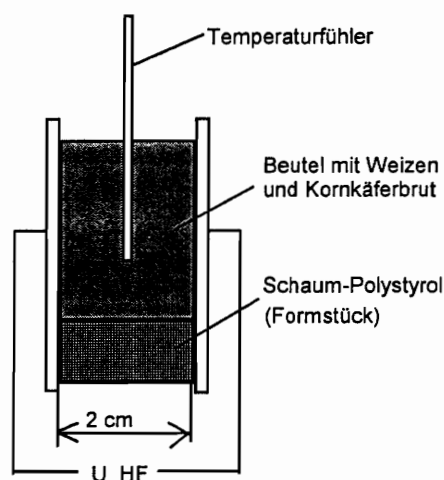


Bild 5.15 Behandlung von Kornkäfer-Brutstadien

Die solcherart präparierten Weizenproben von jeweils ca. 200 g wurden in dem Fassungsvermögen des Arbeitskondensators entsprechenden Portionen zu je 30 g jeweils für 8 s dem hochfrequenten Wechselfeld ausgesetzt. Bild 5.15 zeigt die dabei verwendete Versuchsanordnung.

Jeweils etwa die Hälfte einer Probe wurde mit einer Feldstärke von 150 kV/m behandelt. Für die andere Hälfte wurde die höchstmögliche Feldstärke gewählt, bei der gerade noch keine Spannungsüberschläge im Weizen auftraten. Lag diese kritische Feldstärke bereits bei etwa 150 kV/m wurde für die zweite Probenhälfte eine geringere Feldstärke gewählt.

Nach erfolgter HF-Behandlung wurden sämtliche Proben bis zur Bestimmung des Behandlungsergebnisses im Institut für Vorratsschutz der BBA aufbewahrt. Die Kontrolle erfolgte dort durch Auszählen der zum vorhersehbaren Schlupfzeitpunkt über einen Beobachtungszeitraum von mehreren Wochen aus den behandelten Proben und jeweils einer unbehandelten Vergleichsprobe geschlüpften Käfer. Als Vergleichsprobe wurden jeweils nach der Eiablage 142 g Weizen zurückgelegt, aus denen im Mittel der hier beschriebenen Versuche (2150 ± 400) Käfer schlüpften.

Gewichtsunterschiede zwischen den Vergleichs- und Behandlungsproben wurden in den hier angegebenen Ergebnissen durch lineare Hochrechnung der entsprechenden Schlupfzahlen berücksichtigt.

Aus dem Vergleich der so bestimmten Schlupfzahlen können Schlüsse auf die Wirksamkeit der HF-Behandlung in Bezug auf die sich in den Weizenkörnern entwickelnde Brut gezogen werden. Die jeweils verwendeten Behandlungsparameter und die erzielten Ergebnisse sind in Tab. 5.2 zusammengestellt. Der als Behandlungsergebnis angegebene Überlebenden-Anteil in Prozent bezieht sich auf die Schlupfzahl der unbehandelten Vergleichsprobe (100 %).

Die Auswirkungen der HF-Exposition auf die Nachfolgeneration der überlebenden Käfer wurden nicht untersucht.

Die Tabelle enthält außerdem die gemessenen Werte für die Dichte ρ , die relative Dielektrizitätskonstante ϵ und den dielektrische Verlustfaktor $\tan(\delta)$ jeder behandelten Weizenprobe.

Brutstadium	Physikalische Eigenschaften	Behandlungsfeldstärke (8s)	Registrierte Temperaturerhöhungen	Behandlungsergebnis (Überlebende)
Brut 1 (Eier) Brutansatz: 7.6.-10.6.1999 Behandlungstag: 15.6.1999	Wassergehalt des Host-Weizens 15% $\rho = 0,77 \text{ g/cm}^3$ $\epsilon = 3,3$ $\tan(\delta) = 0,092$	(1)E = 100 kV/m	(12...14)Grad	100 %
		(2)E = 150 kV/m	(22...26)Grad	100 %

<i>Brutstadium</i>	<i>Physikalische Eigenschaften</i>	<i>Behandlungsfeldstärke (δs)</i>	<i>Registrierte Temperaturerhöhungen</i>	<i>Behandlungsergebnis (Überlebende)</i>
Brut 2 Brutansatz: 12.7.-15.7.1999 Behandlungstag: 23.7.1999	$\rho = 0,79 \text{ g/cm}^3$ $\epsilon = 3,5$ $\tan(\delta) = 0,09$	(9)E = 135 kV/m (10)E=150 kV/m	(22...28)Grad (25...35)Grad	91 % 53 %
Brut 3 (junge Larven) Brutansatz: 31.5.-3.6.1999 Behandlungstag: 22.6.1999	$\rho = 0,73 \text{ g/cm}^3$ $\epsilon = 3,25$ $\tan(\delta) = 0,092$	(5)E = 150 kV/m (6)E = 200 kV/m	(22...26)Grad (24...40)Grad	78 % 41 %
Brut 4 (späte Larven) Brutansatz: 28.6.-1.7.1999 Behandlungstag: 23.7.1999	$\rho = 0,58 \text{ g/cm}^3$ $\epsilon = 3,4$ $\tan(\delta) = 0,091$	(7)E = 150 kV/m (8)E = 200 kV/m	(30...50)Grad (60...80)Grad	13 % 5 %
Brut 5 (Puppen) Brutansatz: 17.5.-20.5.1999 Behandlungstag: 17.6.1999	$\rho = 0,49 \text{ g/cm}^3$ $\epsilon = 3,1$ $\tan(\delta) = 0,1$	(3)E = 150 kV/m (4)E = 200 kV/m	(30...50)Grad (60...80)Grad	34 % 1 %

Tab. 5.2 Experimente mit Kornkäfer-Brutstadien

Im Vergleich zu dem für die Käferexperimente verwendeten Weizen mit einem mittleren Korngewicht von ca. 35 mg bei 15 % Wassergehalt enthielt der für die Brutstadien benutzte merklich größere und härtere Körner von im Mittel 55 mg. Vermutlich dadurch bedingt zeigte er eine deutlich stärkere Neigung zur Bildung von Spannungsüberschlägen und Strombahnen im Weizen. Aus diesem Grunde konnten bei den jüngeren Brutstadien (Brut 1 und Brut 2) Feldstärken über 150 kV/m nicht eingesetzt werden, so dass für Vergleiche der Empfindlichkeit der verschiedenen Brutstadien nur diese eine Feldstärke zur Verfügung steht. Merkbliche Unterschiede im Frequenzgang der dielektrischen Parameter wurden zwischen den Weizensorten nicht festgestellt (siehe Bilder 2.5 und 2.6). Der Temperaturanstieg infolge dielektrischer Erwärmung war bei dem großkörnigeren Weizen bei gleichem Energieeintrag um etwa 10 % geringer. Dies könnte mit der etwa um den gleichen Prozentsatz höheren Dichte ρ dieser Weizensorte erklärt werden.

5.3. Diskussion der Ergebnisse

Adulte Kornkäfer können nach den vorliegenden Ergebnissen in einer vorgegebenen Zeit bei einer ausreichenden, vom jeweiligen Wassergehalt des Weizens abhängigen Feldstärke mit einiger Sicherheit abgetötet werden. Es ist zu vermuten, dass dabei infolge der dielektrischen Erwärmung im Inneren der Käfer lebenswichtige Gewebeteile zerstört werden.

Bei einer Feldeinwirkungsdauer von 8 s und trockenem Weizen (unter 15 % Wassergehalt) beträgt die notwendige elektrische Feldstärke etwa 200 kV/m und hat damit nahezu den gleichen Wert, der auch zum Abtöten sich in Luft befindlicher Käfer für erforderlich gefunden wurde (s. Bild 5.11). Wegen der größeren Ähnlichkeit der dielektrischen Daten von Käfern und Weizen (im Vergleich zu den Daten von Käfern und Luft) und dem deshalb zu erwartenden größeren Energieeintrag in die im Weizen befindlichen Käfer war eigentlich eine deutlich geringere Tötungsfeldstärke erwartet worden. Vermutlich spielt hier aber auch die Körnerstruktur des Getreides mit den entsprechenden Luftzwischenräumen, in denen sich die Käfer aufhalten, eine Rolle. In einem so strukturierten Medium treten in geringen räumlichen Abständen sehr unterschiedliche lokale Feldstärken auf (s. Abschnitt 2.1.1.2.), und es wäre denkbar, dass die Käfer dies in einem gewissen Grade zu ihrem Überleben nutzen können.

Erst bei einer Steigerung des Wassergehaltes der Getreidekörner auf 15 % bewirkt die Angleichung der dielektrischen Parameter von Körnern und Insekten ein Absinken der zum Abtöten der Käfer benötigten Mindestfeldstärke auf etwa 150 kV/m.

Zu einer Verminderung der ungewollten Miterwärmung des Getreides reicht dieses Absinken jedoch nicht aus, weil mit der Feuchtigkeit auch der HF-Verlustfaktor stark angestiegen ist. Die bei 8 s-Behandlungen mit 150 kV/m gemessenen Temperaturerhöhungen im Weizen betragen etwa 30 Grad (Bild 5.13).

Die Mehrzahl der Käfer sterben während der Expositionszeit nicht, wenn diese Mindestfeldstärke bei der Behandlung unterschritten wird, es kommt aber dabei zu sichtbaren Verkrüppelungen ihrer Antennen und Beine. Derartige Schädigungen sind vom Wirkmechanismus der dielektrischen Erwärmung in inhomogenen Materialien (s. Abschnitt 2.1.1.2.) zu erwarten.

Der recht unterschiedliche Schädigungsgrad und das Überleben einzelner Käfer bei Behandlungsfeldstärken, die auch nur geringfügig unterhalb der Mindestfeldstärke liegen, weisen ebenfalls darauf hin, dass die zufällige Feinstruktur der Weizenproben (Lage und Beschaffenheit der Körner sowie Lufteinschlüsse in der Umgebung eines Käfers) dann die Wirksamkeit des Verfahrens beeinflusst.

Die festgestellten Überlebensraten verschiedener *Entwicklungsstufen* des Kornkäfers in Weizen mit 15 % Wassergehalt bei einer HF-Behandlung von 8 s Dauer in Abhängigkeit von der Behandlungsfeldstärke sind zur besseren Übersicht noch einmal in Tab. 5.3 und Bild 5.16 dargestellt. Zum Vergleich eignet sich besonders die Feldstärke 150 kV/m, mit der alle Stadien behandelt werden konnten.

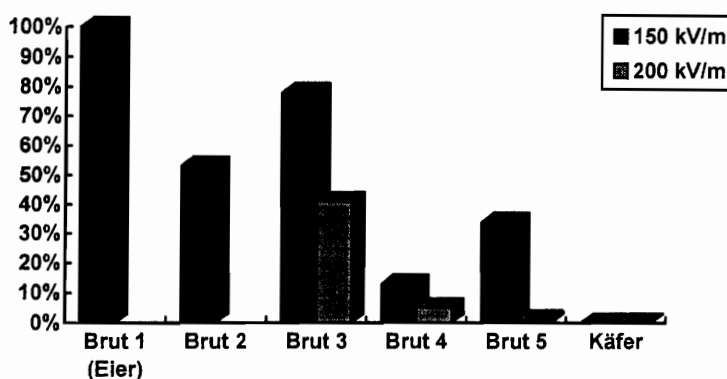
Während diese Feldstärke ausreicht, alle Imagines einer Probe abzutöten, zeigt sie in Bezug auf die Insekteneier (Brut 1) praktisch überhaupt keine Wirkung. Für die dazwischenliegenden Stadien kann überschlägig abgelesen werden, dass zwischen einem Viertel und drei Vierteln der Brut durch diese Behandlungsfeldstärke vernichtet wird. Generell ist erkennbar, dass die Wirksamkeit der Behandlung mit zunehmendem Entwicklungsalter der Kornkäfer ansteigt. Dieser Trend zeigt sich noch eindeutiger in der Zeile für die Behandlungsfeldstärke 200 kV/m.

Behandlungsfeldstärken unter 150 kV/m sind nach den vorliegenden Ergebnissen in jedem Fall für die Getreidesterilisation unzureichend.

Als Ursache der geringeren Empfindlichkeit der jüngeren Brut (Eier und junge Larven) gegenüber der dielektrischen Erwärmung ist sicherlich in erster Linie deren im Vergleich zu den Käfern geringerer Wassergehalt anzunehmen. Außerdem dürften sich die abgerundeten Formen bzw. das Fehlen von Extremitäten, an deren Enden lokale Feldstärkemaxima auftreten könnten, für sie günstig auswirken.

Stadium Feldstärke	Brut 1 Eier	Brut 2	Brut 3 Larven	Brut 4 Larven	Brut 5 Puppen	Imagines
200 kV/m			41 %	5 %	1 %	0 %
150 kV/m	100 %	53 %	78 %	13 %	34 %	0 %
135 kV/m		91 %				
100 kV/m	100 %					100 %

Überlebensrate Brutstadien



Tab. 5.3 und Bild 5.16 Vergleich der gemessenen Überlebensraten verschiedener Entwicklungsstadien von Kornkäfern in Weizen mit 15% Wassergehalt in Abhängigkeit von der Behandlungsfeldstärke

Versuche, der größeren Widerstandsfähigkeit der Brut mit dem Einsatz höherer Behandlungsfeldstärken zu begegnen, scheiterten am Auftreten von Spannungsüberschlägen im Weizen. Das Ziel, durch eine einmalige Getreidebehandlung Käfer und Brut zugleich abzutöten, konnte offensichtlich mit der Versuchsanordnung nicht erreicht werden.

Die Wahrscheinlichkeit für das Auftreten von Hochspannungsüberschläge im Weizen war bei den verschiedenen Proben unterschiedlich. Sie war besonders groß bei den Proben mit den jüngeren Brutstadien mit ihren noch nicht ausgefressenen nahezu intakten Körnern.

Eine deutlich geringere Neigung zu Spannungsüberschlägen zeigte die kurz vor dem Schlupf stehende Brut 5. Diese Weizenprobe bestand zum erheblichen Teil aus relativ trockenen Kornhülsen mit darin befindlichen Kornkäfer-Puppen, sie enthielt außerdem als Ergebnis des Larvenfraßes beträchtlichen Menge von Mehlstaub. Auffällig war ihre geringe Dichte (siehe Tab. 5.2), die auf einen hohen Luftanteil schließen lässt. Es ist anzunehmen, dass die Aushöhlung der Körner durch ihre isolierende Wirkung zur Dämpfung der Überschlagneigung geführt hat.

Bei der Behandlung der Brut 5 mit 150 kV/m wurden innerhalb von 8 s von den zwischen den Körnern befindlichen Sensoren Temperaturanstiege von (30...50) Grad, also bei 20 °C Ausgangstemperatur Behandlungs-Endtemperaturen von (50...70) °C, registriert. Ob die Temperaturfühler dabei Kontakt mit Kornhülsen oder Kornkäfer-Puppen hatten, oder ob die Temperatur in einem Luftschluss gemessen wurde, ließ sich nicht feststellen. Trotz dieser hohen Werte hat etwa ein Drittel der Insekten überlebt. Selbst eine Behandlung mit 200 kV/m, bei der Endtemperaturen von über 100 °C angezeigt wurden, überlebten einige wenige Tiere (Tab 5.2).

Als mögliche Ursachen für diesen unerwarteten Effekt müssen Inhomogenitäten sowohl des elektrischen Feldes im Arbeitskondensator als auch der dielektrischen und thermischen

Kennwerte innerhalb der Weizenproben in Betracht gezogen werden. Bereits die Unterschiede der Erwärmungskurven, die unter annähernd gleichen Bedingungen (Feldstärke, Körner-Feuchtegehalt) aufgenommen wurden (etwa Bild 5.13), weisen auf die Existenz solcher Inhomogenitäten hin. Für einen kommerziellen Einsatz des Verfahrens können solche zufälligen Ungleichmäßigkeiten im Getreide wegen ihres offensichtlich großen Einflusses auf die Effektivität der Behandlung ein ernsthaftes Problem darstellen.

Die Unterschiede im Leistungseintrag, die durch die konstruktionsbedingte Inhomogenität des Feldes im Arbeitskondensator entstehen, werden rechnerisch auf etwa (-10...+30)% geschätzt. Dieser Fehler tritt hauptsächlich an den Rändern bzw. Ecken der Kondensatorplatten auf und ließe sich prinzipiell bei der Konstruktion einer kommerziellen Anlage durch Beschränkung des genutzten Arbeitskondensator-Volumens beliebig verringern. Als Ursache für die unterschiedlichen Temperaturmesswerte in Bild 5.13 kommt er nicht in Betracht, da sich dort die Messfühler stets an der gleichen Stelle etwa in der Mitte des Probenraumes befanden.

Ein weiterer Grund für die erstaunliche Überlebensfähigkeit der Puppen in Brut 5 könnte in der Wirkung der Lufteinschlüsse in den weitgehend ausgefressenen Körnern liegen, weil der erhebliche Unterschied der dielektrischen Parameter von Luft und Kornkäfer-Puppen keinen großen Energieeintrag in Letztere erlaubt (Fehlanpassung).

Eine vom Kooperationspartner BBA begonnene Untersuchung von Auswirkungen der HF-Behandlung auf Pilze, die sich auf Weizenkörnern befinden, führte wegen zu geringem Befall des Ausgangsmaterials zu keinem Ergebnis.

6. Anforderungen an eine kommerzielle Behandlungsanlage

Für die Bewertung der Untersuchungsergebnisse ist es zweckmäßig, grundlegende Vorstellungen vom Aufbau einer Hochfrequenz-Sterilisationsanlage zu haben, mit der nennenswerte Weizenmengen unter Beachtung wirtschaftlicher Gesichtspunkte behandelt werden könnten. Die Betrachtung von Details einer solchen Anlage ist nicht Gegenstand der vorliegenden Arbeit.

6.1. Besonderheiten von Hochfrequenzanlagen

Das hier zur Schädlingsbekämpfung eingesetzte Hochfrequenzverfahren basiert auf der Erwärmung, die unvollkommene Dielektrika wie Käfer oder Weizenkörner in einem hochfrequenten elektrischen Wechselfeld erfahren. In der verwendeten Versuchsanordnung (Bild 4.1) bildet sich dieses Feld zwischen den Platten eines Arbeitskondensators aus. Es beschränkt sich jedoch nicht nur auf den Bereich zwischen den Platten, sondern besteht in abgeschwächter Form auch außerhalb dieses Bereiches. Dieses sogenannte Randfeld gefährdet die Gesundheit von Personen, die sich längere Zeit in seinen Wirkungsbereich aufhalten und damit einer unkontrollierten dielektrischen Erwärmung ausgesetzt sind. Ebenso wird durch ungewollte Energieeinkopplungen die Funktion vornehmlich elektronischer Geräte, die sich in einem solchen Randfeld befinden, mehr oder weniger beeinträchtigt. Dies kann etwa für Personen mit implantierten Herzschrittmachern weitgehende gesundheitliche Auswirkungen haben.

Bei der in dieser Arbeit verwendeten Versuchsanordnung ist der genannte Effekt wegen der geringen Abmessungen und spezieller, im Laborbetrieb leicht durchführbarer Abschirmmaßnahmen vernachlässigbar.

Anlagen mit erheblich größerer Leistung müssen so konstruiert werden, dass außerhalb des Behandlungsraumes keine Streufelder auftreten, deren Kennwerte die durch Arbeitsschutz- und EMV-Vorschriften bestimmten Maximalwerte übersteigen.

In der Hochfrequenztechnik ist bekannt, dass diese Forderung erfüllt werden kann, wenn das Arbeitsfeld in einem möglichst allseitig geschlossenen Gehäuse aus elektrisch gut leitendem Material wie Kupfer oder Aluminium (Faradaykäfig) eingeschlossen wird.

Für die geplante Hochfrequenz-Behandlungsanlage muss ein solcher metallischer Behandlungsraum zumindest Öffnungen für den Ein- und Ausfluss des Weizens haben. Um zu verhindern, dass durch diese Öffnungen ein unzulässiges Streufeld austritt, werden voraussichtlich spezielle Konstruktionselemente notwendig sein.

In jedem Falle muss eine kommerzielle Anlage in Bezug auf elektromagnetische Felder eingehend getestet werden.

6.2. Prinzipieller Aufbau

Eine für den kommerziellen Einsatz geeignete Behandlungsanlage könnte unter Berücksichtigung der beschriebenen hochfrequenztechnischer Besonderheiten den in Bild 6.1 gezeigten prinzipiellen Aufbau haben.

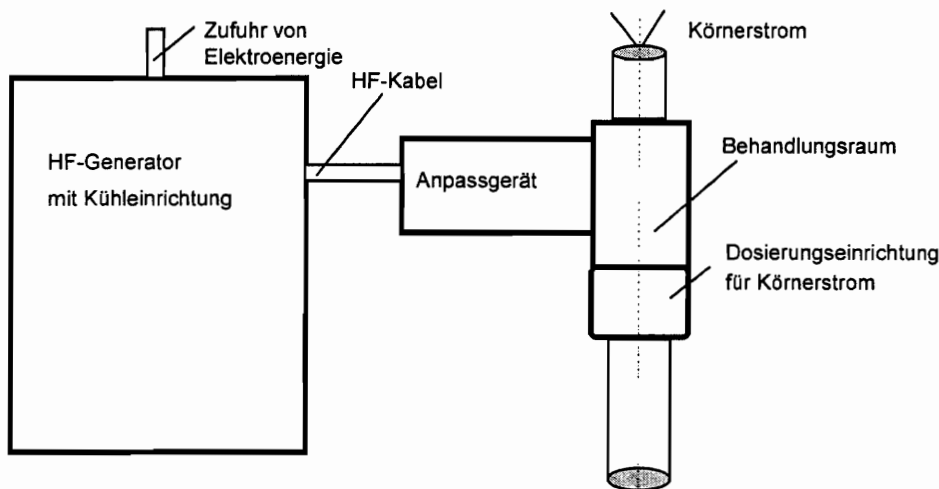


Bild 6.1 Prinzip einer kommerziellen Hochfrequenz-Weizenbehandlungsanlage

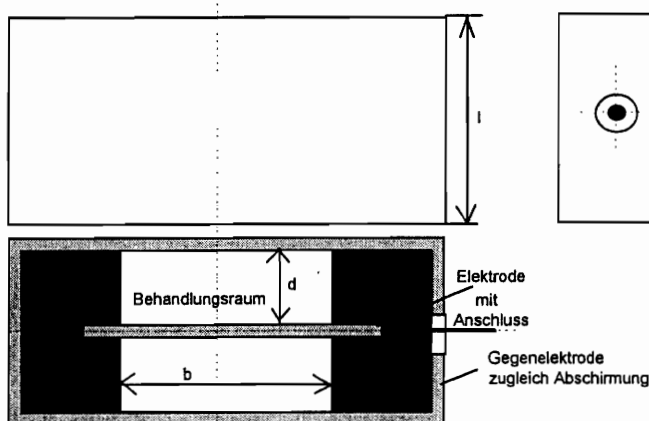


Bild 6.2 Behandlungsraum

Der eigentliche Behandlungsraum ist dabei eine zweckmäßigerweise rechteckige Kammer (Bild 6.2 zeigt eine grundsätzliche Realisierungsmöglichkeit) mit der Länge l , die von den Weizenkörnern durchströmt und in der die zur Weizensterilisation notwendige Feldstärke durch Anlegen einer entsprechenden Hochfrequenzspannung an die Mittelelektrode erzeugt wird. Für die folgenden grundsätzlichen Betrachtungen wird davon ausgegangen, dass es gelingt, im Behandlungsraum einen Körner-

strom mit ausreichend gleichmäßiger Geschwindigkeitsverteilung zu erreichen. Unter derartigen Bedingungen lassen sich die möglichen Leistungsparameter kommerzieller HF-Behandlungsanlagen im Voraus abschätzen.

6.3. Energiebedarf

Die von den Körnern durchströmte Fläche nach Bild 6.2 ist

$$A_{BRaum} = 2 \cdot b \cdot d.$$

Für den Masse-Durchsatz des Behandlungsraumes gilt die Beziehung

$$\frac{\Delta m}{\Delta t} = v \cdot A_{BRaum} \cdot \rho_W$$

wobei v die Durchströmungsgeschwindigkeit des Weizens und ρ_W dessen Dichte ist. Die benötigte Hochfrequenzenergie ergibt sich aus der während der vorgegebenen Behandlungszeit t_{Bh} zwangsläufig auftretenden Weizenerwärmung $\Delta \vartheta$ zu

$$P \cdot \Delta t = c \cdot m \cdot \Delta \vartheta.$$

P ist dabei die Leistung des HF-Generators, c die spezifische Wärme des Weizens (nach [8] bei 15 % Wassergehalt $c = 2,0 \frac{\text{Ws}}{\text{g} \cdot \text{grad}}$) und m die in der Zeit Δt behandelte Weizen-Masse.

In der vorliegenden Arbeit wurde die zum sicheren Abtöten der Schädlinge und ihrer Brut in einer vorgegebenen Zeit von $t_{Bh} = 8,0$ s benötigte Feldstärke experimentell zu etwa 150 kV/m ermittelt. Die bei einer derartigen Behandlung auftretende Miterwärmung des Weizens kann aus dessen gemessenen dielektrischen Daten berechnet werden. Aus dem für die dielektrischen Erwärmung maßgebenden spezifischen Leistungseintrag

$$\frac{dP}{dV} = E^2 \cdot \omega \cdot \varepsilon \cdot \tan(\delta)$$

ergibt sich die in der Behandlungszeit t_{Bh} zu erwartende Temperaturerhöhung zu

$$\Delta \vartheta = \frac{E^2 \cdot \omega \cdot \varepsilon \cdot \tan(\delta) \cdot t_{Bh}}{c \cdot \rho},$$

wobei

$\omega = 2 \cdot \pi \cdot 13,56$ MHz die vom Hochfrequenzgenerator verwendete Kreisfrequenz,

$\varepsilon = 8,854 \frac{\text{pF}}{\text{m}} \cdot \varepsilon_w$ mit $\varepsilon_w \approx 3,3$ die Dielektrizitätskonstante des Weizens,

$\tan(\delta) \approx 0,1$ der dielektrische Verlustfaktor des Weizens und

$\rho \approx 0,7 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$ die Dichte des Weizens ist.

Alle Weizen betreffenden Zahlenangaben beziehen sich auf einen Wassergehalt von 15 %. Damit ergibt sich rechnerisch eine in $t_{Bh} = 8,0$ s Behandlungszeit zu erwartende Temperaturerhöhung von $\Delta \vartheta = 32$ °C. Bei den durchgeführten Experimenten wurden mit der Temperaturmesseinrichtung tatsächlich ähnliche Werte registriert.

Der für eine gegebene Hochfrequenzleistung P bei zu erwartender Temperaturerhöhung $\Delta\theta$ erreichbare Masse-Durchsatz an Weizen beträgt

$$\frac{m}{\Delta t} = \frac{P}{c \cdot \Delta\theta}$$

In Tabelle 6.1 sind die danach bei einer angenommenen Temperaturerhöhung von 32 Grad für eine gegebene HF-Generatorleistung erzielbaren Behandlungsmengen angeführt. Bei trockenerem Weizen mit beispielsweise 12 % Wassergehalt sinken die RDK und der dielektrische Verlustfaktor des Getreides auf etwa $\epsilon_w \approx 2,6$ und $\tan(\delta) \approx 0,06$, die spezifische

Wärme des Weizens sinkt nach [8] auf $c = 1,89 \frac{\text{Ws}}{\text{g} \cdot \text{grad}}$. Zugleich steigt aber die zum Abtöten

der Kornkäfer-Imagines benötigte Feldstärke auf mindestens 180 kV/m. Die aus diesen Werten resultierende Temperaturerhöhung beträgt etwa 23 Grad und die sich damit ergebenden möglichen Behandlungsmengen sind ebenfalls in Tabelle 6.1 aufgeführt.

HF-Leistung des Generators	20 kW	100 kW	500 kW	1 MW
Behandlungsleistung bei 15% Wassergehalt	1,2 to Weizen/h	6 to Weizen/h	30 to Weizen/h	60 to Weizen/h
Behandlungsleistung bei 12% Wassergehalt	1,7 to Weizen/h	8,5 to Weizen/h	42,5 to Weizen/h	85 to Weizen/h

Tabelle 6.1 Zu erwartende Leistungsparameter kommerzieller HF-Behandlungsanlagen zur Weizenentwesung

Eine Absenkung des Wassergehaltes der Körner um 3 % könnte demnach zu einer Steigerung der Behandlungsleistung um etwa 40 % führen. Unabhängig davon sind aber zur Erreichung von in kleineren Speicheranlagen üblichen Massedurchsätzen von etwa 50 to/h mehr als 500 kW HF-Leistung erforderlich.

Wegen der teilweise beträchtlichen Streuungen der einfließenden Getreide-Kennwerte, die sich auch in der Steuung der Messwerte für die Temperaturerhöhungen widerspiegeln, können die angegebene Leistungsparameter nur als Orientierungswerte angesehen werden.

7. Schlussfolgerungen und Ausblick

Die in dieser Arbeit beschriebenen Experimente haben gezeigt, dass grundsätzlich die Möglichkeit besteht, durch den Einsatz hochfrequenter elektrischer Felder eine Weizenentwesung durchzuführen. In relativ trockenem Getreide (Wassergehalt bis etwa 13 %) wurden bei Feldstärken von 180 kV/m und einer Expositionszeit von 8 s Kornkäfer-Imagines (*Sitophilus granarius* L.) sicher abgetötet. Die dabei auftretende Miterwärmung des Weizens betrug nur 15 bis 20 Grad und dürfte deshalb für die Getreidequalität wenig problematisch sein. Dadurch bedingte, im Vergleich zu anderen Verfahren hohe Energiekosten sollten in Anbetracht der zukünftig höher zu bewertenden ökologischen Vorteile der HF-Behandlung zunächst unberücksichtigt bleiben.

Bei den im Rahmen dieser Arbeit labormäßig durchgeführten HF-Behandlungen von feuchterem Getreide sind jedoch eine Reihe von Problemen aufgetreten.

Als obere Grenze für die Lagerfähigkeit des Getreides gilt ein Weizenwassergehalt von 15 %. Aus wirtschaftlichen Gründen wird genau dieser Wert von den Anlieferern auch angestrebt. Für ein neues Entwesungsverfahren wäre es deshalb wünschenswert, Weizen mit 15 % Wassergehalt sicher verarbeiten zu können.

Zwar sank bei solchen Getreideproben die zum Abtöten von Kornkäfer-Imagines erforderliche Behandlungsfeldstärke auf 150 kV/m, die auftretende Weizen-Miterwärmung stieg aber auf typisch 30 Grad. Sie war zudem starken lokalen Schwankungen unterworfen, wobei Spitzenwerte über 40 Grad gemessen wurden. Derartige Schwankungen eines wichtigen Kennwertes könnten die Zuverlässigkeit einer kommerziellen Behandlungsanlage beeinträchtigen, weil je nach Einstellung entweder eine Gefährdung der Weizenqualität eintritt oder das Behandlungsergebnis infragegestellt wird.

Dabei waren mit solchen Behandlungen noch keine ausreichend abtötenden Wirkungen auf die Brutstadien des Kornkäfers zu erzielen, so dass in der Praxis für gegebene Weizenpartien eine mehrfache Anwendung des Verfahrens im Generationen-Abstand der Schädlinge erfolgen müßte.

Völlig inakzeptabel für ein kommerzielles Verfahren sind die in der Versuchseinrichtung wiederholt beobachteten Hochspannungsüberschläge im Getreide, deren Auftretswahrscheinlichkeit mit der Kornfeuchtigkeit und der Behandlungsfeldstärke zunahm. Eine tragfähige technische Lösung dieses Problems steht noch aus.

HF-Generatoren sind bis zu HF-Leistungen von etwa 200 kW handelsüblich. Auf den experimentellen Ergebnissen basierende überschlägige Berechnungen unter Annahme einer Kornfeuchtigkeit von 15 % ergaben, dass bei einem Einsatz eines solchen 200 kW-Generators etwa 12 to Weizen je Stunde behandelt werden können. Verglichen mit den bei Speicheranlagen üblichen Umschlaggeschwindigkeiten von mindestens 50 to je Stunde (z.B. Westhafen Berlin) erscheint eine solche Behandlungsleistung als gering.

Insgesamt kann eingeschätzt werden, dass mit den durchgeführten Untersuchungen wichtige Aussagen zur Nutzung der HF-Energie bei der Getreideentwesung erarbeitet werden konnten. Für einen kommerziellen Einsatz dieses Verfahrens sind jedoch noch intensive, weiterführende Forschungs- und Entwicklungsarbeiten durchzuführen. Besonders bei der technisch/technologischen Umsetzung der gewonnenen Erkenntnisse sind noch sehr schwierige Problemlösungen notwendig. Eine schnelle Umsetzung der Projektergebnisse in ein zuverlässiges und ökonomisches Verfahren zur ökologischen Schädlingsbekämpfung erscheint auf der Basis der Arbeitsergebnisse nicht erreichbar zu sein.

8. Literaturverzeichnis

- [1] Marketing Research Report No. 455
Effects of High-Frequency Electric Fields on Certain Species of Stored-Grain **Insects**
Market Quality Research Division, Agricultural Marketing Service
U.S. Department of Agriculture, March 1961
- [2] S.O.Nelson and W.K. Whitney
Radio-Frequency Electric Fields for Stored Grain Insect Control
Transactions of the ASE (Americ. Soc. of Agricult. Engineers) 1960
- [3] S.O.Nelson, L.E. Stetson, J.J. Rhine
Factors Influencing Effectiveness of Radio-Frequency Electric Fields for Stored-**Grain**
Insect Control
Transactions of the ASE 1966
- [4] G. Benz
Entomologische Untersuchungen zur Entwesung von Getreide mittels
Hochfrequenz
Alimenta; No. 14/1975 S.11-15
- [5] Zhang Congzhong, Ye Bingyuan, Shi Yuping
Studies on the effects of high frequency disinfection in controlling stored grain
insects
Acta phytopylacica sinica (China), ISSN 0577-7518, 1979, v.6(3)p. 51-58
- [6] Zum Stand der Entkeimung von Gewürzen mittels Mikrowellen und Hochfrequenz-
eine Alternative zur Ethylenoxyd-Begasung oder Bestrahlung?
SozEp-Hefte 4/1990
Institut für Sozialmedizin und Epidemiologie des Bundesgesundheitsamtes
- [7] Halverson, Burkholder, Bigelow u.a.
High-Power Microwave Radiation as an Alternative Insect Control Method for
Stored Products
Journal of Economic Entomology Vol 80, no.6 (received 2.11.1995)
- [8] Halverson, Plarre, Burkholder, Bigelow u.a.
Effects of the SHF and EHF Microwave Energy on the Mortality of Sitophilus
Zeamais in Soft White Wheat
ASAE Meeting Presentation, Paper No. 963013, July 1996
- [9] J. Kalina, V. Fric, S. Has
Dezinsekce skladovaneho obili vysokofrekvencni energii
Zemedelska technika, 12 (1966).6, S.359-370
- [10] F. Fleurat-Lessard
Physical measures with hot air or high frequencies against insects of grains and cereal
products
Bulletin Technique d'Information No. 349/1980, p. 345-352
- [11] D.L. Sharma, S. Singh
To Determine the Effect of High Frequency Electric Current in Controlling Rust Red
Flour Beetle
Agricultural and Biological Research, 8(2). 1992. 67-71

- [12] C.Adler,C.Reichmuth
Der Kornkäfer *Sitophilus granarius* L., Coleoptera, Curculionidae, seine Biologie und seine Bekämpfung im Getreide, insbesondere mit modifizierten Atmosphären
Kommissionsverlag Paul Parey, Berlin und Hamburg 1988
- [13] R. Plarre, S. Halverson, W.Burkholder, T. Bigelow, M.Misenheimer
Einsatz von energiereichen hochfrequenten Mikrowellen zur selektiven Bekämpfung von Schadinsekten im Getreide (Vorratsschutz)
Druckschrift zu Vortrag Internationale Entomologentagung Basel, März 1999
- [14] Dr.K.Münzing
Untersuchungen zur Einführung thermischer Vorratsschutzverfahren bei Getreide
Die Mühle + Mischfüttertechnik, 133. Jahrgang Heft 11, 14. März 1996