

DK 681.4.021.1:621.93.023:621.9.025.7:671.152

## Untersuchungen beim Sägen von optischem Glas mit diamantbesetzten Kreissägeblättern

### Teil I. Einfluß der Exzentrizität sowie der Makrogestalt des Sägeblattes auf die Kinematik des Sägevorganges und das Zeitspanvolumen

VON GOTTHOLD PAHLITZSCH UND WINFRIED KARSTEN, Braunschweig

(Mitteilung aus dem Institut für Werkzeugmaschinen und Fertigungstechnik der Technischen Universität Braunschweig)

(Eingegangen am 18. Dezember 1968)

Nach einer kurzen Beschreibung des Versuches wird über den Einfluß des durch eine exzentrische Aufspannung erzeugten Radialschlages eines diamantbesetzten Sägeblattes auf die Kinematik des Kreissägens von optischem Glas mit gewichtsbetätigtem Vorschub berichtet. Es werden Eigenfrequenzen und kritische Drehzahlen theoretisch ermittelt und experimentell nachgewiesen. Die auf den Sägeblattumfang bezogenen Eingriffszeiten werden für verschiedene Exzentrizitäten bestimmt. Es wird gezeigt, daß das Zeitspanvolumen im wesentlichen von der Größe der durch die Exzentrizität hervorgerufenen Vorschubkraftspitzen und nicht so sehr von der Zeitdauer des Eingriffs abhängt. Dies trifft besonders für harte Glasarten zu, deren Splitterneigung größer als die der weichen Gläser ist.

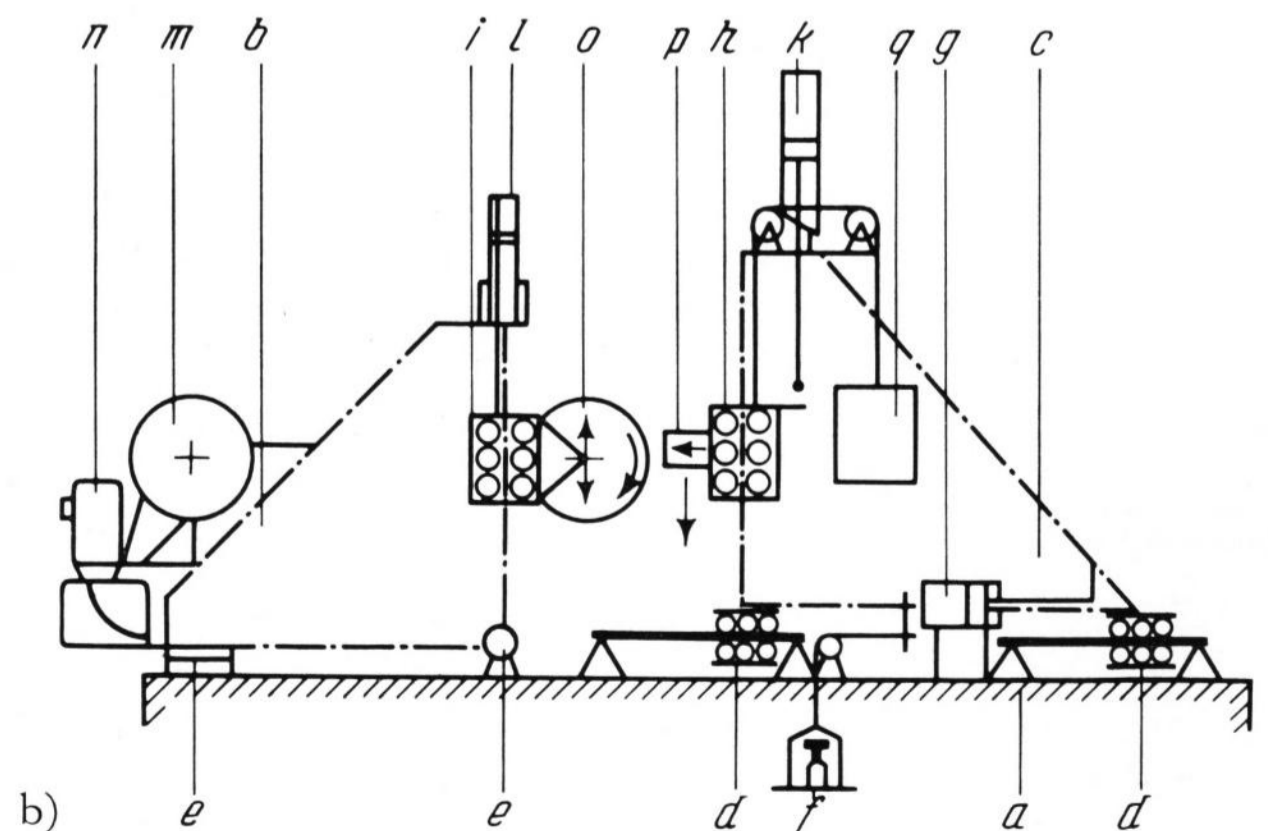
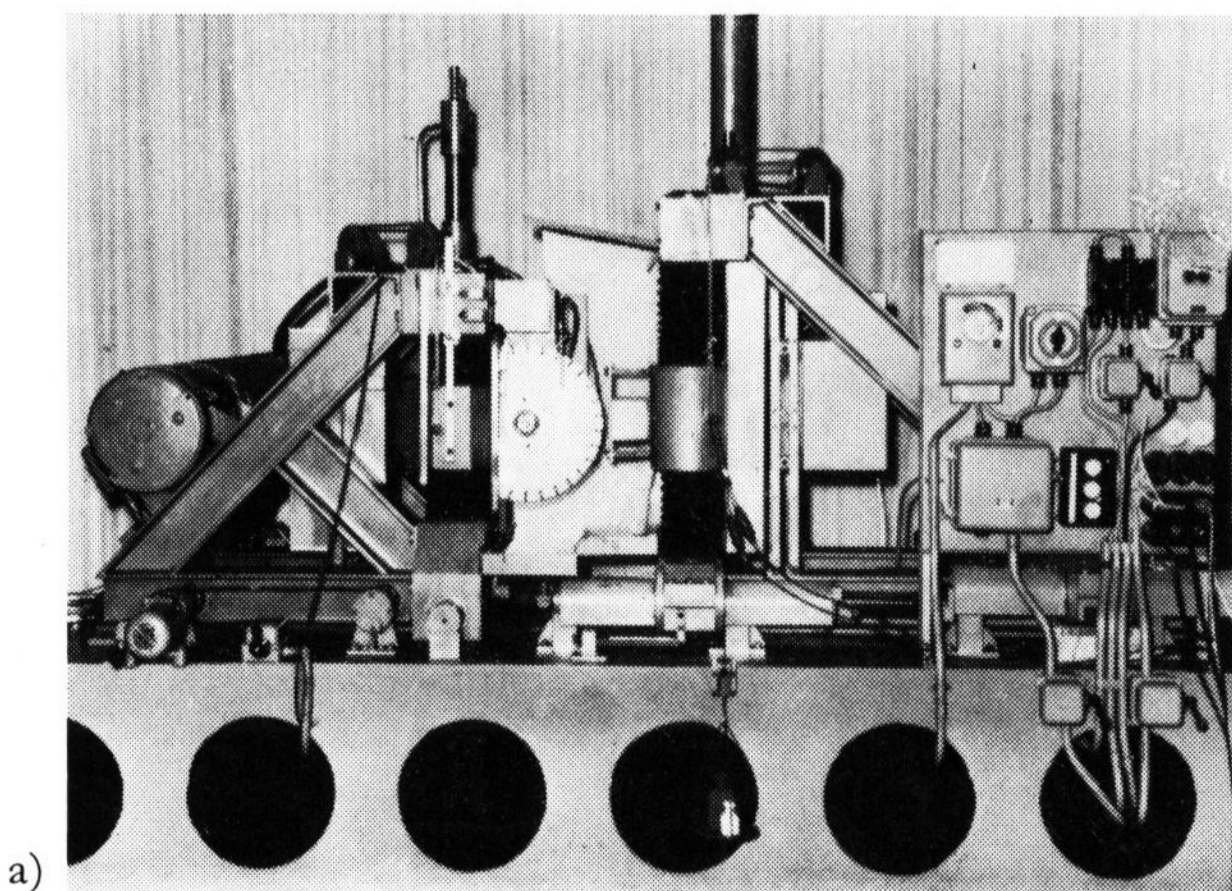
Der Werkstoffabtrag beim Sägen<sup>1)</sup> von optischem Glas mit diamantbesetzten, kreisförmigen Sägeblättern erfolgt nach MEYER [1] durch Ritzen und Zersplittern. Auch SCHULZ [2] kam beim Schleifen von Glas mit losem Korn zu demselben Ergebnis; er stellte darüber hinaus fest, daß die Größe des Werkstoffabtrages beim Zerspanen durch Ritzen der Vorschubkraft linear, beim Zerspanen durch Splitteln und Zertrümmern der Vorschubkraft progressiv folgt. Das Zeitspanvolumen hängt demnach werkstoffseitig im wesentlichen von der Splitterneigung des Glases und werkzeugseitig vom Impuls ab, der vom Sägeblatt auf das Werkstück ausgeübt und in starkem Maße von der Form des Sägeblattes beeinflußt wird. Damit ist aber die Kenntnis des Einflusses der Exzentrizität und Makrogestalt des Werkzeuges auf das Arbeitsergebnis von wesentlicher Bedeutung.

<sup>1)</sup> Im Einklang mit der Praxis wird hier der Begriff „Sägen“ beibehalten, obwohl es sich dabei technologisch um ein „Trennschleifen“ und zwar mit gebundenem Korn handelt.

### 1. Versuchsstand

#### 1.1. Versuchsmaschine

Für die Untersuchungen stand eine Versuchsmaschine (Bild 1) zur Verfügung, die im eingangs genannten Institut entwickelt und hergestellt wurde. Auf dem verrippten Gußeisenbett (a) sind der Werkzeugsupport (b) und der Werkstücksupport (c) so angeordnet, daß der die Vorschubbewegung ausführende Werkstücksupport (c) auf Wälzführungen (d) stick-slip-frei in radialer Vorschubrichtung und der Werkzeugsupport (b) auf Gleitführungen (e) senkrecht dazu horizontal verschoben werden können. Der Werkstücksupport kann dabei wahlweise durch ein Gewicht (f) oder hydraulisch (g) vorgeschoben werden. In vertikaler Richtung sind der Werkstückschlitten (h) und der Werkzeugschlitten (i) auf Wälzführungen hydraulisch (k, l) verschiebbar. So lassen sich mit der Maschine folgende vier Sägeverfahren ausführen: 1. Radialsägen, Vorschub gewichtsbetätigt,



Bilder 1a und b. Versuchsmaschine, a) Ansicht, b) Schematische Darstellung.

a = Maschinenbett, b = Werkzeugsupport, c = Werkstücksupport, d = Führungen der Radialverschiebung, e = Führungen für Axialverschiebung, f = Vorschubgewicht, g = Hydraulikzylinder für Radialvorschub, h = Werkstückschlitten, i = Werkzeugschlitten, k = Hydraulikzylinder für Tangentialvorschub, l = Oszillationszylinder, m = Schnittantriebsmotor, n = Schleichgangantrieb, o = Sägeblatt, p = Werkstück, q = Gegengewicht.

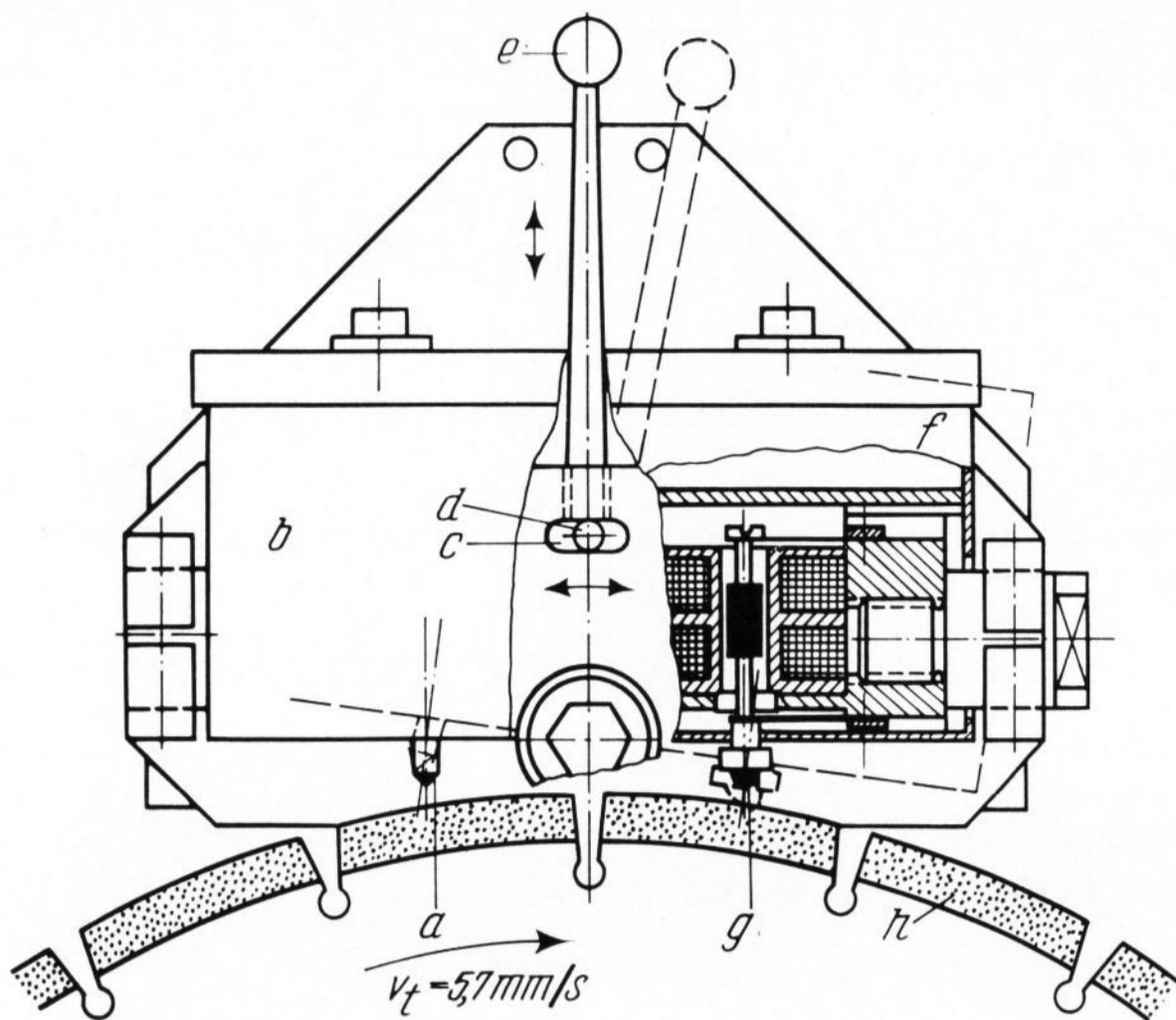


Bild 2. Anordnung der induktiven Wegaufnehmer.

a = Diamantspitze, b = Meßgerät für Kornabstände, c = Nut, d = Stift, e = Hebel, f = Meßgerät für Welligkeit und Verschleiß, g = Hartmetalltastkopf, h = Diamantbesatz.

2. Radialsägen, Vorschub hydraulisch betätigt, 3. Radialsägen mit Oszillation des Sägeblattes in vertikaler Richtung bei gewichtsbetätigtem Vorschub, 4. Tangentialsägen, Vorschub hydraulisch betätigt.

Die Schnittgeschwindigkeit kann bei einem Sägeblattdurchmesser von 400 mm von 10 bis 50 m/s durch Anker- und Feldsteuerung eines Gleichstrom-Nebenschlußmotors (m, Bild 1) stufenlos eingestellt werden. Ein am Werkzeugsupport befestigter Schleichgangantrieb (n) gestattet es, Sägeblattabtastungen bei einer Abtastgeschwindigkeit von etwa 6 mm/s vorzunehmen.

Das Drehmoment wird von der die Riemenscheiben tragenden Antriebsspindel querkraftfrei über eine mit Dehnmeßstreifen bestückte Drehmomentmeßnabe in die eigentliche Sägespindel eingeleitet, zu deren Lagerung vorgespannte und damit spielfreie UKF-Lager höchster Genauigkeitsstufe verwendet wurden.

Die das Sägeblatt aufnehmenden Spannflansche sind über eine Spieth-Druckhülse mit der Sägespindel kraftschlüssig verbunden, wodurch die Möglichkeit gegeben ist, das Sägeblatt exzentrisch zu spannen und damit den Radialschlag in den Grenzen von 0 bis 400  $\mu\text{m}$  beliebig zu verändern.

## 1.2. Meßeinrichtungen

Neben der oben erwähnten Drehmomentmeßeinrichtung ist die Versuchsmaschine mit einer werkstückseitig angeordneten Schnittkraftmeßeinrichtung ausgerüstet. Mit Hilfe von Drehmeßstreifen und Verformungskörpern werden die Vertikalkomponente (Tangentialkraft) und die Horizontalkomponente (Radial- oder Vorschubkraft) in bekannter Weise gemessen.

Induktive Wegaufnehmer gestatten es, sämtliche Bewegungen der Schlitten und Supporte zu messen.

Zur Bestimmung der Exzentrizität (Radialschlag) bzw. der Makrogestalt (Sägeblattwelligkeit) und des radialen Werkzeugverschleißes sowie der Schneidendichte dienen ebenfalls induktive Wegaufnehmer (Bild 2). Bei im Schleichgang umlaufenden Sägeblatt wird dessen Umfläche abgetastet und so die radiale

Abstandsänderung zwischen Tastspitze und Rotationsmittelpunkt induktiv aufgenommen.

Sämtliche Meßwerte können mit einem Direktschreiber grafisch registriert werden.

## 1.3. Untersuchte Werkstoffe und Werkzeuge

Die untersuchten Werkstoffe waren die optischen Gläser BK 7 und F 2 mit einer Mikro-Vickers-Härte von 650 bzw. 430  $\text{kp/mm}^2$ . Die Glasblockhöhe (Eingriffsgröße) betrug 100 mm. Als Werkzeug wurde ein segmentiertes Kreissägeblatt mit einem Durchmesser von 400 mm und einer Dicke von 1,5 mm benutzt. Die Diamantart MBS (synthetisch) hatte die Körnung D 250 und wurde in einer Konzentration  $16 \pm 0,7 \text{ ct/cm}^3$  angewandt. Als Bindung diente Sinterbronze, die Bindungshärte HB betrug 100  $\text{kp/mm}^2$ . Gekühlt wurde mit Petroleum bei einer Durchflußmenge von 1 l/min.

## 2. Einfluß der Exzentrizität des Sägeblattes

Frühere Untersuchungen [1] haben gezeigt, daß das Radialsägen ohne Oszillation mit gewichtsbetätigtem Vorschub als das Verfahren anzusehen ist, das günstige Ergebnisse hinsichtlich Zeitspanvolumen und Rauhtiefe liefert, geringste konstruktive Ansprüche an die Maschine stellt und durch selbständiges Einstellen der Vorschubgeschwindigkeit das Anwenden optimaler Arbeitsbedingungen erleichtert. Leider neigt bei diesem auch in der Praxis oft angewendeten Sägeverfahren der die Vorschubbewegung ausführende Support insbesondere bei unrunder Sägeblättern sehr leicht zu Schwingungen. Darüber hinaus lassen sich bei den in der Praxis verwendeten einfachen Maschinen Aufspannfehler (Exzentrizitätsfehler) beim Sägeblatt nie ganz vermeiden, so daß es sinnvoll erschien, den Einfluß dieser Erregerquelle auf das Schwingungsverhalten der Maschine zu untersuchen.

Zu diesem Zweck wurde ein abgerichtetes, rundes Sägeblatt (Unrundheit<sup>2)</sup> < 20  $\mu\text{m}$ ) absichtlich exzentrisch gespannt und theoretisch und experimentell die kritischen Drehzahlen ermittelt.

### 2.1. Ermittlung der auftretenden Schwingungen

Beim Kreissägen von Glas mit exzentrisch gespanntem Sägeblatt und gewichtsbetätigtem Vorschub treten erzwungene und selbsterregte Schwingungen auf. Denn einmal versucht das abgerichtete, runde, aber exzentrisch

<sup>2)</sup> Nach DIN 7182 ist die Unrundheit die Durchmesser-differenz zweier konzentrischer Kreise, die das Istprofil einhüllen.

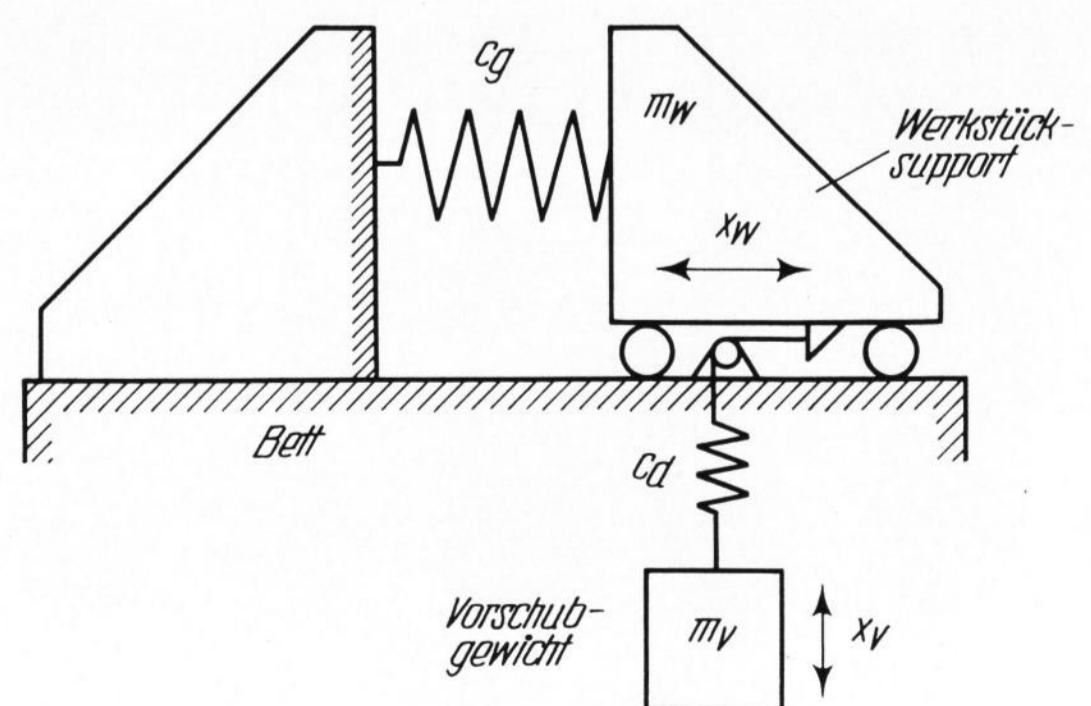
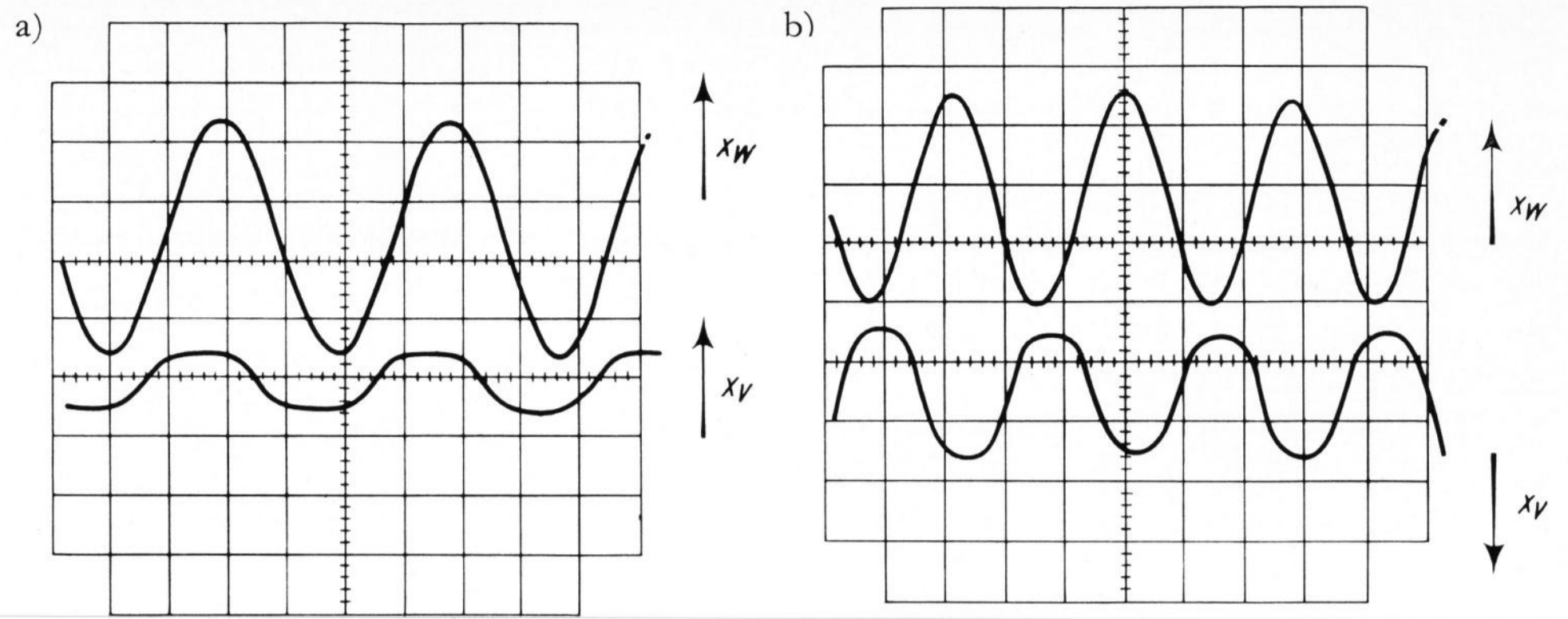
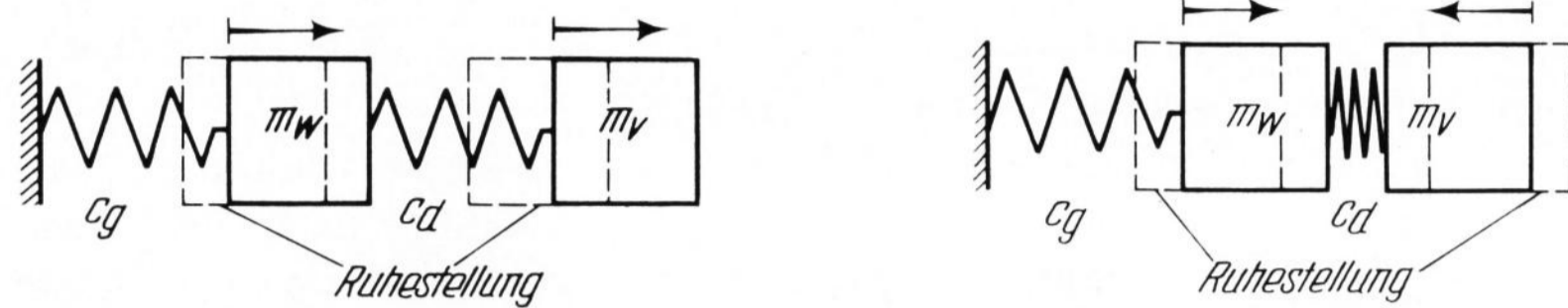


Bild 3. Ersatzsystem der Sägemaschine.

$c_g = 1,430 \text{ kp}/\mu\text{m}$ ,  $m_w = 1000 \text{ kg}$ ,  $c_d = 0,019 \text{ kp}/\mu\text{m}$ ,  $m_v = 5 \text{ bzw. } 10 \text{ kg}$ .



Bilder 4a und b. Eigenschwingungsform für die Frequenz  $f_{e1exp} = 13$  Hz (a) und  $f_{e2exp} = 19,5$  Hz (b). Vorschubgewicht  $m_v = 10$  kg.



gespannte Sägeblatt dem in Vorschubrichtung freischwingfähigen Werkstücksupport eine sinusförmige Bewegung aufzuzwingen, und zum anderen stellt der Support und das Vorschubgewicht ein schwingfähiges Zwei-Massen-System dar, bei dem die beiden Massen durch eine Feder (Drahtseil, an dem der Gewichtsteller befestigt ist) verbunden sind, und bei dem eine Masse — der Werkzeugsupport — durch eine Feder (Sägeblatt mit Spindel und Lagerung) gegen die Umgebung abgestützt ist (Bild 3).

Im folgenden wird daher zwischen „Eigenfrequenz“ und „kritischer Frequenz“ unterschieden. Die „Eigenfrequenz“ kennzeichnet den Zustand des Zwei-Massen-Schwingers, bei dem die größte Wegamplitude auftritt; die „kritische Frequenz“ kennzeichnet die Sägeblatt-drehzahl, bei welcher der Werkstücksupport im Takt des durch Exzentrizität und Drehzahl des Sägeblattes gegebenen Weg-Zeit-Gesetz in Phase schwingt, d. h. der Sägeblattkontur am besten folgt.

2.1.1. Ermittlung der Eigenfrequenzen

Jede Maschine stellt ein kompliziertes Feder-Massen-System dar, wobei jedes Maschinenteil mehr oder weniger als federnde Masse oder als massebehaftete Feder zu betrachten ist. Wird daher bei der Rechnung ein Teil als reine Masse und ein anderes als masselose Feder bezeichnet, so führt dies zu groben aber leider nicht vermeidbaren Vereinfachungen.

Setzt man das in Bild 3 dargestellte Ersatzsystem eines ungedämpften Zwei-Massen-Schwingers voraus, so lauten die beiden Bewegungsgleichungen:

$$m_w \ddot{x}_w = -c_g x_w - c_d x_w + c_d x_v, \quad (1)$$

$$m_v \ddot{x}_v = +c_d x_w - c_d x_v. \quad (2)$$

Die Lösung dieser Differentialgleichungen führen mit den in Bild 3 angegebenen Daten für die experimentell ermittelten Federsteifigkeiten und Massen zu folgenden Eigenfrequenzen:

$$m_v = 5 \text{ kg: } f_{e1} = 18,7 \text{ Hz, } f_{e2} = 30,6 \text{ Hz,}$$

$$m_v = 10 \text{ kg: } f_{e1} = 18,5 \text{ Hz, } f_{e2} = 21,9 \text{ Hz.}$$

Diese theoretisch ermittelten Eigenfrequenzen konnten experimentell größenordnungsmäßig nachgewiesen werden. Auch die oszillografische Aufzeichnung der Eigenschwingungsformen bestätigt, daß die experimentell gefundenen Eigenfrequenzen tatsächlich den errechneten qualitativ entsprechen, denn die beiden Massen schwingen — in Übereinstimmung mit der Theorie — bei der niedrigen Eigenfrequenz (Bild 4a) miteinander (in Phase) und bei der hohen (Bild 4b) gegeneinander (in Gegenphase).

2.1.2. Ermittlung der kritischen Frequenzen

Zu jeder eingestellten Exzentrizität  $e$  des Sägeblattes und jedem aufgebracht Vorschubgewicht  $P_{vg}$  gibt es

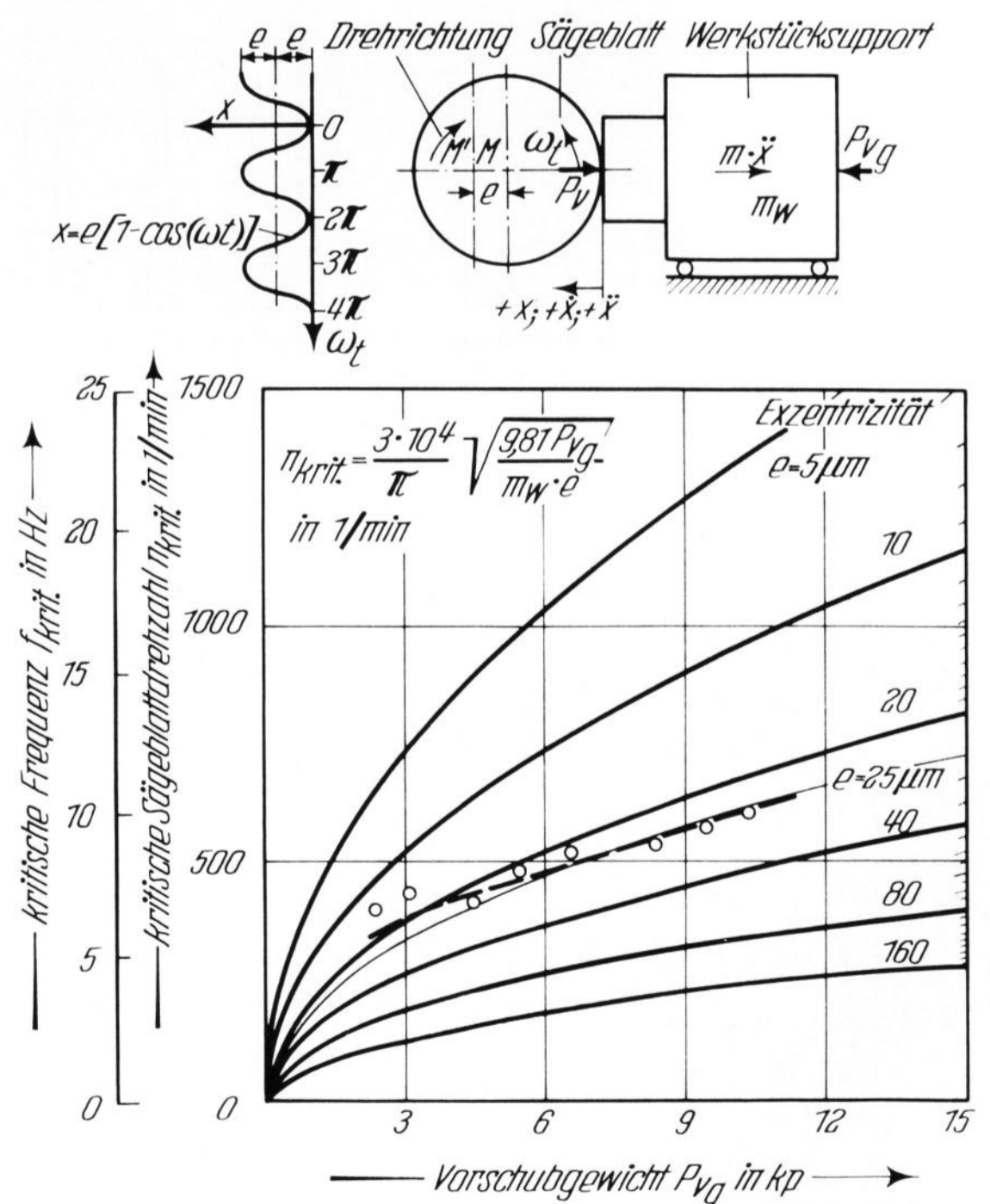


Bild 5. Theoretische Abhängigkeit der kritischen Drehzahl von Vorschubgewicht und Exzentrizität.

eine kritische Drehzahl  $n_{krit}$ , bei welcher der Werkstücksupport maximale Schwingwegamplituden  $x_w$  ausführt und bei der demzufolge maximale Vorschubkraftspitzen auftreten.

Unter der vereinfachenden Annahme, daß kein Zerspanen auftritt und daß sich das Sägeblatt gegen eine ebene Fläche am Werkstücksupport abstützt, läßt sich die maximale Vorschubkraft  $P_v$  nach der Skizze in Bild 5 wie folgt berechnen:

Die Funktion des Vorschubweges  $x_w$  von der Zeit  $t$  bzw. dem Umdrehungswinkel des Sägeblattes  $\omega t$  lautet:

$$x_w = e[(1 - \cos(\omega t))]. \quad (3)$$

Dann ist

$$\ddot{x}_w = e\omega^2 \cos(\omega t). \quad (4)$$

Das Kräftegleichgewicht ergibt sich zu:

$$P_{v(t)} = -m_w \ddot{x}_w + P_{vg} = -m_w e \omega^2 \cos(\omega t) + P_{vg}. \quad (5)$$

Die maximale Vorschubkraft tritt im ersten Umkehrpunkt und dann jeweils nach einer ganzen Umdrehung des Sägeblattes auf ( $\omega t = \pi; 3\pi; 5\pi; \dots$ ), wenn nämlich zur Massenträgheitskraft  $m\ddot{x}$  das Vorschubgewicht  $P_{vg}$  hinzukommt.

Es ist

$$P_{vmax} = m_w e \omega^2 + P_{vg}. \quad (6)$$

Im zweiten Umkehrpunkt ( $\omega t = 0; 2\pi; 4\pi; \dots$ ) wirkt das Vorschubgewicht der Massenträgheitskraft entgegen:

$$P_{v(2\pi)} = -m_w e \omega^2 + P_{vg}. \quad (7)$$

Solange  $P_{v(2\pi)}$  in Gleichung (7) noch positiv ist, tritt kein Abheben des Werkstückes vom Sägeblatt auf. Die

kritische Frequenz  $f_{krit}$  bzw. die kritische Drehzahl  $n_{krit}$  berechnet sich nun aus der Bedingung, daß

$$P_{v(2\pi)} = 0 \quad (8)$$

wird, weil für diesen Fall dann im ersten Umkehrpunkt maximale Kraftspitzen auftreten. Es gilt dann:

$$m_w e \omega_{krit}^2 = P_{vg}, \quad (9)$$

$$4\pi^2 f_{krit}^2 = \frac{P_{vg}}{m_w e}, \quad (10)$$

$$f_{krit} = \frac{1}{2\pi} \cdot \sqrt{\frac{P_{vg} \cdot 9,81 \cdot 10^6}{m_w e}} \text{ Hz}, \quad (11)$$

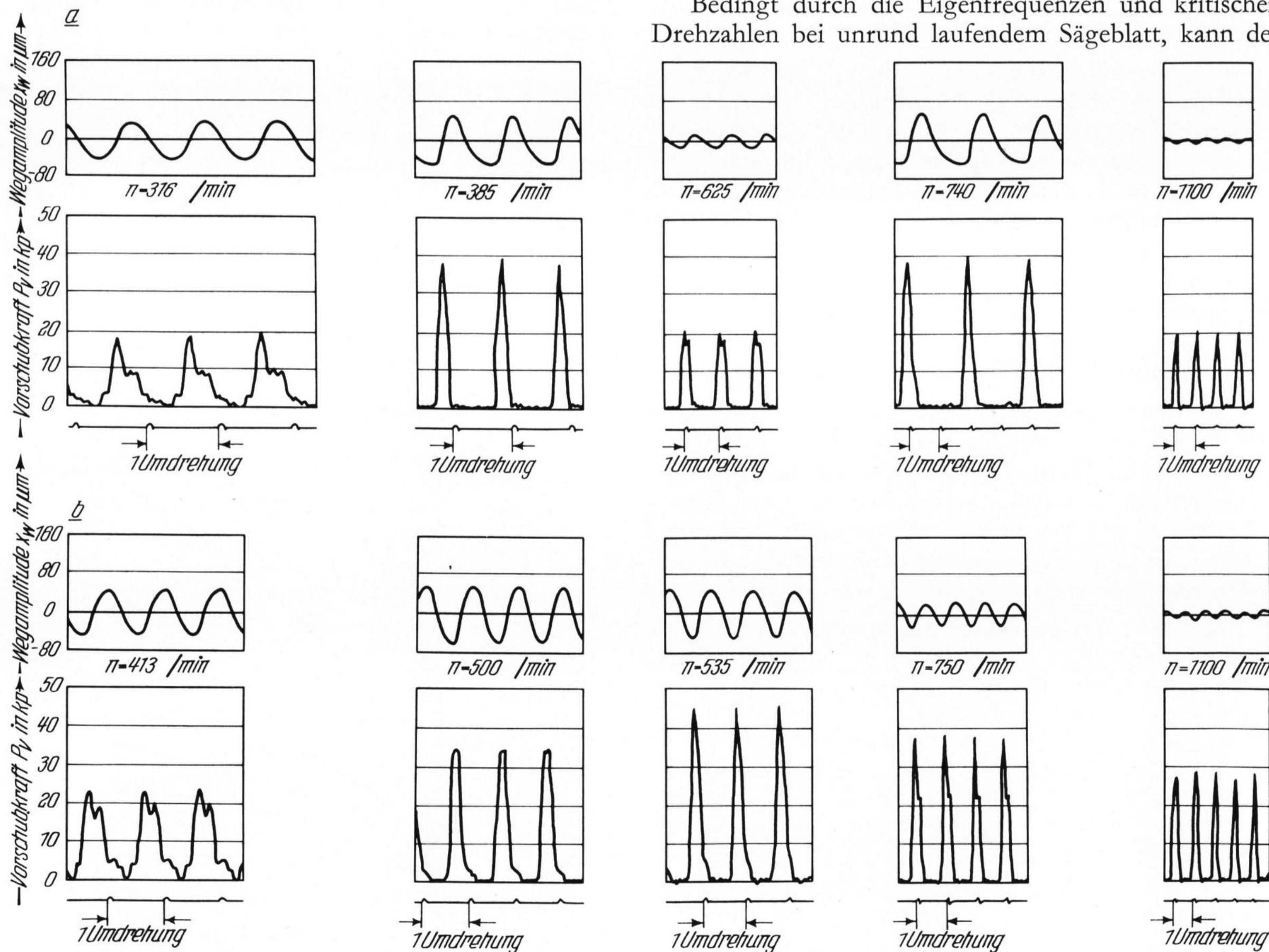
oder:

$$n_{krit} = \frac{3 \cdot 10^4}{\pi} \cdot \sqrt{\frac{9,81 P_{vg}}{m_w e}} \approx 3 \cdot 10^4 \sqrt{\frac{P_{vg}}{m_w e}} \text{ min}^{-1}. \quad (12)$$

Diese Funktionsgleichung (Parameter  $e$ ,  $m_w = 1000 \text{ kg}$ ) ist in Bild 5 grafisch dargestellt. Im gleichen Bild sind darüber hinaus für eine Exzentrizität von  $25 \mu\text{m}$  die experimentell ermittelten kritischen Drehzahlen eingetragen. Als Kriterium zur Bestimmung der kritischen Drehzahl wurde das Auftreten maximaler Vorschubkraftspitzen beim Sägen von BK 7 herangezogen. Bemerkenswert ist die gute Übereinstimmung zwischen den theoretisch ermittelten und den experimentell gefundenen kritischen Drehzahlen.

### 2.2. Einfluß der kritischen Drehzahlen auf die Kinematik

Bedingt durch die Eigenfrequenzen und kritischen Drehzahlen bei unrund laufendem Sägeblatt, kann der



Bilder 6a und b. Eingriffsverhältnisse für verschiedene Drehzahlen bei einer Exzentrizität von  $e = 50 \mu\text{m}$ ,  
 a) Vorschubgewicht  $P_{vg} = 5 \text{ kp}$ , b) Vorschubgewicht  $P_{vg} = 10 \text{ kp}$ .

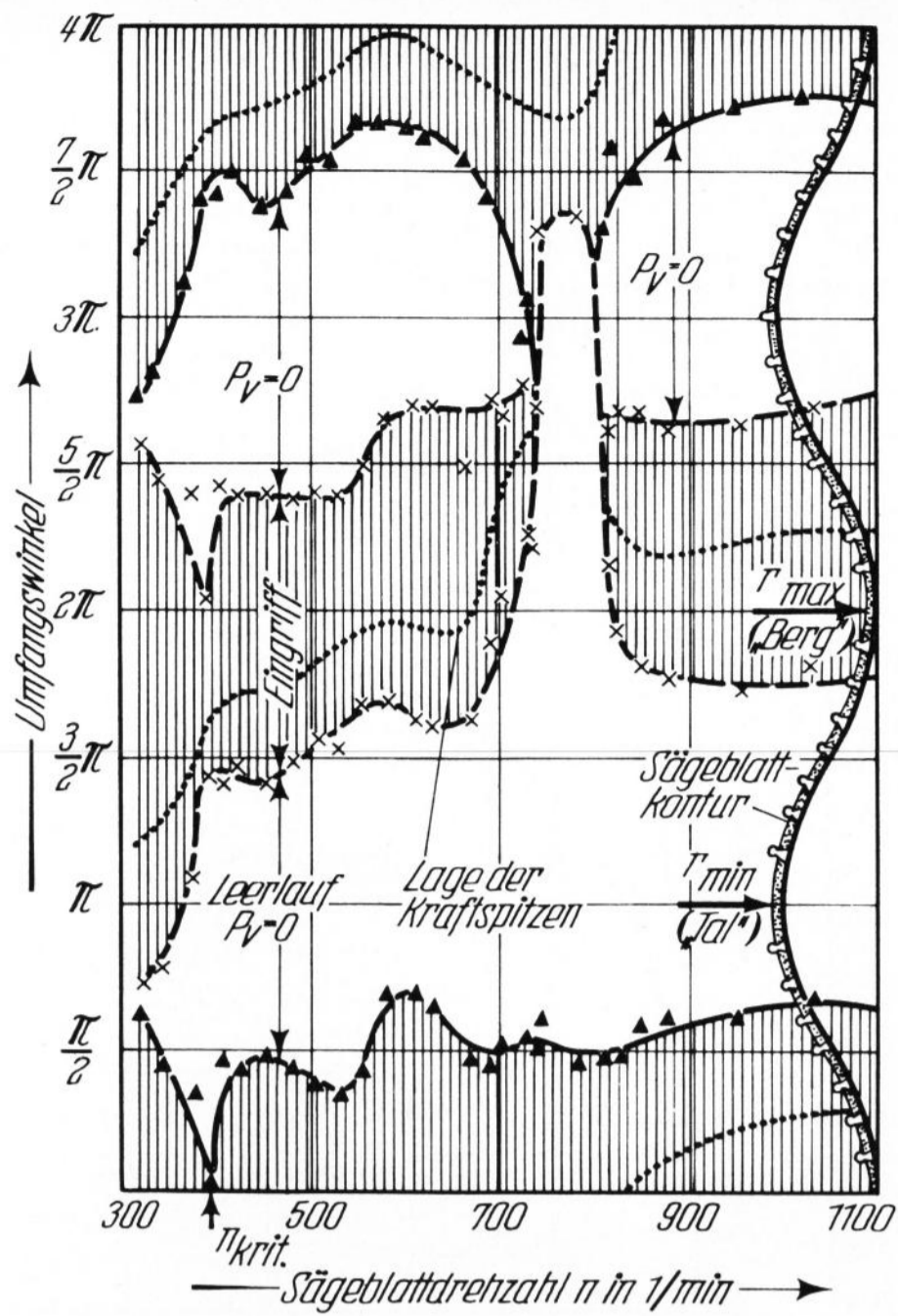


Bild 7. Drehzahlabhängigkeit der auf den Sägeblattumfang bezogenen Lage des Eingriffs.  
Exzentrizität  $e = 50 \mu\text{m}$ , Vorschubgewicht  $P_{vg} = 5 \text{ kp}$ .

Kreissägevorgang nicht als quasistatisch angesehen werden, wie es von MEYER [1] angenommen wurde. Vielmehr ist die Kinematik in starkem Maße von der Sägeblattzahl abhängig, wie die Schriebe von Vorschubkraft und Wegamplitude des Werkstücksupportes in Bild 6 deutlich veranschaulichen.

Die Bilder 7 und 8 zeigen die kinematischen Zusammenhänge beim Glassägen mit einem Vorschubgewicht von 5 kp und einer Sägeblattexzentrizität von  $e = 50 \mu\text{m}$ . Für zwei Sägeblattumdrehungen sind die auf den Sägeblattumfang bezogenen Lagen des Eingriffs und der maximalen Kraftspitzen über der Drehzahl aufgetragen.

Es zeigt sich, daß im unterkritischen Drehzahlbereich — d. h. unter  $n_{krit} = 400 \text{ min}^{-1}$  — das Sägeblatt praktisch dauernd im Eingriff ist (Bild 7). Der Betrag der Vorschubkraftspitze  $P_{vs}$  (Bild 8) hat einen 3fachen Wert des aufgebrachten Vorschubgewichtes  $P_{vg}$ . Die Kraftspitze liegt nahe dem Umfangswinkel von  $\pi, 3\pi, 5\pi, \dots$ , also fast im „Tal“ des Sägeblattes, d. h. nahe der Stelle des Umfangs mit dem kleinsten Sägeblatt-radius<sup>3)</sup>. Die Wegamplitude  $x_w$  des Werkstücksupportes (Bild 8) liegt mit  $80 \mu\text{m}$  in der Größenordnung der doppelten Exzentrizität.

Wird die kritische Drehzahl  $n_{krit}$  erreicht, so vergrößert sich die Leerlaufzeit je Umdrehung auf rund 70%, so daß das Sägeblatt nur kurzzeitig im Eingriff steht. Die maximale Vorschubkraftspitze steigt auf das 8fache des aufgebrachten Vorschubgewichtes an und verlagert sich etwas weiter zum „Berg“ hin. Die Wegamplitude beträgt ungefähr  $2e = 100 \mu\text{m}$ .

<sup>3)</sup> Der Umfangswinkel wird an der Stelle des größten Sägeblattradius mit null beginnend, entgegen der Drehrichtung gezählt (vgl. die Bilder 5 und 7). Die Nullmarkierung erfolgt durch eine ortsfeste Fotozelle und eine Lochscheibe, die mit der Sägeblattspindel synchron läuft.

Bei weiterer Steigerung der Drehzahl wird die Eingriffszeit wieder länger, und das Kraftmaximum verlagert sich immer weiter auf den Berg zu, wobei die Beträge von Vorschubkraft und Supportweg stark absinken.

Nähert sich aber die Drehzahl dem Wert von  $700 \text{ min}^{-1}$ , so ändern sich die kinematischen Verhältnisse grundlegend, und es muß bei der Betrachtung zwischen der  $2k^{\text{ten}}$  und der  $(2k-1)^{\text{ten}}$  Umdrehung unterschieden werden. Während nämlich der Betrag der Kraftspitze der  $2k^{\text{ten}}$  Umdrehung plötzlich vom 4fachen auf den 8fachen Wert des aufgebrachten Vorschubgewichtes ansteigt, sinkt der der nächsten Umdrehung ebenso schnell auf den Wert null ab. Das bedeutet aber, daß das Sägeblatt nur bei jeder zweiten Umdrehung mit dem Werkstück in Eingriff kommt, so daß die auf eine Umdrehung bezogene Leerlaufzeit wieder rund 70% beträgt. Die Wegamplituden des Werkstücksupportes verhalten sich wie die Kraftspitzen: Die der  $2k^{\text{ten}}$  Umdrehung steigen auf rund  $2e = 100 \mu\text{m}$  an, die der folgenden Umdrehung werden zu null.

Der Grund für dieses Verhalten liegt darin, daß mit einer der Eigenfrequenz  $f_{e1exp}$  entsprechenden Drehzahl von

$$n = 60 f_{e1exp} = 60 \cdot 12,5 = 750 \text{ min}^{-1}$$

gesägt wird. Durch die Überlagerung der Eigenschwingung des Zwei-Massen-Systems mit der durch die Sägeblattkontur bedingten erzwungenen Schwingung treten bei dieser Frequenz sehr große Amplituden auf, die zum „Leer-Durchdrehen“ des Sägeblattes führen.

Oberhalb dieser Resonanzstelle ist das Sägeblatt dann wieder bei jeder Umdrehung im Eingriff. Die Kraftspitzen der  $2k^{\text{ten}}$  Umdrehung fallen, die der folgenden

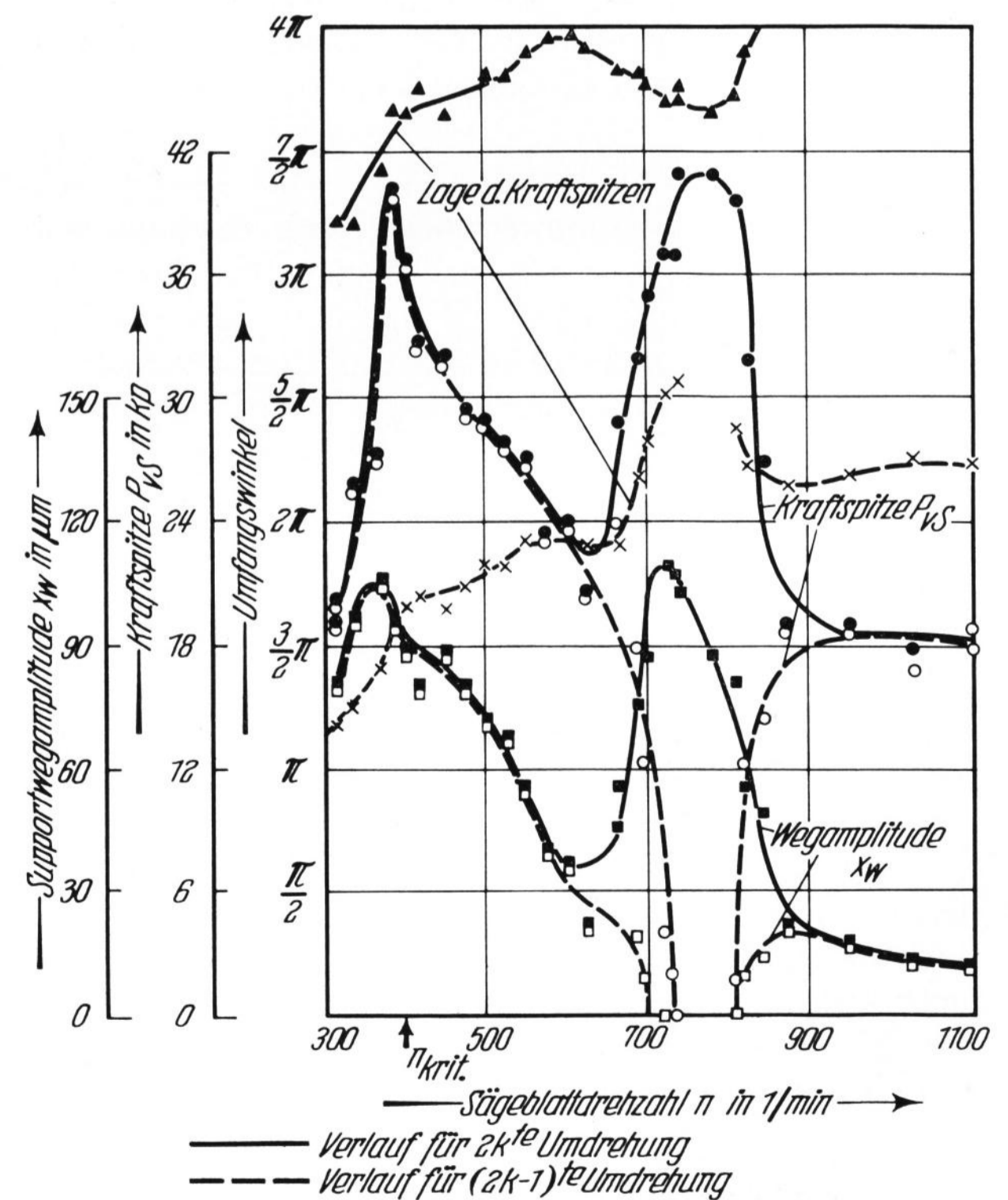


Bild 8. Drehzahlabhängigkeit der Lage und Größe der Kraftspitzen sowie der Supportwegamplituden.  
Exzentrizität  $e = 50 \mu\text{m}$ , Vorschubgeschwindigkeit  $P_{vg} = 5 \text{ kp}$ .

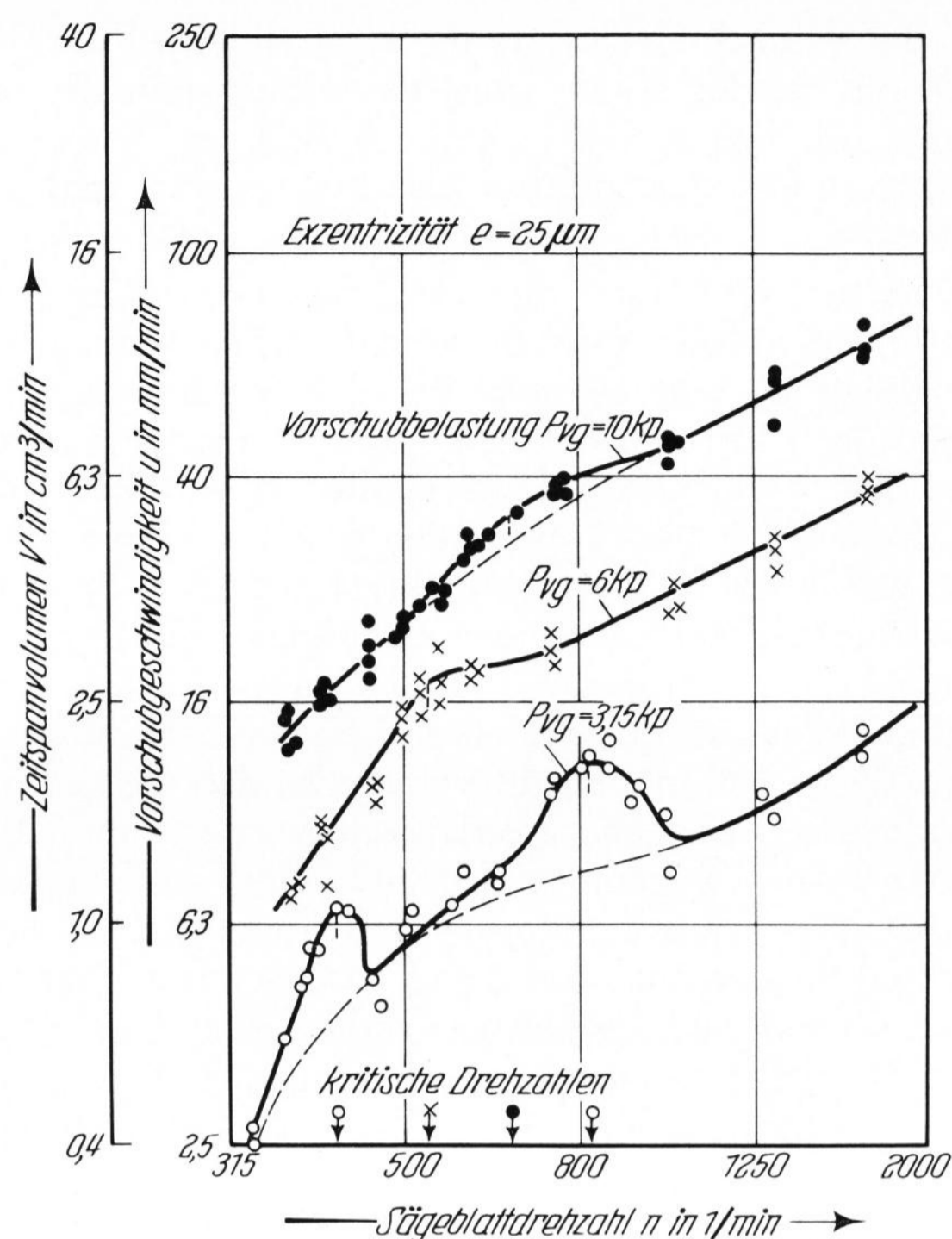


Bild 9. Zeitspanvolumen in Abhängigkeit von der Sägeblatt-drehzahl.

steigen schnell auf den 3,6fachen Wert des aufgetragenen Vorschubgewichtes und bleiben auch bei weiterer Erhöhung der Drehzahl konstant. Die Wegamplituden des Werkstücksupportes fallen auf Werte unter  $15 \mu\text{m}$ .

Für Vorschubgewichte oberhalb  $6,5 \text{ kp}$  tritt bei einer Exzentrizität von  $e = 50 \mu\text{m}$  kein „Durchdrehen“ des Sägeblattes mehr auf. Jedoch gelten für die unterkritischen, kritischen und überkritischen Drehzahlen die gleichen Gesetzmäßigkeiten wie bei den kleineren Vorschubgewichten.

Die Kinematik des Sägevorganges bei einer Exzentrizität von  $e = 25 \mu\text{m}$  unterscheidet sich nur unwesentlich von der bei  $e = 50 \mu\text{m}$ . Wieder tritt nur beim kleineren Vorschubgewicht der Fall auf, daß Sägeblatt und Werkstück nur während jeder zweiten Umdrehung in Eingriff kommen. Die Grenze hierfür wurde zu  $P_{vg} = 5,5 \text{ kp}$  ermittelt.

Versuche mit der Exzentrizität von  $e = 0 \mu\text{m}$ , genauer gesagt mit der Unrundheit von  $0 \mu\text{m}$ , konnten nicht gefahren werden, weil das Verstellen der Spieth-Druckhülse lediglich eine Beseitigung der Exzentrizität gestattet, aber keinen Einfluß auf die Unrundheit des Sägeblattes hat. Die Unrundheit konnte aber durch Abrichten nur bis auf rund  $16 \mu\text{m}$  herabgesetzt werden. Darin liegt der Grund, daß auch bei kleinstmöglicher Exzentrizität sich kritische Zustände einstellen können, bei denen allerdings die Maximal-Kraftspitzen nicht so stark ausgeprägt in Erscheinung treten. Sie überschreiten nicht den doppelten Betrag des Vorschubgewichtes. Bei allen Drehzahlen ist das Sägeblatt dauernd, wenn auch bei schwankender Vorschubkraft, in Eingriff.

### 2.3. Einfluß der kritischen Drehzahlen auf das Zeitspanvolumen

Da im kritischen Drehzahlbereich zwar die Vorschubkraftspitzen ansteigen, die Eingriffszeiten je Sägeblatt-

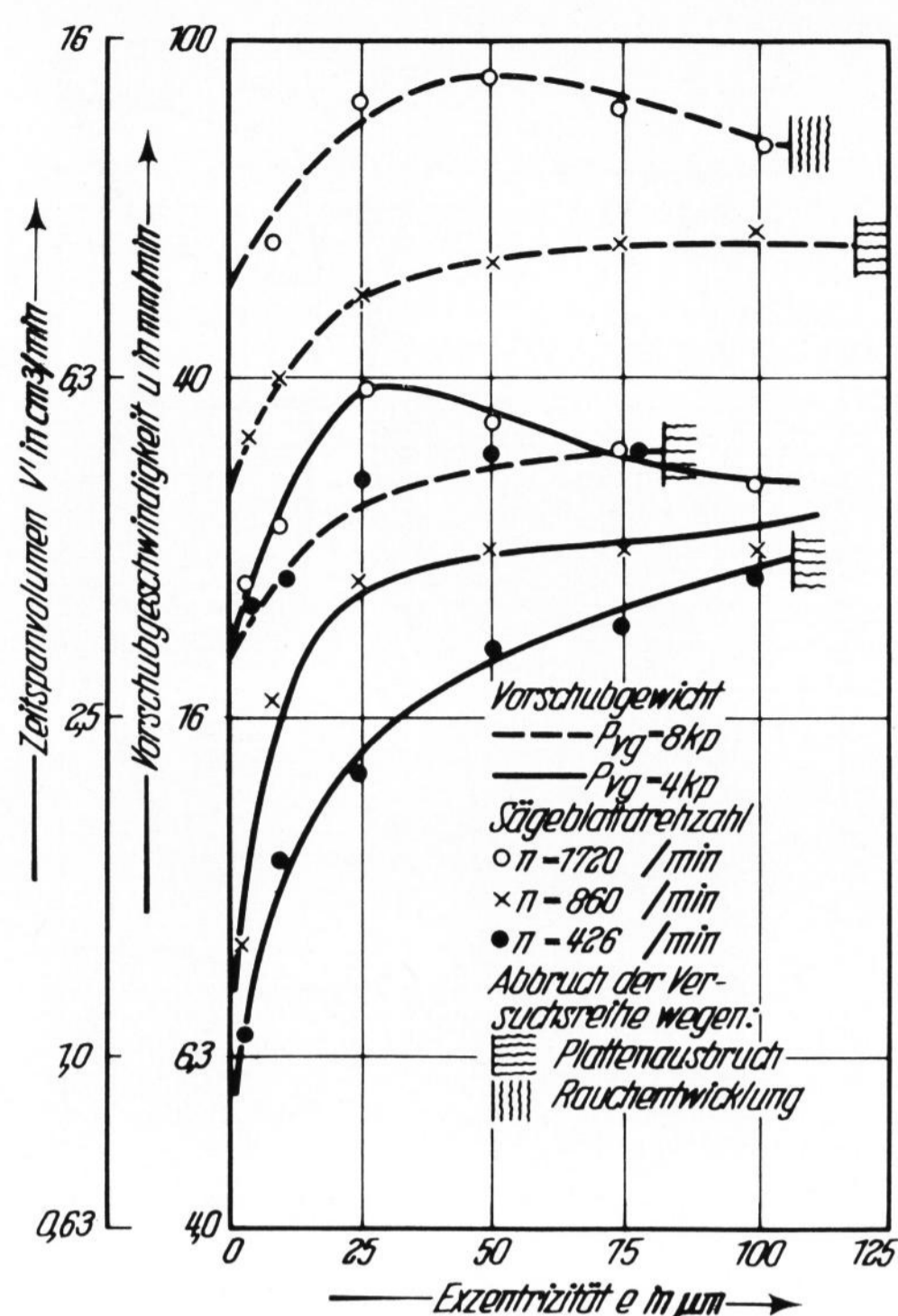


Bild 10. Einfluß der Exzentrizität auf das Zeitspanvolumen.

umdrehung aber kleiner werden (Bild 6), ist eine Voraussage über die Größe des Zeitspanvolumens<sup>4)</sup> nicht möglich.

Die Versuche bewiesen jedoch, daß trotz der relativ kleinen Eingriffszeit das Zeitspanvolumen während der kritischen Drehzahlen beträchtlich ansteigt (Bild 9). Das bedeutet aber, daß das Zeitspanvolumen nur unwesentlich von der Eingriffszeit je Umdrehung, aber in starkem Maße von der Größe der Vorschubkraftspitze abhängt.

### 3. Einfluß der Exzentrizität sowie Makrogestalt des Sägeblattes auf das Zeitspanvolumen

Die Erkenntnis, daß das Zeitspanvolumen stark vom Impuls abhängt, der vom Sägeblatt in das Werkstück eingeleitet wird, führte zu Versuchen, bei denen die Sägeblattexzentrizität systematisch verändert wurde, um — unter Vermeidung kritischer Drehzahlen — eine bezüglich des Zeitspanvolumens optimale Exzentrizität zu ermitteln.

#### 3.1. Zeitspanvolumen beim Sägen von BK 7

Bild 10 zeigt die Abhängigkeit des Zeitspanvolumens von der Sägeblattexzentrizität beim Sägen von BK 7. Bemerkenswert ist, daß sowohl für ein Vorschubgewicht von  $P_{vg} = 4 \text{ kp}$  als auch für  $8 \text{ kp}$  das Zeitspanvolumen zunächst stark mit der Exzentrizität anwächst. Die Erklärung hierfür ist in der Kinematik des Sägevorganges bedingt. Während nämlich bei rundlaufendem Sägeblatt keine großen Vorschubkraft erhöhungen auftreten, der Werkstoffabtrag also vorwiegend durch Ritzen erfolgt,

<sup>4)</sup> Das Zeitspanvolumen errechnet sich aus dem Produkt von Vorschubgeschwindigkeit und Hauptschnittfläche. Die Hauptschnittfläche ist nach DIN 6580 die von der Sägeblattumfläche momentan erzeugte Fläche. Ihr Betrag ist hier also das Produkt aus Schnittfugenbreite ( $1,6 \text{ mm}$ ) und Werkstückhöhe ( $100 \text{ mm}$ ).

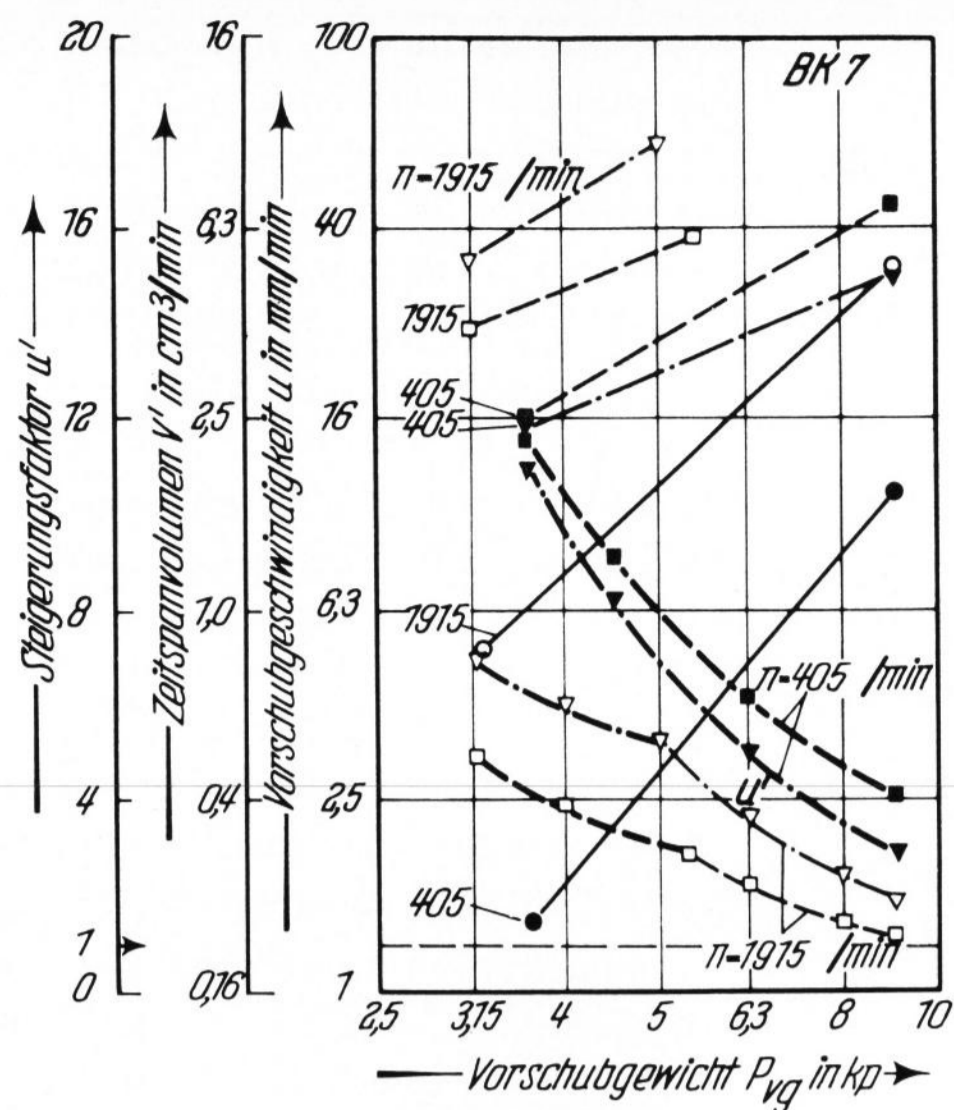


Bild 11. Einfluß der Sägeblattaufspannung und -form auf das Zeitspanvolumen beim Sägen von BK 7.

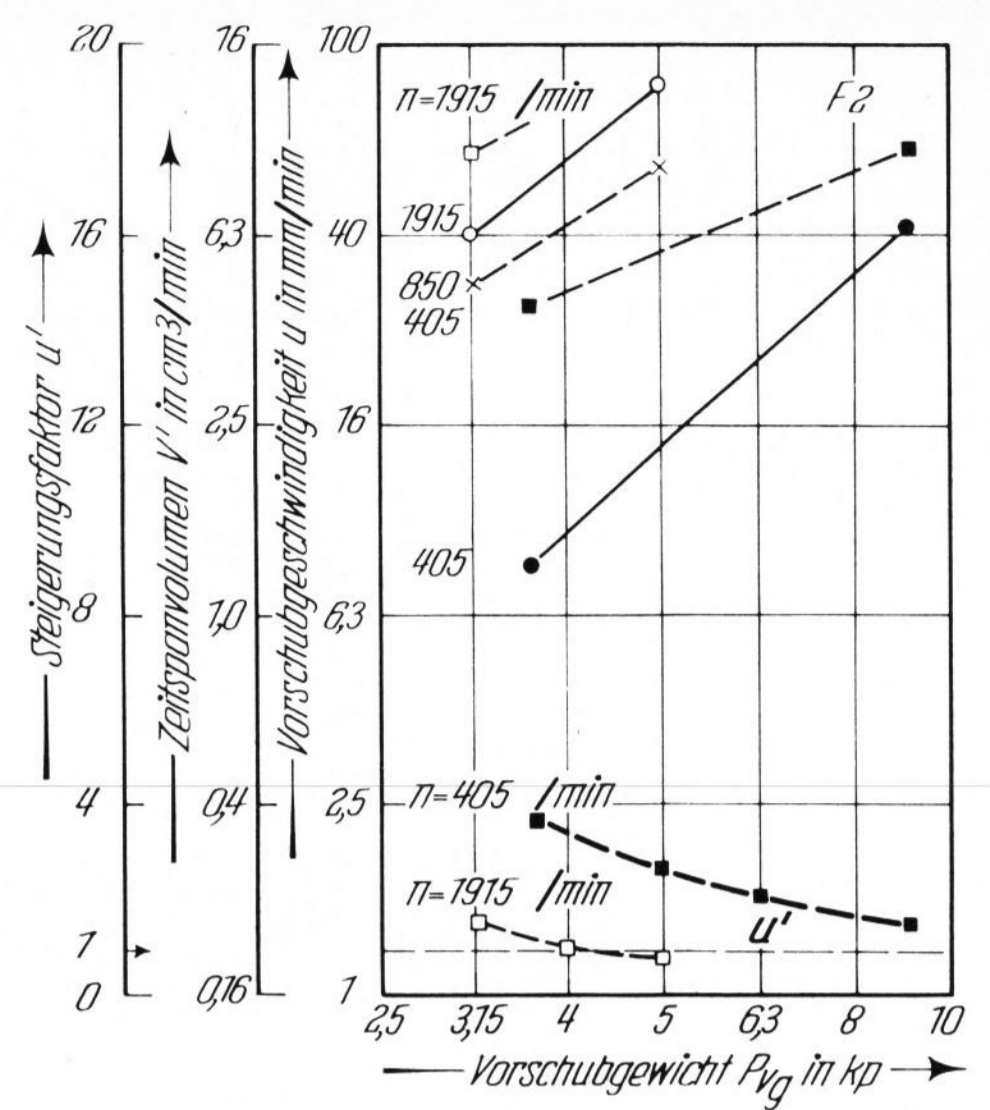


Bild 12. Einfluß der Sägeblattaufspannung auf das Zeitspanvolumen bei F 2.

11) ——— rundlaufendes Sägeblatt  
 - - - - - exzentrisch gespanntes Sägeblatt  
 - · - · - zentrisch gespanntes, aber un rundes Sägeblatt  
 $u'_{ex, unr} = \frac{u_{ex, unr}}{u_{rund}}$

12) ——— rundlaufendes Sägeblatt  
 - - - - - exzentrisch gespanntes Sägeblatt  $u' = \frac{u_{ex}}{u_{rund}}$

wird beim Sägen mit exzentrisch gespanntem Sägeblatt wegen der auftretenden Vorschubkraftspitzen und der dadurch bedingten Schwingungen des Werkstücksupports in Vorschubrichtung diesem Ritzen eine zusätzliche Werkstoffzertrümmerung überlagert, so daß das Zeitspanvolumen anwächst.

Bei der Erhöhung der Exzentrizität von 0 auf 50 µm erhöht sich das Zeitspanvolumen bei einem aufgetragenen Vorschubgewicht von  $P_{vg} = 4$  kp um den 2- bis 3fachen Betrag, wobei die größere Steigerung für die niedrigen Drehzahlen erhalten wird.

Eine Erhöhung der Exzentrizität über 50 µm hat keine nennenswerte Zeitspanvolumensteigerung mehr zur Folge und wirkt sich für die verschiedenen Drehzahlen unterschiedlich aus. Während bei  $n = 426 \text{ min}^{-1}$  wegen der durch starke Schwingungen bedingten Plattenausbrüche die Versuchsreihe bei  $e = 100 \text{ µm}$  abgebrochen werden mußte, fällt bei  $n = 1720 \text{ min}^{-1}$  das Zeitspanvolumen sogar von  $e = 30 \text{ µm}$  bis  $e = 100 \text{ µm}$  leicht ab, weil die Eingriffszeiten kleiner werden. Bei der mittleren Drehzahl wächst das Zeitspanvolumen nach der starken Anfangssteigerung ab  $e = 50 \text{ µm}$  nur noch unwesentlich an.

Die prozentuale Anfangssteigerung des Zeitspanvolumens ist bei einem Vorschubgewicht von  $P_{vg} = 8$  kp nicht mehr so groß. Doch auch für dieses Vorschubgewicht kann eine Exzentrizität von 50 µm als optimal angesehen werden. Größere Exzentrizitäten führen zu Plattenbruch oder, besonders bei hohen Drehzahlen, wegen zu starker thermischer Beanspruchung des Werkstoffes, zum Verbrennen des Kühlmittels Petroleum, dem eine Rauchentwicklung vorausgeht.

Aus diesen Gründen wurden die weiteren Versuche nur noch mit einer Exzentrizität von  $e = 50 \text{ µm}$  gefahren, wobei das Sägeblatt vor dem exzentrischen Spannen durch abwechselndes Einstechen in Hartmetall und Korundschleifscheibe abgerichtet wurde. Die mit einem solchen Sägeblatt erzielten Zeitspanvolumina werden verglichen mit den Zeitspanvolumina, die mit dem abgerichteten, rundlaufenden Sägeblatt erhalten wurden.

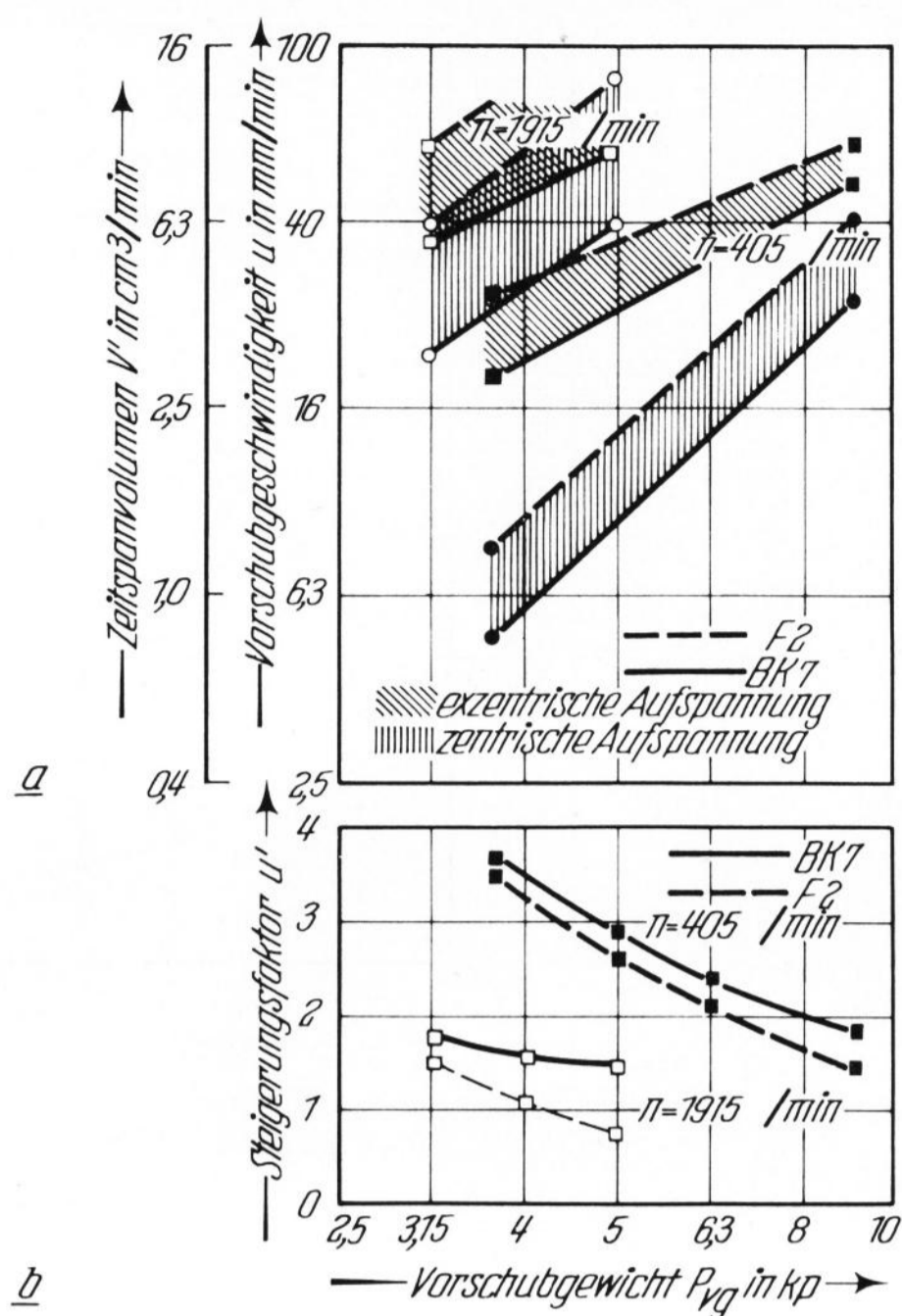
Desweiteren wurde eine Versuchsreihe mit einem zentrisch gespannten, aber un runden Sägeblatt gefahren.

Natürlich hängt der Steigerungsfaktor, um den sich das Zeitspanvolumen bei exzentrischer Sägeblattein spannung erhöht, in starkem Maße vom Zustand des zentrisch gespannten Sägeblattes ab. Je runder das Sägeblatt ist, desto kleiner ist das Anfangszeitspanvolumen, und desto größer ist demzufolge der Steigerungsfaktor, wenn dieses Sägeblatt exzentrisch gespannt wird.

So sind die großen Steigerungsfaktoren, die neben den Absolutwerten des Zeitspanvolumens bzw. der Vorschubgeschwindigkeit in Bild 11 eingetragen sind, auf einen sehr runden Anfangszustand des Sägeblattes zurückzuführen. Auffallend ist die starke Abhängigkeit des Steigerungsfaktors von Drehzahl und Vorschubkraft. Während sich bei exzentrisch gespanntem Sägeblatt für eine kleine Drehzahl und Vorschubkraft ein Faktor von etwa 11 ergibt, sinkt dieser für eine große Drehzahl und Vorschubkraft auf 1,1. Das ist damit zu erklären, daß es bei der niedrigen Drehzahl und der kleinen Belastung beim exzentrisch gespannten Sägeblatt zu intermittierendem Eingriff bei starken Supportschwingungen und dadurch erhöhten Kraftspitzen kommt, während sich bei großen Vorschubkräften ein kontinuierlicher Eingriff einstellt. Für hohe Drehzahlen besteht zwar auch intermittierender Eingriff, doch sind die Supportschwingungen so gering, daß nur relativ kleine Kraftspitzen auftreten und somit nur kleine Zeitspanvolumensteigerungen die Folge sind (vgl. auch Bild 6).

Aus diesen Gründen ist auch nur für die hohe Drehzahl die Steigerung des Zeitspanvolumens beim zentrisch gespannten, un runden Sägeblatt größer als bei exzentrisch gespanntem. Während nämlich bei exzentrischer Einspannung und hoher Drehzahl das Sägeblatt je Umdrehung nur einmal in Eingriff gelangt, ist dies beim zentrisch gespannten, un runden Blatt mehrmals der Fall, was zum erhöhten Zeitspanvolumen führt.

Der einmalige Eingriff bei hoher Drehzahl macht sich besonders nachteilig bei größeren Vorschubkräften



Bilder 13a und b. Einfluß der Sägeblattaufspannung und der Glassorte auf das Zeitspanvolumen (a) und den Steigerungsfaktor (b).

bemerkbar. Während bei rundlaufendem Sägeblatt noch mit einem Vorschubgewicht von  $P_{vg} = 9 \text{ kp}$  gearbeitet werden kann, ist die Verfahrensgrenze wegen zu starker Wärmeentwicklung beim exzentrisch gespannten schon mit  $P_{vg} = 5,5 \text{ kp}$  erreicht. Die Steigerung des Zeitspanvolumens beträgt in diesem Falle nur 10%. Dagegen beträgt bei einer noch geringeren Höchstbelastung von  $P_{vg} = 5 \text{ kp}$  beim zentrisch gespannten, unrunder Sägeblatt die Steigerung immerhin 80%. Das unrunde Sägeblatt zeigt also bei hohen Drehzahlen ein wesentlich günstigeres Verhalten als das exzentrisch gespannte runde Blatt.

### 3.2. Zeitspanvolumen beim Sägen von F 2

Die Abhängigkeit des Zeitspanvolumens vom Vorschubgewicht beim Sägen von F 2 für verschiedene Sägeblatteinspannungen und Drehzahlen gibt das Bild 12 wieder.

Die Steigerung des Zeitspanvolumens bei exzentrisch gespanntem Sägeblatt ist für dieses weiche Glas wesentlich kleiner als beim harten Glas BK 7. Dies ist einmal

auf die geringere Splitterneigung von F 2 zurückzuführen, zum anderen lag aber zu Beginn der F 2-Versuche ein anderer (schärferer) Sägeblattzustand vor als zum Beginn der BK 7-Versuche, so daß direkte Vergleiche an dieser Stelle noch nicht durchgeführt werden können.

Sicher ist jedoch, daß die Sägeblattexzentrizität beim Sägen von F 2 nur bei kleinen Drehzahlen einen geringen Vorteil bezüglich des Zeitspanvolumens bewirkt. Bei hohen Drehzahlen ist eher das Gegenteil der Fall. Denn während bei zentrisch gespanntem Sägeblatt mit  $n = 1915 \text{ min}^{-1}$  und  $P_{vg} = 5 \text{ kp}$  ein Zeitspanvolumen von  $V' = 13,3 \text{ cm}^3/\text{min}$  erzielt werden konnte, wurde bei exzentrisch gespanntem Sägeblatt für diese Drehzahl und einem Höchstgewicht von  $P_{vg} = 3,15 \text{ kp}$  nur ein Zeitspanvolumen von  $V' = 9,6 \text{ cm}^3/\text{min}$  gemessen, d. h. es trat eine Minderung um 28% ein.

Das bedeutet aber, daß beim Sägen von F 2 ein kontinuierlicher Eingriff anzustreben ist, weil durch Vorschubkraftspitzen, die sich auf Grund von Unrundheiten der Sägeblattkontur ausbilden, bei der geringen Splitterneigung des relativ weichen Werkstoffes keine Steigerung des Zeitspanvolumens zu erreichen ist.

### 3.3. Einfluß der Glashärte auf die Steigerung des Zeitspanvolumens

Während der F 2-Reihenversuche wurden nach je 32 Einschnitten in F 2 vier Einschnitte in BK 7 vorgenommen, um für den Vergleich der Zeitspanvolumina den gleichen Sägeblattzustand vorliegen zu haben. Die Ergebnisse der Vergleichsschnitte sind mit den aus Bild 12 entnommenen Werten für F 2 in Bild 13a dargestellt.

Man erkennt, daß beim Zerspanen des weichen Glases F 2 die Zeitspanvolumina für alle Einstellbedingungen über den entsprechenden Werten für BK 7 liegen (Bild 13a). Jedoch ist die prozentuale Steigerung des Zeitspanvolumens bei exzentrischer Sägeblatteinspannung gegenüber zentrischer für alle Einstellbedingungen bei BK 7 immer größer als bei F 2 (Bild 13b). Das beweist noch einmal, daß sich ein Radialschlag des Sägeblattes besonders bei harten Gläsern hinsichtlich des Zeitspanvolumens positiv auswirkt.

Die Arbeit wird im Maiheft (Nr. 5) fortgesetzt.

Die Versuche wurden in dankenswerter Weise von der Deutschen Forschungsgemeinschaft, Bad Godesberg, und den Firmen Schott & Gen., Mainz, und Diamantwerkzeugfabrik Ernst Winter & Sohn, Hamburg, unterstützt.

### Literatur

- [1] MEYER, F.: Beitrag zur Erforschung der technologischen Zusammenhänge beim Sägen von Glas mit diamantbesetzten Kreissägeblättern. Diss. TH Braunschweig 1966.  
 [2] SCHULZ, H.: Schleifhärtebestimmung für Glas. Glastechn. Ber. 20 (1942) S. 222–232.  
 [3] PAHLITZSCH, G.: Neue Forschungsergebnisse beim Sägen von Glas. Sprechsaal 99 (1966) S. 1045, 1047–1050, 1052–1053, 1054–1058, 1060–1061. [Ref. Glastechn. Ber. 40 (1967) S. 365.] (49051)