

Stoßartige Belastung von Maiskörnern

Von Martin Kustermann, Heidenheim*)

DK 633.004.12:633.15:531.6

Maiskörner werden bei der Ernte, beim Transport und beim Fördern oft stoßartig beansprucht. Dies führt häufig zu Kornbeschädigungen und gelegentlich zum Bruch, woraus letztendlich eine Erlösminderung beim Landwirt und beim Verarbeiter resultiert.

In dieser Arbeit wird ein Weg aufgezeigt, wie der Belastungsverlauf beim Stoß rechnerisch bestimmt werden kann. Im zweiten Teil der Arbeit wird der in Versuchen ermittelte Zusammenhang zwischen Kornbeschädigungen und Feuchte bzw. Aufprallgeschwindigkeit vorgestellt.

1. Einleitung und Aufgabenstellung

Infolge der vor allem beim Dreschen und Fördern auftretenden dynamischen Belastungen durch Schlag und Prall werden Getreidekörner häufig erheblich beschädigt. Diese Beschädigungen (Risse und Brüche) führen sowohl zu quantitativen als auch zu qualitativen Verlusten. Es ist deshalb von großem Interesse, die Beschädigungen soweit wie möglich zu reduzieren. Dieses Ziel ist umso eher zu verwirklichen, je besser die Vorgänge, die zur Beschädigung führen, bekannt und beschreibbar sind. Unabdingbar ist darüber hinaus die Kenntnis der Grenzbelastung, bis zu der keine oder nur erträglich geringe Beschädigungen auftreten.

Zum Erreichen der genannten Forderungen soll in einem ersten Schritt das Verhalten der Körner bei stoßartiger Beanspruchung in Abhängigkeit von den Haupteinflußgrößen Feuchtegehalt und Belastungsgeschwindigkeit untersucht werden. Dabei charakterisieren der Kraft-Zeit-Verlauf, die maximale Kontaktkraft, die Stoßdauer und das Auftreten von Brüchen das Stoßverhalten. In einem weiteren Schritt wird ein theoretischer Ansatz vorgestellt, der es erlaubt, das Verhalten der Körner bei dynamischer Belastung mindestens annähernd rechnerisch abzuschätzen.

2. Bisherige Arbeiten

Die Auswirkungen stoßartiger Belastungen auf die Qualität von Maiskörnern und auf die Mengenverluste zwischen Ernte und bestimmungsgemäßem Verbrauch können auf zwei verschiedene Weisen untersucht werden. Einerseits können Untersuchungen an einzelnen, ausgeführten Anlagen durchgeführt werden. Andererseits kann durch Simulation der innerhalb einer Anlage auftretenden Belastung mit Hilfe einer entsprechenden Laboreinrichtung an einer kleineren und damit einfacher zu handhabenden Gutmenge die Bedeutung eben dieser Belastung bestimmt werden. Nur in diesem Fall ist auch eine nahezu beliebige Variation der Einflußgrößen möglich.

Der Verfasser dankt Herrn Prof. Dr.-Ing. H.D. Kutzbach für die wissenschaftliche Betreuung dieser Arbeit, Frau D. Dörner für die zuverlässige und ausdauernde Unterstützung und der DFG für die finanzielle Unterstützung der Versuche.

*) Dr.-Ing. M. Kustermann (J.M. VOITH GmbH, Heidenheim) war wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Grundlagen der Landtechnik (Prof. Dr.-Ing. H.D. Kutzbach) am Institut für Agrartechnik der Universität Hohenheim.

2.1 Untersuchungen an ausgeführten Anlagen

Schmidt [1] untersuchte die Veränderung der Qualität von Saatgut bei verschiedenen Verarbeitungsstufen. Insbesondere verglich er handgerebeltes und maschinell gerebeltes Gut. Für die Bestimmung der Gutqualität wendete er hauptsächlich folgende gebräuchliche Methoden an und verglich die erzielten Ergebnisse: Tetrazoliumkeimwert, Triebkraft, Kaltprüfungswert (oft vereinfacht als Keimfähigkeitsprüfung bezeichnet), Aleuron-Tetrazolium-Test und Einfärben mit Echtgrünlösung. Er stellte fest, daß die Ergebnisse dieser Methoden zur Bestimmung der Qualitätskriterien nicht immer miteinander übereinstimmen. Bei Anwendung der Methode Einfärben mit Echtgrünlösung ist jedoch eine starke Zunahme an Kornverletzungen in der Reihenfolge: handgerebelt, maschinell gerebelt und kalibriert festzustellen.

Spittel [2] führte entsprechende Messungen einige Jahre später mit anderen, neuen Sorten durch. Dabei konnte sie einen generellen Rückgang des Beschädigungsniveaus feststellen. Sie führt dies einerseits auf verbesserte Verfahren bei der Saatgutaufbereitung und andererseits auf Kornmaterial von größerer mechanischer Belastbarkeit zurück. Diese größere Widerstandsfähigkeit der Körner gegen mechanische Beanspruchung, die sie auch durch Laboruntersuchungen bestätigte, sei aber eher durch besonders günstige Witterungsbedingungen während der Wachstumsperiode der Pflanze als durch "verbesserte" Sorten bedingt.

Byg u. Hall [3] untersuchten Konsumware und verglichen einen Axial-Mähdrescher mit einem konventionellen Tangential-Mähdrescher. Sie beobachteten beim Axial-Mähdrescher einen geringeren Anteil beschädigter Körner als beim konventionell arbeitenden. Je nach Mähdreschereinstellung ergab sich ein Minimum des Anteils beschädigter Körner bei Feuchtegehalten zwischen ca. 18 und 25 %.

Dagegen fanden *Waelti u. Buchele* [4] eine stetige Zunahme des Anteils beschädigter Körner mit zunehmendem Feuchtegehalt. Ihren mit einem serienmäßigen Mähdrescher bei immer gleichbleibender Einstellung durchgeführten Untersuchungen zufolge läßt sich der Zusammenhang zwischen dem Anteil beschädigter Körner und dem Feuchtegehalt in Form einer Potenzfunktion beschreiben. In derselben Arbeit konnten sie zeigen, daß die Dreschertrommeldrehzahl und damit die Relativgeschwindigkeit zwischen den Schlagleisten und dem Dreschgut einen sehr großen Einfluß auf das Beschädigungsniveau der Körner hat. Mit steigender Drehzahl nahmen vor allem Schädigungen im Bereich des hornigen Endosperms stark zu, wogegen sie nur eine geringfügige Zunahme von Schädigungen am Keimling beobachteten.

Eine Untersuchung unterschiedlicher Förderverfahren und der Bedeutung der dabei auf die Körner wirkenden dynamischen Belastungen für das Ausmaß ihrer Beschädigung wurde von *Foster u. Holman* [5] durchgeführt. Sie stellten fest, daß beim Befüllen von hohen Silos in beträchtlichem Umfang Körnerbruch entsteht. Dies ist vor allem zu Beginn des Füllvorganges der Fall, da dann die Körner im Gutstrom aus großer Höhe im freien Fall bis zum Boden der Silos fallen. Dabei erreichen sie Geschwindigkeiten, die ab einer Fallhöhe von ca. 15 m über die Schwebegeschwindigkeit des einzelnen Kornes hinausgehen. Bei einem von den Autoren untersuchten Füllvorgang an einem 26 m hohen Silo stellten sie Auftreffgeschwindigkeiten am Boden von ca. 17 bzw. 20 m/s fest, je nachdem, ob ein dünner oder dicker Gutstrom betrachtet wurde.

Umfangreiche Untersuchungen über die Qualitätsveränderungen von Konsumware zwischen der lokalen Sammelstelle in den USA und einem europäischen Seehafen wurden von *Hill u. a.* [6], *Paulsen u. Hill* [7] sowie *Hill, Paulsen u. Hiller* [8] durchgeführt. Sie zeigten, daß Befüllungs- und Entleerungsvorgänge sowohl bei den einzelnen Transportmitteln als auch bei der Zwischenlagerung in Silos die Hauptursachen für die Entstehung von Bruchkorn sind.

2.2 Untersuchungen unter Laborbedingungen

Da bei Untersuchungen an ausgeführten Anlagen immer sehr große Gutmengen gehandhabt werden müssen und die interessierenden Einflußgrößen nie im notwendigen Umfang frei variiert werden können, wird versucht, diese Nachteile durch Tests im Labormaßstab zu umgehen.

Herum u. Hamdy [9] prüften, inwieweit die Empfindlichkeit der Körner gegenüber Beschädigungen beim Fördern mit Elevatoren mit Hilfe von Labortestgeräten festgestellt werden kann. Sie benutzten dazu den in den USA häufig zu diesem Zweck eingesetzten "Stein-Breakage-Tester CK 2" [10] und ein nach dem Stoßprinzip arbeitendes Gerät. Mit beiden Geräten konnten jedoch keine voll befriedigenden Resultate erzielt werden, da das vorhergesagte und das später in der Praxis festgestellte Ausmaß der Beschädigungen nur selten übereinstimmten. Deshalb gibt es inzwischen Bestrebungen, z.B. von Sharda u. Herum [11], den "Stein-Breakage-Tester" durch andere Geräte, die nach dem Stoßprinzip arbeiten, zu ersetzen.

Erste Hinweise auf den Ablauf der Entkörnung durch eine gebräuchliche Schlagleiste gibt Graeber [12]. Er berichtet jedoch nur über die zur Entkörnung notwendige Energie und nicht über den Umfang eventueller Beschädigungen.

Srivastava, Herum u. Stevens [13] und Mensah u.a. [14] führten dynamische Festigkeitsuntersuchungen an fest eingespannten Körnern durch. Sie bestimmten nach dem Pendelprinzip die zum Abscheren der Körner notwendige Energie aus der Differenz der Auslenkwinkel des Pendels vor dem Stoß und nach dem Durchschlagen der Körner. Während Mensah u.a. [14] eine Zunahme der auf die Scherfläche bezogenen Energie und der max. Scherspannung mit größerem Feuchtegehalt (Bereich 12–21 %) beobachteten, berichten Srivastava u.a. [13] über nahezu gleichbleibende Werte für dieselben Größen im Feuchtebereich 15–30 %. Zusätzlich zu den Energiebetrachtungen führten auch Mensah u.a. [14] und Srivastava u.a. [13] indirekte Kraftmessungen durch. Sie erfaßten die Verzögerung des Pendels und errechneten daraus die beim Stoß bzw. Abscheren auftretende Kraft.

Während sich alle genannten Autoren fast ausschließlich mit der Beobachtung der Entstehung von Schäden am Korn beschäftigten, versuchten Casandroiu u. Segarceanu [15] eine theoretische Bestimmung des Stoßkoeffizienten. Sie gingen dabei von Impuls- und Energiebetrachtungen beim rauen Stoß aus. Im experimentellen Teil der Arbeit berichten sie über eine größere Empfindlichkeit gegen Bruch für Maiskörner mit 11 % Feuchtegehalt gegenüber Körnern mit 14,5 %. Außerdem stellten sie im Vergleich zum einfachen Stoß eine sehr starke Zunahme des Anteils beschädigter Körner bei zwei- und dreifachem Stoß fest.

3. Theoretische Grundlagen

3.1 Stoßzahl

Bild 1 zeigt in einer schematischen Darstellung verschiedene zeitliche Stadien beim Stoß zwischen zwei Körpern. Die Beziehungen für den Impuls des Körpers A gelten entsprechend auch für den Körper B.

Die erste Stoßphase beginnt im Moment der Berührung der beiden Körper (t_1) und endet, wenn die Relativgeschwindigkeit der beiden Körper zueinander Null ist (t_3). Diese erste Phase wird als Deformationsphase bezeichnet. Während der zweiten Stoßphase, der Rückbildungsphase, geht der elastische Anteil der Verformung wieder auf Null zurück. Diese Phase ist mit dem Ende der Berührung zwischen den Körpern (t_4) abgeschlossen.

Die gebräuchlichste Größe zur Charakterisierung eines Stoßes ist die sogenannte Stoßzahl k (gelegentlich auch als Restitutionskoeffizient bezeichnet), die definiert ist als das Verhältnis aus den Relativgeschwindigkeiten der Körper nach dem Stoß und vor dem Stoß

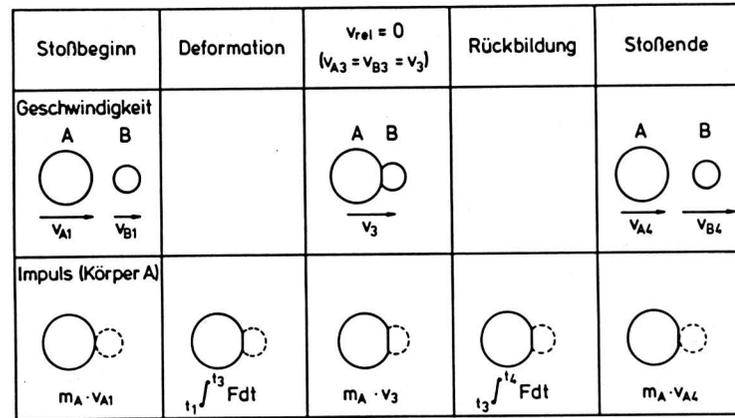


Bild 1. Schematischer Ablauf eines Stoßvorganges.

$$k = \frac{v_{A4} - v_{B4}}{v_{B1} - v_{A1}} \quad (1)$$

Sie ist über weite Bereiche für eine bestimmte Werkstoffpaarung nahezu konstant und kann damit als Stoffeigenschaft betrachtet werden. Mit der Stoßzahl kann eine Aussage über den Energieumsatz beim Stoß getroffen werden. Im ideal elastischen Fall ($k = 1$) wird die gesamte ursprünglich vorhandene kinetische Energie wieder in kinetische Energie umgesetzt. Im ideal plastischen Fall ($k = 0$) dagegen gibt es keine Rückverformung, die gesamte kinetische Energie wird bei der Verformung aufgezehrt.

Können nicht alle 4 Geschwindigkeiten, die zur Lösung von Gl. (1) benötigt werden, gemessen werden, so kann, wie in [16] gezeigt, mit Hilfe des Impulssatzes

$$F = \frac{d(mv)}{dt} \quad (2)$$

die Stoßzahl aus

$$k = \frac{\int_{t_1}^{t_4} F dt}{m_A v_{A1}} - 1 \quad (3)$$

bestimmt werden. Dies gilt unter der Voraussetzung, daß Körper B im Vergleich zu Körper A von sehr großer Masse ist und das Bezugssystem seinen Ursprung auf dem Körper B hat. F ist die (positiv angesetzt!) Kontaktkraft.

3.2 Kraft-Zeit-Verlauf: elastisch

Der Kraft-Zeit-Verlauf beim elastischen Stoß einer Kugel gegen einen Stab kann, ausgehend von einem Ansatz von Crook [17] in Verbindung mit der Theorie von Hertz [18], durch

$$\left(\frac{F}{\gamma_1}\right)^{2/3} = v_1 t - \frac{1}{m} \iint F dt dt - \frac{1}{\rho A c} \int F dt \quad (4)$$

beschrieben werden. Die Größe γ_1 ist eine Konstante, die die Kenngrößen Querkontraktionszahl, Elastizitätsmodul und die Geometrie an der Kontaktstelle zusammenfaßt. v_1 ist die ursprüngliche Geschwindigkeit der bewegten Kugel mit der Masse m . ρ ist die Dichte des Stabmaterials, A der Stabquerschnitt und c die Schallgeschwindigkeit im Stab. Gl. (4) kann nur numerisch gelöst werden. Der resultierende Kraft-Zeit-Verlauf ist in Bild 2 dargestellt.

3.3 Kraft-Zeit-Verlauf: plastisch

Zur Ermittlung des Kraft-Zeit-Verlaufes beim plastischen Stoß einer Kugel gegen einen Stab läßt sich der Ansatz von Crook [17] ebenfalls einsetzen. In Verbindung mit dem empirischen Verformungsgesetz von Meyer [19] ergibt sich:

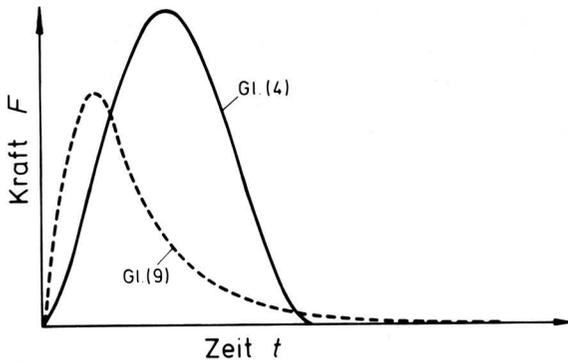


Bild 2. Kraft-Zeit-Verlauf beim elastischen (Gl. (4)) und beim plastischen Stoß (Gl. (9)), basierend auf dem Ansatz von *Crook* [17].

$$\frac{F}{2\pi R p_0} = v_1 t - \frac{1}{m} \iint F dt dt - \frac{1}{\rho A c} \int F dt \quad (5)$$

Diese Gleichung kann direkt zu

$$F = \frac{1}{\varphi} \cdot 2\pi R v_1 p_0 \sin(\varphi t) \exp(-\psi t) \quad (6)$$

mit

$$\psi = \frac{\pi R p_0}{\rho A c} \quad \text{und} \quad \varphi = \sqrt{\frac{2\pi R p_0}{m} - \psi^2}$$

gelöst werden. Dabei ist R der Kugelradius und p_0 der dynamische Fließdruck, von dem angenommen wird, daß er in der gesamten Kontaktfläche gleich groß ist. Die maximale Kraft F_2 wird zum Zeitpunkt

$$t_2 = \frac{\arctan(\varphi/\psi)}{\varphi} \quad (7)$$

erreicht. Danach findet kein plastisches Fließen des Werkstoffes mehr statt. Die weitere Verformung ist ausschließlich auf das Fortschreiten der Kompressionswelle zurückzuführen. Damit ist die Gültigkeit von Gl. (6) auf die Zeitspanne zwischen Stoßbeginn und Erreichen der Maximalkraft beschränkt.

Ab diesem Zeitpunkt wird Gl. (5) zu

$$\frac{F_2}{2\pi R p_0} = v_1 t - \frac{1}{m} \iint F dt dt - \frac{1}{\rho A c} \int F dt \quad (8)$$

Diese läßt sich durch eine einfache Integration lösen, so daß der Kraft-Zeit-Verlauf beim ideal plastischen Stoß (Bild 2) durch das Gleichungspaar

$$F = \begin{cases} \frac{1}{\varphi} \cdot 2\pi R v_1 p_0 \sin(\varphi t) \exp(-\psi t) & \text{für } 0 \leq t \leq t_2 \\ F_2 \exp[\rho A c(t_2 - t)/m] & \text{für } t \geq t_2 \end{cases} \quad (9)$$

für die gesamte Stoßdauer beschrieben werden kann.

3.4 Kraft-Zeit-Verlauf: teilelastisch

Reale Stoßvorgänge oder Stoßvorgänge zwischen realen Körpern sind dadurch charakterisiert, daß sie weder wie ideal elastische noch wie vollplastische Stoßvorgänge ablaufen. Sie sind vielmehr dazwischen einzuordnen. Dabei entscheiden die physikalischen und mechanischen Eigenschaften der beteiligten Körper darüber, ob das elastische oder plastische Verhalten überwiegt. Soweit die Energieumsetzung bzw. der Impulsaustausch und damit die Energie- und Impulsänderung der beiden beteiligten Körper betrachtet wird, lassen diese sich mit der Stoßzahl k beschreiben.

Bezüglich des Kraft-Zeit-Verlaufes ergeben sich zunächst nur qualitative Aussagen. Der Kraft-Zeit-Verlauf wird nicht mehr symmetrisch sein, wie es beim ideal elastischen Stoß zweier gleicher Körper der Fall ist, sondern es wird eine Verschiebung des Zeitpunktes des Auftretens der maximalen Kraft registriert werden.

Den realen Stoß kann man als einen Vorgang betrachten, der sich durch eine Kombination aus elastischem und plastischem Anteil beschreiben läßt. Die einfachsten Kombinationsmöglichkeiten sind die Modelle von *Maxwell* und *Kelvin*, die in Bild 3 dargestellt sind.

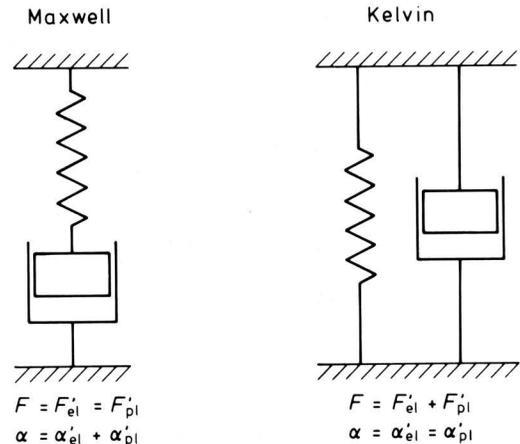


Bild 3. Modelle zur Verknüpfung der elastischen und plastischen Elemente.

In einer früheren Arbeit [16] wurde gezeigt, daß die Kombination auf der Basis des *Maxwell*-Modells mehr Erfolg verspricht, da nur mit diesem Modell auch eine bleibende Verformung simuliert werden kann.

Für die Stoßkraft gilt dann

$$F = F'_{el} + F'_{pl} \quad (10)$$

und für die Verformung:

$$\alpha = \alpha'_{el} + \alpha'_{pl} \quad (11)$$

Dabei stehen die Indizes *el* bzw. *pl* für elastisch bzw. plastisch. Durch die gestrichelte Größe (F' ; α') soll zum Ausdruck gebracht werden, daß die Kraft bzw. die Verformung der beiden Elemente nicht identisch ist mit den jeweils für den Idealfall berechneten Werten. Die Beziehung zu diesen wird für die Schwerpunktannahereung mittels des Elastizitätsgrades k' hergestellt:

$$\alpha'_{el} = k' \alpha_{el} \quad \text{und} \quad \alpha'_{pl} = (1 - k') \alpha_{pl} \quad (12)$$

Der Elastizitätsgrad k' hängt, wie die Stoßzahl k , von den physikalischen Eigenschaften der Stoßpartner ab und ist ein Maßstab dafür, wie stark die elastische Verformung zur Gesamtverformung beiträgt. Setzt man diese Beziehungen in Gl. (11) ein, so ergibt sich

$$\alpha = k' \alpha_{el} + (1 - k') \alpha_{pl} \quad (13)$$

Das heißt, die Verformung ist für den ideal elastischen (plastischen) Fall mit $k' = 1$ ($k' = 0$) gerade identisch mit den für diese Spezialfälle ermittelten Werten. Geht man nun wieder von der modifizierten allgemeinen Beziehung von *Crook* [17]

$$\alpha = v_1 t - \frac{1}{m} \iint F dt dt \quad (14)$$

aus und setzt hierin a aus Gl. (13) ein, so erhält man:

$$k' a_{el} + (1 - k') a_{pl} = v_1 t - \frac{1}{m} \int \int F dt dt \quad (15)$$

Daraus ergibt sich unter Verwendung der Lösungen für den elastischen (Gl. (4)) und plastischen Fall (Gl. (9)) nach [16] für $0 \leq t \leq t_2$

$$k' \left(\frac{F}{\gamma_1}\right)^{2/3} + (1 - k') \left[\frac{F}{2\pi R p_0} + \frac{1}{\rho A c} \int F dt \right] = v_1 t - \frac{1}{m} \int \int F dt dt \quad (16)$$

bzw. für $t \geq t_2$:

$$k' \left(\frac{F}{\gamma_1}\right)^{2/3} + (1 - k') \left[\frac{F_2}{2\pi R p_0} + \frac{1}{\rho A c} \int F dt \right] = v_1 t - \frac{1}{m} \int \int F dt dt \quad (17)$$

Für diese Gleichungen ist keine geschlossene Lösung bekannt, so daß für Beispielrechnungen auf numerische Verfahren zurückgegriffen wurde. Deren Ergebnisse sind in Bild 4 für den Kraft-Zeit-Verlauf und in Bild 5 für den Deformations-Zeit-Verlauf dargestellt.

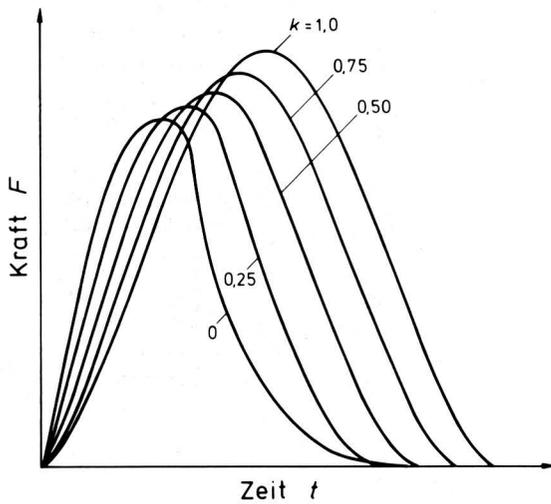


Bild 4. Theoretischer Kraft-Zeit-Verlauf beim Stoß für unterschiedliche Stoßzahlen.

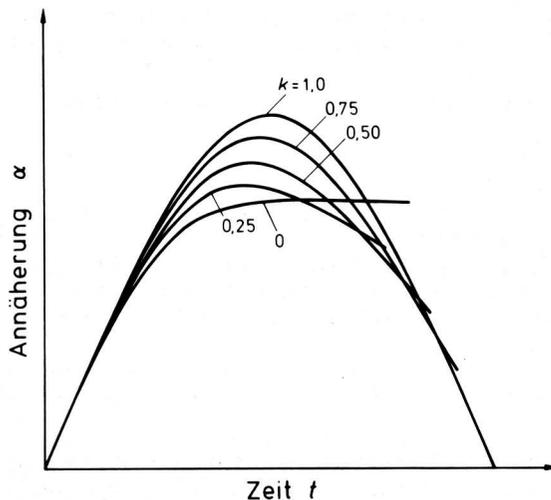


Bild 5. Theoretischer Deformations-Zeit-Verlauf beim Stoß für unterschiedliche Stoßzahlen.

Beim Kraft-Zeit-Verlauf (Bild 4) fällt auf, daß das Kraftmaximum umso später erreicht wird, je größer der Wert der Stoßzahl k bzw. des Elastizitätsgrades k' wird. Bei $k = 1$, also ideal elastischem Stoß, wird das Kraftmaximum gerade bei der Hälfte der gesamten Stoßdauer erreicht. Nur in diesem Fall stimmen der Zeitpunkt des Übergangs von der ersten zur zweiten Stoßphase und der Zeitpunkt des Auftretens der maximalen Kraft überein. In allen anderen Fällen wird die maximale Kraft eher erreicht. Erwartungsgemäß nimmt die Größe der maximalen Kraft mit steigenden Stoßzahlen zu.

Wie gefordert geht die Schwerpunktannäherung (Bild 5) beim elastischen Stoß wieder auf Null zurück, während beim plastischen Stoß die maximale Annäherung erhalten bleibt und keinerlei Rückverformung auftritt. Bei den teilelastischen Stößen bleibt je nach Größe des plastischen Anteils eine bleibende Verformung zurück.

3.5 Simulationsgleichungen für den Stoßvorgang bei Maiskörnern

Aufbauend auf den im vorhergehenden Abschnitt aufgestellten Beziehungen für den realen Stoß, soll versucht werden, den Stoßvorgang zwischen einem Maiskorn und einem stabförmig gedachten Maschinenelement aus Metall zu beschreiben. Im Gegensatz zu der dort gemachten Voraussetzung muß die Verformung des Maiskorns mitberücksichtigt werden [16].

Für eine Abschätzung des Kraft-Zeit-Verlaufes beim Stoß zwischen Maiskörnern und starren Maschinenteilen ist es nun notwendig, die Stoffkennwerte beider Materialien bei dynamischer Belastung zu kennen. Tafel 1 enthält die in den Beispielrechnungen verwendeten Werte.

| Kennwert | Material | Maiskorn | | Alu | Stahl | Quelle |
|-------------------------|----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|--------------|
| | | trocken | feucht | (AlMg 2) | (St 37) | |
| Querschnitt A | [m ²] | 40 · 10 ⁻⁶ | | | | - |
| Krümmungsradius R | [m] | 4 · 10 ⁻³ | | ∞ | | - |
| Elastizitätsmodul E | [N/m ²] | 1 · 10 ⁹ | 180 · 10 ⁶ | 70 · 10 ⁹ | 210 · 10 ⁹ | [20, 23, 30] |
| Dichte ρ | [kg/m ³] | 1330 | 1280 | 2 800 | 7 810 | [31, 30] |
| Schallgeschwindigk. c | [m/s] | 870 | 380 | 5 000 | 5 185 | - |
| Poissonzahl μ | [-] | 0,4 | | 0,33 | 0,30 | [32, 30] |
| dynam. Fließdruck p_0 | [N/m ²] | 180 · 10 ⁶ | 22 · 10 ⁶ | 200 · 10 ⁶ | 250 · 10 ⁶ | [-, 32] |

Tafel 1. Zusammenstellung der den Beispielrechnungen zugrunde liegenden physikalischen Kennwerte.

Es ist bekannt, daß einige der benötigten Stoffkennwerte von der Belastungsgeschwindigkeit abhängig sind. Im Schrifttum sind jedoch kaum Werte für die hier auftretenden Bedingungen zu finden. Für Mais konnte gezeigt werden [20], daß der Elastizitätsmodul mit der Belastungsgeschwindigkeit stark zunimmt. Für Metalle wurde für sehr hohe Belastungsgeschwindigkeiten ebenfalls eine Zunahme des E-Moduls beobachtet [21]. Für den Bereich der Beanspruchungsgeschwindigkeiten 5–20 m/s sind aber keine Werte bekannt. Da die Änderung aufgrund des im Vergleich mit Maiskörnern anderen Aufbaus von Metallen weniger stark sein wird, wurden die unter quasistatischen Bedingungen ermittelten Werte zu-

grunde gelegt. Ebenso wurden für den von *Crook* [17] benutzten dynamischen Fließdruck p_0 im genannten Geschwindigkeitsbereich keine Werte im Schrifttum gefunden. Für Mais wurde deshalb ein Wert angenommen, der auf dem von *Arnold u. Mohsenin* [22] mit "linear load limit" bezeichneten Wert beruht und entsprechend den Angaben von *Kustermann u. Kutzbach* [20] bzw. *Moreira* u.a. [23] hochgerechnet wurde.

Bild 6 zeigt den theoretischen Kraft-Zeit-Verlauf beim Aufprall von trockenen Maiskörnern auf ein starres Maschinenelement aus Aluminium bzw. Stahl. Trotz der großen Unterschiede zwischen den physikalischen Kenngrößen von Aluminium und Stahl verlaufen die Kurven deckungsgleich.

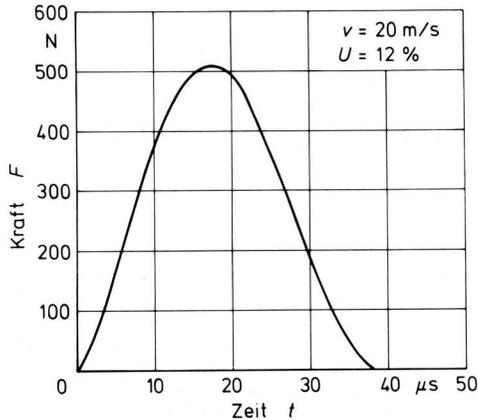


Bild 6. Kraft-Zeit-Verlauf beim Aufprall eines Maiskorns auf Aluminium bzw. Stahl.

4. Charakterisierung des Versuchsgutes

Das Maiskorn besteht, wie in **Bild 7** dargestellt, aus vielen chemisch und mechanisch völlig unterschiedlichen "Bausteinen". Zwar tragen zur Festigkeit und den zugehörigen "scheinbaren" Stoffeigenschaften des Korns in erster Linie lediglich die beiden Komponenten horniges und mehliges Endosperm bei, doch sind auch diese Bestandteile nicht gleichmäßig verteilt.

Bild 8 illustriert, wie unterschiedlich stark sie an den verschiedenen Stellen im Korn ausgeprägt sind. Es macht zudem deutlich, daß es große Unterschiede zwischen verschiedenen Maisarten gibt, und zwar nicht nur Kornform und Größe betreffend, sondern auch hinsichtlich des mengenmäßigen Anteils an hornigem und mehligem Endosperm. Bei eigenen, stichprobenartigen Untersuchungen an einem Querschnitt, wie in **Bild 8** in Spalte 4 dargestellt, konnten bei ein und derselben Sorte an der gleichen Stelle Dicken zwischen 0,3 und 1,2 mm für das hornige Endosperm festgestellt werden.

Für alle aufgeführten Untersuchungen wurde, soweit nicht ausdrücklich vermerkt, Mais von den Versuchsfeldern der Universität Hohenheim verwendet. Die Kolben wurden von Hand gepflückt und von Hand entkörnt. Die Untersuchungen am feuchten Gut wurden, soweit möglich, am Erntetag durchgeführt, d.h. die Kolben wurden morgens gepflückt und entkörnt und dann wurde sofort mit den Untersuchungen begonnen. Für die Untersuchungen bei geringeren Feuchtegehalten wurden die Kolben so lange auf eine Belüftungstrocknungsanlage (Raumtemperatur) gelegt, bis der gewünschte Feuchtegehalt erreicht war. Aufgrund des Umfangs der einzelnen Versuche und der daraus resultierenden großen Versuchsdauer mußte eine größere Gutmenge vor dem Auftreten des ersten Nachtfrostes an einem Tag geerntet werden. Dieses Gut wurde bis zur weiteren Verwendung bei 4 °C in einer Klimakammer eingelagert.

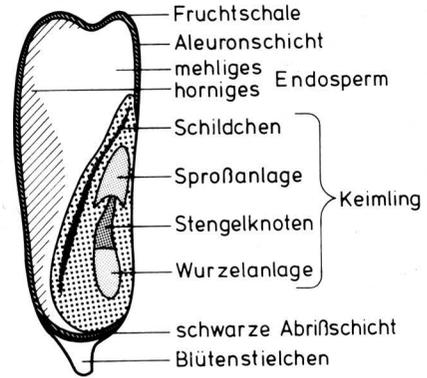


Bild 7. Aufbau eines Maiskorns (schematisch); nach *Zscheischler* u.a. [24].

| Schnitt Art | Schnitt | | | |
|--------------------|---------|---|---|---|
| | 1 | 2 | 3 | 4 |
| white Mandan flour | | | | |
| yellow dent | | | | |
| yellow flint | | | | |
| yellow pop | | | | |

Bild 8. Verteilung der Hauptbestandteile eines Maiskorns (vereinfacht); nach *Wolf* u.a. [25].

5. Versuchsaufbau und Versuchsdurchführung

Mit der hier beschriebenen Schlagprüfanlage, deren Name daher rührt, daß die zu untersuchenden Körner von einem bewegten Maschinenteil getroffen werden, das im folgenden als Schlagwerkzeug bezeichnet wird, wurden dynamische Festigkeitsuntersuchungen ausgeführt. Folgende Anforderungen wurden an die zu erstellende Anlage gestellt:

- Die Körner sollen an genau definierter Stelle belastet werden
- Die während des Kontaktes wirkenden Kräfte sollen gemessen werden
- Schlaggeschwindigkeiten zwischen 0,1 und 20 m/s sollen möglich sein
- Die Schlaggeschwindigkeit soll sich während des Kontaktes weder nach Betrag noch Richtung ändern
- Die Geschwindigkeit der Körner nach dem Stoß soll gemessen werden können
- Die Körner sollen nach dem Schlag weich aufgefangen werden, um sie auf den Grad der Beschädigung untersuchen zu können.

Ausgehend von diesen Forderungen und der Voraussetzung, daß es für die untersuchten Eigenschaften keine Rolle spielt, ob das Korn gegen eine feststehende Platte prallt oder ein bewegtes Werkzeug gegen ein frei aufliegendes Korn schlägt, wurde die in **Bild 9** schematisch dargestellte und in [16] ausführlich beschriebene Anlage gebaut.

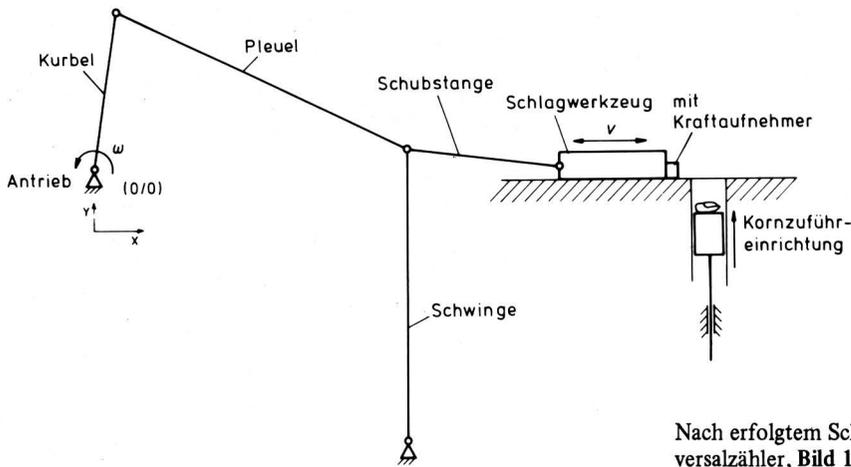


Bild 9. Funktionsprinzip der Schlagprüfanlage.

Die Körner werden vor Versuchsbeginn einzeln gewogen und auf die Kornzuführeinrichtung gelegt. Dann wird der Motor vom Tischrechner (HP-85) aus gestartet. Nach Erreichen der Nenndrehzahl löst ein Steuergerät automatisch den Hubmagneten der Kornzuführung aus. Im Steuergerät wird zusätzlich vor Aktivierung des Hubmagneten überprüft, ob sich das Schlagwerkzeug in der Rückwärtsbewegung (nach links) befindet. Dies ist notwendig, um eine ungewollte Kollision von Schlagwerkzeug und zu untersuchendem Korn zu vermeiden.

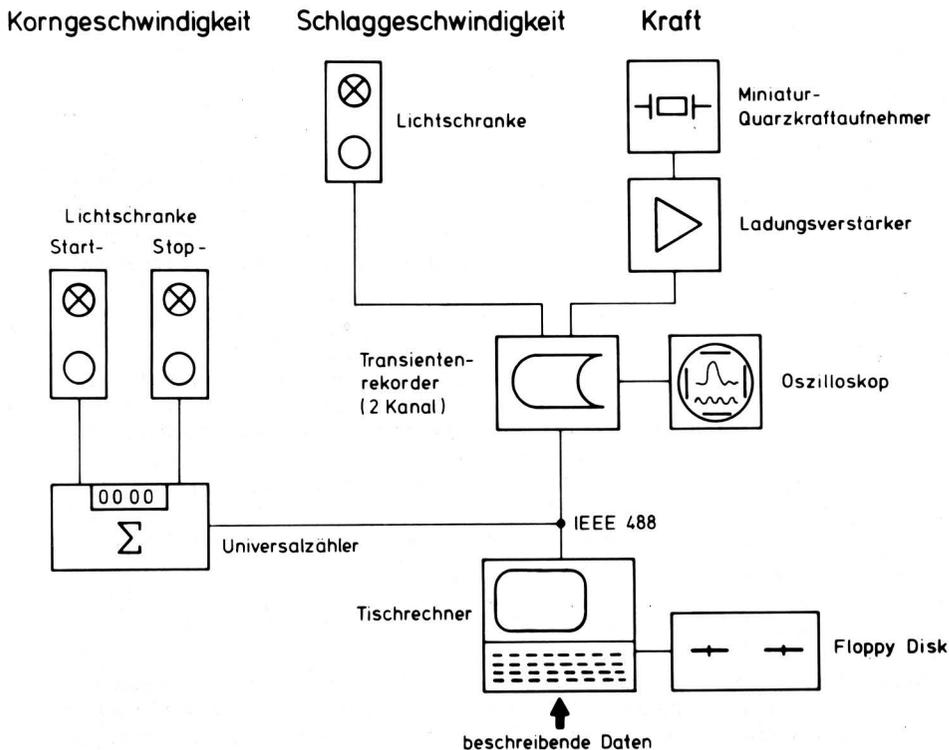
Bei der nächsten Vorwärtsbewegung des Schlagwerkzeuges wird das Korn vom Kraftaufnehmer an der gewünschten, vorher bestimmten Stelle gestoßen. Die dabei auftretende Kraft wird aufgezeichnet. Nach dem Stoß durchfliegt das Korn mit einer Geschwindigkeit, die größer ist als die des Schlagwerkzeuges, ein Lichtschrankenpaar. Dieses Lichtschrankenpaar ist so nah wie möglich hinter dem Hubmagneten angebracht. Die Zeit, die zwischen dem

Passieren der ersten und zweiten Lichtschranke vergeht, ist der Korngeschwindigkeit umgekehrt proportional. Nach einer kurzen Flugphase werden die Körner dann durch lose, nur einseitig befestigte Wollfäden sanft abgebremst und ohne weitere nennenswerte mechanische Belastungen aufgefangen. Sie werden auf zweierlei Art und Weise auf den Grad der Beschädigung untersucht. Zum einen wird direkt nach Versuchsende eine visuelle Begutachtung durchgeführt. Als zweite Methode wird die Leitfähigkeitsmethode angewendet.

Nach erfolgtem Schlag ruft der Rechner automatisch die vom Universalzähler, Bild 10, festgehaltene Zeit ab, die der Abprallgeschwindigkeit des Kornes umgekehrt proportional ist. Danach holt er vom Transientenrekorder zuerst das dort gespeicherte Kraftsignal und dann das Signal von der Lichtschranke, aus dem die Werkzeuggeschwindigkeit bestimmt wird. Es wird erzeugt, indem an der fest mit der Anlage verbundenen Lichtschranke ein hochtransparenter Filmstreifen vorbeigeführt wird. Auf diesem am Schlagwerkzeug befestigten Filmstreifen, wurden in regelmäßigen Abständen schwarze Strichmarkierungen angebracht. Die Frequenz des so entstehenden Signals ist der Schlaggeschwindigkeit direkt proportional.

Der Signalfluß für die Erfassung des Stoßkraftverlaufes ist ebenfalls in Bild 10 dargestellt. Das vom Quarzkraftaufnehmer (Eigenfrequenz 200 kHz) erzeugte Ladungssignal wird vom Ladungsverstärker in ein Spannungssignal umgewandelt. Dieses wird mit dem Transientenrekorder aufgezeichnet. Die ermittelten Daten werden zusammen mit der Versuchs-Nr., Korn-Nr. und Kornmasse auf Disketten abgespeichert.

Die Vorgehensweise bei der Auswertung der Messungen wird in [16] ausführlich erörtert und muß hier aus Platzgründen verkürzt dargestellt werden. Die verwendeten Bezeichnungen können Bild 11 entnommen werden, das einen typischen Kraft-Zeit-Verlauf zeigt.



Als Stoßdauer τ wird die Zeitspanne zwischen Stoßbeginn und Stoßende

$$\tau = t_4 - t_1$$

bezeichnet.

Der zwischen den beiden Stoßpartnern ausgetauschte Impuls (auch als Gesamtimpuls bezeichnet)

$$I = \int_{t=t_1}^{t_4} F(t) dt$$

wird numerisch aus den gespeicherten Kraftwerten bestimmt. Dabei wird die Simpson-Regel, bei Bedarf durch die Newton-Regel [26] ergänzt, angewendet.

Die Stoßzahl wird mit Gl. (3) ermittelt.

Bild 10. Schema der Meßwerterfassung.

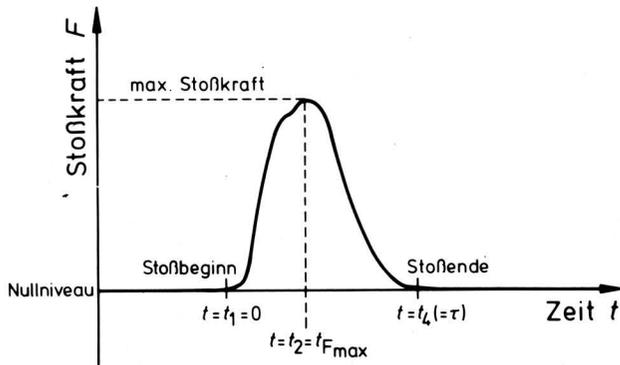


Bild 11. Definition der Bezeichnungen für die analytische Betrachtung des Stoßkraftverlaufs $F = f(t)$.

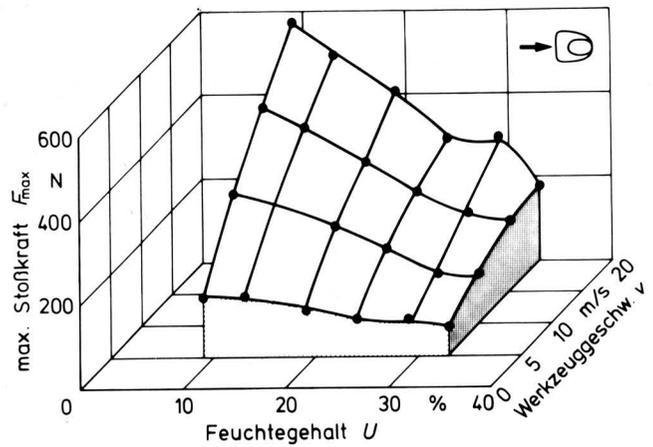


Bild 12. Stoßkraft als Funktion der Schlaggeschwindigkeit und des Feuchtegehaltes beim Schlag auf die Krone.

6. Versuchsergebnisse

Im folgenden werden die Ergebnisse, die für die maximale Stoßkraft, die Stoßdauer, den ausgetauschten Impuls und die beobachteten Beschädigungen in Abhängigkeit vom Feuchtegehalt und der Relativgeschwindigkeit beim Stoß gewonnen wurden, vorgestellt und diskutiert. Dabei ist die Darstellung auf Ergebnisse zu den beiden Orientierungen "Schlag auf die Krone" und "Schlag auf die Flanke" beschränkt. Mit diesen beiden Bezeichnungen, die in den Diagrammen durch Symbole veranschaulicht werden, wird die Lage der Kontaktstelle auf der Kornoberfläche gekennzeichnet.

6.1 Stoßkraft

Die Stoßkraft wächst mit kleiner werdenden Feuchtegehalten und bei Anwachsen der Schlaggeschwindigkeit. Für beide Orientierungen der Körner wurde ein gleichartiges Verhalten ermittelt, wie Bild 12 und 13 klar erkennen lassen. In der gewählten Darstellungsform wird dies durch ein Ansteigen der Kraftwerte von rechts vorne nach links hinten ausgedrückt.

In beiden Fällen ist die Zunahme der Stoßkraft sowohl in Abhängigkeit vom Feuchtegehalt als auch in Abhängigkeit von der Schlaggeschwindigkeit nahezu linear. Dies ist insbesondere in bezug auf die Abhängigkeit vom Feuchtegehalt unerwartet. Erklärt werden kann dieses Verhalten damit, daß der Einfluß des Feuchtegehaltes auf die Verformbarkeit (oder den Verformungswiderstand) des Kornes und sein Einfluß auf die Kornmasse einander gerade neutralisieren. Je feuchter ein Korn ist, umso leichter läßt es sich verformen, was zu kleineren Kräften führt. Wegen der größeren Masse feuchter Körner und dem daraus resultierenden größeren Anfangsimpuls müßten bei gleichbleibendem Verformungswiderstand größere Kräfte auftreten als bei trockenen Körnern. Dieser Effekt ist jedoch wegen der relativ geringen Massenänderung nicht so stark, daß sich insgesamt eine Kraftzunahme ergeben würde, er ist aber groß genug den Einfluß der Verminderung des Verformungswiderstandes zum Teil auszugleichen.

Interessant ist, daß am Kraftverlauf in Abhängigkeit von Geschwindigkeit und Feuchte ein Entstehen von Brüchen nicht erkannt werden kann. Obwohl bei Feuchtegehalten unter ca. 14 % und Geschwindigkeiten ab 15 m/s eine sehr große Zunahme an Beschädigungen zu beobachten ist, nimmt die Kraft in diesem Bereich weiter zu. Es gibt kein Beharrungsniveau, keine Unstetigkeit oder gar einen Kraftrückgang. Daraus wird geschlossen, daß die Körner schon vor der dynamischen Belastung im Inneren Risse aufweisen. Dies ist auch in Übereinstimmung mit Ergebnissen, die von Kustermann u. Kutzbach [27] für quasistatische Belastungen gewonnen wurden.

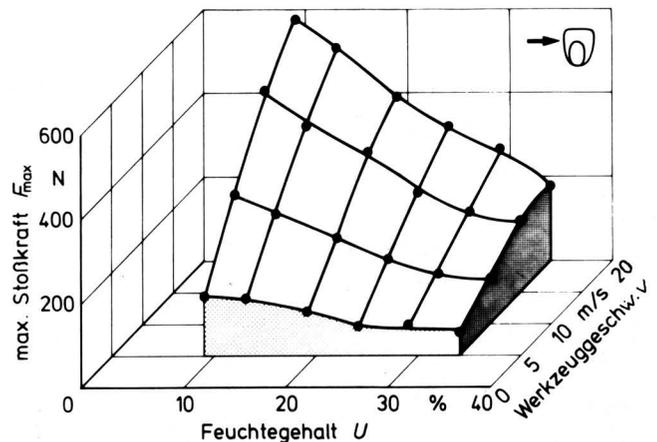


Bild 13. Stoßkraft als Funktion der Schlaggeschwindigkeit und des Feuchtegehaltes beim Schlag auf die Flanke.

6.2 Stoßdauer

Sowohl beim Schlag auf die Krone als auch beim Schlag auf die Flanke nimmt die Stoßdauer bei größeren Feuchtegehalten sehr stark zu. Beim Schlag auf die Krone, Bild 14, ist diese Zunahme etwas geringer als beim Schlag auf die Flanke, Bild 15.

Bei der Diskussion der Stoßkraft wurde schon darauf hingewiesen, daß das Entstehen von Brüchen keinen erkennbaren Einfluß auf die Größe der Maximalkraft hat. Es müßte jedoch einen Einfluß auf die Stoßdauer haben. Entstehen Brüche, so wird ein Teil der gespeicherten Verformungsenergie für die Schaffung neuer Oberflächen entzogen und damit die Rückverformung behindert. Dadurch ist die Rückverformung zwar unvollständig, aber früher beendet als bei intakten Körnern.

Wie in Abschn. 6.4 noch weiter ausgeführt werden wird, konnte ein deutlicher Unterschied im Beschädigungsgrad der Körner festgestellt werden. Vor allem im Bereich hoher Gutfeuchte wurden visuell wesentlich mehr und schwerwiegendere Beschädigungen an den Körnern festgestellt, die an der Krone belastet worden waren, als an denen, die einen Schlag auf die Flanke erhielten. Daraus wird geschlossen, daß die Bruchentstehung einen wesentlichen Einfluß auf die Stoßdauer hat und sich damit die etwas größere Stoßdauer beim Schlag auf die Flanke erklärt.

Im Gegensatz zur Feuchte hat, wie die Bilder 14 und 15 ebenfalls zeigen, die Schlaggeschwindigkeit wenig Einfluß auf die Stoßdauer. Die teilweise relativ großen Schwankungen bei einem angegebenen mittleren Feuchtegehalt rühren daher, daß gelegentlich größere Feuchteschwankungen um einen Mittelwert in Kauf genommen werden mußten.

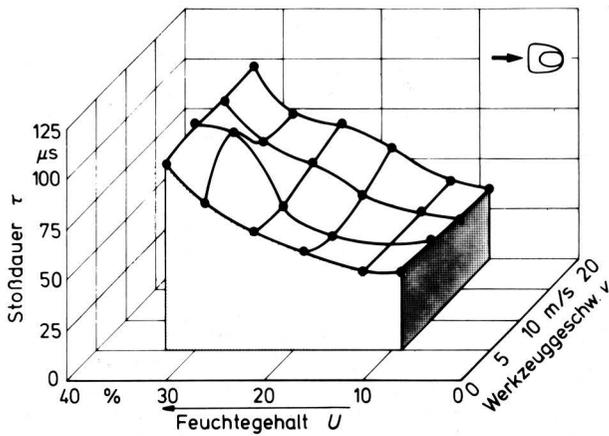


Bild 14. Stoßdauer als Funktion der Schlaggeschwindigkeit und des Feuchtegehaltes beim Schlag auf die Krone.

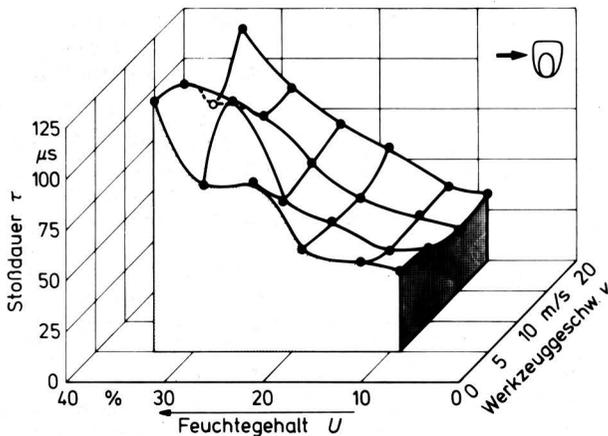


Bild 15. Stoßdauer als Funktion der Schlaggeschwindigkeit und des Feuchtegehaltes beim Schlag auf die Flanke.

6.3 Impulsänderung

Während des Kontaktes zwischen Korn und Schlagwerkzeug findet ein Impulsaustausch zwischen den Stoßpartnern statt. Im Falle des hier gewählten Bezugssystems, dessen Ursprung sich auf dem Schlagwerkzeug befindet, bedeutet dies, daß das Korn sich mit dem Anfangsimpuls mv_1 dem Schlagwerkzeug mit vergleichsweise sehr großer Masse nähert. Während der Verformungsphase wird dieser ursprüngliche Impuls aufgezehrt, bis beide Körper sich mit derselben Geschwindigkeit weiterbewegen. In der Rückverformungsphase erhält das Korn nun den neuen Impuls mv_4 ($|v_1| > |v_4| > 0$), mit dem es sich vom Schlagwerkzeug entfernt. Der Betrag des zwischen den Stoßpartnern ausgetauschten Impulses entspricht – wegen der unterschiedlichen Richtung von v_1 und v_4 – der Summe der Beträge der beiden Impulswerte vor und nach dem Stoß. Für Körper, deren mechanische Kennwerte sich nicht mit der Belastungsgeschwindigkeit ändern, folgt daraus, daß der ausgetauschte Impuls proportional zur Schlaggeschwindigkeit wächst. Bild 16 und 17 zeigen jedoch übereinstimmend eher einen unterproportionalen Anstieg.

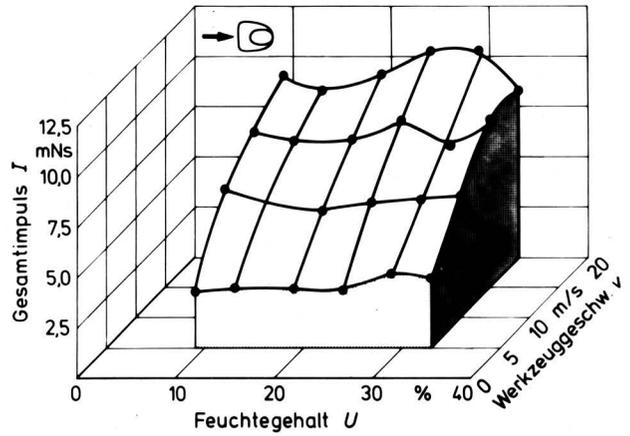


Bild 16. Zwischen den Stoßpartnern ausgetauschter Impuls als Funktion der Schlaggeschwindigkeit und des Feuchtegehaltes beim Schlag auf die Krone.

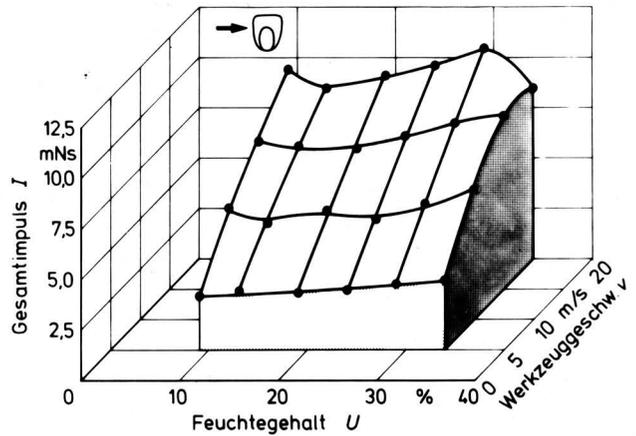


Bild 17. Zwischen den Stoßpartnern ausgetauschter Impuls als Funktion der Schlaggeschwindigkeit und des Feuchtegehaltes beim Schlag auf die Flanke.

Dieses Ergebnis unterstützt die Vermutung, daß im Korninnern bei höheren Geschwindigkeiten immer mehr bzw. größere Anrisse und Risse entstehen. Aus der Tatsache, daß es keinerlei Anzeichen für eine Unstetigkeit im Kurvenverlauf gibt, wird erneut deutlich, daß keine kritische Geschwindigkeit existiert, bei deren Überschreiten Veränderungen in der Struktur des Korninnern auftreten. Für die Größe des ausgetauschten Impulses spielt es offensichtlich keine Rolle, in welcher Orientierung des Kornes der Schlag erfolgt. In [16] wird ausgeführt, daß dies auf einen unterschiedlichen Beschädigungsmechanismus zurückzuführen ist.

Aus Bild 16 und 17 geht weiter hervor, daß der Feuchtegehalt nur einen sehr geringen Einfluß auf den Impulsaustausch hat. Die geringfügige Zunahme des Impulses mit dem Feuchtegehalt wird auf die größere Kornmasse bei höheren Feuchten zurückgeführt. Während die Werte für 5 und 10 m/s geringfügig schwanken und sehr gut durch Geraden angenähert werden können, tritt bei den Werten für 15 und 20 m/s eine größere Schwankungsbreite auf. Relativiert man jedoch die Schwankungen, indem man sie auf den mittleren Impuls bezieht, so zeigt sich, daß für alle Lagen und Geschwindigkeiten fast dieselben relativen Schwankungen auftreten.

6.4 Beschädigungsanalyse

Für die Bestimmung des Beschädigungsgrades der Körner nach dem Stoß werden mehrere Methoden in Betracht gezogen. Im einzelnen waren dies die Methode von *Chowdhury* [28, 29], Keimfähigkeitsuntersuchungen, elektrische Leitfähigkeit und visuelle Bonitierung. Als am besten geeignet [16] erwiesen sich die Leitfähigkeitsmethode und die visuelle Bonitierung. An dieser Stelle werden die Ergebnisse der letztgenannten Methode vorgestellt, da sie sehr anschaulich und leicht nachprüfbar sind.

Die Körner werden grob in drei Klassen eingeteilt: unbeschädigt, beschädigt und gebrochen. Unbeschädigt bedeutet in diesem Zusammenhang lediglich, daß an den Körnern mit bloßem Auge keine sichtbare Veränderung gegenüber dem Ausgangszustand festgestellt werden konnte. Damit ist jedoch keine Aussage darüber getroffen, und es ist auch keine Schlußfolgerung dahingehend zulässig, daß die Körner im Inneren ebenfalls unbeschädigt sind und die Zellen der äußeren Schichten ganz intakt sind.

Beschädigt heißt, daß das Korn mit bloßem Auge erkennbare Risse aufweist, die entweder bis an die Oberfläche durchtreten oder doch bis nahe an die Oberfläche reichen. Bei sehr feuchten Körnern treten häufig deutlich erkennbare plastische Verformungen auf. In diesem Fall kann meist nicht festgestellt werden, ob zusätzlich auch noch Risse entstanden sind. Da die plastischen Verformungen jedoch immer mit einer Änderung des Aussehens der Körner verbunden sind, werden diese Körner ebenfalls zu den beschädigten gezählt. Ihr Aussehen ändert sich dahingehend, daß sie in geringer Tiefe milchig erscheinen. Dieses Verhalten wird vor allem bei den Körnern beobachtet, die einen Schlag auf die Krone erfahren haben.

Als gebrochen werden alle jene Körner bezeichnet, bei denen zumindest ein kleines Stück abgebrochen ist.

In Bild 18 und 19 sind die Ergebnisse der visuellen Beschädigungsbestimmung für die Gesamtheit der erkannten Beschädigungen (Riß und Bruch) dargestellt. Auffällig sind die unterschiedlichen Ergebnisse für den Schlag auf die Krone einerseits und den Schlag auf die Flanke andererseits. Bei den Körnern, die an der Krone belastet werden, ist ganz eindeutig eine Tendenz zu einem Minimum der Beschädigungen bei Feuchtegehalten von 22–26% erkennbar. Gänzlich anders sieht es dagegen bei den Körnern aus, die an der Flanke belastet wurden. In diesem Fall konnte bei höheren als den genannten Feuchtegehalten praktisch kein Ansteigen der Beschädigungen beobachtet werden. Bei der Diskussion des Impulsaustausches wurde bereits darauf hingewiesen, daß trotz des gleichen Betrages des ausgetauschten Impulses für die beiden untersuchten Fälle bei höheren Feuchtegehalten Unterschiede in der Häufigkeit der Beschädigungen festgestellt wurden.

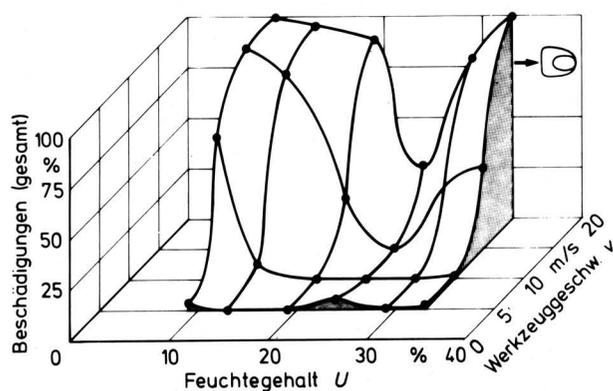


Bild 18. Sichtbare Beschädigungen in Abhängigkeit vom Feuchtegehalt und der Schlaggeschwindigkeit beim Schlag auf die Krone.

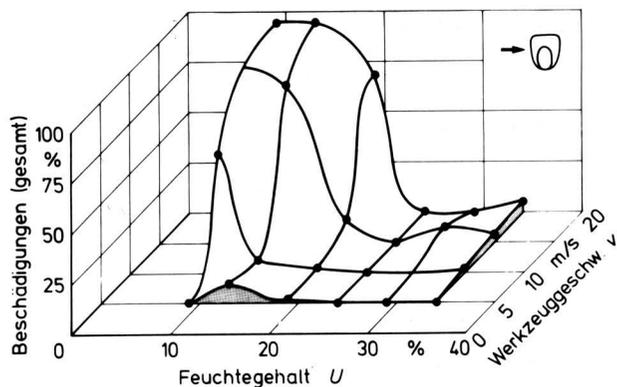


Bild 19. Sichtbare Beschädigungen in Abhängigkeit vom Feuchtegehalt und der Schlaggeschwindigkeit beim Schlag auf die Flanke.

Aus der Tatsache, daß bei den übrigen Meßwerten ebenfalls keine größeren Differenzen für die beiden Orientierungen festgestellt wurden, wird geschlossen, daß beim Schlag auf die Flanke feuchter Körner innere Beschädigungen entstehen, die mit bloßem Auge nicht erkennbar sind. Erklärt werden kann dies dadurch, daß an der Krone nur eine sehr dünne Schicht horniges Endosperm (Bild 8) existiert. Diese ist deshalb auch nicht besonders widerstandsfähig und neigt selbst zu Rissen. Zudem ermöglicht sie wegen ihrer geringen Dicke den Blick auf tieferliegende Schichten. An der Flanke ist das hornige Endosperm wesentlich stärker ausgebildet, wodurch es selbst widerstandsfähiger wird und zusätzlich den Blick in tiefere Schichten verhindert. Dazu kommt, daß der Ort größter Druckspannung — legt man die Theorie von *Hertz* [30] zugrunde — nicht an der Oberfläche, sondern in geringer Tiefe ist.

Wurde in Bild 18 und 19 der Anteil aller beschädigten Körner am gesamten untersuchten Versuchsmaterial ohne Differenzierung in die beiden Kategorien beschädigt bzw. gebrochen dargestellt, so zeigen Bild 20 und 21 nur den Anteil der gebrochenen Körner. Bezugsgröße ist wieder das gesamte Versuchsmaterial. Die beiden Belastungsfälle unterscheiden sich in diesem Punkt nicht sehr voneinander. In beiden Fällen ist die sehr starke Zunahme des Anteils gebrochener Körner bei trockenem Gut und Geschwindigkeiten über 10 m/s zu beobachten. Beim Schlag auf die Krone war auch noch bei höheren Feuchtegehalten ein kleiner Anteil gebrochener Körner bei 20 m/s zu registrieren, wogegen beim Schlag auf die Flanke über ca. 20% Feuchtegehalt keine gebrochenen Körner mehr beobachtet wurden.

Betrachtet man die Darstellung der Beschädigungen insgesamt (Bild 18) einerseits und die der gebrochenen Körner (Bild 20) andererseits, so wird offenkundig, daß die Beschädigungen bei den an der Krone belasteten feuchten Körnern praktisch ausschließlich in Form von Rissen auftreten.

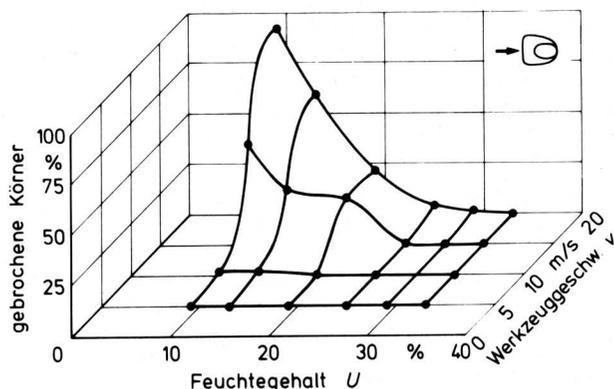


Bild 20. Anteil gebrochener Körner in Abhängigkeit vom Feuchtegehalt und der Schlaggeschwindigkeit beim Schlag auf die Krone.

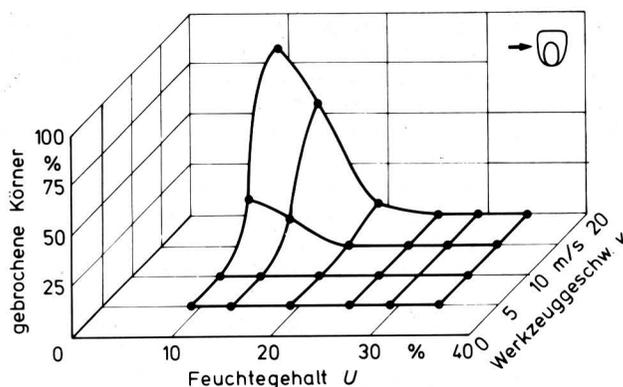


Bild 21. Anteil gebrochener Körner in Abhängigkeit vom Feuchtegehalt und der Schlaggeschwindigkeit beim Schlag auf die Flanke.

7. Zusammenfassung

Beginnend mit dem Pflücken der Kolben von der Pflanze bis hin zum bestimmungsgemäßen Verbrauch sind Maiskörner häufig hohen dynamischen Belastungen ausgesetzt. Diese führen zu Beschädigungen und damit sowohl zu quantitativen als auch zu qualitativen Verlusten. Es ist deshalb von großem Interesse, die Beschädigungen soweit wie möglich zu reduzieren. Dieses Ziel ist umso eher zu verwirklichen, je besser die Vorgänge, die zur Beschädigung führen, beschreibbar sind und die Grenzbelastung bekannt ist, bis zu der keine oder nur erträglich geringe Beschädigungen auftreten.

Zur Beschreibung der Vorgänge bei der untersuchten dynamischen Belastung durch Schlag wird auf die Stoßtheorie zurückgegriffen. Ausgehend von zwei Ansätzen zur Beschreibung des elastischen bzw. plastischen Stoßvorganges, wird ein einfaches Modell zur Beschreibung des realen, teilelastischen Stoßvorganges vorgeschlagen. Damit wurde der Kraft-Zeit-Verlauf beim Stoß zwischen Maiskörnern und einem starren Maschinenelement simuliert. In Anbetracht der noch immer existierenden Wissenslücken bezüglich der Stoffkennwerte bei dynamischer Beanspruchung ergab sich eine gute Übereinstimmung zwischen Theorie und Experiment.

Die experimentellen Untersuchungen zum Verhalten von Maiskörnern unter dynamischer Belastung wurden mit einer Versuchsanlage durchgeführt, bei der ein ruhendes Korn durch einen Schlag belastet wird. Es war möglich, das Verhalten der Körner bei Beanspruchung an einer vorbestimmten Stelle der Oberfläche zu untersuchen. Es konnte gezeigt werden, daß die Kontaktkraft zwischen Korn und Maschinenelement mit größer werdendem Feuchtegehalt linear abnimmt. Mit höheren Relativgeschwindigkeiten zwischen Korn und Maschinenelement steigt sie leicht überproportional an. Die Relativgeschwindigkeit hat aber keinen Einfluß auf die Kontaktdauer. Diese wird jedoch sehr stark vom Feuchtegehalt beeinflusst und nimmt überproportional mit dem Feuchtegehalt zu. Während die Größe der Kontaktkraft bei Belastung an der Krone und bei Belastung an der Flanke nahezu gleich war, wurden — vor allem bei höheren Feuchtegehalten — bei Belastung an der Flanke signifikant größere Werte der Kontaktdauer registriert.

Wie erwartet, steigt der Umfang der Beschädigung mit zunehmender Relativgeschwindigkeit an. Für den Einfluß der Gutfeuchte läßt sich keine gleich eindeutige Aussage treffen. Die an der Krone belasteten Körner sind bei niederen und hohen Feuchtegehalten deutlich empfindlicher gegenüber mechanischer Belastung als bei einem Feuchtegehalt von ca. 25 %. Auch die an der Flanke belasteten Körner zeigen für niedere Feuchtegehalte eine starke Empfindlichkeit gegenüber mechanischen Belastungen. Bei dieser Orientierung der Körner wurde aber nicht ein starkes Ansteigen des Beschädigungsumfanges für hohe Feuchtegehalte beobachtet. Aus diesen Ergebnissen folgt, daß unvermeidbare dynamische Belastungen von Maiskörnern (z.B. beim Drusch) bei Gutfeuchten von ca. 25 % erfolgen sollten, um Beschädigungen möglichst zu vermeiden.

Schrifttum

Bücher sind durch ● gekennzeichnet

- [1] Schmidt, B.: Über Ursache und Wirkung mechanischer Kornbeschädigungen bei der Aufbereitung von Hybridsaatmais aufgrund von Ergebnissen der Saatgutuntersuchungen. *Landwirtschaftl. Forschung* Bd. 31 (1978) Nr. 1, S. 98/107.
- [2] Spittel, Aartje: Untersuchungen über die Auswirkung dynamischer Beanspruchungen auf die Keimfähigkeit von Maissaatgut. Diss. Univ. Bonn 1984.
- [3] Byg, D.M. u. G.E. Hall: Corn losses and kernel damage in field shelling of corn. *Trans. ASAE* Bd. 11 (1968) Nr. 2, S. 164/66.
- [4] Waelti, H. u. W.F. Buchele: Factors affecting corn kernel damage in combine cylinders. *Trans. ASAE* Bd. 12 (1969) Nr. 1, S. 55/59.
- [5] Foster, G.H. u. L.E. Holman: Grain breakage caused by commercial handling method. *Marketing Res. Rep. Nr. 968*, Washington: US Government Printing Office 1973.
- [6] Hill, L.D., M.R. Paulsen, T.L. Mounts, A.R. Heakin u. G.R. List: Changes in quality of corn and soybeans between United States and England. *Special Publication Nr. 63*, Agric. Exp. Station, Univ. of Illinois 1981.
- [7] Paulsen, M.R. u. L.D. Hill: Corn breakage in overseas shipments — two case studies. *Trans. ASAE* Bd. 20 (1977) Nr. 3, S. 550/57.
- [8] Hill, L.D., M.R. Paulsen u. D. Hiller: Corn breakage as affected by handling during shipment. A.E. 4403 Agric. Exp. Station, Univ. of Illinois 1979.
- [9] Herum, F.L. u. M.Y. Hamdy: Actual grain handling breakage compared to predictions by breakage susceptibility testers. *ASAE-Paper Nr. 81-3031*, St. Joseph, Michigan, 1981.
- [10] McGinty, R.J.: Development of a standard grain breakage test. A progress report. *USDA Agric. Res. Service Nr. 51-34*, Hyattsville, Maryland, 1970.
- [11] Sharda, R. u. F.L. Herum: A mechanical damage susceptibility tester for shelled corn. *ASAE-Paper Nr. 77-3504*, St. Joseph, Michigan, 1977.
- [12] Graeber, E.: Der Schlagdrusch von Maiskolben. Diss. Univ. Hohenheim 1973.
- [13] Srivastava, A.K., F.L. Herum u. K.K. Stevens: Impact parameters related to physical damage to corn kernel. *Trans. ASAE* Bd. 19 (1976) Nr. 6, S. 1147/51.
- [14] Mensah, J.K., F.L. Herum, J.L. Blaisdell u. K.K. Stevens: Effect of drying conditions on impact shear resistance of selected corn varieties. *Trans. ASAE* Bd. 24 (1981) Nr. 6, S. 1568/72.
- [15] Casandroi, T. u. M. Segarceanu: Studiul comportarii la ciocuire a semintelor de porump (Study of impact of maize seeds; orig. rum.). *Studii si cercetari de mecanica agricola* Bd. 5 (1971) Nr. 3, S. 235/55.
- [16] Kustermann, M.: Beanspruchung realer Körper durch Stoß — dargestellt am Beispiel des Schlages gegen ein Maiskorn. Diss. Univ. Stuttgart 1986.
- [17] Crook, A.W.: A study of some impacts between metal bodies by a piezoelectric method. *Proc. Royal Society of London*, 1952, Nr. 212, S. 377/90.
- [18] ● Hertz, H.: Über die Berührung fester elastischer Körper und über die Härte. *Gesammelte Werke* Bd. 1, S. 174/96, Leipzig: Johann Ambrosius Barth 1895.
- [19] Meyer, E.: Untersuchungen über Härteprüfungen und Härte. *VDI-Z.* Bd. 52 (1908) Nr. 17, S. 645/54; Nr. 19, S. 740/48 und Nr. 21, S. 835/44.

- [20] *Kustermann, M. u. H.D. Kutzbach*: Young's modulus dependent on deformation velocity. ASAE-Paper Nr. 82-3055, St. Joseph, Michigan, 1982.
- [21] *Rinehart, J.S. u. J. Pearson*: Behaviour of metals under impulsive loads. The American Soc. for Metals, Cleveland, Ohio, 1954.
- [22] *Arnold, P.C. u. N.N. Mohsenin*: Proposed techniques for axial compression tests on intact agricultural products of convex shape. Trans. ASAE Bd. 14 (1971) Nr. 1, S. 78/84.
- [23] *Moreira, S.M.C., G.W. Krutz u. C.T. Sun*: Simulation of stresses inside the corn kernel. ASAE-Paper Nr. 81-3043, St. Joseph, Michigan, 1981.
- [24] *Zscheischler, J., M. Estler, F. Groß, G. Burgstaller, H. Neumann u. B. Geißler*: Handbuch Mais; Anbau-Verwertung-Fütterung. 3. Aufl. Frankfurt/M.: DLG-Verlag 1984.
- [25] *Wolf, M.J., C.L. Buzan, M.M. McMasters u. C.E. Rist*: Structure of the mature corn kernel. I. Gross anatomy and structural relationships. Cereal Chemistry Bd. 29 (1952) Nr. 5, S. 321/33.
- [26] *Stiefel, E.*: Einführung in die numerische Mathematik. 4. Aufl. Stuttgart: B.G. Teubner 1970.
- [27] *Kustermann, M. u. H.D. Kutzbach*: Der Einfluß thermischer Vorbehandlung auf die statische Festigkeit von Maiskörnern. Teil 2: Versuchsergebnisse und Diskussion. Grndl. Landtechnik Bd. 32 (1982) Nr. 1, S. 8/12.
- [28] *Chowdhury, M.H. u. W.F. Buchele*: Colorimetric determination of grain damage. Trans. ASAE Bd. 19 (1976) Nr. 5, S. 807/808.
- [29] *Chowdhury, M.H.*: Operators manual digital grain quality tester; Model D-810. Fa. MC Instruments, 6205 NW Karen, Kansas City, MO 64 151.
- [30] *Hertz, H.*: Prinzipien der Mechanik. Gesammelte Werke Bd. III. Leipzig: Johann Ambrosius Barth (Arthur Meiner) 1894.
- [31] *Sass, F., Ch. Bouche u. A. Leitner*: Dubbel; Taschenbuch für den Maschinenbau. Bd. 1, 13. Aufl. Heidelberg, New York: Springer 1974.
- [32] *Segler, G. u. R. Scherer*: Systematische Untersuchungen über einige physikalische Kenngrößen des Getreidekorns in Abhängigkeit vom Feuchtegrad am Beispiel der Maissorte Inra 258. Grndl. Landtechnik Bd. 26 (1976) Nr. 4, S. 121/27.
- [33] *Kustermann, M. u. H.D. Kutzbach*: Bulk compressibility and Poisson's constant of grains. ASAE-Paper Nr. 84-3045, St. Joseph, Michigan, 1984.

Anlagerung elektrostatisch geladener Flüssigkeitsteilchen beim chemischen Pflanzenschutz im Obstbau

Von Norbert Metz, Biberach, und Eberhard Moser, Stuttgart-Hohenheim*)

DK 631.348:632.982.1:621.319

Trotz Neuerungen und Verbesserungen auf dem Gebiet der Pflanzenschutztechnik, die in den letzten Jahren erreicht wurden, sind weitere Bemühungen in der Applikationstechnik insbesondere bei Raumkulturen dringend notwendig. Gerade im Obstbau geht immer noch über die Hälfte der ausgebrachten Wirkstoffe durch Abdrift verloren [1]. Durch die elektrostatische Aufladung der Spritzflüssigkeit wird versucht, eine Erhöhung der Wirkstoffanlagerung zu erreichen, die Abdrift einzuschränken, Kosten zu sparen und die Umweltbelastung zu verringern.

1. Einleitung

Der Abscheidvorgang in Luft dispergierter Flüssigkeitsteilchen an Objekten ist von zahlreichen Faktoren abhängig und physikalisch nur schwer zu erfassen. Neben Flüssigkeits- und Gaseigenschaften wie Tropfengröße, -verteilung, -konzentration, Koagulationsverhalten, Tropfengeschwindigkeit, Lufttemperatur und -feuchte bestimmen im wesentlichen Form, Abmessungen, Aufbau und Struktur des Objekts die Abscheidung.

*) Prof. Dr.-Ing. E. Moser ist Leiter des Fachgebietes "Verfahrenstechnik für Intensivkulturen" am Institut für Agrartechnik der Universität Hohenheim, Dr. sc. agr. N. Metz war wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut und ist nun als Fachberater für Pflanzenschutz tätig.

Zur Beschreibung des Anlagerungsverhaltens müssen vereinfachende Annahmen getroffen werden. So wird im allgemeinen von der Teilchenabscheidung am Einzelobjekt ausgegangen. Diese wird durch das Modell eines Zylinders im Strömungsfeld dargestellt, an dem folgende Abscheideeffekte wirken: Massenkräfte, Diffusion, elektrostatische Kräfte.

2. Massenkräfte und Diffusion

Als Massenkräfte wirken an den Teilchen Trägheitskraft und Schwerkraft. Die Trägheitskraft bedingt, daß im Luftstrom eingebettete Teilchen beim Umströmen eines Objektes nicht den Stromlinien des Trägerluftstromes folgen. Die Größe der Trägheitskraft nimmt somit Einfluß auf den Abscheidegrad η_T ; es gilt:

$$\eta_T = f(\text{Stk}, \text{Re}, \rho_T/\rho_L).$$

Hierin ist

$$\text{Stk} = \frac{C_u v_T d_T^2 \rho_T}{18 \eta_L d_0} \quad (1)$$

die Stokeszahl oder der Trägheitsparameter mit

$$C_u = 1 + \frac{0,16 \cdot 10^{-6} \text{ m}}{d_T}$$

als Cunningham-Korrekturfaktor bei Normalbedingungen und

$$\text{Re} = \frac{v_L d_0 \rho_L}{\eta_L} \quad (2)$$

die Reynoldszahl.