Mitteilungen aus der Biologischen Bundesanstalt
für Land- und Forstwirtschaft
Berlin-Dahlem

Heft 239 Februar 1988

Der Kornkäfer Sitophilus granarius L., Coleoptera, Curculionidae, seine Biologie und seine Bekämpfung im Getreide, insbesondere mit modifizierten Atmosphären

Von
Cornel Adler und Dr. Christoph Reichmuth

Biologische Bundesanstalt für Land- und Forstwirtschaft,
Institut für Vorratsschutz, Berlin-Dahlem

Berlin 1988

Herausgegeben
von der Biologischen Bundesanstalt für Land- und Forstwirtschaft
Berlin-Dahlem

Kommissionsverlag Paul Parey, Berlin und Hamburg
Lindenstraße 44-47, D-1000 Berlin 61

ISSN 0067-5849 ISBN 3-489-23900-8

CIP-Titelaufnahme der Deutschen Bibliothek
Adler, Cornel:
Der Kornkäfer Sitophilus granarius L., Coleoptera, Curculionidae, seine Biologie und seine Bekämpfung im Getreide, insbesondere mit modifizierten Atmosphären / von Cornel Adler u. Christoph Reichmuth. Hrsg. von d. Biolog. Bundesanst. für Land- u. Forstwirtschaft Berlin-Dahlem. – Berlin; Hamburg: Parey [in Komm.] 1988.
(Mitteilungen aus der Biologischen Bundesanstalt für Land- und Forstwirtschaft Berlin-Dahlem; H. 239)
ISBN 3-489-23900-8)
NE: Reichmuth, Christoph:; Biologische Bundesanstalt für Land- und Forstwirtschaft <Berlin, West; Braunschweig>: Mitteilungen aus der . . .

© Biologische Bundesanstalt für Land- und Forstwirtschaft
Das Werk ist urheberrechtlich geschützt. Die dadurch begründeten Rechte, insbesondere die der Übersetzung, des Nachdrucks, des Vortrages, der Entnahme von Abbildungen, der Funksendung, der Wiedergabe auf photomechanischem oder ähnlichem Wege und der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen, bleiben, auch bei nur auszugsweiser Verwertung, vorbehalten. Werden einzelne Vervielfältigungsstücke in dem nach § 54 Abs. 1 UrhG zulässigen Umfang für gewerbliche Zwecke hergestellt, ist an den Verlag die nach § 54 Abs. 2 UrhG zu zahlende Vergütung zu entrichten, die für jedes vervielfältigte Blatt 0,40 DM beträgt.

1988 Kommissionsverlag Paul Parey, Berlin und Hamburg, Lindenstraße 44-47, D-1000 Berlin 61.
Printed in Germany by Arno Brynda GmbH, 1000 Berlin 62.

Beilagenhinweis: Dieser Ausgabe liegt der Prospekt *"Gesunde Pflanze"* des Verlages Paul Parey, Berlin und Hamburg, bei.

INHALT

1. Einleitung.....5
2. Historischer Rückblick.....7
3. Biologie des Kornkäfers.....8
3.1 Morphologie und Anatomie.....9
3.2 Entwicklung 12
3.3 Verhalten.....18
3.4 Atemphysiologie.....21
4. Bekämpfung.....24
4.1 Chemische Verfahren.....24
4.2 Biologische Verfahren.....32
4.3 Physikalische Verfahren.....35
4.4 Modifizierte Atmosphären.....38
5. Praktischer Teil.....46
5.1 Zucht der Versuchstiere.....47
5.2 Material und Methoden.....49
5.3 Ergebnisse und Diskussion.....57
5.4 Fehlerdiskussion.....76
6. Schlußbetrachtung.....77
7. Zusammenfassung/Summary.....78
8. Danksagung.....79
9. Anhang.....80
10. Literatur.....88

1. EINLEITUNG

Die Gefährdung ökologischer Gefüge, die hohen Kosten bei der Entwicklung neuer chemischer Schädlingsbekämpfungsmittel, Resistenzbildung bei Insekten, das Problem der Rückstandsbildung in behandeltem Lagergut sowie ein gestiegenes Umwelt- und Ernährungsbewußtsein der Verbraucher lenken das Interesse zunehmend auf die Erforschung umweltschonender biologischer, physikalischer und anderer Verfahren zur Schädlingsbekämpfung im Vorratsschutz.

In der vorliegenden Arbeit werden nach einem Überblick über die Biologie des Kornkäfers Sitophilus granarius L. verschiedene Schädlingsbekämpfungsverfahren beschrieben und über die Methode der Getreidelagerung unter modifizierten Atmosphären und die Anwendung dieser Methode zur Bekämpfung des Kornkäfers im Bereich des Vorratsschutzes berichtet.

Viele Rohstoffe und Produkte der Lebensmittel- und Futtermittelindustrie können von Vorratsschädlingen befallen werden. Ausgenommen sind davon lediglich Waren mit extrem einseitiger Zusammensetzung wie reine Kohlenhydrate (z.B. Zucker) oder reine Fette, die wegen der fehlenden Proteine für die Entwicklung von Tieren ungeeignet sind. Die im folgenden Text als Vorräte bezeichneten Stoffe sind lagerfähige Erzeugnisse pflanzichen Ursprungs wie Getreide, Reis, Mais, Hülsenfrüchte, Nüsse, Kaffee, Tee und Kakao sowie getrocknete pflanzliche Drogen, Gewürze und Heilkräuter. Da die Lagerfähigkeit eines Lebensmittels meist durch dessen Wassergehalt bestimmt wird, gehören nach dieser Definition auch Trockenobst und Kartoffelmehl zu den Vorräten, nicht aber Obst, Kartoffeln oder Rüben im Rohzustand.

Die meisten Vorratsschädlinge sind heute durch internationalen Handel zu Kosmopoliten geworden. Dies wird begünstigt durch den Schutz vor jahreszeitlichen Einflüssen wie Temperatur- und Luftfeuchte-Schwankungen, der in ausreichend großen Vorräten entsteht. Außerdem bietet ein Vorratslager nicht nur Abschluß gegen ein widriges Klima, sondern auch gegen mögliche natürliche Feinde. Zu den wirtschaftlich bedeutenden echten Vorratsschädlingen, die ihren gesamten Lebenszyklus in den Vorräten verbringen,

zählt man heute etwa 60 Käferarten und je etwa 10 Motten-, Milben- und Staublausarten. Diese Arthropoden haben die Fähigkeit, ohne direkte Wasserzufuhr auszukommen. Ihre einzige Wasserquelle ist die in den Lebensmitteln enthaltene Feuchtigkeit und das durch Oxidation von Kohlenhydraten entstehende Wasser (WOHLGEMUTH 1986).

Auch einige Vogelarten und Ratten sind potentielle Vorratsschädlinge. Diese Tiergruppen verbringen aber nicht ihren gesamten Lebenszyklus in den Vorräten und werden hier nur am Rande erwähnt.

Unter den vorratsschädlichen Insekten wird der zur Familie der Rüsselkäfer gehörende Kornkäfer besonders in mild gemäßigten Klimaten wie Westeuropa und Nordamerika als wichtigster Getreideschädling betrachtet, während in tropischen und anderen warmen Klimazonen die Schwesterarten Sitophilus oryzae L. (Reiskäfer) und Sitophilus zeamais Motsch. (Maiskäfer) im Vordergrund stehen (ZACHER und LANGE 1964, LONGSTAFF 1981). Im Gegensatz zu Reis- und Maiskäfer kommt der Kornkäfer in freier Natur heute nicht vor, ist jedoch mit seiner synanthropen Lebensweise in allen Getreide anbauenden Ländern verbreitet.

Vom Kornkäfer befallenes Getreide erkennt man an den unterschiedlich großen und unregelmäßig begrenzten Löchern im Getreidekorn, die durch Fraß und Schlupf der Käfer entstehen (ZACHER und LANGE 1964). Außerdem findet man an den Körnern Fraßmehl, das von den sich im Korn entwickelnden Larven nach außen abgegeben wird. Auch ein erhöhter Kohlendioxidgehalt in dem das Getreide umgebenden Gasraum ist ein Anzeichen für Schädlingsbefall (OXLEY 1948, HOWE and OXLEY 1952, SINGH et al. 1977).

Ein starker Schädlingsbefall führt zu einer Erhöhung von Temperatur und Feuchtegehalt im Getreidelager, da die Tiere durch Oxidation von Kohlenwasserstoffen Wasser erzeugen. Neben einer Beschleunigung der Käferentwicklung begünstigt dies die mikrobielle Entwicklung, d.h. eine Ausbreitung von Fäulnisbakterien und Schimmelpilzen. Dadurch kommt es zur Verfärbung des Korns sowie zu geruchlichen und geschmacklichen Beeinträchtigungen. Der Kornkäfer kann außerdem als Vektor Bakterien verschleppen, von denen einige pathogen für Menschen sind (HAREIN and DE LAS CASAS 1968).

Während sich zunächst "Käfernester" bilden, in denen

Feuchtigkeit, Fraßmehl, Wärme und Schimmel zur Verklumpung des Korns führen, kann es bei ungünstigen Bedingungen rasch zu einem Verlust großer Mengen bis zur Einbuße des gesamten Lagergutes kommen.

2. HISTORISCHER RÜCKBLICK

Erst seit relativ kurzer kulturhistorischer Zeit entstanden durch das Seßhaftwerden des Menschen (vor ca. 100.000 Jahren), durch die Entwicklung des Ackerbaus und der Vorratshaltung (vor ca. 10.000 Jahren) günstige Voraussetzungen für die Entwicklung von Vorratsschädlingen. Von den potentiellen Nahrungskonkurrenten konnten sich seitdem Tiere mit entsprechenden ökologischen Valenzen nun von den Abfällen des Menschen bzw. seinen Vorräten ernähren (STEIN 1985).

Die ältesten uns bekannten Getreidelager größeren Umfanges wurden zur Zeit der Mittleren Dynastie im alten Ägypten angelegt. Aus dieser Zeit (3. Jahrtausend v.Chr.) stammen auch die frühesten Funde von Sitophilus granarius. Bruchstücke und ganze Tiere fanden sich in Weizen aus den Grabstätten bei Saqqarah (BUCKLAND 1981, LEVINSON und LEVINSON 1985). Vor der Entwicklung zum Vorratsschädling lebte der Kornkäfer möglicherweise auf Gräsersamen oder Eicheln (HOWE 1965, SWATONEK 1975a). Durch Handel und Kriege wurde in der darauf folgenden Zeit neben anderen Vorratsschädlingen auch der Kornkäfer weit verbreitet. Der älteste Fund in Europa stammt aus Italien (Herculaneum, 79 v. Chr.). Die archäologischen Funde deuten darauf hin, daß Sitophilus granarius im ersten Jahrhundert unserer Zeitrechnung über das Römische Reich in Europa verteilt wurde (BUCKLAND 1981). Da das römische Heer große Vorräte mitführte, und andererseits der Ackerbau in vielen Regionen Europas gerade erst anfing, scheint diese Vermutung einleuchtend.

Im deutschen Sprachraum ist der Kornkäfer seit langer Zeit bekannt und gefürchtet, wofür die große Zahl an landläufigen Bezeichnungen spricht: Schwarzer Kornkäfer, Schwarzer Kornbohrer, Schwarzer oder Brauner Kornwurm, Weibel oder Wippel, Reider oder Kornreuter, Haferrüssel-

käfer, Kornkrebs, Klander oder Calandre. Aus dem Altertum stammt die Bezeichnung Curculio (ANDERSEN 1934).

3. BIOLOGIE DES KORNKÄFERS

Sitophilus granarius (Abb. 1) ist als Imago zwischen 2,3mm und 5mm groß, wobei die Körpergröße von Faktoren wie Temperatur, Feuchtegehalt und Größe der der Larve zur Verfügung stehenden Nahrung abhängt. Bei höheren Temperaturen entwickeln sich etwas kleinere Käfer als bei niedrigen Temperaturen, wo die Entwicklung länger dauert. Sehr kleine Tiere schlüpfen aus Kornbruch, sog. Schmachtkorn und Getreidekörnern, in denen sich bereits einmal ein Käfer entwickelt hat. Der meist rotbraune

Abb. 1 Sitophilus granarius Käfer auf Weizen.

Farbton eines frisch geschlüpften Tieres kann bis zu glänzend schwarz nachdunkeln (ANDERSEN 1934, ZACHER und LANGE 1964).

Der Kornkäfer kann sich ernähren und vermehren in Weizen, Roggen, Hafer, Gerste, Mais, geschältem Reis, Teigwaren, Eicheln und Buchweizen. Er kann sich nur ernähren aber nicht vermehren in Mehl, Kleie und Schrot. Erbsen, Bohnen, Lupinen, Süßlupinen, Mandeln, Erdnüsse und Sojabohnen frißt er zwar an, stirbt in diesen Lebensmitteln aber nach kurzer Zeit. Er frißt nicht an Kakaobohnen, ungebranntem Kaffee und ungeschältem Reis (WEIDNER 1982).

3.1 MORPHOLOGIE UND ANATOMIE

Eine umfassende Beschreibung von Morphologie und Anatomie findet sich in den Arbeiten von MÜLLER (1928) und KHAN (1949).

Cephalon: Der Kopf von Sitophilus granarius ist nach vorne (distal) in ein schmales, im Querschnitt rundes Rostrum verlängert. Dieses ist etwa doppelt so lang wie der übrige Kopf und mißt drei Viertel der Länge des Thorax (KHAN 1949). Apikal sitzen dem Rostrum die Mandibeln auf, die mit ihren je vier Chitinzähnen die eigentlichen Schneide- und Bohrwerkzeuge darstellen. Dicht cranioventral vor den Augen sitzen an der Basis des Rostrums die geknieten Antennen in ausgeprägten Antennengruben. Sie bestehen aus einem großen Basalsegment und einer doppelt so langen siebengliedrigen Geißel. Das letzte Antennalsegment ist zu einem Kolben verdickt und distal mit einem feinen dichten Haarsaum besetzt. Es trägt die olfaktorischen Sinneszellen (LEVINSON und KANAUJIA 1982). In ihrer Länge erreichen die Antennen fast die Spitze des Rostrums. Sie werden bei Lokomotion stark hin und her bewegt.

Thorax: Bei Sitophilus granarius ist das zweite Flügelpaar reduziert. Im Gegensatz zur sehr ähnlichen Schwesterart Sitophilus oryzae, dem Reiskäfer, ist der Kornkäfer daher flugunfähig. Dies äußert sich morphologisch auch in Modifikationen der flügeltragenden Segmente, besonders des Metatergums, aber auch der Pleuriten. Der Prothorax bewegt sich frei zu dem von ihm weit überlappten

Mesothorax. Tergit, Pleuriten und Sternit des Prothorax sind wie bei anderen Rhynchophoren miteinander verschmolzen. Das vom Prothorax gebildete Pronotum ist lang und cranial etwa halb so breit wie caudal. Nach vorne laufen die lateralen Anteile in einen kleinen Kragen aus, in den der Kopf teilweise zurückgezogen werden kann. Das Pronotum ist dicht punktiert mit Reihen tiefer runder Grübchen, in deren Zentrum je eine feine Borste steht.

Abdomen: Das Abdomen ist länglich, oval im Querschnitt und in seinem caudalen Teil leicht nach unten gekrümmt. Das erste Paar Stigmen (Spiraculi) liegt nicht lateral, sondern befindet sich in dem feinen Intersegmentalhäutchen dorsal zwischen Postnotum und dem breiten 1. Tergiten des Abdomens. Die Stigmen 2-6 liegen in den membranösen Epipleuriten, das 7. Paar Stigmen befindet sich in den stark sklerotisierten 7. Epipleuriten, die mit dem 7. Tergiten verschmolzen sind und mit ihm zusammen das Propygydium bilden. Nach ABBOT (1929) besitzen die abdominalen Stigmen des Kornkäfers keine Muskulatur. Weder in lebenden noch in toten Exemplaren konnte er geschlossene Stigmen finden. Die Tergiten 1-6 erscheinen im Gegensatz zum Propygydium hautartig und sind von den Elytren bedeckt.

Geschlechtsunterschiede: Sitophilus granarius zeigt einen relativ ausgeprägten Sexualdimorphismus. Der Rüssel des Weibchens ist länger, schmaler und gleichmäßiger gekrümmt als der des Männchens (MÜLLER 1928, ZACHER und LANGE 1964, SWATONEK 1975a). Nach TOMBES (1971) beträgt die mittlere Länge des Rostrums, gemessen vom Vorderrand der Augen bis zur Spitze der Mandibeln, beim Weibchen 1,03mm, beim Männchen 0,87mm. Der Durchmesser des Rostrums ist 0,15mm bzw. 0,18mm. Außerdem sind die Abdominalsternite 6 und 7 des Männchens meist deutlich nach ventral abgeknickt (HALSTEAD 1963, SWATONEK 1975a) (Abb. 2). TOMBES (1971) maß die Krümmung des letzten Abdominalsegments zur Körperlängsachse. Bei Männchen betrug der gemessene Winkel zwischen 35 und 45 Grad. Als Resultat der Krümmung ist das Pygydium des Männchens von ventral sichtbar. Beim Weibchen ist der Grad der Krümmung recht unterschiedlich und hängt von der Entwicklung der inneren Organe ab (TOMBES 1971). LUM und BAKER (1975) berichten, daß die Länge der Basalgrube auf dem 6. Abdominalsterniten beim Männchen ein Viertel bis ein Drittel und beim Weibchen

Abb. 2 Sexualdimorphismus bei Sitophilus granarius, oben ein männliches, unten ein weibliches Tier.

ein Achtel bis ein Fünftel der gesamten Sternitlänge beträgt. Nach KHAN (1949) ist die caudale Naht des Propygydiums des Männchens breiter als die des Weibchens und befindet sich von ventral betrachtet auf einer Linie mit der hinteren Kante des sechsten Abdominalsterniten. Außerdem ist die Form des letzten Abdominaltergiten bei Weibchen V-förmig, bei Männchen dagegen abgerundet. Dazu muß allerdings das Pygidium vorsichtig angehoben bzw. ein leichter Druck auf die Ventralseite unter dem Pygidium ausgeübt werden. Dadurch wird der letzte Tergit vorgeschoben der normalerweise unter dem Pygidium verborgen liegt (RICHARDS 1947). Hebt man die rechte Elytre eines Kornkäfers an, so ist nach TOMBES (1971) die skleroti-

sierte, durch die Körperwand scheinende Spermatheka des Männchens ein weiteres sicheres Sexualmerkmal.

Mit der funktionellen Anatomie des Geschlechtsapparates beschäftigt sich die Arbeit von KHAN und MUSGRAVE (1969). Die Anatomie des Verdauungssystems und des Geschlechtsaparates ist in der Arbeit von MÜLLER (1928) ausführlich besprochen. Morphologie und Anatomie der Larve behandeln MÜLLER (1928) und HOSSAIN und VERNER (1979).

3.2 ENTWICKLUNG

Die Entwicklung des Kornkäfers verläuft vom Ei bis zum Schlupf der Imago im Innern des Getreidekorns. Der fertige Käfer bleibt noch einige Tage im Korn, bevor er sich ausgefärbt und ausgehärtet aus dem Korn herausfrißt.

Das Ei ist opalglänzend, durchscheinend, von ovaler Form, 0,5mm bis 0,8mm lang und 0,25mm bis 0,35mm breit (Abb. 3). Zur Eiablage bohrt das Weibchen mit seinen Mundwerkzeugen ein Loch in das Korn, legt ein Ei hinein und verschließt das Loch mit einem wachsartigen Sekret. Dieser Sekretpfropfen schützt das Ei vor Austrocknung und hält es gleichzeitig an seiner Stelle. Durch den weißlichen, leicht glänzenden Pfropfen, der sich von der Kornoberfläche kaum abhebt, ist die Eiablagestelle mit bloßem Auge kaum sichtbar. Die aus dem Ei schlüpfende Larve ist spindelförmig, fußlos und weiß (Abb. 4). Ihre Haut ist runzelig, weich und gliedert sich in Kopfkapsel, drei Brust- und neun Hinterleibsringe. An ihrem bräunlichen Kopf sitzen die kräftigen chitinisierten Mandibeln, mit denen sie zunächst einen Gang, später eine runde Höhle in den Mehlkörper des Korns nagt. Die Larve häutet sich in ihrer Fraßhöhle vier mal und hat vor ihrer letzten Häutung schließlich eine Länge von durchschnittlich 3-4mm (MÜLLER 1928, KHAN 1949).

Nach der vierten Larvalhäutung entsteht die Vorpuppe, die im Gegensatz zur kurzen gedrungenen Larve etwas gestreckt erscheint. Diese häutet sich ihrerseits nach kurzer Zeit, bei 25 Grad Celsius nach einem Tag (ZACHER und LANGE 1964), zur elfenbeinfarbenen Puppe (Abb. 5).

Die Puppe läßt schon alle Teile des fertigen Käfers erkennen und ist normalerweise 3,8mm bis 4,3mm lang. Das

Abb. 3 Ei im Weizenkorn; über dem Ei ist der Verschluß-stopfen schwach zu erkennen.

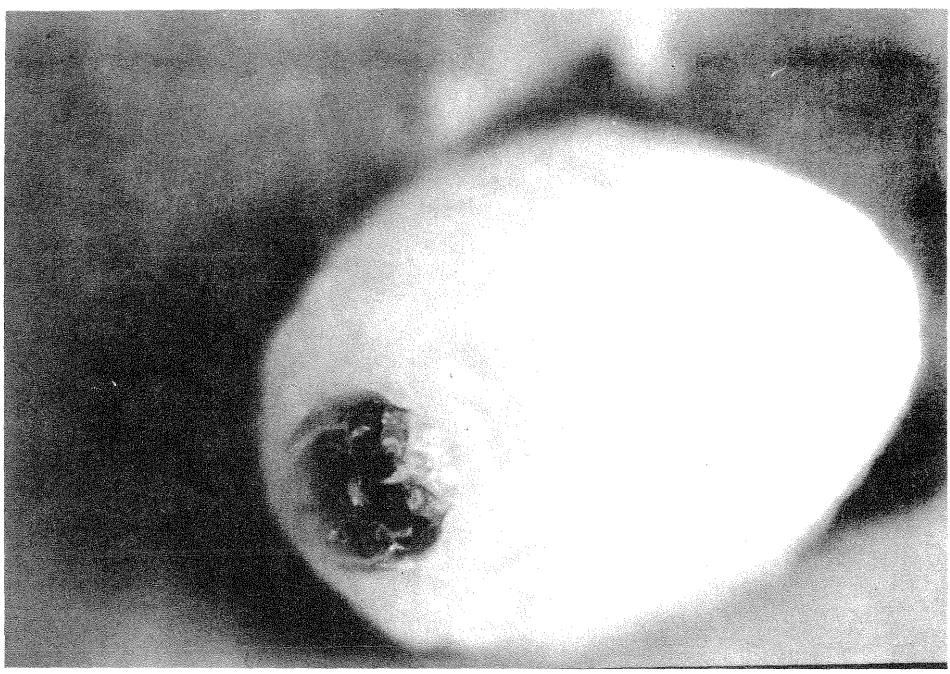


Abb. 4 Viertes Larvalstadium von Sitophilus granarius.

glasartig erscheinende Rostrum ist an den Thorax geklappt und die Beine liegen eng am Körper an. Die Puppe liegt immer in Längsrichtung des Korns (MÜLLER 1928).

Aus der Puppe schlüpft der fertige Käfer, der noch einige Zeit im Korn bleibt, bevor er sich nach außen durchfrißt (Abb. 6), um zu kopulieren und selbst Körner anzubohren. Kornkäfer-Weibchen sind nach Erkenntnissen von STUBBS (1982) gleich nach dem Schlupf paarungsbereit. Nach einer gewissen Präovipositionszeit kommt es dann zur Eiablage. Stubbs gibt für die Dauer der Präovipositionsperiode (bei 20°C und 70% Luftfeuchte) einen Zeitraum von

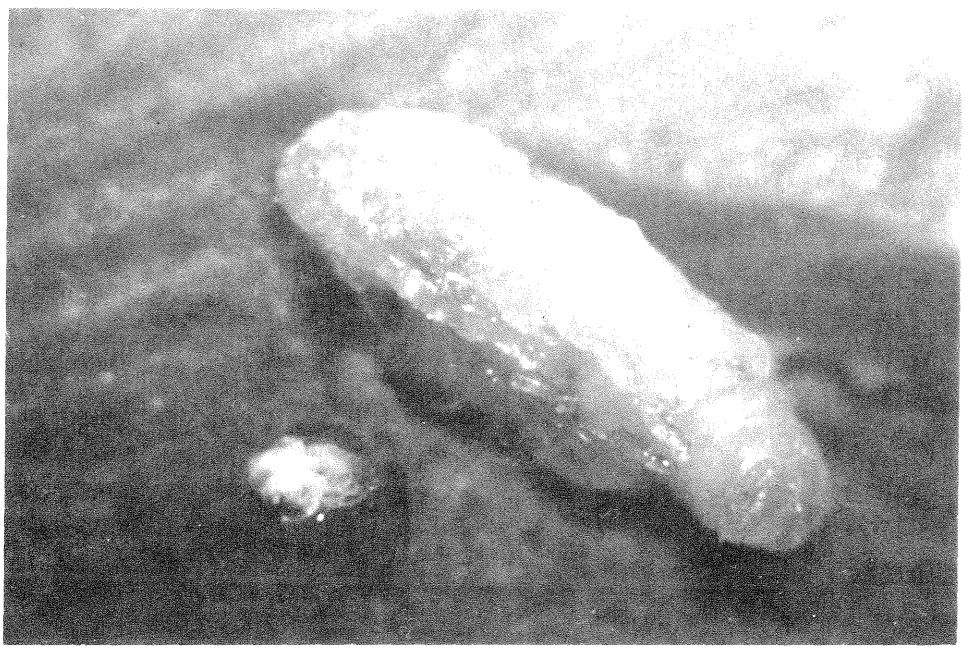


Abb. 5 Puppe des Kornkäfers, links darunter das Exuvium des letzten Larvenstadiums und der Vorpuppe.

etwa 14 Tagen an, wenn die Begattung zwischen dem 0. und 10. Tag nach Schlupf stattgefunden hat. Bei 25 Grad Celsius und 70 Prozent Luftfeuchte ist dagegen nach SWATONEK (1975a) eine optimale Eiablagerate schon ab dem 6. Tag nach Schlupf möglich. In den Versuchen zur vorliegenden Arbeit wurden bei der Nachzucht behandelter Kornkäfer-Brutstadien geschlüpfte Käfer wöchentlich entfernt. Trotzdem kam es in den meisten Fällen, einige Wochen nach Schlupf der letzten die Behandlung überlebenden Käfer, zu einer zahlenstarken Nachfolge-Generation. Dies spricht dafür, daß bei 25 Grad Celsius und 70 Prozent Luftfeuchte die Präovipositionsperiode kürzer ist als 7 Tage. Frisch geschlüpfte Käfer

Abb. 6 Aus dem Korn schlüpfende Käfer. Abgebildet sind hier Tiere, die während des Schlupfvorganges abstarben.

sind meist rötlich braun und dunkeln bald bis zu fast schwarzer Farbe nach. Die Dauer der Entwicklung des Kornkäfers ist stark abhängig von Temperatur und Luftfeuchte. Bei Temperaturen von weniger als 10-11 Grad Celsius und mehr als 32-34 Grad Celsius findet keine Entwicklung mehr statt (MÜLLER 1928, EASTHAM and SEAGROVE 1947, KHAN 1949, ZACHER und LANGE 1964). In Klimabereichen, die eine Entwicklung ermöglichen, gilt, daß mit steigender Temperatur und steigender Substratfeuchte die Entwicklungszeit abnimmt.

Dieser Zusammenhang wird verdeutlicht durch die Abbildungen 7 und 8. Der doppelt logarithmisch wiedergegebene Funktionsverlauf (Entwicklungszeit gegen Temperatur) deckt sich weitgehend mit den Daten von BODENHEIMER (1927), der in seiner Arbeit allerdings keine Angaben zur Kornfeuchte seiner Zuchten macht.

Abb. 7 Dauer der Kornkäferentwicklung von der Eiablage bis zum Schlupf der Imago aus dem Korn bei 70% Luftfeuchte

A = ANDERSEN (1934)
E = EVANS (1977)
K = KHAN (1949)
O = OXLEY (1948)
R = RICHARDS (1947)
S = SHARIFI and MILLS (1971)
Z = ZACHER und LANGE (1964)

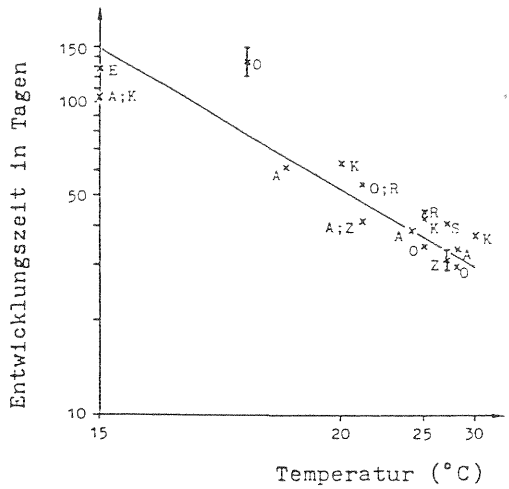
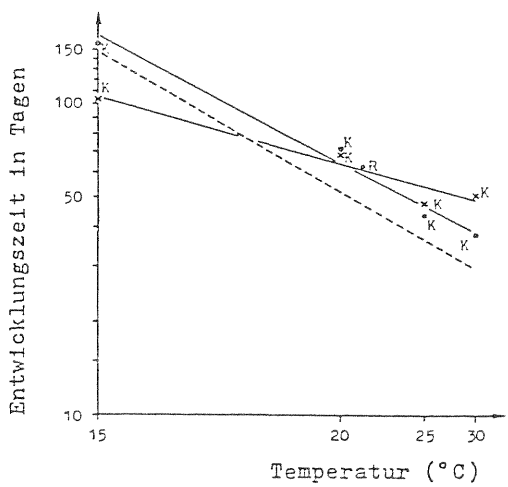


Abb. 8 Dauer der Kornkäferentwicklung von der Eiablage bis zum Schlupf der Imago aus dem Korn bei verschiedenen Luftfeuchtegehalten



Es wird deutlich, daß bei geringer Luftfeuchte (50%, °) die Entwicklungszeit stets länger ist als bei 70% Feuchte (---, siehe auch Abb. 7).

Bei niedrigen Temperaturen führen hohe Luftfeuchtegehalte (90%, ×) zu einer beschleunigten Entwicklung, während sie bei Temperaturen ab ca. 18 Grad Celsius möglicherweise durch Schimmelbildung im Getreide die Entwicklung verzögern (KHAN 1949).

Auch die Lebensdauer ist abhängig von Temperatur und Luftfeuchte, wobei mit steigender Temperatur die durchschnittliche Lebensdauer abnimmt. RICHARDS (1949) untersuchte 39 Kornkäferweibchen und kam bei 25 Grad Celsius und 70 Prozent Luftfeuchte auf eine mittlere Lebensdauer von 174,5 Tagen (min. 80, max. 279 Tage).

3.3 VERHALTEN

Phototaxis/Hygrotaxis: Sitophilus reagiert im allgemeinen negativ phototaktisch und negativ hygrotaktisch (KLEINE 1929, ZACHER und LANGE 1964). PERTTUNEN (1972) weist allerdings nach, daß bei entsprechender Austrocknung der Tiere diese Verhaltensweisen auch in ihr Gegenteil umschlagen können.

Thigmotaxis: Der Kornkäfer hat das Bestreben, sich zwischen Körner oder in enge Spalten zurückzuziehen. In der gleichen Menge Weizen werden mehr Eier abgelegt, wenn sich das Korn in einem hohen engen Rohr befindet, als wenn es flach ausgebreitet den legebereiten Weibchen angeboten wird (ANDERSEN 1934).

Thermotaxis: Bei Temperaturen bis zu 28 Grad Celsius bewegt sich der Kornkäfer in einem Temperaturgradienten immer in Richtung der höheren Temperatur.

Geotaxis: Aus Berichten von Lagerhaltern ist bekannt, daß sich Sitophilus granarius, zumindest bei mechanischer Beunruhigung, negativ geotaktisch verhält, also immer zum höchsten Punkt in einem Getreidehaufen strebt. Diese Verhaltensweise wird in der Großlagerhaltung genutzt , um einen Befall früh zu erkennen. Dazu schüttet man an der Getreideoberfläche kleine Häufchen (ca. 30cm) kegelförmig auf, in deren Spitze ein Becherglas versenkt wird, sodaß der Glasrand mit der Kornoberfläche abschließt. Die nach oben strebenden Käfer fallen so in das Glas und kommen an den glatten staubigen Glaswänden nicht mehr hinauf (Mitteilung Berliner Hafen- und Lagerhausgesellschaft, BeHaLa 1987).

Thanathose: Auf mechanische Beunruhigung reagieren Kornkäfer meist mit kurzzeitigem Todstellen (SWATONEK 1975a).

Futterpräferenzen: KANAUJIA und LEVINSON (1981) stellen fest, daß länger gelagerter Weizen gegenüber frischem Korn bevorzugt wird.

Aggregationspheromone: Die Arbeit von FAUSTINI et al. (1982) weist auf die Existenz von Aggregationspheromonen hin, die, so scheint es, ausschließlich von Kornkäfermännchen abgegeben werden. Ein hoher Anteil der Versuchstiere orientierte sich bei Verhaltensexperimenten in Richtung des Duftstoffextrakts männlicher Käfer. Die Attraktanz dieses Pheromons wirkt auf Männchen und Weibchen vor und nach der Kopulation gleichermaßen. Zu einem ähnlichen Ergebnis kamen zuvor PHILLIPS und BURKHOLDER (1981) bei Versuchen mit dem Reiskäfer Sitophilus oryzae.

Paarungsverhalten: Sexuallockstoffe konnten bisher nicht festgestellt werden (SURTEES 1964c, 1964d, 1965). SURTEES (1965) entdeckte allerdings eine Verhaltensweise, die möglicherweise die Geschlechterfindung paarungsbereiter Käfer erleichtert: Er fand einen signifikant größeren Anteil an ungepaarten als gepaarten Sitophilusweibchen auf der Kornoberfläche.

Bei der Kopulation reitet das Männchen auf dem Weibchen. Dieses verhält sich dabei ruhig oder kriecht auf der Kornoberfläche umher. Beide Tiere bewegen während der Kopulation ihre Antennen. Es kommt auch vor, daß sich bei der Kopulation nur die Abdomina von Männchen und Weibchen berühren (KHAN 1949).

Oviposition: Über zur Eiablage bevorzugte Stellen am Korn gehen die Beobachtungen und Meinungen auseinander (ANDERSEN 1934, SWATONEK 1975a, LONGSTAFF 1981, KANAUJIA und LEVINSON 1981), relativ selten scheinen Eier am embryonalen Pol des Weizenkorns abgelegt zu werden (RICHARDS 1947).

Ein Weibchen legt nach der Begattung durchschnittlich etwa 150 Eier, die Höchstzahl kann bis zu 300 Eier betragen. Dabei werden täglich nur ein bis zwei Eier, selten bis zu fünf Eier abgelegt (ZACHER und LANGE 1964). STUBBS (1982) führte Kopulations- und Ovipositionsversuche bei 20 Grad Celsius und 70 Prozent Luftfeuchte durch um festzustellen, wieviele Jungtiere unter diesen Bedingungen pro begattetes fertiles Weibchen schlüpfen. Die Inkubation der Brut fand bei 25 Grad Celsius statt. Stubbs ermittelte als durchschnittliche Nachkommenproduktionsrate für Kornkäferweibchen einen Wert von 1,3 Individuen pro Tag.

Dieser Wert wird nicht beeinflußt durch das Alter des Weibchens bei der Kopulation oder die Anwesenheit von Männchen bei der Eiablage. Falls eine ausreichend große Menge an Getreidekörnern zur Verfügung steht, legen Sitophilus-Weibchen meist pro Korn ein Ei, in große Körner selten auch zwei Eier oder mehr. Gleichzeitig können sich jedoch selten mehr als ein Käfer pro Korn entwickeln, da eine sich entwickelnde Larve mit ihren kräftigen Mandibeln aggressiv auf alle sich bewegenden Körper zustößt, und so durch Kanibalismus meist nur eine Larve überlebt. Es kommt jedoch vor, daß sich Käfer nur in einer Hälfte des Getreidekorns entwickeln (MÜLLER 1928), sodaß die andere Hälfte für ein weiteres Ei zur Entwicklung bleibt.

LEVINSON und KANAUJIA (1982) unternahmen Versuche um festzustellen, welche Substratbedingungen ein Weibchen zur Eiablage stimulieren. Sie benutzten Weizenattrappen aus Kreide, die mit einem konzentrierten wässrigen Weizenextrakt getränkt worden waren. In die Attrappen wurden zwar Eiablagekanäle gebohrt, es wurden jedoch keine Eier abgelegt. Daraus läßt sich schließen, daß 1. ein Medium aus komprimierten Teilchen, 2. die Anwesenheit von Fraßstimulantien, wie sie in wässrigem Weizenextrakt enthalten sind und 3. eine Art von Nährmedium, wie sie zur Entwicklung von Nachkommenschaft geeignet ist, die Voraussetzungen zur Oviposition darstellen. Länger gelagerter Weizen wird gegenüber erntefrischem Weizen zur Eiablage bevorzugt (KANAUJIA und LEVINSON 1980).

EWER (zit. bei RICHARDS 1947) berichtet, daß Weibchen bei der Oviposition solche Weizenkörner ablehnen, die schon mit Brut im 4. Larvenstadium belegt sind. RICHARDS (1947) hält es für wahrscheinlich, daß auch jüngere Larven im Korn bis zu einem bestimmten Grad legebereite Weibchen von der Eiablage abhalten können. Wie ein Weibchen ein belegtes Korn erkennt, scheint bisher noch nicht genau bekannt zu sein. Mögliche Signale für das Weibchen wären z.B. Erschütterung des Korns durch Bewegung und Fraß der Larve, der Geruch der Larve oder des wachsartigen Verschlußstopfens über dem Ei.

Wie andere vorratsschädliche Insekten hat auch der Kornkäfer keine Möglichkeit zur Lautäußerung (WOJCIK 1968).

Mit genetisch-zytologischen Aspekten der Kornkäferbiologie beschäftigt sich die Arbeit von SMITH (1952).

3.4 ATEMPHYSIOLOGIE

Die Respirationsphysiologie vorratsschädlicher Insekten hat besondere Bedeutung, gerade wenn es gilt, die Wirkungsweise verschiedener gasförmiger Schädlingsbekämpfungsmittel aufzuklären. Auch die in dieser Arbeit besprochenen modifizierten Atmosphären sind gasförmige Bekämpfungsmittel. Im Gegensatz zu giftigen Gasen im üblichen Sinn wird bei dem Verfahren der Anwendung modifizierter Atmosphären jedoch das Mischungsverhälnis der in der Vorratslageratmosphäre befindlichen Gase Stickstoff, Sauerstoff und Kohlendioxid durch Verringerung des Sauerstoffanteils so verändert, daß Vorratsschädlinge abgetötet werden (siehe Kapitel 4.4).

Zur Atemphysiologie des Kornkäfers gibt es bisher sehr wenig Literatur. Deshalb werden hier teilweise auch Arbeiten über andere vorratsschädliche Insektenarten angeführt.

CHIBA et al. (1973) beschreiben circadiane Rhythmik im Sauerstoffverbrauch des Reismehlkäfers Tribolium confusum Duv. (Col., Tenebrionidae), einem weiteren Vorratsschädling. Zu dem gleichen Befund kommen GUERRA et al. (1983), welche die Atemphysiologie des Mexikanischen Baumwollkapselkäfers Anthonomus grandis Boh. untersuchen. Wie Sitophilus ist auch Anthonomus ein Rüsselkäfer.

Bei Puppen der Tropischen Speichermotte Ephestia cautella (Wlk.), die über 24 Stunden modifizierten Atmosphären mit 10 Prozent Sauerstoff und hohen Kohlendioxidgehalten (20-89%) ausgesetzt waren, konnte mit steigendem Kohlendioxidanteil in der Atmosphäre ein gleichmäßiger Anstieg an Milchsäure in der Haemolymphe gemessen werden. Zu einem plötzlichen und sehr starken Ansteigen des Lactat-Gehaltes in der Haemolymphe kam es bei Reduzierung des Sauerstoffgehaltes unter 3 Prozent ohne Kohlendioxidzumischung. Der Gehalt an Pyruvat, einem weiteren bei Sauerstoffmangel typischen Stoffwechselprodukt, stieg nur bei einer Sauerstoffkonzentration von unter einem Prozent auf etwa das Doppelte des ursprünglich gemessenen Wertes. Eine Veränderung der Lactat-Dehydrogenase-Aktivität konnte nicht festgestellt werden (NAVARRO und FRIEDLANDER 1975).

Bisher scheint es keine Arbeiten über die Stoffwechselphysiologie des Kornkäfers bei niedrigem Sauerstoff-

angebot zu geben. In einer Atmosphäre ohne Sauerstoff geht Sitophilus in einen Koma-ähnlichen Zustand über, aus dem er aber auch nach einer sehr langen Zeitspanne wieder erwachen kann, sobald ein ausreichendes Sauerstoffangebot besteht. ANDERSEN stellt bereits 1934 fest, daß der Kornkäfer einen Aufenthalt von bis zu zwei Wochen in etwa 19 Grad kaltem Wasser überleben kann.

KASHI (1979) untersuchte Struktur und Funktionsweise von Mitochondrien aus Zellen von Sitophilus granarius. Er stellt fest, daß sie den Mitochondrien von Rattenleberzellen entsprechende Merkmale besitzen.

EVANS stellt fest, daß kälteadaptierte Kornkäfer bei 15 Grad Celsius eine höhere Populationszuwachsrate besitzen als Reiskäfer (EVANS 1977), und daß kälteadaptierte Tiere signifikant weniger Sauerstoff verbrauchen als wärmeadaptierte (EVANS 1979, 1980).

BIRCH (1947) untersuchte die Atemaktivität des Reiskäfers, Calandra (heute Sitophilus) oryzae über dessen gesamten Entwicklungszyklus. Birch stellt fest, daß der Sauerstoff-Verbrauch während der Entwicklung vom Ei zur Vorpuppe ansteigt. Ca. 16 Tage alte Larven verbrauchen bei 30 Grad Celsius und 14 Prozent Kornfeuchte die größte Menge Sauerstoff (26mm3) pro Stunde. Bei der Verpuppung fällt die Menge pro Stunde veratmeten Sauerstoffs stark ab, um dann wieder bis zum Schlupf des adulten Tieres leicht anzusteigen. Der Sauerstoffbedarf der Imago erreicht aber etwa nur ein Fünftel (5,4mm3) der von der älteren Larve veratmeten Sauerstoffmenge (BIRCH 1947).

Nach Messungen von BAILEY (1969) hat Sitophilus granarius etwa die gleiche Sauerstoffverbrauchskurve (Abb. 9). Gemessen wurde jeweils der Sauerstoffverbrauch eines Individuums. Dazu stellte man zunächst durch Röntgenstrahlung fest, welches Weizenkorn belegt war. Jeweils ein belegtes Weizenkorn wurde dann in einer kleinen Meßkammer eingeschlossen, die nur kaum größer als das Weizenkorn selbst war. Entsprechend dem von WINTERINGHAM (1959, zit. in BAILEY 1969) beschriebenen Verfahren wurde der Sauerstoffverbrauch elektrolytisch gemessen.

Da die untersuchten Individuen aus Weizen stammten, der zuvor für eine Woche adulten Kornkäfern zur Oviposition angeboten worden war, wurde unter der Abszisse jeweils das maximal mögliche Alter aufgetragen.

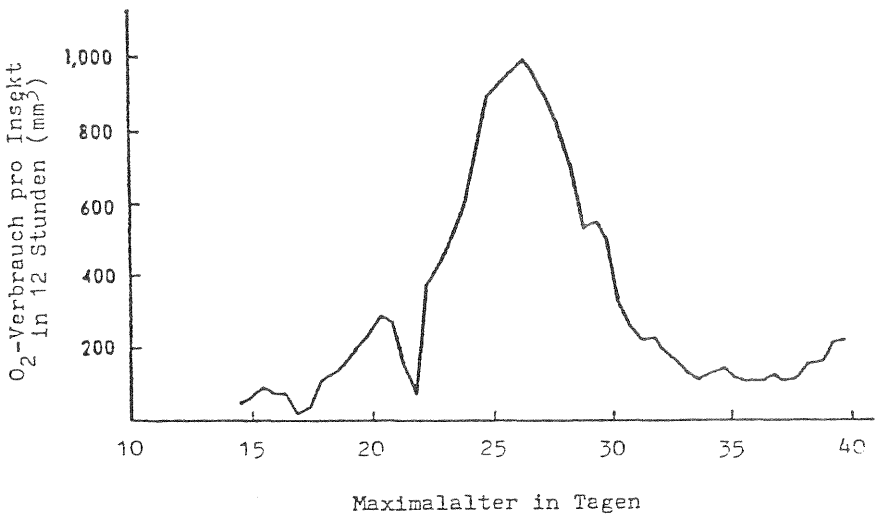


Abb. 9 Sauerstoffverbrauch von Sitophilus granarius während der Entwicklung vom Ei bis zum Schlupf der Imago bei 28 Grad Celsius (72% Luftfeuchte; nach BAILEY 1969).

Allerdings veratmet der Kornkäfer unter ähnlichen Bedingungen (28°C und etwa 14% Kornfeuchte) offensichtlich über drei mal soviel Sauerstoff pro Zeiteinheit wie der Reiskäfer (maximal ca. 82mm3 pro Stunde) und die Kornkäferentwicklung dauert etwa 2 Wochen länger. WILLIAMS und WILBUR (1969) fanden eine Entwicklung der Kohlendioxidproduktion, die in ihrem Verlauf ungefähr der von BAILEY beschriebenen Sauerstoffverbrauchskurve entspricht. Kalorimetrische Untersuchungen an allen Entwicklungsstadien des Kornkäfers (CAMPBELL et al. 1976), ergaben außerdem einen dem Sauerstoffverbrauch entsprechenden Verlauf der Stoffwechselrate.

4. BEKÄMPFUNG

Die im Vorratsschutz möglichen chemischen, biologischen und physikalischen Schädlingsbekämpfungsverfahren sollen im folgenden Kapitel getrennt besprochen werden. Ihnen gegenübergestellt wird die Methode der Schädlingsbekämpfung durch modifizierte Atmosphären, da sich solche Atmosphären sowohl chemisch als auch biologisch herstellen lassen, und diese Methode das Thema der vorliegenden Arbeit ist.

4.1 CHEMISCHE VERFAHREN

Wie im Bereich der landwirtschaftlichen Schädlingsbekämpfung auf dem Feld, so werden auch für den Schutz der Ernteprodukte in Westeuropa seit vielen Jahrzehnten fast ausschließlich chemische Schädlingsbekämpfungsverfahren verwendet. Dies liegt hauptsächlich daran, daß es bis heute kaum bewährte biotechnische oder physikalische Verfahren gibt, die eine wirksame Schädlingsbekämpfung so schnell und preiswert ermöglichen, wie es von chemischen Mitteln gewährleistet wird. Allerdings geraten nach großen Chemieunfällen (wie in Seveso, Bhopal oder Basel), die das Bewußtsein der Öffentlichkeit für die Bedrohung der eigenen Lebensgrundlagen durch den Menschen vertiefen, auch Verfahren wie der Einsatz chemischer Schädlingsbekämpfungsmittel unter öffentlichen Druck.

Der Einsatz chemischer Pflanzenschutzmittel im Freiland ist wegen der schädigenden Wirkung auch auf andere Tiere und Pflanzen als die Zielorganismen nicht unproblematisch. Im Vorratsschutz bestehen folgende Nachteile bei der Anwendung chemischer Mittel (STEIN 1985):

1. Im Freiland auf chemische Substanzen einwirkende Umweltfaktoren (Regen, Licht, Wärme etc.), die dort einen Abbau beschleunigen, entfallen im Vorratslager.
2. Zwischen Bekämpfungsmaßnahmen und Verzehr der behandelten Produkte stehen meist nur wenige Verarbeitungsschritte, die eine Reduktion oder Entfernung der chemischen Mittel bewirken könnten.

3. Im Vorratsschutz werden die lagernden Lebensmittel fast immer direkt behandelt, um die sich darin entwickelnden Schädlinge zu vernichten, während auf dem Feld oft das Ernteprodukt indirekt geschützt werden kann, indem später nicht mitverzehrte Pflanzenteile wie Wurzeln, Blätter, Blüten, oder zumindest Hülsen oder Spelze chemisch behandelt werden.

Auch aus diesen Gründen gibt es nur eine sehr geringe Anzahl für den Vorratsschutz zugelassener chemischer Mittel. Die in der Bundesrepublik Deutschland für den Vorratsschutz zum Vertrieb zugelassenen Schädlingsbekämpfungsmittel sind im Pflanzenschutzmittel-Verzeichnis (PflSchmV Teil 5, Vorratsschutz, ANONYM 1986) aufgeführt. Weitere Probleme der chemischen Schädlingsbekämpfung sind die bei Produktion und Vernichtung der Wirkstoffe entstehenden Umweltbelastungen, und wie bei einigen anderen Verfahren besteht auch hier die Gefahr der Entwicklung resistenter Schädlinge.

Andererseits ist die Gefahr unerwünschter ökologischer Auswirkungen bei der Anwendung chemischer Verfahren in geschlossenen Vorratslägern geringer als beim Pflanzenschutz unter Freilandbedingungen.

Die chemischen Schädlingsbekämpfungsmittel und ihre Formulierungen als Präparate für den Vorratsschutz lassen sich nach ihrem Aggregatzustand in feste, flüssige und gasförmige Substanzen einteilen.

An festen Bekämpfungsmitteln gibt es im Vorratsschutz in der Bundesrepublik Deutschland zur Zeit zur Behandlung von Futtergetreide ein Einstäubemittel auf Pyrethrumbasis (DUSTURAN Kornkäferpuder, Pyrethrum+Piperonylbutoxid), das relativ schnell abbaubar ist. Unter dem Begriff Pyrethrum werden sechs chemisch nah verwandte Substanzen (Pyrethrine: Pyrethrin I und II, Jasmolin I und II und Cinerin I und II) zusammengefaßt. Pyrethrine sind aus Chrysanthemen isolierte pflanzliche Insektizide. Sie zerfallen relativ schnell unter dem Einfluß ultravioletter Strahlung und werden deshalb zusammen mit einem Synergisten (Piperonylbutoxid) ausgebracht, um die Wirksamkeit und Stabilität der Verbindungen zu erhöhen (für weitere Informationen siehe LEAHEY 1985). Substanzen mit ähnlicher chemischer Struktur können heute synthetisch hergestellt werden (Pyrethroide,

z.B. PERMETHRIN, DELTAMETHRIN, BIORESMETHRIN, etc.). Da meist nur kleine Mengen eines in fester Form vorliegenden Wirkstoffes notwendig sind, wird dieser zur Gewährleistung einer gleichmäßigen Verteilung durch neutrale Substanzen wie Kaolin, Kreide oder Ton gestreckt.

Vorteilhaft ist bei diesem Verfahren:

1. Der Wirkstoff kann ohne größeren technischen Aufwand ausgebracht werden. (Im Gegensatz zu flüssigen Insektiziden oder Gasen sind keine Spritzgeräte bzw. gasdicht verschlossenen Läger notwendig)
2. Lagernde Vorräte können im Gegensatz zu Verfahren mit wasserhaltigen Spritzmitteln direkt behandelt werden.
3. Die Stäube sind gebrauchsfertig, es entfallen also mögliche Fehlerquellen beim Ansetzen oder Durchmischen eines Präparates.

Ein Nachteil dieses Verfahrens ist, daß bei Ausbringung von Stäuben auf bereits lagernde Vorräte diese mit dem Bekämpfungsmittel vermengt werden müssen. Außerdem muß eine Atemmaske beim Ausbringen der Stäube getragen werden, da diese leicht eingeatmet werden können und unter Umständen auch lungengängig sind (STEIN 1985). Die Stäube sind nur gegen Schädlinge wirksam, die sich frei zwischen den gelagerten Produkten bewegen. In Getreide- oder Maiskörnern befindliche Entwicklungsstadien können sich bis zum Schlupf meist ungehindert weiterentwickeln. Eine weitere Gefahr besteht in der Rückstandsbildung. Vor dem Vermahlen wird in Mühlen das Getreide durch ein Aspirationsverfahren von Getreidestaub, Bruchkorn und Sand getrennt, sodaß auch diese Stäube weitgehend entfernt werden. Wurde Getreide zuvor mit insektiziden Stäuben behandelt, darf der Müller die abgetrennten Stäube allerdings nicht als Ballaststoff-Beimengung für Viehfutter weiterverkaufen (WOHLGEMUTH, mündl. Mitteilung). Insgesamt werden Insektizide in fester Form im Vorratsschutz nur zu einem sehr geringen Teil verwendet.

Bekämpfungsmittel in flüssiger Form werden fast immer in wässriger Lösung ausgebracht. Da die Wirkstoffe im allgemeinen nicht wasserlöslich sind, werden Suspensionen oder Emulsionen hergestellt. Allerdings muß dabei für eine

gleichmäßige Durchmischung vor dem Ausbringen gesorgt werden (STEIN 1985). Diese Methode wird meist nur in leeren Mühlen und Lagerräumen eingesetzt, wobei die Wirkstoffe Bromophos, Lindan, Malathion, Phoxim und Primiphosmethyl zur Anwendung kommen (PflSchmV, ANONYM 1986). In der Bundesrepublik Deutschland ist ACTELLIC 50 mit dem Wirkstoff Primiphosmethyl das einzige Mittel, bei dessen Zulassung das Anwendungsgebiet "zur Behandlung von Getreide im Fördergutstrom" vorgesehen ist. Für andere Vorratsgüter gibt es keine zugelassenen Spritzmittel.

Relativ häufig werden als Verdunstungsmittel sogenannte DDVP-Strips zur Mottenbekämpfung eingesetzt, bei denen der Wirkstoff Dichlorvos in Dampfphase wirksam ist. Hierauf soll im Zusammenhang mit gasförmigen Insektiziden noch einmal eingegangen werden.

Die zur Zeit üblichste Methode zur Bekämpfung von Vorratsschädlingen in großen Lägern und Schiffsladeräumen ist die Verwendung giftiger Gase. Diese Gase können auf Grund ihrer geringen Molekülgröße auch lagernde Vorräte schnell durchdringen. Außerdem sind diese Mittel preiswert und ohne großen Personal- und Materialaufwand einsetzbar.

Während früher auch andere Substanzen wie Acrylnitril, Ethylendibromid, Ethylenoxid, Schwefelkohlenstoff und Tetrachlorkohlenstoff im Vorratsschutz zur Anwendung kamen (MONRO 1969, STEIN 1985), sind in der Bundesrepublik Deutschland zur Zeit nur Mittel mit den Wirkstoffen Phosphorwasserstoff (Phosphin, PH3), Blausäure (HCN) und Methylbromid (CH3Br) zugelassen (PflSchmV, ANONYM 1986). Die übrigen Wirkstoffe wurden meist wegen ihrer Gesundheitsschädlichkeit oder zu großer Rückstandsbildungen in den begasten Lebensmitteln verboten.

Nach SCHACHER und KNÜLLE (1980) nimmt die Insekten abtötende Wirkung von Methylbromid mit steigender Luftfeuchte ab und mit steigender Temperatur zu. So verhält es sich auch mit der Wirksamkeit der übrigen beiden Gase.

Methylbromid wird häufig zur Entseuchung von Mühlen und Getreide verarbeitenden Lebensmittelbetrieben verwendet. Teilweise werden dabei gleichzeitig auch geringe Mengen Blausäure mit ausgebracht, weil die beiden Gase synergistisch wirken. In der Bundesrepublik Deutschland sind heute nur phosphorwasserstoffentwickelnde Mittel mit

den Anwendungsgebieten "zur Behandlung von Getreide" zugelassen. Bei anderen Vorräten wird neben Phosporwasserstoff auch Methylbromid eingesetzt.

Die zwischen 1975 und 1977 in der Bundesrepublik verwendeten Mengen an gasförmigen Wirkstoffen sind der Abbildung 10 zu entnehmen. Der Anteil an verbrauchter Blausäure ist relativ gering, weil Blausäure meist nur in geringeren Mengen bei Methylbromid/Blausäure-Mischbegasungen eingesetzt wird. Da Blausäure ein starkes Wirbeltiergift ist, wird es auch gelegentlich zur Entrattung von Schiffen und Gebäuden benutzt.

	Phosphin	Methylbromid	Blausäure
1975	37.016kg	ca.20.000kg	ca.2.500kg
1976	33.135kg	ca.42.000kg	ca.4.000kg
1977	9.982kg	ca.33.000kg	ca.4.000kg

Abb. 10 Zwischen 1975 und 1977 verwendete Mengen an gasförmigen Insektiziden in der Bundesrepublik Deutschland (nach REICHMUTH und NOACK 1983).

Die durchschnittliche Menge verwendeten Wirkstoffs pro Einzelbegasung ist bei Methylbromid höher als bei Phosphorwasserstoff, weil zum einen häufig die zu begasenden Objekte bei Methylbromid-Begasungen größer sind (z.B. Mühlen), zum anderen Methylbromid wegen seiner geringeren spezifischen Giftigkeit in höheren Wirkstoffkonzentrationen eingesetzt werden muß (16-96g/m3) als Phosphorwasserstoff (1-30g/m3) (NOACK und REICHMUTH 1982, REICHMUTH und NOACK 1983). Der Rückgang der zwischen 1975 und 1977 verwendeten Menge an Phosphin ist auf den verstärkten Einsatz von DDVP-Strips zur Mottenbekämpfung in Getreideschüttbodenlägern zurückzuführen (NOACK und REICHMUTH 1982). DDVP-Strips sind mit dem flüssigen Insektizid Dichlorvos getränkte Weichfaserplatten, die im Luftraum über gelagerten Vorräten, z.B. Getreide aufgehängt werden. Aufgrund seines hohen Dampfdrucks verteilt sich der Wirkstoff gleichmäßig in diesem Luftraum, dringt aber nur wenige Zentimeter in den Getreidekörper und kaum in die Körner selbst ein. Ein DDVP-Strip reicht je nach

Größe für etwa 40m3 bis 100m3.

Bei Phosphorwasserstoff-Begasungen enwickelt sich der Wirkstoff aus Metall-Phosphiden, die zur Zeit in gepreßter Form als Pellets (0,6g Gesamtgewicht), als Tabletten (3g Ges.gew.), als Plates (110g Ges.gew.) oder in pulverisierter Form mit Zusatzstoffen in Beuteln (17g, 30g oder 40g Ges.gew.) erhältlich sind. Zur Behandlung von Schüttbodenlägern gibt es seit einigen Jahren auch ein Verfahren, bei dem 100 Beutel mit je 34g Aluminiumphosphidpräparat in einem gasdurchlässigen Flies verpackt sind (Beutelrolle, blankets) und auf dem Getreide ausgerollt werden (REICHMUTH et al. 1985). Anschließend deckt man den als Getreidescheibe bezeichneten gesamten Getreidekörper mit einer Folie ab. Eine Beutelrolle reicht bei sachgemäßer Anwendung für ca. 40t Getreide. Vorteilhaft ist bei dieser Methode, daß eine übersichtliche und gleichmäßige Verteilung des Präparates in kurzer Zeit möglich ist. Außerdem sind auf diese Weise Reste des Insektizids (vorwiegend Aluminiumhydroxid mit etwas unzersetztem Aluminiumphosphid) nach der Begasung leicht vom Lagergut zu entfernen. Bei Tabletten- oder Pelletbegasungen von Getreide müssen diese Reste bei Auslagerung durch Aspirationsverfahren entfernt werden, was zu Verlusten führt, da die insektizidhaltigen Stäube nicht weiterverkauft werden dürfen.

Ein Vorteil der Phosphin-Behandlung ist, daß Phosphorwasserstoff zunächst (bis zum Erreichen des MAK-Wertes von 0,1ppm Vol. = 0,1vpm) ohne Atemschutzgerät ausgebracht werden kann, da das wirksame Phosphin erst allmählich durch Reaktion von Aluminium- oder Magnesiumphosphid mit der in der Luft befindlichen Feuchtigkeit entsteht.

Durch die im Rahmen der Zulassung durchgeführte sicherheitstechnische Prüfung wird sichergestellt, daß bei Anwendung nach Gebrauchsanleitung Phosphinkonzentrationen von 18000vpm oder darüber nicht entstehen, da sonst Entzündungsgefahr besteht. Ammoniumcarbamat und Harnstoff sowie Paraffin sind deshalb häufig als Zusatzstoff in Phosphorwasserstoff-Präparaten enthalten, weil unter anderem die so zusätzlich entstehenden Gase Kohlendioxid und Ammoniak entzündungshemmend wirken. Paraffin erhöht die Festigkeit des Präparates und behindert den Wasserzutritt, was die Freisetzung von Phosphin verzögert.

Eier und insbesondere Puppen des Kornkäfers sind die Stadien, die am ehesten eine Phosphin-Begasung überleben können (HOWE 1973, HOLE et al. 1976). Bei subletalen Dosen kann es zu Resistenzbildungen kommen. MONRO (1972) berichtet, daß bei Selektionsversuchen auf Phosphintoleranz nach 28 Generationen eine dreimal längere Einwirkzeit zur vollständigen Abtötung der Käfer notwendig war als bei nicht selektierten Tieren. Für die Praxis wird eine solche Entwicklung befürchtet, da kommerzielle Interessen häufig dazu führen, daß mit zu geringen Konzentrationen bzw. zu kurzen Einwirkzeiten und in nicht ausreichend abgedichteten Lagern begast wird (WINKS 1987). In der Bundesrepublik Deutschland gibt es bisher offensichtlich noch keine Probleme mit phosphintoleranten Schädlingen.

Das Rückstandsverhalten von Phosphin in begasten Lebensmitteln wird unter anderem von NOACK et al. (1984a, 1984b) und NOACK und WOHLGEMUTH (1985) beschrieben. Durch Sorption und Diffusion entstehende Rückstände finden sich verstärkt in fetthaltigen Lebensmitteln wie z.B. Haselnüssen (NOACK et al. 1984b). Nach heutigem Kenntnisstand scheint Phosphorwasserstoff bei sachgemäßer Anwendung in bezug auf sein Rückstandsverhalten relativ unproblematisch zu sein.

Methylbromid-Begasungen können ebenfalls zu Rückständen in den behandelten Vorräten führen. LINDGREN et al. (1962) untersuchten begaste Getreideproben mit 9 bzw. 15 Prozent Wassergehalt. Sie stellen fest, daß nach sechs Stunden Belüftung sich der Gesamtbromgehalt im begasten Getreide kaum noch verändert. Bei dem feuchteren Getreide wurden wesentlich höhere Begasungsmittelrückstände gemessen als bei der trockenen Probe. Auch höhere Temperaturen bei der Begasung führten zu mehr Rückständen. Eine zweite Begasung derselben Getreidemenge resultierte in einer Erhöhung der Rückstände um 65 Prozent. WINTERINGHAM (1955) unternahm Versuche mit 14-C-markiertem Methylbromid. Er stellt fest, daß ca. 80 Prozent des absorbierten und umgewandelten Methylbromids in der Proteinfraktion des Getreidekorns nachweisbar sind (WINTERINGHAM 1955). Die Rückstandsmenge in begastem Weizen, Weizenmehl, Mais, Sorghum, Reis und Rosinen sinkt aber nach wenigen Tagen unter den nach der Höchstmengenverordnung zur Zeit tolerierten Grenzwert von 0,1mg CH_3Br/kg (PHmV, ANONYM 1984).

Die Höchstmenge von 0,1mg/kg ist ein EG-Wert und soll nach dem Verständnis aller Beteiligten bedeuten, daß Rückstände nicht vorhanden bzw. nicht nachweisbar sind. Da die Analysemethoden insgesamt auch niedrigere Gehalte - zumindest in bestimmten pflanzlichen Matrizes - zu bestimmen gestatten, wird dieser Wert in Zukunft überprüft werden müssen. Wie zuvor erwähnt, ist bei der Zulassung von Methylbromid in der Bundesrepublik Deutschland eine Begasung von Weizen heute nicht mehr vorgesehen.

Andere Versuche ergaben, daß Erdnüsse, Erdnußexpeller und Kakaobohnen (Begasung mit ca. 14g CH_3Br/m^3 für 3 Tage) auch 28 Tage nach der Begasung noch Rückstandswerte aufweisen können, die über 0,1mg CH_3Br/kg liegen (SCUDAMORE und HEUSER 1970). Daraus kann man schließen, daß (wie bei PH_3-Behandlungen) Samen mit einem hohen Fettgehalt bei Methylbromidbegasungen besonders rückstandsgefährdet sind. Problematisch ist dieser Umstand vor allem deshalb, weil Nüsse in den Erzeugerländern bei Lagerung oder Transport meist schon einmal begast werden, und so bei einer erneuten Behandlung in Lagern der verarbeitenden Industrie schnell überhöhte Rückstandswerte erreicht werden können.

Die oben erwähnte Höchstmengenverordnung hat die Aufgabe, den Verbraucher vor überhöhten Rückständen zu schützen. Verfeinerte Analysemethoden, die es seit einiger Zeit ermöglichen, auch geringste Mengen festzustellen und die Unsicherheit über Langzeitwirkung und Synergismen verschiedener kontinuierlich in geringen Dosen aufgenommener Chemikalien, führten in den letzten Jahren jedoch häufig zu einer Herabsetzung von zunächst für unbedenklich gehaltenen Grenzwerten.

Ein weiteres Risiko bei der Verwendung der hier erwähnten Gase ist ihre hohe akute Wirbeltiertoxizität, d.h. bei nicht vorschriftsmäßiger Handhabung sind auch sich in unmittelbarer Nachbarschaft aufhaltende Menschen in Gefahr. Wegen fehlerhafter Begasungen kam es deshalb in der Vergangenheit zu tödlichen Unfällen. Außerdem können die gasförmigen Insektizide zwar vorhandene Schädlinge abtöten, ein Schutz gegen Neubefall nach der Behandlung ist aber nicht gegeben.

Die Kosten für die Entwicklung, Erprobung und Zulassung neuer chemischer Bekämpfungsverfahren sind mittlerweile so hoch, daß in naher Zukunft nicht mit einer Vielzahl neuer

Mittel zu rechnen ist.

Alle diese Umstände führten dazu, daß seit einigen Jahren weltweit verstärkt nach Alternativen bei der Schädlingsbekämpfung im Vorratslager gesucht wird.

4.2 BIOLOGISCHE VERFAHREN

Unter Freilandbedingungen hat fast jede Tier- und Pflanzenart natürliche Feinde, Krankheiten und Konkurrenten, welche ihre Populationsdichte beeinflussen. Je mehr Arten in einem Biotop vorkommen, desto ausgeprägter ist die Regenerationsfähigkeit dieses Systems. In der Biologischen Schädlingsbekämpfung dezimiert man einen auftretenden Schädling, indem man die vorhandenen natürlichen Gegenspieler unterstützt oder neue Gegenspieler (z.B. Viren) ausbringt. Biotechnische Verfahren nutzen natürliche Reaktionen der Schädlinge auf bestimmte physikalische (z.B. optische oder akustische) oder chemische Reize (z.B. Pheromone, Wachstumsregulatoren) zweckentfremdet von ihrer natürlichen Funktion (FRANZ und KRIEG 1976). Sinn dieser Bekämpfung ist es, die durch den Schädling verursachten Schäden unter die wirtschaftliche Schadensschwelle zu senken. Die wirtschaftliche Schadensschwelle ist der Bereich, in dem der finanzielle Aufwand für eine Schädlingsbekämpfung den Verlusten bei nicht durchgeführter Bekämpfung entspricht.

Diese Schadensschwelle liegt im Vorratsschutz allerdings häufig auf sehr niedrigem Niveau bzw. bei Null. Dafür werden mehrere Gründe angeführt:

1. Dadurch, daß ein Vorratslager aus ökologischer Sicht eine absolute Reinkultur darstellt, führt das Einwandern eines an diese Bedingungen angepaßten Schädlings sehr schnell zu seiner exponentiellen Vermehrung (Gradation).
2. Nicht nur der Vorratsschädling selbst, sondern auch die durch seine Stoffwechselprozesse stark beschleunigte Entwicklung von Fäulnisbakterien und Schimmelpilzen führen zur schnellen Vernichtung von Vorräten (STEIN 1985).

3. Während eine vorübergehend befallene Pflanze durch ihr Wachstum einen Schaden wieder ausgleichen kann, ist dies bei eingelagerten Ernteprodukten nicht der Fall (STEIN 1985).
4. Ob Schädling oder Nützling, beide würden Rückstände hinterlassen, die in Lebensmittelvorräten nicht geduldet werden können (ARBOGAST 1984). Das Lebensmittelgesetz läßt Tiere oder deren Rückstände in zum Verzehr bestimmten Vorräten nicht zu. Außerdem werden auch von den Verbrauchern keine feststellbaren Schädlingsrückstände auf Lebensmitteln toleriert.

Andererseits sollten diese Gründe nicht dazu führen, biologische Bekämpfungsverfahren generell als für den Vorratsschutz ungeeignet zu betrachten. So könnte bei geringem, biologisch kontrolliertem Schädlingsbefall z.B. eine ausreichende Durchlüftung der Vorräte die Entwicklung von Fäulnisbakterien und Schimmel bremsen. Geringe Fraßverluste und Insektenüberreste sind außerdem in Produkten wie noch unbehandeltem Saatgetreide, Tierfutter und Rohwaren, die durch weitere Verarbeitungsschritte noch gereinigt werden, zunächst durchaus tolerierbar (ARBOGAST 1984).

Gegen den Kornkäfer gibt es zur Zeit kein wirksames biologisches Bekämpfungsverfahren. Im Folgenden soll deshalb kurz der Entwicklungsstand verschiedener biologischer und biotechnischer Methoden im Vorratsschutz allgemein besprochen werden.

Räuberisch lebende Käferarten, die für Vorratsschutzwecke eingesetzt werden könnten, stammen aus den Familien der Carabidae (Laufkäfer), Staphylinidae (Kurzflügler) und Histeridae (Stutzkäfer). ARBOGAST (1984) berichtet über eine Reihe erfolgreicher Versuche, Vorratsschädlingspopulationen durch solche Raubarthropoden auf einem niedrigen Niveau zu stabilisieren. Allerdings scheint es keinen auf Sitophilus spezialisierten Räuber zu geben. Dies könnte daran liegen, daß sich Sitophilus-Brut geschützt in Getreide-, Reis- oder Maiskörnern entwickelt.

Der Einsatz von parasitierenden Hymenopteren kann einen Schädlingsbefall im Vorratslager verringern, aber kaum wirksam kontrollieren. Versuche mit den Pteromaliden (syn. Calchicidae, Erzwespen) Chaetospila elegans Westwood

und Anisoptera calandrae (Howard) brachten bei Sitophilus zeamais-Zuchten eine Reduktion des Populationswachstums von nur 25 bzw. über 50 Prozent (WILLIAMS und FLOYD 1971).

Zur Bekämpfung von Vorratsschädlingen eignen sich auch insektenpathogene Protozoen, Bakterien, Pilze und Viren (ARBOGAST 1984).

Im Einsatz gegen Vorratsschädlinge wird über erfolgreiche Versuche mit mehreren Arten der Protozoenordnung Neogregarina berichtet (FINLAYSON 1950, SCHWALBE et al. 1973). Die Erforschung der Anwendbarkeit einer Neogregarina-Art gegen den Großen Kornbohrer Prostephanus truncatus ist zur Zeit auch Thema einer Dissertation am Institut für Vorratsschutz (LELIVELDT in Vorbereitung).

Unter den Bakterien ist Bacillus thuringiensis Berliner am besten bekannt, von dem schon mehrere Präparate gegen Insekten im Handel sind. Solche Präperate werden z.B. im Gemüseanbau zur Bekämpfung des Kohlweißlings Pieris brassicae L. und des Maiszünslers Ostrinia nubilalis Hbn. eingesetzt. Dieses Bakterium ist auch gegen vorratsschädliche Mottenarten wirksam (McGAUGHEY 1976, McGAUGHEY und KINSINGER 1978, RASSMANN 1986). Gegen vorratsschädliche Käferarten besitzt Bacillus thuringiensis keine Wirksamkeit, diese können aber das Bakterium weiterverschleppen (McGAUGHEY et al. 1975, zit. in WEIDNER 1976). Wegen Bedenken des Bundesgesundheitsamtes gegen die Einbringung von Bakterienkeimen in Lebensmittel sind Bacillus thuringiensis-Präparate für Vorratsschutzzwecke in der Bundesrepublik Deutschland zur Zeit nicht zugelassen. Präparate mit durch Bestrahlung abgetöteten Bakterien (-wirksam ist dann nur das bakterieneigene Toxin-) befinden sich noch in der wissenschaftlichen Erprobung.

Auch Pheromonfallen können in Vorratslägern zur Bekämpfung oder zumindest zur Früherkennung eines Mottenbefalls verwendet werden (REICHMUTH et al. 1976, REICHMUTH et al. 1978). Andere natürliche oder naturnahe Substanzen und Produkte wie Juvenilhormone (LOSCHIAVO 1975, EDWARDS und ROWLANDS 1977), andere Wachstumsregulatoren (STRONG und DIEKMAN 1973, HOPPE 1976), bestimmte Leguminosensamen, Samen des Niem-Baumes (PEREIRA und WOHLGEMUTH 1982, MAURER 1985) oder Pflanzenöle (QI und BURKHOLDER 1981, PEREIRA 1983) und Repellentien wie Kampfer (ABIVARDI 1976) werden auf ihre Einsetzbarkeit im

Vorratsschutz hin überprüft.

Durch die Züchtung einiger weniger, heute weltweit angebauter Hybridgetreidesorten mit hohem Ertrag wurden in vielen Regionen die lokal angepaßten Sorten verdrängt. Dadurch erhöhte sich meist die Anfälligkeit für einen Befall durch Feld- und Vorratsschädlinge. Hier gibt es möglicherweise noch ein gewisses Potential, durch Einkreuzung widerstandsfähiger Sorten den Befallsdruck zu verringern.

Die meisten der heute theoretisch anwendbaren biologischen Verfahren haben in der Praxis auf Grund geringer Praktikabilität oder nicht ausreichender Wirksamkeit noch keine wirtschaftliche Bedeutung erlangt, und auch in naher Zukunft kann nicht mit einem umfassenden biologischen Bekämpfungskonzept gerechnet werden. In einzelnen Bereichen bestehen auf diesem Gebiet für die Zukunft aber noch einige Möglichkeiten zur Entwicklung wirksamer und umweltfreundlicher Schädlingsbekämpfungsverfahren.

4.3 PHYSIKALISCHE VERFAHREN

Eine weitere Möglichkeit pestizidfreier Schädlingsbekämpfung ist die Beeinflussung der abiotischen Bedingungen im Vorratslager, sodaß die Schädlinge abgetötet werden und einem Neubefall vorgebeugt ist. Dies kann man z.B. durch extrem hohe bzw. niedrige Temperaturen oder durch Trocknungsverfahren erreichen. Zu den physikalischen Bekämpfungsmethoden kann man aber außerdem das mechanische Umwenden und Belüften von Vorräten, ihre Bestrahlung und den Einsatz von Prallmaschinen rechnen.

Bestrahlung von Lebensmitteln durch harte Gamma-Strahlen (60Co) (WOHLGEMUTH 1973), wie z.B. in Holland schon praktiziert, ist in der Bundesrepublik zur Zeit wegen der Unsicherheit über mögliche schädliche Veränderungen bestrahlter Lebensmittel (STEIN 1986) und dieser Methode entgegenstehenden Verbraucherforderungen nicht erlaubt. Besonders bei Produkten mit sehr niedrigem Wassergehalt wie Gewürzen, Tee oder auch Getreide erscheint eine Zulassung

nach ausführlichen Erprobungen jedoch durchaus denkbar. Umfangreiche Untersuchungen zur Konservierung von Lebensmitteln durch Gammastrahlung wurden von KUPRIANOFF und LANG (1960) durchgeführt.

Durch den Einsatz von Prallmaschinen (Entoletern) wird eine wirksame, mechanische Bekämpfung von Vorratsschädlingen ermöglicht. Besonders in Mühlen aber auch in Betrieben der Futtermittel- und Teigwarenindustrie sind heute üblicherweise Prallmaschinen zum Reinigen und Vormahlen von Getreide zwischengeschaltet. Dabei wird ein dosierter Getreidestrom von oben zwischen zwei rotierende Scheiben geleitet, die an ihrem Rand durch meist zwei Bolzenreihen miteinander verbunden sind. Das Getreide wird durch die Fliehkraft nach außen geleitet und Schädlinge sowie befallene Körner werden durch die Stahlbolzen zerschlagen oder im Kornstrom zerrieben. Entscheidend für eine wirksame Abtötung der Schädlinge ist die richtige Einstellung des Mahlgutstromes und der Rotationsgeschwindigkeit der Scheiben bei den durch Getreidetyp, Art des Schädlingsbefalls und Mahlwerkzeuggeometrie vorgegebenen Bedingungen. Insektenbruchstücke, Exkremente, Staub und Bruchkorn werden bei einer anschließenden Aspiration abgetrennt. Wegen des relativ hohen Gehalts an anfallendem Bruchkorn ist diese Methode nur dann wirtschaftlich, wenn das Getreide anschließend vermahlen werden soll (STRATIL et al. 1987). Für bereits gemahlene Produkte wie Mehle oder Griese ist dieses Verfahren weniger geeignet, da die Überreste der Schädlinge nicht mehr vollständig vom Produkt zu trennen sind (STEIN 1986).

Hohe Temperaturen können in kurzer Zeit zur vollständigen Abtötung einer Kornkäferpopulation führen. Nach GONEN (1977) reichen 24 Stunden bei 40 Grad Celsius aus, um bei 26,5 Grad Celsius gezüchtete Sitophilus granarius und Sitophilus oryzae-Populationen vollständig abzutöten. Dies entspricht auch etwa der von der Bundesanstalt für landwirtschaftliche Marktordnung (BALM) erlaubten Höchsttemperatur zur Trocknung von frisch geerntetem Brotgetreide. Noch höhere Temperaturen (über 40°C) beeinträchtigen in den meisten Fällen die Qualität der Vorräte und können nur bei bereits trockenem Getreide kurzzeitig angewendet werden.

Andererseits können auch niedrige Temperaturen oft in

zufriedenstellend kurzer Zeit und ohne Qualitätsbeeinflussung der Produkte Vorratsschädlinge abtöten (STRATIL und REICHMUTH 1983, 1984). Besonders in den mild gemäßigten Klimaten Mitteleuropas, Kanadas und der USA könnten natürliche Kälteperioden bei trockenen Witterungsbedingungen stärker als bisher für eine preiswerte und rückstandsfreie Bekämpfung genutzt werden. Der durch starke Abkühlung von Getreide entstehende Schutz bleibt auch relativ lange erhalten, da Getreide durch seine Struktur und das relativ große Zwischenkornvolumen ein schlechter Wärmeleiter ist. Damit bei der Abkühlung des Getreides kein Kondenswasser ensteht, muß jedoch darauf geachtet werden, daß die Temperatur der zugeführten trockenen Luft erst nach und nach verringert wird, sodaß die Feuchte aus dem Zwischenkornvolumen aufgenommen und nach außen abgeführt werden kann. Wollte man nur auf die Methode der Kältebehandlung zur Schädlingsbekämpfung setzen, wäre allerdings auch die Installation eines Anschlusses für elektrische Kühlaggregate notwendig, da bei einem Befall schnell gehandelt werden muß, und nicht die nächste natürliche Kälteperiode abgewartet werden kann.

Niedrige Feuchtegehalte sind an sich schon ein guter Schutz gegen Schädlingsbefall. Weizenfeuchte von unter 9 Prozent (ZACHER 1933) und entsprechende Luftfeuchten von unter 50 Prozent (HOWE 1965) machen einen Befall durch den Kornkäfer unmöglich.

Andererseits sind künstliche Kühlungs- oder Trocknungsprozesse bei der Größe der Vorratsläger sehr energieaufwendig und dadurch relativ teuer.

Hohe bzw. niedrige Drucke wären ebenfalls eine mögliche Methode der Bekämpfung von Vorratsschädlingen. Allerdings ist die Herstellung von Überdruck- bzw. Vakuumkammern relativ aufwendig. Mit einem Einsatz dieser Verfahren zum Schutz von Vorratsgütern, abgesehen von relativ wertvollen Produkten wie Arzeneimitteln oder pflanzlichen Drogen, ist in absehbarer Zukunft deshalb nicht zu rechnen.

4.4 MODIFIZIERTE ATMOSPHÄREN

Bei der Schädlingsbekämpfung durch modifizierte Atmosphären (auch kontrollierte Atmosphären, Inertgas- oder CA- Controlled Atmospheres"-Begasung genannt) wird die Gaszusammensetzung der im Vorratslager befindlichen Atmosphäre so verändert, daß Vorratsschädlinge nicht überleben können. Hauptfaktor für die Toxizität modifizierter Atmosphären ist einerseits der Mangel an Sauerstoff; andererseits haben auch hohe Gehalte an Kohlendioxid an sich eine abtötende Wirkung, wobei noch nicht erwiesen zu sein scheint, wo im Insektenmetabolismus diese Wirkung eintritt. Kohlendioxid kann auch die Effektivität einiger gasförmiger Insektizide steigern (BOND und BUCKLAND 1977, DESMARCHELIER 1984).

Modifizierte Atmosphären bestehen meist aus verschiedenen Anteilen Stickstoff und Kohlendioxid sowie einem geringen Gehalt an Restsauerstoff. Andere Gase, z.B. Edelgase wie Helium oder Argon, wurden auf ihre Wirksamkeit zwar auch überprüft (BASS et al. 1963, zit. in BANKS 1981), sie sind aber nicht wirksamer als Stickstoff und werden deshalb aus Kostengründen heute im allgemeinen nicht verwendet.

Ein Problem bei der Lagerung von Vorräten unter modifizierten Atmosphären ist die Gewährleistung einer ausreichenden Gasdichtigkeit der Lagerräume (KASHI 1981). Denn nur, wenn während der Behandlung kein Sauerstoff von außen eindringen kann, ist ein Bekämpfungserfolg möglich. Viele der zur Zeit in Gebrauch befindlichen Läger und Silozellen sind für die Inertgasanwendung nicht ausreichend gasdicht, da sie zu einer Zeit gebaut wurden, als immer neue und immer effektivere chemische Bekämpfungsmittel auf den Markt kamen und wegen ihrer schnellen Wirksamkeit nicht so hohe Ansprüche in Bezug auf Gasdichtigkeit bestanden. Zur Abtötung aller Entwicklungsstadien der Schädlinge ist beim Einsatz kontrollierter Atmosphären im Vergleich zu Begasungen mit Phosphin insbesondere bei niedrigen Temperaturen ein relativ langer Begasungszeitraum notwendig. Dies beschränkt die Anwendung dieser Methode auf gasdichte Langzeitläger mit einer Lagerungsdauer von mindestens drei Monaten (BAILEY und BANKS 1975). Andererseits hat dieses Verfahren aber eine Reihe von Vorteilen:

1. Der Sauerstoffentzug im Getreidelager ist ein rückstandsfreies Bekämpfungsverfahren (MÜNZING und BOLLING 1985). Auch Kohlendioxid-reiche Atmosphären lassen keine bedenklichen Rückstände erwarten.
2. Bei feucht eingebrachten Vorräten wird eine Entwicklung von Fäulnisbakterien und Schimmelpilzen stark verlangsamt (SHEJBAL et al. 1973). Dadurch können Trocknungsengpässe überbrückt werden.
3. Resistenzbildung größeren Ausmaßes sind zumindest bei dem Jahrtausende alten Verfahren der hermetischen Getreidelagerung nicht bekannt geworden. (Auf Resistenzerscheinungen bei bestimmten CO2-Begasungen soll später noch eingegangen werden.)
4. Abgesehen von der notwendigen Gasdichtigkeit des Lagers, ist diese Methode relativ preiswert. Wirtschaftliche Vorteile entstehen auch durch den Punkt 2.
5. Bei Dauerlagerung unter modifizierten Atmosphären kann einem Neubefall durch Schädlinge vorgebeugt werden.
6. Durch Produktion und Anwendung der Gase wird die Umwelt kaum bzw. gar nicht belastet.
7. Auch für biologisch alternative Erzeugerbetriebe, die wegen des angestrebten Verzichts auf rückstandsbildende Insektizide bisher noch weitgehend ohne wirksame Bekämpfungsmittel auskommen mußten, dürfte dieses Verfahren akzeptabel sein (MÜNZING und BOLLING 1985).

Kontrollierte Atmosphären können auf verschiedene Art und Weise hergestellt werden:

Streng genommen ist die moderne Form der Anwendung kontrollierter Atmosphären ein chemisches Verfahren, da entweder der Luftsauerstoff in Kohlendioxid umgewandelt oder technisch hergestelltes Gas zur Verdrängung des Sauerstoffs eingesetzt wird. Andererseits kann man eine solche Atmosphäre auch biologisch durch Atmungsprozesse von Mikroorganismen erzeugen, wie aus China berichtet wird (LU QIANYU 1985).

Die älteste und ursprüngliche Methode ist das hermetische Verschließen des Vorratslagers. Stoffwechselprozesse in den Vorräten, Mikroorganismen und

gegebenenfalls vorhandene Schädlinge sorgen nach und nach für ein Absinken des Sauerstoffgehalts und einen Anstieg des Kohlendioxidanteils auf toxische Verhältnisse.

Besonders im mediterranen Bereich und im mittleren Osten ist hermetische Getreidelagerung schon aus frühesten Überlieferungen bekannt. Meist wurde das Getreide dazu in unterirdische Kammern eingebracht (CALVERLEY 1984). Sofern die Wände dieser Kammern gegen eindringende Feuchtigkeit aus dem umgebenden Erdraum geschützt waren, kann man auch von einer hinreichenden Gasdichtigkeit ausgehen. BAILEY und BANKS (1975) berichten von ca. 300 Jahre alten Getreidelagern auf Malta, die bei unterirdischer Bauweise und bis zu 500t Fassungsvermögen auch 1973 bei Versuchen noch eine ausreichende Gasdichtigkeit aufwiesen.

Auch im 20. Jahrhundert wendet man diese Art der Lagerung noch in großem Maßstab an. Es wird berichtet, daß in Argentinien als Folge des 2. Weltkrieges 1942 große Mengen von Weizen gelagert werden mußten, die nicht nach Übersee verschifft werden konnten . Da Argentinien zu dieser Zeit selbst keine Pestizide produzierte, wurde nach Möglichkeiten gesucht, das Getreide preiswert und ohne große Verluste durch Schädlingsbefall aufzubewahren. Die Unterbringung in hermetisch abgedichteten Gruben erwies sich als erfolgreichste Form der Getreidelagerung. Bis 1948 wurden deshalb 1540 unterirdische Silos gebaut, die insgesamt etwa 850.000t Weizen aufnehmen konnten (BAILEY 1955).

Auch heute wird hermetische Lagerung von Getreide mit Erfolg in mehreren Entwicklungsländern, z.B. Jemen, Ägypten, Sudan, Somalia und Äthiopien angewendet (KAMEL 1980, DE LIMA 1980).

In Australien wird in Jahren mit einer sehr guten Ernte das Getreide in großen Haufen ("bunkers") hermetisch unter Kunststoffplanen gelagert. Nur im Falle einer (selten) auftretenden Schädlingskalamität wird mit Kohlendioxid oder Phosphin begast. Trockenes Getreide und oft hohe Temperaturen kommen in Australien dieser Methode entgegen (BANKS 1983b, BENGSTON mündliche Mitteilung).

NAVARRO et al. (1984) berichten von einem erfolgreichen Großversuch nach australischem Vorbild in Israel, wo 15.566,5t Weizen mit 11,4 Prozent Feuchtegehalt unter einer festen PVC-Folie gelagert wurden. Nach 15 Monaten

Lagerung befand sich der Weizen in qualitativ gutem Zustand, die Verluste durch Vorratsschädlinge und Fäulnis an der Getreideoberfläche betrugen weniger als 0,25 Prozent der Gesamtmenge. Auch aus den USA liegen inzwischen Erfahrungen mit der "bunker"-Lagerung vor (JAY, mündl. Mitteilung).

Um die bei hermetischer Lagerung entstehenden Verluste und Getreideverunreinigungen durch Schadinsekten zu verringern, wird seit Anfang dieses Jahrhunderts versucht, eine sauerstoffarme, insektizide Atmosphäre künstlich herzustellen. Diese könnte ein Überleben von Schädlingen schon zu Beginn der Lagerung verhindern. Solche modifizierten Atmosphären kann man zum einen erzeugen, indem Luftsauerstoff durch eine Flamme oder katalytisch zu Kohlendioxid umgewandelt wird. Sogenannte Inertgas-Generatoren, die solche Gase erzeugen, wurden bereits in einer Reihe von Versuchen verwendet (STOREY 1975a, 1975b, NAVARRO 1978b, FLEURAT LESSARD 1986). Zum anderen können technisch reine Gase in das Lager eingepreßt und der Luftsauerstoff auf diese Weise verdrängt werden (HAREIN und PRESS 1968, JAY und PEARMAN 1973, NAVARRO 1978, NAVARRO et al. 1978, JAY 1984).

Durch Verbrennung von Kohlenwasserstoffen mit Luftsauerstoff in einem Inertgas-Generator können maximal etwa 16 Prozent Kohlendioxid erreicht werden, der Rest besteht aus ca. 80 Prozent Stickstoff, Wasserdampf und einem geringen Sauerstoffrestgehalt. Es besteht die Gefahr, daß auch kleine Mengen an Kohlenmonoxid und Stickoxiden entstehen (BAILEY und BANKS 1980). Benutzt man technisch reine Gase, so können sie einzeln oder kombiniert in beliebigen Mischungsverhältnissen eingesetzt werden. Allerdings müssen die Gase in diesem Fall vom Produktionsort zum Einsatzort transportiert werden. Australische Erfahrungen über die Kosten des Umbaus herkömmlicher Lager in abgedichtete Lager, die sich zum Einsatz modifizierter Atmosphären eignen, werden in der Arbeit von LOVE et al. (1983) zusammengefaßt.

Der Einfluß der CA-Lagerung auf die Qualität des behandelten Getreides wurde von mehreren Autoren beschrieben. Bei der Untersuchung der Getreidequalität spielt die Überprüfung der Keimfähigkeit eine große Rolle. Dieser Parameter läßt sich durch Keimtests (EGGEBRECHT 1949) bzw.

das Lakonsche Topographische Tetrazolium-Verfahren (LAKON 1942) relativ leicht messen. Während man für Keimtests Getreidekörner auf feuchtem Sand oder feuchter Watte unter Licht zur Keimung bringt, wird mit dem Tetrazolium-Verfahren der lebende Getreide-Embryo angefärbt. So läßt sich auch bei temperaturbedingter Keimhemmung die potentielle Entwicklungsfähigkeit schnell feststellen.

Bei Beeinträchtigung der Getreidequalität, läßt die Keimfähigkeit nach, bevor andere Eigenschaften wie Backvolumen oder der Gehalt an freien Fettsäuren nachteilig beeinflußt werden (BANKS 1981). Allgemein kann man davon ausgehen, daß unter sauerstoffarmen Atmosphären gelagertes Getreide seine Keimfähigkeit genau so lange oder länger behält als unter Luft gelagertes Getreide (BANKS 1983a). Die keimfähigkeitserhaltenden Eigenschaften der modifizierten Atmosphäre kommen bei trocken eingelagertem Getreide (unter 12% Feuchte) erst nach sehr langen (mehrjährigen) Lagerzeiten zum Tragen. Nach Experimenten von ROBERTS und ABDALLA (1968), die Roggen mit 11,3 Prozent Feuchtegehalt bei 60 Grad Celsius in Sauerstoff, Luft bzw. reinem Stickstoff lagerten, scheint nicht die Aktivität von Mikroorganismen, sondern die Anwesenheit von Sauerstoff nach längerer Lagerzeit die Keimfähigkeit trockenen Getreides zu reduzieren. Bei 60 Grad Celsius sind Getreide besiedelnde Mikroorganismen nicht aktiv. Es handelt sich hier also wahrscheinlich um eine Ermüdungserscheinung im Stoffwechsel des Getreidekorns.

Wenn Getreide, wie es in Mitteleuropa häufig vorkommt, feucht (mit ca. 16% Feuchte) eingelagert wird, ist der positive Effekt der Lagerung unter modifizierten Atmosphären wesentlich schneller festzustellen (MÜNZING und BOLLING 1985). Dies liegt daran, daß der Sauerstoffmangel die Entwicklung von Bakterien und Schimmelpilzen hemmt, die bei feuchtem Getreide unter Luftlagerung Hauptursache für ein Nachlassen der Keimfähigkeit sind (CHRISTENSEN und KAUFMANN 1974, zit. bei BANKS 1983a).

CA-Lagerung trägt außerdem zur Erhaltung essentieller Aminosäuren und des Vitamins E bei, indem der oxidative Abbau dieser Korninhaltsstoffe verhindert wird (NADKYTA et al. 1983, zit. bei MÜNZING und BOLLING 1985, HAKKARINEN 1983).

Stickstoff oder Kohlendioxid mit einem geringen

Sauerstoffrest zwischen 0,5 und 3 Prozent scheinen zur Bekämpfung der Sitophilus-Arten wirksamer zu sein als die reinen Gase (LINDGREN und VINCENT 1970, NAVARRO 1978a, BELL 1984). Synergistische Effekte bei der Kombination von Sauerstoff und Kohlendioxid werden auch von CALDERON und NAVARRO (1979) festgestellt.

Kohlendioxid-Atmosphären haben eine eigene toxische Wirkung. Bei trockenem Getreide (<11% Kornfeuchte) und hohen Temperaturen (>25?C) reicht schon eine Konzentration von über 35 Prozent Kohlendioxid aus, um nach zehn Tagen eine vollständige Abtötung aller Getreideschädlinge zu erreichen (BENGSTON, mündliche Mitteilung 1986). Diese Methode wird in Queensland, Australien, in Stahlsilos bereits kommerziell angewendet, wobei man bei Begasungsbeginn durch eine einmalige Spülung zunächst eine Atmosphäre mit etwa 60 Prozent CO_2 (Rest: Luft) hergestellt. Nachteilig ist bei CO_2-Begasungen andererseits die hohe Wasserlöslichkeit dieses Gases. Ensprechend seinem Bunsenschen Absorptionskoeffizienten (BA) wird mehr als 58 mal soviel CO_2 (BA = 0,878) wie Stickstoff (BA = 0,015) im Kornwasser absorbiert. Auch Betonwände von Begasungsräumen absorbieren zunächst große Mengen Kohlendioxid, bis eine gewisse Sättigung erreicht ist (SPRATT 1975). Diese Umstände führen zu einer Erhöhung der Begasungskosten.

Je nach Gaszusammensetzung und Temperaturunterschieden zwischen der in einem Getreidelager befindlichen Atmosphäre und der Außenluft entsteht eine mehr oder weniger große Druckdifferenz (BAILEY und BANKS 1975). Wird mit reinem Kohlendioxid gespült (Dichte = 1,52), so entsteht in einem 30m hohen Silo im Bodenbereich ein Innendruck von 156 Pa gegenüber der Außenluft. Sind im Silo niedrige Temperaturen, während außen hohe Temperaturen herrschen, so wird diese Druckdifferenz noch verstärkt. Andererseits kann in einem tagsüber durch Sonneneinstrahlung erhitzten Stahlsilo auch im oberen Bereich des Silos ein hoher Druck gegenüber der abends abkühlenden Außenluft entstehen. Dies stellt besondere Ansprüche an die Qualität der Wände des Vorratslagers.

Hohe Kohlendioxid-Gehalte können außerdem die Keimfähigkeit gelagerter Getreidepartien beeinträchtigen, da die CO_2-Anreicherung im Korn das Stoffwechselenzym

Glutaminsäure-Decarboxylase durch Produkthemmung inaktiviert (MÜNZING und BOLLING 1985).

Überdies wurde von Resistenzerscheinungen bei Schädlingen bisher nur bei Versuchen mit Kohlendioxid und mindestens 5 Prozent Sauerstoff berichtet. NAVARRO (1985) unternahm Versuche mit 40 bzw. 75 Prozent Kohlendioxid (Rest Luft: 48% N_2, 12% O_2 bzw. 20% N_2, 5% O_2, bei 100% Luftfeuchte). Nach Selektion einer Population von Sitophilus oryzae auf Überlebensfähigkeit (LT 60) unter diesen Bedingungen ergab sich nach sieben Generationen und 40-prozentiger Kohlendioxidatmosphäre ein Toleranzfaktor von 2,15. Nach Exposition von 10 aufeinanderfolgenden Generationen bei 75 Prozent CO_2 erhöhte sich dieser Faktor auf 3,34. Navarro spricht von Toleranz, da die ermittelten "Resistenzen" nach wenigen Generationen ohne Selektierung erheblich nachließen und daher offensichtlich genetisch nicht stabil waren. Kohlendioxid wirkt auf verschiedene Reaktionen im Metabolismus ein. Deshalb schließt NAVARRO aus diesem Rückgang der Toleranz, daß die von ihm untersuchte Population in hinsichtlich ihrer Kohlendioxid-Toleranz nicht isogenisch war, d.h. nicht alle überlebenden Individuen die gleiche genetische Information in bezug auf CO_2-Toleranz besaßen. BOND und BUCKLAND (1979) fanden eine Erhöhung der Toleranz von Sitophilus granarius gegenüber einer 75prozentigen CO_2-Atmosphäre um den Faktor 1,8 nach vier Generationen Selektierung bei 25 Grad Celsius. Mit 42 Prozent Kohlendioxid in Luft (46,4% N_2, 11,6% O_2) erreichten sie unter gleichen Bedingungen einen Toleranzfaktor von 3,4 nach 7 Generationen. JAY (mündl. Mitteilung) wies auf Erfahrungen hin, wonach Laborstämme vorratsschädlicher Insektenarten durch die Zuchtbedingungen in Zuchtgläsern ständig einer höheren Kohlendioxid-Konzentration als Freilandtiere ausgesetzt sind und wohl deshalb bei Begasungen wesentlich unempfindlicher gegen solche Atmosphären sind.

Resistenzbildungen von vorratsschädlichen Insekten gegen Atmosphären mit einem Sauerstoffgehalt von unter zwei Prozent wurden bisher noch nicht beschrieben. Die Entwicklung von Insekten mit vollständig anaerobem Stoffwechsel ist zwar theoretisch nicht auszuschließen, würde aber eine Fülle grundlegender Veränderungen im Metabolismus dieser Tiere erfordern. Außerdem wurde das

Verfahren der hermetischen Getreidelagerung in einer Reihe von Kulturen Afrikas und Asiens über viele Jahrhunderte ohne erkennbare Einbuße der Wirksamkeit bis heute angewendet. Insofern erscheint die Gefahr der Resistenzbildung gegen niedrige Sauerstoffgehalte gering.

Wie auch bei anderen Bekämpfungsverfahren hängt die Effektivität modifizierter Atmosphären in hohem Maße von der Temperatur und der Kornfeuchte ab. Je höher die Temperaturen im Getreide (MARZKE 1969, LINDGREN und VINCENT 1970) und je niedriger sein Feuchtegehalt (JAY et al. 1971), desto kürzer ist die für eine vollständige Abtötung der Schädlinge notwendige Einwirkzeit. BAILEY und BANKS (1980) bemängeln, daß es bisher kaum Daten über die Wirksamkeit modifizierter Atmosphären bei Temperaturen zwischen 15 und 20 Grad Celsius gibt. Neuere Veröffentlichungen (JAY 1980, 1984, REICHMUTH 1987) und auch die vorliegende Arbeit versuchen diese Lücke zu schließen. Bei 15 bis 20 Grad Celsius reicht die Kälte allein zur Abtötung nicht aus. Durch den unter diesen Bedingungen mehr oder weniger stark verlangsamten Stoffwechsel der Insekten verzögert sich aber auch die abtötende Wirkung des Sauerstoffentzugs bzw. der CO_2-Atmosphäre.

BANKS und ANNIS (1977) stellten nach Extrapolieren der vorhandenen Versuchsdaten mit Temperaturen von über 20 Grad Celsius fest, daß bei 18 Grad Celsius ein Gasgemisch aus 1 Prozent Sauerstoff und 99 Prozent Stickstoff etwa 15 Wochen für eine vollständige Abtötung aller vorratsschädlichen Insekten brauchen würde. Bei 15 Grad Celsius wären nach ihren Angaben etwa 24 Wochen nötig. REICHMUTH (1987) stellt dagegen fest, daß bei Einwirkzeiten von acht Wochen bei 15 Grad Celsius eine 95prozentige Abtötung des widerstandsfähigsten Kornkäferstadiums (Puppen) möglich ist. Dabei enthielt das verwendete Gas 96 Prozent Stickstoff und 4 Prozent Sauerstoff. JAY (1980) kommt nach Versuchen mit Sitophilus oryzae sogar zu dem Ergebnis daß bei 15,7 Grad Celsius eine 99prozentige Stickstoff-Atmosphäre (Rest O_2) ausreicht, um nach 4 Wochen Begasung über 99 Prozent aller Altersstadien abzutöten. Allerdings ist der Reiskäfer als mehr wärmeadaptierter Vorratsschädling wahrscheinlich empfindlicher gegen Kälte als der Kornkäfer.

Die von JAY verwendete Methode der konstanten Begasung (mit 300ml Gas pro Minute) dürfte ein zusätzlicher Streßfaktor sein, da schon eine einfache Belüftung zu höheren Mortalitätsraten führen kann (NAVARRO 1975). Außerdem wurde in den von JAY beschriebenen Versuchen nur für 6 Wochen auf Schlupf kontrolliert, was bei dem entwicklungsverzögernden Effekt des Gases und der Temperatur zu wenig sein kann. Dies gilt besonders, weil während des Versuches und danach nur Feuchtegehalte von 56 bzw. 60 Prozent eingehalten wurden. Bei diesen Luftfeuchten ist die Entwicklung zusätzlich etwas langsamer als bei 70 Prozent Feuchte. Die entwicklungsverzögernde Wirkung von Stickstoff-Atmosphären und niedrigen Temperaturen scheint bisher noch nicht untersucht worden zu sein. Auf sie wird deshalb im praktischen Teil dieser Arbeit besonders eingegangen.

5. PRAKTISCHER TEIL

Die zur Erstellung dieser Arbeit durchgeführten Versuche sollten einen Beitrag leisten zum Auffinden der günstigsten Methode der Anwendung modifizierter Atmosphären in der Schädlingsbekämpfung im Vorratsschutz. Dabei sollte untersucht werden, ob Unterschiede in der Effektivität von Stickstoff mit Sauerstoffzusätzen zwischen 1 und 3 Prozent feststellbar sind. Solche Stickstoff-Atmosphären haben den Vorteil, daß ein Vorratslager so lange mit Stickstoff gespült werden kann, bis die O_2-Konzentration auf das gewünschte Niveau absinkt, ohne daß zuvor ein Gasgemisch hergestellt werden muß. Ferner war zu überprüfen, ob eine Zumischung von 10 Prozent CO_2 die insektizide Wirkung einer Stickstoff-Atmosphäre auf den Kornkäfer signifikant steigern kann. Der Kornkäfer Sitophilus granarius wurde gewählt, da er sowohl einer der wirtschaftlich bedeutendsten Getreideschädlinge als auch besonders unempfindlich gegen die heute üblichen Bekämpfungsverfahren ist. Ein Verfahren, das zur vollständigen Abtötung des Kornkäfers führt, besitzt daher auch gute Aussichten, gegen andere Vorratsschädlinge erfolgreich zu sein.

5.1 ZUCHT DER VERSUCHSTIERE

Untersucht werden sollten fünf Brutstadien und adulte Tiere des Kornkäfers Sitophilus granarius. 25 Grad Celsius Raumtemperatur, 70 Prozent Luftfeuchte und ca. 14 Prozent Weizenfeuchte wurden gewählt, da diese Werte nach Literaturangaben (EASTHAM und McCULLY 1943, HOWE 1949, HOWE und HOLE 1968, TYLER und BINNS 1982, STUBBS und ABOOD 1983, SHAZALI und SMITH 1985, REICHMUTH 1986, u.a.) und Erfahrungswerten am Institut für Vorratsschutz der Biologischen Bundesanstalt für Land- und Forstwirtschaft Berlin, Eckdaten günstiger Aufzuchtbedingungen für den Kornkäfer darstellen. Diese Werte wurden für Auf- und Nachzucht der Versuchstiere eingehalten. Der bei Zucht und Versuchen verwendete Weizen war schädlingsfrei durch mindestens 14 Tage Lagerung bei minus 20 Grad Celsius. Er kam aus einer Lieferung (BALM: Hartweizen, Ernte 1982), wurde nach der Kältebehandlung zur Entfernung von Staub und Kornbruch gesiebt und durch Zugabe von Leitungswasser auf einen Feuchtegehalt von ca. 14 Prozent gebracht. Die Feuchte wurde an feingeschroteten Kornproben mit je 10g Weizen durch einen BRABENDER Feuchtemesser überprüft (Abb.11).

Für die Begasungsversuche galt es nun, nach Alterstadien getrennt, die sich im Weizenkorn entwickelnde Brut und adulte Käfer definierten Alters bereitzustellen. Tiere für die Zucht wurden aus einer seit 1955 im Institut befindlichen Kornkäferkultur übernommen.

Das Kornkäferweibchen bohrt zur Eiablage einen Kanal in ein Weizenkorn, den es, nachdem das Ei hineingelegt ist, mit einem wachsartigen Pfropfen verschließt. Dieser Pfropfen ist an einem belegten Weizenkorn kaum sichtbar und deshalb kann man ein belegtes nur sehr schwer von einem unbelegten Weizenkorn unterscheiden. Die Methode der Fuchsinrot-Färbung nach FRANKENFELD (zit. in SHARIFI 1972) wurde nicht verwendet, da eine Beeinflussung der Begasungsversuchsergebnisse nicht ausgeschlossen werden kann. Außerdem sollten während des Versuchs schlüpfende Käfer die Möglichkeit haben, an unbelegten Weizenkörnern zu fressen, da sonst auch belegte Körner angebohrt und so noch nicht geschlüpfte Tiere abgetötet werden. Statt dessen wurde experimentell versucht, eine möglichst hohe Belegungsrate zu erzielen. Dazu wurde bei gleichbleibender

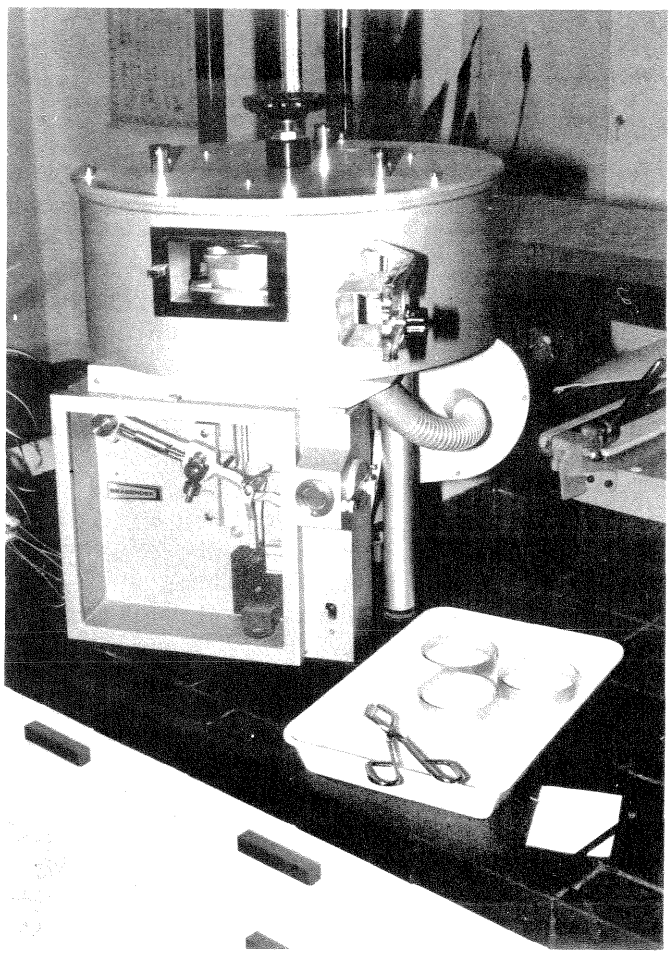


Abb. 11 Der Feuchtegehalt des feingemahlenen Weizens wird in einem BRABENDER Feuchtemesser überprüft.

Käferzahl die Menge zugegebenen Weizens variiert.

Das Geschlechterverhältnis der Kornkäfer ist abhängig von den Lebensbedingungen. Bei hoher Populationsdichte überwiegt der Anteil an Männchen (CISIELSKA 1985). Für die Zuchtversuche gingen wir von der ungünstigen Voraussetzung aus, daß nur 40 Prozent der Käfer Weibchen sind. Die Käfer wurden für drei Tage zur Oviposition auf dem Weizen belassen. Beste Schlupfraten wurden mit dem Ansatz "pro Weibchen und Tag Belegungszeit ein Korn" erreicht. Nach diesem Ansatz wurden etwa 2500 Käfer beiderlei Geschlechts (27ml, mit statistisch etwa 40% = 1000 Weibchen) für 3 Tage auf ca. 3000 Weizenkörner (142,2g) in Zuchtgläser mit 2 l Fassungsvermögen (Durchm. 12cm) gesetzt. Nach 3 Tagen Belegungszeit wurden die Käfer abgesiebt (Siebmaschenweite 2mm, nach FRANEK 1975) und die Körner in kleine Schraubdeckelgläser überführt (Abb. 12). Eine Käferpopulation wurde für etwa einen Monat zur Eiergewinnung verwendet. Unter diesen Bedingungen schlüpften nach 5-6 Wochen Entwicklungszeit junge Käfer aus 70 bis 90 Prozent des belegten Weizens. Weizenkörner und mindestens ca. 2 Wochen alte Käfer wurden in wöchentlichem Turnus angesetzt, sodaß für die Begasungsversuche ein bis fünf Wochen alte Brut und Imagines zur Verfügung standen.

Tatsächlich waren bei einer späteren Untersuchung des Geschlechterverhältnisses von 268 untersuchten Kornkäfern 44,2 Prozent (118 Tiere) Weibchen, sodaß man bei dem hier verwendeten Zuchtansatz sogar auf etwas weniger als ein Weizenkorn pro Weibchen und Tag kommt.

5.2 MATERIAL UND METHODEN

Untersucht wurden vier Gasgemische :
Gas 1: 1% Sauerstoff, 99% Stickstoff
Gas 2: 2% Sauerstoff, 98% Stickstoff
Gas 3: 3% Sauerstoff, 97% Stickstoff
Gas 4: 2% Sauerstoff, 88% Stickstoff, 10% Kohlendioxid.
(Schwankungen ± 0,3% absolut)

Die fünf Brutstadien und ca. 14 Tage alte Imagines des Kornkäfers wurden in Versuchen 2 bis 6 Wochen (für

Abb. 12 Kleine Schraubdeckelgläser mit verschieden alten Brutstadien. Die großen Gefäße enthalten jeweils etwa 2500 mindestens 2 Wochen alte Kornkäfer auf ca. 3000 unbelegten Weizenkörnern.

Gas 2 und Gas 4 auch 7 Wochen) lang begast. In der Regel wurden die Versuche für jedes Altersstadium drei mal wiederholt.

Insgesamt wurden 870 Käfige mit Brut bzw. Käfern begast, 386 Käfige mit Brut oder Imagines wurden als unbehandelte Kontrolle angesetzt. Begast wurde in Klimazellen bei 15 und 20 Grad Celsius und schwacher Beleuchtung; zur anschließenden Nachzucht wurden die Tiere wieder in einem Raum mit 25 Grad Celsius gebracht. Für die Versuche wurden je ca. 50 Körner (je nach Altersstadium 1,7g bis 2,3g) belegten Weizens in kleine röhrenförmige Edelstahl-Drahtgazekäfige (Maschenweite 0,135mm) eingewogen, meist jedoch eingezählt. Bei der Begasung von Käfern wurden wahllos 50 Tiere abgezählt und zusammen mit ca. 5g Weizen in etwas größere Drahtgazekäfige gefüllt (Abb. 13). Die Käfige wurden mit Gummistopfen verschlossen, (je nach Altersstadium) beschriftet und von jedem zu untersuchenden Altersstadium je ein Käfig in eine 500ml Gaswaschflasche gegeben. Anschließend wurden die Gaswaschflaschen mit Weizen aufgefüllt, der Schliff mit Vakuumfett gefettet und mit einem gläsernen Gaswaschflascheneinsatz verschlossen, von dessen zwei Verbindungsstutzen einer bis auf den Boden des Gefäßes reichte. Flaschen, die mit demselben Gasgemisch und bei derselben Temperatur aber unterschiedlich langen Einwirkzeiten begast werden sollten, wurden in Reihe geschaltet und mit PVC-Schlauch (lichte Weite 8mm, Wandstärke 2mm) verbunden.

Die Gasgemische aus nachgereinigtem Stickstoff (zum Teil Kohlendioxid) und Sauerstoff wurden mit einem manometrischen Gasmischgerät (SETARAM, Rampé à gaz) hergestellt (Abb. 14). Dazu wurde der mit Stickstoff gespülte und dann evakuierte Versuchsgaszylinder zunächst mit N2 gefüllt, bis das Manometer des Gasmischgeräts einen leichten Überdruck (z.B. 1500mbar) anzeigte. Das Flaschenventil wurde verschlossen und Leitungen und Mischgerät mit Sauerstoff durch wiederholtes Evakuieren gespült. Anschließend wurde im Gasmischgerät ein höherer O2-Überdruck (z.B. 1600mbar) erzeugt, damit beim dann folgenden Öffnen des Flaschenventils kein Stickstoff zurückströmen konnte. Die Flasche wurde geöffnet und solange Sauerstoff aus einer Druckflasche dazudosiert, bis die Druckerhöhung am Manometer im Verhältnis zum angestrebten Gesamtdruck dem gewünschten

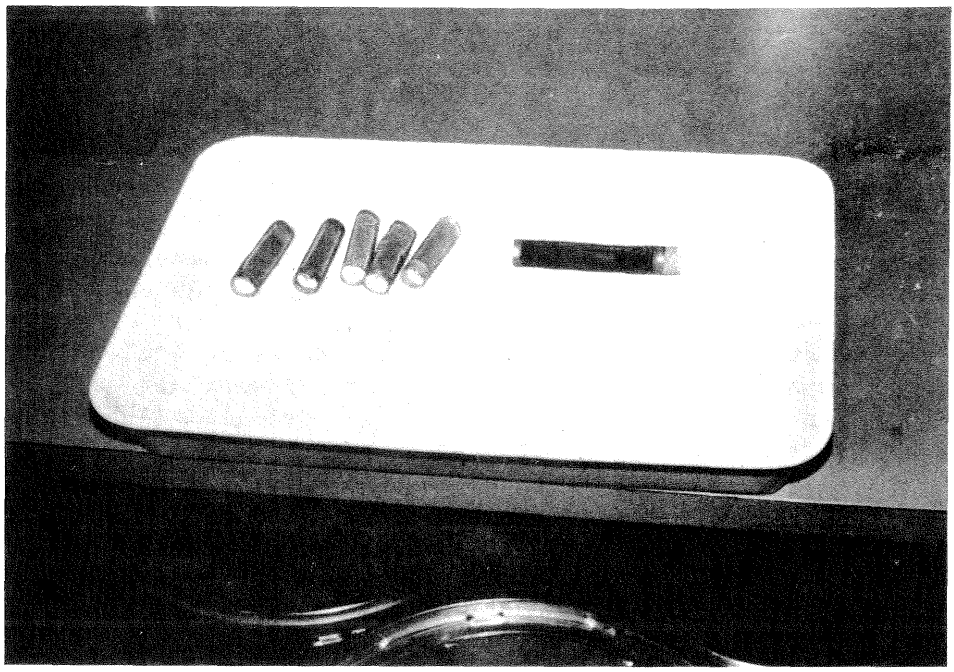


Abb. 13 Drahtgazekäfige mit Gummistopfen für Brutstadien und adulte Kornkäfer.

Sauerstoffprozentanteil entsprach (bei Gas 2 und 10000mbar Gesamtdruck z.B. von 1500mbar auf 1700mbar = 200mbar O_2-Partialdruck, entsprechend 2 Vol.% O_2). Die Versuchsgas-Flasche wurde verschlossen und nach Spülung von Leitungen und Mischgerät mit N_2 auf den angestrebten Gesamtdruck (z.B. 10bar) gebracht. Nach ein bis zwei Tagen wurde die Sauerstoffkonzentration mit einem Oxymeter (SERVOMEX Oxygen Analyser 580 A) überprüft (Abb. 14, Schwankungen ± 0,05%).

Das durch ein Kupferrohr in die Klimazellen geleitete Gas wurde zunächst mit einem drosselbaren Durchflußmesser auf 1000ml Gasdurchlauf pro Minute eingestellt und anschließend durch eine gesättigte Kochsalzlösung geleitet, um 70 ± 5 Prozent Gasfeuchte zu erhalten. So wurde der

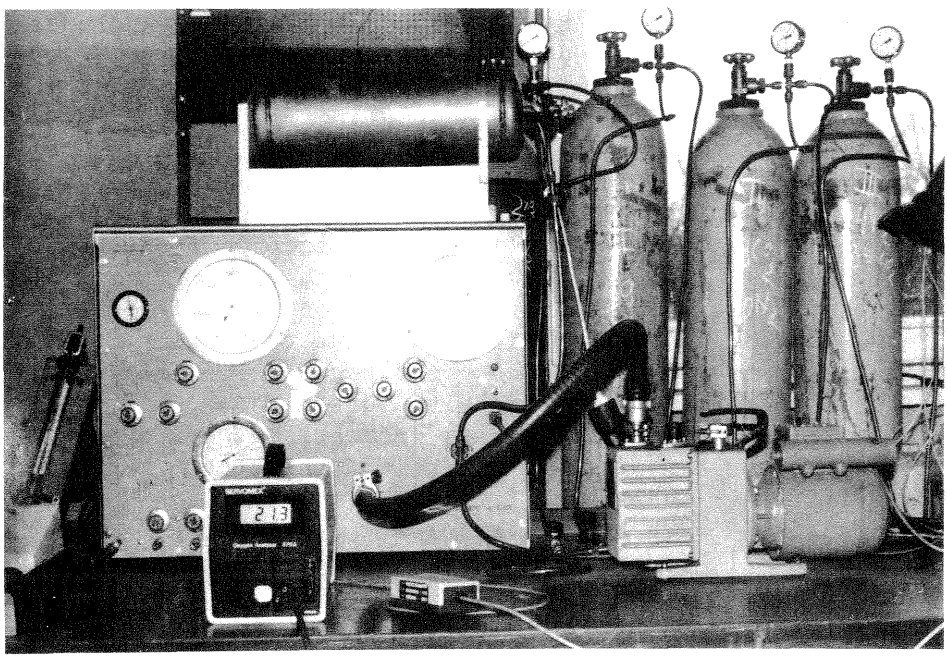


Abb. 14 Manometrisches Gasmischgerät und elektronisches Oximeter (zur Überprüfung des Sauerstoffgehalts). Außerdem sind die Flaschen für die angemischten Versuchsgase und eine Vakuumpumpe zu sehen.

zusätzliche, möglicherweise entwicklungshemmende Effekt eines trockenen Gases verhindert. Direkt hinter dem Befeuchter wurde die Gaswaschflasche mit der kürzesten Einwirkzeit (z.B. 2 Wochen) angeschlossen, darauf folgten die zunehmend längeren Begasungszeiten hintereinander (z.B. 3, 4, 5, 6 Wochen, Abb. 15).

Die Einsätze der Flaschen waren so miteinander verbunden, daß das Gas zunächst durch den Stutzen mit dem langen Glasrohr zum Flaschenboden geleitet wurde und dann oben durch den kurzen Auslaufstutzen herausstömte. Nachdem

das Gas alle Flaschen passiert hatte, wurde es über eine Kupferleitung aus den klimatisierten Begasungszellen wieder zurück in den Kontrollraum geleitet und dort durch das oben genannte Oximeter auf seinen Sauerstoffgehalt überprüft. Begast wurde nach folgenden zwei Modi:

1. Im überwiegenden Teil der Versuche (I-IV) wurden die Gaswaschflaschen zwei Stunden lang mit einer Spülrate von 1000 ml pro Minute gespült und anschließend für ca. 5 Stunden eine sehr niedrige Spülrate (ca. 20ml/Min.) eingestellt. Die Begasungsstutzen wurden anschließend luftdicht verschlossen und die Versuchsgefäße dann über die festgesetzte Einwirkzeit bei der Versuchstemperatur stehengelassen. Die unbehandelten zur Kontrolle angesetzten Tiere wurden wie Versuchstiere in Gaswaschflaschen gegeben. Diese Flaschen wurden jedoch nicht begast, sondern mit dem natürlichen Luftsauerstoffgehalt verschlossen. Für jedes Altersstadium, jede Einwirkzeit und jede Temperatur gab es pro Versuchsreihe mindestens eine Kontrollprobe. Eine hohe Mortalität der unbehandelten Kontrolltiere nach längeren Einwirkzeiten auch bei niedriger Versuchstemperatur führten dazu, daß die Sauerstoffabnahme in der Flasche periodisch überprüft wurde. Es zeigte sich, daß auch bei der unbehandelten Kontrolle (Luft) durch den Sauerstoffverbrauch der Tiere und Dissimilationsvorgänge im Weizen nach gut vierzehn Tagen Sauerstoffkonzentrationen erreicht wurden (um 1%), die zur Abtötung der Käfer führten. Die so erreichten Mortalitäten entsprechen also dem Effekt einer hermetischen Getreidelagerung. Diese Ergebnisse sind in der vorliegenden Arbeit nicht aufgeführt.

2. Um Sauerstoffkonzentrationsschwankungen möglichst gering zu halten, wurde (nach einem hier nicht ausgewerteten Zwischenversuch mit wöchentlichen Begasungen) bei späteren Versuchsreihen täglich nachgespült (V, VI). Nachbegasungen wurden hierbei jeweils mindestens so lange durchgeführt, bis das Gas aus den Versuchsgefäßen in seinem O2-Gehalt dem eingeleiteten Gas entsprach. Auch hier betrug die Gasdurchlaufrate 1000 ml pro Minute.

Die als Kontrolle gehaltenen unbehandelten Altersstadien wurden wie Versuchstiere bei Versuchstemperatur in Gaswaschflaschen mit Weizen aufbewahrt, die jedoch nicht mit einem Glasstutzen, sondern durch eine gasdurchlässige Stoffbindung verschlossen waren. Die Luft in den

klimatisierten Zellen wurde wegen des so ermöglichten Gasaustausches durch (DEFENSOR) Luftbefeuchter auf 70 ± 5 Prozent Luftfeuchte gebracht. Es wurde darauf verzichtet, die Kontrollflaschen mit Luft zu spülen, da schon Belüftung eine Beunruhigung der Tiere darstellt und auch durch den zusätzlichen Kühlungseffekt zu höheren Mortalitäten der unbehandelten Tiere führen kann (NAVARRO 1975). Da in den hier beschriebenen Versuchen die unbehandelten Proben einem nicht bekämpften Befall im Vorratslager entsprechen sollten, wurde in Kauf genommen, daß es sich bei dem in behandelten Proben erzielten Effekt um eine Kombination aus der Wirkung des Gases und der Wirkung des Spülvorgangs handelt.

Nur die im zweiten Begasungsmodus angesetzten unbehandelten Tierproben gingen als Kontrolle in die Auswertung

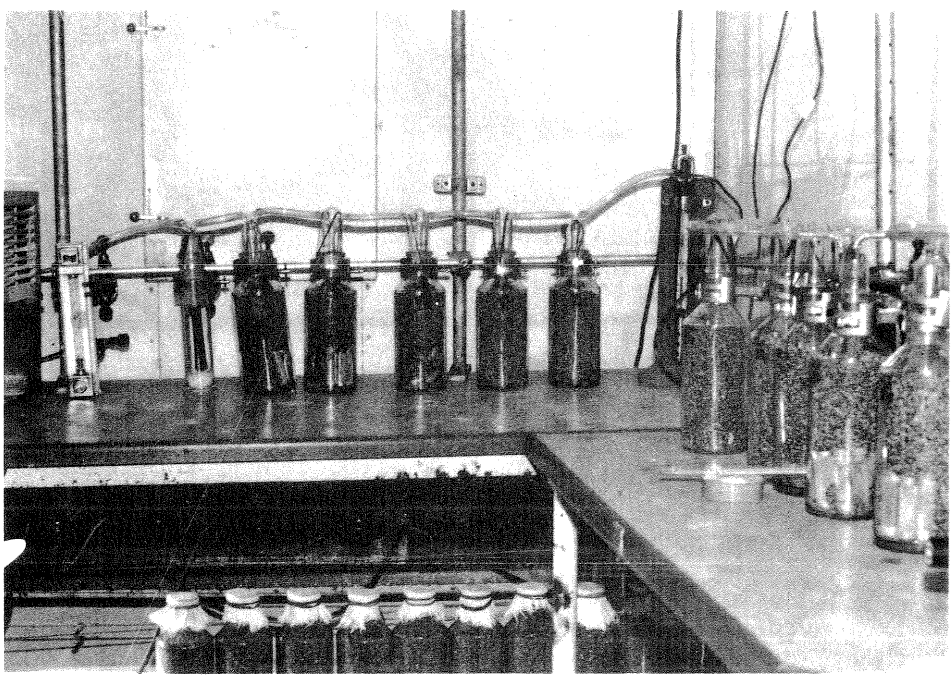


Abb. 15 Versuchsanordnung in den klimatisierten und feuchteregulierten Versuchszellen.

der Versuchsergebnisse ein.

Nach der jeweiligen Einwirkzeit wurden die Flaschen geöffnet und die belegten Weizenkörner bzw. die Käfer aus den Käfigen in Petrischälchen überführt. So wurden sie bei 25 Grad Celsius und 70 Prozent Luftfeuchte gelagert (Abb. 16).

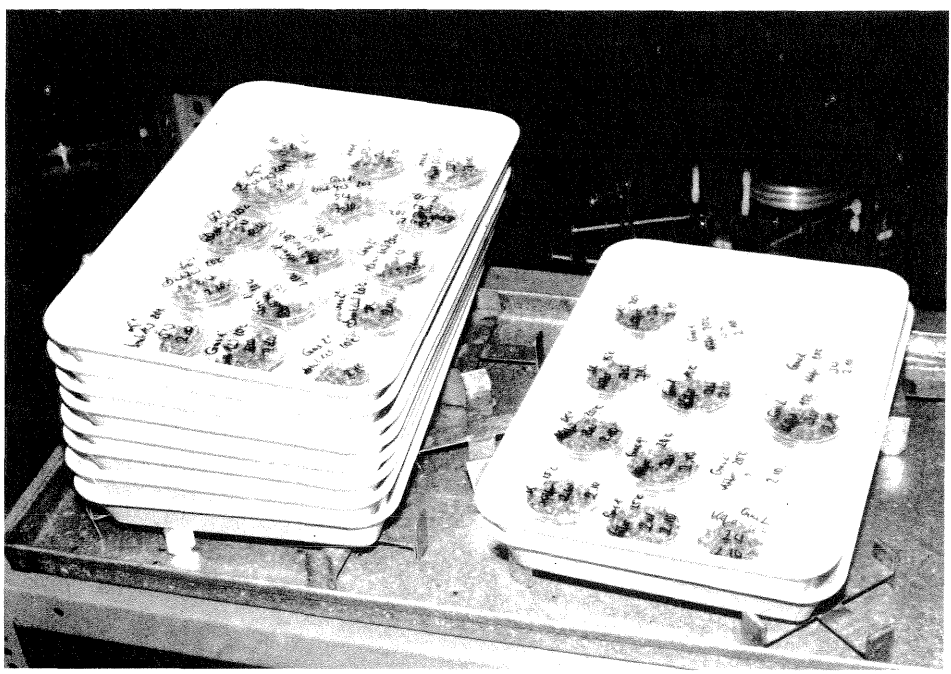


Abb. 16 Petrischälchen mit verschiedenen Entwicklungsstadien zur Nachzucht und Schlupfkontrolle nach Versuchsende.

Der Schlupf aus den Körnern bzw. die Mortalität der Käfer wurde anschließend für mindestens zehn Wochen wöchentlich überprüft. Dabei wurden nur vollständig geschlüpfte Käfer gezählt. In einigen Fällen wurde bei länger begasten fünf Wochen alten Brutstadien tote geschlüpfte Käfer beim Öffnen der Käfige gefunden. Diese waren offenbar während der Begasung geschlüpft und dann

abgestorben. Leblose Käfer wurden eine Woche lang aufbewahrt, um sicherzustellen, daß die Tiere tatsächlich tot waren. Beim ersten Öffnen gefundene tote Käfer wurden registriert, aber in die Ergebniszusammenfassung nicht mit aufgenommen. Auch bei späteren Nachkontrollen fanden sich gelegentlich tote Käfer. Diese wurden wie lebende als geschlüpft gezählt, da man nicht mit Sicherheit davon ausgehen kann, daß diese Tiere keine Gelegenheit zur Vermehrung hatten.

Die bei Zucht, Versuch und Nachkontrolle herrschenden Temperaturen werden durch ein Temperaturprofil verdeutlicht (Abb. 17).

Um die Einflüsse des Weizens auf Veränderungen der Sauerstoffkonzentation in den Versuchsgefäßen festzustellen, wurde in einem Nebenversuch auch Weizen ohne Versuchstierkäfige begast.

5.3 ERGEBNISSE UND DISKUSSION

Die Rohdaten der Versuchsergebnisse (Schlupfprotokolle) wurden in Prozent umgerechnet, wobei für jedes Altersstadium der Brut und jede Versuchsreihe die höchste Anzahl geschlüpfter Tiere (maximal jedoch 45 Tiere) gleich 100 Prozent gesetzt wurden. Auf diese Weise wurden unterschiedliche Versuchsergebnisse auf Grund verschiedener Belegungsraten der Weizenkörner augeglichen. Bei Käfern wurden 50 Tiere als 100 Prozent angenommen, da in diesem Fall die Tiere direkt in die Versuchskäfige eingezählt worden waren.

In Tabelle 1 sind die Ergebnisse aus gleichartigen Versuchsansätzen (also gleiches Gas, Altersstadium und Einwirkzeit) gemittelt.

Aus der Umrechnung dieser Werte in "Prozent Mortalität" (Tab. 2) wurden dann die Abbildungen 18a-f (einmalige Begasung) und 19a-f (tägliche Nachspülung) erstellt, in denen für jedes Altersstadium Mortalität gegen Einwirkzeit aufgetragen ist. Auf Balken für die Standartabweichungen (siehe Tab. 1) wurde aus Gründen der Übersichtlichkeit verzichtet. Die einzelnen Werte wurden durch Ausgleichsgeraden nach Augenmaß miteinander verbunden.

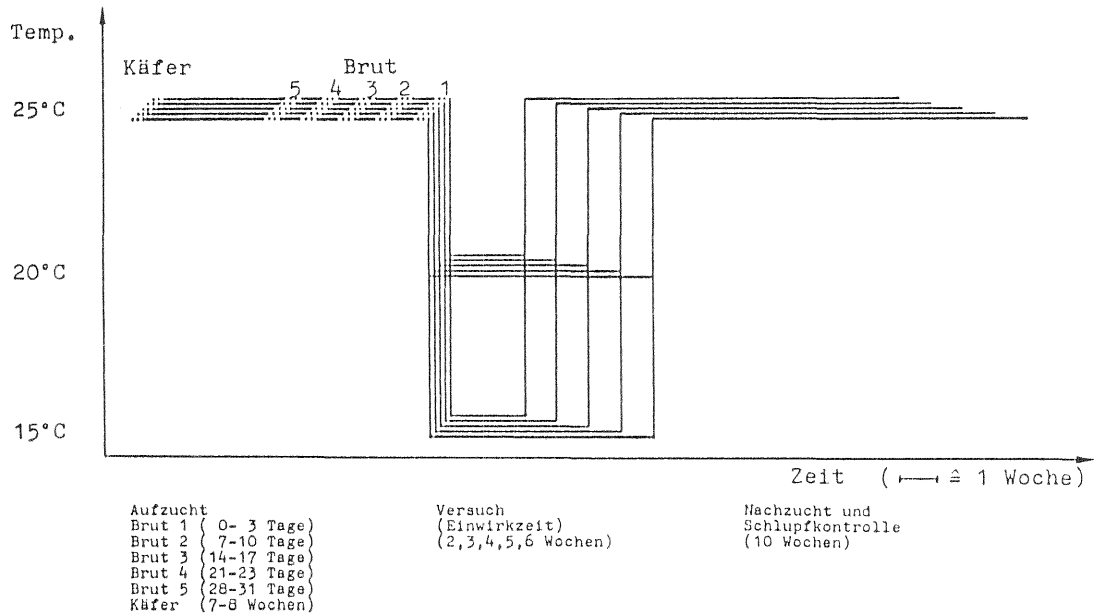


Abb. 17 Temperaturprofil des Versuchsansatzes
Jede der parallelen Linien bedeutet eine andere Einwirkzeit (2 bis 6 Wochen). Gepunktet ist der 3 Tage-Zeitraum der Oviposition für das jeweilige Altersstadium. Unten links ist hinter jedem Altersstadium in Klammern die Zeit angegeben, die nach der Oviposition bei 25 Grad Celsius verbracht wurde. Käfer wurden ca. 2 Wochen nach dem Schlupf in den Versuch genommen, waren ab Oviposition also etwa 7 bis 8 Wochen alt, da der Schlupf unter diesen Bedingungen zwischen der 5. und 6. Woche erfolgt.

Falls die Werte verschiedener Gase über mehrere Einwirkzeiten nicht weiter als maximal 20 Prozent auseinander lagen, so wurde eine gemeinsame Ausgleichsgerade gelegt.

Aus diesen Mortalitätskurven wurden dann grafisch die LT50-, LT75- und LT90-Werte ermittelt (Tab. 3a-c und Abb. 20a-c).

Auf Grund der höheren Stoffwechselaktivität von Kornkäfern und Weizen bei 20 Grad Celsius entsteht bei dieser Temperatur schneller ein Sauerstoffdefizit als bei 15 Grad Celsius. Durch eine Begasung von Weizen ohne Tierproben stellte sich heraus, daß der Weizen zu Beginn des Versuchs (innerhalb der ersten Woche) den im Korn gebundenen Luftsauerstoff an die O2-arme kontrollierte Atmosphäre abgibt. Dies deckt sich mit den Versuchsergebnissen von BAILEY (1965). Später treten im Korn ablaufende sauerstoffzehrende Dissimilationsprozesse in Konkurrenz mit der Sauerstoffveratmung durch die Vorratsschädlinge. Der Sauerstoffgehalt von mit Gas 2 gespülten einzelnen 2 Liter-Gaswaschflaschen mit einem Gesamtvolumen von 2370ml, gefüllt mit 1805g Weizen (14% Kornfeuchte), nahm bei wöchentlicher Nachspülung bei 15 Grad Celsius in sieben Tagen durchschnittlich auf 0,9 Prozent, bei 20 Grad Celsius auf unter 0,1 Prozent ab. Dies bedeutet einen Sauerstoffverbrauch von ca. 1ml (15°C) bzw. ca. 1,8ml (20°C) pro kg Weizen und Tag. Auch BANKS (1983b) stellt fest, daß Weizen mit über 13 Prozent Kornfeuchte einen signifikanten Sauerstoffverbrauch hat.

5.31 Einfluß der Temperatur

Betrachtet man die Anzahl geschlüpfter Tiere bzw. überlebender Käfer aus den unbehandelten Kontrollen, so wird deutlich, daß für bestimmte Altersstadien 15 Grad Celsius gegenüber 20 Grad Celsius einen gewissen Letalfaktor darstellen. Als besonders kälteempfindlich erweisen sich die Stadien Brut 1, Brut 4 und Brut 5 (siehe Abb. 19a-f). Nach dem U-Test von Wilcoxon, Mann und Whitney (SACHS 1974) ist die Mortalitätsrate dieser Stadien signifikant höher bei 15 Grad als bei 20 Grad Celsius (Irrtumswahrscheinlichkeit $2\alpha = 0,01$).

Während bei kurzen Versuchszeiten (2 und 3 Wochen) die

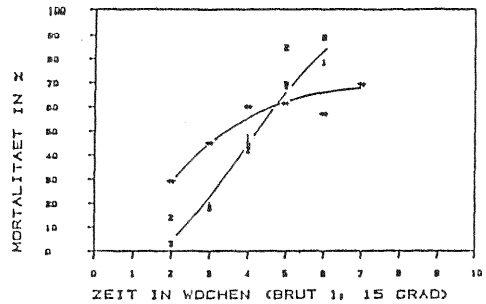
Kälteeinwirkung bei unbehandelten Tieren von Brut 1 (Eier) zu einer höheren Mortalität führt als bei den begasten Tieren, stabilisiert sich ab etwa 4 Wochen Einwirkzeit die kältebedingte Mortalität bei ca. 60 Prozent und die begasten Proben nähern sich einer Rate von 100 Prozent Mortalität an. Diese besonders ausgeprägte Kälteempfindlichkeit der Eistadien wird bestätigt durch die Feststellungen von HOWE und HOLE (1968), die ebenfalls bei 25 Grad Celsius (70% Luftfeuchte) abgelegte Eier 15 Grad Celsius aussetzten. Die Mortalität der zwei Tage alten Eier lag in ihren Versuchen nach acht Wochen Kälteexposition bei über 60 Prozent. HOWE und HOLE stellen fest, daß auch 23 bis 26 Tage alte Brut (späte Larven) gleich hohe Mortalitätsraten erreichen. Tatsächlich liegen auch in den Versuchen der vorliegenden Arbeit die Mortalitätsraten der Brut 4 (21 bis 24 Tage) bei etwa 60 Prozent und Brut 5 (28 bis 31 Tage, Puppen,) erreicht immerhin noch über 40 Prozent Mortalität nach 7 Wochen bei 15 Grad Celsius.

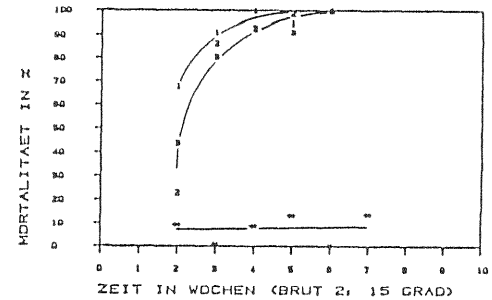
Für Brut 2 (7 bis 10 Tage) liegt die Mortalitätsrate der unbehandelten Kontrolle bei 15 Grad Celsius wesentlich niedriger (unter 10%) und erreicht bei Brut 3 (14 bis 17 Tage) einen Wert von knapp über 10 Prozent nach 7 Wochen.

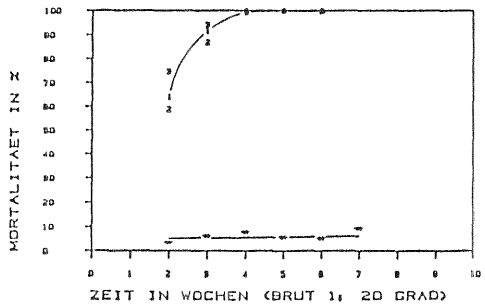
Käfer sind nicht sehr kälteempfindlich. Auch nach 7 Wochen bei 15 Grad Celsius liegt die Mortalität der unbegasten Imagines deutlich unter 10 Prozent und nur wenig über den Werten der bei 20 Grad gehaltenen Tiere.

Eine Temperaturverminderung von 25 Grad auf 20 Grad Celsius kann offensichtlich von allen Entwicklungsstadien des Kornkäfers toleriert werden. Die Sterblichkeit der Kontrolltiere liegt in allen Fällen unter 10 Prozent.

(Fortsetzung S. 69)







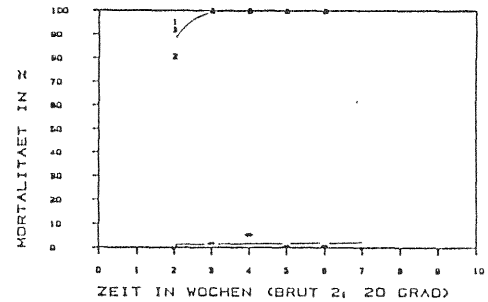


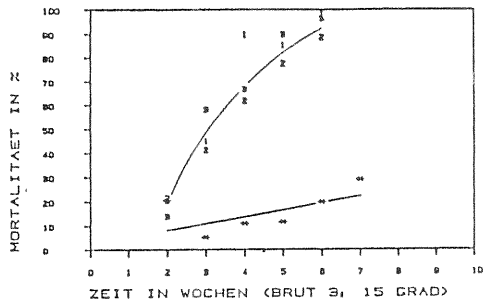
Abb. 18a

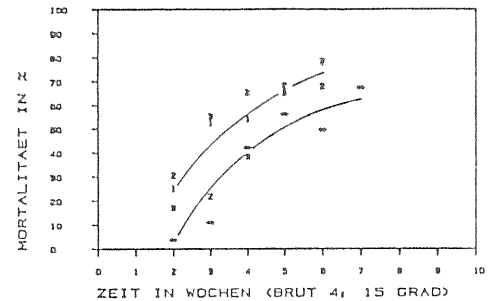
Abb. 18b

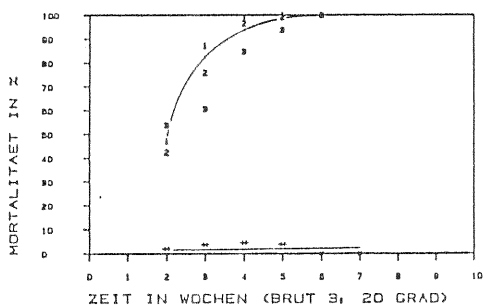
Mortalitätsraten von Sitophilus granarius Brut 1 und Brut 2 bei einmaliger Begasung

1 = Gas 1 (99% N2, 1% O2); 2 = Gas 2 (98% N2, 2% O2); 3 = Gas 3 (97% N2, 3% O2);

* = Unbehandelt (Luft)







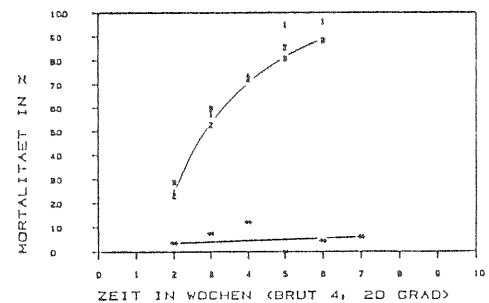
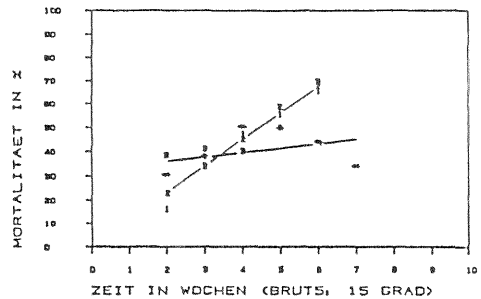
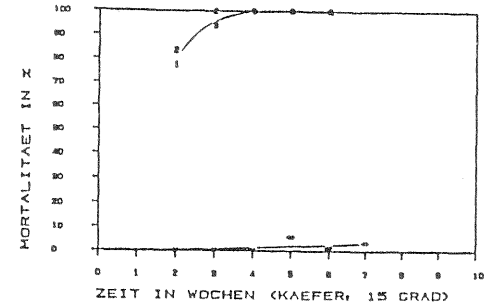


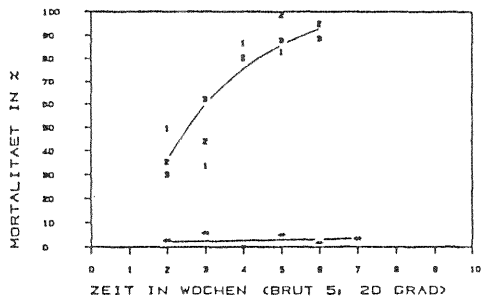
Abb. 18c

Abb. 18d

Mortalitätsraten von Sitophilus granarius Brut 3 und Brut 4 bei einmaliger Begasung
1 = Gas 1 (99% N2, 1% O2); 2 = Gas 2 (98% N2, 2% O2); 3 = Gas 3 (97% N2, 3% O2);
* = Unbehandelt (Luft)







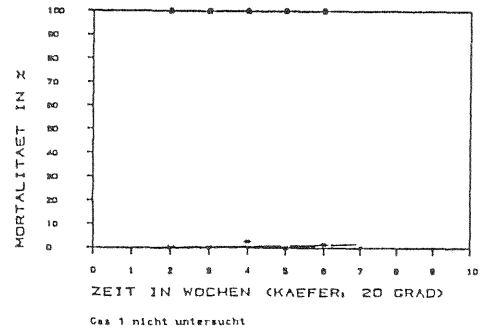
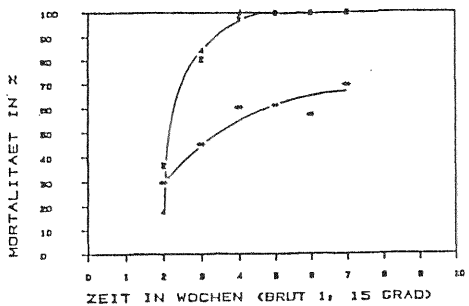


Abb. 18e

Abb. 18f

Mortalitätsraten von Sitophilus granarius Brut 5 und Käfern bei einmaliger Begasung
1 = Gas 1 (99% N2, 1% O2); 2 = Gas 2 (98% N2, 2% O2); 3 = Gas 3 (97% N2, 3% O2);
* = Unbehandelt (Luft)



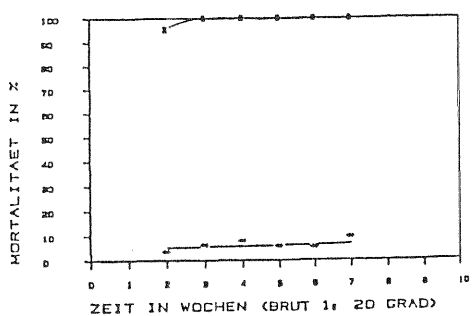
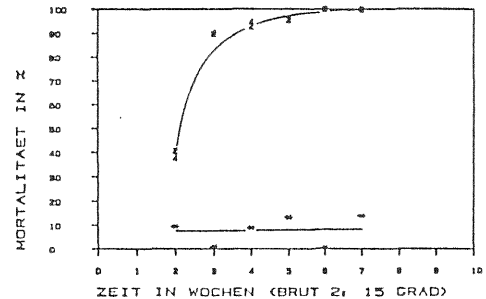


Abb. 19a



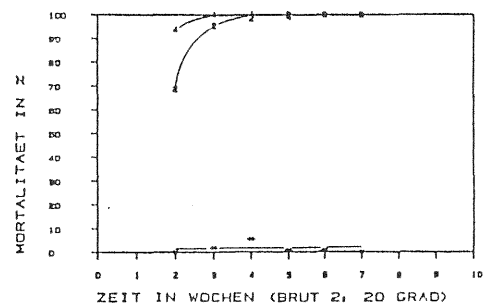
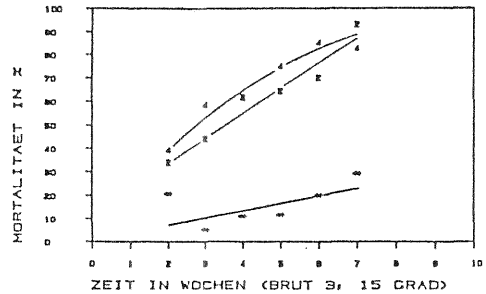
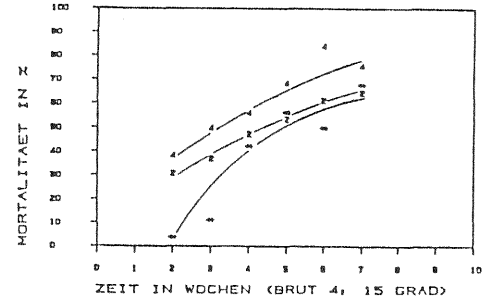


Abb. 19b

Mortalitätsraten von Sitophilus granarius Brut 1 und Brut 2 bei täglicher Spülung
2 = Gas 2 (98% N2, 2% O2); 4 = Gas 4 (88% N2, 10% CO2, 2% O2); * = Unbehandelt (Luft)





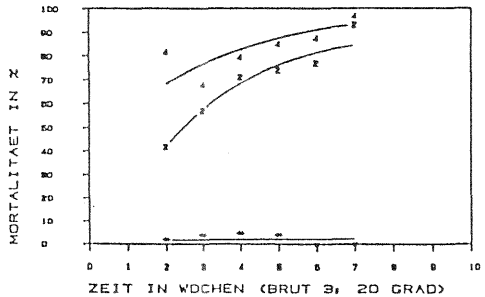


Abb. 19c

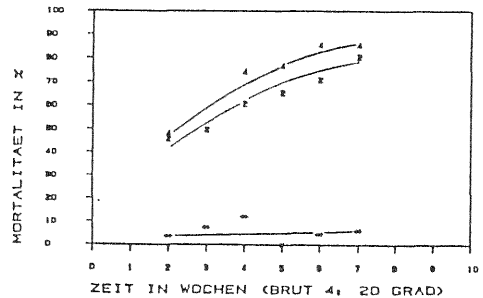
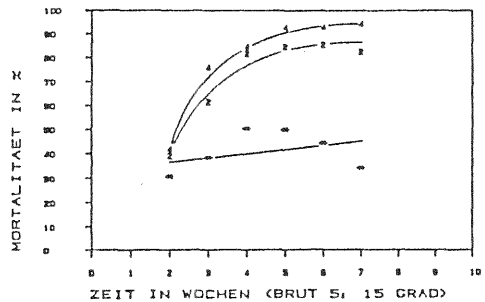


Abb. 19d

Mortalitätsraten von Sitophilus granarius Brut 3 und Brut 4 bei täglicher Spülung
2 = Gas 2 (98% N2, 2% O2); 4 = Gas 4 (88% N2, 10% CO2, 2% O2); * = Unbehandelt (Luft)



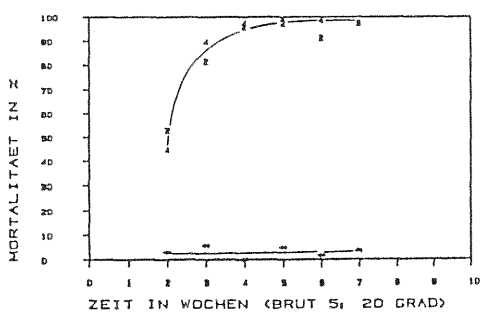
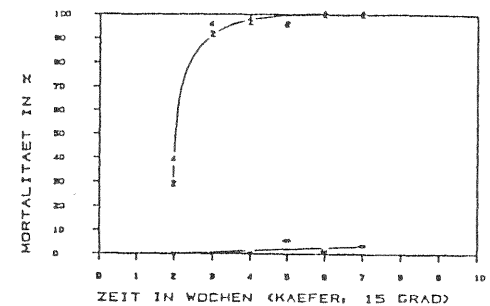


Abb. 19e



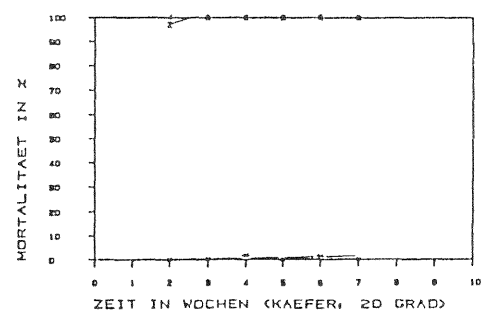


Abb. 19f

Mortalitätsraten von Sitophilus granarius Brut 5 und Käfern bei täglicher Spülung
2 = Gas 2 (98% N2, 2% O2); 4 = Gas 4 (88% N2, 10% CO2, 2% =2); * = Unbehandelt (Luft)

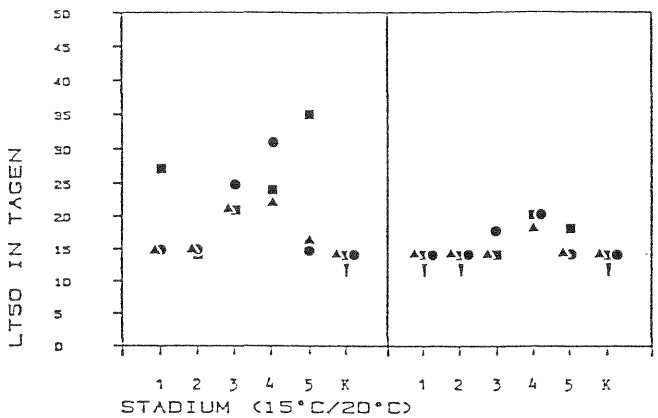


Abb. 20a (Symbolerklärung siehe Abb. 20c)

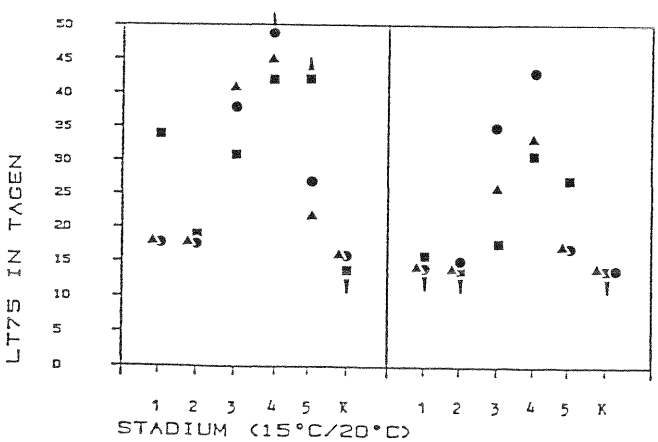


Abb. 20b (Symbolerklärung siehe Abb. 20c)

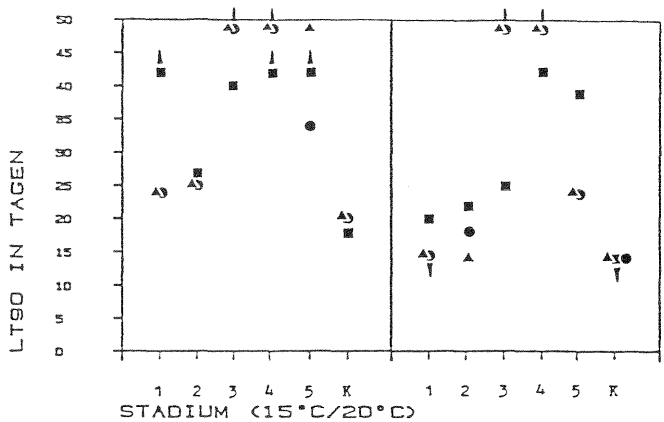


Abb. 20c

Abb. 20a-c Aus den Mortalitätskurven grafisch ermittelte letale Einwirkzeiten

■ = Mittelwert der Gase 1, 2 und 3 bei einmaliger Begasung

● = Gas 2 bei täglicher Begasung

▲ = Gas 4 bei täglicher Begasung

Ein nach oben bzw. unten gerichteter Pfeil zeigt an, daß die entsprechende letale Einwirkzeit über bzw. unter den getesteten Einwirkzeiten liegt. Bei einmaliger Spülung wurde 2 bis 6 Wochen, bei täglicher Spülung 2 bis 7 Wochen lang begast.
Die unter der Abszisse angegebenen Zeichen haben folgende Bedeutung:

1 = Brut 1 (0- 3 Tage alt)

2 = Brut 2 (7-10 Tage alt)

3 = Brut 3 (14-17 Tage alt)

4 = Brut 4 (21-23 Tage alt)

5 = Brut 5 (28-31 Tage alt)

K = Käfer (7-8 Wochen alt, etwa 2 Wochen nach dem Schlupf)

5.32 Einfluß der Gase

Die Unterschiede der durch Gas 1, Gas 2 und Gas 3 bei einmaliger Begasung erreichten Mortalitäten sind gering und liegen meist innerhalb der Standartabweichung. In den Mortalitätskurven (Abb. 18a-f) wurde deshalb meist nur eine Ausgleichsgerade nach Augenmaß für alle drei Gase gelegt.

Die Empfindlichkeit der Altersstadien für dieses Begasungsverfahren nimmt in folgender Reihenfolge ab: Brut 2 > Käfer > Brut 3 > Brut 1 > Brut 5 > Brut 4. Außer dem in Abbildung 9 angegebenen Sauerstoffbedarf spielt möglicherweise der Besitz von Reservestoffen eine Rolle für die Überlebensfähigkeit, da Brut 3 und Brut 4 trotz eines höheren Sauerstoffverbrauchs die sauerstoffarmen Atmosphären länger überleben als Brut 2.

Bei dem Begasungsmodus mit täglicher Spülung wurden nur Gas 2 (2% Sauerstoff, Rest Stickstoff) und Gas 4 (2% Sauerstoff, 10% Kohlendioxid, Rest Stickstoff) miteinander verglichen (Abb. 19a-f). Generell läßt sich sagen, daß eine Zumischung von 10 Prozent Kohlendioxid die Effektivität von Stickstoff mit 2 Prozent Sauerstoffrestgehalt steigert. Gas 4 ist oft etwas wirksamer als Gas 2. Allerdings ist der Unterschied zwischen den durch die Gase erreichten Mortalitäten meist nicht größer als 10 Prozent. Auch Gas 4 kann in 7 Wochen keine vollständige Abtötung von Brut 3, Brut 4 und Brut 5 bewirken. Insofern bestätigt sich die Feststellung von BAILEY und BANKS (1980), daß die Zumischung von einigen Prozenten Kohlendioxid zwar die Effektivität eines Gases erhöht, dadurch aber keine höhere Wirtschaftlichkeit des Bekämpfungsverfahrens durch ein Verkürzen der Behandlungszeit zu erreichen ist.

5.33 Einfluß der unterschiedlichen Begasungsmodi

Die durch einmalige Begasung bzw. tägliche Gasspülung mit Gas 2 erreichten Mortalitätswerte werden in Abbildung 21 miteinander verglichen. Die Signifikanz der Ergebnisunterschiede wurde mit Hilfe des Vorzeichentests (SACHS 1974) ermittelt.

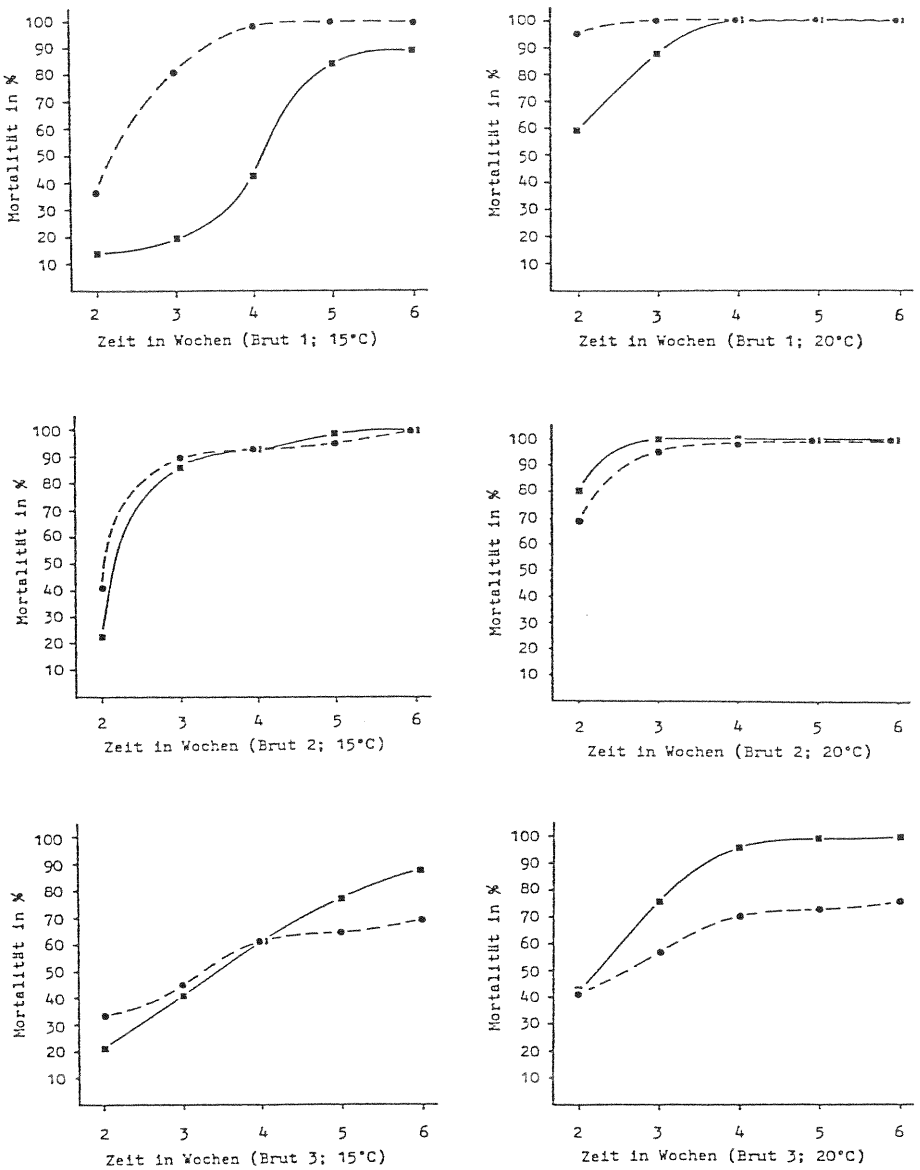


Abb. 21a Vergleich der mit Gas 2 durch einmalige Begasung (▪———▪) bzw. tägliche Spülung (•– – – –•) erreichten Mortalitäten bei 15 und 20 Grad Celsius; Brut 1, Brut 2, Brut 3.

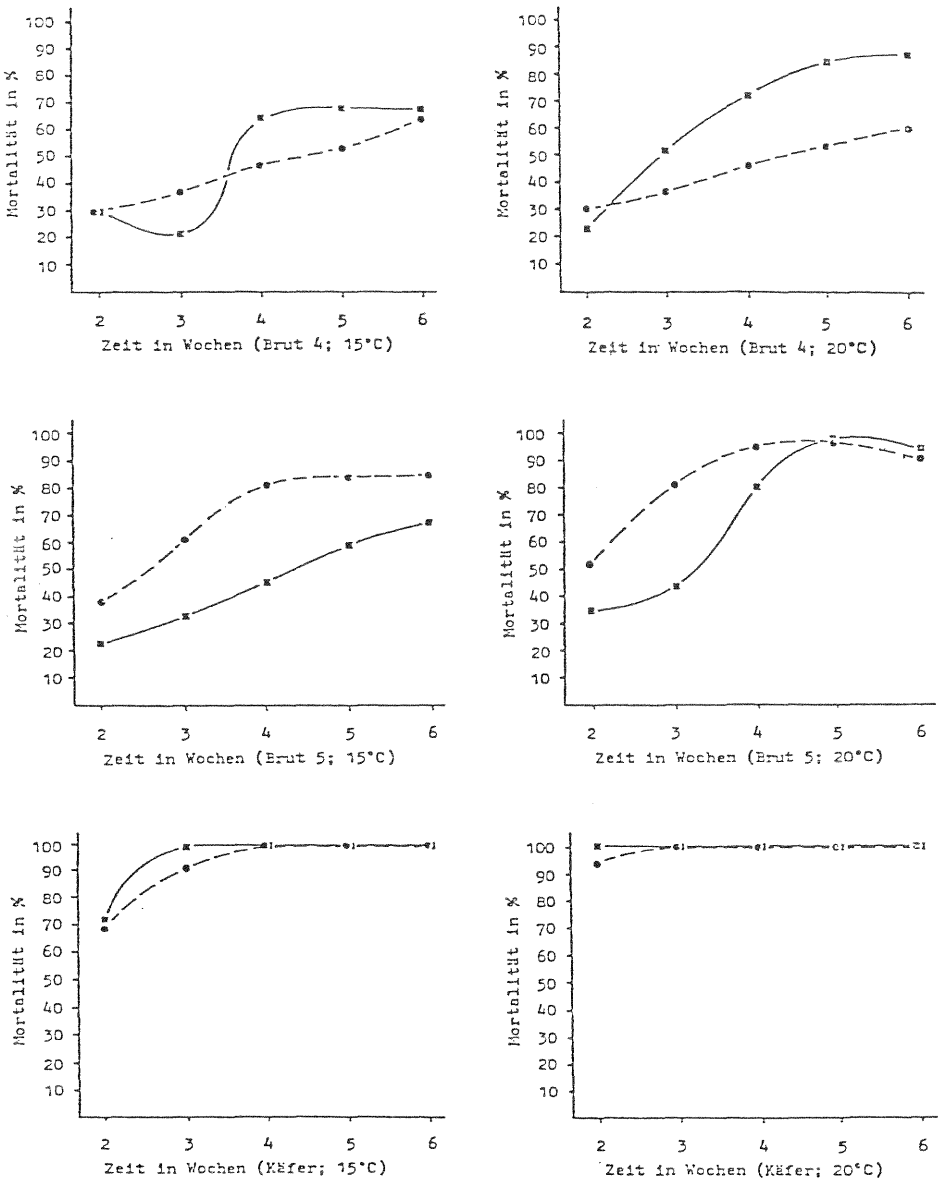


Abb. 21b Vergleich der mit Gas 2 durch einmalige Begasung (▪———▪) bzw. tägliche Spülung (•– – –•) erreichten Mortalitäten bei 15 und 20 Grad Celsius; Brut 4, Brut 5, Käfer.

Als signifikant wirksamer (Irrtumswahrscheinlichkeit $2\alpha = 0{,}01$) erweist sich die tägliche Spülung bei Brut 1 und Brut 5, 15 Grad Celsius, während bei Brut 3, 20 Grad Celsius die einmalige Begasung signifikant wirksamer ist. Bei Brut 4, 20 Grad Celsius ist bei langen Einwirkzeiten die einmalige Begasung deutlich effektiver, die tägliche Spülung erreicht aber bei 2 Wochen Einwirkzeit eine höhere Mortalität. Auch bei 15 Grad Celsius hat die tägliche Spülung bei kurzen Einwirkzeiten (2 und 3 Wochen) auf Brut 3 und Brut 4 eine stärkere Wirkung. Dies kann daran liegen, daß die tägliche Spülung möglicherweise den Aufbau von Wärmeinseln im Weizen verhindert und die von den Tieren produzierte Feuchte abtransportiert. Andererseits haben die diesen Effekt überlebenden atmungsaktiven Tiere der Brut 3 und Brut 4 bei täglicher Spülung insgesamt mehr Sauerstoff zur Verfügung. Brut 2 und Käfer sind gegenüber beiden Begasungsmodi annähernd gleich empfindlich.

5.34 Einfluß der Kombination aus Temperatur und Gas

Vergleicht man den Letaleffekt von niedriger Temperatur und oben genannten modifizierten Atmosphären, so fällt auf, daß interessanterweise gerade die kältesensitiven Stadien sich als relativ begasungsunempfindlich erweisen. Eier und Puppen sind diejenigen Stadien, die sich nicht bewegen, keine Nahrung aufnehmen und den geringsten Sauerstoffbedarf haben. Stoffwechsel, Bewegung und Oxidationen erzeugen bekannterweise Wärme, sodaß dies eine Erklärung dafür sein könnte, weshalb Larven und Käfer niedrige Temperaturen besser überstehen können. Andererseits sind Eier und Puppen durch die oben genannten Eigenschaften unempfindlicher für Sauerstoffmangel. Warum kann bei längeren Begasungszeiten nun aber doch eine vollständige Abtötung der Brut 1 erreicht werden? Nach der die Abhängigkeit von Temperatur und Entwicklungszeit (bei 70% Luftfeuchte) beschreibenden Kurve (Abb.7) entspricht eine Woche Entwicklung bei 25 Grad Celsius etwa 3 Wochen bei 15 Grad Celsius. Der Sauerstoffmangel hat bei den begasten Eiern offensichtlich einen zusätzlichen entwicklungsverzögernden aber nicht abtötenden Effekt. So ließe sich jedenfalls erklären, warum bei kurzen Begasungszeiten

(bis zu 3 Wochen) im Vergleich zur unbehandelten Kontrolle ein höherer Prozentsatz der begasten Tiere überlebt. Diese Hypothese würde allerdings bedeuten, daß zumindest junge Eier nicht durch 15 Grad Kälte abgetötet werden können und daß die begaste Brut zunächst durch den entwicklungsverzögernden Effekt des Sauerstoffmangels geschützt ist. Die schließlich zwischen 4 und 7 Wochen Versuchsdauer schlüpfenden Larven können ihren dann starken Sauerstoffbedarf nicht decken und sterben ab.

Bei höherer Temperatur (20°C) ist die Entwicklungsgeschwindigkeit der Eier größer und dadurch tritt auch die letale Wirkung des Sauerstoffdefizits auf die schlüpfenden Junglarven schneller ein.

Die in dieser Arbeit verwendeten Atmosphären haben auf Brut 4 bei 15 Grad Celsius nur einen geringen Abtötungseffekt. Die Wirkung des Gases ist hier nur wenig stärker als die der Temperatur. Andererseits scheint der Schutz durch einen entwicklungsverzögernden Einfluß der Gase auf Brut 4 stärker zu sein als bei den Eistadien; denn auch bei 20 Grad Celsius überleben nach 7 Wochen noch einige widerstandsfähige Individuen, die erst einige Zeit nach Begasungsende schlüpfen. Tiere der Brut 4, also späte Larven, sind möglicherweise deshalb noch widerstandsfähiger als Puppen (Brut 5), weil sie noch die gesamte Verpuppungszeit vor sich haben, während der sie Sauerstoffmangel relativ gut überstehen können.

Die in diesen Versuchen für eine vollständige Abtötung bestimmter Stadien ermittelten Einwirkzeiten liegen durchweg höher als die von REICHMUTH (1987) angegebenen Werte. Dies kann daran liegen, daß in den hier beschriebenen Versuchen 500ml Gaswaschflaschen mit Weizen gefüllt waren, während in den Versuchen von REICHMUTH die Käfige mit Kornkäferbrutstadien in leeren Flaschen mit 250ml Volumen begast wurden. Der Weizen gibt bei einer Begasung zunächst noch in ihm absorbierten Luftsauerstoff an die Umgebung ab und absorbiert eine gewisse Menge an Kohlendioxid (OXLEY und WICKENDEN 1962). Bei nur 2 Prozent Sauerstoff dürfte das durch Atmungsprozesse entstehende Kohlendioxid also wahrscheinlich ganz absorbiert werden. Andererseits führen Atmungsprozesse im Weizen zu einem schnelleren O2-Verbrauch im Versuchsgefäß (siehe S. 59), sodaß die bald entstehende Sauerstoff-freie Atmosphäre ein längeres Überleben der

Kornkäfer ermöglichen könnte.

Bei den überlebenden Individuen aller Brutstadien führte Kälteexposition bzw. Kälteexposition und Begasung zu unterschiedlich starken Verzögerungen der Entwicklung. Dies äußert sich in einem verspäteten Auftreten des Schlupfmaximums, d.h. der größten Anzahl innerhalb einer Woche geschlüpften Tiere. In Abbildung 22 sind diese Schlupfmaxima für Gas 2 und Unbehandelt in Wochen nach Versuchsende über der Einwirkzeit aufgetragen. Die absolute Anzahl geschlüpfter Tiere geht mit zunehmender Einwirkzeit natürlich zurück, sie wird in dieser Grafik aber nicht berücksichtigt. Teilweise konnte durch eine relativ schnelle vollständige Abtötung nur für kurze Einwirkzeiten ein Schlupfmaximum festgestellt werden (z.B. Brut 1, Gas 2 20 Grad Celsius). In die Abbildung gingen lediglich die Versuchsergebnisse aus einmaliger Begasung ein, da bei täglicher Begasung andere Verzögerungseffekte auftraten.

Eine abfallende Gerade bedeutet, daß auch während der Einwirkzeit Entwicklung stattfand, sodaß das Maximum überlebender Käfer mit zunehmender Einwirkzeit immer kürzer nach Versuchsende schlüpfte. Bei unbehandelten älteren Brutstadien kam es bei langen Einwirkzeiten auch während der Versuchsdauer zum Schlupf, was in der Grafik dadurch zum Ausdruck kommt, daß diese Kurven die Abszisse schneiden (z.B. Brut 4, Unb. 20°C). Eine Waagerechte zeigt an, daß die Entwicklung während des Versuchs ruhte (z.B. Brut 4, Gas 2 20°C) und eine ansteigende Kurve signalisiert eine Verzögerung der Entwicklung über den Versuchszeitraum hinaus (wie z.B. bei Brut 1, Gas 2 20°C).

Auffällig ist, daß die stärkste Entwicklungsverzögerung immer bei Gas 2 und 20 Grad Celsius auftritt, d.h. der entwicklungsverzögernde Effekt des Gases bei höherer Temperatur immer stärker ist als bei niedriger Temperatur. Während bei unbehandelten Stadien die niedrige Temperatur (15°C) zu einer stärkeren Entwicklungsverzögerung führt, addieren sich bei Gas 2 also nicht die Effekte von Kälte und Gas, sondern der entwicklungsverzögernde Effekt verläuft parallel zu der Abtötungswirksamkeit einer Gas/Temperaturkombination.

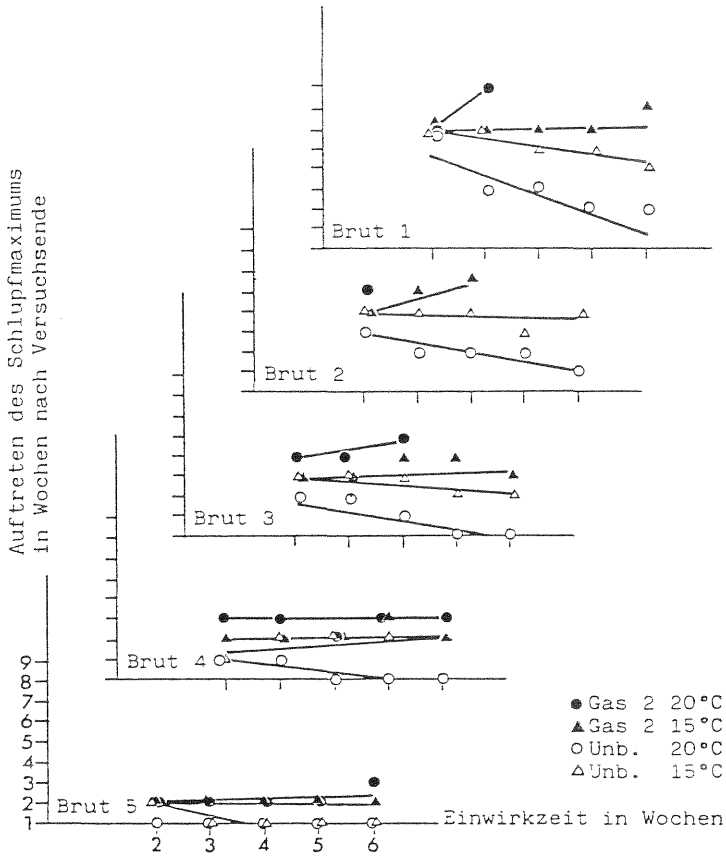


Abb. 22 Verzögerung des Schlupfzeitpunkts der Kornkäfer-Brutstadien durch Temperatur- bzw. Gas- und Temperatur-Einwirkung

Um Verzögerungen des Schlupfes, die durch Temperatur- bzw. Gas- und Temperatur-Einwirkung entstehen, zu vergleichen, wurde hier der Zeitpunkt des Schlupfmaximums in Wochen nach Versuchsende gegen die Einwirkzeit aufgetragen. Eine abfallende Gerade bedeutet, daß auch während der Einwirkzeit Entwicklung stattfand (z.B. Brut 1, Unb. 20°C). Eine Waagerechte zeigt an, daß die Entwicklung während des Versuchs ruhte (z.B. Brut 4, Gas 2 20°C), und eine ansteigender Funktionsverlauf signalisiert eine Entwicklungsverzögerung auch über das Versuchsende hinaus (z.B. Brut 1, Gas 2 20°C). Bricht die Kurve ab, ohne die Abszisse zu schneiden, so wurden 100 Prozent Mortalität erreicht (z.B. Brut 1, Gas 2 20°C).

5.4 FEHLERDISKUSSION

Die Ergebnisse der einzelnen hier beschriebenen Versuchsreihen können aus mehreren Gründen voneinander abweichen.

Wie man an den Schlupfzahlen der unbehandelten Brutstadien sehen kann, gab es Schwankungen in der Belegungsdichte bei zu unterschiedlichen Zeitpunkten angesetzten Brutstadien. Die zur Oviposition verwendeten Elterntiere wurden alle vier bis fünf Wochen gegen jüngere Käfer ausgewechselt. Möglicherweise führte ein höheres Alter der Kornkäferweibchen (in der 4. und 5. Ovipositionswoche) zu schlechteren Belegungsraten. Durch Umrechnung der pro Altersklasse zu einem Zeitpunkt erzielten maximalen Schlupfrate (höchstens jedoch 45 Tiere) auf 100 Prozent wurde versucht, diesen Fehler weitgehend auszugleichen. Im ungünstigsten Fall wurden so einmal 22 Tiere gleich 100 Prozent gesetzt, sodaß der einzelne Käfer 4,6 Prozent statt wie bei 45 Tieren 2,1 Prozent ausmacht. Da das Gesamtergebnis in diesem Fall aus 4 Wiederholungen (mit verschiedenen Zuchtansätzen) gemittelt wurde, dürfte der so mögliche Fehler nicht über 3 Prozent liegen.

Ein anderer Störfaktor ist die zufällige Streuung der Belegungsdichte bei zur gleichen Zeit und von der gleichen Parentalpopulation abgelegten Eiern. Zur Abschätzung dieses Faktors wurden die Schwankungen der Schlupfraten bei unbehandelten Brutstadien, 20 Grad Celsius miteinander verglichen. Da die Schlupfrate der Brutstadien auch nach längerer Lagerung bei 20 Grad Celsius nicht abnahm, konnten hier alle Einwirkzeiten gemittelt werden. Die mittlere Standardabweichung der Schlupfrate aller Brutstadien betrug 9 Prozent, d.h. bei einer in einer Versuchsreihe geschlüpften Anzahl von Käfern (z.B. 11 Tiere) könnten auf Grund unterschiedlicher Belegungsraten auch 9 Prozent mehr (12 Käfer) oder 9 Prozent weniger (10 Käfer) geschlüpft sein. Bei 100 Prozent Schlupf (also 45 Tieren) macht dieser Faktor ±4 Tiere aus.

Nicht immer wurden alle Brutstadien und Käfer in einem Versuch gemeinsam begast. Bei Abwesenheit stark atmungsaktiver Stadien wäre ein längeres Überleben der schwach atmungsaktiven Stadien denkbar. Die Kombination von Brut 1

und Käfern (Versuch I) und Brut 1, Brut 2 und Brut 3 (Versuch II) führte jedoch nicht zu erhöhten Überlebensraten der begasten Tiere.

Möglich ist außerdem eine Abweichung von Versuchsergebnissen durch die individuellen konstitutionellen Unterschiede der Versuchstiere. Dieser Fehler erscheint aber durch die Anzahl an Tieren gegenüber den anderen Fehlern vernachlässigbar gering.

Bei der grafischen Ermittlung der letalen Einwirkzeiten aus den Mortalitätskurven (LT50, LT75, LT90, Abb. 21 und Tab. 6) entsteht auf Grund der Ungenauigkeit dieser Methode ein zusätzlich möglicher Fehler von etwa 5 Prozent. Als bedeutsam wurden hier deshalb nur Unterschiede betrachtet, bei denen sich zwei Ergebnisse mit je 15 Prozent Fehlerbereich nicht überschnitten.

Die in der Ergebnisauswertung gemachten Aussagen sind nach Ansicht der Autoren auch insofern gerechtfertigt, als sich die Ergebnisse der Gase 1, 2 und 3 und die Ergebnisse der zunehmenden Einwirkzeiten gegenseitig abstützen.

6. SCHLUSSBETRACHTUNG

Vordringliche Aufgabe für die Getreidelagerung der Zukunft muß es sein, gasdichte Lagerräume zu schaffen. So wird zum einen das Eindringen von Schadinsekten behindert, zum anderen kann man auf diese Weise die Effektivität jedes gasförmigen Bekämpfungsmittels deutlich steigern. Die durch modifizierte Atmosphären einmal hergestellten Bedingungen lassen sich so im Idealfall unbegrenzt lange erhalten, ohne die Qualität des Vorratsgutes zu verschlechtern. Dadurch würde dieses rückstandsfreie Verfahren preiswert, und zusätzlich wäre in Langzeitlägern einem Neubefall vorgebeugt.

In nur weitgehend gasdichten Lagerräumen ist es möglich, für die Dauer der Begasung einen leichten Überdruck herzustellen, der ein Eindringen von Luftsauerstoff verhindert. Durch die zur Insektenabtötung erforderlichen langen Einwirkzeiten wird dies jedoch schnell unrentabel.

Mittel- und langfristig betrachtet kann das Verfahren der Begasung mit modifizierten Atmosphären zu einer guten Alternative für Langzeitläger von Vorräten werden.

7. ZUSAMMENFASSUNG

Zur Beurteilung, ob inerte Atmosphären unter mitteleuropäischen Klimabedingungen eine Alternative zu PH3-Begasungen bieten können, wurden Daten zur Wirksamkeit von sauerstoffarmen Stickstoff-Atmosphären auf den Kornkäfer Sitophilus granarius L. und seine Brutstadien ermittelt. Bei einmaliger Spülung sind Stickstoff/Sauerstoff-Gemische mit 1, 2 bzw. 3 Prozent Sauerstoff bei 15 und 20 Grad Celsius (70% Luftfeuchte) zur Bekämpfung des Kornkäfers in Weizen annähernd gleich effektiv. Die Empfindlichkeit des Kornkäfers und seiner Brutstadien, die nach Ablage der Eier 0 bis 4 Wochen vor Versuchsbeginn bei 25 Grad Celsius gehalten wurden (Brut 1 bis Brut 5), nimmt gegenüber diesen Gasen in folgender Reihenfolge ab:

Brut 2 > Käfer > Brut 3 > Brut 1 > Brut 5 > Brut 4.

Für eine vollständige Abtötung sind bei einmaliger Gas-Spülung Einwirkzeiten von mehr als 6 Wochen, bei täglicher Nachbegasung von mehr als 7 Wochen nötig. 10 Prozent Kohlendioxid in einer Stickstoffatmosphäre mit 2 Prozent Sauerstoff bewirken nur eine geringfügig höhere Kornkäfermortalität als das reine N2/O2-Gasgemisch.

Niedere Temperaturen (15°C) alleine schädigen nur Brut 1 und Brut 4 (Eier und Altlarven, ca. 60% Mortalität nach 6 Wochen Einwirkzeit). Kälte und modifizierte Atmosphären wirken auf diese Stadien jedoch offensichtlich nicht additiv oder synergistisch, sondern leicht antagonistisch.

Die Entwicklungsverzögerung überlebender begaster Brut ist bei 20 Grad Celsius Versuchstemperatur stärker als bei 15 Grad Celsius, obwohl eine höhere Temperatur normalerweise die Entwicklung beschleunigt.

Weizen mit 14 Prozent Kornwassergehalt hat bei 15 und besonders bei 20 Grad Celsius einen nicht unerheblichen Anteil an der Sauerstoffzehrung in einem wöchentlich mit 98% N2 und 2% O2 (Gas 2) gespülten Versuchsgefäß (ca. 1ml bzw. ca. 1,8ml O2 pro kg Weizen und Tag).

Summary

The Granary Weevil Sitophilus granarius *L., Coleoptera, Curculionidae, its Biology and its Control especially with Modified Atmospheres*

Using one single purging mixtures of 1, 2 and 3 per cent oxygen in nitrogen have about the same effectivity against the granary weevil Sitophilus granarius *in wheat at 15°C and 20°C (70% RH.). The susceptibility of breed stages decreases in following order:*
young larvae > beetles > larvae > eggs > pupae > late larvae. For a complete kill after one single purge or daily repeated purging an exposuretime of more than six respectively more than seven weeks is needed.

10% CO_2 in a mixture of N_2 and 2% O_2 can only slightly increase the granary weevil mortality compared to the pure N_2/O_2 mixture. 15°C cause considerable mortality (up to about 60% after 6 weeks exposure) only among eggs and late larvae. But in combination low temperatures and modified atmospheres seem to be not synergistic but rather antagonistic in action. Younger larvae and beetles are not killed by 15°C.

Delay in development of surviving breed stages is more pronounced at 20°C than at 15°C although higher temperatures normally accelerate development. Wheat of 14% water content has a considerable oxygen consumption at both temperatures when stored in a flask weekly purged with a 2% oxygen, 98% nitrogen mixture (1.8ml respectively 1ml O_2 per day and kg wheat).

8. DANKSAGUNG

Wir danken der Linde AG Berlin für die Bereitstellung der Gase, des Sauerstoff-Meßgeräts und für finanzielle Unterstützung.

Den Herren Prof. Dr. P. Götz, Inst. f. Zoologie, Freie Universität Berlin und Dr. Bode, Biologische Bundesanstalt für Land- und Forstwirtschaft Braunschweig, Fachgr. f. zoologische Mittelprüfung, sind wir dankbar für wertvolle Diskussionen, Anregungen und Manuskriptdurchsicht.

Unser Dank gehört auch Frau S. Berger für die Überlassung der Sitophilus granarius-Zucht.

9. Anhang

Tab. 1 Durchschnittlich Überlebende in Prozent (Mittelwerte mit Standardabweichung, Anzahl der Wiederholungen siehe Tab. 2)

Brut 1

15°C

Ewzt.	Unb.	Gas1	Gas 2	Gas 3	Gas 2t	Gas 4t
2 W	70,6	97,2±4,3	85,8±16,1	96,8±2,8	63,5	82,4
3 W	54,9±10	80,5±21,9	81,6±18,1	82,0±17	19,4±15,9	15,8±9
4 W	40,0±3	53,3±22	58,9±15,9	56,5±14,6	1,2±1,7	0,0
5 W	37,4±15	31,4±25,7	15,2±12,4	30,6±20,1	0,0	0,0
6 W	42,7	21,4±14	10,7±5,7	11,2±8,3	0,0	0,0
7 W	30,5±2,8	n.u.	n.u.	n.u.	0,0	0,0

20°C

Ewzt.	Unb.	Gas1	Gas 2	Gas 3	Gas 2t	Gas 4t
2 W	96,5	35,9±15,7	41,2±14,4	25,3±5,8	4,7	4,7
3 W	93,6±7,8	8,3±8,3	13,0±7,4	5,7±2,7	0,0	0,0
4 W	92,1±2,4	0,0	0,0	0,6±1,1	0,0	0,0
5 W	94,2±6,6	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
6 W	94,6±4,3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
7 W	90,5±1,5	n.u.	n.u.	n.u.	0,0	0,0

Brut 2

15°C

Ewzt.	Unb.	Gas 1	Gas 2	Gas 3	Gas 2t	Gas 4t
2 W	90,6	32,1±13,5	77,0±11,3	56,2±4,2	59,4	62,5
3 W	99,0±2	8,9±8,7	13,7±3,2	19,5±5,8	10,2±7,7	9,7±10,7
4 W	91,1±9	0,0	7,3±12,6	6,9±8,2	7,1±3,3	5,2±9
5 W	86,6±13	5,3±9,2	1,3±2,3	8,8±13,2	4,3±2,8	4,7±7,3
6 W	99,6±1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
7 W	86,1±8	n.u.	n.u.	n.u.	0,0	0,0

20°C

Ewzt.	Unb.	Gas 1	Gas 2	Gas 3	Gas 2t	Gas 4t
2 W	100,0	4,9±2,9	19,3±10,9	8,0±3,6	31,3	6,3
3 W	98,2±3	0,0	0,0	0,0	4,7±6,6	0,0
4 W	94,5±5	0,0	0,0	0,0	1,6±2,2	0,0
5 W	99,2±1	0,0	0,0	0,0	0,0	1,0±1,8
6 W	99,1±0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
7 W	100,0	n.u.	n.u.	n.u.	0,0	0,0

Fortsetzung Tab. 1 (Überlebende in Prozent, $\bar{x}$ + s)

Brut 3

15°C

Ewzt.	Unb.	Gas1	Gas 2	Gas 3	Gas 2t	Gas 4t
2 W	79,5	79,6±13,7	78,5±22,2	86,1±5,7	66,2	60,9
3 W	94,8±6	54,9±23,5	58,6±10,8	41,8±19,7	55,9±3,4	41,7±8,6
4 W	89,0±7,1	10,2±3,5	38,2±10,8	33,3±4,1	38,5±1,8	38,9±3
5 W	88,4±12	14,8±23,3	22,4±10,7	10,2±1,4	35,8±1,7	25,4±9,1
6 W	80,2±5	1,9±3,2	11,3±10,4	3,7±4,2	30,2	15,1±8,2
7 W	71,0±1,6	n.u.	n.u.	n.u.	7,0	17,5+1,6

20°C

Ewzt.	Unb.	Gas1	Gas 2	Gas 3	Gas 2t	Gas 4t
2 W	98,0	52,9±10,7	57,7±16,8	46,2±16	58,3	18,5
3 W	96,2±5	12,9±8,8	24,1±5,7	39,4±30,4	43,1±4,8	32,4±17
4 W	95,4±5	1,0±1,7	3,7±1,7	15,4±20	29,0±11,5	20,8±4,7
5 W	96,1±7	0,0	0,9±1,6	7,0±9,8	26,2±4,1	15,2±15
6 W	100,0	0,0	0,0	0,0	23,3	12,8±11
7 W	100,0	n.u.	n.u.	n.u.	7,0	3,5±5

Brut 4

15°C

Ewzt.	Unb.	Gas1	Gas 2	Gas 3	Gas 2t	Gas 4t
2 W	96,3	74,8±2,1	69,4±8,8	82,9±24,2	69,1	61,7
3 W	88,9±19	47,4±33,5	78,2±2,6	44,7±18,5	63,0±1,8	50,4±14
4 W	57,9±3	45,7±1,4	34,5±7,8	61,7±16,5	52,8±5,7	44,1±9,4
5 W	43,8±12	32,4±17,5	31,7±14,9	34,9±1	46,6±3	31,8±5,5
6 W	50,4±7	22,1±6	32,1±8,1	21,4±4,2	39,0	16,2
7 W	32,5±4,6	n.u.	n.u.	n.u.	35,7	24,4±6,9

20°C

Ewzt.	Unb.	Gas1	Gas 2	Gas 3	Gas 2t	Gas 4t
2 W	96,3	75,3±9,8	76,8±26,7	71,1	54,3	51,9
3 W	92,6±12	42,7±12	47,4±7,3	40,3±12,3	50,3±2,3	50,8±17
4 W	87,9±20	26,5±0,3	27,9±1,6	27,3±13,9	39,3±0,4	25,8±3,5
5 W	100,0	5,1±4	14,5±13,6	19,3±21,1	34,8±3,2	23,4±9,8
6 W	95,5±6	3,8±2,2	11,7±13,4	11,7±13,4	29,2	14,7±6,9
7 W	93,9±9	n.u.	n.u.	n.u.	19,5	14,7±16,1

(Fortsetzung Tab. 1: Überlebende in Prozent, $\bar{x}$ + s)

Brut 5

15°C

Ewzt.	Unb.	Gas1	Gas 2	Gas 3	Gas 2t	Gas 4t
2 W	69,4	83,7±10,5	76,9±4,5	61,3±23,4	61,1	58,3
3 W	61,7±10	62,4±25	66,3±13,7	59,3±16,8	38,5±4,6	24,1±6,6
4 W	49,6±7	52,4±10,8	54,5±17,3	59,5±32,1	18,3±13,4	15,5±7,6
5 W	50,1±8	44,0±10,1	40,8±2	50,4±4,2	15,5±13,5	7,6±5,7
6 W	55,8±4	34,5±5,5	32,1±8,1	30,1±1,5	14,7	7,3±6,2
7 W	66,0±6,2	n.u.	n.u.	n.u.	17,6	5,9±8,3

20°C

Ewzt.	Unb.	Gas1	Gas 2	Gas 3	Gas 2t	Gas 4t
2 W	97,2	50,4±4,2	64,5±31,5	69,9±20,6	47,2	55,6
3 W	94,3±5	66,3±0,6	56,0±12,1	37,9±12,5	18,6±2,7	10,5±9,1
4 W	100,0	13,5±15,4	19,5±16,4	20,1±12,7	4,3±1,9	2,8±2,8
5 W	95,1±6	17,2±5,5	1,3±1,8	12,2±1,5	2,8±4	1,0±1,7
6 W	98,4±2,3	5,3±7,4	5,1±4	11,4±9,9	8,8	1,5±2,1
7 W	86,5±2,1	n.u.	n.u.	n.u.	2,9	2,9

Käfer

15°C

Ewzt.	Unb.	Gas1	Gas 2	Gas 3	Gas 2t	Gas 4t
2 W	100,0	22,5	18,5	n.u.	70,9	60,9
3 W	99,7	0,0	0,0	6,1	8±11,3	4,1±7
4 W	99,7	0,0	0,0	0,0	3±3,2	2±3,5
5 W	94,3±7	0,0	0,0	0,0	4±4,3	4,1±7
6 W	98,8±2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
7 W	96,6±2	n.u.	n.u.	n.u.	0,0	0,0

20°C

Ewzt.	Unb.	Gas1	Gas 2	Gas 3	Gas 2t	Gas 4t
2 W	100,0	n.u.	0,0	0,0	4,0	0,0
3 W	99,7	n.u.	0,0	0,0	0,0	0,0
4 W	98,2±2	n.u.	0,0	0,0	0,0	0,0
5 W	99,9	n.u.	0,0	0,0	0,0	0,0
6 W	98,6±1	n.u.	0,0	0,0	0,0	0,0
7 W	100,0	n.u.	n.u.	n.u.	0,0	0,0

Tab. 2 Durchschnittliche Mortalität in Prozent (Mittelwerte, Anzahl der Wiederholungen als Index, Standartabweichungen siehe Tab. 1)

Brut 1

15°C

Ewzt.	Unb.	Gas 1	Gas 2	Gas 3	Gas 2t	Gas 4t
2 W	29,4[1]	2,8[4]	14,2[4]	3,2[3]	36,5[1]	17,6[1]
3 W	45,1[3]	19,5[4]	18,4[4]	18,0[4]	80,6[2]	84,2[3]
4 W	60,0[3]	46,7[4]	41,1[4]	43,5[4]	98,8[2]	100,0[3]
5 W	62,6[2]	68,6[4]	84,8[3]	69,4[4]	100,0[2]	100,0[3]
6 W	57,3[2]	78,6[4]	89,3[4]	88,8[4]	100,0[1]	100,0[2]
7 W	69,5[2]	n.u.	n.u.	n.u.	100,0[1]	100,0[2]

20°C

Ewzt.	Unb.	Gas 1	Gas 2	Gas 3	Gas 2t	Gas 4t
2 W	3,5[1]	64,1[3]	58,8[4]	74,7[4]	95,3[1]	95,3[1]
3 W	6,4[3]	91,7[3]	87,0[4]	94,3[4]	100,0[2]	100,0[3]
4 W	7,9[3]	100,0[3]	100,0[4]	99,4[4]	100,0[2]	100,0[3]
5 W	5,8[3]	100,0[3]	100,0[4]	100,0[4]	100,0[2]	100,0[3]
6 W	5,4[2]	100,0[3]	100,0[4]	100,0[4]	100,0[1]	100,0[2]
7 W	9,5[2]	n.u.	n.u.	n.u.	100,0[1]	100,0[2]

Brut 2

15°C

Ewzt.	Unb.	Gas 1	Gas 2	Gas 3	Gas 2t	Gas 4t
2 W	9,4[1]	67,9[3]	23,0[3]	43,8[3]	40,6[1]	37,5[1]
3 W	1,0[3]	91,1[3]	86,3[3]	80,5[3]	89,8[2]	90,3[3]
4 W	8,9[3]	100,0[3]	92,7[3]	93,1[3]	92,9[2]	94,8[3]
5 W	13,4[3]	94,7[3]	98,7[3]	91,2[3]	95,7[2]	95,3[3]
6 W	0,4[2]	100,0[3]	100,0[3]	100,0[3]	100,0[1]	100,0[2]
7 W	13,9[2]	n.u.	n.u.	n.u.	100,0[1]	100,0[2]

20°C

Ewzt.	Unb.	Gas 1	Gas 2	Gas 3	Gas 2t	Gas 4t
2 W	0,0[1]	95,1[3]	80,7[3]	92,0[3]	68,7[1]	93,7[1]
3 W	1,8[3]	100,0[3]	100,0[3]	100,0[3]	95,3[2]	100,0[3]
4 W	5,5[3]	100,0[3]	100,0[3]	100,0[3]	98,4[2]	100,0[3]
5 W	0,8[3]	100,0[3]	100,0[3]	100,0[3]	100,0[2]	99,0[3]
6 W	0,9[2]	100,0[3]	100,0[3]	100,0[3]	100,0[1]	100,0[2]
7 W	0,0[2]	n.u.	n.u.	n.u.	100,0[1]	100,0[2]

(Fortsetzung Tab. 2: Mortalität in Prozent)

Brut 3

15°C

Ewzt.	Unb.	Gas 1	Gas 2	Gas 3	Gas 2t	Gas 4t
2 W	20,5[1]	20,4[3]	21,5[3]	13,9[3]	33,8[1]	39,1[1]
3 W	5,2[3]	45,1[3]	41,4[3]	58,2[3]	44,1[2]	58,3[3]
4 W	11,0[3]	89,8[3]	61,8[3]	66,7[3]	61,5[2]	61,1[3]
5 W	11,6[3]	85,2[3]	77,6[3]	89,8[3]	64,2[2]	74,6[3]
6 W	19,8[2]	98,1[3]	88,7[3]	96,3[3]	69,8[1]	84,9[2]
7 W	29,0[2]	n.u.	n.u.	n.u.	93,0[1]	82,5[2]

20°C

Ewzt.	Unb.	Gas 1	Gas 2	Gas 3	Gas 2t	Gas 4t
2 W	2,0[1]	47,1[3]	42,3[3]	53,8[3]	41,7[1]	81,5[1]
3 W	3,8[3]	87,1[3]	75,9[3]	60,6[3]	56,9[2]	67,6[3]
4 W	4,6[3]	99,0[3]	96,3[3]	84,6[3]	71,0[2]	79,2[3]
5 W	3,9[3]	100,0[3]	99,1[3]	93,0[2]	73,8[2]	84,8[3]
6 W	0,0[2]	100,0[3]	100,0[3]	100,0[2]	76,7[1]	87,2[2]
7 W	0,0[2]	n.u.	n.u.	n.u.	93,0[1]	96,5[2]

Brut 4

15°C

Ewzt.	Unb.	Gas 1	Gas 2	Gas 3	Gas 2t	Gas 4t
2 W	3,7[1]	25,2[2]	30,6[2]	17,1[2]	30,7[1]	38,3[1]
3 W	11,1[3]	52,6[2]	21,8[2]	55,3[2]	37,0[2]	49,6[3]
4 W	42,1[3]	54,3[2]	65,5[2]	38,3[2]	47,2[2]	55,9[3]
5 W	56,2[3]	67,6[2]	68,3[2]	65,1[2]	53,4[2]	68,2[3]
6 W	49,6[2]	77,9[2]	67,9[2]	78,6[2]	61,0[1]	83,8[2]
7 W	67,5[2]	n.u.	n.u.	n.u.	64,3[1]	75,6[2]

20°C

Ewzt.	Unb.	Gas 1	Gas 2	Gas 3	Gas 2t	Gas 4t
2 W	3,7[1]	24,7[2]	23,2[2]	28,9[2]	45,7[1]	48,1[1]
3 W	7,4[3]	57,3[2]	52,6[2]	59,7[2]	49,7[2]	49,2[3]
4 W	12,1[3]	73,5[2]	72,1[2]	72,7[2]	60,7[2]	74,2[3]
5 W	0,0[3]	94,9[2]	85,5[2]	80,7[2]	65,2[2]	76,6[3]
6 W	4,5[2]	96,2[2]	88,3[2]	88,3[2]	70,8[1]	85,3[2]
7 W	6,1[2]	n.u.	n.u.	n.u.	80,5[1]	85,3[2]

(Fortsetzung Tab. 2: Mortalität in Prozent)

Brut 5

15°C

Ewzt.	Unb.	Gas 1	Gas 2	Gas 3	Gas 2t	Gas 4t
2 W	30,6[1]	16,3[2]	23,1[2]	38,7[2]	38,9[1]	41,7[1]
3 W	38,3[3]	37,6[2]	33,7[2]	40,7[2]	61,5[2]	75,9[3]
4 W	50,4[3]	47,6[2]	45,5[2]	40,5[2]	81,7[2]	84,5[3]
5 W	49,9[3]	56,0[2]	59,2[2]	49,6[2]	84,5[2]	92,4[3]
6 W	44,2[2]	65,5[2]	67,9[2]	69,9[2]	85,3[2]	92,7[1]
7 W	34,0[2]	n.u.	n.u.	n.u.	82,4[1]	94,1[1]

20°C

Ewzt.	Unb.	Gas 1	Gas 2	Gas 3	Gas 2t	Gas 4t
2 W	2,8[1]	49,6[2]	35,5[2]	30,1[2]	52,8[1]	44,4[1]
3 W	5,7[3]	33,7[2]	44,0[2]	62,1[2]	81,4[2]	89,5[3]
4 W	0,0[3]	86,5[2]	80,5[2]	79,9[2]	95,7[2]	97,2[3]
5 W	4,9[3]	82,8[2]	98,7[2]	87,8[2]	97,2[2]	99,0[3]
6 W	1,6[2]	94,7[2]	94,9[2]	88,6[2]	91,2[1]	98,5[1]
7 W	3,5[2]	n.u.	n.u.	n.u.	97,1[1]	97,1[1]

Käfer

15°C

Ewzt.	Unb.	Gas 1	Gas 2	Gas 3	Gas 2t	Gas 4t
2 W	0,0[1]	77,5[1]	81,5[1]	--	29,1[1]	39,1[1]
3 W	0,3[3]	100,0[1]	100,0[1]	93,9[1]	92,0[2]	95,9[3]
4 W	0,3[3]	100,0[1]	100,0[1]	100,0[1]	97,0[2]	98,0[3]
5 W	5,7[3]	100,0[1]	100,0[1]	100,0[1]	96,0[2]	95,9[3]
6 W	1,2[2]	100,0[1]	100,0[1]	100,0[1]	100,0[1]	100,0[1]
7 W	3,4[2]	n.u.	n.u.	n.u.	100,0[1]	100,0[1]

20°C

Ewzt.	Unb.	Gas 1	Gas 2	Gas 3	Gas 2t	Gas 4t
2 W	0,0[1]	--	100,0[1]	100,0[1]	96,0[1]	100,0[1]
3 W	0,3[3]	--	100,0[1]	100,0[1]	100,0[2]	100,0[3]
4 W	1,8[3]	--	100,0[1]	100,0[1]	100,0[2]	100,0[3]
5 W	0,1[3]	--	100,0[1]	100,0[1]	100,0[2]	100,0[3]
6 W	1,4[2]	--	100,0[1]	100,0[1]	100,0[1]	100,0[1]
7 W	0,0[2]	--	n.u.	n.u.	100,0[1]	100,0[1]

Tab. 3a LT50

15°C	Gas 1	Gas 2	Gas 3	Gas 2t	Gas 4t
Brut 1	27	27	27	15	15
Brut 2	<14	14	14	15	15
Brut 3	21	21	21	25	21
Brut 4	24	24	24	31	22
Brut 5	35	35	36	15	16
Käfer	<14	<14	<14	14	14

20°C	Gas 1	Gas 2	Gas 3	Gas 2t	Gas 4t
Brut 1	<14	<14	<14	<14	<14
Brut 2	<14	<14	<14	<14	<14
Brut 3	14	14	14	18	14
Brut 4	20	20	20	20	18
Brut 5	18	18	18	14	14
Käfer	--	<14	<14	<14	<14

Tab. 3b LT 75

15°C	Gas 1	Gas 2	Gas 3	Gas 2t	Gas 4t
Brut 1	34	34	34	18	18
Brut 2	16	19	19	18	18
Brut 3	31	31	31	38	41
Brut 4	42	42	42	>49	45
Brut 5	>42	>42	>42	27	22
Käfer	<14	<14	<14	16	16

20°C	Gas 1	Gas 2	Gas 3	Gas 2t	Gas 4t
Brut 1	18	18	18	<14	<14
Brut 2	<14	<14	<14	15	<14
Brut 3	18	18	18	35	26
Brut 4	31	31	31	43	33
Brut 5	27	27	27	17	17
Käfer	<14	<14	<14	<14	<14

Tab. 3a-c Grafisch ermittelte LT50, LT75 und LT90-Werte (letale Einwirkzeiten) in Tagen. Mit "<" oder ">" gekennzeichnete Daten zeigen an, daß sich der tatsächliche Wert unter bzw. über den überprüften Einwirkzeiten von zwei bis sechs (bei einmaliger Begasung, Gas 1-3) bzw. sieben Wochen (bei täglicher Spülung, Gas 2t, Gas 4t) liegt.

Tab. 3c LT 90

15°C	Gas 1	Gas 2	Gas 3	Gas 2t	Gas 4t
Brut 1	>42	>42	>42	24	24
Brut 2	21	27	27	25	25
Brut 3	40	40	40	>49	>49
Brut 4	>42	>42	>42	>49	>49
Brut 5	>42	>42	>42	34	49
Käfer	18	18	18	2o	20

20°C	Gas 1	Gas 2	Gas 3	Gas 2t	Gas 4t
Brut 1	20	20	20	<14	<14
Brut 2	22	22	22	18	<14
Brut 3	25	25	25	>49	>49
Brut 4	42	42	42	>49	>49
Brut 5	39	39	39	24	24
Käfer	<14	<14	<14	<14	<14

Tab. 3a-c Grafisch ermittelte LT50, LT75 und LT90-Werte (letale Einwirkzeiten) in Tagen. Mit "<" oder ">" gekennzeichnete Daten zeigen an, daß sich der tatsächliche Wert unter bzw. über den überprüften Einwirkzeiten von zwei bis sechs (bei einmaliger Begasung, Gas 1-3) bzw. sieben Wochen (bei täglicher Spülung, Gas 2t, Gas 4t) liegt.

10. LITERATUR

ABIVARDI, C. (1976): Additional studies on insecticidal activities of Camphor to stored-product insects.-Zeitschr. f. PFlkrh. u. Pflsch. 7/8: 397-400

ANDERSEN, K.Th. (1934): Biologie des Kornkäfers (Calandra granaria L.). - Nachrichten über Schädlingsbekämpfung, Jg. 9, 3

ANONYM (1982): Verordnung über Höchstmengen an Pflanzenschutz- und sonstigen Mitteln sowie anderen Schädlingsbekämpfungsmitteln in oder auf Lebensmitteln und Tabakerzeugnissen (Pflanzenschutzmittel-Höchstmengenverordnung - PHmV). Vom 24. Juni 1982; BGBl. I, Nr. 22, S.745

ANONYM (1984): Erste Verordnung zur Änderung der Pflanzenschutzmittel-Höchstmengenverordnung vom 18. April 1984, BGBl. I S.745

ANONYM (1986): Gefahrstoffverordnung vom 26. August 1986, BGBl. I, S.1470

ANONYM (1987): Technische Regeln für Gefahrstoffe (TRGS 512), Ausgabe Januar 1987, Bundesarbeitsblatt 1/1987

ARBOGAST, R.T. (1984): Biological control of stored product insects: status and prospects. - Aus: BAUR, F.J. (ed.): Insect management for food storage and processing, Am. Ass. of Cereal Chemists, St. Paul, MA, USA

ARMITAGE, D.M.; DAY, P.G.; LEWIS, G.J. (1983): The effect of aeration on the vertical distribution of grain beetles (Coleoptera) in wheat. - Bull. Ent. Res. 73, (2): 233-237

BAILEY, S.W. (1955): Airtight storage of grain- its effects on insect pests I. Calandra granaria L. (Col.: Curculionidae). - Aust. J. Agric. Res. 6 1: 33-51

BAILEY, S.W. (1957): Airtight storage of grain; its effects on insect pests III: Calandra oryzae (Large strain). - Aust. J. Agric. Res. 8: 595-603

BAILEY, S.W. (1965): The absorption of atmospheric oxygen by wheat. - J. stored Prod. Res. 1: 197-199

BAILEY, S.W. (1969): The effects of physical stress in the grain weevil Sitophilus granarius. - J. Stored Prod. Res. 5 (4): 311-324

BAILEY, S.W. and BANKS, H.J. (1975): The use of controlled atmospheres for storage of grain. - Aus: Proceedings of the 1st int. Work. Conf. on Stored Prod. Ent.; 1974, Savannah, GA, USA: 362-374

BAILEY, S.W.; BANKS, H.J. (1980): A review of recent studies of the effects of controlled atmospheres on stored product insects. - Aus: SHEJBAL, J. (ed.): Controlled Atmosphere Storage of Grains, Amsterdam: 101-108

BANKS, H.J. (1981): Effects of controlled atmosphere storage on grain quality: a review. - Food Technol. Aust. 33: 335-340

BANKS, H.J. (1983a): Modified atmosphere and hermetic storage - effects on insect pests and the commodity. - Aus: CHAMP, B.R.; HIGHLEY, E. (edts.): Proc. Aust. Dev. Asst. Course on the Pres. of Stored Cereals, 1981: 521-532

BANKS, H.J. (1983b): Modified atmospheres - hermetic storage. - Aus: CHAMP, B.R.; HIGHLEY, E. (edts.): Proc. Aust. Dev. Asst. Course on the Pres. of Stored Cereals, 1981: 558-573

BELL, C.H. (1984): Effects of oxygen on the toxicity of carbon dioxide to storage insects. - Aus: RIPP, B.E. et al. (edts.): Controlled Atmosphere and Fumigation in Grain Storages: 67-74

BBA Braunschweig (1986): Pflanzenschutzmittel-Verzeichnis 1986, Teil 5, Vorratsschutz, ACO Druck Braunschweig

BIRCH, L.C. (1947): The oxygen consumption of the small strain of Calandra oryzae(L.) and Rhizopertha dominica (Fab.) as affected by temperature and humidity. - Ecology 28: 17-25

BODENHEIMER, F.S. (1927): Über die ökologischen Grenzen der Verbreitung von Calandra oryzae (L.) und Calandra granaria L. - Z. wiss. Ins.-Biol. 22: 65-73

BOND, E.J. and BUCKLAND, C.T. (1978): Control of insects with fumigants at low temperatures - toxicity of fumigants in atmospheres of carbondioxide. - J. Econ. Entomol. 71 (2): 307-309

BOND, E.J. and BUCKLAND, C.T. (1979): Development of resistance of carbon dioxide in the granary weevil. - J. Econ. Entomol. 72, (5): 770-771

BUCKLAND,P.C. (1981): The early dispersal of insect pests of stored products as indicated by archaeological records. - J. Stored Prod. Res. 17, (1): 1-12

CALDERON, M.; NAVARRO, S. (1979): Increased toxicity of low oxygen atmospheres supplemented with carbon dioxide on Tribolium castaneum adults. - Entomol. Exp. Appl. 25 (1): 39-44

CALVERLEY, D.J.B. (1984): Where is CA storage going in developing countries? - Aus: RIPP, B.E. et al.: Controlled Atmosphere and Fumigation in Grain Storages: 509-522

CAMPBELL, A.; SINGH, N.B.; SINHA, R.N. (1976): Bioenergetics of the granary weevil, Sitophilus granarius (L.) (Coleoptera: Curculionidae). - Can. J. Zool. 54 (5): 786-798

CIESIELSKA, Z. (1985): The relationship between sex ratio and population dynamics of Sitophilus granarius L. (Col.: Curculionidae) and Oryzaephilus surinamensis L. (Col.: Cucujidae) in varius environmental conditions. - Mitt. d. Deut. Ges. f. Allg. u. Ang. Entomol. 4: 272-274

EASTHAM, L.E.S.; McCULLY, S.B. (1943): The oviposition responses of Calandra granaria L. - J. Exp. Biol. 20: 35-42

EASTHAM, L.E.S.; SEGROVE, F. (1947): The influence of temperature and humidity on instar length in Calandra granaria L. - J. exp. Biol. 24: 79-94

EDWARDS, J.P. and ROWLANDS, D.G. (1978): Metabolism of a synthetic juvenile hormone JH-I in two strains of the grain weevil Sitophilus granarius L. - Insect Biochem. 8 (1): 23-28

EVANS, D.E. (1977): The capacity for increase at low temperature of some Australian populations of the granary weevil, Sitophilus granarius (L.) - Aust. J. Ecol. 2 (1): 69-79

EVANS, D.E. (1979): The effect of thermal acclimation and relative humidity on the oxygen consumption of three Sitophilus species. - J. Stored Prod. Res. 15 (3/4): 87-93

EVANS, D.E. (1980): Further studies on acclimation to low temperatures in the grain weevils Sitophilus oryzae (L.) and Sitophilus granarius (L.). - Aust. J. Ecol. 5 (4): 371-378

FAUSTINI, D.L.; GIESE, W.L.; PHILLIPS, J.K.; BURKHOLDER, W.E. (1982): Aggregation pheromone of the male granary weevil, Sitophilus granarius (L.). - J. Chem. Ecol. 8 (4): 679-687

FRANEK, M. (1975): Studies of the optimum conditions in laboratory cultures of the granary weevil, Sitophilus granarius L. (Col., Curculionidae), for testing insecticides. III. Determination of the best rearing methods for biological tests. - Polskie Pismo Entomol. 45 (3/4): 654-662

FRANZ, J.M. und KRIEG, A. (1976): Biologische Schädlingsbekämpfung. - 2. Aufl., 222 S., Paul Parey Verlag Berlin und Hamburg

GONEN, M. (1977): Susceptibility of Sitophilus granarius and Sitophilus oryzae (Coleoptera: Curculionidae) to high temperature after exposure to supraoptimal temperature. - Entomol. Exp. Appl. 21 (3): 243-248

GUERRA, A.A.; GARCIA, R.D.; WIYGUL, G. (1983): Oxygen consumption in boll weevil, Anthonomus grandis, Col. Curculionidae, from subtropical areas of the Rio Grande valley of Texas, USA. - Comp. Biochem. Physiol. A Comp. Physiol. 74 (2): 263-266

HAKKARINEN, R.V.J.; TYOPPÖNEN, J.T.; BENGTSSON, S.G. (1983): Changes in the content and composition of vitamin E in damp barley stored in airtight bins. - J. Science Food Agric. 34 (10): 1029-1038

HALSTEAD, D.G.H. (1963): External sex differences in stored products Coleoptera. - Bull. Entomol. Res. 54: 119-134

HAREIN, P.K. and DE LAS CASAS, E. (1968): Bacteria from granary weevils collected from laboratory colonies and field infestations. - J. Econ. Entomol. 61 (6): 1719-1720

HAREIN, P.V. and PRESS, A.F. (1968): Mortality of stored peanut insects exposed to mixtures of atmospheric gases at various temperatures. - J. Stored Prod. Res. 4: 77-82

HOLE, B.D.; BELL, C.H.; MILLS, K.A.; GOODSHIP, G. (1976): The toxicity of phosphine to all developmental stages of 13 species of stored product beetles. - J. Stored Prod. Res. 12 (4): 235-244

HOPPE, T. (1976): Microplot trial with an epoxy phenyl ether insect growth regulator against several pests of stored wheat grain. - J. Stored Prod. Res. 12 (3): 205-209

HOSSAIN, M. and VERNER, P.H. (1979): Larvae of three species of Sitophilus (Coleoptera: Curculionidae). - Bangladesh J. of Zool. 7 (1): 45-51

HOWE, R.W. and OXLEY, T.A. (1952): Detection of insects by their carbon dioxide production. - Pest infestation research, Her Majesty's Stationery Office

HOWE, R.W. (1965): A summary of estimates of optimal and minimal conditions for population increase of some stored product insects. - J. Stored Prod. Res. 1: 177-184

HOWE, R.W. and HOLE, B.D. (1967): The yield of cultures of Sitophilus granarius at 25 deg. Celsius and 70 per cent relative humidity with some observations on rates of oviposition and development. - J. Stored Prod. Res. 2: 257-272

HOWE, R.W. and HOLE, B.D. (1968): The susceptibility of developmental stages of Sitophilus granarius (L.) (Coleoptera: Curculionidae) to moderately low temperatures. - J. Stored Prod. Res. 4: 147-156

HOWE, R.W. (1973): The susceptibility of of the immature and adult stages of Sitophilus granarius to phosphine. - J. Stored Prod. Res. 8 (4): 241-262

JAY E.G.; ARBOGAST, R.T.; PEARMAN, G.C. (1971): Relative humidity: its importance in the control of stored product insects with modified atmospheric gas concentrations. - J. Stored Prod. Res. 6: 325-329

JAY, E.G. and PEARMAN, G.C. (1973): Carbon dioxide for control of insect infestation in stored corn (maize). - J. Stored Prod. Res. 9: 25-29

JAY, E.G. (1980): Low temperatures: effects on control of Sitophilus oryzae (L.) with modified atmospheres. - Aus: SHEJBAL, J. (ed.): Controlled Atmosphere Storage of Grains, Amsterdam: 65-71

Jay, E.G. (1984): Imperfections in our current knowledge of insect biology as related to their response to controlled atmospheres. - Aus: RIPP, B.E. et al. (edts.) Controlled Atmosphere and Fumigation in Grain Storage, Amsterdam: 493-508

KANAUJIA, K.R. and LEVINSON, H.Z. (1981): Phagostimulatory responses and oviposition behavior of Sitophilus granarius L. to newly harvested and stored wheat grains. - Zeitschr. Ang. Entomol. 91 (4): 417-424

KASHI, K.P. and BOND, E. J. (1979): Studies on isolation and respiratory activity of the mitochondria of Sitophilus granarius. - J. Stored Prod. Res. 15 (1): 17-24

KASHI, K.P. (1981): Controlling pests in stored grain with carbon dioxide. - Span 24 (2): 69-71

KHAN, M.Q. (1949): A contribution to a further knowledge of the structure of biology of the weevils, Sitophilus oryzae (L.) and Sitophilus granarius (L.) with special reference to the effects of temperature and humidity on their rate of development. - Indian J. of Entomol. 11: 143-201

KHAN, N.R.; MUSGRAVE, A.J. (1969): Observations on the functional anatomy of the reproductive organs of Sitophilus Coleoptera: Curculionidae. - Can. J. Zool. 47 (4): 665-669

KLEINE, R. (1929): Der Kornkäfer im lagernden Getreide. - Z. f. Ang. Entomol. 15: 159-164

LAKON, G. (1942): Biochemische Keimprüfung nach dem Lakonschen "Topographischen Tetrazoleum Verfahren" zur Feststellung der Keimfähigkeit bzw. Keimpotenz von Getreide und Mais. - Ber. Deutsch. Bot. Ges. 60: 299-305

LEAHEY, J.P. (ed.) (1985): The Pyrethroid Insecticides; 440pp., Taylor & Francis London and Philadelphia

LEVINSON, H.Z. (1976): Ernährungs- und Stoffwechselphysiologie der Insekten und deren Anwendungsmöglichkeiten zur Schädlingsbekämpfung. - Z. Ang. Entomol. 81: 113-132

LEVINSON, H.Z. and KANAUJIA, K.R. (1981): Phagostimulatory responses of male and female Sitophilus granarius L. to newly harvested and stored wheat grains. - Naturwissenschaften 68 (1):44-45

LEVINSON, H.Z. and KANAUJIA, K.R. (1982): Feeding and oviposition behavior of the granary weevil (Sitophilus granarius L.) induced by stored wheat, wheat extracts and dummies. - Z. Ang. Entomol. 93 (3):295-305

LEVINSON, H.Z.; LEVINSON, A.R. (1985): Storage and insect species of stored grain and tombs in ancient Egypt. - Zeitschr. f. Ang. Entomol. 100 (4): 321-339

LINDGREN, D.L.; VINCENT, L.E. (1970): Effect of atmospheric gases alone or in combination on the mortality of granary and rice weevils. - J. Econ. Entomol. 6: 1926-1929

LLOYD, C.J. (1973): The toxicity of pyrethrins and five synthetic pyrethroids to Triboleum castaneum (Herbst) and pyrethrin resistant Sitophilus granarius (L.). - J. Stored Prod. Res. 9: 77-92

LONGSTAFF, B.C. (1981): Biology of the grain pest species of the genus Sitophilus (Coleoptera: Curculionidae): a critical review. - Protect. Ecol. 3 (2): 83-130

LOSCHIAVO, S.R. (1975): Tests of four synthetic insect growth regulators with juvenile hormone activity against seven species of stored product insects. - Manit. Entomol. 9: 43-52

LOVE, G; TWYFORD-JONES, P.; WOOLCOCK, I. (1983): An Economic Evaluation of Alternative Grain Insect Control Measures. - Bureau of Agricultural Economics, Canberra, Occasional Paper No. 78, 115pp.

LU QIANYU (1985): An overview of the present state of controlled atmosphere storage of grain in China. - Aus: RIPP, B.E. et al. (edts.): Controlled Atmosphere and Fumigation in Grain Storages: 15-28

LUM, P.T.M.; BAKER, J.E. (1975): Sexual dimorphism in the sixth abdominal sternite of Sitophilus oryzae (L.), Coleoptera: Curculionidae. - J. Stored Prod. Res. 11: 57-59

MALINOWSKI, H. (1982): The activity of photostable pyrethroids against hygiene and stored-product pests. - Wiadomosci Parazytologiczne 28 (1/2): 249-251

MARZKE, F.O.; PRESS, Jr. A.F.; PEARMAN Jr. G.C. (1969): Mortality of the rice weevil, the Indian-meal moth and Trogoderma glabrum exposed to mixtures of atmospheric gases at various temperatures. - J. Econ. Entomol. 63 (2): 570-574

MAURER, G. (1985): Untersuchungen zur Wirkung von Niem-Extrakten (Azadirachta indica A. Juss, Meliaceae) auf Vorratsschädlinge. - Inaugural-Dissertation, 101 S., Justus Liebig Universität Gießen

MONRO, H.A.U. (ed.) (1969): Manual of Fumigation for Insect Control. - FAO Agric. Stud. No. 79, Rome, 381 pp.

MONRO, H.A.U.; UPITIS, E.; BOND, E.J. (1972): Resistance of a laboratory strain of Sitophilus granarius, Coleoptera: Curculionidae to phosphine. - J. Stored Prod. Res. 8 (3): 199-207

MÜLLER, K. (1928): Beiträge zur Kenntnis des Kornkäfers Calandra granaria (L.). - Z. Ang. Entomol. 13: 314-368

MÜNZING, K.; BOLLING, H. (1985): Qualitätsveränderungen von Weizen durch CA-Lagerung. - Veröffentlichungsnr. 5309 der Bundesforschungsanstalt f. Getr. u. Kartoffelverarb., Detmold

NAVARRO, S. (1975): Aeration of grain as a non chemical method for the control of insects in the grain bulk. - Aus: Proc. of the 1st int. Working Conf. of Stored Prod. Entomol., Savannah, GA 1974: 341-353

NAVARRO, S. and FRIEDLANDER, A. (1975): The effect of carbon dioxide anesthesia on the lactate and pyruvate levels in the hemolymph of Ephestia cautella (Wlk.) pupae. - Comp. Biochem. Physiol., 50B: 187-189

NAVARRO, S. (1978): The effects of low oxygen tensions on three stored product insect pests. - Phytoparasitica 6 (2): 51-58

NAVARRO, S.; GONEN, M.; SCHWARTZ, A. (1978): Large scale trials on the use of controlled atmospheres for the control of stored grain insects. - Aus: Proceedings of the 2nd Int. Working Conf. Stored Prod. Entomol., Ibadan: 260-270

NAVARRO, S.; AMOS, T.G.; WILLIAMS, P. (1981): The effect of oxygen and carbon dioxide gradients on the vertical dispersion of grain insects in wheat. - J. Stored Prod. Res. 17 (3):101-107

NAVARRO, S.; DONAHAYE, E.; KASHANCHI, Y.; PISAREV, V.; BULBUL, O. (1984): Airtight storage of wheat in a P.V.C. covered bunker. - Aus: RIPP, B.E. et al. (edts.): Developments in Agricultural Engeneering. Controlled Atmosphere and Fumigation in Grain Storages 5: 601-614

NAVARRO, S.; DIAS, R.; DONAHAYE, E. (1985): Induced tolerance of Sitophilus oryzae adults to carbon dioxide. - J. Stored Prod. Res. 21 (4): 207-213

NOACK, S. und REICHMUTH, Ch. (1982): Über die im Vorratsschutz eingestzten Mengen von Phosphin, Methylbromid und Blausäure in der Bundesrepublik Deutschland in den Jahren 1975-1977. - Nachichtenbl. Dtsch. Pflanzenschutzd. 34 (2): 17-21

NOACK, S.; REICHMUTH, CH.; WOHLGEMUTH, R. (1984a): Rückstandsverhalten von Phosphin in begasten Lebensmitteln in Abhängigkeit von der Lagertemperatur und der Belüftung. - Z. Lebensm. Unters. Forsch. 178: 31-37

NOACK, S.; REICHMUTH, CH., WOHLGEMUTH, R. (1984b): Ein halbempirisches Modell zur Abschätzung von PH3-Rückständen am Beispiel phosphinbegaster Haselnüsse. - Z. Lebensm. Unters. Forsch. 178: 97-103

NOACK, S.; WOHLGEMUTH, R. (1985): PH3-Rückstände in Haselnüssen, Sojabohnen und Weizen nach Phosphin-Begasungen mit zeitlich nicht konstanter Konzentration. - Z. Lebensm. Unters. Forsch. 180: 101-108

OXLEY, T.A. (1948): The Scientific Principles of Grain Storage; 100 S., Northern Publishing Co. Ltd., Liverpool

OXLEY, T.A.; WICKENDEN, G. (1963): The effect of restricted air supply on some insects which infest grain. - Ann. Biol. 51: 313-324

PEREIRA, J. and WOHLGEMUTH, R. (1982): Neem (Azadirachta indica A. Juss) of West African origin as a protectant of stored maize. - Z. Ang. Entomol. 94: 208-214

PEREIRA, J. (1983): The effectiveness of six vegetable oils as protectants of cowpeas and bambara ground nuts against infestation by Callosobruchus maculatus (F.) (Coleoptera: Bruchidae). - J. Stored Prod. Res. 19 (2): 57-62

PERTTUNEN, V. (1972): Humidity and light reactions of Sitophilus granarius L., S. oryzae L. (Col.,Curculionidae), Rhyzoperta dominica F. (Bostrychidae), and Acanthoscelides obtectus Say (Bruchidae). - Ann. Entomol. Fenn. 38 (4): 161-176

PHILLIPS, J.K. and BURKHOLDER, W.E. (1981): Evidence for a male-produced aggregation pheromone in the rice weevil, Sitophilus oryzae (L.). - J. Econ. Entomol. 74: 539-542

PRICKETT, A.J. (1980): The cross resistance spectrum of Sitophilus granarius Coleoptera: Curculionidae heterozygous for pyrethrine resistance. - J. Stored Prod. Res. 16 (1): 19-26

QI, Y.T.; BURKHOLDER, W.E. (1981): Protection of stored wheat from the granary weevel by vegetable oils. - J. Econ. Entomol. 74 (5): 502-505

RASSMANN, W. (1986): Untersuchungen zur Wirksamkeit eines Bacillus thuringiensis-Präparates gegen vorratsschädliche Motten in der Getreidelagerung. - Nachichtenbl. Deut. Pflanzenschutzd. 38: 61-63

REICHMUTH, CH.; WOHLGEMUTH, R.; LEVINSON, A.R.; LEVINSON, H.Z. (1976): Untersuchungen über den Einsatz von pheromonbeköderten Klebefallen zur Bekämpfung von Motten im Vorratsschutz. - Z. f. Angew. Entomol.83 (1): 95-102

REICHMUTH, CH.; SCHMIDT, H.-U.; LEVINSON, A.R.; LEVINSON, H.Z. (1978): Erfahrungen im Einsatz pheromonbeköderter Klebefallen zur Bekämpfung der vorratsschädlichen Motte Ephestia elutella Hbn. in Getreidelägern. - Mitt. Dtsch. Ges. Allg. Angew. Entomol. 1: 158-165

REICHMUTH, CH. und NOACK, S. (1983): Zur Beurteilung der Umweltverträglichkeit von Begasungsverfahren im Vorratsschutz. - Getreide Mehl und Brot 37 (5): 139-144

REICHMUTH, CH.; WOHLGEMUTH, R.; NOACK, S. (1985): Ein neues Verfahren zur Bekämpfung von vorratsschädlichen Insekten in geschüttetem Getreide mit Phosphorwasserstoff aus Beutelrollen. - Mühle u. Mischfuttertechn. 122 (20): 266-268

REICHMUTH, CH. (1987): Low oxygen content to control stored product insects. - Aus: DONAHAYE,E. and NAVORRO, S. (edts.) Proc. 4th Int. Work. Conf. on Stored Prod. Protection; 1986, Tel Aviv, Israel: 194-207

RICHARDS, O.W. (1947): Observations of grain weevils, Calandra granaria (Coleoptera:Curculionidae) I. General biology and oviposition. - Proc. Zool. Soc. London 117: 1-43

SACHS, L. (1974): Angewandte Statistik, Planung und Auswertung, Methoden und Modelle; 545 S., Springer Verlag Berlin Heidelberg New York

SCHACHER, A.; KNÜLLE, W. (1980): Mortality of the grain weevil, Sitophilus granarius, by fumigation with methyl bromide, depending on different rates of relative humidity. - Anz. Schädlingsk. Pflanzensch. Umweltsch. 53 (11): 166-169

SHARIFI, S. (1972): Oviposition site and egg plug staining as related to development of two species of Sitophilus in wheat kernels. - Z. Ang. Entomol. 71: 428-431

SHAZALI, M.E.H.; SMITH, R.H. (1985): Live history studies of internally feeding pests of stored sorghum: Sitotroga cerealella (Ol.) and Sitophilus oryzae (L.). - J. Stored Prod. Res. 21 (4): 171-178

SHEJBAL J.; TONOLO, A.; CARERI, G. (1973): Conservation of cereals under nitrogen. - SNAM Progretti S.p.A., Rome, Italy: 1133-1144

SINGH, N.B.; SINHA, R.N.; WALLACE H.A. (1977): Changes in O2, CO2 and microflora of stored wheat induced by weevils. - Environ. Entomol. 6 (1): 111-117

SMITH, S.G. (1952): The cytology of Sitophilus oryzae (L.), S. granarius (L.) and some other Rhynchophora (Coleoptera). - Cytologia 17: 50-70

STEIN, W. (Hrsg.) (1986): Vorratsschädlinge und Hausungeziefer; 287 S., Ulmer Verlag, Frankfurt

STOREY, C.L. (1975a): Mortality of Sitophilus oryzae (L.) and Sitophilus granarius (L.) in atmospheres produced by an exothermic inert atmosphere generator. - J. Stored Prod. Res. 11 (3/4): 217-221

STOREY C.L. (1975b): Mortality of adult stored-product insects in atmospheres produced by an exothermic inert atmosphere generator. - J. Econ. Entomol. 68 (3): 316-318

STRATIL, H. und REICHMUTH, CH. (1983): Ausnutzung der Kälteempfindlichkeit vorratsschädlicher Motten (Pyraloidea) zu ihrer Bekämpfung. - Mitt. dtsch. Ges. allg. angew. Ent. 4: 111-115

STRATIL, H. und REICHMUTH, CH. (1984): Überlebensdauer von Eiern der vorratsschädlichen Motten Ephestia cautella Wlk. und Ephestia elutella (Hbn.) (Lepidoptera, Pyraloidea) bei Temperaturen unterhalb ihres Entwicklungsminimums. - Z. angew. Entomol. 97 (1): 63-70

STRATIL, H.; WOHLGEMUTH, R.; BOLLING, H.; ZWINGEBERG, H. (1987): Optimierung des Prallmaschinenverfahrens zum Abtöten und Entfernen von vorratsschädlichen Insekten aus Nahrungsmitteln unter besonderer Berücksichtigung der Qualität der Mahlerzeugnisse. - Getreide, Mehl und Brot, 41 (10): 294-302

STRONG, R.G.; DIEKMAN, J. (1973): Comparative effectiveness of 15 insect growth regulators against several pests of stored products. - J. Econ. Entomol. 66 (5): 1167-1173

STUBBS, M. (1982): The influence of age of female at mating and duration of male presence upon the length of the pre-oviposition period and productivity of Sitophilus granarius (L.) (Coleoptera: Curculionidae) at 20 deg C. - J. Stored Prod. Res. 18 (4): 171-175

STUBBS, M.; ABOOD, F. (1983): Oviposition by Sitophilus granarius (L.) (Coleoptera: Curculionidae) in insect contaminated wheat. - J. Stored Prod. Res. 19 (1): 51-56

SWATONEK, F. (1975a): Untersuchungen zur Biologie des Kornkäfers, Sitophilus granarius (L.) , I. Teil. - Bodenkultur 26 (3): 278-290

SWATONEK, F. (1975b): Untersuchungen zur Biologie des Kornkäfers, Sitophilus granarius (L.), II. Teil. - Bodenkultur 26 (4): 379-398

TYLER, P.S. and BINNS, T.J. (1982): The influence of temperature on the susceptibility to eight organophosphorus insecticides of susceptible and resistant strains of Tribolium castaneum, Oryzaephilus surinamensis and Sitophilus granarius. - J. Stored Prod. Res. 18 (1): 13-19

WEIDNER, H. (Hrsg.) (1982): Bestimmungstabellen der Vorratsschädlinge und des Hausungeziefers Mitteleuropas; 251 S., Fischer Verlag Stuttgart

WEIDNER, H. (1976): Vorratsschutz-Literatur 1975. - Zeitschr. Pflanzenkrankh. Pflanzensch. 83 (7/8): 462-491

WILLIAMS, J.H.; WILBUR, D.A. (1969): Respiratory and environments of grain infesting weevils, II. Comparison of respiratory atmospheres produced by laboratory populations of three species of grain weevils. - J. Econ. Entomol. 62 (3): 693-697

WINKS, R.G. (1987): Strategies for effective use of phosphine as a grain fumigant and the implications of resistance. - Aus: DONAHAYE, E. and NAVARRO, S. (edts.): Proc. 4th Int. Work. Conf. Stored Prod. Protection, Tel Aviv, Israel, 1986: 335-344

WOHLGEMUTH, R. (1979): Probleme und Forschungsrichtungen im Vorratsschutz heute. - Ber. ü. Landwirtsch. 57 (4): 570-575

WOJCIK, D.P. (1968): Test for audible and ultrasonic sound production by stored product insects. - J. Econ. Entomol. 61 (5): 1414-1417

ZACHER, F. (1933): Haltung und Züchtung von Vorratsschädlingen. - Aus: ...(Hrsg.): Handbuch d. biol. Arbeitsmeth., Abt. IX, 7 (3): 389-592

ZACHER, F. und LANGE, B. (1964): Vorratsschutz gegen Schädlinge; 125 S., Paul Parey Verlag Berlin und Hamburg