

Beurteilungskriterien für die Auslenkungen von Bandsägeblättern*

Dritte Mitteilung: Ermittlung der Gesamtseitenauslenkung und der Gesamtsteifheit

Gotthold Pahlitzsch und Klaus Puttkammer

Mitteilung aus dem Institut für Werkzeugmaschinen und Fertigungstechnik der Technischen Universität Braunschweig, Versuchsfeld für Holzbearbeitung

1. Einleitung

In der Fachliteratur und in Handbüchern wird immer wieder darauf hingewiesen, daß beim Einsatz von Bandsägemaschinen das seitliche Verlaufen des Bandsägeblattes während des Schnittvorganges als eines der wichtigsten Probleme anzusehen ist, weil hierdurch in starkem Maße die Planparallelität und Oberflächengüte der erzeugten Schnittware beeinträchtigt wird. Umfangreiche Untersuchungen der beiden Autoren [Pahlitzsch, Puttkammer 1975a, b] ließen jedoch erkennen, daß sich die Ursachen für das Verlaufen des Bandsägeblattes senkrecht zur Arbeitsebene allein anhand von Schnittversuchen nicht eindeutig klären lassen. Unter gleichen Schnittbedingungen war eine bevorzugte Auslenkrichtung nicht zu erkennen.

Um dennoch die Frage nach den Zusammenhängen zwischen Belastungen und seitlichen Auslenkungen und damit die Frage nach der Steifheit des Bandsägeblattes beantworten zu können, wurde parallel zu den Schnittversuchen zunächst eine systematische Analyse der am Bandsägeblatt auftretenden Belastungen durch die Komponenten der Zerspankraft durchgeführt [Pahlitzsch, Puttkammer 1974a]. Diese Analyse zeigte, daß die Seitenauslenkungen vor allem aus dem Zusammenwirken von Vorschub- und Passivkraft resultieren, während die in Richtung der sehr großen Einspannkraft wirkende Schnittkraft vernachlässigt werden kann. Weiterhin wurde deutlich, daß sich die Ursachen für das seitliche Auslenken des Bandsägeblattes auf die Wirkung der Gesamtpassivkraft und auf das Vorhandensein einer Exzentrizität hinsichtlich der Wirkungslinie der Gesamtvorschubkraft zurückführen lassen. Da das Auftreten beider Einflußgrößen hauptsächlich zufallsbedingt ist, lassen sie sich als Störgrößen mit stochastischem Charakter deuten. Ferner verdeutlichte diese Analyse, daß die Kriterien „kritische Gesamtvorschubkraft“ bei Belastung durch die Gesamtvorschubkraft und „Seitensteifheit“ bei Belastung durch die Gesamtpassivkraft zur Beurteilung der Seitenauslenkungen keine Aussagen über die wirklichen Steifheitsverhältnisse während des Bandsägens zulassen. Beide Kriterien dienen nur zur Beurteilung idealisierter Extremfälle, die beim wirklichen Sägeprozeß nicht auftreten.

Darüber hinaus bestand der Sinn dieser Analyse darin, den komplexen Mechanismus des allgemeinen Belastungsfalles auf einfachere und besser überschaubare Belastungsfälle zurückzuführen, um einerseits die grundsätzlich auftretenden Beanspruchungsarten des Bandsägeblattes wie Biegung, Torsion und Kippen zu erkennen, und andererseits die charakteristischen Merkmale des jeweiligen Belastungsfalles durch die

Kennlinien der Auslenkungen zu veranschaulichen sowie entsprechende Beurteilungskriterien in Form von Teilsteifheiten zuzuordnen. Auf diese Weise wurde es möglich, den allgemeinen Belastungsfall der mathematischen Behandlung zugänglich zu machen.

In der zweiten Mitteilung [Pahlitzsch, Puttkammer 1974b] konnte deshalb das vorliegende Verformungs- und Stabilitätsproblem mit Hilfe der aus der Elastizitätslehre bekannten Energiemethode mathematisch gelöst werden. Dabei zeigte sich, daß die für den allgemeinen Belastungsfall abgeleitete Gleichung der Gesamtseitenauslenkungen sich als Funktion der Teilsteifheiten (Seitenbiegesteifheit und Seitentorsionssteifheit), der Gesamtvorschubkraft und Gesamtpassivkraft sowie zweier Exzentrizitäten bezüglich der Wirkrichtung dieser Kräfte angeben lassen, wobei die beiden Teilsteifheiten wiederum jeweils von der Einspannkraft, der freien Einspannlänge, der Bandsägeblattbreite und -dicke abhängen.

Um zu überprüfen, ob sich diese rechnerisch gefundenen Abhängigkeiten auch experimentell bestätigen lassen, wurden systematische Auslenkungsversuche am eingespannten, nicht umlaufenden Bandsägeblatt durchgeführt. Über diese statischen Versuche wird in der hier vorliegenden dritten Mitteilung berichtet. Desweiteren wird gezeigt, wie sich aus den gemessenen Seitenauslenkungen in Abhängigkeit von den Komponenten der Gesamtzerspannkraft die Gesamtseitensteifheit von Bandsägeblättern ermitteln läßt.

2. Versuchseinrichtungen und -durchführung

2.1 Bandsägemaschine: Abmessungen und Belastungen

Für die Durchführung der Versuche stand eine vertikale Trennbandsägemaschine¹ zur Verfügung. Bild 1 zeigt schematisch den prinzipiellen Aufbau der Bandsägemaschine mit den wichtigsten Abmessungen und den beim Bandsägen auftretenden Eingriffsverhältnissen und Kräften. Die Hauptabmessungen der Maschine sind durch den Durchmesser der Bandscheiben, $D_B = 1100$ mm, und deren Achsabstand $L_a = 700$ mm bestimmt. Die Einspannkraft F_e wird durch Spanngewichte W über ein Gewichtshebelssystem durch Anheben der oberen Bandscheibe in das Bandsägeblatt eingeleitet. Es wurden Einspannkräfte im Bereich von $F_e = 3000$ bis 15000 N eingestellt.

Die Bandsägemaschine ist serienmäßig mit einer stationären Vorschubeinrichtung ausgerüstet. Diese besteht aus Vorschubwalzen (in Bild 1 gestrichelt), die links und rechts vom Bandsägeblatt auf dem Maschinenbett verschiebbar angeordnet sind. Bei der Durchführung der statischen Belastungsver-

* Diese Untersuchungen sind Teil einer Forschungsarbeit, die in dankenswerter Weise von der DFG gefördert wurde

¹ Typ B3 der Fa. B. Raimann GmbH., Freiburg, der die Verfasser für die Überlassung der Maschine zu danken haben

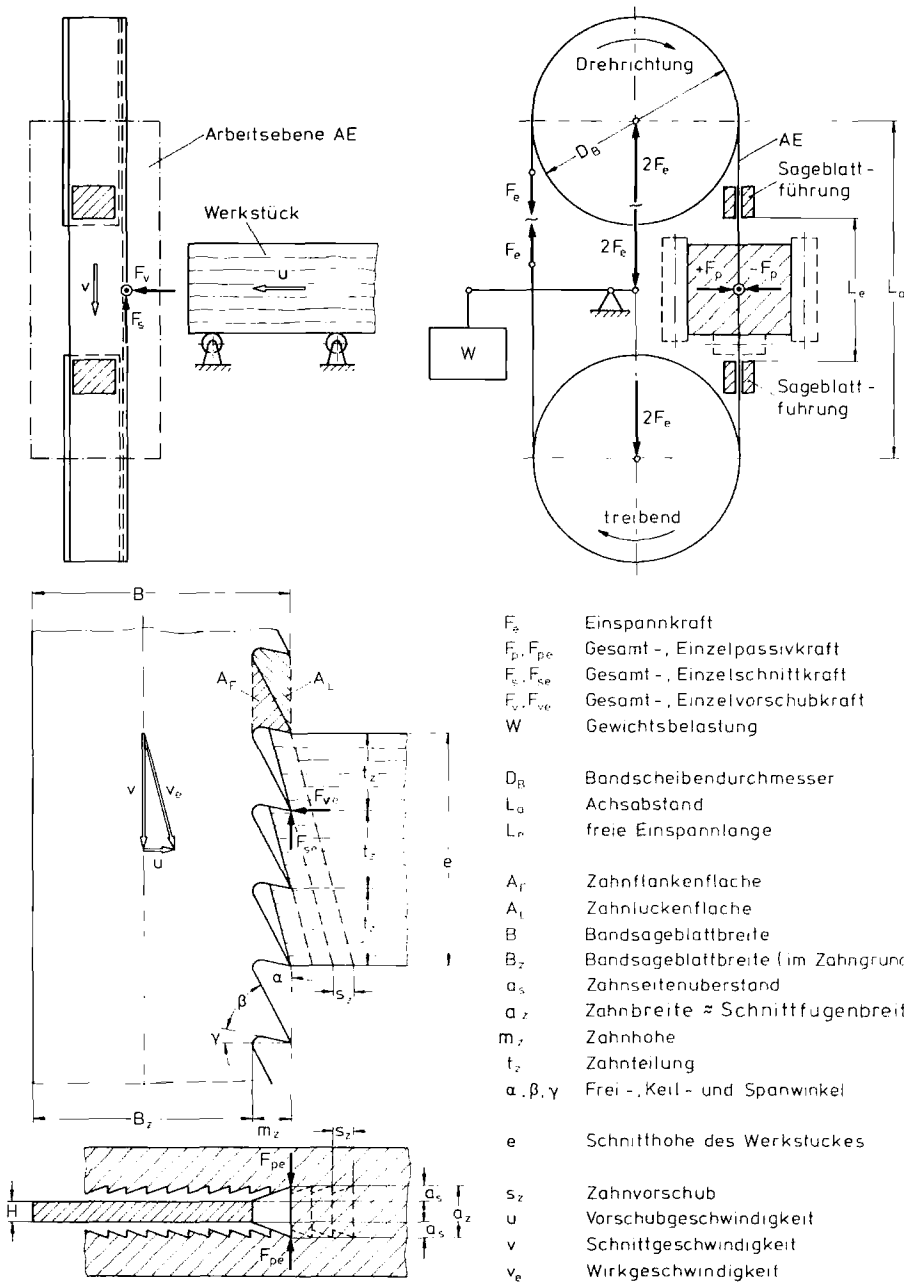


Bild 1. Abmessungen und Belastungen des Bandsägeblattes

suche am nicht umlaufenden Bandsägeblatt wurde die Vorschubeinrichtung durch entsprechende Belastungs- und Meßeinrichtungen ersetzt.

Zur serienmäßigen Ausrüstung der Trennbandsägemaschine gehören ferner zwei Bandsägeblattführungen, die oberhalb und unterhalb des Werkstückes und jeweils beiderseits des Bandsägeblattes angeordnet sind, um letzteres in der Nähe der Schnittstelle seitlich abzustützen. Während die untere Führung fest mit dem Maschinenbett verbunden ist, ist die obere Führung in der Höhe verstellbar und kann der jeweiligen Schnitthöhe des Werkstückes angepaßt werden. Als Führungselemente dienen Gleitbacken aus graphithaltigem Kunststoff. Diese sind im allgemeinen mit einem beiderseitigen Spiel von einigen Zehntelmillimetern gegenüber dem eingespannten Bandsägeblatt zurückgesetzt.

Für die Zerlegung der beim Bandsägen auftretenden Zerspänkraft in ihre Komponenten gilt DIN 6854. Die an einem einzelnen Sägezahn angreifenden Komponenten werden im

folgenden Einzelschnittkraft F_{se} , Einzelvorschubkraft F_{ve} und Einzelpassivkraft F_{pe} genannt. Da es sich bei der Analyse der beim Bandsägen auftretenden Kräfte und der daraus resultierenden Auslenkungen des Bandsägeblattes als vorteilhaft erweist, von der Gesamtzerspänkraft, d. h. von der Summe aller an den Sägezähnen angreifenden Einzelzerspänkräfte, auszugehen, sind in Bild 1 weiterhin die Gesamtschnittkraft F_s , Gesamtvorschubkraft F_v und Gesamtpassivkraft F_p bezüglich ihrer Wirkrichtung zur Arbeitsebene AE eingezeichnet.

2.2 Belastungs- und Meßeinrichtungen zur Ermittlung der Auslenkungen

Um die Untersuchungen der Auslenkungen am stillstehenden Bandsägeblatt möglichst genau den Gegebenheiten beim Bandsägeschnitt anzupassen, müssen bei der Versuchsdurchführung folgende Gesichtspunkte berücksichtigen werden:

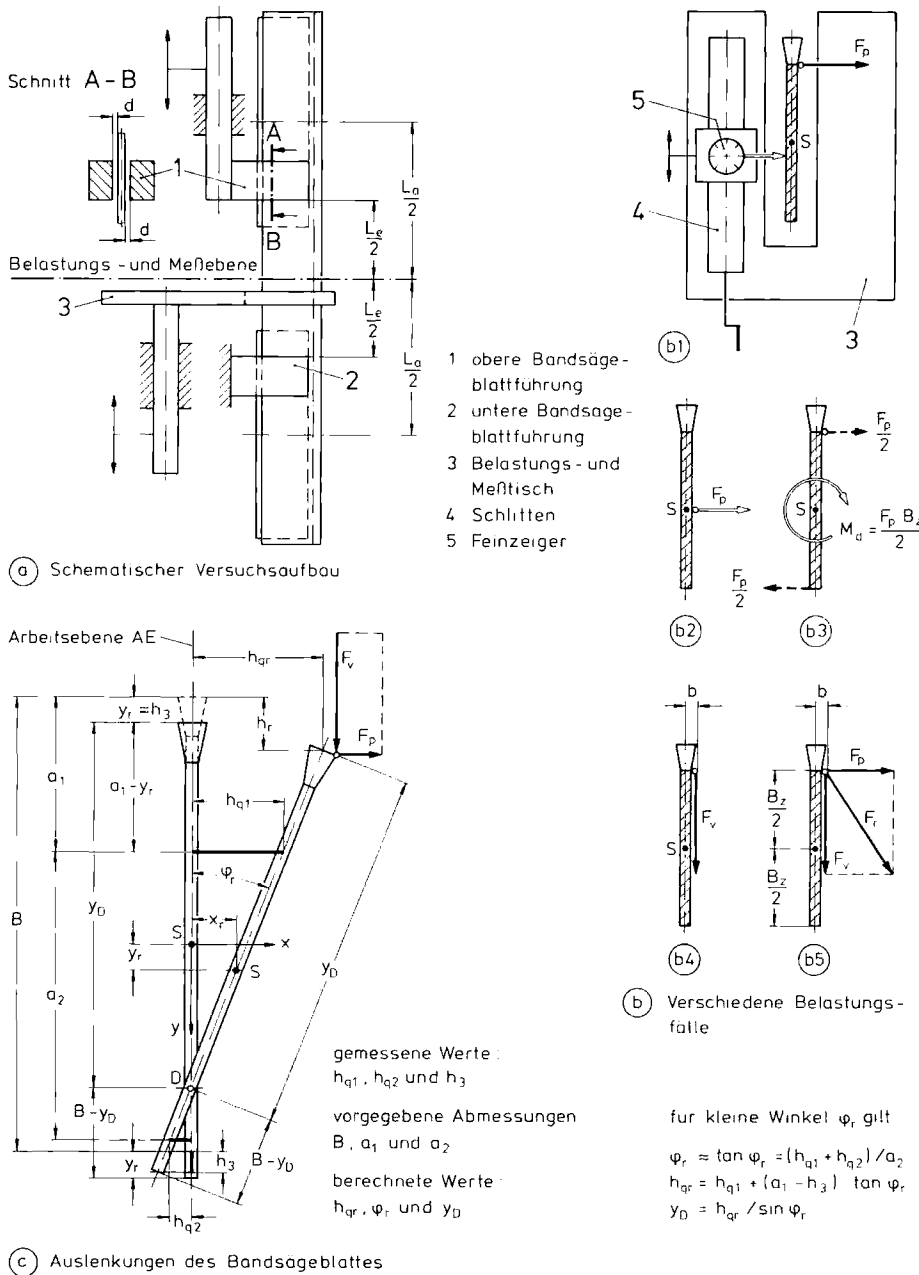


Bild 2. Versuchseinrichtung zur Ermittlung der Seitenauslenkungen am nicht umlaufenden Bandsägeblatt bei Einpunktbelastung

1. Die Zerspankraftkomponenten belasten das Bandsägeblatt während des Schnittes sowohl in der Arbeitsebene (F_s , F_c) als auch senkrecht zur Arbeitsebene (F_p).

2. Unter Wirkung dieser Kräfte erfährt das Bandsägeblatt Kantenauslenkungen in der Arbeitsebene und Seitenauslenkungen senkrecht zur Arbeitsebene.

3. Da die Zerspankraftkomponenten nicht zentrisch in der Schwerpunkthase des Bandsägeblattes, sondern exzentrisch in der Zahnzone angreifen, ist der Mechanismus der Seitenauslenkungen durch Biege- und Torsionserscheinungen gekennzeichnet.

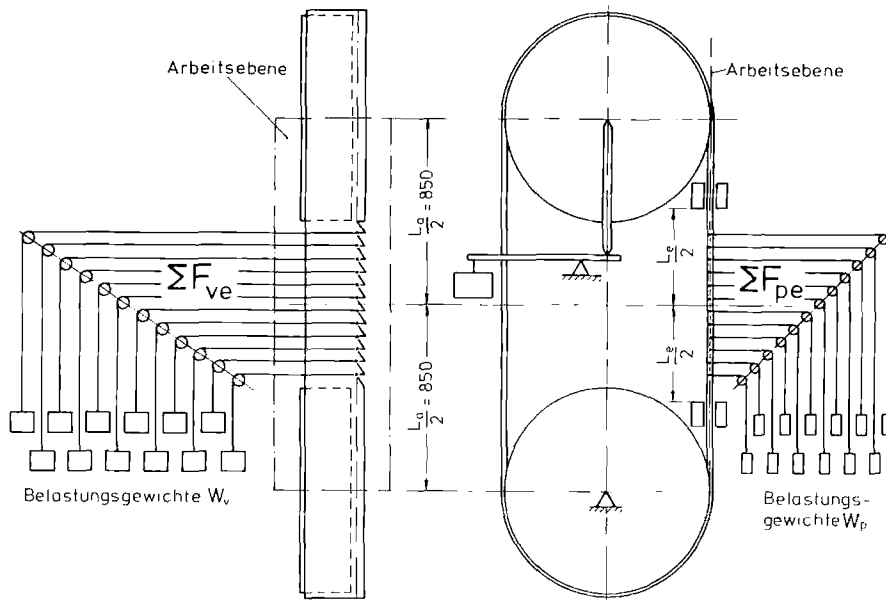
4. Da beim Bandsägen entsprechend der unterschiedlichen Schnitthöhe der vorkommenden Werkstücke jeweils eine unterschiedliche Anzahl von Sägezähnen gleichzeitig im Eingriff ist, hat auch die Art und der Ort der Krafteinleitung einen Einfluß auf die Auslenkungen.

Um die verschiedenen Einflüsse im einzelnen erfassen zu können, wurden zur Durchführung der entsprechenden Ver-

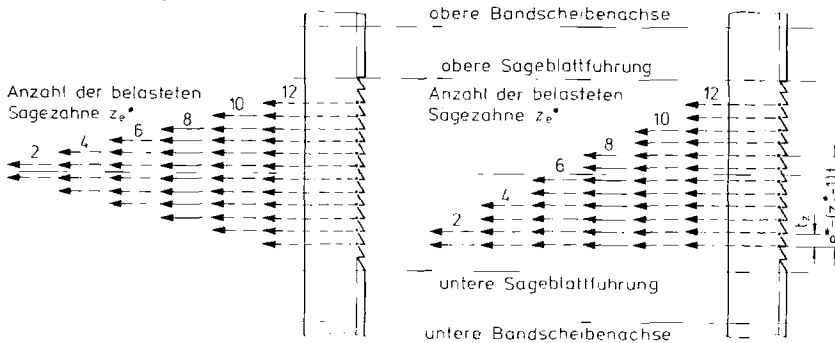
suche mehrere Versuchseinrichtungen erstellt, die es gestatten, das Bandsägeblatt sowohl in der Arbeitsebene als auch senkrecht dazu mit jeweils bis zu zwölf Einzelkräften zu belasten, und die resultierenden Auslenkungen mittels Feinzeigern zu messen. Bei allen Untersuchungen erfolgte das Aufbringen der punktförmig angreifenden Einzelkräfte mit definierten Gewichten über Seilzüge und Umlenkrollen.

In Bild 2 sind zunächst die Versuchseinrichtungen zur Ermittlung der Auslenkungen bei Einpunktbelastung dargestellt. Wie der schematische Versuchsaufbau in Bild 2a zeigt, wurde für diese Untersuchungen als bevorzugte Belastungs- und Meßebebene die Mitte der freien Einspannlänge L_v bzw. die Mitte des Achsabstandes L_u gewählt.

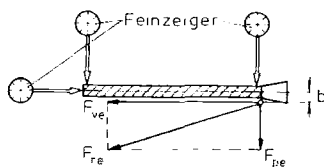
Um genauere Aufschlüsse über den Auslenkmechanismus des Bandsägeblattes unter Wirkung der Zerspankraftkomponenten zu erhalten, wurden bei Einpunktbelastung die in Bild 2b dargestellten fünf Belastungsfälle untersucht. Im Belastungsfall 1 wird das Bandsägeblatt senkrecht zur Arbeits-



(a) Schematischer Versuchsaufbau bei Belastung in der Arbeitsebene (Vorschubrichtung) (b) Schematischer Versuchsaufbau bei Belastung senkrecht zur Arbeitsebene



(c) Symmetrische Lastverteilung (d) Asymmetrische Lastverteilung



(e) Anordnung der Feinzeiger am Bandsägeblatt

- F_{pe} in N Einzelpassivkraft
- F_{ve} in N Einzelnvorschubkraft
- F_{re} in N resultierende Einzelkraft
- e^* in mm Höhe der Lastverteilung
- t_z in mm Zahnteilung
- b in mm Exzentrizität

Bild 3. Versuchseinrichtung zur Ermittlung der Seitenauslenkungen am nicht umlaufenden Bandsägeblatt bei Mehrpunktbelastung

ebene durch die im Zahngrund punktförmig angreifende Gesamtpassivkraft F_p belastet. Zur exakteren Analyse der hierbei auftretenden Seitenauslenkungen wird das Bandsägeblatt im Belastungsfall 2 allein auf Biegung und im Belastungsfall 3 allein auf Torsion beansprucht.

Die Untersuchungen im Belastungsfall 4 sollen neben der Erfassung der Auslenkungen in der Arbeitsebene vor allem den Einfluß der Gesamtvorschubkraft F_v auf die Seitenauslenkungen aufzeigen und Angaben über die Größenordnung der kritischen Gesamtvorschubkraft ermöglichen. Um eine bevorzugte seitliche Auslenkrichtung zu erhalten, werden alle Untersuchungen mit einer Exzentrizität $b = (H/2) + 0,2$ bezüglich der idealen Wirkungslinie der Gesamtvorschubkraft durchgeführt. Im Belastungsfall 5 wird das Bandsägeblatt sowohl durch die Gesamtpassivkraft F_p als auch durch die Gesamtvorschubkraft F_v belastet, um mit Hilfe dieser statischen Belastungsversuche möglichst exakt die beim Zerspanungsvorgang auftretenden Belastungen zu simulieren.

Um zu überprüfen, ob das Bandsägeblatt in der ausgelenkten Stellung seine ursprüngliche gerade Form beibehält, wurden zunächst die Auslenkungen senkrecht zur Arbeitsebene mit einem auf dem Schlitten (4) befestigten Feinzeiger (5) längs der Sägeblattbreite B gemessen. Ausgangspunkt dieser Messungen war immer die Sägeblatttrübenlinie. Für die eigentliche Erfassung der entstehenden Auslenkungsfigur wurden drei feststehende Feinzeiger benutzt, deren Anordnung am Bandsägeblatt das Bild 3e zeigt.

Neben diesen grundlegenden Untersuchungen bei Einpunktblastung wurden weiterhin umfangreiche Auslenkversuche bei Mehrpunktbelastung des Bandsägeblattes durchgeführt. In Bild 3a und b sind die zugehörigen Versuchseinrichtungen zur Aufbringung der Einzelnvorschubkräfte F_{ve} und Einzelpassivkräfte F_{pe} dargestellt. Die maximale Anzahl der belasteten Sägezähne beträgt $z_e^* = 12$. Die Untersuchungen wurden sowohl bei symmetrischer als auch bei asymmetrischer Lastverteilung (Bild 3c und d) vorgenommen.

Da die Auslenkungen der Bandsägeblätter nicht nur von der Art der Belastung abhängen, sondern auch von der Kombination der Bandsägeblattparameter, wurden im einzelnen der Einfluß der Einspannkraft F_e , der Bandsägeblattbreite B_z , der Bandsägeblattdicke H und der freien Einspannlänge L_e untersucht. Die verschiedenen Werte für die freie Einspannlänge wurden durch vertikales Verstellen der oberen Bandsägeblattführung und durch Klemmen ($d=0!$) einer bzw. beider Sägeblattführungen verwirklicht (Bild 2a).

2.3 Versuchs-Bandsägeblätter

Für die Untersuchungen standen sieben handelsübliche Trennbandsägeblätter unterschiedlicher Breite und Dicke, jedoch gleicher Länge und Verzahnung zur Verfügung. Diese mit den Buchstaben A bis G bezeichneten Sägeblätter sind vom gleichen Hersteller, um Unterschiede bei der Sägeblatt-Herstellung und -behandlung weitgehend auszuschließen. Nach Angaben des Herstellers sind die Sägeblätter in gleicher Weise plangeschliffen, gerichtet und durch Walzen reckvorge-spannt: die Sägezähne sind gestaut, egalisiert und geschärft.

Für alle Sägeblätter gemeinsam gelten folgende technische Daten:

Sägeblattlänge	$L = 6860$ mm;	Zahnform	$PV = \text{Zahn}$ (Hakenzahn)
Zähnezahl	$z = 196$ mm;	Freiwinkel	$\alpha = 15^\circ$
Zahnteilung	$t_z = 35$ mm;	Keilwinkel	$\beta = 50^\circ$
Zahnhöhe	$m_z = 11$ mm;	Spanwinkel	$\gamma = 25^\circ$

Tabelle 1 enthält alle weiteren wichtigen technischen Daten, die für die Bandsägeblätter unterschiedlich sind, wie die Sägeblattbreite B_z im Zahngrund, Sägeblattdicke H und die Zahnungsbreite a_z .

Tabelle 1. Technische Daten der Versuchs-Bandsägeblätter

Sägeblatt-bezeichnung	Sägeblatt-breite B_z mm	Sägeblatt-dicke H mm	Zahn-breite a_z mm
A	88,2	1,11	2,18
B	85,6	1,07	2,15
C	86,6	1,06	2,16
D	84,2	0,98	2,02
E	87,6	0,90	1,78
F	66,4	0,90	1,81
G	46,6	0,90	1,75

3. Belastung durch die Gesamtpassivkraft

Belastet man ein Bandsägeblatt senkrecht zur Arbeitsebene punktförmig im Zahngrund durch die Gesamtpassivkraft F_p , so sind die Seitenauslenkungen in der Zahnzone immer bedeutend größer als am Blattrücken. Eine derartige Auslenkungsfigur des belasteten Sägeblattquerschnittes deutet darauf hin, daß das Bandsägeblatt unter der Wirkung der Gesamtpassivkraft eine Durchbiegung und eine Verdrehung erfährt. Zur genaueren Analyse sind im Bild 4 die entsprechenden Teilauslenkungen getrennt dargestellt. Durch Reduktion der Gesamtpassivkraft in den Schwerpunkt des betrachteten Sägeblattquerschnittes und durch Einführung des Versatzmomentes M_d lassen sich nach den Gesetzen der Statik die entsprechende Teilauslenkung x_{ps} infolge Biegung (F_p) und die Teilauslenkung h_{qd} infolge Torsion (M_d) getrennt betrachten und anschließend durch Addition die Seitenauslenkung $h_{qp} = x_{ps} + h_{qd}$ des wirklichen Belastungsfalles gewinnen.

Die entsprechenden Messungen längs der Bandsägeblattbreite zeigten zunächst, daß das Bandsägeblatt bei allen Belastungen seine ursprünglich gerade Form beibehält. Weiterhin ergab sich, daß in allen drei Belastungsfällen jeweils zwischen Belastung und zugehöriger Auslenkung ein proportionaler Zusammenhang besteht. Deshalb lassen sich für die drei verschiedenen Belastungsfälle charakteristische Steifigkeiten mit den Bezeichnungen:

$$\begin{aligned} \text{Seitenbiegesteifigkeit} & c_x = F_p / x_{ps} \\ \text{Seitentorsionssteifigkeit} & c_d = F_p / h_{qd} \\ \text{Seitensteifigkeit} & c_{qp} = F_p / h_{qp} \end{aligned}$$

zuordnen, die jeweils als Verhältnis von Gesamtpassivkraft und zugehöriger Auslenkung definiert sind. In den folgenden Versuchsreihen wurde nun der Einfluß der Bandsägeblattparameter auf die drei Seitensteifigkeiten genauer untersucht.

3.1. Einfluß der Einspannkraft

In Bild 4a erkennt man, daß im untersuchten Bereich der Einspannkraft die drei Seitensteifigkeiten c_x , c_d und c_{qp} jeweils linear von der Einspannkraft abhängen. Der Vergleich zwischen c_x und c_d macht deutlich, daß für die notwendigen hohen Einspannkraft an Trennbandsägemaschinen im Bereich von $F_e = 6$ bis 15 kN das Bandsägeblatt gegenüber Torsionsbeanspruchung empfindlicher ($c_d < c_x$) ist als gegenüber Biegebeanspruchung. Da durch die Gesamtpassivkraft das Bandsägeblatt gleichzeitig auf Biegung und Torsion beansprucht wird, muß die Seitensteifigkeit c_{qp} immer kleiner sein als die Teilsteifigkeiten c_x und c_d . Dieser Sachverhalt entspricht einer Hintereinanderschaltung zweier Ersatzfedern mit den Teilsteifigkeiten c_x und c_d bzw. der Addition der zugehörigen Teilauslenkungen. Die Seitensteifigkeit läßt sich deshalb aus den Teilsteifigkeiten wie folgt berechnen:

$$c_{qp} = \frac{c_x \cdot c_d}{(c_x + c_d)}$$

3.2. Einfluß der Bandsägeblattbreite

Entgegen den üblichen Vorstellungen in der Praxis, daß breitere Bandsägeblätter eine Sägeblattversteifung gegenüber Kräften senkrecht zur Arbeitsebene bewirken, ergeben die hier durchgeführten Messungen einen leicht degressiven Abfall der Seitensteifigkeit bei einer Vergrößerung der Bandsägeblattbreite (Bild 4c). Für dieses Phänomen läßt sich jedoch eine relativ einfache Erklärung geben. Würde man bei diesen Untersuchungen den Drehwinkel in Abhängigkeit von der Bandsägeblattbreite auftragen (hier nicht dargestellt), so ergäben die Messungen, daß bei sonst konstanten Bedingungen der Drehwinkel mit zunehmender Sägeblattbreite kleiner wird. Dieses Ergebnis bedeutet bezüglich des Drehwinkels eine scheinbare Versteifung des Bandsägeblattes. Da jedoch bei Belastung in der Zahnzone mit zunehmender Sägeblattbreite gleichzeitig der wirksame Hebelarm der Gesamtpassivkraft, bezogen auf den Drehpunkt D , größer wird und dieser Einfluß überwiegt, nehmen auch die zahnseitigen Auslenkungen h_{qp} größere Werte an. Gemäß Definition muß dann die Seitensteifigkeit c_{qp} bei einer Vergrößerung der Bandsägeblattbreite kleiner werden.

3.3. Einfluß der Bandsägeblattdicke

Wie das Bild 4d zeigt, ergibt sich im untersuchten Bereich der Bandsägeblattstärken nur ein leicht progressiver Anstieg in den Kurvenverläufen. Ein derartig geringer Einfluß der Band-

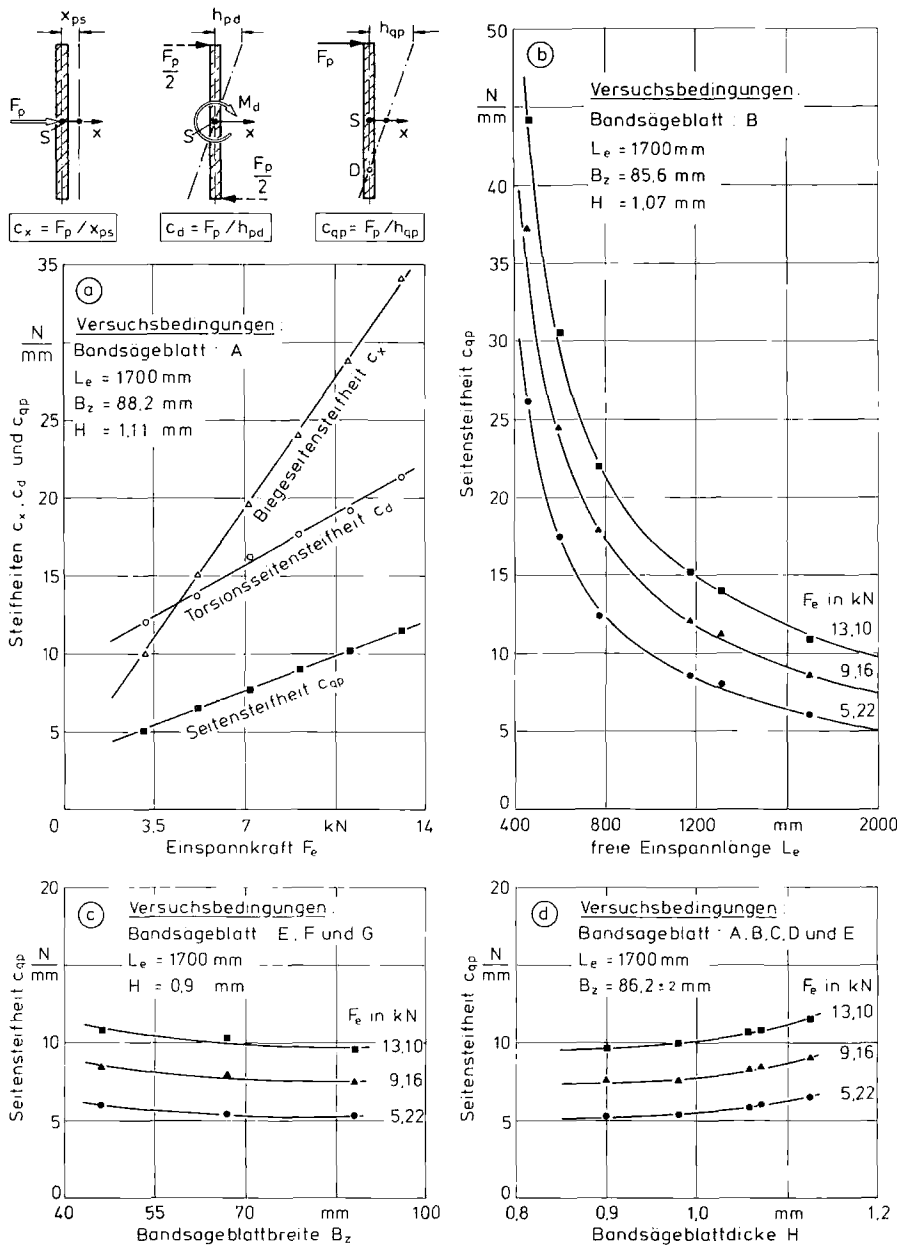


Bild 4. Seitensteifheit in Abhängigkeit von der Einspannkraft, freien Einspannlänge, Bandsägeblattbreite und -dicke bei Einpunktbelastung

sägeblattdicke auf die Seitensteifheit ist darauf zurückzuführen, daß eine Änderung dieses Parameters nur in einem engen Bereich möglich ist. Besonders eine Erweiterung des Bereiches zu großen Bandsägeblattdicken hin läßt sich, wie die Spannungs- und Festigkeitsbetrachtungen [Pahlitzsch, Puttkammer 1972] gezeigt haben, nicht ohne weiteres durchführen, weil in diesem Fall die Bruchsicherheit sehr schnell kleinere Werte annimmt.

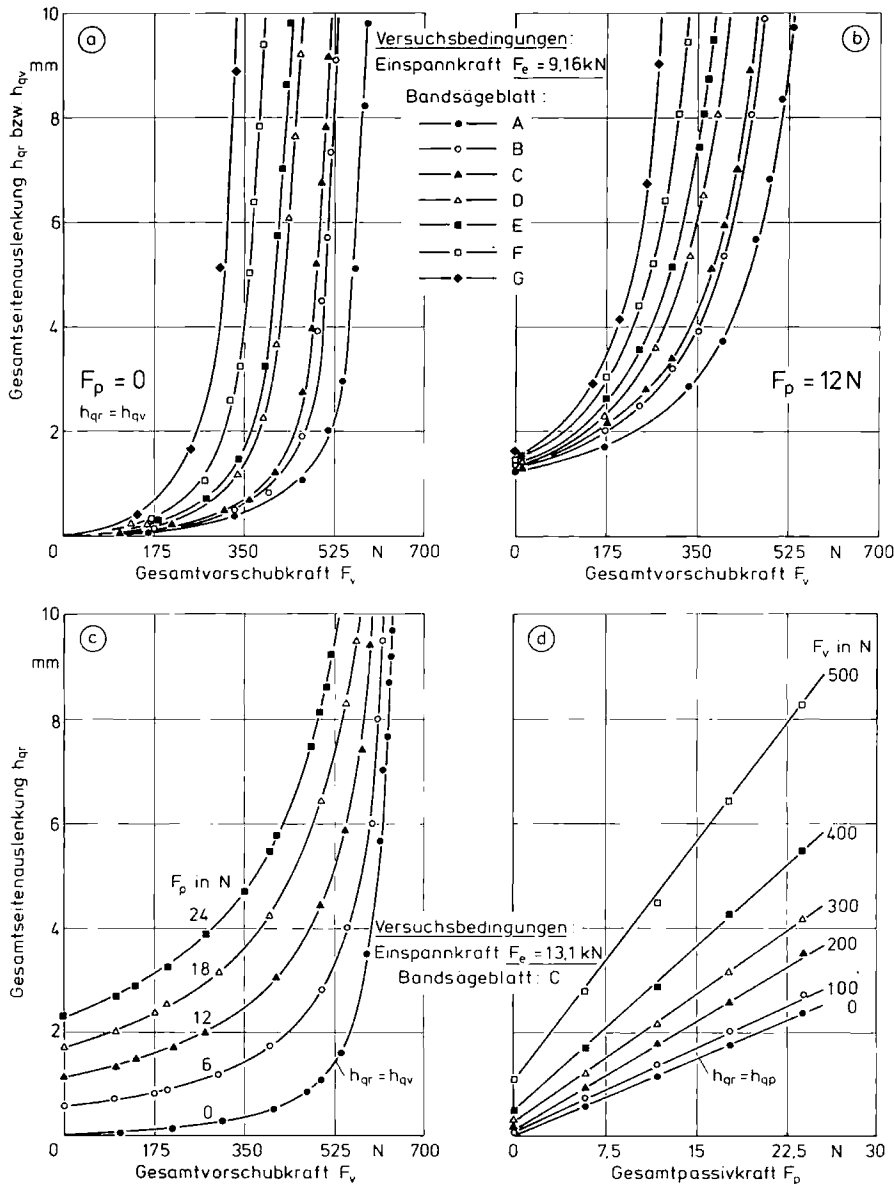
3.4. Einfluß der freien Einspannlänge

Wie dem Bild 4b zu entnehmen ist, hat die freie Einspannlänge einen relativ großen Einfluß auf die Seitensteifheit des Bandsägeblattes.

Aus den hyperbolischen Kurvenverläufen läßt sich folgern, daß c_{qp} und L_e mit guter Näherung durch eine umgekehrte Proportionalität miteinander verbunden sind. Während die übrigen Abmessungen nur einen geringen Einfluß auf die Seitensteifheit ausüben, läßt sich durch eine Verkürzung der

freien Einspannlänge eine entscheidende Vergrößerung der Seitensteifheit erreichen. Einer Verkürzung der freien Einspannlänge L_e durch Verkleinerung des Achsabstandes L_u sind jedoch durch die geometrischen Anordnungen der beiden Bandscheiben ($L_{u, \min} \approx 1,05 D_B$) Grenzen gesetzt. Kleinere freie Einspannlängen und damit größere Seitensteifheiten lassen sich deshalb bei der üblichen Konstruktion der Bandsägemaschinen grundsätzlich nur unter Zuhilfenahme von Bandsägeblattführungen realisieren.

Eine effektive Erhöhung der Seitensteifheit infolge Reduzierung der freien Einspannlänge durch den Einsatz von Bandsägeblattführungen ist jedoch nur dann zu erwarten, wenn bei Belastung des Bandsägeblattes senkrecht zur Arbeitsebene die Führungen wie feste Einspannungen wirken. Diese Bedingung ist bei den üblichen mechanischen Bandsägeblattführungen nicht erfüllt, weil sie, um ein Erwärmen des Bandsägeblattes durch Gleiten an den Führungsbacken zu verhindern, um einige Zehntel Millimeter gegenüber dem eingespannten Bandsägeblatt zurückgesetzt sind.



weitere Versuchsbedingungen: freie Einspannlänge $L_e = 1700$ mm; Belastungsart $z^* = 1$
Lastverteilung symmetrisch

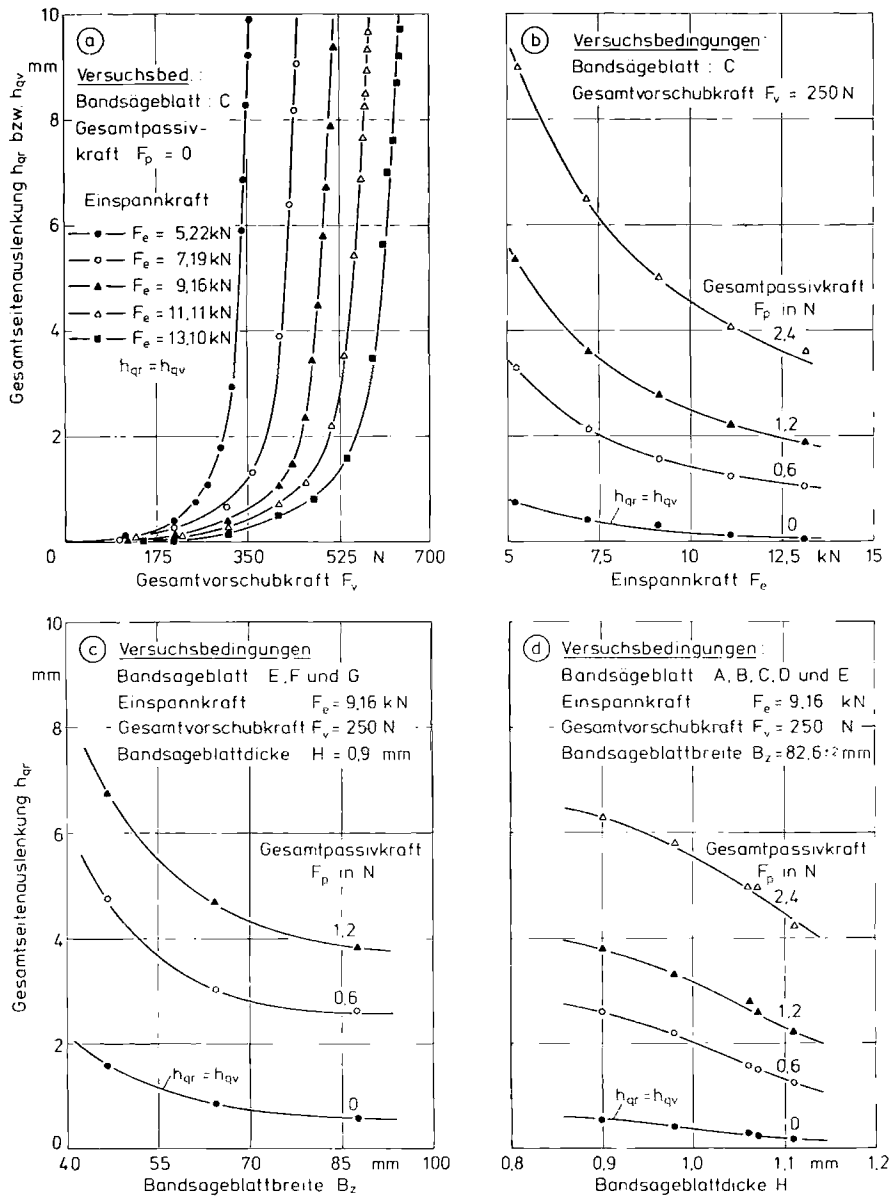
Bild 5. Einfluß der Gesamtschubkraft und Gesamtpassivkraft auf die Gesamtseitenauslenkung für verschiedene Bandsägeblätter bei Einpunktbelastung

4. Belastung durch die Gesamtvorschubkraft

Gegenüber dem einfachen Zusammenhang zwischen Seitenauslenkung und Gesamtpassivkraft, der durch eine lineare Kennlinie gekennzeichnet ist, zeigt die Kennlinie der Seitenauslenkung in Abhängigkeit von der Gesamtvorschubkraft einen völlig anderen Charakter. Wie bereits in der ersten und zweiten Mitteilung [Pahlitzsch, Puttkammer 1974a, b] ausführlich erläutert und mathematisch untermauert, würden sich am Bandsägeblatt bei exakt zentrischer Belastung in Vorschubrichtung bis zu einem bestimmten Grenzwert der Gesamtvorschubkraft keine Seitenauslenkungen ergeben. Erst bei Erreichen dieses Grenzwertes, der kritischen Gesamtvorschubkraft $F_{v, krit}$ würde das Bandsägeblatt plötzlich aus der Arbeitsebene umkippen.

Da ein derartiger exakter Belastungsfall infolge immer vorhandener Exzentrizitäten bezüglich der Wirkungslinie der Gesamtvorschubkraft nicht möglich ist, wird das Bandsägeblatt bereits für Gesamtvorschubkräfte $F_v < F_{v, krit}$ Seitenaus-

lenkungen aufweisen. Zum Verständnis des Zusammenhanges zwischen Gesamtvorschubkraft und Seitenauslenkung muß deshalb grundsätzlich einerseits das Zusammenwirken von Gesamtvorschubkraft und Exzentrizität berücksichtigt und zum anderen das Vorhandensein einer Instabilitäterscheinung, gekennzeichnet durch die kritische Gesamtvorschubkraft, beachtet werden. Alle Untersuchungen der Seitenauslenkungen unter der Belastung der Gesamtvorschubkraft werden deshalb mit der Exzentrizität $b = (H/2) + 0.2$ in mm bezüglich der idealen Wirkungslinie dieser Kraft durchgeführt (siehe auch Bild 2b). Bild 5a zeigt die auf diese Weise gemessenen Werte der Seitenauslenkungen in Abhängigkeit von der Gesamtvorschubkraft für die zur Verfügung stehenden Versuchsbandsägeblätter A bis G. In allen Fällen steigen die Seitenauslenkungen zunächst schwach und dann stark progressiv über der Gesamtvorschubkraft an. Die Kurve für das Bandsägeblatt G, das mit $A_z = 41,9 \text{ mm}^2$ den kleinsten Sägeblattquerschnitt hat, erreicht schon bei $F_v = 260$ N eine Seitenauslenkung von $h_{qr} = 2$ mm; das Bandsägeblatt A mit dem größten



weitere Versuchsbedingungen freie Einspannlänge $L_e = 1700 \text{ mm}$, Belastungsart $z_c^* = 1$
 Lastverteilung - symmetrisch

Bild 6. Einfluß der Einspannkraft, Bandsägeblattbreite und -dicke auf die Gesamtseitenauslenkung bei Einpunktbelastung

Sägeblattquerschnitt von $A_z = 97,9 \text{ mm}^2$ weist den gleichen Wert für die Seitenauslenkung erst für $F_v = 520 \text{ N}$ auf. In beiden Fällen bewirkt eine weitere Erhöhung der Gesamtpassivkraft um rund 70 N , daß die Seitenauslenkungen die bereits extrem großen Werte von $h_{qr} = 10 \text{ mm}$ annehmen. Das deutet darauf hin, daß sich jede der Kurven sehr schnell ihrem Grenzwert, der kritischen Gesamtvorschubkraft, nähert; theoretisch erreicht sie ihn jedoch erst bei unendlich großen Seitenauslenkungen. Aus diesem Grund sind die kritischen Gesamtvorschubkräfte, die sich grundsätzlich als Asymptoten an die jeweiligen Kurven darstellen lassen, im Diagramm nicht eingezeichnet. Nimmt man jedoch willkürlich an, daß die Kurven der Seitenauslenkungen bereits für den Wert $h_{qr} = 10 \text{ mm}$ näherungsweise den jeweiligen Grenzwert der Gesamtvorschubkraft erreicht haben, so lassen sich z. B. den Bandsägeblättern G und A die kritischen Gesamtvorschubkräfte $F_{v, krit} = 330 \text{ N}$ bzw. $F_{v, krit} = 590 \text{ N}$ zuordnen.

Bei allen Untersuchungen der Seitenauslenkungen unter der Belastung durch die Gesamtvorschubkraft ergeben sich grundsätzlich die zunächst schwach und bei Annäherung an die kritische Gesamtvorschubkraft stark progressiv ansteigenden Kennlinien. Je nach der Kombination von Einspannkraft, freier Einspannlänge, Bandsägeblattbreite und -dicke sowie von Belastungsart und Lastverteilung nehmen die Kennlinien für mehr oder weniger große Gesamtvorschubkräfte große Seitenauslenkungen an. So zeigt z. B. Bild 6a die entsprechenden Kennlinien, wenn bei sonst konstanten Bedingungen die Einspannkraft verändert wird. Mit zunehmender Einspannkraft verschieben sich die Kennlinien zu größeren Gesamtvorschubkräften, d. h., bei großer Einspannkraft ist die Widerstandsfähigkeit des Bandsägeblattes gegenüber der Gesamtvorschubkraft größer als bei kleiner Einspannkraft.

Ähnliche Kennliniendiagramme lassen sich auch für die übrigen Einflußgrößen aufzeichnen. Da die Seitenauslenkun-

gen jedoch nicht allein durch die Gesamtvorschubkraft, sondern vielmehr durch das Zusammenwirken von Gesamtvorschubkraft und Gesamtpassivkraft bestimmt werden, ist es notwendig, die entsprechenden Abhängigkeiten in diesem allgemeineren Zusammenhang genauer zu untersuchen.

5. Belastung durch die Gesamtpassiv- und Gesamtvorschubkraft

Die aus der Belastung durch die Gesamtpassivkraft F_p und Gesamtvorschubkraft F_v resultierenden zahnseitigen Auslenkungen senkrecht zur Arbeitsebene werden als Gesamtseitenauslenkungen h_{qr} bezeichnet. Für die Sonderfälle $F_p=0$ gilt $h_{qr}=h_{qv}$ und für $F_v=0$ ist $h_{qr}=h_{qp}$.

5.1. Einfluß der Gesamtpassivkraft

Bild 5b zeigt die auf diese Weise bei einer konstanten Gesamtpassivkraft von $F_p = 12$ N ermittelten Werte der Gesamtseitenauslenkungen in Abhängigkeit von der Gesamtvorschubkraft für die Versuchsbandsägeblätter A bis G. Ein Vergleich mit Bild 5a, das – unter sonst gleichen Bedingungen – für $F_p=0$ gilt, macht deutlich, daß in beiden Bildern die Reihenfolge der Kurven zwar die gleiche, die Zunahme der Seitenauslenkungen über der Gesamtvorschubkraft für den Fall $F_p = 12$ N jedoch bedeutend schneller erfolgt.

Besonders deutlich läßt sich der Einfluß der Gesamtpassivkraft in Bild 5c aufzeigen, in dem die Gesamtseitenauslenkungen in Abhängigkeit von der Gesamtvorschubkraft für verschiedene Gesamtpassivkräfte dargestellt sind. Der zunächst schwach und dann stark progressive Anstieg der Kurve $h_{qr}=h_{qv}$ gilt für $F_p=0$. Diesem Belastungsfall läßt sich näherungsweise eine kritische Gesamtvorschubkraft von $F_{v, \text{krit}} \approx 640$ N zuordnen. Wird das Bandsägeblatt zusätzlich durch die Gesamtpassivkraft belastet, so ergeben sich bereits für $F_v=0$ endliche Werte für die Seitenauslenkungen $h_{qr}=h_{qp}$, denen im vorliegenden Fall eine Seitensteifheit von $c_{qp} = F_p / h_{qp} \approx 10,6$ N/mm entspricht. Mit wachsender Gesamtvorschubkraft nehmen dann für $F_p > 0$ die Gesamtseitenauslenkungen h_{qr} bedeutend schneller größere Werte an als für $F_p=0$. Aus der Lage der Kurven zueinander läßt sich folgern, daß sich die Gesamtseitenauslenkungen h_{qr} nicht durch eine Superposition der Teilauslenkungen h_{qv} und h_{qp} gewinnen lassen.

Wie im Bild 5d dargestellt, erweist sich der Einfluß der Gesamtpassivkraft F_p auf die Gesamtseitenauslenkung grundsätzlich als linear. Für den Fall $F_v=0$ ergibt sich sogar eine proportionale Abhängigkeit zwischen den beiden Größen; es gilt wiederum $h_{qr}=h_{qp}$.

5.2 Einfluß der Einspannkraft

Der Einfluß der Einspannkraft auf die Gesamtseitenauslenkungen ist dem Bild 6b zu entnehmen, in dem die Gesamtseitenauslenkungen h_{qr} für eine konstante Gesamtvorschubkraft F_v und verschiedene konstante Gesamtpassivkräfte F_p über der Einspannkraft F_e aufgetragen sind. In allen Fällen verringern sich, wie zu erwarten ist, die Auslenkungen mit zunehmender Einspannkraft. Es ergeben sich Kurven mit jeweils hyperbelförmigem Charakter.

5.3 Einfluß der Bandsägeblattbreite

Ähnliche hyperbelförmige Kurven zeigen sich, wenn man die Gesamtseitenauslenkungen h_{qr} in Abhängigkeit von der Bandsägeblattbreite darstellt (Bild 6c). Dieses Ergebnis bedeutet für den allgemeinen Belastungsfall ($F_v > 0$, $F_p > 0$), daß durch eine Vergrößerung der Bandsägeblattbreite eine größere Widerstandsfähigkeit des Bandsägeblattes gegenüber den beiden Gesamtspannkraftkomponenten erreicht werden kann. Gegenüber den im Abschnitt 3.2 erläuterten Belastungsfall

($F_p > 0$, $F_v = 0$), wo mit zunehmender Bandsägeblattbreite die Seitensteifheit kleinere Werte annimmt, kehren sich hier die Verhältnisse um. Vor allem dieser Sachverhalt führte bei den Untersuchungen der Seitenauslenkungen zu der Gewißheit, daß das bisher in der einschlägigen Literatur benutzte Kriterium der Seitensteifheit für die Beurteilung des Einflusses der Bandsägeblattbreite nicht kennzeichnend ist.

5.4 Einfluß der Bandsägeblattdicke

Während sich bei der Darstellung der Abhängigkeiten $h_{qr}=f(F_e)$ und $h_{qr}=f(B_z)$ jeweils hyperbelförmige Kurvenzüge ergeben, erreicht man bei einer Vergrößerung der Bandsägeblattdicke H zwar auch eine Verringerung der Gesamtseitenauslenkungen, die entsprechenden Kurven zeigen jedoch praktisch einen proportionalen Abfall über der Bandsägeblattdicke (Bild 6d).

5.5 Einfluß der freien Einspannlänge

Wie schon bei den im Abschnitt 3.4 durchgeführten Versuchen bei alleiniger Belastung des Bandsägeblattes senkrecht zur Arbeitsebene, erweist sich auch bei diesen Untersuchungen der Einfluß der freien Einspannlänge L_e gegenüber dem Einfluß von F_e , B_z und H als relativ am größten. Zur Verdeutlichung dieser Abhängigkeit sind in Bild 7 zwei räumliche Diagramme gegenübergestellt. Bild 7a zeigt die Gesamtseitenauslenkungen h_{qr} in Abhängigkeit von der Gesamtvorschubkraft F_v und Gesamtpassivkraft F_p für eine freie Einspannlänge von $L_e = 1700$ mm. Bild 7b gibt unter sonst gleichen Bedingungen für $L_e = 600$ mm. Als Besonderheit ist noch zu erwähnen, daß diese Untersuchungen bei symmetrischer Zweipunktbelastung ($z^* = 2$) durchgeführt wurden, um Beschädigungen des Bandsägeblattes bei Einpunktbelastung durch zu große Gesamtvorschubkräfte zu vermeiden. In beiden Bildern erkennt man deutlich die nicht linearen Kennlinien der Gesamtvorschubkraft für $F_p = \text{const}$ und die linearen Kennlinien der Gesamtpassivkraft für $F_v = \text{const}$. Während bei der großen freien Einspannlänge bereits bei relativ kleinen Werten von F_v und F_p die Gesamtseitenauslenkungen große Werte annehmen, lassen sich bei einer Reduzierung der freien Einspannlänge auf $L_e = 600$ mm die Werte für die Kräfte ungefähr verdoppeln bis verdreifachen, um gleich große Gesamtseitenauslenkungen zu erhalten.

5.6 Einfluß der Belastungsart

Neben den bisher aufgezeigten Einflüssen hängen die Gesamtseitenauslenkungen natürlich von der Belastungsart (Mehrpunktbelastung) ab. Bild 8a zeigt noch einmal das Belastungsschema bei symmetrischer Lastverteilung. Dabei wird das Bandsägeblatt symmetrisch zur Mitte der freien Einspannlänge jeweils mit bis zu 12 Einzelvorschub- und Einzelpassivkräften derart belastet, daß die zugehörige Gesamtvorschubkraft und Gesamtpassivkraft konstant sind. Bild 8b zeigt zunächst für $F_p=0$ die Gesamtseitenauslenkung $h_{qr}=h_{qv}$ in Abhängigkeit von der Gesamtvorschubkraft F_v bei unterschiedlicher Anzahl der belasteten Zähne z^* . Es ergeben sich die für diese Belastungsart typischen Kennlinien, die zunächst schwach und dann stark progressiv über die Gesamtvorschubkraft ansteigen. Diese Untersuchungen machen deutlich, daß die Einpunktbelastung ($z^* = 1$) hinsichtlich der Seitenauslenkungen die ungünstigste Belastungsart darstellt. Unter den hier geltenden Bedingungen, d. h. Aufteilung der Gesamtvorschubkraft als Resultierende in mehrere Einzelvorschubkräfte $F_{v,c} = F_v / z^*$, bedeutet eine Mehrpunktbelastung, daß das Bandsägeblatt eine größere Widerstandsfähigkeit besitzt als bei Einpunktbelastung. Daraus läßt sich folgern, daß die günstigste Belastungsart eine Streckenlast ist. Der sehr steile An-

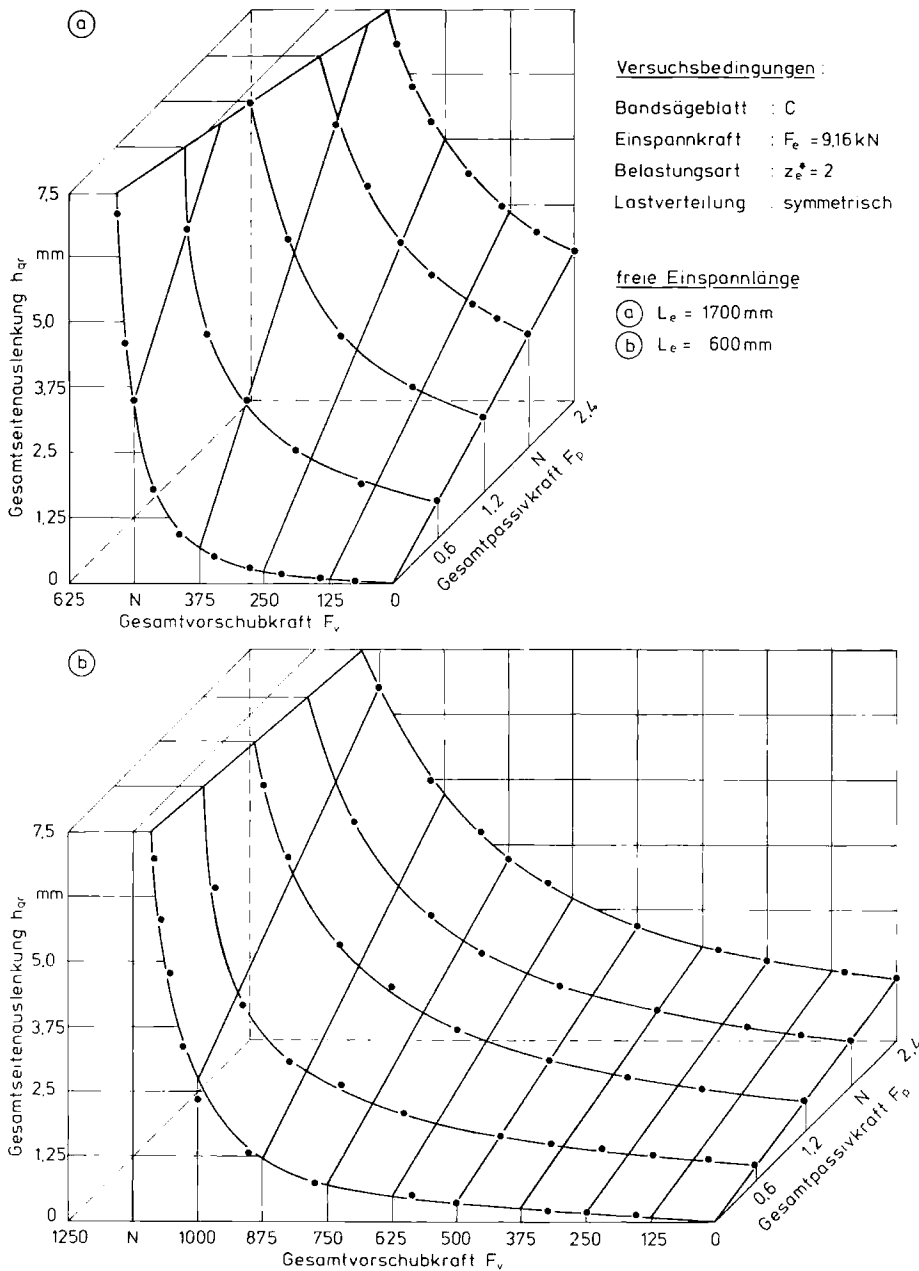


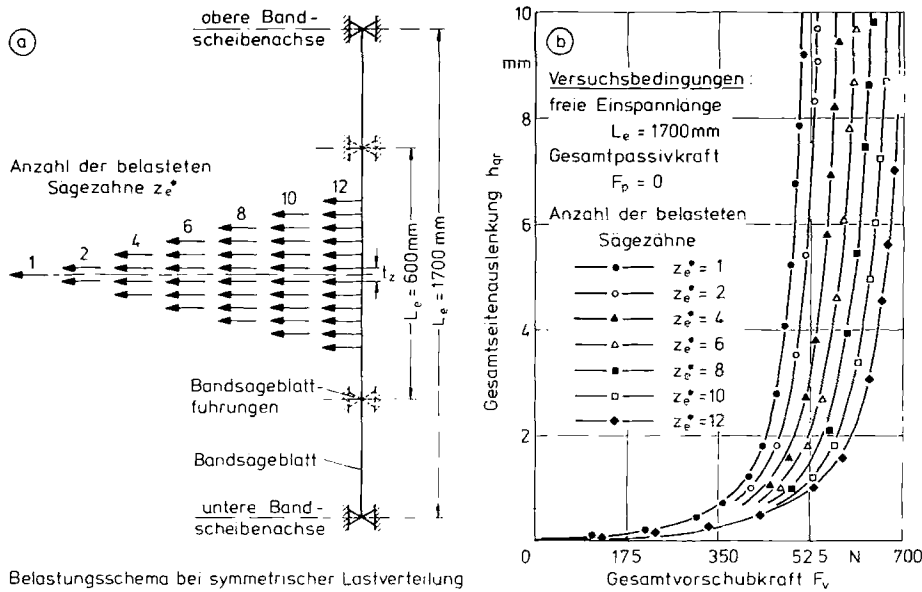
Bild 7. Einfluß der Gesamtvorschubkraft und Gesamtpassivkraft auf die Gesamtseitenauslenkung für zwei verschiedene freie Einspannlängen bei Zweipunktbelastung

stieg der einzelnen Kurven bei großen Gesamtseitenauslenkungen deutet darauf hin, daß für jedes z_e^* ein anderer Wert für die kritische Gesamtvorschubkraft gilt. Andererseits erkennt man jedoch, daß sich in der Anfangsphase, d.h. bei kleinen Gesamtvorschubkräften, die Seitenauslenkungen bei Ein- und Mehrpunktbelastung nicht allzu sehr voneinander unterscheiden.

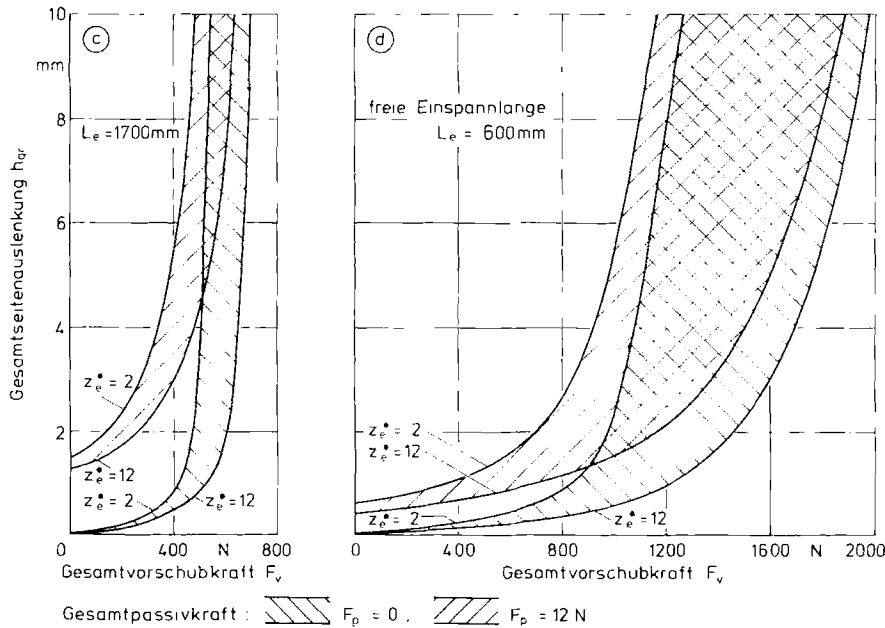
Dieser Sachverhalt ändert sich jedoch, wenn das Bandsägeblatt zusätzlich durch Einzelpassivkräfte belastet wird. In den Bildern 8c und d, die sich hinsichtlich der Versuchsbedingungen nur durch verschiedene Werte für die freie Einspannlänge ($L_e = 1700 \text{ mm}$ bzw. $L_e = 600 \text{ mm}$) unterscheiden, sind deshalb für $F_p = 0$ und $F_p = 12 \text{ N}$ jeweils die Bereiche der Gesamtseitenauslenkungen in Abhängigkeit von der Gesamtvorschubkraft einander gegenübergestellt, wenn die Anzahl der belasteten Zähne von $z_e^* = 2$ auf $z_e^* = 12$ verändert wird. Beide Bilder zeigen, daß sich die entsprechenden Bereiche für große Gesamtvorschubkräfte überschneiden. Für $F_p = 12 \text{ N}$ ergeben sich bei kleinen Gesamtvorschubkräften unterschiedliche Gesamtseitenauslenkungen für verschiedene z_e^* .

Ähnliche Verhältnisse stellen sich ein, wenn das Bandsägeblatt entsprechend dem Belastungsschema in Bild 9a asymmetrisch zur Mitte der freien Einspannlänge mit mehreren Einzelschub- und Einzelpassivkräften belastet wird. Bei dieser Belastungsart, die beim Bandsägen — bei konstanter Gesamtvorschubkraft und Gesamtpassivkraft — den Einfluß der Lastverteilung entsprechend einer zunehmenden Schnitthöhe des Werkstückes aufzeigen soll, ergeben sich für $L_e = 1700 \text{ mm}$, wie das Bild 9c zeigt, gleich große Auslenkungen wie bei symmetrischer Belastung (Bild 8c). Vergleicht man die entsprechenden Bereiche in den Bildern 8d und 9d, so erkennt man, daß für die kurze Einspannlänge von $L_e = 600 \text{ mm}$ die Gesamtseitenauslenkungen bei asymmetrischer Belastung zwar kleiner sind, ein entscheidender Einfluß, besonders im Bereich der Anfangsauslenkungen, läßt sich jedoch nicht feststellen.

Zusammenfassend läßt sich aussagen, daß bei Mehrpunktbelastung grundsätzlich kleinere Gesamtseitenauslenkungen auftreten als bei Einpunktbelastung. Dieser Sachverhalt geht deutlich aus Bild 9b hervor, in dem die Gesamtseitenlenkungen h_{qr} in Abhängigkeit von der Anzahl der belasteten Säge-



Belastungsschema bei symmetrischer Lastverteilung



Versuchsbedingungen Bandsägeblatt: C, Zahnteilung $t_z = 35$ mm, Einspannkraft $F_e = 9,16$ kN

Bild 8. Einfluß der Belastungsart auf die Gesamtseitenauslenkung bei symmetrischer Lastverteilung (Mehrpunktbelastung)

zähne z^* bzw. von der Höhe der Lastverteilung e^* für eine konstante Gesamtvorschubkraft und für verschiedene, konstante Gesamtpassivkräfte dargestellt sind.

6. Ermittlung der Gesamtseitensteifheit

Die experimentellen Untersuchungen der Seitenauslenkungen haben gezeigt, daß, je nachdem ob das Bandsägeblatt in der Arbeitsebene durch die Gesamtvorschubkraft oder senkrecht zur Arbeitsebene durch die Gesamtpassivkraft oder gleichzeitig durch beide Kräfte belastet wird, sich verschiedenartige Kennlinien ergeben. Das Kriterium der Seitensteifheit erweist sich, besonders bei der Beurteilung des Einflusses der Bandsägeblattbreite, als nicht kennzeichnend. Die kritische Gesamtvorschubkraft stellt ein Kriterium dar, mit dem lediglich ein theoretischer Grenzfall beschrieben wird.

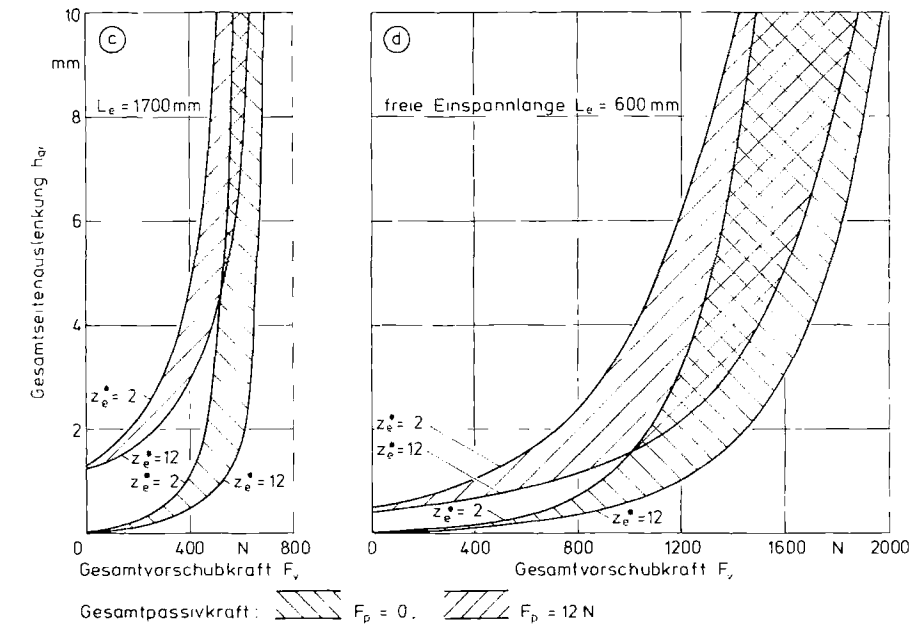
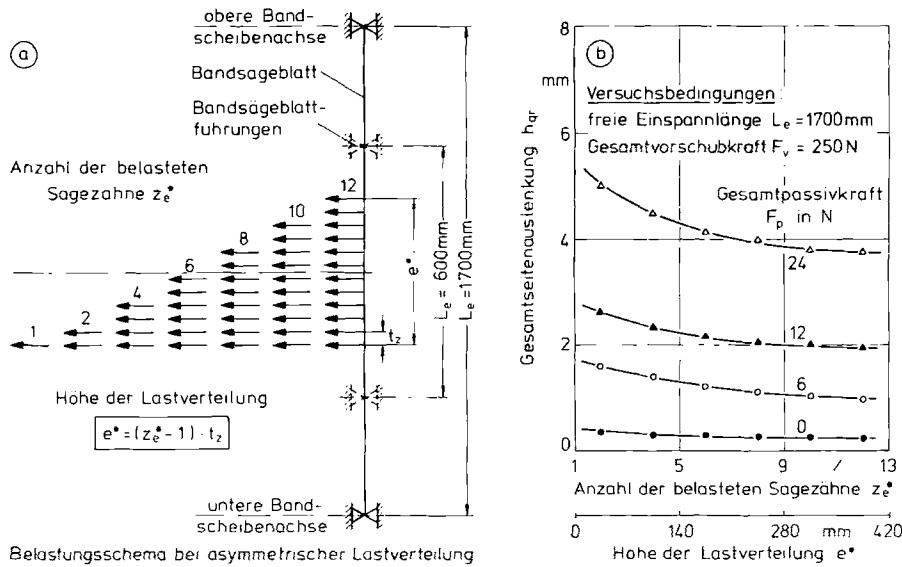
Wie bei der Systematik der Belastungsfälle in der ersten Mitteilung und der Berechnung der Gesamtseitenauslenkungen in der zweiten Mitteilung [Pahlitzsch, Puttkammer

1974a, b] gezeigt wurde, müssen bei der Definition einer Gesamtseitensteifheit folgende zwei Eigentümlichkeiten des allgemeinen Belastungsfalles beachtet werden:

1. die beiden Kräfte F_p und F_r haben unterschiedliche Wirkrichtungen.
2. die Kennlinien der zugehörigen Gesamtseitenauslenkungen sind nicht mehr linear.

Die erste Schwierigkeit läßt sich dadurch beseitigen, daß man die Kräfte F_r und F_p als zwei senkrecht aufeinanderstehende Vektoren deutet und durch geometrische Addition zu einer resultierenden Gesamtkraft F_r , bestimmt durch Größe und Richtung, zusammenfaßt. Die zweite Schwierigkeit führt zwangsläufig zur Definition einer Steifheit, für die anstelle des einfachen Quotienten von resultierender Gesamtkraft F_r und Gesamtseitenauslenkung h_{qr} der entsprechenden Differentialquotienten als Berechnungsvorschrift dient.

Damit steht einer mathematischen Berechnung der Gesamtseitensteifheit nichts mehr im Wege, da ja, wie in der zweiten Mitteilung [Pahlitzsch, Puttkammer 1974b] ausführ-



Versuchsbedingungen. Bandsägeblatt: C; Zahnteilung $t_z = 35\text{mm}$. Einspannkraft $F_e = 9,16\text{kN}$

Bild 9. Einfluß der Belastungsart auf die Gesamtseitenauslenkung bei asymmetrischer Lastverteilung (Mehrpunktbelastung)

lich dargelegt wurde, der formelmäßige Zusammenhang zwischen den Gesamtseitenauslenkungen und den beiden Kräften F_v und F_p und damit auch zwischen h_{qr} und F_r bekannt ist. Wegen des begrenzten Umfangs dieses Beitrages muß hier jedoch auf die rein mathematische Berechnung der Gesamtseitensteifheit verzichtet werden, weil sich sowohl ihre Ableitung als auch ihre Endgleichung als sehr umfangreich erwiesen. Deshalb sei hier nur auf das Schrifttum [Puttkammer 1975] hingewiesen. Eine diagrammatische Auswertung der Endgleichung für Gesamtseitensteifheit — im folgenden *resultierende Kippseitensteifheit* genannt — zeigt jedoch Bild 11, das in den weiteren Ausführungen noch besprochen wird.

Zunächst soll jedoch dargestellt werden, daß es auch möglich ist, durch Auswertung der experimentellen Ergebnisse die resultierende Kipp-Seitensteifheit zu ermitteln. Als Beispiel für diese Auswertung wird das Bild 7 herangezogen, wo in zwei räumlichen Diagrammen der Einfluß der Gesamtvorschub- und Gesamtpassivkraft auf die Gesamtseitenauslenkungen für zwei verschiedene Einspannlängen dargestellt ist.

Ein beliebiger Punkt der Kennlinienfläche in den beiden räumlichen Diagrammen läßt sich auffassen als Schnittpunkt

der Kennlinie $h_{qr} = f(F_v)$ für $F_p = \text{const}$ und der Kennlinie $h_{qr} = f(F_p)$ für $F_v = \text{const}$. Damit lassen sich auch jedem beliebigen Punkt zwei Steigungen zuordnen. Ist nun h_{qr} eine Funktion von F_v und F_p und sind $\tan \alpha_v$ und $\tan \alpha_p$ die zugehörigen Steigungen an die Kennlinien $h_{qr} = f(F_v)$ bzw. $h_{qr} = f(F_p)$, ist weiterhin F_r die Resultierende von F_v und F_p , so berechnet sich die Steigung in einem beliebigen Punkt der zugehörigen Kennfläche in Richtung der Resultierenden F_r mit Hilfe der Differentialgleichung wie folgt:

$$\frac{dh_{qr}}{dF_r} = \frac{F_p}{F_r} \cdot \tan \alpha_p + \frac{F_v}{F_r} \cdot \tan \alpha_v$$

Der Kehrwert des Ausdrucks dh_{qr}/dF_r stellt nun ein allgemeines Kriterium zur Beurteilung der Gesamtseitenauslenkungen dar. Überträgt man diese Umkehrung auf die obige Gleichung, so ergibt sich für die resultierende Kipp-Seitensteifheit folgende Bestimmungsgleichung

$$c_{qr} = \frac{dF_r}{dh_{qr}} = \frac{\sqrt{F_p^2 + F_v^2}}{F_p \cdot \tan \alpha_p + F_v \cdot \tan \alpha_v}$$

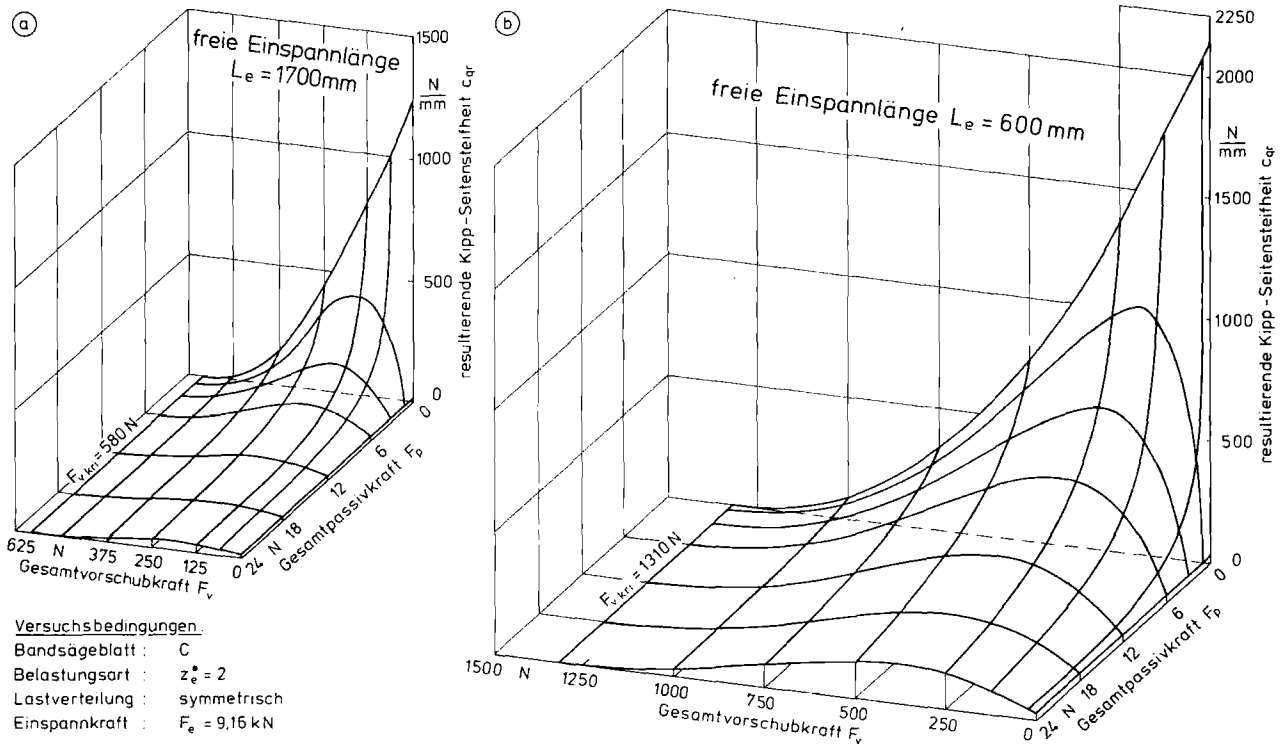


Bild 10. Resultierende Kipp-Seitensteifheit in Abhängigkeit von Gesamtvorschubkraft und Gesamtpassivkraft für zwei verschiedene Einspannlängen (Zweipunktbelastung)

Wertet man die in Bild 7 dargestellte Kennlinienfläche der experimentell gemessenen Gesamtseitenauslenkungen in der Art aus, daß man für jede Konstellation von F_p und F_v zeichnerisch die Steigungen $\tan \alpha_p$ und $\tan \alpha_r$ bestimmt, und setzt die gefundenen Werte in die obige Gleichung ein, so läßt sich für jeden beliebigen Punkt die resultierenden Kippseitensteifheit berechnen.

In Bild 10 sind die so ermittelten Werte der resultierenden Kippseitensteifheit in Abhängigkeit von der Gesamtvorschub- und Gesamtpassivkraft für die beiden verschiedenen Einspannlängen des Bandsägeblattes wiederum in zwei räumlichen Diagrammen dargestellt. Man erkennt in beiden Fällen, daß das Bandsägeblatt solange eine relativ große Steifheit besitzt, wenn es allein durch die Gesamtvorschubkraft belastet ist ($F_p = 0$). Mit wachsender Gesamtvorschubkraft verliert das Bandsägeblatt infolge vorhandener Exzentrizitäten allmählich seine Steifheit. Für den Wert der kritischen Gesamtvorschubkraft nimmt die resultierende Kippseitensteifheit schließlich den Wert Null an. Tritt jedoch neben der Gesamtvorschubkraft zusätzlich die Gesamtpassivkraft als Störgröße auf, so verliert das Bandsägeblatt extrem schnell seine Steifheit.

Derartige experimentell ermittelte Kennliniendiagramme lassen sich auch für die übrigen Bandsägeblattparameter aufstellen.

Da die zeichnerische Auswertung der entsprechenden Meßergebnisse sehr zeitraubend ist, wurde darauf verzichtet. Statt dessen ist, wie bereits zuvor erwähnt, in Bild 11 eine diagrammatische Auswertung der von K. Puttkammer [1975] abgeleiteten mathematischen Gleichung für die resultierende Gesamtseitensteifheit dargestellt.

Bild 11a zeigt zunächst für eine typische Bandsägeblattkonstellation (Einspannkraft $F_e = 12 \text{ kN}$, freie Einspannlänge $L_e = 1750 \text{ mm}$, Sägeblattbreite $B_2 = 100 \text{ mm}$, Sägeblattdicke $H = 1 \text{ mm}$, Exzentrizität $b = 0,5 \text{ mm}$) den Verlauf der resultierenden Kipp-Seitensteifheit c_{qr} in Abhängigkeit von der Gesamtvorschubkraft F_v für verschiedene Werte der Gesamtpassivkraft F_p . Weiterhin sind in das Diagramm folgende Extrem- und Sonderfälle eingezeichnet:

Seitensteifheit $c_{qp} = c_{qr}$ für $F_v = 0$ und $F_p > 0$
 Kippsteifheit $c_{qv} = c_{qr}$ für $F_v > 0$ und $F_p = 0$
 kritische Gesamtvorschubkraft $F_{v,kri} = F_v$ für $c_{qr} = c_{qv} = 0$.

Während die Seitensteifheit c_{qp} und die kritische Gesamtvorschubkraft $F_{v,kri}$ Extremwerte darstellen, für die c_{qr} sehr klein bzw. Null ist, erweist sich die Kippsteifheit c_{qv} als eine obere Grenzkurve, die über der Gesamtvorschubkraft degressiv abfällt. Daß sich der Kippsteifheit auch für $F_v = 0$ ein endlicher Wert zuordnen läßt, resultiert daraus, daß die zugehörige Kennlinie der Seitenauslenkung $h_{qr} = h_{qp}$ bereits im Koordinatenanfangspunkt des Kennliniendiagramms eine endliche Steigung aufweist (Bild 5a). Die Lage der Extremwerte und der Grenzlinie zueinander macht deutlich, daß der eigentliche Sägeprozeß im Bereich zwischen $0 < F_v < F_{v,kri}$ und im Bereich zwischen $c_{qp} < c_{qr} < c_{qv}$ abläuft.

Der Verlauf der Kurven $c_{qr} = f(F_v)$ für $F_p > 0$, die bei $c_{qr} = c_{qp}$ beginnend zunächst einem Maximum zustreben und dann, ähnlich wie die Kippsteifheit, degressiv über der Gesamtvorschubkraft abfallen und für $F_v = F_{v,kri}$ den Wert $c_{qr} = 0$ annehmen, verdeutlicht noch einmal eindringlich, daß das Bandsägeblatt besonders bei sehr kleinen Gesamtvorschubkräften sehr empfindlich auf seitliche Störungen durch die Gesamtpassivkraft reagiert.

Aus dem Bild 11b läßt sich der Einfluß der Bandsägeblattparameter sowie der Exzentrizität b auf die resultierende Kipp-Seitensteifheit entnehmen. Ausgehend von der bereits im Bild 11a gewählten Bandsägeblattkonstellation wird bei einer konstanten Gesamtvorschubkraft von $F_v = 100 \text{ N}$ und einer konstanten Gesamtpassivkraft von $F_p = 0,5 \text{ N}$ jeweils ein Parameter geändert, während die übrigen konstant gehalten werden. Aus dem Verlauf der verschiedenen Kurven erkennt man, daß sich die Steifheitsverhältnisse dadurch günstiger gestalten, daß man die Einspannkraft F_e , die Bandsägeblattbreite B_2 und die Bandsägeblattdicke H vergrößert sowie die freie Einspannlänge L_e verringert. Eine Reduzierung der Exzentrizität b , die als Störgröße aufzufassen ist, läßt sich jedoch ohne weiteres nicht erreichen.

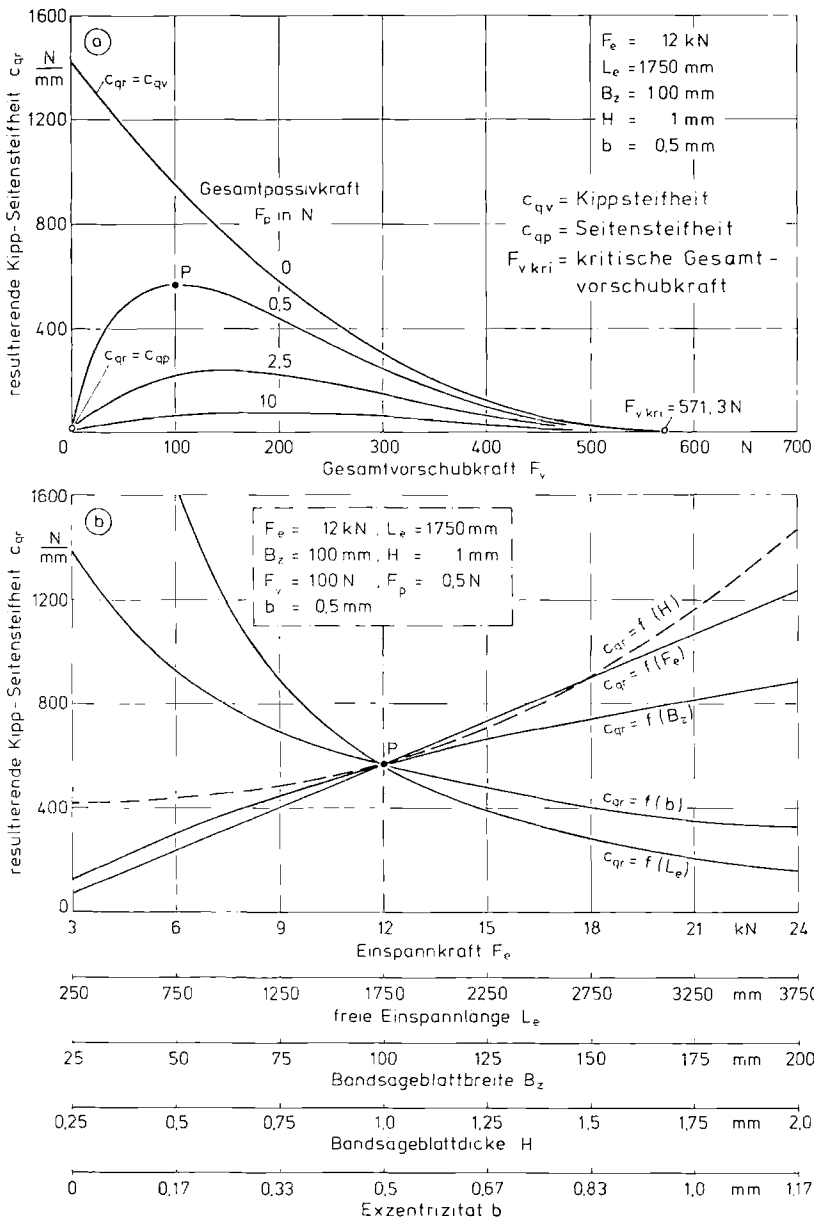


Bild 11. Resultierende Kipp-Seitensteifheit in Abhängigkeit von verschiedenen Einflußgrößen (theoretisch)

Berücksichtigt man die für die Bruchsicherheit von Bandsägeblättern geltenden Abhängigkeiten [Pahlitzsch, Puttkammer 1972], so lassen sich aus den hier vorliegenden Untersuchungen folgende Maßnahmen zur Verbesserung der Steifheitsverhältnisse als Hinweise für die Praxis ableiten:

- a) Zur Vermeidung von Unsymmetrien an den Sägezähnen müssen diese besonders sorgfältig gestaucht, geschliffen und egalisiert werden.
- b) Größere Steifheiten setzen vor allem kleine freie Einspannlängen voraus. Eine effektive Erhöhung der Steifheit durch Reduzierung der freien Einspannlänge läßt sich jedoch nur dann erreichen, wenn durch Bandsägeblattführungen ein wirklicher Einspanneffekt erzielt wird. Das ist jedoch bei den üblichen Bandsägeblattführungen nicht der Fall.
- c) Eine Erhöhung der Einspannkraft wirkt sich positiv auf die Steifheit aus, vermindert jedoch die Bruchsicherheit.
- d) Durch eine Vergrößerung der Bandsägeblattbreite lassen sich sowohl die Steifheits- als auch die Spannungsverhältnisse günstig beeinflussen.
- e) Es ist durchaus möglich mit kleineren Bandsägeblatt-dicken ($H/D_B < 0,001$) zu sägen, weil in diesem Bereich die

Bruchsicherheit ein Maximum annimmt und die Steifheit sich nicht entscheidend ändert.

7. Schrifttum

Pahlitzsch, G., Puttkammer, K. 1972. Die Beanspruchung von Bandsägeblättern: Spannungen und Festigkeitsgrenzen. Holz Roh-Werkstoff **30** (5): S. 165–174

Pahlitzsch, G., Puttkammer, K. 1974. Beurteilungskriterien für die Auslenkungen von Bandsägeblättern – Erste Mitteilung: Systematik der Belastungsfälle. Holz Roh-Werkstoff **32** (2): S. 52–57

Pahlitzsch, G., Puttkammer, K. 1974. Beurteilungskriterien für die Auslenkungen von Bandsägeblättern – Zweite Mitteilung: Berechnung der Auslenkungen. Holz Roh-Werkstoff **32** (8): S. 295–302

Pahlitzsch, G., Puttkammer, K. 1975. Schnittversuche beim Bandsägen. Holz Roh-Werkstoff **33** (5): S. 181–186

Pahlitzsch, G., Puttkammer, K. 1976. Schnittversuche beim Bandsägen. Holz Roh-Werkstoff **34** (1): S. 17–21

Puttkammer, K. 1975. Spannungs- und Steifheitsuntersuchungen an Bandsägeblättern für die Holzbearbeitung. Diss. TU Braunschweig