

新 制
I
617

京大附図

Über das Warmwalzen für die Breitenabnahme der stranggegossenen Brammen

von
Hirohiko Takuda

1984

Über das Warmwalzen für die Breitenabnahme
der stranggegossenen Brammen

von
Hirohiko Takuda

1984

V O R W O R T

Die vorliegende Dissertation wurde von Herrn Professor Dr.-Ing. J. Kokado angeregt. An dieser Stelle möchte ich ihm für die freundliche Betreuung der Arbeit danken.

Mein aufrichtiger Dank gilt auch den Herren a.o. Professor Dr.-Ing. N. Hatta und Dr.-Ing. K. Mori für ihre wertvollen Hinweise bei der Durchführung der Forschung.

Nicht minder sei dem Kultusministerium für die finanzielle Unterstützung der Arbeit gedankt.

I N H A L T S V E R Z E I C H N I S

	Seite
1. EINLEITUNG	1
1.1. Bedeutung der Breitenabnahme der strang- gegossenen Brammen beim Warmwalzen vor der Warmbreitbandstraße	1
1.2. Bisherige Forschungsergebnisse	3
1.3. Zweck und Inhalt dieser Arbeit	7
2. EXPERIMENT UND ANALYSE ÜBER DAS VERTIKALWALZEN DER BRAMMEN MIT FLACH- UND KALIBERWALZE	10
2.1. Einleitung	10
2.2. Versuchsmethode	10
2.3. Berechnungsverfahren	13
2.3.1. Ansatz der Grundgleichungen für das in der Rechnung benutzte starr-plastische Finite-Elemente-Verfahren	13
2.3.2. Berücksichtigung der Abhängigkeit der Materialsfließspannung von der Dehnung und von der Dehngeschwindigkeit	15
2.3.3. Die für die Rechnung benutzten räum- lichen finiten Elemente	17
2.3.4. Rechenmodell für das Vertikalwalzen mit Flach- und Kaliberwalze	19
2.4. Experimentelle und analytische Ergebnisse	23
2.4.1. Querschnittform der Bramme nach dem Vertikalwalzen	23
2.4.2. Einfluß der Abhängigkeit der Materials- fließspannung von der Dehnung und von der Dehngeschwindigkeit auf die Hunde- knochenform	27

	Seite
2.4.3. Walzkraft und Walzmoment beim Vertikalwalzen	28
2.4.4. Walzeigenschaft beim Horizontalwalzen des hundeknochenförmigen Walzgutes	30
2.4.5. Anwendung des analytischen Verfahrens über das Vertikalwalzen auf die praktischen Stahlbrammen	32
2.5. Zusammenfassung	35
3. EXPERIMENT UND ANALYSE ÜBER DAS HORIZONTALWALZEN DES HUNDEKNOCHENFÖRMIGEN WALZGUTES	37
3.1. Einleitung	37
3.2. Versuchs- und Berechnungsverfahren	37
3.2.1. Versuchsverfahren	37
3.2.2. Berechnungsverfahren	38
3.3. Experimentelle und analytische Ergebnisse	41
3.3.1. Experimentelle Ergebnisse über die Wirkung des Hundeknochendickenverhältnisses und des Gipfelstellenverhältnisses auf den Walzvorgang	41
3.3.2. Vergleich zwischen den experimentellen und analytischen Ergebnissen	44
3.3.3. Rechnerische Ergebnisse über die Wirkung des Hundeknochendickenverhältnisses und des Gipfelstellenverhältnisses auf den Walzvorgang	45
3.4. Zusammenfassung	48
4. VERTEILUNG DER IM WALZGUT HERVORGERUFENEN SPANNUNGEN BEIM BREITENABNAHMENPROZESS	49
4.1. Einleitung	49

	Seite
4.2. Versuchs- und Berechnungsverfahren	49
4.2.1. Versuchsmethode	49
4.2.2. Rechnerische Methode	50
4.3. Experimentelle und berechnete Ergebnisse	52
4.3.1. Spannungsverteilung während des Vertikalwalzens mit Kaliberwalze	52
4.3.2. Spannungsverteilung während des Horizontalwalzens des hundeknochenförmigen walzgutes	56
4.3.3. Einfluß der Form der Vertikalwalze auf die Spannungsverteilung	58
4.3.4. Einfluß der Größe der Breitenabnahme auf die Spannungsverteilung	62
4.5. Zusammenfassung	63
5. EINFLUSS DES WALZENDURCHMESSERS UND DER BRAMMENBREITE AUF DIE WALZEIGENSCHAFTEN BEIM WALZEN FÜR DIE BREITENABNAHME DER BRAMMEN	65
5.1. Einleitung	65
5.2. Versuchsmethode	65
5.3. Versuchsergebnisse und Betrachtung	66
5.3.1. Einfluß des Walzendurchmessers auf die Walzeigenschaften	66
5.3.2. Einfluß der Brammenbreite auf die Walzeigenschaften	71
5.3.3. Berechnung der Walzeigenschaften beim Vertikalwalzen der Stahlbrammen mit dem Finite-Elemente-Verfahren	76
5.4. Zusammenfassung	80

	Seite
6. EINFLUSS DER TEMPERATURVERTEILUNG IM WALZGUT AUF DIE HUNDEKNOCHENFORM BEIM VERTIKALWALZEN	82
6.1. Einleitung	82
6.2. Experimentelle und rechnerische Methode	83
6.2.1. Experimentelle Methode	83
6.2.2. Rechnerische Methode	84
6.3. Experimentelle und rechnerische Ergebnisse	85
6.4. Betrachtung	90
6.5. Zusammenfassung	92
7. FORMÄNDERUNG DER BRAMMEN UND KRAFTBEDARF BEIM MEHRSTUFIGEN WALZEN FÜR DIE BREITENABNAHME	94
7.1. Einleitung	94
7.2. Versuchsmethode	94
7.3. Experimentelle Ergebnisse	97
7.3.1. Veränderung der Querschnittform des Walzgutes im ständigen Umformungsbereich	97
7.3.2. Veränderung der Länge des Schopf-Endes	102
7.3.3. Veränderung des Walzmomentes und der Walzkraft	104
7.4. Zusammenfassung	106
8. EINWIRKUNG DES WALZENS FÜR DIE BREITENABNAHME AUF DIE MAKROSTRUKTUR UND AUF DIE MECHANISCHEN EIGENSCHAFTEN DER STRANGGEGOSSENEN BRAMMEN	108
8.1. Einleitung	108
8.2. Versuchsmethode	109
8.3. Versuchsergebnisse und Betrachtung	111
8.3.1. Änderung der Querschnittform des Walz- gutes beim V.H-Walzen	111

	Seite
8.3.2. Einfluß des Walzens für die Breiten- abnahme auf die Makrostruktur	113
8.3.3. Änderung der mechanischen Eigenschaften des Walzgutes	116
8.4. Zusammenfassung	119
9. ZUSAMMENFASSUNG	121
SCHRIFTTUM	128

1. EINLEITUNG

1.1. Bedeutung der Breitenabnahme der stranggegossenen Brammen beim Warmwalzen vor der Warmbreitbandstraße

Das erstmals im Jahre 1960 für Stahl praktisch angewendete Stranggießverfahren wurde in den letzten Jahren technisch stark verbessert. Das Verhältnis des durch das Stranggießverfahren erzeugten Rohstahls zur gesamten Rohstahlerzeugung nimmt von Jahr zu Jahr zu, besonders stark in Japan. Dies kommt erstens daher, daß das Ausbringen beim Stranggießverfahren über 10 % höher ist als beim Blockverfahren, und zweitens daß sein Energieverbrauch etwa $200 \sim 250 \cdot 10^3$ kcal/t-RS geringer ist. Ferner ist zu erwähnen, daß die Qualität der stranggegossenen Brammen besser ist als die der nach dem Blockverfahren erzeugten Brammen. Zum Beispiel hat das aus stranggegossenen Brammen warmgewalzten Stahlband eine geringere Streuung der Härte und der Festigkeit und eine größere Festigkeit zur Übergangstemperatur als das Stahlband, das aus den nach dem Blockverfahren erzeugten Brammen warmgewalzt ist. Früher wurde die nach dem Stranggießverfahren gewonnenen Brammen zunächst einmal auf die Zimmertemperatur abgekühlt, damit die Schrammen auf ihrer Oberfläche abgehobelt werden können. Durch die technische Entwicklung wurde aber die Oberflächenqualität so verbessert, daß dieser Vorgang unnötig wurde.

Daher werden heute die Brammen für die Warmbreitbandstraße meistens, über 90 % in Japan, im Strangguß hergestellt. In

der Warmbreitbandstraße sind Brammen mit verschiedenen Breiten erforderlich. Sie werden gewöhnlich durch die Veränderung der Kokillenbreite während des Gießens erzeugt. Es ist jedoch günstiger, die Brammen mit gleichbleibender Breite und Dicke strangzugießen, um die Gießgeschwindigkeit konstant zu halten. Dies erleichtert die Abstimmung auf die Geschwindigkeit der Stahlerzeugung, die Kontrolle der Brammenqualität, die Automatisierung und die Vereinfachung des Stranggießverfahrens und nicht zuletzt erhöht es das Ausbringen der Brammen. Deshalb hat man sich bemüht, Vorbrammen mit beliebiger Breite aus einem mit konstanter Breite vergossenen Strang durch Vertikal- und Horizontalwalzen herzustellen. Im Jahre 1980 wurde schließlich ein solches Verfahren mit Erfolg in Japan (Nippon Steel Corporation, Hütte-Oita) festgestellt. Und zwar werden die mit einer maximalen und konstanten Breite von 1900 mm und mit einer Dicke von 280 mm in drei Stranggießanlagen erzeugten Brammen durch die Anlage der Breitenabnahme mit den zwei Vertikalwalzen und dazwischen befindlichen Horizontalwalze zur Vorbrammen mit einer beliebigen Breite von 1900 mm bis auf 750 mm gewalzt, mit einer Walzgeschwindigkeit von etwa 1,0 m/s. Die Erzeugungsfähigkeit der Vorbrammen nach diesem Verfahren ist drei- bis viermal größer als die der einzelnen Stranggießanlage mit zwei Stränge. Dies bedeutet, daß das Verfahren wirtschaftlich ungünstig ist, wenn die Anzahl der Stranggießanlage weniger zwei ist. In diesem Falle sollte man die Kokillenbreite ändern, wenn man die Breite der Brammen groß ändern will, und sollte man die Brammenbreite durch eine vor der Vorstraße der Warmbreitbandstraße neu ge-

bauten Vertikalwalze ändern, wenn man die Breite der Brammen um weniger als 300 mm abnehmen will.

Es sind beim Planen solch einer Anlage wichtige und schwierige Fragen, welche Leistung der Motor haben soll, welche Form und welchen Durchmesser die Vertikalwalze haben soll und wie sich die Verteilung der Spannungen im Walzgut durch die Walzbedingungen verändert.

1.2. Bisherige Forschungsergebnisse

Wenn die Bramme durch die Vertikalwalze in der Breitenrichtung gewalzt wird, verdicken sich die Brammenseiten, und ihre Querschnitt nimmt die sogenannte "Hundeknochenform" an. Daher ist das Horizontalwalzen erforderlich, um die Bramme wieder zu ebenen, dadurch wird jedoch die Brammenbreite wieder etwas ausgebreitet. Das Umformverhalten der Brammen läßt sich für diese Fälle nicht anhand der bisherigen Walztheorien^{1,2)} diskutieren.

Das Walzen der Brammen in ihrer Breitenrichtung unterscheidet sich in der Walzgeometrie vom Flachwalzen durch ein wesentlich geringes Walzspaltverhältnis, meistens viel kleiner als 1,0, worunter hier das Verhältnis der gedrückten Länge im Walzspalt zur eingestellten Walzgutbreite zu verstehen ist. Das Walzspaltverhältnis beim Block- und manchmal Dickplattenwalzen hat einen Wert von etwa 1,0. Deswegen müssen die Untersuchungsergebnisse über diese beiden Walzverfahren für die Untersuchung des Vertikalwalzens nützlich sein.

Die Walzkraft beim Dickplattenwalzen wurde bisher mit einigen

Berechnungsmethoden, die z.B. von Saito³⁾, Nakajima⁴⁾, Macgregor⁵⁾ usw. unter Berücksichtigung des sogenannten "Peening Effect" ergriffen wurden, berechnet.

Die Walzkraft beim Blockverfahren, wobei das Walzgut horizontal- und vertikalgewalzt wird, wurde berechnet anhand der Walzkraftfunktion, die aus der Berechnungsmethode beim Dickplattenwalzen herausgezogen und durch die Betriebsdaten kompensiert worden war.⁶⁾ Diese Berechnungsmethoden sind aber auf der bisherigen Walztheorie im Fall der Platte begründet und deshalb für das Vertikalwalzen nur schlecht anwendbar.

Zur Berechnung der Ausbreitung des Materials beim Dickplattenwalzen sind einige rechnerischen Modelle von Yanagimoto⁷⁾, Gokyu et al.⁸⁾ und in den letzten Jahren von Kihara et al.^{9,10)}, Kato et al.¹¹⁾ usw. vorgeschlagen worden. Es ist jedoch unmöglich, daß man das Umformverhalten von Brammen beim Vertikalwalzen und beim Horizontalwalzen des Walzgutes mit einer Hundeknochenform anhand der obigen vorgeschlagenen Modelle ermittelt.

Es bestand daher die Notwendigkeit, auf einem neuen Gesichtspunkt über das Umformverhalten des Walzgutes und über die Walzeigenschaften, nämlich die Walzkraft, das Walzmoment usw., beim Warmwalzen der Brammen in ihrer Breitenrichtung zu untersuchen.

Nagata et al.^{12,13)} und Saito et al.^{14,15)} haben ungefähr gleichzeitig die experimentellen Untersuchungen über das Umformverhalten der Brammen beim Vertikal- und Horizontalwalzen mit Flachwalze durchgeführt, und Saito et al. haben eine empirische Gleichung zu den Walzeigenschaften vorgeschlagen.

Kurz danach haben Pawelski et al.¹⁶⁾ eine Untersuchung über die

Möglichkeit und Grenze der Umformung in Breitenrichtung beim Warm-Flachwalzen berichtet.

Nagata et al.^{17,18)} und Watanabe et al.¹⁹⁾ haben eine ähnliche experimentelle Untersuchung über das Umformverhalten des Walzgutes beim Kaliberwalzen durchgeführt.

Eine analytische Forschung über die Walzkraft wurde seit 1977 angefangen. Nämlich haben Watanabe et al.²⁰⁾ unter der Annahme, daß die Bramme in ihrer Breitenrichtung ins Umform- und ins Nicht-Umformbereich eingeteilt werden könne, eine die Walzkraft beim Vertikalwalzen mit Flachwalze gebende Berechnungsgleichung aufgestellt. Nagata et al.²¹⁾ haben eine Berechnungsgleichung zur Walzkraft beim Horizontalwalzen der hundeknochenförmigen Brammen unter der Annahme gegeben, daß die Walzkraft der hundeknochenförmigen Bramme mit der jener zwei rechteckigen Teile gleich sei, die einen gleichwertigen Flächenraum haben mit den Hundeknochenteile der Bramme. Suzuki et al.²²⁾ haben auch eine Berechnungsgleichung zur Walzkraft beim Vertikalwalzen mit kaliberwalze unter der Annahme gegeben, daß die an die Kaliberwand wirkende Kraft mit der an den Kaliberboden wirkenden durchschnittlichen Kraft gleich sei.

Jedes des Berechnungsergebnisses aus diesen Gleichungen stimmt mit jedem entsprechenden experimentellen Ergebnis nur schlecht überein und zeigt manchmal über 20 % Fehler.

Einige allgemeine Vorausberechnungsmodelle des Umformverhaltens und der Walzeigenschaften der Bramme wurde von Hino et al.,²³⁾ Tanaka et al.^{24~27)} und Hamazu et al.²⁸⁾ durch die aufgrund der bisherigen Walztheorien vorgenommene Regressionsanalyse der zahlreichen Untersuchungsergebnisse vorgeschlagen. Jedes dieser

Modelle zeigt gute Übereinstimmung mit den Berechnungen im Bereich der dem Modell entsprechenden experimentellen Bedingungen. Aber wenn sich die experimentellen Bedingungen ändern, gelangt man natürlich zu schlechtem Ergebnis.

Tanaka et al. und Hamauzu et al. haben über den Wirkungsgrad der Zugspannung zwischen den Gerüsten auf die Umformung und auf die Walzkraft in der Tandemstraße untersucht. In letzter Zeit sind auch die im Betrieb geschehenden Probleme berichtet worden.^{29~31)}

Beim Vertikalwalzen der Brammen wird der sogenannte Fischschwanz durch die am Kopf- und Fußende der Brammen erzeugte unständige Umformung gebildet, und er ruft die Abnahme der Ausbeute hervor.^{32~35)} Dies ist ein großes Problem im Betrieb. Um die Abnahme der Ausbeute zu vermeiden, haben sich einige praktische Maßnahmen entwickelt.^{36~47)}

Die Ergebnisse in den oben angegebenen experimentellen Berichten sind nur unter den jede Untersuchung voraussetzenden Bedingungen gültig und haben keine allgemeine Gültigkeit. Dies kommt erstens daher, daß die Forschungsergebnisse anhand der nur im Fall der zweidimensionalen Umformung gültigen Walztheorie gebracht waren oder durch die Regressionsanalyse in einer empirischen Gleichung geordnet waren, und zweitens daß jeder Untersuchungsbereich zu eng war, um die allgemeine Beeinflussung der Walzbedingungen auf das Umformverhalten und auf die Walzeigenschaften in Erwägung zu ziehen.

Daher stand es ungeduldig zu erwarten, daß die grundsätzlichen und anwendbaren Untersuchungen über das Vertikal- und Horizon-

tal-Warmwalzen der Brammen durchgeführt werden und dadurch die Anleitung zur Planung solch einer Anlage gegeben wird.

1.3. Zweck und Inhalt dieser Arbeit

Die Wichtigkeit der Untersuchung über die Breitenabnahme der Brammen wird in den letzten Jahren größer mit der wachsenden Erzeugung der stranggegossenen Brammen und mit der Entwicklung der unmittelbaren Walzungsmethode, mit der die stranggegossenen Brammen ohne Anwendung des Heizofens in die Warmbreitbandstraße gefördert werden können. Infolgedessen wurde eine Reihe von den Untersuchungen über das Walzen der Brammen in ihrer Breitenrichtung durchgeführt und daraus kamen zahlreiche Erfolge. Aber noch bleiben viele Probleme offen, um diese Walzungsmethode zum Betrieb zu bringen, wie sie in 1.2. dargestellt wurden.

Unter Berücksichtigung dieser Situationen wurde eine experimentelle und analytische Untersuchung durchgeführt, um die unklaren Punkte zu erklären und die benutzbaren Unterlagen zur Planung einer praktischen Anlage beizubringen^{48~63)}.

Nämlich wurde der Einfluß der Gestalt der Vertikalwalze, des Walzendurchmessers, der Brammenbreite und der Brammentemperatur auf das Umformverhalten der Brammen und auf die Walzeigenschaften, i.e. die Walzkraft, das Walzmoment und die Innenspannungen, anhand der Aluminiumplatten, der Plasticine-Platten, und der Stahlplatten experimentell untersucht. Gleichzeitig wurde eine analytische Untersuchung über das Umformverhalten der Brammen und über die Walzeigenschaften nach dem starr-

plastischen Finite-Elemente-Verfahren unter Berücksichtigung der Abhängigkeit der Fließspannung des Walzgutes von der Dehnung, von der Dehngeschwindigkeit und von der Temperaturverteilung im Walzgut durchgeführt.

Der Inhalt der Untersuchung wird in den folgenden sieben Kapiteln ausführlich geschrieben, und die erbrachten Ergebnisse werden im Kapitel 9 zusammengefaßt.

Im zweiten Kapitel wird der Walzvorgang beim Vertikalwalzen mit Flach- und Kaliberwalze untersucht. Und zwar wird die Wirkung der Größe der Breitenabnahme und der Gestalt der Walze auf die Hundeknochenform, auf die Walzkraft, auf das Walzmoment und auf die Ausbreitungsgröße beim nachfolgenden Horizontalwalzen wird experimentell untersucht. Gleichzeitig wird ein rechnerisches Modell aus starr-plastischen finiten Elementen zum Ermitteln des Walzvorganges beim Vertikalwalzen vorgeschlagen, und das rechnerische Ergebnis wird im Vergleich mit den gemessenen Werten dargestellt.

Im dritten Kapitel wird ein rechnerisches Modell zum Ermitteln des Walzvorganges beim Horizontalwalzen des hundeknochenförmigen Walzgutes vorgeschlagen, und der Zusammenhang zwischen der Hundeknochenform und dem Walzvorgang wird experimentell und analytisch untersucht.

Im vierten Kapitel werden die durch das Vertikal- und Horizontalwalzen hervorgerufenen Spannungen im Walzgut experimentell und nach dem im zweiten und dritten Kapitel dargestellten Verfahren rechnerisch untersucht.

Im fünften Kapitel wird der Einfluß des Walzendurchmessers und der Brammenbreite auf den Walzvorgang beim Vertikal- und

Horizontalwalzen untersucht.

Im sechsten Kapitel wird der Einfluß der Walzgutstemperatur, besonders der Einfluß der Temperaturverteilung im Walzgut in der Breitenrichtung, auf das Umformverhalten beim Vertikalwalzen untersucht.

Im siebten Kapitel wird die Veränderung der Brammenform und der erforderlichen Walzleistung beim mehrstufigen Walzen mit verschiedenen Stichplänen experimentell untersucht.

Im achten Kapitel wird die Einwirkung des Walzens für die Breitenabnahme auf die Makrostruktur und auf die mechanischen Eigenschaften des Walzgutes, besonders der Brammenseiten, worauf sich die Formänderung beim Vertikal- und Horizontalwalzen konzentriert, experimentell untersucht.

2. EXPERIMENT UND ANALYSE ÜBER DAS VERTIKALWALZEN DER BRAMMEN MIT FLACH- UND KALIBERWALZE

2.1. Einleitung

In diesem Kapitel werden zunächst die Ergebnisse des Modellversuches über das Vertikalwalzen berichtet, das anhand der Flachwalze und der Kaliberwalzen mit dreiartigen Kaliberwinkeln durchgeführt wurde, um hauptsächlich die Zusammenhänge der Breitenabnahme mit dem Umformverhalten der Brammen, der Walzkraft und dem Walzmoment zu erklären. Zweitens wird ein rechnerisches Modell aus starr-plastischen finiten Elementen zum Ermitteln des Umformverhaltens von Brammen beim Vertikalwalzen unter Berücksichtigung der Abhängigkeit der Materialsfließspannung von der Dehnung und von der Dehngeschwindigkeit vorgeschlagen. Die Gültigkeit des hier vorgeschlagenen rechnerischen Modells wird im Vergleich mit den experimentellen Ergebnissen bestätigt.

2.2. Versuchsmethode

Als Walzgut wurden Aluminiumplatten mit einer Breite von 85 mm und einer Dicke von 12 mm benutzt. Diese Größe entspricht etwa 1/20 der praktisch stranggegossenen Brammen mit einer Breite von 1800 mm und einer Dicke von 250 mm. Das Walzgut wurde im Heizofen auf eine Temperatur von 500°C erwärmt und dann gewalzt. Die Fließspannung σ des benutzten Werkstoffes bei dieser Temperatur wurde gemessen und mit der folgenden

Gleichung dargestellt:

$$\sigma = 20,6 \cdot \epsilon^{0,12} \cdot \dot{\epsilon}^{0,15} \quad \text{in N/mm}^2 \quad (2-1)$$

Darin ist ϵ die Vergleichsdehnung und $\dot{\epsilon}$ die Vergleichsdehngeschwindigkeit. Die Gleichung zeigt, daß sich die Fließspannung der benutzten Aluminiumplatten mit der Dehnung und der Dehngeschwindigkeit genau so ähnlich verändert wie bei dem erwärmten Stahle, und daß deshalb das Werkstoff zum Ersatzmodellstoff für den Stahl geeignet ist.

Als Vertikalwalze wurden die in Bild 2-1 gezeigten Flach- und Kaliberwalzen mit einem Durchmesser von 80 mm benutzt. Der Kaliberwinkel war 10° , 20° und 30° . Die Drehgeschwindigkeit der Walze war 63,5 mm/s.

Das hundeknochenförmige Walzgut nach dem Vertikalwalzen wurde durch die Flachwalze mit einem Durchmesser von 180 mm und mit einer Drehgeschwindigkeit von 80~100 mm/s bis zu seiner Anfangsdicke horizontalgewalzt. Betreffs der Querschnittform des Walzgutes vor und nach dem Walzen wurden die in Bild 2-2 gezeigten Größen gemessen. Die Walzkraft und das Walzmoment wurden gleichzeitig gemessen.

Die benutzten Bezeichnungen sind in Tafel 2-1 zusammengestellt.

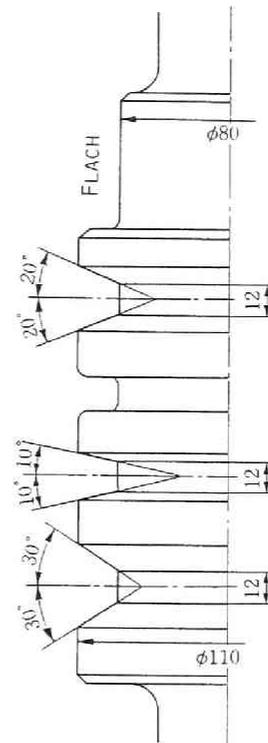
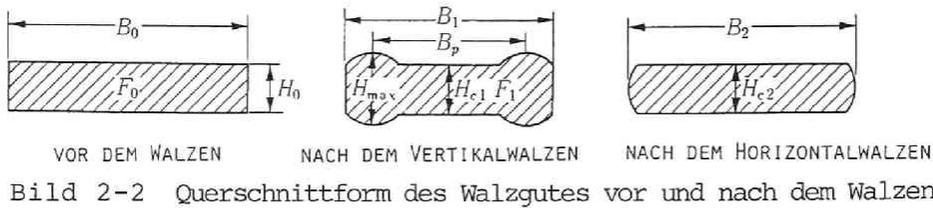


Bild 2-1 Profil der Vertikalwalze



Tafel 2-1 Bezeichnungen

B_0	: Anfangsbreite
H_0	: Anfangsdicke
F_0	: Anfangsquerschnitt
B_1	: Breite nach dem Vertikalwalzen
B_p	: Gipfelbreite
H_{max}	: Hundeknochendicke
H_{c1}	: Zentrumsdicke nach dem Vertikalwalzen
F_1	: Querschnitt nach dem Vertikalwalzen
B_2	: Breite nach dem Horizontalwalzen
H_{c2}	: Zentrumsdicke nach dem Horizontalwalzen
$B_0 - B_1$: Breitenabnahme (= ΔB)
$(B_0 - B_1) / B_0$: Breitenabnahmenverhältnis (B.A.V.)
$B_2 - B_1$: Ausbreitungsgröße
$B_0 - B_2$: Effektivbreitenabnahme
$(B_0 - B_2) / B_0$: Effektivbreitenabnahmenverhältnis
$(F_0 - F_1) / F_0$: Querschnittabnahmenverhältnis
H_{max} / H_0	: Dickenverhältnis des Hundeknochens
H_{c1} / H_0	: Zentrumsdickenverhältnis nach dem Vertikalwalzen
B_p / B_1	: Gipfelstellenverhältnis
$(B_1 - B_p) / 2$: Gipfelstelle
H_{c2} / H_0	: Zentrumsdickenverhältnis nach dem Horizontalwalzen
$(H_0 - H_{c2}) / H_0$: Abnahmenverhältnis der Zentrumsdicke

Wenn die Breitenabnahme größer als die Grenze des Greifwinkels war, wurde der Kopf des Walzgutes vor dem Walzen gespitzt, um den experimentellen Bereich der Breitenabnahme auszubreiten.

2.3. Berechnungsverfahren

2.3.1. Ansatz der Grundgleichungen für das in der Rechnung benutzte starr-plastische Finite-Elemente-Verfahren

Für die Rechnung wurde das von Mori et al. aufgestellte starr-plastische Finite-Elemente-Verfahren^{64,65)} angewandt. In dem Verfahren werden die Grundgleichungen der Plastizität für ein kompressibles Material⁶⁶⁾ auf die für ein nichtkompressibles Material angewandt, indem man die Kompressibilität als sehr klein ansetzt.

Nimmt man an, daß die Vergleichsspannung σ in der v. Misesschen Fließbedingung ein wenig von der hydrostatischen Spannung σ_m abhängt, so kann man schreiben:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{2} \{(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2 + 6(t_{xy}^2 + t_{yz}^2 + t_{zx}^2)\} + g\sigma_m^2}. \quad (2-2)$$

Darin ist g ein kleiner Wert (z.B. kleiner als 10^{-2}), der dem eigentlich nicht kompressiblen Material eine kleine (scheinbare) Kompressibilität gibt. Für den Zusammenhang zwischen den Spannungen und den Dehngeschwindigkeiten erhält man aus der Gleichung zur Fließbedingung (2-2) und aus der inkrementellen Dehnungstheorie folgende Gleichungen:

$$\sigma_x = \sigma \left\{ \frac{2}{3} \dot{\epsilon}_x + \left(\frac{1}{g} - \frac{2}{9} \right) \dot{\epsilon}_y \right\} / \dot{\epsilon}$$

$$\begin{aligned}\sigma_y &= \sigma \left\{ \frac{2}{3} \dot{\epsilon}_y + \left(\frac{1}{g} - \frac{2}{9} \right) \dot{\epsilon}_v \right\} / \dot{\epsilon} \\ \sigma_z &= \sigma \left\{ \frac{2}{3} \dot{\epsilon}_z + \left(\frac{1}{g} - \frac{2}{9} \right) \dot{\epsilon}_v \right\} / \dot{\epsilon} \\ \tau_{xy} &= \sigma \dot{\gamma}_{xy} / 3 \dot{\epsilon} \\ \tau_{yz} &= \sigma \dot{\gamma}_{yz} / 3 \dot{\epsilon} \\ \tau_{zx} &= \sigma \dot{\gamma}_{zx} / 3 \dot{\epsilon} \quad \dot{\epsilon}_v = \dot{\epsilon}_x + \dot{\epsilon}_y + \dot{\epsilon}_z.\end{aligned} \tag{2-3}$$

Und die Vergleichsdehngeschwindigkeit $\dot{\epsilon}$ des Materials ergibt sich den Komponenten als

$$\dot{\epsilon} = \sqrt{\frac{2}{9} \{ (\dot{\epsilon}_x - \dot{\epsilon}_y)^2 + (\dot{\epsilon}_y - \dot{\epsilon}_z)^2 + (\dot{\epsilon}_z - \dot{\epsilon}_x)^2 \} + \frac{1}{3} (\dot{\gamma}_{xy}^2 + \dot{\gamma}_{yz}^2 + \dot{\gamma}_{zx}^2) + \frac{1}{g} \dot{\epsilon}_v^2}. \tag{2-4}$$

Aus diesen Gleichungen kann man jede Spannungskomponente berechnen. Ermöglicht wird dies durch die Annahme einer endlichen (kleinen) Kompressibilität.

Falls die Fließspannung des Materials von der Dehngeschwindigkeit unabhängig ist, kann man die richtigen Dehngeschwindigkeiten, Dehnungen und Spannungen an jedem beliebigen Punkt des Materials durch die Suche nach einem Geschwindigkeitsfeld, das den Wert der folgenden Funktion Φ_1 minimiert, berechnen.

$$\Phi_1 = \int_V \sigma \dot{\epsilon} dV + \int_{S_f} \tau_f \Delta v dS - \int_{S_t} T_i v_i dS \tag{2-5}$$

Darin sind:

V das Volumen,

S die Fläche,

τ_f die Reibungsspannung,

Δv die Relativgeschwindigkeit,

T_i die äußeren Kräfte außer der Reibungsspannung,

v_i die Geschwindigkeit.

Auf der rechten Seite von Gleichung (2-5) stellt also das erste Glied die Leistung der plastischen Formänderung dar, das zweite die Leistung der äußeren Reibung und das dritte die der äußeren Kräfte.

Falls die Funktion Φ_1 minimiert worden ist, muß sich die Volumenänderungsgeschwindigkeit ϵ_v als natürliche Folge zu Null nähern, weil der Wert von $1/g$ in Gleichung (2-4) sehr groß ist, und auch die Bedingung der Nichtkompressibilität fast zufriedengestellt wird.

2.3.2. Berücksichtigung der Abhängigkeit der Materialsfließspannung von der Dehnung und von der Dehngeschwindigkeit

Wenn die Fließspannung des Materials von der Dehngeschwindigkeit stark abhängt wie der Stahl bei hoher Temperatur, muß die Gleichung (2-5) wie folgt umgeformt werden.^{67,68)}

$$\Phi = \int_V \left[\int \sigma d\dot{\epsilon} \right] dV + \int_{S_f} \tau_f A v dS - \int_{S_t} T_i v_i dS \quad (2-6)$$

Die Abhängigkeit der Fließspannung von der Dehnung und von der Dehngeschwindigkeit kann im allgemeinen mit der Exponentialform dargestellt werden, wie die Gleichung (2-7) zeigt.

$$\sigma = a \cdot \epsilon^n \cdot \dot{\epsilon}^m \quad (2-7)$$

Darin ist a die Konstante, n der Verfestigungsexponent und m die Geschwindigkeitsempfindlichkeit.

Wenn man die Gleichung (2-6) mit der Darstellung der finiten Elemente zeigt, bekommt man die folgende Gleichung (2-8).

$$\Phi = \sum_{i=1}^{N_1} \left(\frac{1}{m+1} a \varepsilon^n \dot{\varepsilon}^{m+1} V \right)_i + \sum_{i=1}^{N_2} (\tau_f \Delta v A)_i - \sum_{i=1}^{N_3} (F v_T)_i \quad (2-8)$$

Darin sind:

σ die Vergleichsspannung,

ε die Vergleichsdehnung,

$\dot{\varepsilon}$ die Vergleichsdehngeschwindigkeit,

n der Verfestigungsexponent,

m die Geschwindigkeitsempfindlichkeit,

V das Volumen des Elementes,

τ_f die Reibungsspannung,

Δv die Relativgeschwindigkeit zwischen Walze und Walzgut,

A die Berührungsfläche zwischen Walze und Walzgut,

F die äußeren Kräfte außerhalb des Walzspaltes,

v_T die Geschwindigkeit der Flächen, auf die solche äußeren Kräfte wirken,

N_1 die Anzahl aller Elemente,

N_2 die Anzahl der Flächen, die die Walze berühren,

N_3 die Anzahl der Flächen, auf die die äußeren Kräfte wirken.

Wenn die Fließspannung des Materials nicht von der Dehngeschwindigkeit abhängt (d.h. $m=0$), wird die Funktion Φ der gesamten Verformungsleistung gleich. Einer der Vorteile des Verfahrens mit starr-plastischen finiten Elementen liegt darin, daß die Abhängigkeit der Fließspannung von der Dehngeschwindigkeit ohne Schwierigkeit berücksichtigt werden kann.

2.3.3. Die für die Rechnung benutzten räumlichen finiten Elemente

Um die räumliche Formänderung beim Vertikalwalzen von Brammen mit der Methode der finiten Elemente genau zu analysieren, ist es nötig, daß man das Material in drei Richtungen feinstmöglichst in finite Elemente einteilt. Die Rechenzeitdauer verlängert sich stark mit der zunehmenden Anzahl der Elemente, aber die Genauigkeit der Rechnung wird damit nur schwach verbessert, wenn die Anzahl der Elemente groß wird. Deswegen beherrscht man mit der Geschicklichkeit der Einteilungsweise die erforderliche Zeitdauer und die Genauigkeit der Rechnung. Erfahrungsgemäß ist es günstig und damit genug, daß man das Walzgut in seiner Dickenrichtung nur in zwei Teile und in seiner Walz- und Breitenrichtung in einige geeignete Teile teilt, wie Bild 2-3 zeigt.

In jedem Elemente wird es angenommen, daß die Geschwindigkeitskomponenten in Breiten- (x) und Walzrichtung (y), u und v , in der Dickenrichtung (z) konstant bleiben, und daß die Geschwindigkeitskomponente in der Dickenrichtung, w , in der Mitte der

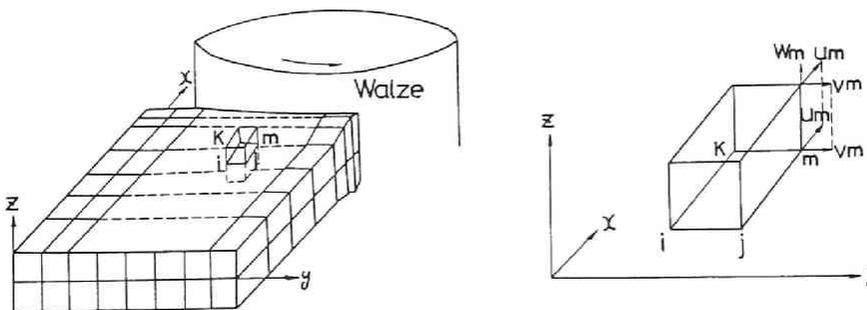


Bild 2-3 Die für die Rechnung benutzten finiten Elemente in räumlicher Darstellung

Walzgutdicke Null ist und sich mit dem Abstand von der Dickenmitte linear vergrößert.^{69,70)} So kann man die Geschwindigkeitskomponenten u , v und w in einem Element wie folgt schreiben:

$$\begin{aligned} u &= \frac{1}{4} \{ (1-\xi)(1-\eta)u_i + (1+\xi)(1-\eta)u_j + (1+\xi)(1+\eta)u_m + (1-\xi)(1+\eta)u_k \} \\ v &= \frac{1}{4} \{ (1-\xi)(1-\eta)v_i + (1+\xi)(1-\eta)v_j + (1+\xi)(1+\eta)v_m + (1-\xi)(1+\eta)v_k \} \\ w &= \frac{1}{4} \left\{ (1-\xi)(1-\eta)\frac{z}{h_i}w_i + (1+\xi)(1-\eta)\frac{z}{h_j}w_j \right. \\ &\quad \left. + (1+\xi)(1+\eta)\frac{z}{h_m}w_m + (1-\xi)(1+\eta)\frac{z}{h_k}w_k \right\} . \quad (2-9) \end{aligned}$$

Darin sind η und ξ normalisierte Koordinaten von 1 bis -1, und h_i , h_j , h_m und h_k die Dicke des Elementes an jedem Knotenpunkt. Die Dehngeschwindigkeitskomponenten können durch die partielle Differenzierung der Geschwindigkeitskomponenten u , v und w nach dem Ort wie folgt dargestellt werden:

$$\begin{Bmatrix} \dot{\epsilon}_x \\ \dot{\epsilon}_y \\ \dot{\epsilon}_z \\ \dot{\gamma}_{zy} \\ \dot{\gamma}_{yz} \\ \dot{\gamma}_{zx} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} B_i & 0 & 0 & B_j & 0 & 0 & B_m & 0 & 0 & B_k & 0 & 0 \\ 0 & C_i & 0 & 0 & C_j & 0 & 0 & C_m & 0 & 0 & C_k & 0 \\ 0 & 0 & D_i & 0 & 0 & D_j & 0 & 0 & D_m & 0 & 0 & D_k \\ C_i & B_i & 0 & C_j & B_j & 0 & C_m & B_m & 0 & C_k & B_k & 0 \\ 0 & 0 & \frac{z}{h_i}C_i & 0 & 0 & \frac{z}{h_j}C_j & 0 & 0 & \frac{z}{h_m}C_m & 0 & 0 & \frac{z}{h_k}C_k \\ 0 & 0 & \frac{z}{h_i}B_i & 0 & 0 & \frac{z}{h_j}B_j & 0 & 0 & \frac{z}{h_m}B_m & 0 & 0 & \frac{z}{h_k}B_k \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_i \\ v_i \\ w_i \\ u_j \\ v_j \\ w_j \\ u_m \\ v_m \\ w_m \\ u_k \\ v_k \\ w_k \end{Bmatrix} \quad (2-10)$$

$$\begin{Bmatrix} B_i \\ B_j \\ B_m \\ B_k \end{Bmatrix} = \frac{2}{J} \begin{Bmatrix} y_{jk} - y_{mk} \xi - y_{jm} \eta \\ -y_{im} + y_{mk} \xi + y_{ik} \eta \\ -y_{jk} + y_{ij} \xi - y_{ik} \eta \\ y_{im} - y_{ij} \xi + y_{jm} \eta \end{Bmatrix}, \quad \begin{Bmatrix} C_i \\ C_j \\ C_m \\ C_k \end{Bmatrix} = \frac{2}{J} \begin{Bmatrix} -x_{jk} + x_{mk} \xi + x_{jm} \eta \\ x_{im} - x_{mk} \xi - x_{ik} \eta \\ x_{jk} - x_{ij} \xi + x_{ik} \eta \\ -x_{im} + x_{ij} \xi - x_{jm} \eta \end{Bmatrix}, \quad \begin{Bmatrix} D_i \\ D_j \\ D_m \\ D_k \end{Bmatrix} = \frac{1}{4} \begin{Bmatrix} \frac{1}{h_i}(1-\xi)(1-\eta) \\ \frac{1}{h_j}(1+\xi)(1-\eta) \\ \frac{1}{h_m}(1+\xi)(1+\eta) \\ \frac{1}{h_k}(1-\xi)(1+\eta) \end{Bmatrix} \quad (2-11)$$

$$\begin{aligned} J &= \{ (-x_i + x_j + x_m - x_k) + (x_i - x_j + x_m - x_k) \eta \} \\ &\quad \times \{ (-y_i - y_j + y_m + y_k) + (y_i - y_j + y_m - y_k) \xi \} \\ &\quad - \{ (-x_i - x_j + x_m + x_k) + (x_i - x_j + x_m - x_k) \xi \} \\ &\quad \times \{ (-y_i + y_j + y_m - y_k) + (y_i - y_j + y_m - y_k) \eta \} \end{aligned}$$

$$x_{ij} = x_i - x_j, \quad y_{ij} = y_i - y_j$$

Ein hexaedrisches Element hat 8 Knotenpunkte, und jeder Punkt hat normalerweise drei unbekannte Geschwindigkeitskomponenten. Infolgedessen hat das einzelne Element grundsätzlich 24 unbekannte Größen der Geschwindigkeitskomponenten. Diese Anzahl von 24 kann aber durch die oben gegebene Einteilungsweise und auch durch die obenerwähnte Annahme bis zur Hälfte vermindert werden, wie die Gleichung (2-10) zeigt.

2.3.4. Rechenmodell für das Vertikalwalzen mit Flach- und Kaliberwalze

Bild 2-4 zeigt das benutzte Netz der finiten Elemente in der Breiten- und Walzrichtung auf der Anfangsstufe der Rechnung.

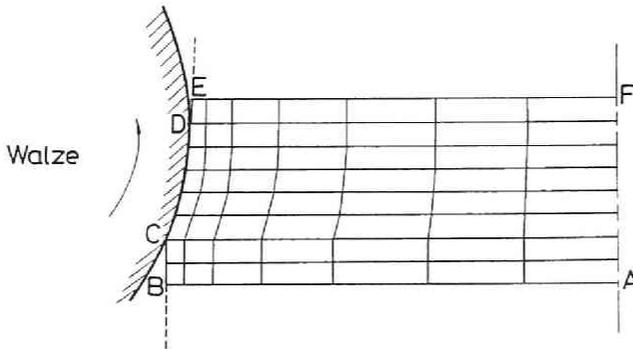


Bild 2-4 Netz der finiten Elemente in Breiten- und Walzrichtung

Tafel 2-2 Randbedingungen der Geschwindigkeit

A - B	$u = w = 0$, $v = \text{konstant}$ (unbekannt)
C - D	$u = -v \cdot \tan \alpha$, α : Berührungswinkel
D - E	$u = 0$
E - F	$u = w = 0$, $v = \text{konstant}$ (unbekannt)
F - A	$u = 0$

Tafel 2-2 zeigt die Randbedingungen der Geschwindigkeit beim Vertikalwalzen mit Flachwalze. Mit den in 2.3.3. aufgestellten Annahmen läßt sich die Minimierung der Funktion Φ unter den gegebenen Bedingungen im Fall der Flachwalze direkt und verhältnismäßig leicht durchführen.

Beim Walzen im Kaliber sind die Randbedingungen der Geschwindigkeit komplizierter, weil die Verdickung der Bramme durch die Kaliberwand beschränkt wird (vgl. Bild 2-5). Zur Beschreibung dieses Vorganges werden die zwei in Bild 2-6 gezeigten Koordinatensysteme gewählt. Die x-, y- und z-Achsen im Walzgut zeigen - wie in Bild 2-3 - Breiten-, Walz- und Dickenrichtung. Der Koordinatenursprung liegt etwas außerhalb des Walzspalts auf der Eingangsseite in der Mitte von Breite und Dicke. Die Koordinaten eines beliebigen Punktes in der Berührungsfläche zwischen Walzgut und Kaliberwand werden durch die Größen X, Y und Z (=z) beschrieben. Für die Umrechnung von einem System auf das andere gelten die folgenden Gleichungen:

$$\begin{aligned} Z &= (\sqrt{X^2 + Y^2} - R) \cdot \tan\theta + h \\ X &= R + \frac{B_1}{2} - x \\ Y &= a_1 \cdot \Delta l - y \\ \Delta l &= \frac{1}{a_2} \sqrt{\left(\frac{B_0 - B_1}{2}\right) \cdot \left(2R - \frac{B_0 - B_1}{2}\right)}. \end{aligned} \quad (2-12)$$

Darin sind:

R der Radius des Kaliberbodens,

θ der Kaliberwinkel,

h die halbe Dicke des Kaliberbodens,

B_0 die Breite des Walzgutes am Walzspalteingang,

B_1 die Breite des Walzgutes am Walzspaltausgang,

a_1 die Anzahl der Elemente in Walzrichtung vom Koordinatenursprung bis zum Walzspaltausgang,

a_2 die Anzahl der Elemente in Walzrichtung vom Walzspalteingang bis zum Walzspaltausgang,

Δl die Länge der Elemente, hier also genau ein Fünftel der Walzspaltlänge.

Die Randbedingung für die Geschwindigkeitskomponente w (in der Dickenrichtung) lautet dann:

$$w = -\tan\theta \cdot (X^2 + Y^2)^{-1/2} \cdot (X \cdot u + Y \cdot v). \quad (2-13)$$

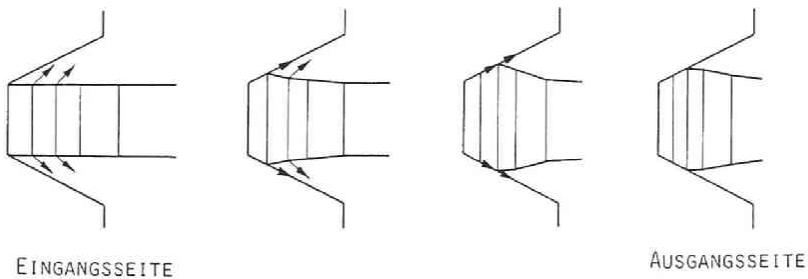


Bild 2-5 Änderung des Walzgutsquerschnittes während des Vertikalwalzens mit Kaliberwalze

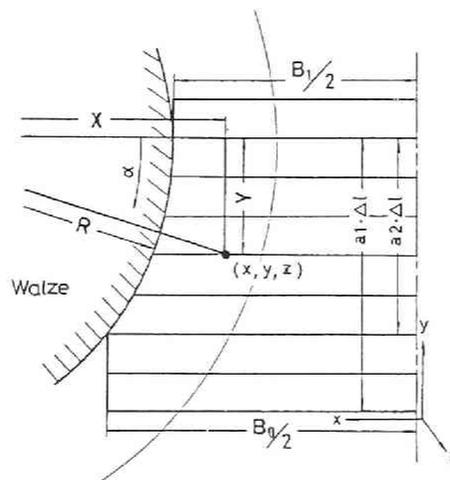


Bild 2-6 Koordinatensystem für die Berechnung in der Kaliberwalze

Die Rechnung wird nun in folgenden Schritten durchgeführt:

1. Anfangs der Rechnung fehlen die Werte von der Dicke des Walzgutes im Walzspalt und von der Reibungsspannung τ_f . So nimmt man an, daß die Dickenverteilung des Walzgutes mit seiner Anfangsdicke gleich und konstant ist, und daß die Verteilung der Reibungsspannung aus der vorläufigen Walzdruckverteilung berechnet wird, die z.B. durch die zweidimensionale Walztheorie leicht berechnet wird. Zunächst wird die Funktion ϕ mit den in Tafel 2-2 gezeigten Randbedingungen minimiert. Dadurch erhält man das Geschwindigkeitsfeld im Walzgut.
2. Aus dem Geschwindigkeitsfeld kann man die Verteilung der Dicke (z-Koordinate) und der Vergleichsdehnung im Walzgut berechnen.
3. Wenn der berechnete Wert der z-Koordinate eines Knotenpunkts größer ist als Z (die Koordinate der Kaliberwand), so wird er zunächst so weit vermindert, daß er den Wert Z nur in kleinem Maß übersteigt. In der folgenden Berechnung wird die Geschwindigkeitsbedingung von Gleichung (2-13) für solche Knotenpunkte zu den in Tafel 2-2 gegebenen Randbedingungen hinzugefügt. Falls alle vier Knotenpunkte eines Elementes die Kaliberwand berühren, wird die Oberfläche dieses Elementes zur Reibungsfläche zwischen Walze und Walzgut addiert.
4. Mit diesen neuen Randbedingungen wird die Funktion ϕ wiederum minimiert, und man erhält ein neues Geschwindigkeitsfeld im Walzgut.
5. Die Schritte 2, 3 und 4 werden nun wiederholt, bis sich

die Änderung der Dicken, Spannungen und Dehnungen vernachlässigen läßt.

Der Schritt 3 wird im Fall der Flachwalze ausgelassen.

Die Zahlenangaben für die Rechnung sind in 2.2. dargestellt, und die Rechnung wird auch für die Kaliberwalze mit einem Kaliberwinkel von 5° getan. Der Reibungskoeffizient zwischen Walze und Walzgut wird zu 0,45 angenommen.

2.4. Experimentelle und analytische Ergebnisse

2.4.1. Querschnittform der Bramme nach dem Vertikalwalzen

Bild 2-7 zeigt an einem Beispiel den Vergleich zwischen den berechneten und experimentellen Ergebnissen der Hundeknochenform nach dem Vertikalwalzen mit Flach- und Kaliberwalze nach einer Breitenabnahme von 9 mm. Die berechneten und die gemessenen Konturen stimmen gut miteinander überein. Es ist zu beachten, daß das Maximum der Dicke nach dem Walzen mit Kaliberwalze kleiner ist als bei der Flachwalze und weiter zur Breitenmitte hin verschoben ist.

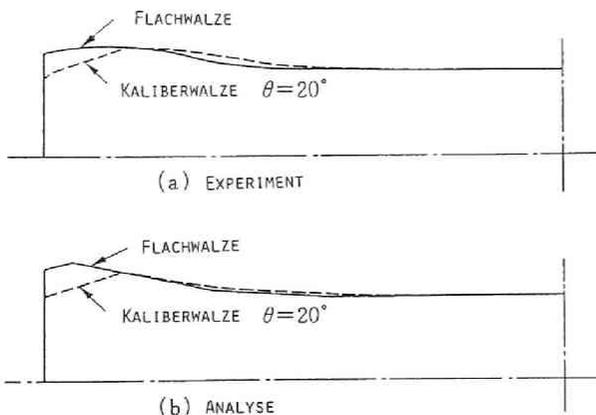


Bild 2-7
Vergleich zwischen
berechneten und experi-
mentellen Ergebnissen
über die Hundeknochen-
form nach dem Vertikal-
walzen

Bild 2-8 zeigt den Zusammenhang des Breitenabnahmenverhältnisses mit dem Dickenverhältnis des Hundeknochens und mit dem Zentrumdickenverhältnis. Im Bild zeigen die ausgezogenen Linien die berechneten Werte, und die gestrichelten Linien die gemessenen Werte. Mit zunehmendem Breitenabnahmenverhältnis nimmt das Dickenverhältnis des Hundeknochens zu, und zwar am stärksten bei der Flachwalze, und es wird kleiner mit abnehmendem Kaliberwinkel. Diese Wirkung des Kaliberwinkels auf das Dickenverhältnis des Hundeknochens verstärkt sich mit abnehmendem Kaliberwinkel. Die Zuwachsrates des Hundeknochendickenverhältnisses verkleinert sich sanft mit zunehmendem Breitenabnahmenverhältnis. Die berechneten und die gemessenen Werte stimmen gut miteinander überein, obwohl der erste etwas größer ist als der letzte.

Die Zentrumdicke des Walzgutes wird mit zunehmendem Breitenabnahmenverhältnis zunächst ein wenig dünner und dann nachher wieder dicker als seine Anfangsdicke. Sie ist immer umso dicker, je kleiner der Kaliberwinkel ist. Davon kann man verstehen, daß die Kaliberwalze die Formänderung an den Breitenseiten beschränkt und gleichzeitig die Verformungszone in die Breitenmitte ausbreitet.

Das Breitenabnahmenverhältnis bei der Greifgrenze der benutzten Versuchseinrichtung war etwa 10~15 % bei der Flachwalze und etwas größer bei der Kaliberwalze. Aber das Experiment wurde auch im Gebiete über diese Greifgrenze durchgeführt, um den Walzvorgang in dem weiteren Bereich der Breitenabnahme zu untersuchen. Aber die Konvergenz der Lösung bei der Rechnung wird schlechter mit zunehmender Breitenabnahme, und die Rech-

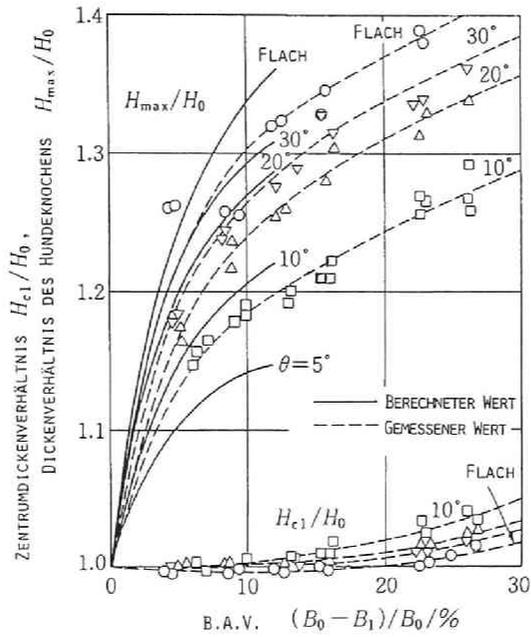


Bild 2-8 Zusammenhang des Breitenabnahmenverhältnisses (B.A.V.) mit dem Dickenverhältnis des Hundeknochens und mit dem Zentrumdickenverhältnis

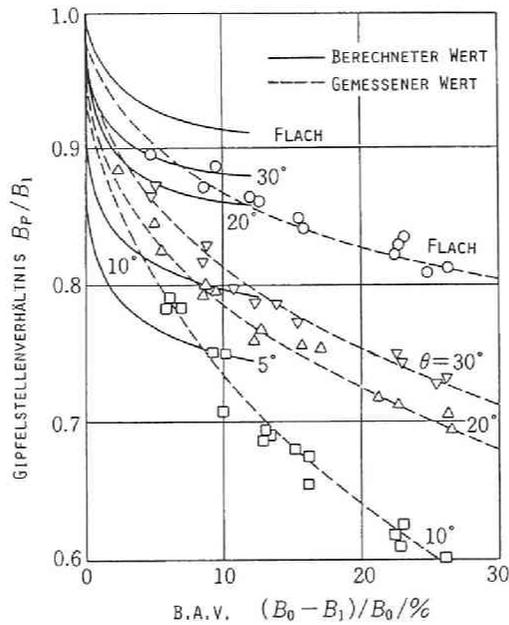


Bild 2-9 Zusammenhang zwischen dem Breitenabnahmenverhältnis und dem Gipfelstellenverhältnis

nung wird schließlich unmöglich, wenn die Größe der Breitenabnahme die Greifgrenze verhältnismäßig überschreitet. Auf diesem Grund gelang die Rechnung nur bei der verhältnismäßig kleinen Breitenabnahme.

Bild 2-9 zeigt den Zusammenhang zwischen dem Breitenabnahmenverhältnis und dem Gipfelstellenverhältnis, darin zeigen die ausgezogenen Linien die berechneten Werte und die gestrichelten Linien die gemessenen Werte. Das Gipfelstellenverhältnis verkleinert sich mit zunehmendem Breitenabnahmenverhältnis, nämlich nähert sich die Gipfelstelle der Breitenmitte. Diese Tendenz wird mit abnehmendem Kaliberwinkel deutlicher. Die berechneten Werte sind größer als die gemessenen Werte. Der Unterschied der beiden Werte ist davon hervorgerufen, erstens daß bei der Rechnung die Temperaturverteilung im Walzgut nicht berücksichtigt ist und zweitens daß die Feststellung des Gipfelpunktes und dessen Messung beim Experiment ziemlich schwer ist, weil die Form des Hundeknochens in der Umgebung seines Gipfels flachförmig ist.

Bild 2-10 zeigt den Zusammenhang zwischen dem Breitenabnahmenverhältnis und dem Querschnittabnahmenverhältnis. Weil sich die Formänderung beim Vertikalwalzen an den Brammenseiten konzentriert und der Querschnitt keine rechteckige Form zeigt, sondern eine Hundeknochenform, ist das Querschnittabnahmenverhältnis beim Vertikalwalzen kleiner als das beim Horizontalwalzen der rechteckigen Platten. Das Bild zeigt, daß beim kleinen Breitenabnahmenverhältnis diese Tendenz stark ist. Das Querschnittabnahmenverhältnis ist am kleinsten bei der Flachwalze und wird größer mit abnehmendem Kaliberwinkel. Die mit ausgezogenen Linien gezeigten berechneten Werte und

die mit gestrichelten Linien gezeigten gemessenen Werte stimmen fast gut miteinander überein.

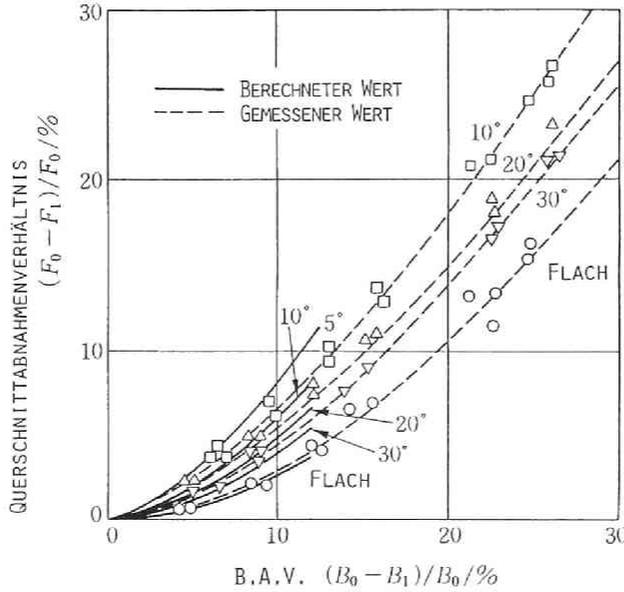


Bild 2-10 Zusammenhang zwischen dem Breitenabnahmenverhältnis und dem Querschnittabnahmenverhältnis

2.4.2. Einfluß der Abhängigkeit der Materialsfließspannung von der Dehnung und von der Dehngeschwindigkeit auf die Hundeknochenform

Wie oben dargestellt, stimmen die berechneten Werte der Walzgutsquerschnittform nach dem Vertikalwalzen mit den gemessenen Werten gut überein. Daraus kann man schließen, daß das hier angewandte Rechenverfahren genügend seine Genauigkeit hat. Die Fließspannung des Materials hängt von der Dehnung und von der Dehngeschwindigkeit ab, und der Verfestigungsexponent n und die Geschwindigkeitsempfindlichkeit m sind unterschiedlich je nach dem Material und nach seiner Temperatur.

Bild 2-11 zeigt die Wirkung des Wertes von n und von m auf die Hundeknochenform und zwar die berechneten Konturen des Brammenquerschnittes nach dem Vertikalwalzen mit Flachwalze für verschiedene Werte der Exponenten n und m . Es zeigt sich, daß der Maximalwert der Brammendinge (Hundeknochenstärke) mit steigenden Werten von n und m abnimmt. Beide Parameter haben etwa den gleichen Einfluß. Man sieht daraus, daß es notwendig ist, nicht nur die Verfestigung, sondern auch die Geschwindigkeitsempfindlichkeit in die Berechnung einzubeziehen.

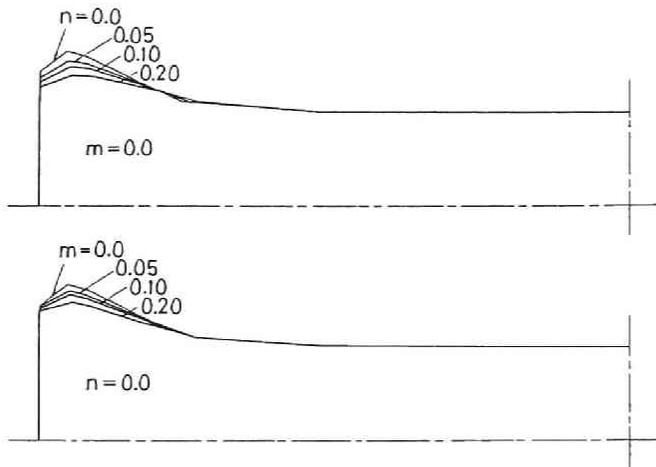


Bild 2-11 Wirkung des Verfestigungsexponentes n und der Geschwindigkeitsempfindlichkeit m auf die Hundeknochenform

2.4.3. Walzkraft und Walzmoment beim Vertikalwalzen

Bild 2-12 zeigt den Zusammenhang zwischen dem Breitenabnahmenverhältnis und der Walzkraft, und Bild 2-13 zeigt den Zusammenhang zwischen dem Breitenabnahmenverhältnis und dem Walzmoment. Die Walzkraft wächst mit zunehmendem Breitenabnahmenverhältnis, aber schwächer als proportional. Dagegen wächst

das Walzmoment proportional zum zunehmenden Breitenabnahmenverhältnis. Walzkraft und Walzmoment sind am kleinsten bei der Flachwalze und werden größer mit abnehmendem Kaliberwinkel, und diese Wirkung des Kaliberwinkels verstärkt sich mit abnehmendem Kaliberwinkel. Die berechneten Werte stimmen mit den gemessenen Werten gut überein. Die strichpunktierten Linien in Bild 2-13 zeigen den vom Reibungsverlust bewirkten Teil des Walzmomentes, der durch die Rechnung erworben wird. Sein Verhältnis zum Walzmoment wächst mit abnehmendem Kaliberwinkel.

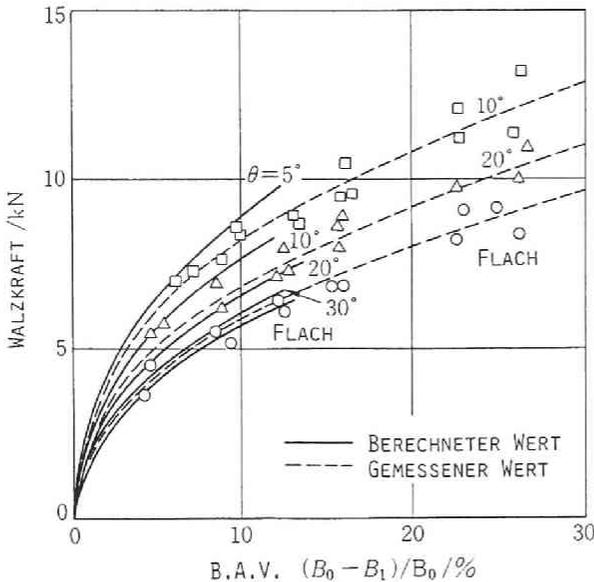
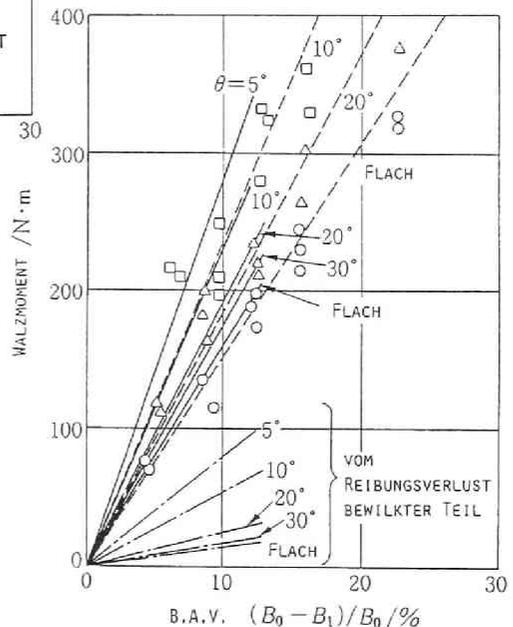


Bild 2-13
Zusammenhang zwischen dem Breitenabnahmenverhältnis und dem Walzmoment

Bild 2-12
Zusammenhang zwischen dem Breitenabnahmenverhältnis und der Walzkraft



2.4.4. Walzeigenschaft beim Horizontalwalzen des hunde- knochenförmigen Walzgutes

Das durch das Vertikalwalzen gebildete hundeknochenförmige Walzgut wird wieder bis zu seiner Anfangsdicke horizontalgewalzt.

Bild 2-14 zeigt den Zusammenhang zwischen den Verhältnissen der Breitenabnahme und der Effektivbreitenabnahme. Der Unterschied zwischen der Breitenabnahme und der Effektivbreitenabnahme, nämlich die Ausbreitungsgröße steigert sich mit zunehmender Breitenabnahme zuerst und wird bald konstant. Dies zeigt, daß mit zunehmender Breitenabnahme der Wirkungsgrad der Breitenabnahme relativ größer wird. Die Ausbreitungsgröße ist am größten bei der Flachwalze und wird kleiner mit abnehmendem Kaliberwinkel der Vertikalwalze.

Beim Horizontalwalzen hat die Form der Vertikalwalze einen bedeutenden Einfluß nicht nur auf die Ausbreitungsgröße, sondern auch auf die Zentrumsdicke. Nach dem Horizontalwalzen wird das Walzgut nicht ganz flach, sondern die Zentrumsdicke wird ein wenig dünner als seine Anfangsdicke. Bild 2-15 zeigt den Zusammenhang zwischen dem Breitenabnahmenverhältnis und dem Zentrumsdickenverhältnis nach dem Horizontalwalzen, und zwar wird die Zentrumsdicke mit zunehmendem Breitenabnahmenverhältnis zunächst dünner. Aber wenn das Breitenabnahmenverhältnis noch größer wird, wendet sich die Zentrumsdicke zur Zunahme. Das Zentrumsdickenverhältnis nach dem Horizontalwalzen ist am kleinsten bei der Flachwalze und wird größer mit abnehmendem Kaliberwinkel der angewendeten Vertikalwalze. Um die

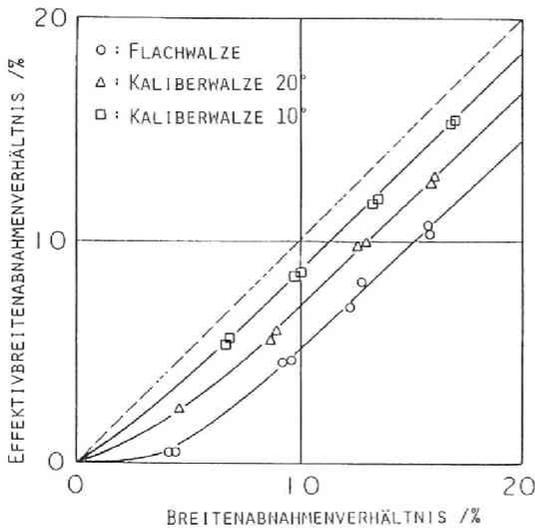


Bild 2-14
Zusammenhang zwischen den Verhältnissen der Breitenabnahme und der Effektivbreitenabnahme

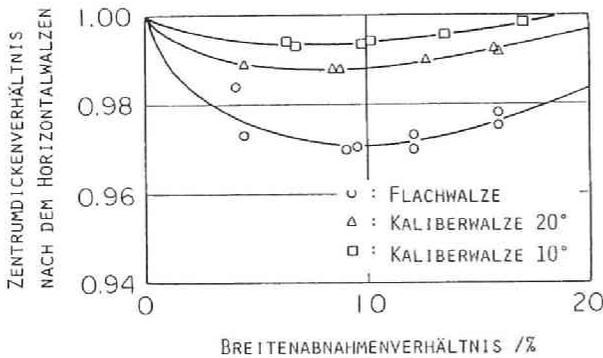


Bild 2-15
Zusammenhang zwischen dem Breitenabnahmenverhältnis und dem Zentrumdickenverhältnis nach dem Horizontalwalzen

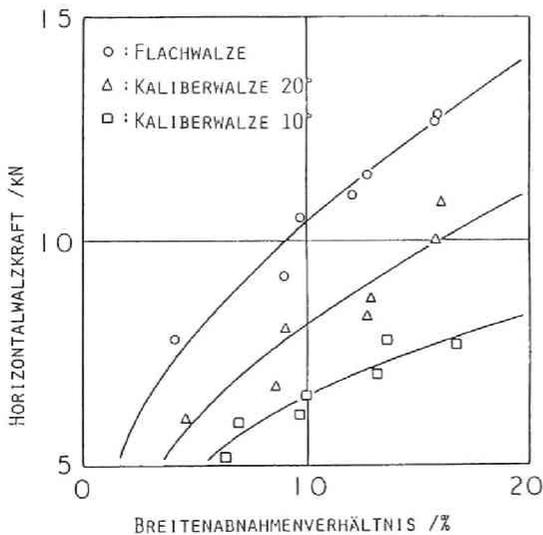


Bild 2-16
Zusammenhang zwischen dem Breitenabnahmenverhältnis und der Walzkraft beim Horizontalwalzen

Verminderung der Zentrumsdicke zu vermeiden, ist es günstiger, die Kaliberwalze mit einem kleinen Kaliberwinkel beim vorigen Vertikalwalzen zu benutzen.

Bild 2-16 zeigt den Zusammenhang zwischen dem Breitenabnahmenverhältnis und der Walzkraft beim Horizontalwalzen. Die Walzkraft vergrößert sich mit zunehmendem Breitenabnahmenverhältnis, aber diese Zuwachsrage wird damit kleiner. Die Walzkraft beim Horizontalwalzen ist im Gegensatz zur Walzkraft beim Vertikalwalzen am größten bei der Flachwalze und wird kleiner mit abnehmendem Kaliberwinkel.

Das Walzmoment beim Horizontalwalzen zeigt eine ähnliche Tendenz.

2.4.5. Anwendung des analytischen Verfahrens über das Vertikalwalzen auf die praktischen Stahlbrammen

Der Modellversuch des Vertikalwalzens wurde anhand der Aluminiumplatten durchgeführt, und dabei wurde die Richtigkeit des in 2.3. vorgeschlagenen analytischen Verfahrens festgestellt. Daher würde es eine Bedeutung haben, daß man den Walzvorgang beim Warm-Vertikalwalzen von Stahlbrammen mit praktischen Größen anhand dieses Verfahrens analysiert.

Bild 2-17 ~ 2-19 zeigen die Beispiele der berechneten Werte. Die für die Rechnung benutzten Zahlenangaben sind wie folgt. Als Walzgut wird eine Stahlbramme mit einer Breite von 1900 mm, mit einer Dicke von 280 mm, mit 0,1% C und mit einer Temperatur von 1100°C angenommen. Die Fließspannung dieses Werkstoffs wird nach S.Shida⁷¹⁾ durch die folgende Gleichung besch-

rieben:

$$\sigma = 98,2 \left\{ 1,3 \left(\frac{\varepsilon}{0,2} \right)^{0,403} - 0,3 \left(\frac{\varepsilon}{0,2} \right) \right\} \left(\frac{\dot{\varepsilon}}{10} \right)^{0,128} \quad (\text{in N/mm}^2). \quad (2-14)$$

Als Vertikalwalze werden Flach- und Kaliberwalzen mit einem Durchmesser von 1200 mm und mit verschiedenen Kaliberwinkeln von $5^\circ \sim 30^\circ$ angenommen.

Der Zusammenhang der Breitenabnahme mit dem Dickenverhältnis des Hundeknochens, der Walzkraft und dem Walzmoment zeigt eine qualitativ gleiche Tendenz mit den Ergebnissen des Modellversuches, wie Bild 2-17 \sim 2-19 zeigen.

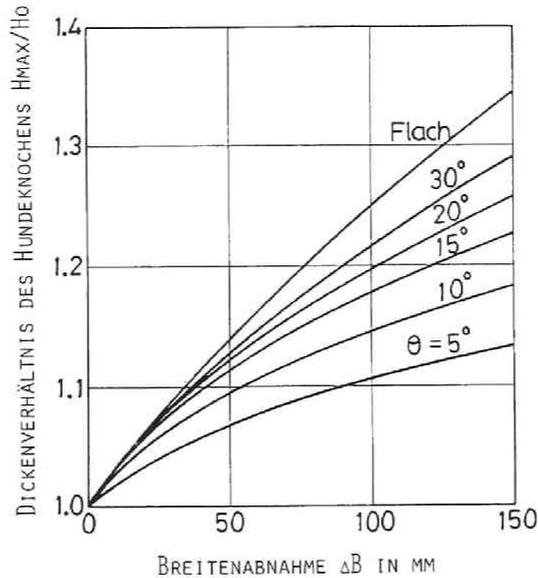


Bild 2-17

Zusammenhang zwischen der Breitenabnahme und dem Dickenverhältnis des Hundeknochens für Stahlbrammen

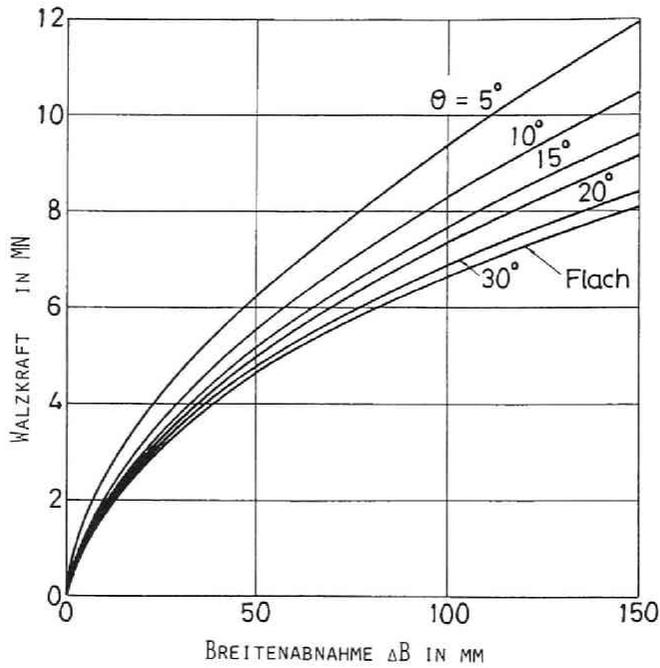


Bild 2-18 Zusammenhang zwischen der Breitenabnahme und der Walzkraft für Stahlbrammen

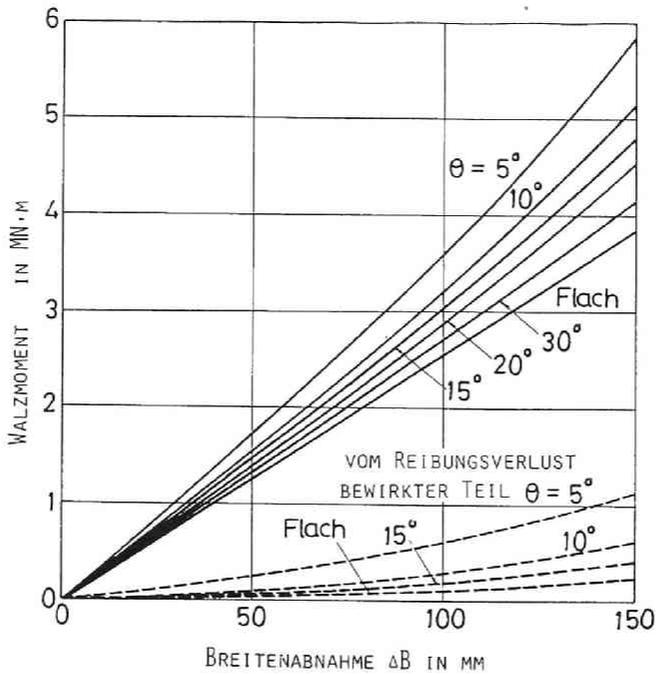


Bild 2-19 Zusammenhang zwischen der Breitenabnahme und dem Walzmoment für Stahlbrammen

2.5. Zusammenfassung

In diesem Kapitel wurde der Walzvorgang beim Vertikalwalzen anhand der Flach- und Kaliberwalzen mit verschiedenen Kaliberwinkeln experimentell und nach dem starr-plastischen Finite-Elemente-Verfahren unter Berücksichtigung der Abhängigkeit der Materialsfließspannung von der Dehnung und von der Dehngeschwindigkeit analytisch untersucht. Nach dieser Untersuchung wurde es klar, daß die Form der Vertikalwalze großen Einfluß auf den Walzvorgang beim Vertikal- und nachfolgenden Horizontalwalzen hat.

Die in diesem Kapitel erworbenen Ergebnisse können wie folgt zusammengefaßt werden:

- 1) Der Wirkungsgrad der Breitenabnahme ist effektiver bei der Kaliberwalze als bei der Flachwalze und verstärkt sich mit abnehmendem Kaliberwinkel. Mit abnehmendem Kaliberwinkel wird das Dickenverhältnis des Hundeknochens kleiner, Walzkraft und Walzmoment dagegen größer. Das erstere ist von Vorteil für die Weiterverarbeitung der Bramme, das letztere führt zu stärkerer Abnutzung der Walze. Unter Berücksichtigung dieser Vor- und Nachteile kann der günstigste Kaliberwinkel zwischen 10° und 15° liegen.
- 2) Die Verminderung der Zentrumdicke und der Kraftbedarf beim nachfolgenden Horizontalwalzen sind am größten, wenn das Vertikalwalzen mit Flachwalze durchgeführt wurde, und werden kleiner mit abnehmendem Kaliberwinkel der Vertikalwalze beim Vertikalwalzen.
- 3) Die nach dem starr-plastischen Finite-Elemente-Verfahren

berechneten Ergebnisse über den Walzvorgang beim Vertikalwalzen stimmen gut mit den gemessenen Ergebnissen überein.

- 4) Der Verfestigungsexponent n und die Geschwindigkeitsempfindlichkeit m haben etwa einen gleichen Einfluß auf die Hundeknochenform, und die Hundeknochendicke nimmt mit steigenden Werten von n und m ab.

Zur Rechnung wurde die Elektronenrechenmaschine FACOM M-200 an der Uni. Kyoto verwandt, und die Rechenzeitdauer war ungefähr 100 Sekunden für die Flachwalze und 130 ~ 150 Sekunden für die Kaliberwalze.

3. EXPERIMENT UND ANALYSE ÜBER DAS HORIZONTALWALZEN DES HUNDEKNOCHENFÖRMIGEN WALZGUTES

3.1. Einleitung

Die hundeknochenförmigen Brammen nach dem Vertikalwalzen werden horizontalgewalzt, damit sie wieder geflächt werden. Das Umformverhalten von hundeknochenförmigen Brammen beim Horizontalwalzen ist auch räumlich gleich wie das beim Vertikalwalzen, und die Analyse darüber ist auch nicht einfach.

In diesem Kapitel wird zuerst der Einfluß der Hundeknochenform auf das Umformverhalten und auf den Kraftbedarf beim Horizontalwalzen experimentell untersucht. Dann wird das analytische Verfahren aus starr-plastischen finiten Elementen vorgeschlagen, und durch das Vergleichen mit den gemessenen Ergebnissen wird die Gültigkeit der berechneten Ergebnisse festgestellt. Danach wird die Wirkung der Hundeknochendicke und der Gipfelstelle auf den Walzvorgang analytisch untersucht.

3.2. Versuchs- und Berechnungsverfahren

3.2.1. Versuchsverfahren

Als Walzgut wurden die durch den Modellversuch des Vertikalwalzens erzeugten hundeknochenförmigen Aluminiumplatten benutzt, wobei das Walzgut, das eine Anfangsbreite von 85 mm und eine Anfangsdicke von 12 mm hatte, mit einmaliger Breitenabnahme von 3 ~ 15 mm vertikalgewalzt wurde. Dabei wurden die Flachwalze

und Kaliberwalzen mit Kaliberwinkeln von 10° und 20° als Vertikalwalze benutzt.

Das dadurch erzeugte hundeknochenförmige Walzgut wurde anhand einer Flachwalze mit einem Durchmesser von 180 mm und mit einer Temperatur von 500°C bis zu seiner Anfangsdicke horizontalgewalzt.

In diesem Kapitel werden die Bezeichnungen benutzt, die in Bild 2-2 und in Tafel 2-1 dargestellt sind.

3.2.2. Berechnungsverfahren

Für die Analyse über das Horizontalwalzen wurde das für die Analyse über das Vertikalwalzen angewandte starr-plastische Finite-Elemente-Verfahren benutzt. Weil die Grundbegriffe des Verfahrens schon in 2.3.1.~ 2.3.3. erklärt wurden, werden hier nur die für die Analyse über das Horizontalwalzen typischen Punkte dargestellt.

Bild 3-1 zeigt das Netzmodell der finiten Elemente in Breiten- und Walzrichtung auf der Anfangsstufe der Rechnung als ein Beispiel, das der in Bild 3-2 mit einer ausgezogenen Linie gezeigten Hundeknochenform entspricht. Wie das Bild zeigt, wird das Walzgut in 20 gleiche Teile in der Breitenrichtung eingeteilt. In der Walzrichtung wird aber die Walzspaltlänge durch eine ganze Zahl so eingeteilt, daß sich die dadurch gebildete Elementsform möglichst einer quadratischen Form nähert. Die schraffierten Elemente im Bild 3-1 zeigen die Elemente, die die Walz an über drei Knotenpunkten berühren und als Reibungsflächen zwischen Walze und Walzgut angenommen werden.

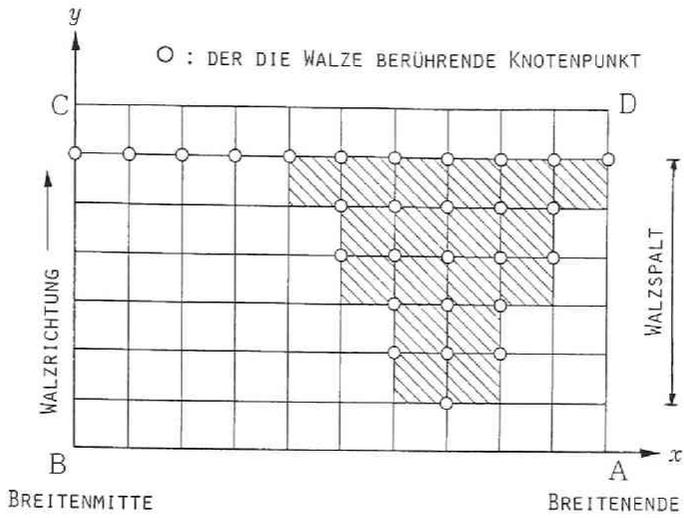
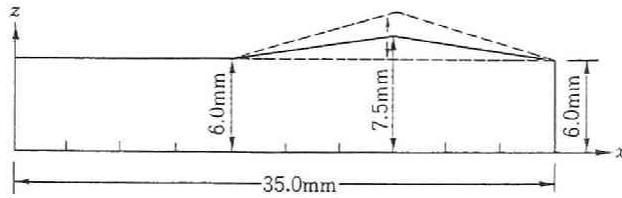
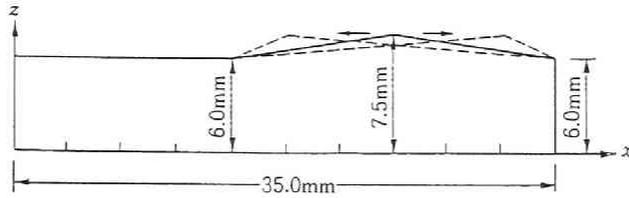


Bild 3-1 Netz der finiten Elemente in der Breiten- und Walzrichtung



(a)



(b)

Bild 3-2 Die für die Rechnung benutzte schematische Hundeknochenform

Tafel 3-1 Randbedingungen der Geschwindigkeit

A - B	$u = w = 0$, $v = \text{konstant (unbekannt)}$
B - C	$u = 0$
C - D	$u = w = 0$, $v = \text{konstant (unbekannt)}$
O	$w = -v \cdot \tan \alpha$, α : Berührungswinkel

Die Rechnung wird nun in folgenden Schritten durchgeführt.

1. Da vor der Rechnung die Ausbreitungsgröße des Walzgutes durch das Horizontalwalzen unbekannt ist, wird die Breite als konstant angenommen. Die Funktion Φ (vgl. Gleichung 2-8) wird mit den in Tafel 3-1 gezeigten Randbedingungen minimiert, und dadurch erhält man das Geschwindigkeitsfeld im Walzgut.
2. Aus dem Geschwindigkeitsfeld berechnet man eine Verteilung der Breite, der Dicke und der Vergleichsdehnung im Walzgut.
3. Der Berührungsbereich zwischen Walze und Walzgut wird durch die aus der Rechnung in Schritt 2 gewonnenen Ergebnisse nachbessert. Unter den neuen Randbedingungen wird die Funktion Φ wiederum minimiert, und man gewinnt ein neues Geschwindigkeitsfeld im Walzgut.
4. Die Schritte 2 und 3 werden so wiederholt, bis sich die Änderung der Breiten, Dicken, Spannungen und Dehnungen vernachlässigen läßt.

Um die Gültigkeit des analytischen Verfahrens festzustellen, wurde die Rechnung über das wirkliche hundeknochenförmige Walzgut durchgeführt, das durch das Vertikalwalzen mit Flach- und Kaliberwalze mit einem Kaliberwinkel von 10° erworben wurde, und ihre Ergebnisse wurden mit den gemessenen Ergebnissen verglichen. Danach wurde die Rechnung über das schematische hundeknochenförmige Walzgut durchgeführt, dessen Form in Bild 3-2 gezeigt ist, um die Wirkung der Hundeknochendicke und der Gipfelstelle auf den Walzvorgang beim Horizontalwalzen zu untersuchen.

3.3. Experimentelle und analytische Ergebnisse

3.3.1. Experimentelle Ergebnisse über die Wirkung des Hundeknochendickenverhältnisses und des Gipfelstellenverhältnisses auf den Walzvorgang

Bild 3-3 zeigt den Zusammenhang zwischen dem Hundeknochendickenverhältnis und der Ausbreitungsgröße. Die Ausbreitungsgröße vermehrt sich unabhängig von der Walzenform beim Vertikalwalzen und proportional zum zunehmendem Hundeknochendickenverhältnis. Weil das Dickenverhältnis des Hundeknochens, wie im zweiten Kapitel dargestellt wurde, von der Form der Vertikalwalze abhängt, ist die Ausbreitungsgröße bei der Flachwalze am größten.

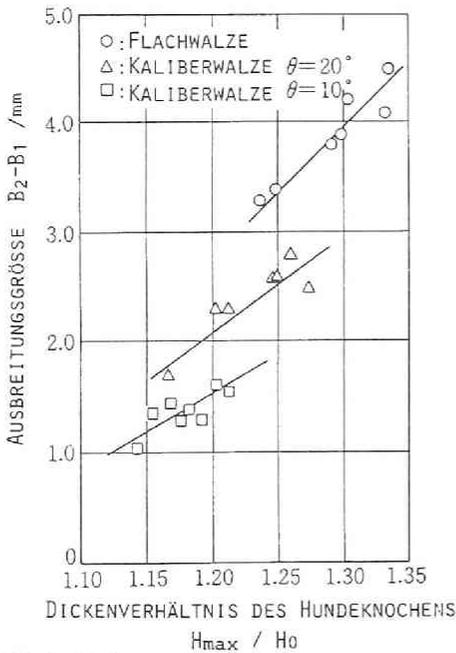


Bild 3-3
Zusammenhang zwischen dem Hundeknochendickenverhältnis und der Ausbreitungsgröße

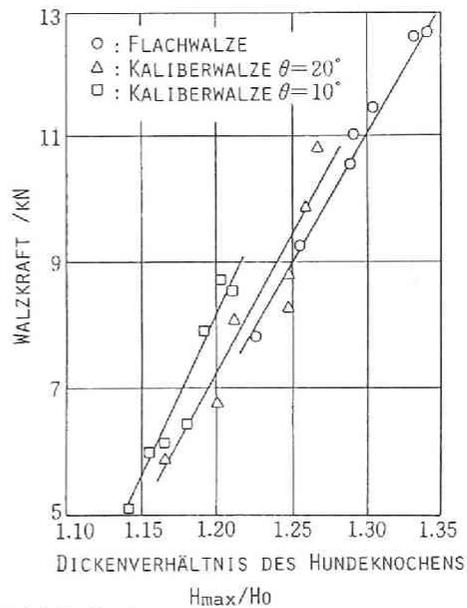


Bild 3-4
Zusammenhang zwischen dem Hundeknochendickenverhältnis und der Walzkraft

Bild 3-4 zeigt den Zusammenhang zwischen dem Hundeknochen-
dickenverhältnis und der Walzkraft beim Horizontalwalzen. Die
Walzkraft vergrößert sich stark und dem zunehmenden Hunde-
knochendickenverhältnis proportional. Der Zusammenhang zwischen
dem Hundeknochendickenverhältnis und dem Walzmoment zeigt eine
ähnliche Tendenz.

Das Walzgut wird nach dem Horizontalwalzen nicht ganz flach,
sondern wird die Zentrumdicke ein wenig dünner als seine An-
fangsdicke. Bild 3-5 zeigt den Zusammenhang zwischen dem Hunde-
knochendickenverhältnis und dem Zentrumdickenverhältnis nach
dem Horizontalwalzen. Die Zentrumdicke nach dem Horizontal-
walzen wird zunächst dünner mit zunehmendem Hundeknochendicken-
verhältnis. Aber wenn das Hundeknochendickenverhältnis noch
größer wird, nämlich wenn die Breitenabnahme beim Vertikal-
walzen noch größer wird, wendet sich die Zentrumdicke zur Zu-
nahme. Das Zentrumdickenverhältnis ist bei der Flachwalze am
kleinsten und wird größer mit abnehmendem Kaliberwinkel der
Vertikalwalze.

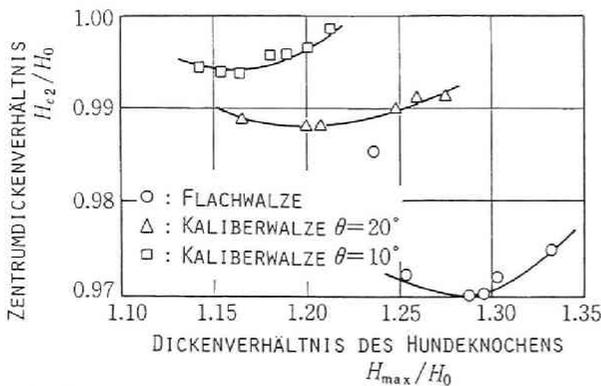


Bild 3-5
Zusammenhang zwischen dem Hunde-
knochendickenverhältnis und dem
Zentrumdickenverhältnis

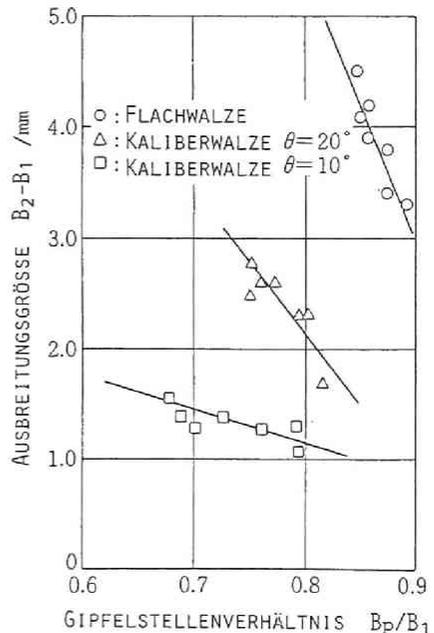


Bild 3-6 zeigt den Zusammenhang zwischen dem Gipfelstellenverhältnis und der Ausbreitungsgröße. Die Ausbreitungsgröße vermindert sich dem zunehmenden Gipfelstellenverhältnis proportional, das bei der Flachwalze am größten ist und mit abnehmendem Kaliberwinkel kleiner wird. Der Verkleinerungsgrad ist bei der Flachwalze am stärksten und wird schwächer mit abnehmendem Kaliberwinkel der Kaliberwalze.

Bild 3-7 zeigt den Zusammenhang zwischen dem Gipfelstellenverhältnis und der Walzkraft, und der Zusammenhang zeigt eine ähnliche Tendenz mit dem im Bild 3-6 gezeigten Zusammenhang zwischen dem Gipfelstellenverhältnis und der Ausbreitungsgröße. Wie Bild 3-8 zeigt, ist der Zusammenhang zwischen dem Gipfelstellenverhältnis und dem Zentrumdickenverhältnis nicht deutlich.

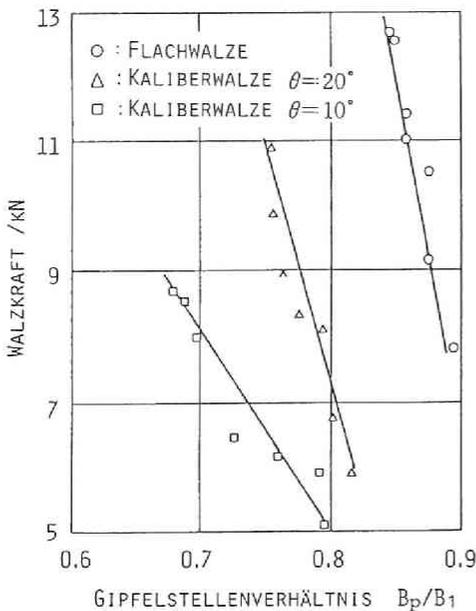


Bild 3-7 Zusammenhang zwischen dem Gipfelstellenverhältnis und der Walzkraft

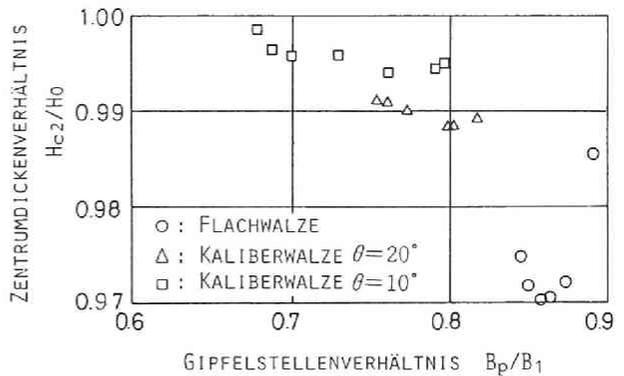


Bild 3-8 Zusammenhang zwischen dem Gipfelstellenverhältnis und dem Zentrumdickenverhältnis

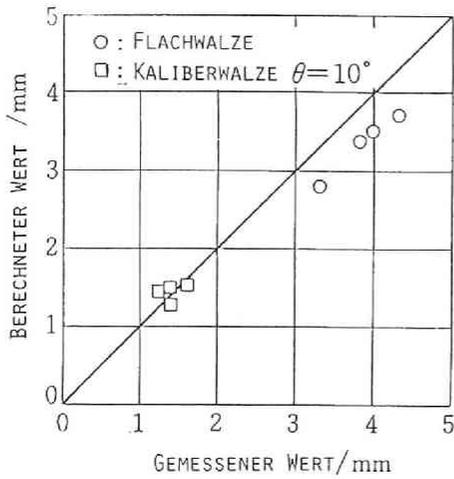
← Bild 3-6 Zusammenhang zwischen dem Gipfelstellenverhältnis und der Ausbreitungsgröße

3.3.2. Vergleich zwischen den experimentellen und analytischen Ergebnissen

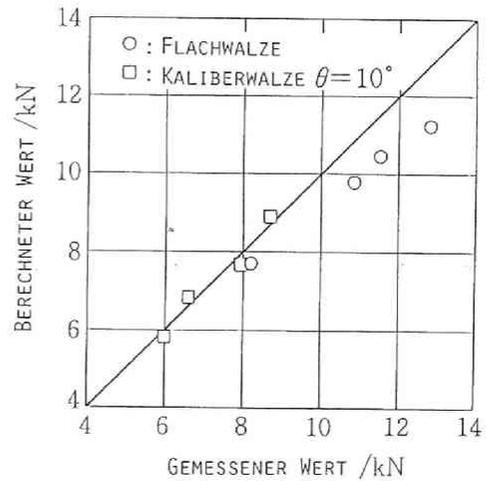
In Bild 3-9 (a), (b) und (c) sind die Vergleiche zwischen den gemessenen und berechneten Werten dargestellt, um die Gültigkeit des in 3.2.2. vorgeschlagenen analytischen Verfahrens über das Horizontalwalzen des hundeknochenförmigen Walzgutes festzustellen. Und zwar zeigt Bild 3-9 (a) den Zusammenhang zwischen den gemessenen und berechneten Werten über die Ausbreitungsgröße, Bild 3-9 (b) über die Walzkraft und Bild 3-9 (c) über das Zentrumdickenverhältnis. Über die Ausbreitungsgröße stimmen die berechneten Werte mit den gemessenen Werten gut überein, besonders bei der Kaliberwalze. Bei der Flachwalze sind die berechneten Werte etwas kleiner als die gemessenen Werte. Die Ursache von diesem Unterschied dazwischen kann darin liegen, daß bei der Rechnung das Walzgut in nur zwei Elemente in der Dickenrichtung geteilt wird, obwohl die Hundeknochenform bei der Flachwalze steiler ist als sie bei der Kaliberwalze. Über die Walzkraft stimmen auch die berechneten Werte mit den gemessenen Werten überein, gut bei der Kaliberwalze und mit kleinem Rechenfehler bei der Flachwalze. Über das Zentrumdickenverhältnis stimmen die beiden Werte miteinander qualitativ gut überein, obgleich die berechneten Werte kleiner sind als die gemessenen Werte.

Daraus kann man so schließen, daß die analytischen Ergebnisse mit den experimentellen Ergebnissen gut überein. Dies zeigt, daß das hier vorgeschlagene analytische Verfahren eine praktische und genügende Gültigkeit für die qualitative Unter-

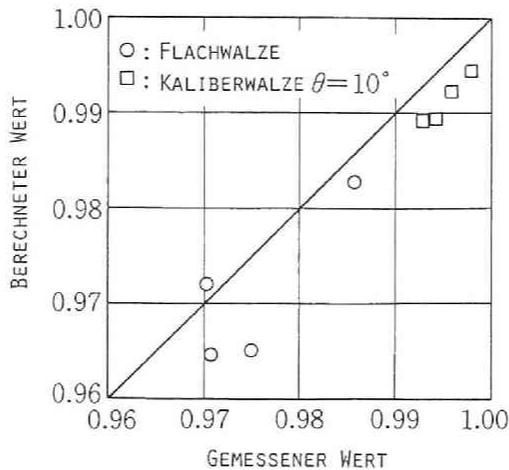
suchung über den Walzvorgang beim Horizontalwalzen des hundenknochenförmigen Walzgutes hat.



(a)



(b)



(c)

Bild 3-9 Zusammenhang zwischen berechneten und gemessenen Werten der Ausbreitungsgröße (a), der Walzkraft (b) und des Zentrumsdickenverhältnisses (c)

3.3.3. Rechnerische Ergebnisse über die Wirkung des Hundeknochendickenverhältnisses und des Gipfelstellenverhältnisses auf den Walzvorgang

Die Ausbreitungsgröße, die Walzkraft, das Walzmoment und die

Verminderung der Zentrumdicke verändert sich mit dem Hundeknochendickenverhältnis und gleichzeitig mit dem Gipfelstellenverhältnis, wie Bild 3-3, 3-4 usw. zeigen. Aber soweit von den Bildern beurteilt, ist es sehr schwer zu entscheiden, welches von den beiden Verhältnissen auf den Walzvorgang herrschend wirkt, weil die Werte des Gipfelstellenverhältnisses an den gemessenen Punkten, die den Zusammenhang zwischen dem Hundeknochendickenverhältnis und der Walzeigenschaft in jedem Bild zeigen, nicht immer gleich sind.

Daher wurde eine rechnerische Entscheidung über den Wirkungsgrad des Hundeknochendickenverhältnisses und des Gipfelstellenverhältnisses auf den Walzvorgang in den folgenden beiden Fällen versucht:

1. Im Fall, daß das Gipfelstellenverhältnis mit einem Wert von 0,7 konstant ist und sich der Wert des Hundeknochendickenverhältnisses von 1,0 bis 1,5 verändert. (vgl. Bild 3-2 (a))
 2. Im Fall, daß das Hundeknochendickenverhältnis mit einem Wert von 1,25 konstant ist und sich der Wert des Gipfelstellenverhältnisses von 0,5 bis 0,9 verändert. (vgl. Bild 3-2 (b))
- Bild 3-10 und Bild 3-11 zeigen die rechnerischen Ergebnisse über den Einfluß des Hundeknochendickenverhältnisses und des Gipfelstellenverhältnisses auf die Ausbreitungsgröße, auf die Walzkraft, auf das Walzmoment und auf das Abnahmenverhältnis der Zentrumdicke. Bild 3-10 zeigt, daß sich die Walzkraft, das Walzmoment, die Ausbreitungsgröße und das Abnahmenverhältnis der Zentrumdicke dem Hundeknochendickenverhältnis proportional vergrößern. Dagegen zeigt Bild 3-11, daß sich die Walzkraft, das Walzmoment, die Ausbreitungsgröße und das Abnahmen-

verhältnis der Zentrumdicke mit dem Gipfelstellenverhältnis fast kaum verändern.

Daraus kann man schließen, daß der Einfluß des Hundeknochendickenverhältnisses auf den Walzvorgang viel stärker ist als der des Gipfelstellenverhältnisses.

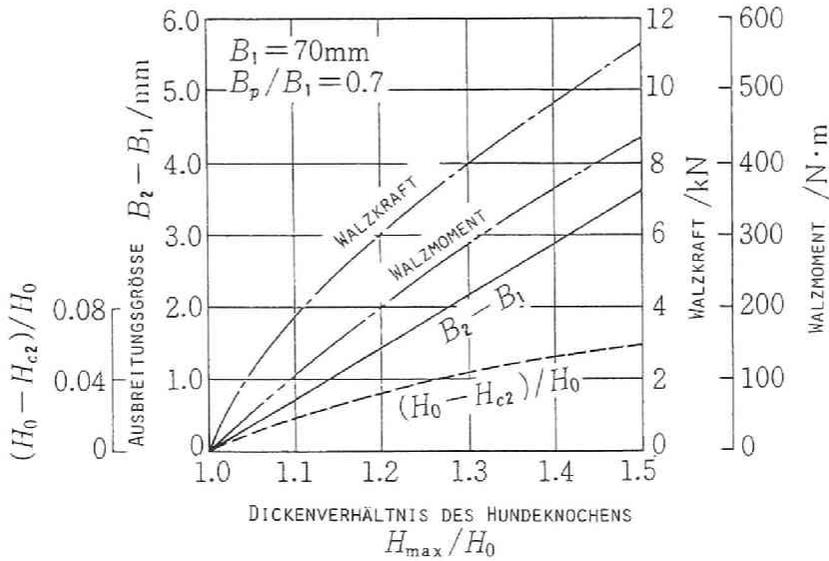


Bild 3-10 Rechnerisches Ergebnis über den Zusammenhang zwischen dem Hundeknochendickenverhältnis und den Walzeigenschaften beim Horizontalwalzen

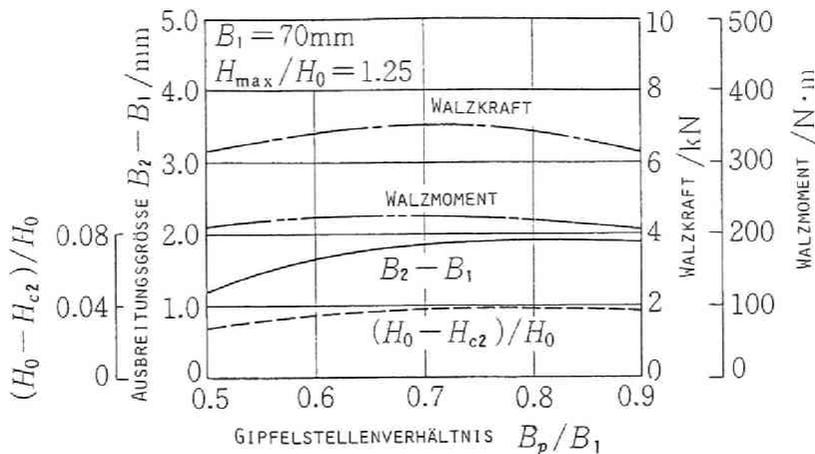


Bild 3-11 Rechnerisches Ergebnis über den Zusammenhang zwischen dem Gipfelstellenverhältnis und den Walzeigenschaften beim Horizontalwalzen

3.4. Zusammenfassung

In diesem Kapitel wurden das Experiment und die Analyse über das Horizontalwalzen des hundeknochenförmigen Walzgutes durchgeführt, und die folgenden Ergebnisse wurden erworben.

- 1) Das Hundeknochendickenverhältnis hat einen viel stärkeren Einfluß auf den Walzvorgang beim Horizontalwalzen als das Gipfelstellenverhältnis.
- 2) Die Ausbreitungsgröße und der Kraftbedarf beim Horizontalwalzen vergrößern sich dem zunehmenden Hundeknochendickenverhältnis proportional.
- 3) Die Zentrumsdicke nach dem Horizontalwalzen wird zunächst dünner mit zunehmendem Hundeknochendickenverhältnis. Aber wenn das Hundeknochendickenverhältnis noch größer wird, nämlich wenn die Breitenabnahme beim Vertikalwalzen noch größer wird, wendet sich die Zentrumsdicke zur Zunahme.

Für die Rechnung wurde die Elektronenrechenmaschine FACOM M-200 an der Uni. Kyoto verwandt, und die Rechenzeitdauer war 50 ~ 70 Sekunden.

4. VERTEILUNG DER IM WALZGUT HERVORGERUFENEN SPANNUNGEN BEIM BREITENABNAHMENPROZESS

4.1. Einleitung

Beim Breitenabnahmenprozeß der Brammen ist es eine wichtige Frage, ob die durch das Walzen im Walzgut hervorgerufenen Spannungen Flächen- und Innenrisse der stranggegossenen Brammen erweitern können. Daher soll es vor der praktischen Anwendung dieses Prozesses genug untersucht werden, wo und wie groß die Spannungen im Walzgut entstehen und wie die Walzbedingungen auf die Verteilung der Spannungen wirken.

In diesem Kapitel werden diese Fragen durch das Modellversuch anhand der Plasticine-Platten und auch durch die analytische Berechnung mit dem starr-plastischen Finite-Elemente-Verfahren untersucht.

4.2. Versuchs- und Berechnungsverfahren

4.2.1. Versuchsmethode

Als Modellversuch wurden Plasticine-Platten mit einer Breite von 190 mm und mit einer Dicke von 28 mm durch die Vertikal- und Horizontalwalze gewalzt. Diese Größe entspricht etwa 1/10 von der praktisch stranggegossenen Brammen. Als Vertikalwalze wurden eine Flachwalze und drei verschiedene Kaliberwalzen mit einem Durchmesser von 120 mm und mit einer Drehzahl von 3,75 r.p.m. benutzt. Bild 4-1 zeigt die Form der Kaliberwalzen

und ihre Größe. Wie das Bild zeigt, haben die Kaliberwalzen je einen Kaliberwinkel von $7,6^\circ$ (Form I), $14,9^\circ$ (Form II) und $21,8^\circ$ (Form III) (je eine Neigung der Kaliberwand von 13,3 %, 26,6 % und 40,0 %).

Das Walzgut mit rechteckigem Querschnitt wurde zuerst mit einer Breitenabnahme von 15 mm (Breitenabnahmenverhältnis von 7,9 %) und dann weiter mit einer Breitenabnahme von 15 mm (8,6 %) durch die gleichartige Vertikalwalze gewalzt. Das dadurch gewonnene hundeknochenförmige Walzgut wurde durch die Flachwalze bis zur Anfangsdicke von 28 mm horizontalgewalzt. Die Normalspannungen in Breiten-, Walz- (Längs-) und Dickenrichtung des Walzgutes, σ_W , σ_L und σ_H , wurden anhand der Drucksensoren mit einem Durchmesser von 6 mm und einer Dicke von 0,6 mm gemessen. Dabei wurden die Sensoren an drei Stellen, je 7 mm, 15 mm und 35 mm von dem Breitenende der Probe entfernt, und auch in der Breitenmitte vorher begraben, wie sie in Bild 4-2 wiedergegeben sind. Um die begrabenen Stellen und Richtungen genau zu halten, wurden die Drucksensoren vor jedem Walzen neu begraben.

Es wurde im Vorversuch festgestellt, daß der Drucksensor auch auf eine Zugspannung, die kleiner ist als etwa 1 kgf/cm^2 , sicher antworten kann, aber daß in diesem Fall die quantitative Zuverlässigkeit niedrig ist.

Die Temperatur des Walzgutes war immer auf 20°C gehalten.

4.2.2. Rechnerische Methode

Die rechnerische Methode mit starr-plastischen finiten Elemen-

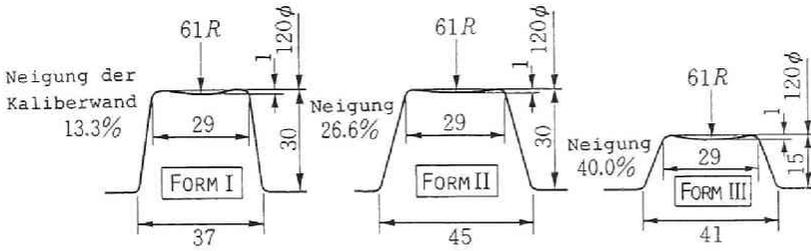


Bild 4-1 Profil von drei Kaliberwalzen

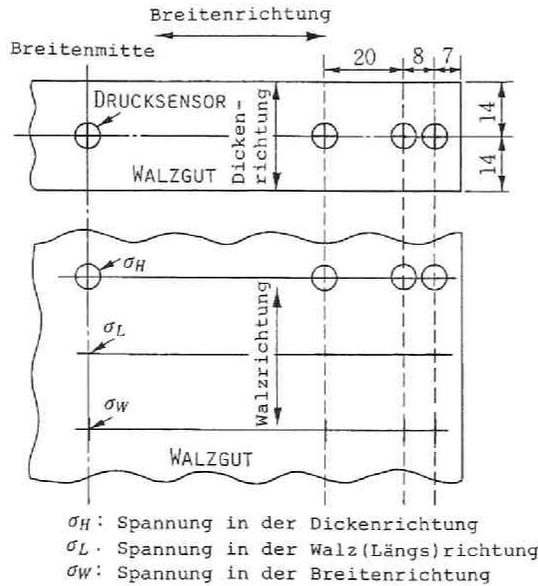


Bild 4-2 Stellen und Richtungen der Drucksensoren im Walzgut

ten ist im zweiten und dritten Kapitel eingehend dargestellt. Die für die Rechnung erforderliche Fließspannung von Plastizine wird nach Chijiwa et al.⁷²⁾ durch die folgende Gleichung gegeben:

$$\sigma = 1.15 \times 10^{-5} \epsilon^{0.085} \dot{\epsilon}^{0.12} \exp\left(\frac{3530}{T}\right) \quad \text{in kgf/cm}^2 \quad (4-1)$$

$$T = 253 \sim 323 \text{ K}, \quad \epsilon = 0,02 \sim 0,3, \quad \dot{\epsilon} = 10^{-2} \sim 10^0 \text{ 1/s.}$$

Darin ist T die absolute Temperatur. Unter bestimmten Walzbedingungen überschreitet die Vergleichsdehnung ϵ den Anwendungsbereich der Gleichung ein wenig. Es wurde angenommen, daß auch

in diesem Fall die Gleichung doch noch gültig ist.

Die Reibungskoeffizient zwischen Walze und Plasticine wurde um 0,45 angenommen.

4.3. Experimentelle und berechnete Ergebnisse

4.3.1. Spannungsverteilung während des Vertikalwalzens mit Kaliberwalze

Bild 4-3 (a) und (b) zeigen die Abläufe der gemessenen Span-

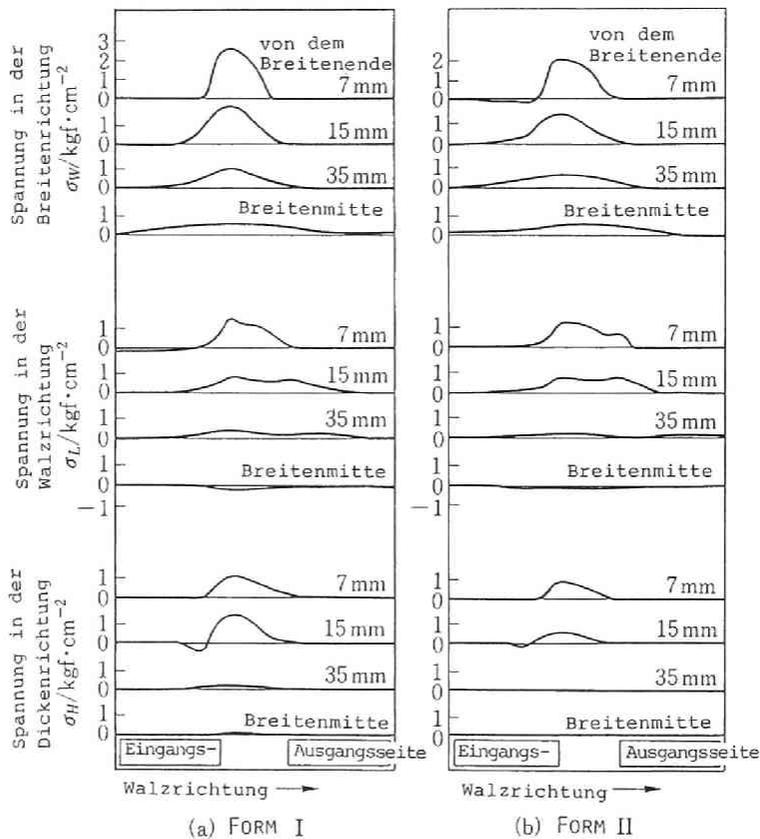


Bild 4-3 Experimentelle Ergebnisse über die Änderung von drei Normalspannungen während des ersten Vertikalwalzens mit Kaliberwalze von Form I und II

nungen in Breiten-, Walz- (Längs-) und Dickenrichtung des Walzgutes, σ_W , σ_L und σ_H , während des ersten Vertikalwalzens mit Kaliberwalze von Form I und von Form II. In diesen Bildern sind die Druckspannungen positiv angegeben. Mit der Entfernung von dem Breitenende verkleinert sich der Wert jeder Spannung, aber damit breitet sich der Einflußbereich der Spannungen aus. Die Spannungen im Walzgut sind größtenteils Druckspannungen. Aber die Längsspannung σ_L in der Umgebung der Breitenmitte und die Dickenspannung σ_H vor dem Walzspalt an der um 15 mm von dem Breitenende entfernten Stelle sind Zugspannungen. Der Wert der Druckspannung von σ_L verkleinert sich einmal in der Mitte des Walzspaltes. Die maximale Druckspannung entsteht an der Eingangsseite des Walzspaltes wie sie beim Dickplattenwalzen.

Bild 4-4 zeigt die nach dem starr-plastischen Finite-Elemente-Verfahren berechneten Ergebnisse über die Verteilung der Spannungen im Walzgut während des Vertikalwalzens mit Kaliberwalze von Form II. Und zwar zeigt das Bild 4-4 (a) die Spannungsverteilung im L.W-Querschnitt beim ersten Vertikalwalzen, wodurch die Breite des Walzgutes von 190 mm zu 175 mm abgenommen wird, und die beim zweiten Vertikalwalzen, wodurch die Breite von 175 mm zu 160 mm abgenommen wird. Die gestrichelten Linien im Bild zeigen die Fließlinien der Punkte, wo die Drucksensoren begraben sind. Das Bild 4-4 (b) zeigt den Ablauf der Spannungen während des ersten Vertikalwalzens an den gemessenen Punkten, der den Fließlinien entlang erworben wird. Die Verteilung der σ_W und der σ_H verhalten sich miteinander ähnlich, und beide zeigen eine sogenannte muschelförmige

Gestalt im Bild (a) und eine konvexförmige Kurve im Bild (b). Die Verteilung der σ_L verhältet sich aber anders als die von σ_W und σ_H und zeigt eine konkavförmige Kurve im Bild (b). Ferner wird die Längsspannung σ_L in der Umgebung der Breitenmitte eine verhältnismäßig große Zugspannung. Diese Ergebnisse

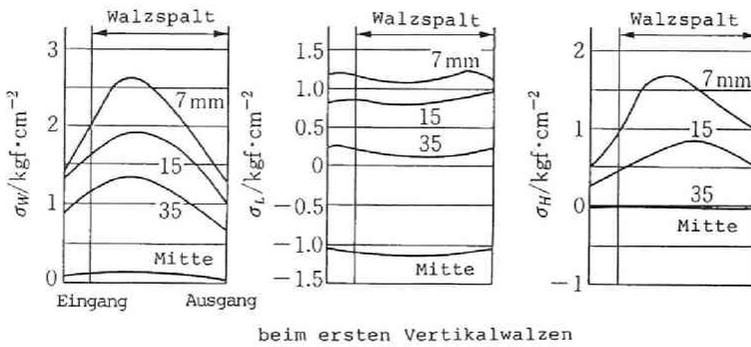
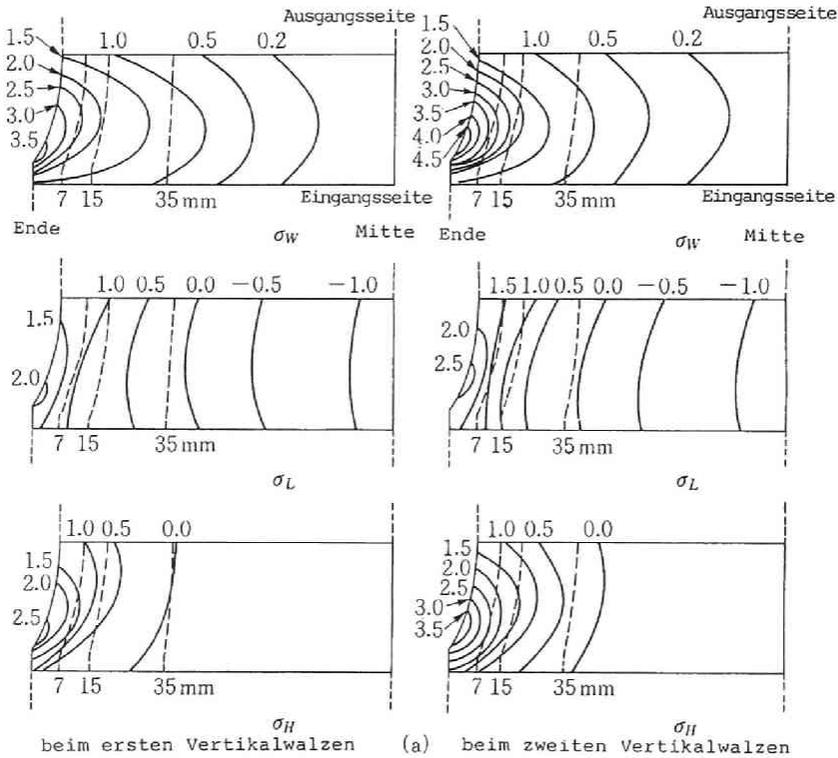


Bild 4-4 Berechnete Ergebnisse über die Verteilung der Spannungen im Walzgut während des Vertikalwalzens mit Kaliberwalze von Form II

stimmen mit den im Bild 4-3 gezeigten gemessenen Ergebnissen im ganzen gut überein.

Vergleicht man die beiden Darstellungen der Spannungsverteilung im Bild 4-4 (a) miteinander, kann man es leicht verstehen, daß die Werte der Spannungen bei zweiten Vertikalwalzen im ganzen größer sind als die beim ersten.

Bild 4-5 zeigt die gemessenen und berechneten Ergebnisse über die maximale Spannungsverteilung in der Breitenrichtung während des Vertikalwalzens mit Kaliberwalze von Form II und die gute Übereinstimmung von beiden Werten. Jede Spannung ist am Breitenende am größten und wird umso kleiner, je näher sie zur Breitenmitte kommt. In diesem Fall ist es beachtlich, daß die Spannung σ_L eine Zugspannung wird, wo die Entfernung von dem Breitenende größer ist als ungefähr 40 mm, und daß die Größe der Zugspannung in der Breitenmitte nach dem berechneten Ergebnis nicht außerachtgelassen werden kann. Daß die

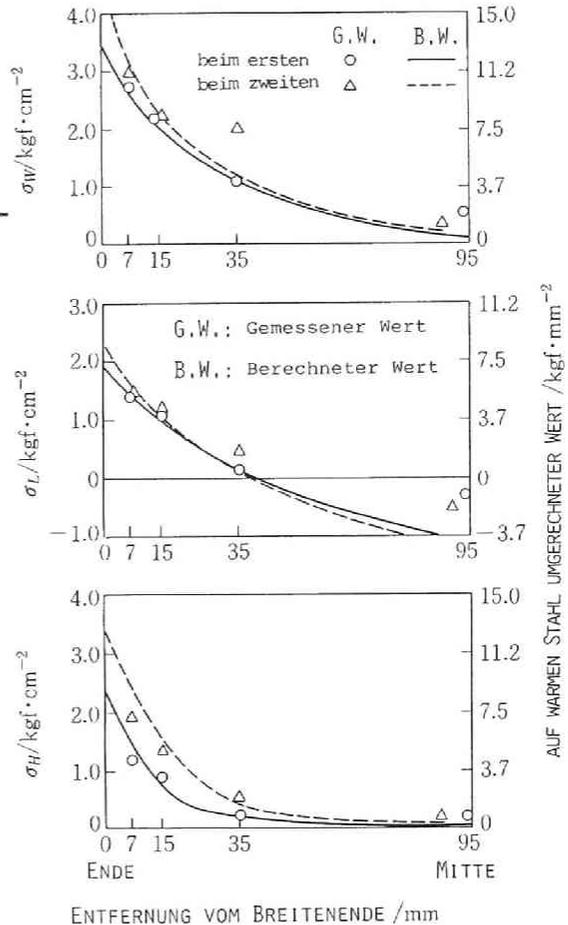


Bild 4-5
Vergleich zwischen berechneten und gemessenen Ergebnissen über die maximalen Spannungen während des Vertikalwalzens mit Kaliberwalze von Form II

gemessenen Werte der Zugspannung in der Breitenmitte etwas kleiner sind als die berechneten Werte, kann man damit begründen, daß bei der Zugspannung der Drucksensor eine schlechtere Zuverlässigkeit hat als bei der Druckspannung. Die rechte Vertikalachse des Bildes zeigt den auf warmen Stahl umgerechneten Werte unter der Annahme, daß die Fließspannung von $1,0 \text{ kgf/cm}^2$ beim Plasticine der Fließspannung von $3,7 \text{ kgf/mm}^2$ beim warmen Stahl entspricht.

4.3.2. Spannungsverteilung während des Horizontalwalzens des hundeknochenförmigen Walzgutes

Das durch die zweimal durchgeführten Vertikalwalzen je mit einer Breitenabnahme von 15 mm gewonnene hundeknochenförmige Walzgut wurde bis zu seiner Anfangsdicke horizontalgewalzt. Bild 4-6 zeigt die Verteilung von drei berechneten Normalspannungen im L.W-Querschnitt beim Horizontalwalzen, das nach dem Vertikalwalzen mit Kaliberwalze von Form II durchgeführt wurde. Die Verhalten der Verteilung der σ_W und der σ_H zeigen eine ähnliche Figur, obwohl die Größen der Spannungen unterschiedlich sind. Die maximale Druckspannung der σ_H entsteht an der Gipfelstelle des Hundeknochens, aber die der σ_W verschiebt sich etwas zur Breitenmitte. In der Umgebung der Breitenmitte werden die Spannungen von σ_W und insbesondere von σ_L eine Zugspannung. Es ist zu beachten, daß eine verhältnismäßig große Zugspannung nicht nur beim Vertikalwalzen entsteht, sondern auch beim Horizontalwalzen in der Umgebung der Breitenmitte des Walzgutes. Infolgedessen sollten die Brammen

beim Stranggießverfahren so gegossen werden, daß sie nicht nur auf ihre Oberfläche sondern auch in ihrem Innern keinen Fehler haben, um die Vergrößerung des Fehlers durch die beim Vertikal- und Horizontalwalzen hervorgerufene Zugspannung zu vermeiden.

Bild 4-7 zeigt die gemessenen und berechneten Ergebnisse über die maximale Spannungsverteilung in der Breitenrichtung beim Horizontalwalzen. Außer den Werten der Spannungen von σ_L und von σ_W in der Breitenmitte stimmen die berechneten Werte mit

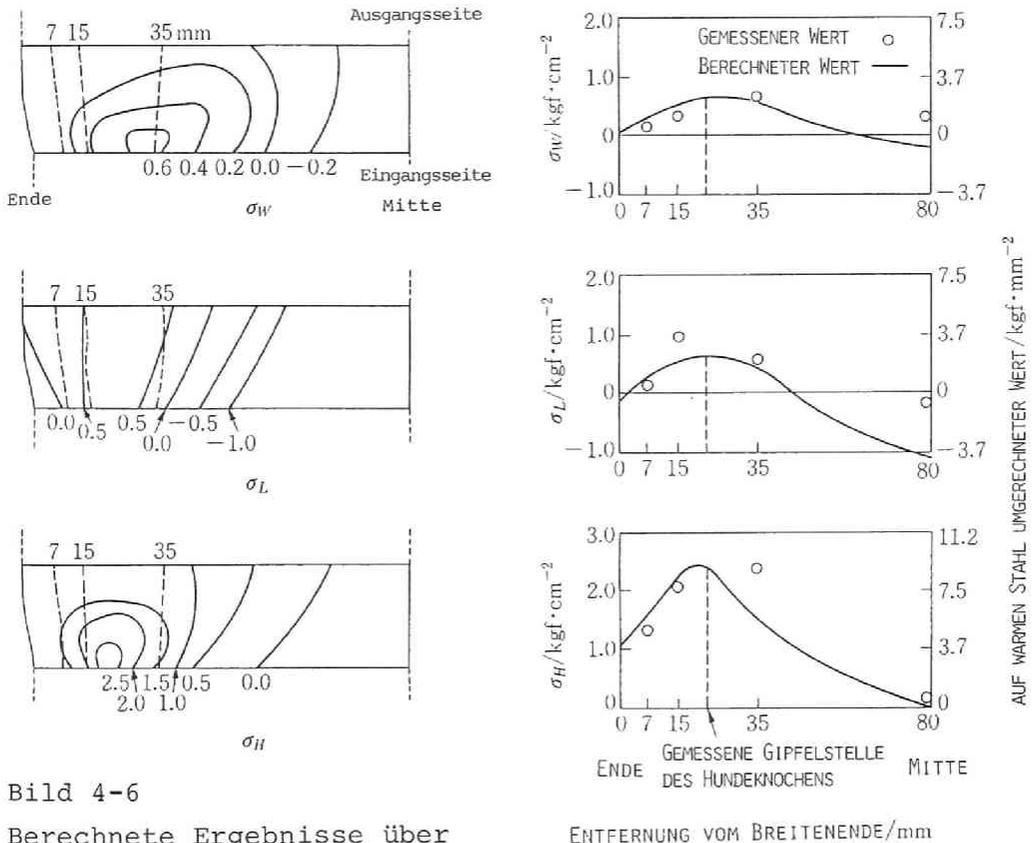


Bild 4-6

Berechnete Ergebnisse über die Spannungsverteilung während des Horizontalwalzens nach dem Vertikalwalzens mit Kaliberwalze von Form II

Bild 4-7

Vergleich zwischen berechneten und gemessenen Ergebnissen über die maximalen Spannungen während des Horizontalwalzens mit Form II

den gemessenen Werten sehr gut überein. Das Bild zeigt auch, daß am Breitenende die Spannung von σ_L eine kleine Zugspannung wird. Dies bedeutet, daß an der Brammenkante manchmal entstehende Risse durch die Zugspannung entwickelt werden können. Die rechte Vertikalachse im Bild zeigt den auf warmen Stahl umgerechneten Wert wie die im Bild 4-5.

4.3.3. Einfluß der Form der Vertikalwalze auf die Spannungsverteilung

Bild 4-8 zeigt die gemessenen und berechneten Ergebnisse über

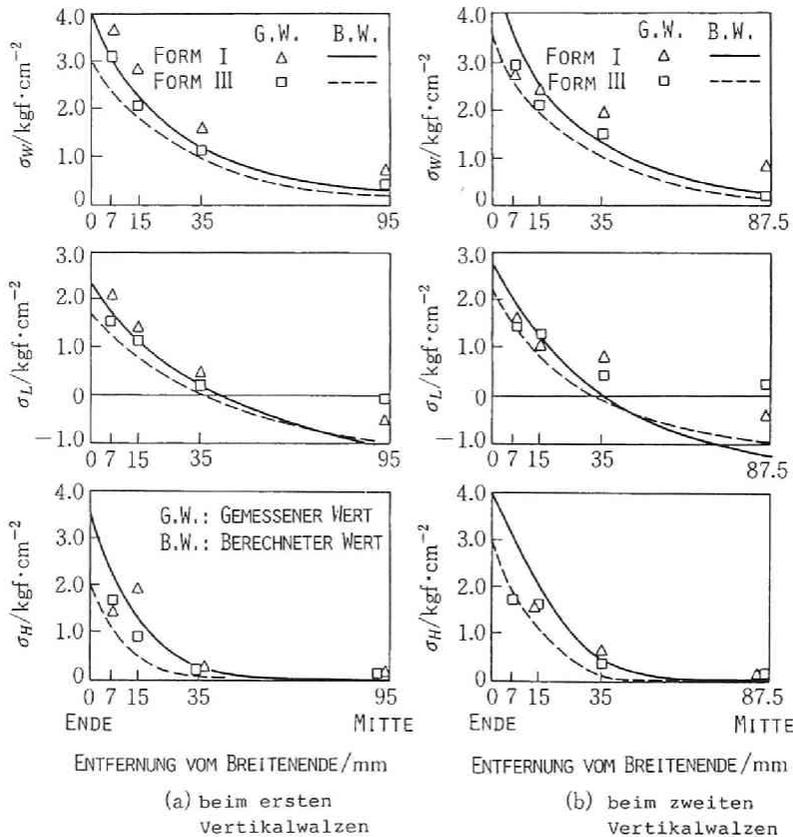


Bild 4-8 Verteilung der maximalen Spannungen beim Vertikalwalzen mit Kaliberwalze von Form I und III

die Verteilung der maximalen Normalspannungen in der Breitenrichtung beim Vertikalwalzen mit Kaliberwalze von Form I und von Form III. Jede Spannung bei der Vertikalwalze mit einem Kaliberwinkel von $7,6^\circ$ (Form I) ist größer als bei der Kaliberwalze mit einem Kaliberwinkel von $21,8^\circ$ (Form III), und der Unterschied dazwischen wird umso geringer, je näher es zur Breitenmitte kommt. Die berechneten Werte sind dabei ein wenig kleiner als die gemessenen Werte, aber die beiden stimmen miteinander im ganzen gut überein. Daß es in der Breitenmitte einen gewissen Unterschied zwischen den berechneten und gemessenen Werten der Spannung σ_L gibt, kann von der Meßunsicherheit des Sensors bei der Zugspannung abhängen. Die Spannungen beim zweiten Vertikalwalzen werden etwas größer

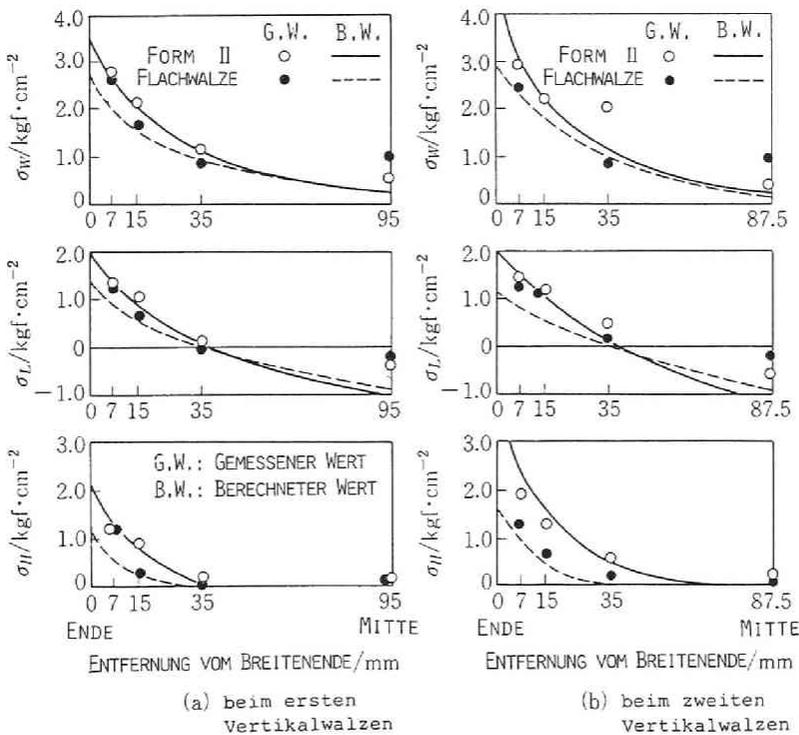


Bild 4-9 Verteilung der maximalen Spannungen beim Vertikalwalzen mit Flachwalze und Kaliberwalze von Form II

als die beim ersten Vertikalwalzen, aber die Verhalten der Spannungsverteilung sind miteinander ähnlich.

Bild 4-9 zeigt die maximale Spannungsverteilung in der Breitenrichtung beim Vertikalwalzen mit Flachwalze im Vergleich mit der beim Vertikalwalzen mit Kaliberwalze. Die Spannungen bei der Flachwalze sind im ganzen kleiner als sie bei der Kaliberwalze, besonders am Breitenende. Das Verhalten der Spannungsverteilung bei der Flachwalze ist aber grundsätzlich gleich mit dem bei der Kaliberwalze.

Bild 4-10 zeigt die berechnete Spannungsverteilung im L.W-Querschnitt beim ersten Vertikalwalzen mit Kaliberwalze von Form I, Kaliberwalze von Form III und Flachwalze. Im Vergleich der in Bild 4-10 und in Bild 4-4 dargestellten Spannungen miteinander wird es klar, daß die Spannungen beim Vertikalwalzen

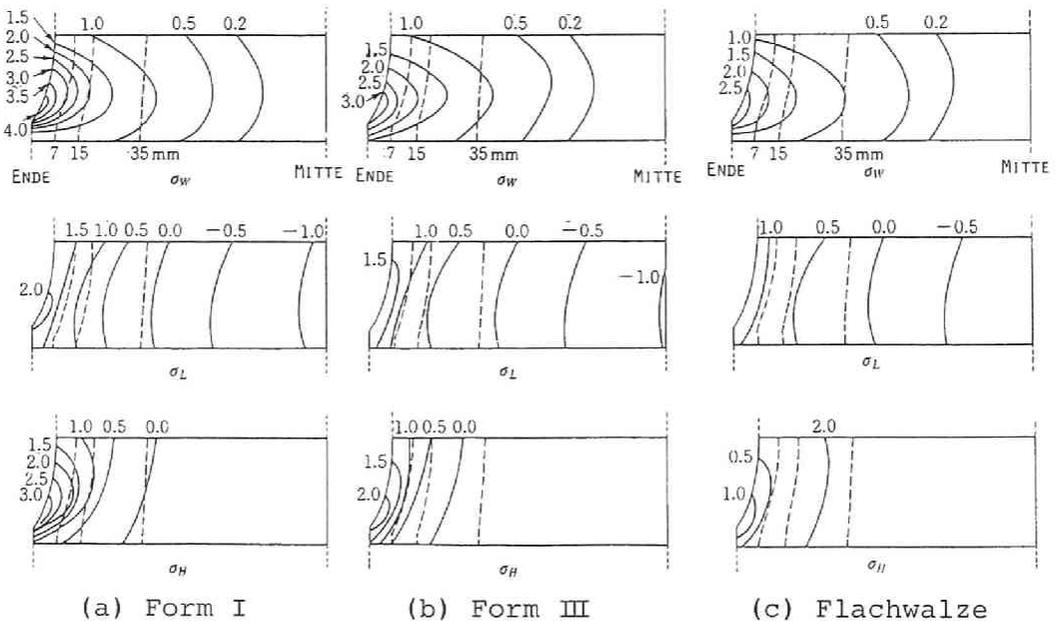


Bild 4-10 Berechnete Ergebnisse über die Spannungsverteilung beim ersten Vertikalwalzen mit Kaliberwalze von Form I, Kaliberwalze von Form III und Flachwalze

bei der Flachwalze am kleinsten sind, und daß mit abnehmendem Kaliberwinkel die Spannungen immer größer werden und der Wirkungsbereich der Breitenabnahme immer mehr in die Breitenmitte kommt.

Bild 4-11 zeigt die gemessenen und berechneten Ergebnisse über die maximale Spannungsverteilung in der Breitenrichtung

beim Horizontalwalzen nach den zweimaligen Vertikalwalzen mit Kaliberwalze von Form I und III.

Aus diesem Bild und dem Bild 4-7 kann man leicht verstehen, daß sich die Gipfelstelle jeder Spannungsverteilung mit abnehmendem Kaliberwinkel der Vertikalwalze zur Breitenmitte verschiebt.

Dies bedeutet, daß sich die Formänderung beim Vertikalwalzen mit abnehmendem Kaliberwinkel zur Breitenmitte mehr ausbreitet.

Die Form der Vertikalwalze hat einen Einfluß auf die Zugspannung am Breitenende, und zwar verkleinert sich die Zugspannung von σ_L am Breitenende mit zunehmendem Kaliberwinkel.

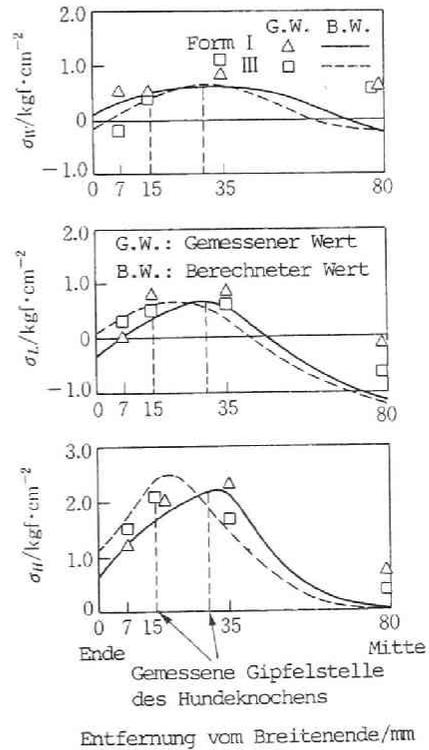


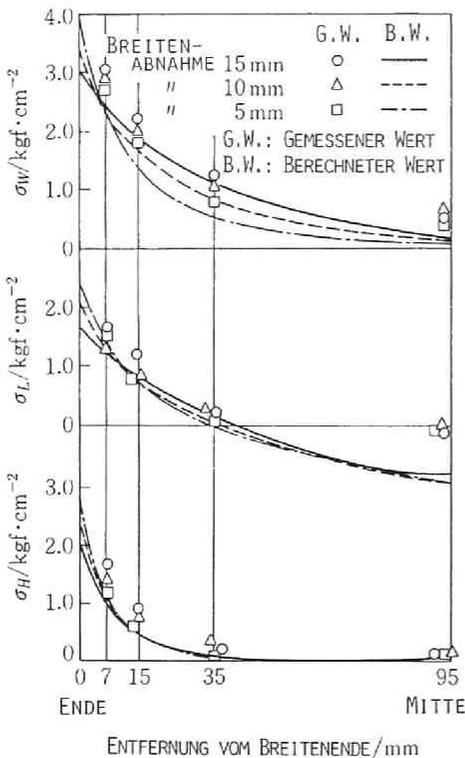
Bild 4-11
Verteilung der maximalen Spannungen während des Horizontalwalzens nach dem Vertikalwalzen mit Kaliberwalze von Form I und von Form III

4.3.4. Einfluß der Größe der Breitenabnahme auf die Spannungsverteilung

Um den Einfluß der Größe der Breitenabnahme auf die Spannungsverteilung beim Vertikalwalzen zu untersuchen, wurde das Walzgut mit einer Breite von 190 mm und einer Dicke von 28 mm anhand der Kaliberwalze von Form III mit drei verschiedenen Breitenabnahmen von 5 mm, 10 mm und 15 mm vertikalgewalzt.

Bild 4-12 zeigt die unter diesen Walzbedingungen berechneten und gemessenen Ergebnisse über die maximale Spannungsverteilung in der Breitenrichtung, und Bild 4-13 zeigt die berechnete Spannungsverteilung im L.W-Querschnitt. Mit zunehmender Breitenabnahme vergrößern sich die Spannungen im ganzen.

Nach dem berechneten Ergebnis wird aber diese Tendenz umge-



kehrt am Breitenende, wo das Walzgut die Walze berührt. Dies bedeutet, daß mit zunehmender Breitenabnahme die Lokalisierung der Formänderung am Breitenende schwächer wird und sich statt dessen die Verformungszone zur Breitenmitte ausbreitet.

Bild 4-12
Verteilung der maximalen Spannungen während des ersten Vertikalwalzens anhand der Kaliberwalze von Form III mit drei verschiedenen Breitenabnahmen von 5 mm, 10 mm und 15 mm

4.4. Zusammenfassung

Durch eine Reihe von Modellversuchen mit Plasticine wurde es untersucht, wie die Verteilung der Spannungen im Walzgut beim Breitenabnahmenprozeß ist, und wie sich die Spannungsverteilung durch die Walzbedingungen verändert. Zugleich wurde die Spannungsverteilung nach dem Finite-Elemente-Verfahren analysiert, und die berechneten Ergebnisse wurden mit den gemessenen Ergebnissen verglichen. Obwohl es teilweise einen kleinen Unterschied dazwischen gibt, stimmen die beiden im ganzen nicht nur qualitativ, sondern auch quantitativ gut überein. Wenn man die Gültigkeit der Voraussetzungen, z.B. die genaue Stellen- und Richtungssetzung des begrabenen Drucksensors und die Genauigkeit der Fließspannungsgleichung von Plasticine, berücksichtigt, kann man so schließen, daß der Unterschied zwischen den berechneten und gemessenen Ergebnissen in einem zulässigen Bereich liegt, und daß die hier vorgeschlagene analytische

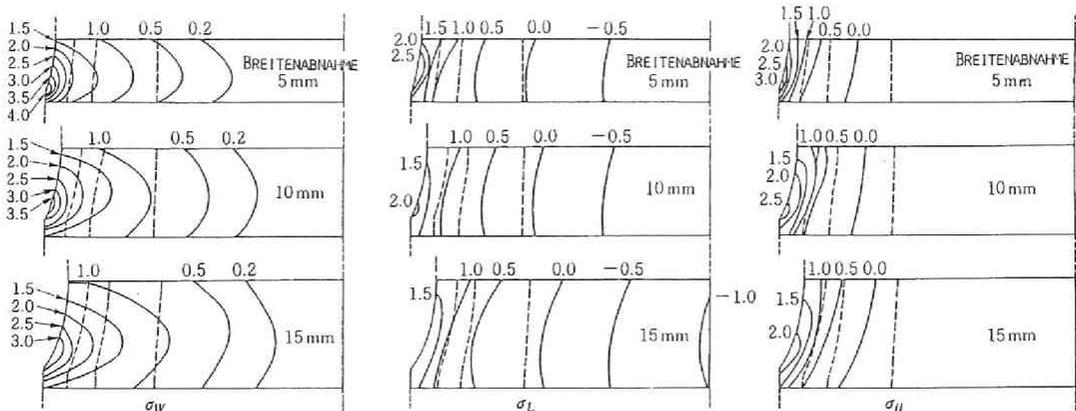


Bild 4-13 Berechnete Ergebnisse über die Spannungsverteilung beim Vertikalwalzen anhand der Kaliberwalze von Form III mit drei verschiedenen Breitenabnahmen von 5 mm, 10 mm und 15 mm

Methode verlässlich ist.

Die Eigentümlichkeit der Spannungsverteilung im Breitenabnahmenprozeß der Brammen kann wie folgt zusammengefaßt werden:

- 1) Beim Vertikalwalzen und dem nachfolgenden Horizontalwalzen wird die Spannung in der Walzrichtung σ_L in der Umgebung der Breitenmitte des Walzgutes eine verhältnismäßig große Zugspannung. Dies bedeutet, daß Innenrisse, die im Strangguß unerwartet erscheinen, in der Umgebung der Breitenmitte der Brammen durch das Walzen vergrößert werden können. Daher sollte die Entstehung von Innenrissen beim Stranggießverfahren völlig zurückgehalten werden.
- 2) Beim Horizontalwalzen wird die Spannung in der Walzrichtung σ_L nach den Walzbedingungen nicht nur in der Umgebung der Breitenmitte eine Zugspannung, sondern auch am Breitenende. Diese Zugspannung kann einen Anlaß für die Entwicklung der Risse an der Brammenkante geben.
- 3) Die Form der Vertikalwalze und die Größe der Breitenabnahme haben einen bedeutsamen Einfluß auf die Größe der Spannungen. . . Die am Breitenende entstehende Zugspannung beim Horizontalwalzen kann durch die Zunahme des Kaliberwinkels vermieden werden. Dagegen kann die in der Umgebung der Breitenmitte entstehende Zugspannung beim Vertikal- und auch Horizontalwalzen nicht vermieden werden.

5. EINFLUSS DES WALZENDURCHMESSERS UND DER BRAMMENBREITE AUF DIE WALZEIGENSCHAFTEN BEIM WALZEN FÜR DIE BREITEN- ABNAHME DER BRAMMEN

5.1. Einleitung

Bis hierher wurde eine Reihe von den experimentellen und analytischen Untersuchungen über die Walzeigenschaften beim Vertikal- und Horizontalwalzen der Brammen durchgeführt, und zahlreiche Fragen sind gelöst. Aber der Einfluß des Walzendurchmessers und der Brammenbreite auf die Walzeigenschaften stellte eine ungelöste Frage dar. Unter Berücksichtigung dieser Situation wurde eine weitere Untersuchung über die Wirkung des Walzendurchmessers und der Brammenbreite auf die Walzkraft, das Walzmoment, die Walzleistung und das Umformverhalten beim Vertikalwalzen und beim nachfolgenden Horizontalwalzen durchgeführt.

5.2. Versuchsmethode

Als Walzgut wurden die im Heizofen auf eine Temperatur von 500°C erwärmten Aluminiumplatten mit einer Dicke von 12 mm und mit verschiedenen Breiten von 36 mm bis 96 mm (Breiten-Dickenverhältnis ist 3 ~ 8) benutzt. Die Fließspannung des benutzten Werkstoffs bei dieser Temperatur kann nach den gemessenen Werten durch die folgende Gleichung dargestellt werden:

$$\sigma = 16 \cdot \epsilon^{0,085} \cdot \dot{\epsilon}^{0,17} \quad \text{in N/mm}^2 \quad (5-1)$$

Als Vertikalwalze wurden Flach- und Kaliberwalzen mit einem konstanten Kaliberwinkel von 15° und mit vier verschiedenen Walzendurchmessern von 60 mm, 80 mm, 100 mm und 120 mm benutzt. Die Drehzahl der Walze war immer 15,2 r.p.m.. Beim Experiment zum Ermitteln des Walzendurchmessereinflusses wurden nur die Platten mit einer Breite von 84 mm, und beim Experiment zum Ermitteln des Brammenbreiteinflusses wurde nur die Walze mit einem Durchmesser von 80 mm benutzt.

Als Horizontalwalze wurde meistens eine Flachwalze mit einem Durchmesser von 70 mm und mit einer Drehzahl von 45 r.p.m., und teilweise eine andere Flachwalze mit einem Durchmesser von 180 mm und mit einer Drehzahl von 10,5 r.p.m. benutzt.

Das Walzgut wurde mit verschiedenen Breitenabnahmen zuerst einmal vertikal und dann bis zu seiner Anfangsdicke horizontal gewalzt.

Bei jedem Walzen wurden die Walzkraft, das Walzmoment und die Querschnittform des Walzgutes gemessen. Die in Bild 2-2 und in Tafel 2-1 im zweiten Kapitel definierten Bezeichnungen werden auch in diesem Kapitel gebraucht.

5.3. Versuchsergebnisse und Betrachtung

5.3.1. Einfluß des Walzendurchmessers auf die Walzeigenschaften

Bild 5-1 (a) zeigt den Zusammenhang zwischen dem Vertikalwalzendurchmesser und der Vertikalwalzkraft für verschiedene Breitenabnahmen ΔB , und Bild 5-1 (b) den Zusammenhang zwischen

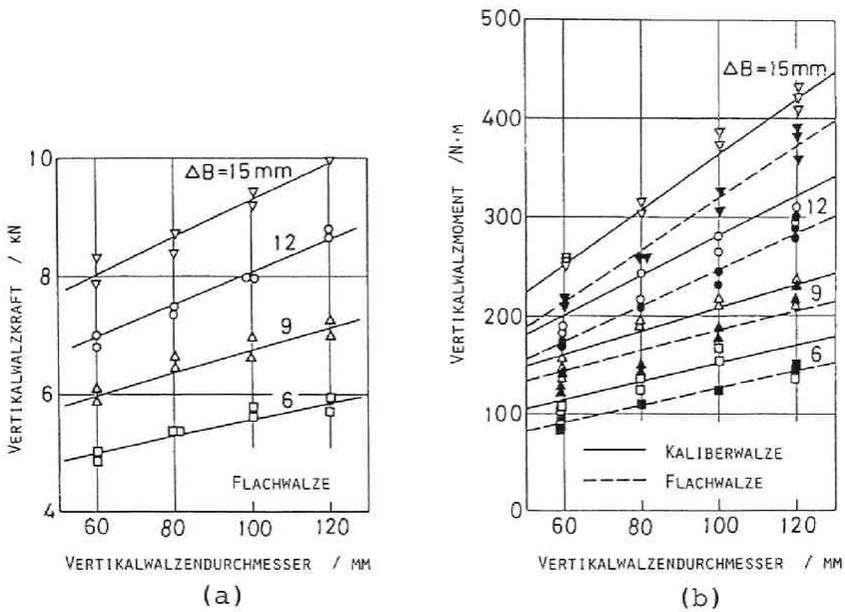


Bild 5-1 Zusammenhang zwischen dem Vertikalwalzendurchmesser und (a) der Vertikalwalzkraft, (b) dem Vertikalwalzmoment

dem Vertikalwalzendurchmesser und dem Vertikalwalzmoment. Die Walzkraft und das Walzmoment vergrößern sich fast proportional, besonders das Walzmoment stark, mit zunehmendem Walzendurchmesser. Aber wie das Bild 5-2 zeigt, verkleinert sich die Walzenergie pro einheitliches Volumen des Walzgutes mit zunehmendem Walzendurchmesser.

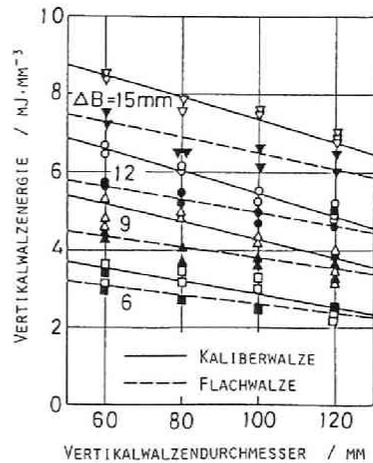


Bild 5-2 Zusammenhang zwischen dem Vertikalwalzendurchmesser und dem Vertikalwalzenergie

Bild 5-3 zeigt, wie sich die Hundeknochenform, nämlich ihr Dickenverhältnis (Bild (a)) und ihre Gipfelstelle (Bild (b)), mit dem Vertikalwalzendurchmesser verändert. Aus den beiden Bildern ist es sichtbar, daß die Formänderung

des Walzgutes beim Vertikalwalzen mit abnehmendem Walzendurchmesser am Breitenende mehr lokalisiert wird. Mit andern Worten erreicht die Verformungszone mit zunehmendem Walzendurchmesser weiter in die Breitenmitte, und die Hundeknochenform wird sanfter. Der Einfluß des Walzendurchmessers auf die Hundeknochenform ist bei der Flachwalze größer als bei der Kaliberwalze. Dies geschieht daraus, daß die Kaliberwalze mit seiner Kaliberwand das sich mit abnehmendem Walzendurchmesser vergrößernde Dickenwachstum einschränkt. Infolgedessen wird die Einschränkungskraft der Kaliberwand mit abnehmendem Walzendurchmesser größer. Dies ist die Ursache dafür, daß sich die Walzenergie bei der Kaliberwalze, wie Bild 5-2 zeigt, mit abnehmendem Walzendurchmesser deutlicher vergrößert als bei der Flachwalze. Mit zunehmendem Walzendurchmesser wird der Unterschied zwischen der durch das Vertikalwalzen mit der Flachwalze gebildeten Hundeknochenform und der mit der Kali-

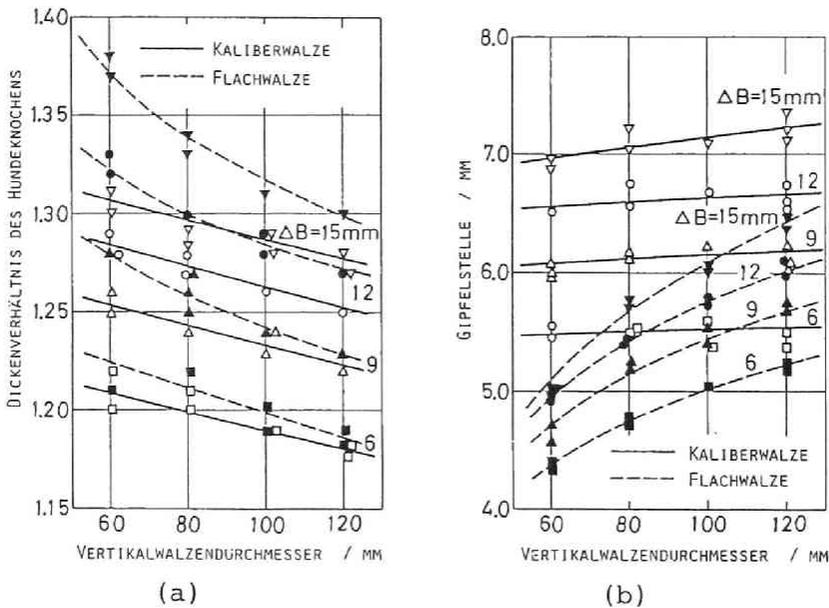


Bild 5-3 Einfluß des Vertikalwalzendurchmessers auf (a) das Hundeknochenickenverhältnis und (b) die Gipfelstelle

berwalze gebildeten Form kleiner, und der Vorteil der Kaliberwalze wird geringer. Dies bedeutet, daß der günstigste Kaliberwinkel auch von dem Walzendurchmesser abhängig ist.

Bild 5-4 zeigt den Zusammenhang zwischen dem Vertikalwalzendurchmesser und der Ausbreitungsgröße beim Horizontalwalzen anhand der Flachwalze mit einem Durchmesser von 70 mm für verschiedene Breitenabnahmen ΔB . Die Ausbreitungsgröße verkleinert sich mit zunehmendem Vertikalwalzendurchmesser, besonders bei der Flachwalze, weil der Einfluß des Walzendurchmessers auf die Hundeknochendicke bei der Flachwalze größer ist als bei der Kaliberwalze. Mit zunehmender Breitenabnahme wird die Ausbreitung größer, aber der Vergrößerungsgrad wird bei der Flachwalze kleiner. Bei der Kaliberwalze wird die Veränderung der Ausbreitungsgröße durch die Änderung des Ver-

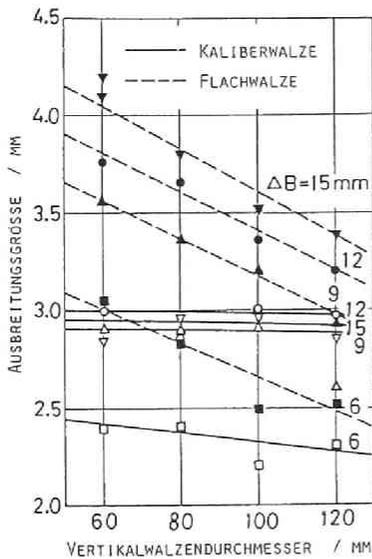


Bild 5-4
Zusammenhang zwischen dem Vertikalwalzendurchmesser und der Ausbreitungsgröße beim Horizontalwalzen

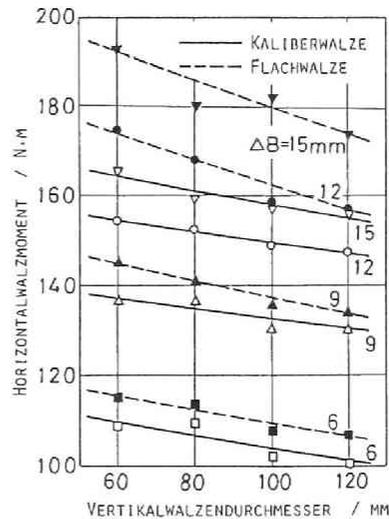


Bild 5-5
Zusammenhang zwischen dem Vertikalwalzendurchmesser und dem Horizontalwalzmoment

tikalwalzendurchmessers und gleichzeitig durch die Änderung der Breitenabnahme undeutlich, wenn die Breitenabnahme größer wird als 9 mm.

Bild 5-5 zeigt den Zusammenhang zwischen dem Vertikalwalzendurchmesser und dem Walzmoment beim Horizontalwalzen anhand der Flachwalze mit einem Durchmesser von 70 mm. Mit zunehmendem Vertikalwalzendurchmesser verkleinert sich das Horizontalwalzmoment, besonders bei der Flachwalze.

Daraus ist es klar geworden, daß mit zunehmendem Vertikalwalzendurchmesser die Leistung der Breitenabnahme besser und die erforderliche Gesamtwalzenenergie kleiner wird.

Um den Einfluß des Horizontalwalzendurchmessers auf die Querschnittform des Walzgutes nach dem Horizontalwalzen zu untersuchen, wurden die anhand der Flach- und Kaliberwalze mit einem Durchmesser von 60 mm und 120 mm vertikalgewalzten Walzgüte durch zwei verschiedene Flachwalzen mit einem Durchmesser von 70 mm und 180 mm horizontalgewalzt. Die Ergebnisse sind

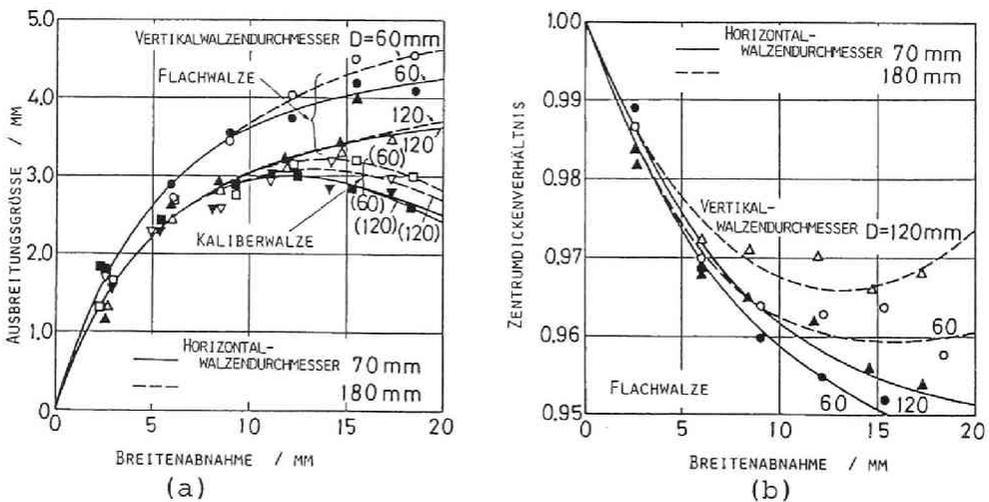


Bild 5-6 Einfluß des Horizontalwalzendurchmessers auf (a) die Ausbreitungsgröße und (b) das Zentrumdickenverhältnis

in Bild 5-6 (a) und (b) gezeigt. Bild (a) zeigt den Zusammenhang zwischen der Breitenabnahme und der Ausbreitungsgröße. In diesem Bild spielt der Walzendurchmesser eine Rolle als Parameter. Obgleich der Einfluß des Horizontalwalzendurchmessers auf die Ausbreitungsgröße klein ist, wird die Ausbreitungsgröße mit zunehmendem Horizontalwalzendurchmesser etwas größer. Bild (b) zeigt den Zusammenhang zwischen der Breitenabnahme und dem Zentrumdickenverhältnis, wobei der Walzendurchmesser auch wieder als Parameter spielt. Die Zentrumdicke verkleinert sich mit Abnahme des Horizontalwalzendurchmessers und auch des Vertikalwalzendurchmessers.

5.3.2. Einfluß der Brammenbreite auf die Walzeigenschaften

Bild 5-7 zeigt den Zusammenhang zwischen der Brammenbreite und der Grenze des Greifwinkels beim Vertikalwalzen. Die Grenze des Greifwinkels vergrößert sich mit zunehmender Brammenbreite. Dies hat eine Ähnlichkeit dazu, daß die Bramme beim früheren Walzen in der Vorstraße der Warmbreitbandstraße leichter gegriffen wird. Die Ursache ist nicht klar, aber kann darin liegen, daß der sogenannte "Peening Effect" mit zunehmender Brammenbreite größer wird.

Die Wirkung der Brammenbreite auf das Dickenverhältnis des

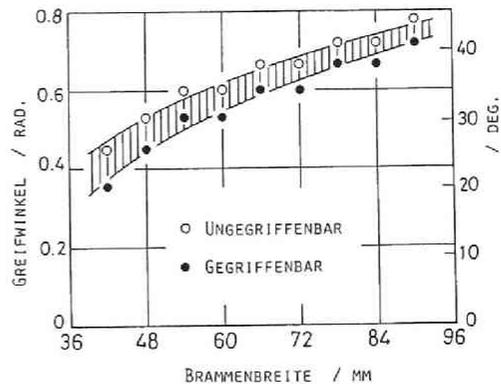
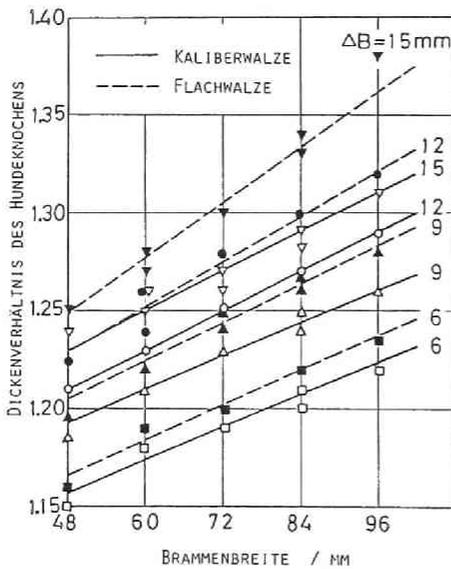
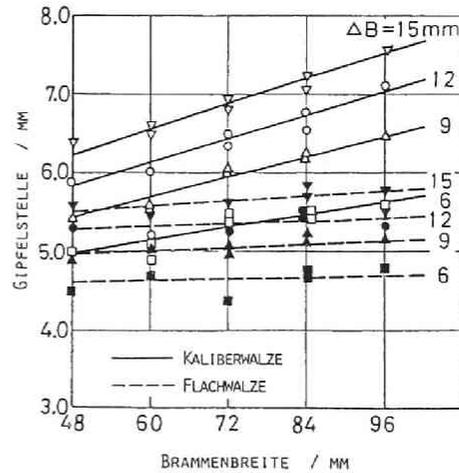


Bild 5-7 Zusammenhang zwischen der Brammenbreite und der Grenze des Greifwinkels beim Vertikalwalzen

Hundeknochens wird in Bild 5-8 (a) und die auf die Gipfelstelle in Bild 5-8 (b) gezeigt. Das Dickenverhältnis des Hundeknochens wird größer mit zunehmender Brammenbreite, besonders bei der Flachwalze. Bei der Flachwalze verändert sich die Gipfelstelle fast kaum mit der Änderung der Brammenbreite. Bei der Kaliberwalze nähert sich dagegen die Gipfelstelle mit zunehmender Brammenbreite etwas der Breitenmitte. Dies bedeutet, daß sich die Formänderung am Breitenende mit zunehmender Brammenbreite vergrößert und bei der Flachwalze verhältnismäßig mehr lokalisiert wird als bei der Kaliberwalze, weil die Kaliberwalze das sich mit zunehmender Brammenbreite vergrößernde Dickenwachstum einschränkt. Der Unterschied zwischen der bei der Flachwalze gebildeten Hundeknochenform und der bei der Kaliberwalze gebildeten Form vermindert sich mit abnehmender Brammenbreite.



(a)



(b)

Bild 5-8 Zusammenhang zwischen der Brammenbreite und
(a) dem Dickenverhältnis des Hundeknochens,
(b) der Gipfelstelle

Bild 5-9 zeigt den Zusammenhang zwischen der Brammenbreite und dem Vertikalwalzmoment. Das Walzmoment nimmt schwach mit der Brammenbreite zu. Die Steigung ist größer bei der Kaliberwalze als bei der Flachwalze. Die Walzkraft zeigt eine ähnliche Tendenz.

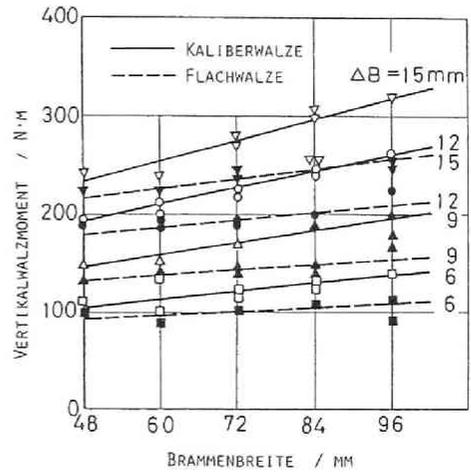
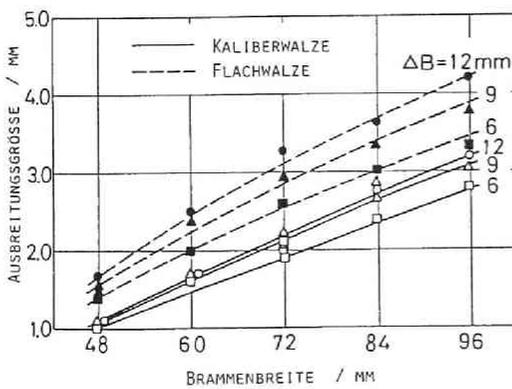
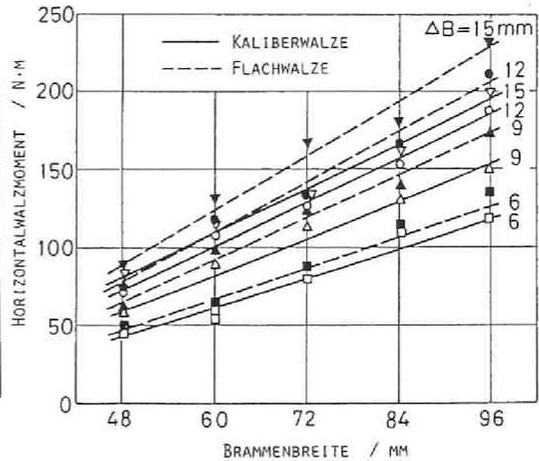


Bild 5-9 Zusammenhang zwischen der Brammenbreite und dem Vertikalwalzmoment

Bild 5-10 (a) zeigt den Zusammenhang zwischen der Anfangsbrammenbreite und der Ausbreitungsgröße beim Horizontalwalzen, und Bild 5-10 (b) den Zusammenhang zwischen der Anfangsbrammenbreite und dem Horizontalwalzmoment. Weil sich die Hundeknochendicke mit zunehmender Anfangsbrammenbreite vergrößert, vergrößern sich beim Horizontalwalzen die Ausbreitungsgröße, das Walz-



(a)



(b)

Bild 5-10 Zusammenhang zwischen der Anfangsbrammenbreite und (a) der Ausbreitungsgröße, (b) dem Walzmoment beim Horizontalwalzen

moment und auch die Walzkraft mit der Anfangsbrammenbreite. Diese Tendenz ist bei der Flachwalze stärker als bei der Kaliberwalze.

Daraus wird es klar, daß mit zunehmender Brammenbreite die Leistung der Breitenabnahme sich verkleinert und die erforderliche Gesamtwalzenergie sich vergrößert.

Bild 5-11 zeigt den Zusammenhang zwischen der Breitenabnahme und dem Zentrumdickenverhältnis nach dem Horizontalwalzen bei drei verschiedenen Anfangsbrammenbreiten von 48 mm, 72 mm und 96 mm. Mit der Vergrößerung der Breitenabnahme vermindert sich das Zentrumdickenverhältnis am Anfang stark, aber weil mit wachsender Breitenabnahme die Formänderung beim Vertikalwalzen weiter in die Breitenmitte hinreicht, wird die Verminderungsrate des Zentrumdickenverhältnisses kleiner und endlich wendet sich das Zentrumdickenverhältnis zur Zunahme. Wenn die Brammenbreite klein wird, wird die Breitenabnahme klein, wobei das Zentrumdickenverhältnis den minimalen Wert zeigt.

Bild 5-12 zeigt den Zusammenhang zwischen dem Hundeknochen-dickenverhältnis und der Ausbreitungsgröße bei drei verschiedenen Anfangsbrammenbreiten von 48 mm, 72 mm und 96 mm. Die Ausbreitungsgröße beim Horizontalwalzen vermehrt sich am Anfang mit zunehmendem Dickenverhältnis des Hundeknochens verhältnismäßig und dann wird ihre Zuwachsrateschwächer als proportional. Wenn das Dickenverhältnis des Hundeknochens gleichen Wert hat, wird die Ausbreitungsgröße mit zunehmender Anfangsbrammenbreite größer.

Bild 5-13 zeigt den Zusammenhang zwischen dem Hundeknochen-

dickenverhältnis und dem Horizontalwalzmoment bei drei verschiedenen Anfangsbrammenbreiten. Das Horizontalwalzmoment vergrößert sich fast proportional zum Dickenverhältnis des Hundeknochens. Wenn das Dickenverhältnis des Hundeknochens gleichen Wert hat, wird auch das Walzmoment mit zunehmender Anfangsbrammenbreite größer.

Dies geschieht daraus, daß mit zunehmender Anfangsbrammenbreite die Dehnung des Berges des Hundeknochens in der Walzrichtung durch die Widerstandskraft des flachen Teiles des Hundeknochenförmigen Walzgutes eingeschränkt wird.

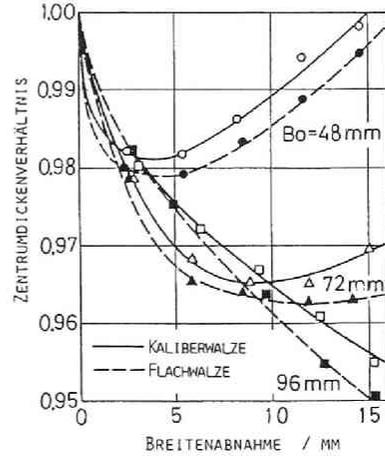


Bild 5-11

Einfluß der Brammenbreite auf das Zentrumdickenverhältnis nach dem Horizontalwalzen

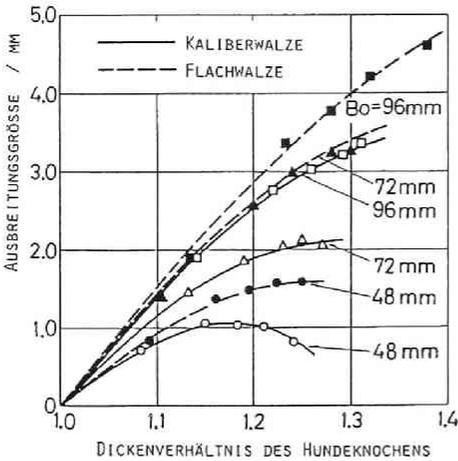


Bild 5-12 Zusammenhang zwischen dem Hundeknochen-dickenverhältnis und der Ausbreitungsgröße bei verschiedenen Brammenbreiten

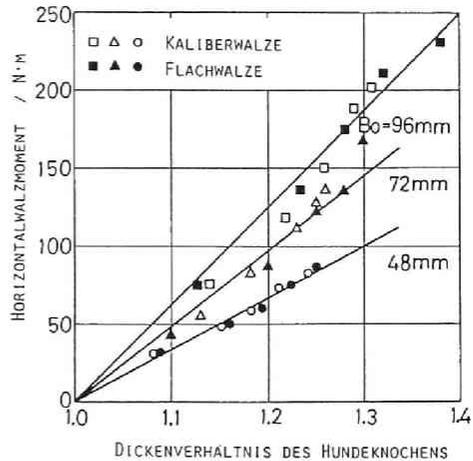


Bild 5-13 Zusammenhang zwischen dem Hundeknochen-dickenverhältnis und dem Horizontalwalzmoment bei verschiedenen Brammenbreiten

5.3.3. Berechnung der Walzeigenschaften beim Vertikalwalzen der Stahlbrammen mit dem Finite-Elemente-Verfahren

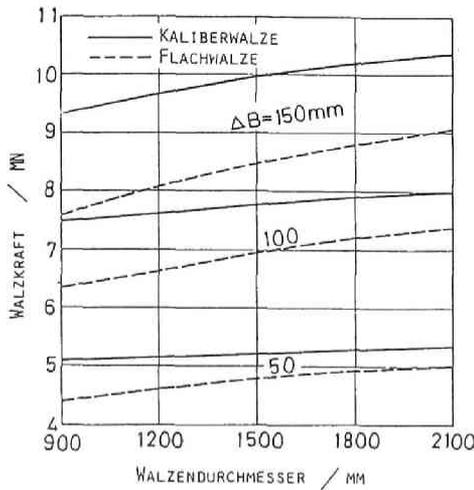
Aus dem oben dargestellten Experiment anhand der Aluminiumplatten wurde es klar, wie der Einfluß des Walzendurchmessers und der Brammenbreite auf das Umformverhalten und auf den Kraftbedarf beim Vertikalwalzen ist. Um diese Ergebnisse auf das Warm-Vertikalwalzen der stranggegossenen Stahlbrammen zu erweitern und die Kenntnisse um den Neubau einer praktischen Anlage zu erwerben, werden die Walzeigenschaften nach dem starr-plastischen Finite-Elemente-Verfahren berechnet, dessen Gültigkeit im zweiten und vierten Kapitel schon festgestellt ist.

Als Walzgut wird Stahl mit 0,1% C und mit einer Temperatur von 1100°C angenommen. Die Fließspannung dieses Werkstoffs wird nach S.Shida durch die folgende Gleichung beschrieben:

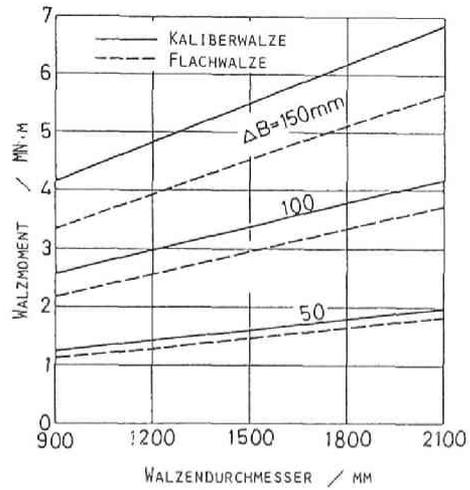
$$\sigma = 98,2 \left\{ 1,3 \left(\frac{\epsilon}{0,2} \right)^{0,403} - 0,3 \left(\frac{\epsilon}{0,2} \right) \right\} \left(\frac{\dot{\epsilon}}{10} \right)^{0,128} \quad (\text{in N/mm}^2). \quad (5-2)$$

Als Ausgangspunkt der Berechnung wird eine Bramme mit einer Breite von 1900 mm und einer Dicke von 280 mm gewählt. Die Flach- und Kaliberwalzen haben jeweils einen Durchmesser von 1200 mm und einen Kaliberwinkel von 15°. Die Drehgeschwindigkeit der Walze ist 1 m/s, und es gibt keinen Längszug.

Um den Einfluß des Walzendurchmessers zu untersuchen, wird er (bei Flach- und Kaliberwalze) zwischen 900 mm und 2100 mm variiert. Die rechnerischen Ergebnisse sind in Bild 5-14 bis 5-17 gezeigt. Bild 5-14 (a) und (b) zeigen die Wirkung des Walzendurchmessers auf die Walzkraft und das Walzmoment. Die



(a)



(b)

Bild 5-14 Rechnerische Ergebnisse über den Zusammenhang zwischen dem Walzendurchmesser und (a) der Walzkraft, (b) dem Walzmoment beim Vertikalwalzen der Stahlbrammen

Walzkraft und das Walzmoment vergrößern sich mit zunehmendem Walzendurchmesser, und zwar die Walzkraft verhältnismäßig schwach und das Walzmoment stark. Diese Tendenz ist gleich mit den in Bild 5-1 (a) und (b) gezeigten Ergebnissen. Dagegen zeigt Bild 5-15, daß sich die Walzleistung mit zunehmendem Walzendurchmesser vermindert und daß die Verminderungsrate auch kleiner wird. Aus den beiden Bildern von 5-14 und

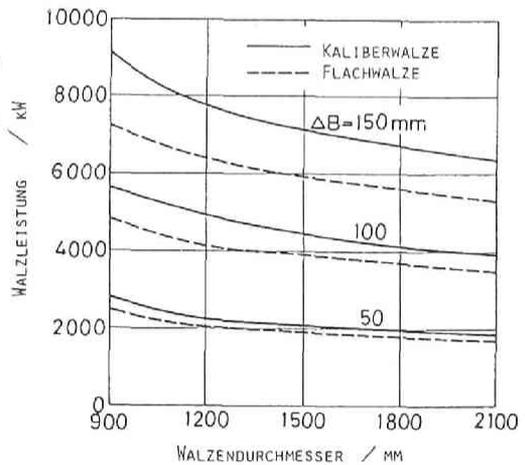


Bild 5-15

Rechnerische Ergebnisse über den Zusammenhang zwischen dem Walzendurchmesser und der Walzleistung beim Vertikalwalzen der Stahlbrammen

von 5-15 erklärt sich, daß die Zunahme des Walzendurchmessers

zu einer nachteilhaften Vergrößerung der Anlage und zu einer vorteilhaften Verkleinerung des Energieverbrauches führt. Der günstigste Walzendurchmesser sollte aber nicht nur von diesen Tatsachen, sondern auch aus dem Gesichtspunkt der Baukosten, der Lebensdauer der Walze, der Größe der dort behandelten Brammen usw. entschieden werden.

Bild 5-16 (a), (b) und (c) zeigen die Verteilung der Spannungen in Breiten, Walz- und Dickenrichtung des Walzgutes, σ_x , σ_y und σ_z , während des Vertikalwalzens in Kaliberwalzen je mit einem Durchmesser von 900 mm, 1500 mm und 2100 mm. Es zeigt sich, daß mit der Vergrößerung des Walzendurchmessers die Werte von Spannungen an der Brammenseite abnehmen und daß sich der Abstand zwischen Linien gleicher Spannung vergrößert. Das bedeutet, daß die Reibungskraft zwischen Walze und Walzgut mit der Vergrößerung des Walzendurchmessers abnimmt, so daß die Lebens-

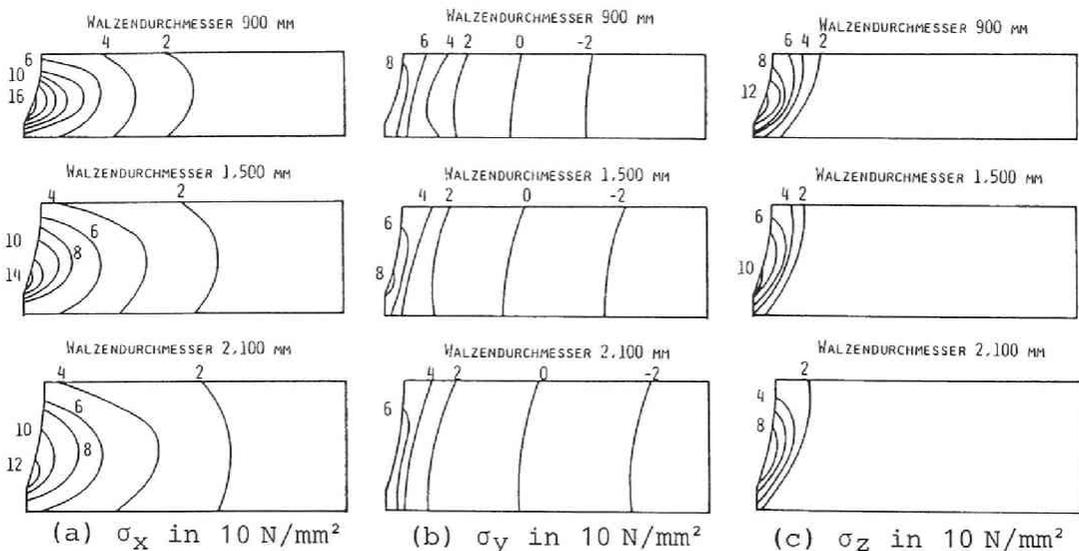


Bild 5-16 Rechnerische Ergebnisse über den Einfluß des Walzendurchmessers auf die Spannungsverteilung in Stahlbrammen während des Vertikalwalzens mit der Kaliberwalze (Breitenabnahme ist 100 mm)

dauer der Walze verlängert wird. Auch die Zugspannung von σ_y in der Breitenmitte verringert sich etwas mit zunehmendem Walzendurchmesser.

Bild 5-17 zeigt den Zusammenhang zwischen dem Walzendurchmesser und dem Dickenverhältnis des Hundeknochens. Dieses vermindert sich mit zunehmendem Walzendurchmesser, und zwar bei der Flachwalze stärker als bei der Kaliberwalze.

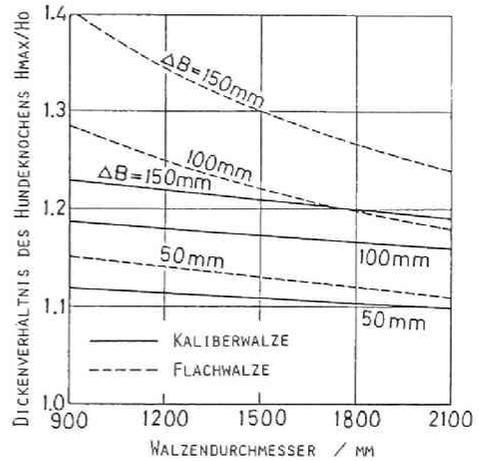


Bild 5-17
Rechnerische Ergebnisse über den Zusammenhang zwischen dem Walzendurchmesser und dem Dickenverhältnis des Hundeknochens

Um den Einfluß der Brammenbreite auf die Walzeigenschaften zu untersuchen, wird die Brammenbreite von 900 mm bis 2100 mm variiert. Die rechnerischen Ergebnisse sind in Bild 5-18 und

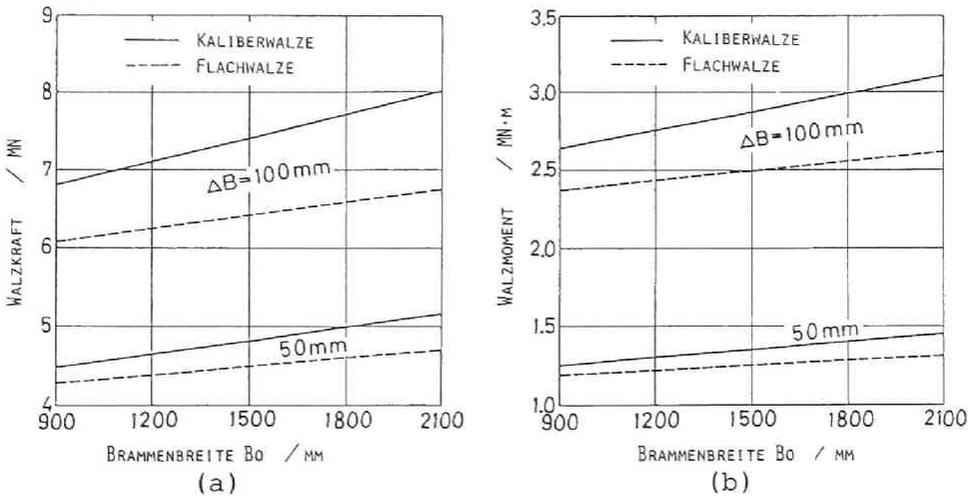


Bild 5-18 Rechnerische Ergebnisse über den Zusammenhang zwischen der Brammenbreite und (a) der Walzkraft, (b) dem Walzmoment beim Vertikalwalzen der Stahlbrammen

5-19 gezeigt, und zwar zeigt Bild 5-18 (a) die Werte über die Walzkraft, Bild 5-18 (b) die über das Walzmoment und Bild 5-19 die über das Dickenverhältnis des Hundeknochens. Diese Ergebnisse stimmen mit den schon dargestellten experimentellen Ergebnissen qualitativ gut überein, so wird hier die Erklärung jedes Bilds ausgelassen.

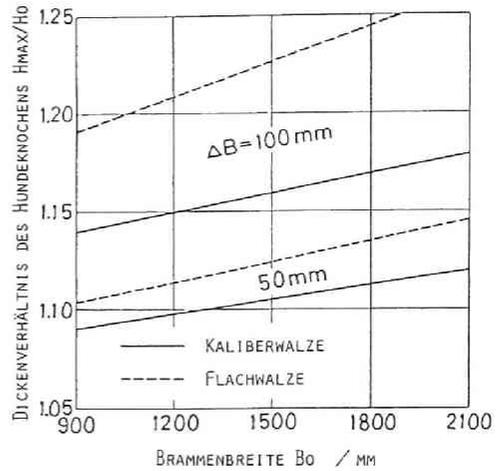


Bild 5-19
Rechnerische Ergebnisse über den Zusammenhang zwischen der Brammenbreite und dem Dickenverhältnis des Hundeknochens

5.4. Zusammenfassung

In diesem Kapitel wurde es experimentell und rechnerisch untersucht, wie der Walzendurchmesser und die Brammenbreite auf das Umformverhalten und auf den Kraftbedarf beim Walzen für die Breitenabnahme der Brammen einwirken.

Die experimentellen und rechnerischen Ergebnisse können wie folgt zusammengefaßt werden:

- 1) Mit der Vergrößerung des Vertikalwalzendurchmessers nehmen die Walzkraft und das Walzmoment beim Vertikalwalzen zu, dagegen nimmt die Walzleistung ab.
- 2) Mit der Vergrößerung des Vertikalwalzendurchmessers nimmt die Hundeknochendicke ab, und dadurch werden die Ausbreitungsgröße und der Kraftbedarf beim nachfolgenden Horizontalwalzen kleiner.

- 3) Mit der Vergrößerung des Vertikalwalzendurchmessers nimmt der Wert der Spannungen an der Brammenseite ab. Dies bedeutet, daß die Lebensdauer der Walze verlängert wird. Es ist eine schwierige Frage, wie groß der Walzendurchmesser beim Vertikalwalzen sein soll. Mit der Vergrößerung des Walzendurchmessers nehmen die Baukosten zu, dagegen nimmt der Energieverbrauch ab. Unter Berücksichtigung dieser Tatsachen und auch der Betriebserfahrungen dürfte der günstigste Walzendurchmesser etwa 1500 mm bei der Kaliberwalze und etwas mehr bei der Flachwalze sein.
- 4) Mit der Vergrößerung der Brammenbreite vergrößert sich die Grenze des Greifwinkels beim Vertikalwalzen.
- 5) Mit der Vergrößerung der Brammenbreite nehmen die Hundeknochendicke, die Walzkraft und das Walzmoment beim Vertikalwalzen, ferner die Ausbreitungsgröße, die Walzkraft und das Walzmoment beim nachfolgenden Horizontalwalzen zu.

6. EINFLUSS DER TEMPERATURVERTEILUNG IM WALZGUT AUF DIE HUNDEKNOCHENFORM BEIM VERTIKALWALZEN

6.1. Einleitung

Der Querschnitt des Walzgutes nach dem Vertikalwalzen wird mehr oder weniger je nach der Walzenform hundeknochenförmig. Ein Teil des Hundeknochens wird durch das nachfolgende Horizontalwalzen verbreitet, und dies führt zu einer Verschlechterung der Breitenabnahmenleistung. Eine Möglichkeit, die Verschlechterung der Leistung zu hindern, könnte man dadurch besitzen, daß das Walzgut mit einer Kaliberwalze vertikalgewalzt wird, die einen Kaliberwinkel unter 5° und eine Kalibertiefe von mehr als ein Viertel der Brammenbreite hat. Aber dies ist tatsächlich furchtbar schwer. Eine andere Möglichkeit liegt darin, daß man absichtlich den Brammen eine Temperaturverteilung in ihrer Breitenrichtung gibt, um die Festigkeit an den Brammenseiten eher als die in der Mitte zu verstärken. Die stranggegossenen Brammen haben so wie so eine Temperaturverteilung in der Breitenrichtung nach dem Gießen. In diesem Kapitel wird der Einfluß der Temperaturverteilung im Walzgut auf das Umformverhalten beim Vertikalwalzen mit Flachwalze experimentell und rechnerisch untersucht. Für die Rechnung wird die im zweiten Kapitel aufgestellte rechnerische Methode mit starr-plastischen finiten Elementen so erweitert, daß die Verteilung der Temperatur in der Breitenrichtung des Walzgutes berücksichtigt werden kann.

6.2. Experimentelle und rechnerische Methode

6.2.1. Experimentelle Methode

Als Vertikalwalze wurde eine Flachwalze mit einem Durchmesser von 80 mm angewandt, und die Drehgeschwindigkeit der Walze war 160 mm/s. Als Walzgut wurden ausgeglühte Aluminiumplatten mit einer Breite von 52 mm und einer Dicke von 8,2 mm (Breite/Dickenverhältnis ist 6,3) gebraucht.

Um den Einfluß der Temperaturverteilung in der Breitenrichtung auf das Umformverhalten beim Vertikalwalzen zu untersuchen, wurde das auf eine Temperatur von 600°C erwärmte Walzgut kurz vor dem Walzen von seinen beiden Breitenenden an abgekühlt und dann mit verschiedenen Breitenabnahmen vertikalgewalzt. Dadurch wurde eine Temperaturverteilung erhalten, wie Bild 6-1 zeigt.

Vergleichsweise wurde das Vertikalwalzen des Walzgutes durchgeführt, das auf verschiedene Temperaturen von 300°C, 400°C, 500°C und 600°C gleichmäßig erwärmt wurde.

Nach dem Vertikalwalzen wurde das Walzgut bis zur Anfangsdicke horizontalgewalzt. Als Horizontalwalze wurde eine Flachwalze mit einem Durchmesser von 180 mm angewandt.

Die Bezeichnungen für die Querschnittform des Walzgutes sind gleich mit den Bezeichnungen,

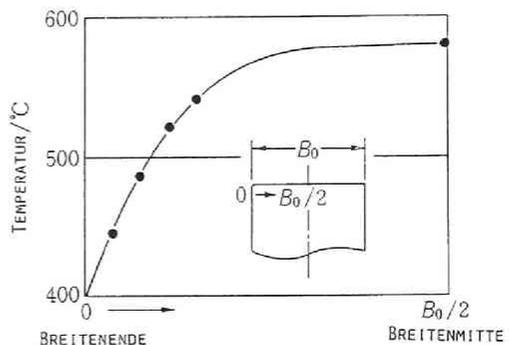


Bild 6-1

Temperaturverteilung in der Breitenrichtung des Walzgutes

die in Bild 2-2 und in Tafel 2-1 definiert sind.

6.2.2. Rechnerische Methode

Die rechnerische Methode für das Vertikalwalzen wurde schon im zweiten Kapitel ausführlich erklärt, so wird hier nur der erweiterte Teil dargestellt.

Die für die Rechnung erforderliche Fließspannung des Walzgutes wurde bei jeder Temperatur gemessen, und daraus konnte sie durch die folgende Gleichung gegeben werden:

$$\sigma = a \cdot \epsilon^n \cdot \dot{\epsilon}^m \quad \text{in N/mm}^2 \quad (6-1)$$

Darin ist σ die Vergleichsspannung, ϵ die Vergleichsdehnung, $\dot{\epsilon}$ die Vergleichsdehngeschwindigkeit, n der Verfestigungsexponent und m die Geschwindigkeitsempfindlichkeit. a , n und m hängen von der Temperatur ab, und der Zusammenhang dazwischen ist in Bild 6-2 gezeigt.

Bei der Rechnung der Walzeigenschaften beim Vertikalwalzen des Walzgutes mit einer Temperaturverteilung in der Breitenrichtung wurde es angenommen, daß während des Walzens die Temperatur die Fließlinie entlang konstant ist. Dadurch kann man eine Temperaturverteilung anhand der in Bild 6-2 gezeigten Beziehung auf die Verteilung von a , n und m für finite Elemente umstellen.

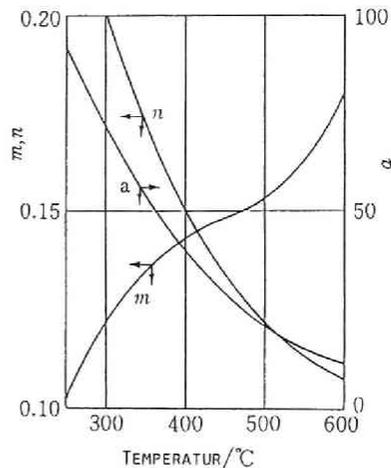


Bild 6-2

Abhängigkeit der Werte von a , n und m des für das Experiment gebrauchten Aluminiums von der Temperatur

6.3. Experimentelle und rechnerische Ergebnisse

Die experimentellen und rechnerischen Ergebnisse über die Querschnittform nach dem Vertikalwalzen sind in Bild von 6-3 bis 6-5 gezeigt. In diesen Bildern zeigen die weißen Punkte und die ausgezogenen Linien die gemessenen und berechneten Werte für den Fall, daß das Walzgut eine gleichmäßige Temperaturverteilung hat, und die schwarzen Punkte und die gestrichelten Linien zeigen die Werte für den Fall, daß das Walzgut eine bestimmte Temperaturverteilung hat, die in Bild 6-1 gezeigt ist.

Bild 6-3 zeigt den Zusammenhang des Breitenabnahmenverhältnisses mit dem Hundeknochendickenverhältnis und mit dem Zentrumdickenverhältnis. Wenn das Walzgut gleichmäßig erwärmt ist, vergrößert sich das Dickenverhältnis des Hundeknochens mit zunehmendem Breitenabnahmenverhältnis am Anfang stark und dann etwas schwächer. Die Zentrumdicke des Walzgutes wird mit zunehmendem Breitenabnahmenverhältnis einmal dünner als seine Anfangsdicke und dann umgekehrt dicker und bekommt seine Anfangsdicke beim Breitenabnahmenverhältnis von etwa 18 % wieder. Die Wirkung der Walztemperatur auf die Hundeknochendicke und besonders auf die Zentrumdicke ist klein. Falls das Walzgut von seinen Breitenseiten an abgekühlt wird und die in Bild 6-1 gezeigte Temperaturverteilung in seiner Breitenrichtung hat, ist das Dickenverhältnis des Hundeknochens viel kleiner und das Zentrumdickenverhältnis größer als beim Walzen des Walzgutes mit gleichmäßiger Temperaturverteilung. Diese Ergebnisse bedeuten, daß beim Ver-

tikalwalzen desjenigen Walzgutes die Formänderung an den Breitenseiten wegen der höheren Fließspannung beschränkt wird und dadurch der Umformungsbereich weiter in die Breitenmitte hingeht. Wie das Bild zeigt, stimmen die unter Berücksichtigung der Temperaturverteilung im Walzgut berechneten Werte mit den gemessenen Werten sehr gut überein.

Bild 6-4 zeigt den Zusammenhang zwischen dem Breitenabnahmenverhältnis und dem Gipfelstellenverhältnis. Das Gipfelstellenverhältnis beim Vertikalwalzen des von seinen Breitenseiten an abgekühlten Walzgutes ist kleiner als das beim Walzen des gleichmäßig erwärmten Walzgutes. Daraus kann man auch leicht verstehen, daß der Umformungsbereich beim abgekühlten Walzgut mehr in die Breitenmitte hingeht als beim gleichmäßig erwärmten Walzgut. Nach den experimentellen Ergebnissen ist der Einfluß der gleichmäßigen Erwärmungstemperatur auf das Gipfelstellenverhältnis wenig, und das Gipfelstellenverhältnis wird mit steigender Erwärmungstemperatur etwas kleiner. Die berechneten Werte in diesem Fall sind deutlich größer als die gemessenen Werte. Dagegen stimmen die unter Berücksichtigung der Temperaturverteilung berechneten Werte des Gipfelstellenverhältnisses beim Walzen des von seinen Breitenseiten an abgekühlten Walzgutes mit den gemessenen Werten gut überein. Dies bedeutet, daß die berechneten Werte beim Walzen des gleichmäßig erwärmten Walzgutes mit den gemessenen Werten gut übereinstimmen müßten, wenn man die durch den Temperaturabfall wegen der Ausstrahlung hervorgerufene Temperaturverteilung in der Breitenrichtung des Walzgutes richtig annehmen könnte. Bild 6-5 zeigt den Zusammenhang zwischen dem Breitenabnahmen-

verhältnis und dem Querschnittabnahmenverhältnis. Das Querschnittabnahmenverhältnis des von den Breitenseiten an abgekühlten Walzgutes ist größer als das des Walzgutes mit gleichmäßiger Temperaturverteilung. Dies bedeutet, daß die Abkühlung an den Breitenseiten auch auf die Dehnung des Walzgutes in der Walzrichtung zweckmäßig wirkt. In diesem Fall ist der Einfluß der Erwärmungstemperatur auch wenig, wenn das Walzgut gleichmäßig erwärmt wird. Die berechneten Werte stimmen mit den gemessenen Werten gut überein.

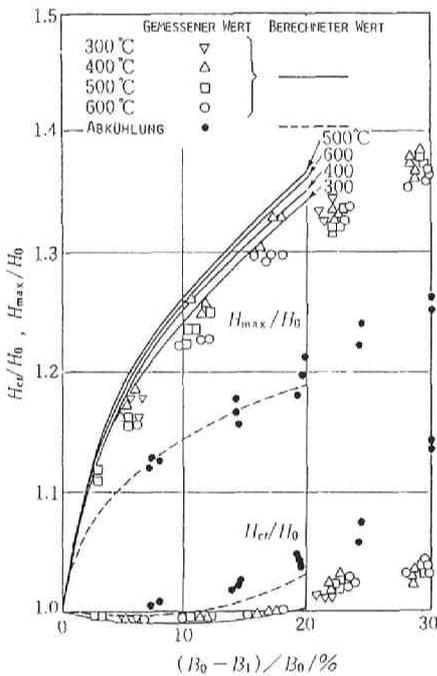


Bild 6-3

Zusammenhang des Breitenabnahmenverhältnisses mit dem Hundeknochendickenverhältnis und mit dem Zentrumdickenverhältnis

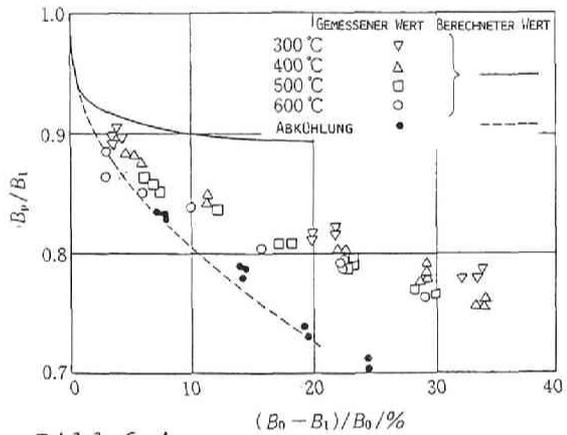


Bild 6-4

Zusammenhang zwischen dem Breitenabnahmenverhältnis und dem Gipfelstellenverhältnis

Bild 6-5

Zusammenhang zwischen dem Breitenabnahmenverhältnis und dem Querschnittabnahmenverhältnis

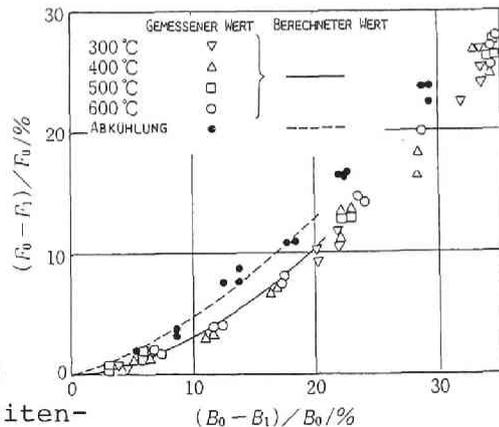


Bild 6-6 zeigt an einem Beispiel den Vergleich der Querschnittform nach dem Vertikalwalzen zwischen dem Walzgut mit gleichmäßiger Temperatur und dem Walzgut mit der Temperaturverteilung in der Breitenrichtung. Es zeigt sich, daß beim Walzen des von den Breitenenden an abgekühlten Walzgutes die Höhe der Hundeknochenform niedriger ist und sich die Querschnittform der rechteckigen Form nähert, und daß die berechnete Querschnittform mit der gemessenen Form gut übereinstimmt.....

Bild 6-7 zeigt ein Beispiel der berechneten Verteilung der Vergleichsdehngeschwindigkeit während des Vertikalwalzens mit Vergleich zwischen dem Fall, daß das Walzgut eine gleichmäßige Temperatur von 600°C hat, und dem Fall, daß das Walzgut die Temperaturverteilung in der Breitenrichtung hat. Die Vergleichsdehngeschwindigkeit ist am Breitenende des Walzgutes am Eingang des Walzspaltes am größten. Bild 6-8 zeigt die Verteilung der Vergleichsdehnung. Nach dem Bild konzentriert sich die Formänderung beim Vertikalwalzen genau so am Breitenende, wie schon öfter diskutiert wurde. Falls das Walzgut von seinen Breitenenden abgekühlt wird, wird der Konzentrationsgrad der Formänderung an seinem Breitenende geringer.

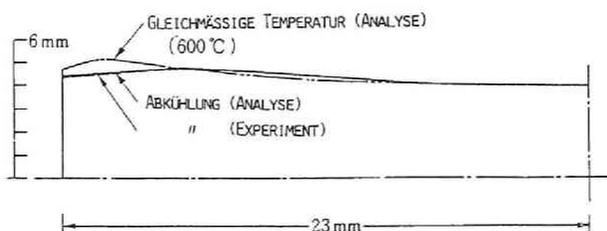


Bild 6-6 Vergleich der Querschnittform nach dem Vertikalwalzen zwischen dem Walzgut mit gleichmäßiger Temperatur und dem Walzgut mit der Temperaturverteilung in der Breitenrichtung

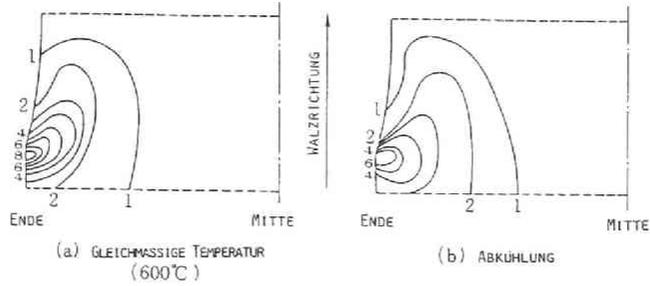


Bild 6-7 Rechnerische Ergebnisse über die Verteilung der Vergleichsdehngeschwindigkeit (s^{-1}) im Walzgut während des Vertikalwalzens

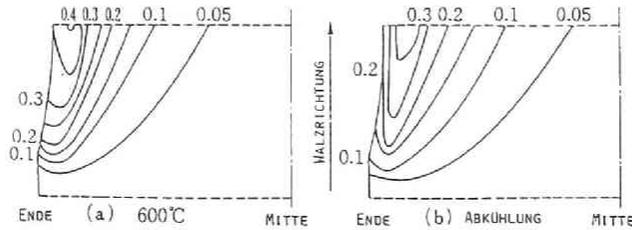


Bild 6-8 Rechnerische Ergebnisse über die Verteilung der Vergleichsdehnung während des Vertikalwalzens

Bild 6-9 zeigt den Zusammenhang zwischen dem Breitenabnahmenverhältnis und der Walzkraft. Die Walzkraft vergrößert sich mit abnehmender Erwärmungstemperatur und auch mit zunehmendem Breitenabnahmenverhältnis. Die Walzkraft beim von seinen Breitenenden an abgekühlten Walzgut ist größer als die beim nicht abgekühlten Walzgut, aber der Unterschied dazwischen ist nicht so groß. Die berechneten und gemessenen Werte stimmen miteinander gut überein.

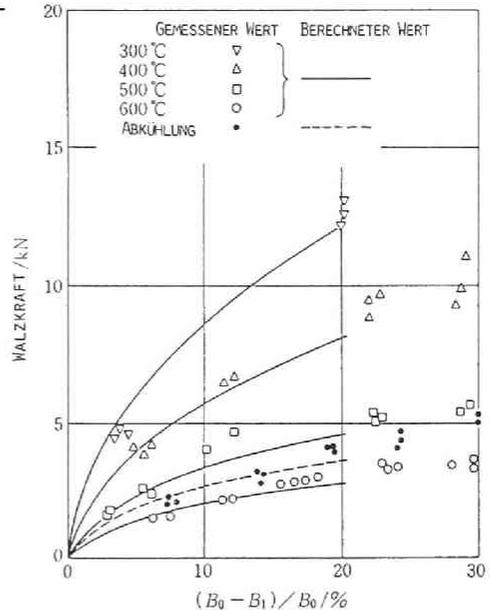


Bild 6-9 Zusammenhang zwischen dem Breitenabnahmenverhältnis und der Walzkraft

Das vertikalgewalzte Walzgut wurde bis zu seiner Anfangsdicke horizontalgewalzt. Bild 6-10 zeigt den Zusammenhang zwischen dem Breitenabnahmenverhältnis beim Vertikalwalzen und dem Effektivbreitenabnahmenverhältnis nach dem Horizontalwalzen. Der Unterschied zwischen der Breitenabnahme und der Effektivbreitenabnahme stellt die Ausbreitungsgröße beim Horizontalwalzen dar.

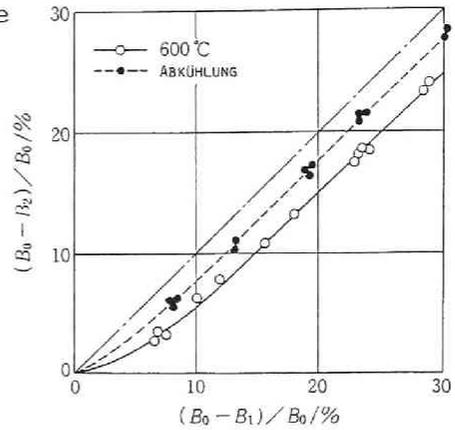


Bild 6-10
Zusammenhang zwischen den Verhältnissen der Breitenabnahme und der Effektivbreitenabnahme

Beim Horizontalwalzen des beim Vertikalwalzen von seinen Breitenseiten an abgekühlten Walzgutes ist die Ausbreitungsgröße kleiner als beim Horizontalwalzen des mit gleichmäßiger Temperatur vertikalgewalzten Walzgutes, wie es aus der nach dem Vertikalwalzen gebildeten Hundeknochenform vorausgesehen werden kann. Dies ist eine erfreuliche Tatsache um die Besserung der Breitenabnahmenleistung.

6.4. Betrachtung

Wie oben dargestellt wurde, hat die Erwärmungstemperatur des Walzgutes wenigen Einfluß auf die Bildung der Hundeknochenform beim Vertikalwalzen, wenn das Walzgut gleichmäßig erwärmt wird. Es bedeutet, daß das Koeffizient von "a" in der die Fließspannung des Werkstoffs darstellenden Gleichung (6-1) fast keinen Einfluß auf die Hundeknochenform ausübt.

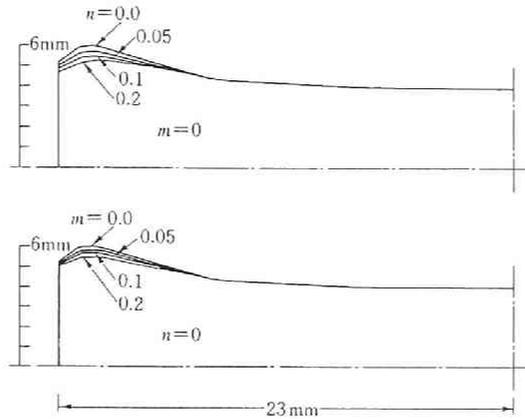


Bild 6-11 Rechnerische Ergebnisse über die Wirkung des Verfestigungsexponent n und der Geschwindigkeitsempfindlichkeit m auf die Hundeknochenform

Bild 6-11 zeigt die analytischen Ergebnisse über die Wirkung des Verfestigungsexponent " n " und der Geschwindigkeitsempfindlichkeit " m " auf die Hundeknochenform, und zwar zeigt es die berechneten Konturen des Walzgutsquerschnittes nach dem Vertikalwalzen für verschiedene Werte der Exponenten n und m . Wie schon im zweiten Kapitel dargestellt wurde, nimmt die Hundeknochendicke mit steigenden Werten von n und m ab, und beide Parameter wirken auf die Bildung der Hundeknochenform mit gleichmäßigem Grad.

Die Werte der Exponenten n und m des gebrauchten Aluminiums verändern sich mit verändernder Temperatur umgekehrterweise, wie in Bild 6-2 gezeigt ist. Daraus kann man sich überzeugen, daß die Erwärmungstemperatur des Walzgutes wenigen Einfluß auf die Hundeknochenform ausübt.

Bei warmem Stahl ist es meistens angenommen, daß der Wert von n konstant ist, und daß der Wert von m mit steigender Temperatur ein wenig größer wird. Deshalb kann die Erwärmungstemperatur der Stahlbramme auf die Bildung der Hundeknochenform

nur kleinen Einfluß ausüben. Obwohl die Bramme im Heizofen gleichmäßig erwärmt wird, kann sie durch die Ausstrahlung keine gleichmäßige Temperatur halten, sondern sie hat vor dem Walzen immer in seiner Breitenrichtung mehr oder weniger eine Temperaturverteilung. Wenn das Walzgut mit einer höheren Temperatur erwärmt wird, wird der Temperaturunterschied im Walzgut größer, und dadurch wird die Hundeknochendicke kleiner, wie Bild 6-3 zeigt.

6.5. Zusammenfassung

Das Umformverhalten der Brammen beim Vertikalwalzen mit Flachwalze wurde in beiden folgenden Fällen experimentell und rechnerisch untersucht:

1. Im Fall, daß die Bramme gleichmäßig auf verschiedene Temperaturen erwärmt wird.
2. Im Fall, daß die Bramme eine Temperaturverteilung in ihrer Breitenrichtung hat.

Die in diesem Kapitel erworbenen Ergebnisse können wie folgt zusammengefaßt werden:

- 1) Wenn das Walzgut gleichmäßig erwärmt wird, hat die Erwärmungstemperatur wenigen Einfluß auf die Hundeknochenform. Wenn das Walzgut vor dem Vertikalwalzen von seinen Breitenseiten an abgekühlt und in seiner Breitenrichtung eine Temperaturverteilung gegeben wird, wird die Hundeknochen- dicke kleiner, nähert sich die Gipfelstelle seiner Breiten- mitte, wird die Ausbreitungsgröße beim Horizontalwalzen kleiner, und dadurch wird die Leistung der Breitenabnahme

besser als die beim Walzgut mit gleichmäßiger Temperatur. Die durch die Abkühlung hervorgerufene Zunahme der Walzkraft ist nicht so groß.

- 2) Die nach dem Finite-Elemente-Verfahren berechneten Werte stimmen mit den gemessenen Werten gut überein, wenn die gegebene Temperaturverteilung im Walzgut berücksichtigt wird. Daraus zeigt es sich, daß die in dieser Arbeit vorgeschlagene rechnerische Methode auch das Umformverhalten des Walzgutes mit einer Temperaturverteilung in der Breitenrichtung beim Vertikalwalzen zweckmäßig analysieren kann.

7. FORMÄNDERUNG DER BRAMMEN UND KRAFTBEDARF BEIM MEHRSTUFIGEN WALZEN FÜR DIE BREITENABNAHME

7.1. Einleitung

Die Größe der durch einmaliges Vertikalwalzen gewonnenen Breitenabnahme ist im praktischen Betrieb durch die Greif- und die Vermögensgrenze der Anlage und auch durch die Knickgrenze des Materials beschränkt. Wenn eine noch größere Breitenabnahme erforderlich ist, muß die Bramme deshalb mehrstufig gewalzt werden mit der Kombination von dem Vertikal- und Horizontalwalzen.

In diesem Kapitel wird es experimentell untersucht, wie sich die Form der Brammen, die Walzkraft und das Walzmoment beim mehrstufigen Walzen für die Breitenabnahme mit verschiedenen Stichplänen und mit verschiedenen Formen der Vertikalwalze verändern.

7.2. Versuchsmethode

Als Walzgut wurden die auf eine Temperatur von 500°C erwärmten Aluminiumplatten mit einer Breite von 85 mm und einer Dicke von 12 mm angewandt, die gleich mit dem in zweiten, dritten und sechsten Kapitel gebrauchten Werkstoff waren.

Als Vertikalwalze wurden eine Flachwalze und zwei Kaliberwalzen mit Kaliberwinkeln von 10° und 20° benutzt. Jede Walze hatte einen Durchmesser von 80 mm, und die Drehgeschwindigkeit jeder Walze war 63,5 mm/s. Als Horizontalwalze wurde eine

Flachwalze mit einem Durchmesser von 180 mm benutzt, und die Drehgeschwindigkeit der Walze war $80 \sim 100$ mm/s.

Die Stichpläne werden wesentlich in zwei Gruppen eingeteilt. Beim ersten Stichplan wurden das Vertikalwalzen und das Horizontalwalzen abwechselnd wiederholt, und beim zweiten wurde das Walzgut zuerst durch die Wiederholung des Vertikalwalzens bis zur erwarteten Breite und dann durch einmaliges Horizontalwalzen bis zu seiner Anfangsdicke gewalzt. In diesem Kapitel wird der erste Plan V.H-Walzen und der zweite Plan V.V-Walzen genannt.

Die Abnahme der Walzenöffnung pro einmaliges Vertikalwalzen ΔR war konstant beim V.H-Walzen und auch beim V.V-Walzen. Daher war die Breitenabnahme des Walzgutes bei jedem Vertikalwalzen gleich mit ΔR beim V.V-Walzen und wegen der durch das vorige Horizontalwalzen verursachten Ausbreitung etwas größer als ΔR beim V.H-Walzen. Die Untersuchung wurde bei drei verschiedenen ΔR von 6 mm, 9 mm und 12 mm durchgeführt. Bild 7-1 (a) zeigt die gemessenen Größen der Querschnittform des Walzgutes nach jedem Walzen. Über eine unständige Umformung am Kopf- und Fußende des Walzgutes wurde jeder Flächenraum der in Bild 7-1 (b) mit Schraffierung gezeigten Teile, d.h. C_t und C_b , gemessen, und der Wert von der Dividierung des Gesamtflächenraums am Kopf- und Fußende durch die Anfangsbreite, d.h. $(C_t + C_b) / B_0$, wurde als eine Relativlänge des Fischeschwanzes definiert. Die im folgenden benutzten Bezeichnungen sind in Tafel 7-1 dargestellt.

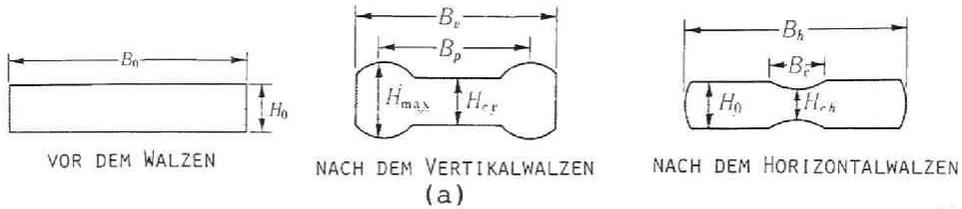
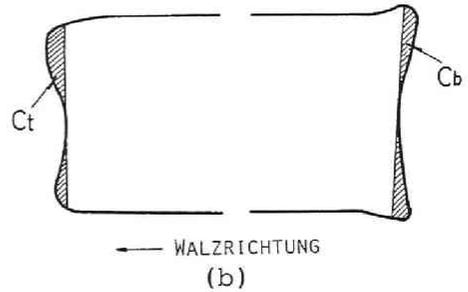


Bild 7-1

- (a) Querschnittform des Walzgutes vor und nach dem Walzen
 (b) Fischschwanz am Kopf- und Fußende des Walzgutes



Tafel 7-1 Bezeichnungen

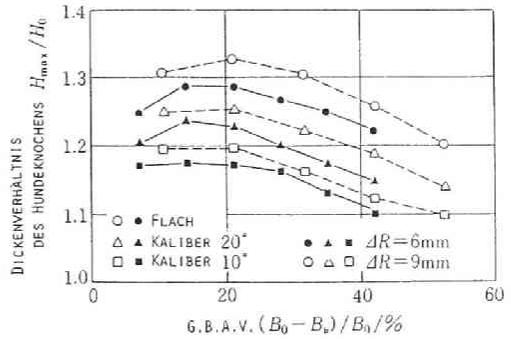
B_0	: Anfangsbreite
H_0	: Anfangsdicke
H_{max}	: Hundeknochendicke
B_p	: Gipfelbreite
B_v	: Breite nach dem Vertikalwalzen
H_{cv}	: Zentrumdicke nach dem Vertikalwalzen
B_h	: Breite nach dem Horizontalwalzen
H_{ch}	: Zentrumdicke nach dem Horizontalwalzen
$B_0 - B_v$: Gesamtbreitenabnahme
$(B_0 - B_v) / B_0$: Gesamtbreitenabnahmenverhältnis (G.B.A.V.)
$B_h - B_v$: Ausbreitungsgröße
$(B_0 - B_h) / B_0$: Gesamtbreitenabnahmenverhältnis nach dem Horizontalwalzen
H_{max} / H_0	: Dickenverhältnis des Hundeknochens
H_{cv} / H_0	: Zentrumdickenverhältnis nach dem Vertikalwalzen
B_p / B_v	: Gipfelstellenverhältnis
$(B_v - B_p) / 2$: Gipfelstelle
H_{ch} / H_0	: Zentrumdickenverhältnis nach dem Horizontalwalzen
B_c	: Zentrumgrabenbreite
C_t	: Fischschwanz-Flächenraum am Kopfende
C_b	: Fischschwanz-Flächenraum am Fußende
$(C_t + C_b) / B_0$: Relativlänge des Fischschwanzes
ΔR	: Abnahme der Walzenöffnung pro ein Vertikalwalzen

7.3. Experimentelle Ergebnisse

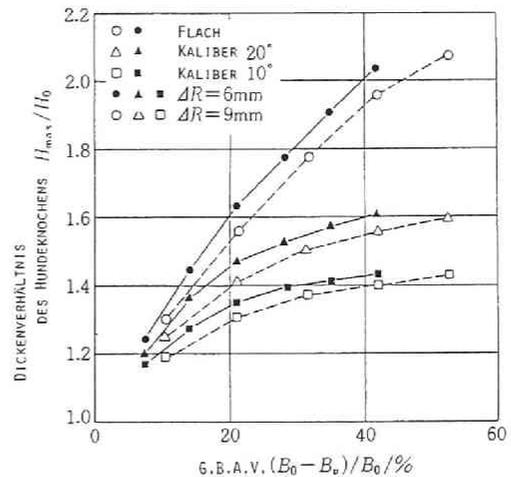
7.3.1. Veränderung der Querschnittform des Walzgutes im ständigen Umformungsbereich

Bild 7-2 (a) und (b) zeigen den Zusammenhang zwischen dem Gesamtbreitenabnahmenverhältnis und dem Dickenverhältnis des Hundeknochens beim V.H-Walzen und beim V.V-Walzen. Beim V.H-Walzen wird das Dickenverhältnis des Hundeknochens beim zweiten Vertikalwalzen ein bißchen größer als das beim ersten Vertikalwalzen, aber danach kleiner mit zunehmendem Gesamtbreitenabnahmenverhältnis. Dies geschieht daraus, daß sich die Breite des Walzgutes vor dem Vertikalwalzen mit zunehmendem Gesamtbreitenabnahmenverhältnis stufenartig verkleinert. Das Dickenverhältnis des Hundeknochens ist bei der Flachwalze größer als bei der Kaliberwalze und vermindert sich mit abnehmendem Kaliberwinkel und mit abnehmender ΔR .

Andererseits vergrößert sich beim V.V-Walzen das Dickenverhältnis des Hundeknochens mit zunehmendem Gesamtbreitenabnahmenver-



(a) V.H-WALZEN



(b) V.V-WALZEN

Bild 7-2 Veränderung des Hundeknochen-dickenverhältnisses beim (a) V.H-Walzen und (b) V.V-Walzen

hältnis, besonders bei der Flachwalze stark. Bei der Kaliberwalze wird die Zuwachsrate des Dickenverhältnisses mit zunehmendem Gesamtbreitenabnahmenverhältnis kleiner und schließlich fast zu Null. Es ist beachtlich, daß das Dickenverhältnis des Hundeknochens mit abnehmender ΔR größer wird im Gegensatz zu dem beim V.H-Walzen.

Bild 7-3 (a) und (b) zeigen die Veränderung des Zentrumdickenverhältnisses beim V.H-Walzen und beim V.V-Walzen, und in diesen Bildern zeigen die schwarzen Punkte die Werte nach dem Vertikalwalzen und die weißen Punkte die Werte nach dem Horizontalwalzen. Wie es schon im Kapitel 2 und 5 geschrieben wurde, wird die Zentrumdicke beim Vertikalwalzen nicht größer außer dem Falle, daß die Breitenabnahme groß, der Kaliberwinkel klein und die Brammenbreite klein ist. Diese Tendenz ist auch in diesen Bildern sichtbar. Beim V.H-Walzen wird die Zentrumdicke nach jedem Horizontalwalzen dünner als die nach dem vorigen Vertikalwalzen, und im ganzen vermindert sich die Zentrumdicke mit zunehmendem Gesamtbreitenabnahmenverhältnis, besonders wenn ΔR klein ist und die Flachwalze als Vertikalwalze verwendet ist.

Dagegen verkleinert sich beim V.V-Walzen die Zentrumdicke mit zunehmendem Gesamtbreitenabnahmenverhältnis nicht, sondern sie vergrößert sich damit. Diese Tendenz wird stärker mit zunehmender ΔR und mit abnehmendem Kaliberwinkel der Kaliberwalze. Daher gibt es keine Rinne in der Umgebung der Breitenmitte des Walzgutes nach dem Horizontalwalzen beim V.V-Walzen.

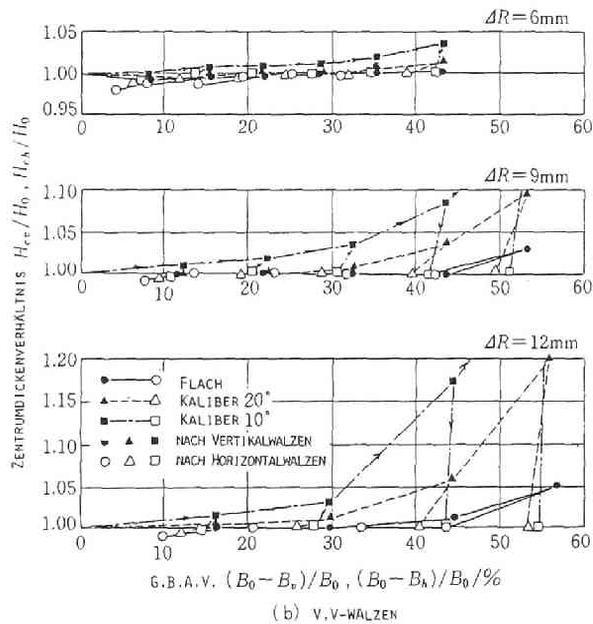
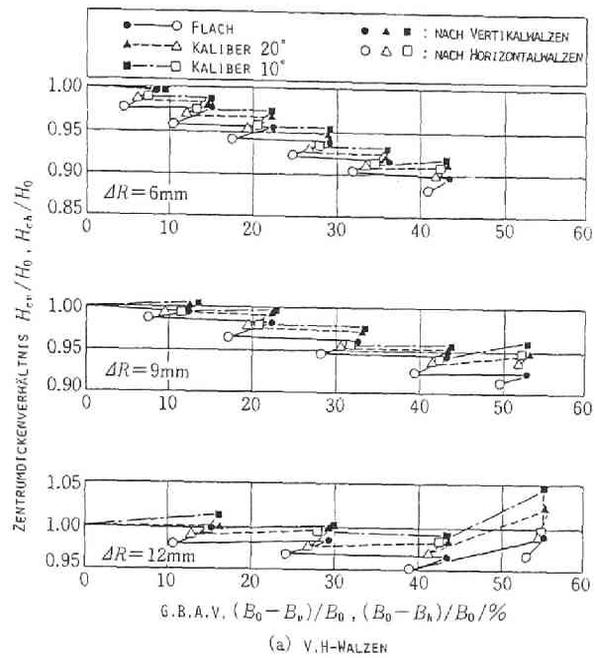


Bild 7-3 Veränderung des Zentrumsdickenverhältnisses
 (a) beim V.H-Walzen und (b) beim V.V-Walzen

Bild 7-4 zeigt die Veränderung der Gipfelstelle mit dem Gesamtbreitenabnahmenverhältnis beim V.H-Walzen und beim V.V-Walzen für eine ΔR von 9 mm. In diesem Bild zeigen die schwarzen Punkte die Werte beim V.H-Walzen und die weißen Punkte die Werte beim V.V-Walzen. Beim V.H-Walzen wird der Abstand zwischen der Gipfelstelle und dem Breitenende, nämlich der Gipfelstellenwert, nach dem zweiten Vertikalwalzen ein bißchen größer als der nach dem ersten, aber danach wird er mit zunehmendem Gesamtbreitenabnahmenverhältnis kleiner.

Beim V.V-Walzen vergrößert sich der Gipfelstellenwert mit zunehmendem Gesamtbreitenabnahmenverhältnis bei der Kaliberwalze,,,, und diese Tendenz wird mit abnehmendem Kaliberwinkel stärker. Bei der Flachwalze verkleinert sich der Gipfelstellenwert mit zunehmendem Gesamtbreitenabnahmenverhältnis auch beim V.V-Walzen. Dies bedeutet, daß sich der Umformbereich des Walzgutes mit der Wiederholung des Vertikalwalzens in die Breitenmitte verbreitet bei der Kaliberwalze, aber dieser Umformbereich bei der Flachwalze nur am Breitenende bleibt.

Wenn das Kaliber nicht genug tief ist und eine Hundeknochenform ungewöhnlich außerhalb des Kalibers wächst, ist zu befürchten, daß der Hundeknochen teil durch das nachfolgende Horizontalwalzen geknickt und dadurch ein schädlicher Oberflächenfehler gebildet wird. Dies muß vor allem für die Nacharbeitung vermieden werden. Unter diesem Gesichtspunkt hat es eine große Bedeutung für die Entscheidung einer Kalibertiefe, die Gipfelstelle des Hundeknochens vorauszuwissen.

Aus Bild 7-4 kann man leicht verstehen, daß die Kalibertiefe mit abnehmendem Kaliberwinkel, besonders beim V.V-Walzen,

größer gemacht werden.

Bild 7-5 (a) und (b) zeigen den Zusammenhang zwischen dem Gesamtbreitenabnahmenverhältnis und der Ausbreitungsgröße beim V.H-Walzen und beim V.V-Walzen. Beim V.H-Walzen hat die Ausbreitungsgröße eine Tendenz, nach dem zweiten Vertikalwalzen mit zunehmendem Gesamtbreitenabnahmenverhältnis unabhängig von der Walzenform abzunehmen. Dies geschieht daraus, daß die Hundeknochendicke und auch die Brammenbreite mit zunehmendem Gesamtbreitenabnahmenverhältnis kleiner werden.

Beim V.V-Walzen vergrößert sich die Ausbreitungsgröße mit zunehmendem Gesamtbreitenabnahmenverhältnis, besonders bei der Flachwalze. Bei der Kaliberwalze wird die Zuwachsrate der Ausbreitungsgröße mit zunehmendem Gesamtbreitenabnahmenverhältnis kleiner.

Diese Tendenz ist gleich mit dem Verhalten des Hundeknochendickenverhältnisses, das in Bild 7-2 (b) gezeigt ist.

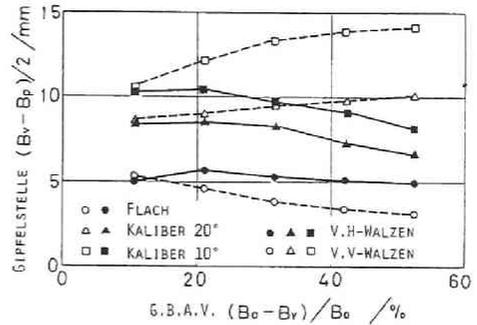
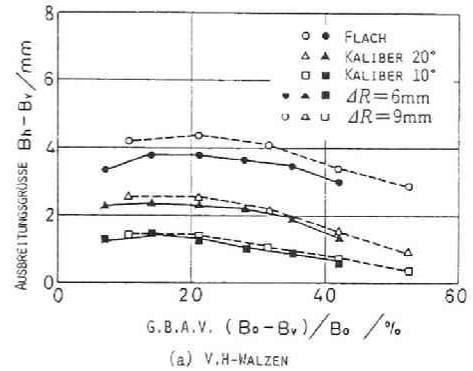
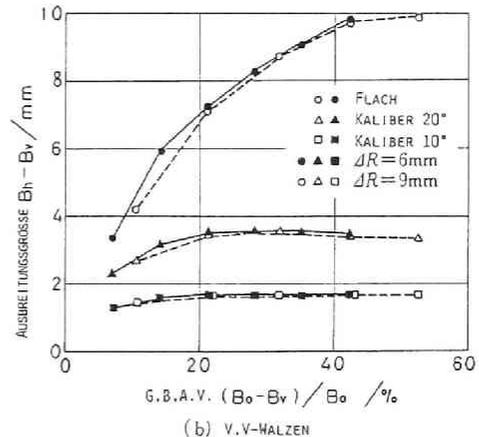


Bild 7-4 Veränderung der Gipfelstelle beim V.H-Walzen und beim V.V-Walzen



(a) V.H-WALZEN



(b) V.V-WALZEN

Bild 7-5 Zusammenhang zwischen dem Gesamtbreitenabnahmenverhältnis und der Ausbreitungsgröße (a) beim V.H-Walzen und (b) beim V.V-Walzen

7.3.2. Veränderung der Länge des Schopf-Endes

Beim Walzen für die Breitenabnahme wird der sogenannte Fischschwanz durch die am Kopf- und Fußende des Walzgutes entstehende unständige Umformung gebildet.

Bild 7-6 zeigt den Zusammenhang zwischen dem Gesamtbreitenabnahmenverhältnis und der Relativlänge des Fischschwanzes beim V.H-Walzen. Die Relativlänge des Fischschwanzes vergrößert sich im ganzen mit zunehmendem Gesamtbreitenabnahmenverhältnis, aber sie wird wieder kleiner, wenn das Gesamtbreitenabnahmenverhältnis größer als 40 % und ΔR größer als 9 mm wird. Die Relativlänge des Fischschwanzes vermindert sich mit zunehmender ΔR , und sie ist bei der Flachwalze größer als bei der Kaliberwalze und wird kleiner mit abnehmendem Kaliberwinkel.

Bild 7-7 zeigt den Vergleich zwischen der Relativlänge des Fischschwanzes beim V.H-Walzen und derjenigen beim V.V-Walzen. Bei den beiden Fällen zeigt die Änderung der Relativlänge des Fischschwanzes mit dem Gesamtbreitenabnahmenverhältnis eine ähnliche Tendenz. Die Relativlänge des Fischschwanzes beim V.V-Walzen ist aber kleiner als die beim V.H-Walzen.

Die Entstehung des Fischschwanzes führt zur Verschlechterung der Ausbeute, weil der Fischschwanzteil vor dem nachfolgenden Prozeß geschopft werden muß. Deswegen bemüht man sich zur Zeit um eine Entwicklung der praktischen Maßnahme, die Größe des Schopf-Endes zu vermindern. Aus den in Bild 7-6 und 7-7 gezeigten experimentellen Ergebnissen werden einige Erkenntnisse erworben, daß die Größe des beim mehrstufigen Walzen

entstehenden Schopf-Endes beim V.V-Walzen kleiner ist als beim V.H-Walzen, und daß die Größe des Schopf-Endes mit abnehmendem Kaliberwinkel der Vertikalwalze und mit zunehmender ΔR kleiner wird. Außerdem ist es auch eine wirkliche Maßnahme, daß die möglichst lange Bramme durch die Wiederholung des Vertikal-Vertikal-Horizontalwalzens in ihrer Breitenrichtung gewalzt wird und danach mit einer bestimmter Länge eingeteilt wird.

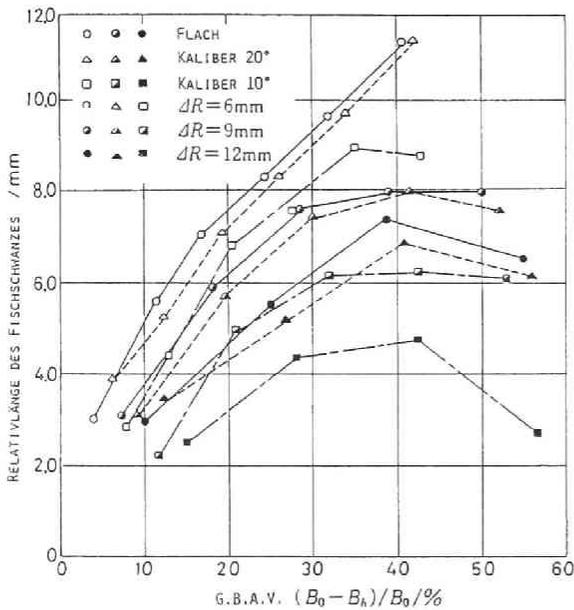


Bild 7-6
Zusammenhang zwischen dem Gesamtbreitenabnahmenverhältnis und der Relativlänge des Fischschwanzes beim V.H-Walzen

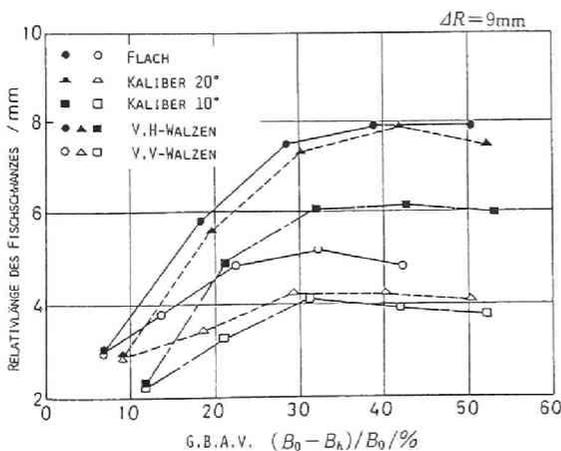


Bild 7-7
Vergleich zwischen dem V.H-Walzen und dem V.V-Walzen über die Relativlänge des Fischschwanzes

7.3.3. Veränderung des Walzmomentes und der Walzkraft

Bild 7-8 (a) und (b) zeigen den Zusammenhang zwischen dem Gesamtbreitenabnahmenverhältnis und dem Walzmoment beim V.H-Walzen und beim V.V-Walzen für eine ΔR von 9 mm. In diesen Bildern zeigen die schwarzen Punkte die Werte beim Vertikalwalze und die weißen Punkte die Werte beim Horizontalwalzen.

Beim V.H-Walzen: Das Vertikalwalzmoment beim zweiten Vertikalwalzen ist größer als das beim ersten Vertikalwalzen, weil die Größe der Breitenabnahme beim zweiten Vertikalwalzen wegen der beim vorigen Horizontalwalzen hervorgerufenen Ausbreitung größer ist als die der Breitenabnahme beim ersten Vertikalwalzen. Aber das Vertikalwalzmoment wird mit zunehmendem Gesamtbreitenabnahmenverhältnis nach dem zweiten Vertikalwalzen kleiner. Dies geschieht daraus, daß mit zunehmendem Gesamtbreitenabnahmenverhältnis die Breite des Walzgutes kleiner wird und dadurch sich die Ausbreitungsgröße beim vorigen Horizontalwalzen verringert. Das Horizontalwalzmoment wird auch mit zunehmendem Gesamtbreitenabnahmenverhältnis nach dem zweiten Horizontalwalzen kleiner. Dies geschieht daraus, daß sich das Dickenverhältnis des Hundeknochens verkleinert, wie Bild 7-2 (a) zeigt, und auch die Breite selbst des Walzgutes kleiner wird.

Beim V.V-Walzen: Das Vertikalwalzmoment vergrößert sich mit zunehmendem Gesamtbreitenabnahmenverhältnis schwach, weil beim V.V-Walzen die Dicke der Brammenseiten mit zunehmendem Gesamtbreitenabnahmenverhältnis immer dicker wird und dadurch

sich die Berührungsfläche zwischen Walze und Walzgut vergrößert. Die Zuwachsrate des Vertikalwalzmomentes wird aber damit kleiner. Das Horizontalwalzmoment wird bei der Flachwalze mit zunehmendem Gesamtbreitenabnahmenverhältnis viel größer, bei der Kaliberwalze ein wenig größer. Dies entspricht auch der in Bild 7-2 (b) gezeigten Veränderung des Hundeknochendickenverhältnisses.

Der Zusammenhang zwischen der Walzkraft und dem Gesamtbreitenabnahmenverhältnis beim V.H- und auch beim V.V-Walzen zeigt eine ähnliche Tendenz mit dem Zusammenhang zwischen dem Walzmoment und dem Gesamtbreitenabnahmenverhältnis.

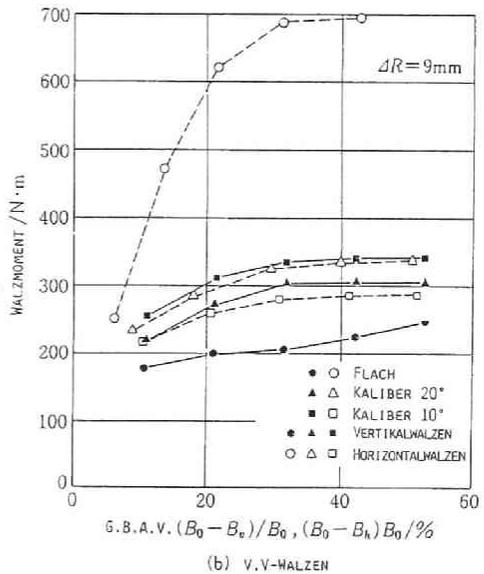
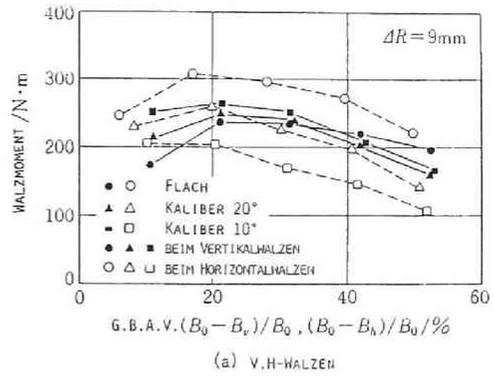


Bild 7-8

Zusammenhang zwischen dem Gesamtbreitenabnahmenverhältnis und dem Vertikal- und Horizontalwalzmoment (a) beim V.H-Walzen und (b) beim V.V-Walzen

7.4. Zusammenfassung

In diesem Kapitel wurde der Modellversuch zum Ermitteln der Veränderung der Brammenform, des Walzmomentes und der Walzkraft beim mehrstufigen Walzen durchgeführt. Daraus erklärte sich, daß die Form der Vertikalwalze und der Stichplan großen Einfluß auf die Brammenform, die Walzkraft und das Walzmoment haben.

Die erworbenen Erkenntnisse können wie folgt zusammengefaßt werden:

- 1) Die Flachwalze hat nicht nur beim V.V-Walzen, sondern auch beim V.H-Walzen einige Nachteile. Beim V.V-Walzen mit Flachwalze wird z.B. das Hundeknochendickenverhältnis mit zunehmendem Gesamtbreitenabnahmenverhältnis zu groß und dadurch wird die Ausbreitungsgröße und der Kraftbedarf beim nachfolgenden Horizontalwalzen viel größer als bei der Kaliberwalze. Beim V.H-Walzen ist die Abnahme der Zentrumsdicke bei der Flachwalze stärker als bei der Kaliberwalze und die Ausbeute schlechter. Daraus erklärt sich, daß die Flachwalze für die Vertikalwalze bei der Breitenabnahme der Brammen nicht geeignet ist.
- 2) Bei der Kaliberwalze sind die Abnahme der Zentrumsdicke und die Länge des Fischschwanzes kleiner als diese bei der Flachwalze, und diese Tendenz wird mit abnehmendem Kaliberwinkel stärker. Beim V.V-Walzen nimmt die Hundeknochendicke mit dem Gesamtbreitenabnahmenverhältnis zu, und ihre Zuwachsrate vermindert sich mit abnehmendem Kaliberwinkel. Dadurch wird die Zunahme der Ausbreitungs-

größe und des Kraftbedarfs beim Horizontalwalzen mit abnehmendem Kaliberwinkel kleiner.

- 3) Beim V.H-Walzen wird die Hundeknochendicke nicht so groß wie die beim V.V-Walzen. Aber die Abnahme der Zentrumsdicke und die Länge des Fischeschwanzes sind beim V.H-Walzen größer als die beim V.V-Walzen.
- 4) Wenn die Abnahme der Walzenöffnung pro ein Vertikalwalzen ΔR konstant ist, verkleinert sich die Walzkraft und das Walzmoment mit zunehmendem Gesamtbreitenabnahmenverhältnis beim V.H-Walzen.

8. EINWIRKUNG DES WALZENS FÜR DIE BREITENABNAHME AUF DIE MAKROSTRUKTUR UND AUF DIE MECHANISCHEN EIGENSCHAFTEN DER STRANGGEGOSSENEN BRAMMEN

8.1. Einleitung

Die Makrostruktur der stranggegossenen Brammen besteht, von der Oberfläche in die Mitte gesagt, aus dem abschreckenden Kristall, aus dem Stengelkristall und aus dem gleichachsigen Kristall, wie Bild 8-1 zeigt. Der bei der Erstarrung des Stahls gebildete Stengelkristall ist für die mechanische Qualität nicht günstig. Es ist zu vermuten, daß der in der Dickenrichtung der Bramme gewachsene Stengelkristall durch das horizontale Walzen auf der Warmbreitbandstraße zerdrückt wird, aber daß der am Seitenteil in der Breitenrichtung der Bramme gewachsene Stengelkristall nur wenig zerdrückt und seine schlechte mechanische Qualität kaum verbessert werden kann. Wenn die Bramme beim Walzen für die Breitenabnahme durch die Vertikalwalze in ihrer Breitenrichtung gewalzt wird, verdicken sich die Brammenseiten und wird die sogenannte Hundeknochenform gebildet. Dabei und beim nachfolgenden Horizontalwalzen konzentriert sich die Formänderung an den Brammenseiten, und dadurch kann die mechanische Qualität an den Brammenseiten verbessert werden.

In diesem Kapitel wird deshalb die experimentelle Untersuchung über die Einwirkung des Walzens für die Breitenabnahme auf die Makrostruktur und auf die mechanischen Eigenschaften des Walzgutes, besonders der Brammenseiten berichtet.

8.2. Versuchsmethode

Als Walzgut wurden die Stahlplatten mit einer Breite von 150 mm und einer Dicke von 24 mm angewandt. Sie wurden aus einem quadratisch stranggegossenen Knüppel mit einer Seite von 160 mm so ausgeschnitten, daß die Wachstumsrichtung des Stengelkristalles möglichst mit der Breitenrichtung des Walzgutes übereinstimmt, wie Bild 8-2 zeigt. Die Größe des Walzgutes war fast ein Zehntel der wirklichen Brammen im Betrieb.

Tafel 8-1 zeigt die chemische Zusammensetzung des Walzgutes. Die Breitenabnahme des Walzgutes wurde mit der abwechselnden Wiederholung des Vertikal- und Horizontalwalzens, nämlich V.H-Walzens, durchgeführt. Und zwar wurde das Walzgut bei drei verschiedenen ΔR (ΔR : die Abnahme der Walzenöffnung pro ein Vertikalwalzen) von 5 mm, 10 mm und 15 mm und bei drei verschiedenen Gesamtbreitenabnahmen von 30 mm, 60 mm und 90 mm gewalzt.

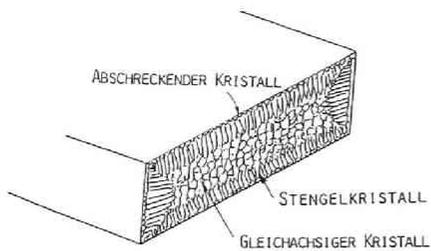


Bild 8-1 Schematisches Bild der Makrostruktur der stranggegossenen Brammen

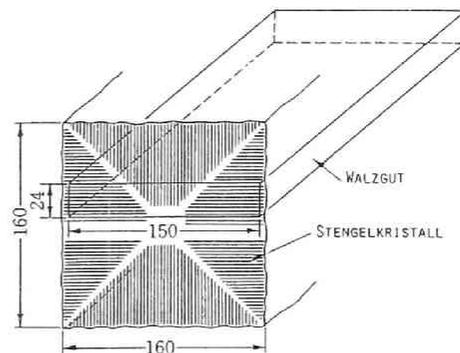


Bild 8-2 Ausschnitt des Walzgutes aus dem quadratisch stranggegossenen Knüppel

Tafel 8-1 Chemische Zusammensetzung des Walzgutes (%)

C	Si	Mn	P	S
0,25	0,18	1,17	0,024	0,017

Außerdem wurde das Walzgut, ohne vorher vertikal gewalzt zu werden, mit einer Dickenabnahme von 2,4 mm zwei- bis achtmal horizontalgewalzt. Dieser Stichplan wird in diesem Kapitel H-Walzen genannt.

Das Walzgut wurde im Gasofen auf eine Temperatur von 1000°C erwärmt und dann anhand der Flachwalze mit einem Durchmesser von 180 mm und mit einer Drehgeschwindigkeit von 80 mm/s vertikal- und horizontalgewalzt. Beim Vertikalwalzen wurde das Walzgut durch den vor dem Walzspalteingang gesetzten Führer in den Walzspalt vertikal eingeführt. Nach den erforderlichen Walzen wurde das Walzgut durch die natürliche Konvektion abgekühlt.

In dem ständigen Formänderungsbereich wurde die mechanische Eigenschaft des Walzgutes durch die Zugprüfung untersucht. Die Zugprüfungsstücke wurden aus der Umgebung des Breitenendes und der Breitenmitte des Walzgutes, wo der Stengelkristall existiert war, mit Mikroschneidmaschine ausgeschnitten, wie Bild 8-3 zeigt. Das Walzgut wurde geätzt, und dann wurde die Makro- und Mikrostruktur seiner Oberfläche beobachtet und fotografiert (vgl. Bild 8-3). Das Ätzmittel für die Makrostruktur war die Salzsäure mit einer Dichte von 18 % und mit einer Temperatur von 75°C, und die Ätzungszeit war 30 Minuten.

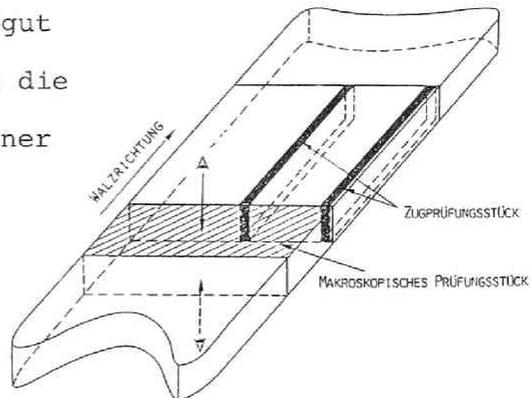


Bild 8-3
Ausschnitt des Zugprüfungsstückes und des makroskopischen Prüfungsstückes aus dem Walzgut

Das Ätzmittel für die Mikrostruktur war Nital mit einer Dichte von 10 % und mit einer Zimmertemperatur, und die Ätzungszeit war 10 bis 15 Sekunden.

Nach jedem Walzen wurde die Querschnittform des Walzgutes gemessen. Die Meßpunkte der Form und die Bezeichnungen sind gleich mit denjenigen im siebten Kapitel (vgl. Bild 7-1 und Tafel 7-1).

8.3. Versuchsergebnisse und Betrachtung

8.3.1. Änderung der Querschnittform des Walzgutes beim V.H-Walzen

Die Änderung der Querschnittform des Stahlwalzgutes beim V.H-Walzen zeigt eine ähnliche Tendenz wie bei dem Experiment anhand der Aluminiumplatten, das im siebten Kapitel dargestellt wurde.

Bild 8-4 (a) zeigt die Änderung der Hundeknochendicke H_{max} und der Gipfelstelle $(B_v - B_p)/2$ nach jedem Vertikalwalzen beim V.H-Walzen. Die Hundeknochendicke wird mit abnehmender ΔR und mit abnehmender Walzgutsbreite kleiner. Die Gipfelstelle nähert sich mit abnehmender ΔR dem Breitenende.

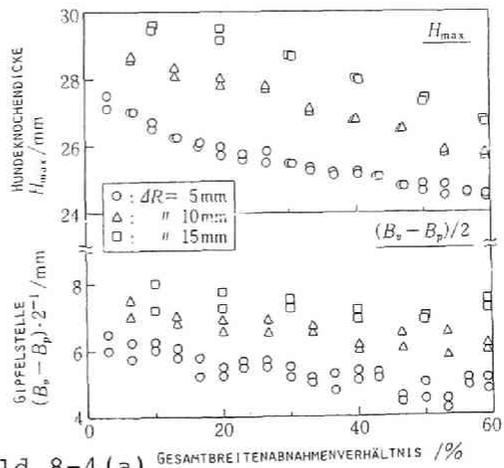


Bild 8-4 (a) Änderung der Hundeknochendicke und der Gipfelstelle nach dem Vertikalwalzen beim V.H-Walzen

Bild 8-4 (b) zeigt die Änderung der Zentrumdicke H_{Ch} und der Zentrumgrabenbreite B_C nach jedem Horizontalwalzen. Durch das Horizontalwalzen wird das hundeknochenförmige Walzgut in seiner Breitenrichtung verbreitert und gleichzeitig in seiner Walzrichtung gedehnt. Weil die Formänderung in

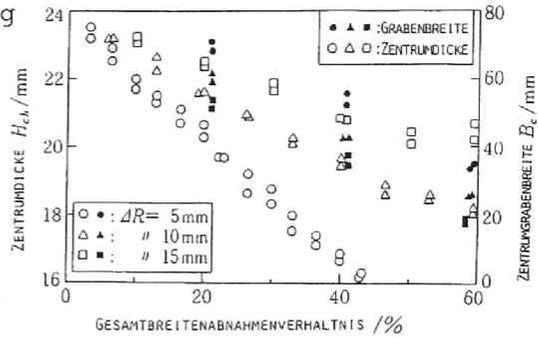


Bild 8-4 (b)

Änderung der Zentrumdicke und der Zentrumgrabenbreite nach dem Horizontalwalzen beim V.H-Walzen

diesem Fall meistens im Hundeknochenteil entsteht, wird der Zentrumteil des Walzgutes durch die Dehnung seiner beiden Seiten gezogen und mit zunehmender Gesamtbreitenabnahme dünner, , und diese Tendenz wird mit abnehmender ΔR stärker. Von diesem Grunde hängt es ziemlich ab, daß das am Kopf- und Fußende der Bramme sich entwickelnde Fischschwanz-Volumen mit abnehmender ΔR und mit zunehmender Gesamtbreitenabnahme größer und dadurch die Ausbeute schlechter wird. Es ist auch beachtlich, daß eine von der Ausdehnung in der Walzrichtung hervorgerufene Zugspannung im Zentrumteil die beim Strangguß gebildeten Innenrisse ausbreiten kann.

Durch die Untersuchung über die Änderung der Querschnittform des Walzgutes kommt es zum Schluß, daß sich die Formänderung beim V.H-Walzen auf die Umgebung der beiden Breitenenden konzentriert, und diese Tendenz wird mit abnehmender ΔR stärker.

8.3.2. Einfluß des Walzens für die Breitenabnahme auf die Makrostruktur

Bild 8-5 zeigt die Makrostruktur der Probe vor dem Walzen. Wie das Bild zeigt, wächst der Stengelkristall vom Breitenende zur Breitenmitte der Probe parallel mit der Breitenrichtung.

Bild 8-6 zeigt die Makrostruktur des Walzgutes nach dem mehrstufigen H-Walzen mit einem Gesamtdickenabnahmenverhältnis von 40 %. Der Stengelkristall ist noch nicht zerstört und bleibt in der Breitenrichtung bestehen, obgleich der Abstand zwischen den Stengelkristallen größer wird.

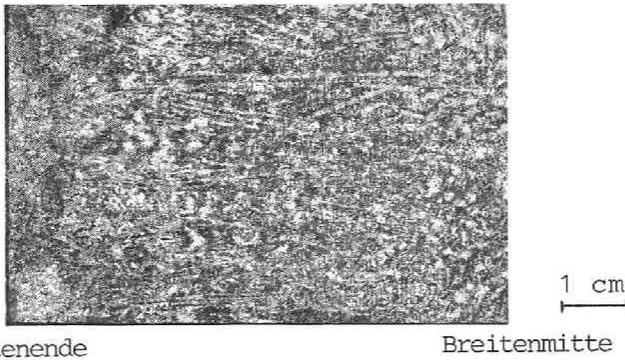


Bild 8-5 Makrostruktur der Probe vor dem Walzen

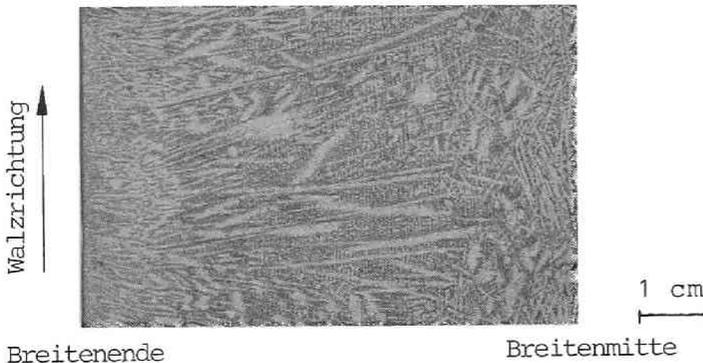


Bild 8-6 Makrostruktur des Walzgutes nach dem H-Walzen
(Gesamtdickenabnahmenverhältnis ist 40 %)

Bild 8-7 (a) und (b) zeigen die Makrostruktur des Walzgutes nach dem V.H-Walzen mit zwei verschiedenen ΔR von 5 mm und 15 mm und mit einem Gesamtbreitenabnahmenverhältnis von 60 %. Der Stengelkristall des Walzgutes fließt in der Walzrichtung schräg von dem Breitenende zur Breitenmitte, und der Fließwinkel ist bei der ΔR von 5 mm größer als bei der ΔR von 15 mm.

Diese Tendenz ist noch klarer gezeigt in Bild 8-8, das den Zusammenhang zwischen dem Gesamtbreitenabnahmenverhältnis und dem Fließwinkel des Stengelkristalles darstellt. Der Fließwinkel vergrößert sich mit zunehmendem Gesamtbreitenabnahmenverhältnis und mit abnehmender ΔR .

Bild 8-9 zeigt beispielsweise die Mikrostruktur der Probe vor dem Walzen und diejenige des Walzgutes nach dem V.H- und H-

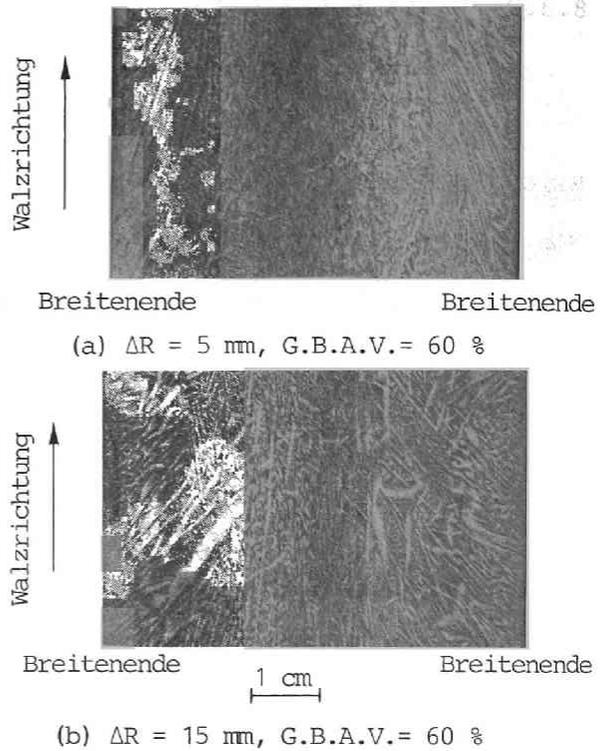


Bild 8-7 Makrostruktur des Walzgutes nach dem V.H-Walzen

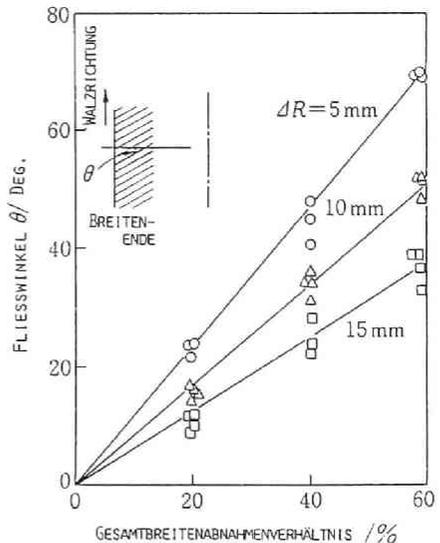


Bild 8-8

Zusammenhang zwischen dem Gesamtbreitenabnahmenverhältnis und dem Fließwinkel des Stengelkristalles

Walzen. Die Mikrostruktur der Probe vor dem Walzen ist von derjenigen des Walzgutes verschieden, und zwar wird z.B. die Korngröße nach dem Walzen kleiner.

Bild 8-10 zeigt den Zusammenhang zwischen dem Gesamtbreiten(dicken)abnahmenverhältnis und der Korngröße von Ferrit. Die Korngröße wird mit zunehmendem Gesamtabnahmenverhältnis kleiner, besonders beim H-Walzen. Nach dem V.H-Walzen wird die Korngröße am Breitenende ein bißchen kleiner als die an der Breitenmitte. Aber auf alle Fälle hat das V.H-Walzen wenigen Einfluß auf die Verkleinerung der Korngröße.



Bild 8-9 Mikrostruktur der Probe vor dem Walzen und des Walzgutes nach dem V.H- und H-Walzen

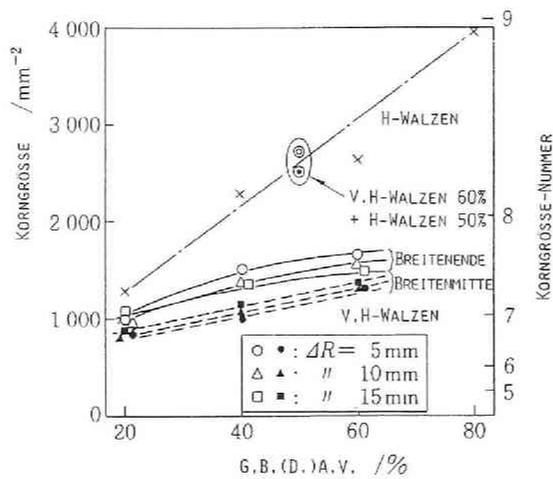


Bild 8-10 Zusammenhang zwischen dem Gesamtbreiten(dicken)abnahmenverhältnis und der Korngröße von Ferrit

8.3.3. Änderung der mechanischen Eigenschaften des Walzgutes

Die mechanischen Eigenschaften der Probe vor und nach dem Walzen, nämlich der n-Wert, der r-Wert, die Fließgrenze, die Zugfestigkeit und das Querschnittabnahmenverhältnis beim Zerreißen wurden durch die Zugprüfung untersucht. Bilder von 8-11 bis 8-14 zeigen die Änderung jedes Durchschnittswertes von diesen gemessenen Werten beim V.H- und H-Walzen.

Bild 8-11 zeigt den Zusammenhang zwischen dem Querschnittabnahmenverhältnis beim Zerreißen und dem Gesamtbreiten-(dicken)abnahmenverhältnis beim V.H-Walzen und beim H-Walzen unter der Annahme, daß beide Verhältnisse von Breiten- und Dickenabnahme eine gleiche Wirkung für das Querschnittabnahmenverhältnis haben. Da die Probe vor dem Walzen viele Fehler hat, so wird sie durch eine kleine Dehnung zerrissen. Daher ist das Querschnittabnahmenverhältnis sehr klein. Dies wird durch das Walzen verbessert, besonders stark am Breitenende beim V.H-Walzen. Das Querschnittabnahmenverhältnis der von dem Breitenende ausgeschnittenen Probe beim Zerreißen wird mit abnehmender ΔR größer. Das Querschnittabnahmenverhältnis der von der Breitenmitte ausgeschnittenen Probe wird dagegen mit zunehmender ΔR größer. Dies geschieht daraus, daß sich der Formänderungsbereich beim V.H-Walzen mit abnehmender ΔR am Breitenende mehr konzentriert und mit zunehmender ΔR in die Breitenmitte mehr ausbreitet. Das Querschnittabnahmenverhältnis der Zugprüfungsprobe beim Zerreißen, die von dem durch das H-Walzen gewalzten Walzgut ausgeschnitten wurde, ist kleiner als das beim V.H-Walzen und nimmt mit zunehmendem

Gesamtdickenabnahmenverhältnis nur schwach zu.

Bild 8-12 zeigt den Zusammenhang zwischen dem Gesamtbreiten- (dicken) abnahmenverhältnis und dem Verfestigungsexponent n-Wert. Der Verfestigungsexponent n-Wert der Probe vor dem Walzen und des Walzgutes nach dem H-Walzen ist unabhängig von dem gemessenen Teil und konstant mit einem Wert von ungefähr 0,27. Der n-Wert des Walzgutes nach dem V.H-Walzen ist abhängig vom gemessenen Teil und wird am Breitenende größer als an der Breitenmitte. Diese Tendenz wird mit abnehmender ΔR deutlicher.

Bild 8-13 zeigt den Zusammenhang zwischen dem Gesamtbreiten- (dicken) abnahmenverhältnis und dem von Lankford vorgeschlagenen r-Wert bei der Dehnung in Längsrichtung von 10 % bis 15 %. Weil die Zugprüfungsprobe aus dem Walzgut so ausgeschnitten werden, wie Bild 8-3 zeigt, stellt die durch die Zugprüfung

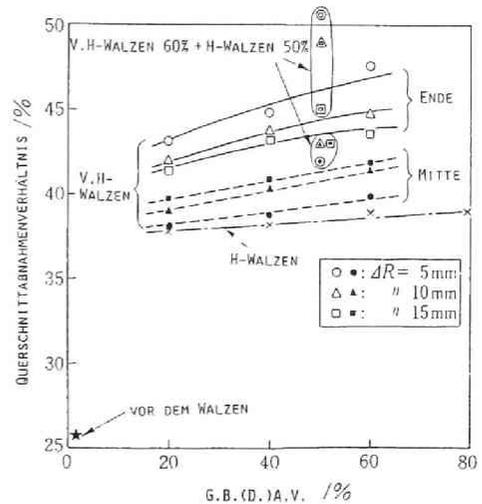


Bild 8-11 Einfluß des V.H- und H-Walzens auf das Querschnittabnahmenverhältnis

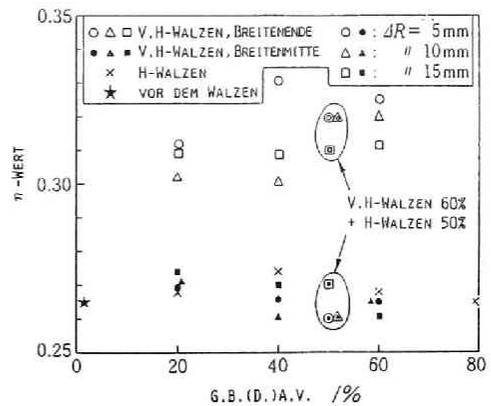


Bild 8-12 Einfluß des V.H- und H-Walzens auf den Verfestigungsexponent n

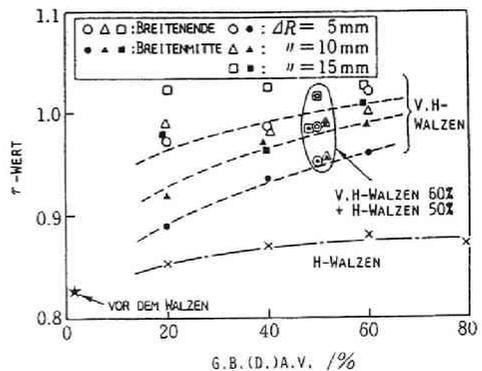


Bild 8-13 Einfluß des V.H- und H-Walzens auf den Lankfordschen Wert r

hervorgerufene Dehnung der Probe in ihrer Breitenrichtung die Dehnung in der Dickenrichtung des Walzgütes ϵ_t dar. Dagegen stellt die Dehnung der Probe in ihrer Dickenrichtung die Dehnung in der Breitenrichtung des Walzgütes ϵ_w dar. Der r-Wert ist so berechnet: $r = \epsilon_w / \epsilon_t$. Der gemessene r-Wert der Probe vor dem Walzen ist 0,83 und ziemlich kleiner als 1,0. Dies geschieht daraus, daß die Probe vor dem Walzen in ihrer Breitenrichtung wegen des Stengelkristalls schwer zusammenzuziehen ist. Der r-Wert des Walzgütes nach dem H-Walzen ist ungefähr 0,87 und auch kleiner als 1,0. Daraus kann man vermuten, daß der Stengelkristall durch das H-Walzen nicht so stark zerdrückt wird. Die gemessenen r-Werte am Breitenende des Walzgütes nach dem V.H-Walzen liegen zerstreut um einen Wert von 1,0. Dies bedeutet, daß die von dem Stengelkristall hervorgerufene Anisotropie des Walzgütes an seinem Breitenende durch das V.H-Walzen verschwunden ist.

Diese Wirkung breitet sich mit zunehmendem Gesamtbreitenabnahmenverhältnis zur Breitenmitte aus.

Bild 8-14 zeigt den Einfluß des Walzens auf die Fließgrenze und die Zugfestigkeit. Beide vergrößern sich mit zunehmendem Gesamtbreitenabnahmenverhältnis beim V.H-Walzen schwach und sind am Breitenende größer als an

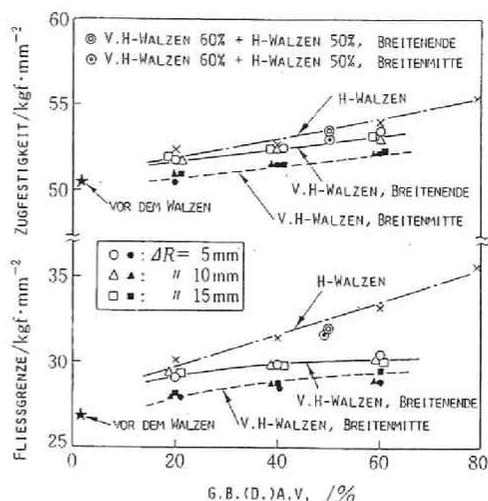


Bild 8-14
Einfluß des V.H- und H-Walzens auf die Fließgrenze und auf die Zugfestigkeit

der Breitenmitte. Beim H-Walzen sind die beiden größer als die beim V.H-Walzen. Diese Tendenz hat eine enge Beziehung mit der Änderung der Korngröße durch das Walzen, wie in Bild 8-10 gezeigt ist.

Das Walzgut nach dem V.H-Walzen zeigt günstigere mechanische Eigenschaften als die nach dem H-Walzen, obwohl die Fließgrenze und die Zugfestigkeit ein bißchen niedriger sind. Die mechanischen Eigenschaften des Walzgutes, das durch das V.H-Walzen seine Breite um 60 % und dann weiter durch horizontales Walzen seine Dicke um 50 % abgenommen wurde, wurden durch die Zugprüfung gemessen. Wie in Bildern 8-10 bis 8-14, kamen die Werte von der Korngröße, der Fließgrenze und der Zugfestigkeit desjenigen Walzgutes denen des Walzgutes nach dem H-Walzen gleich. Der n-Wert und der r-Wert, die schon größer als die des Walzgutes nach dem H-Walzen waren, veränderten sich sehr wenig, und das Querschnittabnahmenverhältnis beim Zerreißen wurde etwas noch größer.

8.4. Zusammenfassung

In diesem Kapitel wurde der Einfluß des Walzens für die Breitenabnahme der stranggegossenen Brammen auf die Veränderung der Gußstruktur und auf die mechanischen Eigenschaften des Walzgutes untersucht. Die experimentellen Ergebnisse können wie folgt zusammengefaßt werden:

- 1) Der am Breitenende der Bramme befindliche Stengelkristall, der beim Gießen in ihrer Breitenrichtung erzeugt wurde,

wird durch die Wiederholung des Vertikal- und Horizontalwalzens zerdrückt, und dadurch werden ihre mechanischen Eigenschaften, besonders die Dehnbarkeit am Breitenende verbessert.

- 2) Mit abnehmender ΔR , die die Abnahme der Walzenöffnung pro ein Vertikalwalzen zeigt, konzentriert sich die Formänderung mehr am Breitenende, und die Wirkung des Vertikalwalzens auf die mechanischen Eigenschaften der Brammenseiten wird stärker. Wenn ΔR größer wird, wird die mechanischen Eigenschaften in der Breitenmitte verbessert und dadurch wird ihr Unterschied zwischen dem Breitenende und der Breitenmitte kleiner.
- 3) Wenn die Bramme ohne Vertikalwalzen nur noch horizontalgewalzt wird, wird der Stengelkristall in der Breitenrichtung nur wenig zerdrückt und die mechanischen Eigenschaften werden schwer verbessert.
- 4) Die Fließgrenze und die Zugfestigkeit werden durch das H-Walzen ein bißchen mehr vergrößert als die durch das V.H-Walzen. Aber wenn das Walzgut nach dem V.H-Walzen weiter horizontalgewalzt wird, vergrößern sich die beiden Werte bis zum Wert des Walzgutes nach dem H-Walzen.

Daraus kommt es zum Schluß, daß die mechanischen Eigenschaften des warmgewalzten Stahlbandes, dessen Breite durch die Wiederholung des Vertikal- und Horizontalwalzens abgenommen wurde, besser sind als die des ohne Breitenabnahme warmgewalzten Stahlbandes.

9. ZUSAMMENFASSUNG

In der vorliegenden Arbeit wurde der Walzvorgang beim Breitenabnahmenprozeß der stranggegossenen Brammen durch eine Reihe von Modellversuchen und Analysen untersucht. Dadurch sind die Zusammenhänge der Walzeigenschaften mit der Größe der Breitenabnahme, der Walzenform, dem Walzendurchmesser, der Brammenbreite, der Brammentemperatur und dem Stichplan klar geworden. Diese Ergebnisse werden hier wiederum zusammengefaßt.

Erstens wurde ein grundlegendes Experiment über das Vertikalwalzen der Brammen und über das nachfolgende Horizontalwalzen angestellt, indem Aluminiumplatten als Walzgut und Flach- und Kaliberwalzen mit verschiedenen Kaliberwinkeln als Vertikalwalze benutzt wurden. Gleichzeitig wurde ein rechnerisches Modell aus starr-plastischen finiten Elementen vorgeschlagen, damit der Walzvorgang analysiert. Aus diesem Experiment und der Analyse wurden die folgenden Erkenntnisse erworben.

- 1) a) Wenn die Bramme durch die Vertikalwalze in ihrer Breitenrichtung gewalzt wird, wird die sogenannte Hundeknochenform gebildet. Die Hundeknochendicke (Maximaldicke) vergrößert sich mit zunehmender Breitenabnahme am Anfang stark und danach sanft, und die Gipfelstelle des Hundeknochens nähert sich auch damit der Breitenmitte. Die Zentrumsdicke der Bramme wird nicht größer, sondern ein wenig kleiner als ihre Anfangsdicke, wenn die Breitenabnahme klein ist. Die Walzkraft und das Walzmoment vergrößern sich mit zunehmender Breitenabnahme, und zwar die Walzkraft schwächer als proportional, das Walzmoment proportional.

- b) Bei der Kaliberwalze ist die Hundeknochendicke kleiner und verbreitet sich die Formänderung in die Breitenmitte mehr als bei der Flachwalze. Mit abnehmendem Kaliberwinkel wird diese Tendenz deutlicher, Walzkraft und Walzmoment dagegen größer. Das erstere ist vorteilhaft für die Weiterverarbeitung der Bramme, das letztere führt zu stärkerer Abnutzung der Walze. Unter Berücksichtigung dieser Vor- und Nachteile kann der günstigste Kaliberwinkel zwischen 10° und 15° liegen.
- c) Die berechnete Querschnittform der Bramme stimmt mit der gemessenen Form gut überein, wenn die Abhängigkeit der Materialsfließspannung von der Dehnung und von der Dehngeschwindigkeit richtig berücksichtigt wird. Nach der Analyse nimmt die Hundeknochendicke ab mit steigenden Werten von Verfestigungsexponent n und von Geschwindigkeitsempfindlichkeit m . Beide Parameter haben etwa den gleichen Einfluß auf die Hundeknochenform. Man sieht daraus, daß es notwendig ist, nicht nur die Verfestigung, sondern auch die Geschwindigkeitsempfindlichkeit in die Berechnung einzubeziehen.
- 2) a) Beim Horizontalwalzen der hundeknochenförmigen Bramme breitet sich die Brammenbreite wieder etwas aus. Die Ausbreitungsgröße steigt mit zunehmender Breitenabnahme zuerst, aber wird bald fast konstant. Dies bedeutet, daß mit zunehmender Breitenabnahme die Breitenabnahmenleistung relativ größer wird. Die Zentrumdicke der Bramme nach dem Horizontalwalzen wird dünner als ihre Anfangsdicke, wenn die Breitenabnahme klein ist.

b) Die Ausbreitungsgröße, die Verminderung der Zentrumsdicke, die Walzkraft und das Walzmoment beim Horizontalwalzen sind am größten, wenn das Vertikalwalzen durch die Flachwalze durchgeführt wurde, und sie werden kleiner mit abnehmendem Kaliberwinkel der Vertikalwalze beim vorigen Vertikalwalzen.

c) Der Einfluß der Hundeknochendicke auf die Walzeigenschaften beim Horizontalwalzen ist viel stärker als der Einfluß der Gipfelstelle. Die Ausbreitungsgröße und der Kraftbedarf beim Horizontalwalzen vergrößern sich fast proportional zur Hundeknochendicke.

d) Die berechneten Werte der Walzeigenschaften beim Horizontalwalzen stimmen mit den gemessenen Werten qualitativ gut überein, aber der Rechenfehler wird mit zunehmender Hundeknochendicke verhältnismäßig größer.

Zweitens wurde ein Modellversuch über die bei der Breitenabnahme im Walzgut entstehende Spannung anhand der Plasticine-Platten und gleichzeitig eine rechnerische Untersuchung darüber mit dem Finite-Elemente-Verfahren durchgeführt. Daraus erklärte sich, wie die Walzbedingungen auf die Spannungsverteilung im Walzgut wirken. Die daraus gewonnene wichtige Kenntnis ist:

3) Beim Vertikalwalzen und auch beim nachfolgenden Horizontalwalzen entsteht im allgemeinen eine Druckspannung, und ihre Größe ist am größten an den Breitenenden der Bramme. Aber die Spannung in der Walzrichtung wendet sich mit Näherung zur Breitenmitte von Druckspannung zu Zugspannung. Dies bedeutet, daß die im Strangguß unerwartet in der Umgebung der Breitenmitte der Bramme erscheinenden Innenrisse

durch die beim Walzen dort entstehende Zugspannung vergrößert werden können. Daher sollte die Entstehung von Innenrissen beim Stranggießverfahren völlig zurückgehalten werden.

Die berechneten Werte der Spannungen stimmten mit den gemessenen Werten im ganzen nicht nur qualitativ, sondern auch quantitativ gut überein. Daraus und aus den Ergebnissen 1)c) und 2)d) kann man so schließen, daß die hier vorgeschlagene rechnerische Methode genügende Gültigkeit und Verlässlichkeit hat.

Drittens wurde der Einfluß des Walzendurchmessers, der Brammenbreite und der Brammentemperatur auf das Umformverhalten der Bramme und auf den Kraftbedarf beim Vertikal- und beim Horizontalwalzen experimentell und rechnerisch untersucht.

4) a) Mit der Vergrößerung des Vertikalwalzendurchmessers wird die Hundeknochendicke kleiner, und dadurch die Ausbreitungsgröße, die Walzkraft und das Walzmoment beim Horizontalwalzen kleiner.

b) Mit der Vergrößerung des Vertikalwalzendurchmessers wird die Vertikalwalzkraft und das Vertikalwalzmoment größer, dagegen wird die Walzleistung kleiner. Dies bedeutet, daß mit zunehmendem Walzendurchmesser die Baukosten zunimmt, dagegen aber der Energieverbrauch abnimmt. Unter Berücksichtigung dieser Tatsachen und auch der Betriebserfahrungen dürfte der günstigste Vertikalwalzendurchmesser etwa 1500 mm bei der Kaliberwalze und etwas mehr bei der Flachwalze sein.

5) a) Mit der Vergrößerung der Brammenbreite vergrößert sich

der Greifgrenzwinkel beim Vertikalwalzen.

b) Mit der Vergrößerung der Brammenbreite nehmen die Hundeknochendicke, die Walzkraft und das Walzmoment beim Vertikalwalzen, ferner die Ausbreitungsgröße, die Walzkraft und das Walzmoment beim Horizontalwalzen zu.

6) a) Wenn das Walzgut gleichmäßig erwärmt wird, hat die Erwärmungstemperatur wenigen Einfluß auf die Bildung der Hundeknochenform.

b) Wenn das Walzgut vor dem Vertikalwalzen von seinen Breitenseiten an abgekühlt wird, wird die Hundeknochendicke kleiner, nähert sich die Gipfelstelle seiner Breitenmitte, wird die Ausbreitungsgröße beim Horizontalwalzen kleiner, und dadurch wird die Leistung der Breitenabnahme besser als die beim Walzgut mit gleichmäßiger Temperatur.

Weiter wurde der Modellversuch zum Ermitteln der Veränderung der Brammenform, der Walzkraft und des Walzmomentes beim mehrstufigen Walzen durchgeführt. Dabei wurden zwei Gruppen von Stichplänen, V.H-Walzen und V.V-Walzen, benutzt.

(V.H-Walzen: die abwechselnde Wiederholung des Vertikal- und Horizontalwalzens, V.V-Walzen: die Wiederholung des Vertikalwalzens + das einmalige Horizontalwalzen)

7) a) Beim V.H-Walzen ist die Hundeknochendicke kleiner als die beim V.V-Walzen. Aber das lokale Dünnerwerden des Walzgutes in der Umgebung der Breitenmitte nach dem Horizontalwalzen und die Länge des Fischeschwanzes am Kopf- und Fußende des Walzgutes beim V.H-Walzen sind größer als die beim V.V-Walzen.

b) Die Flachwalze hat nicht nur beim V.V-Walzen, sondern

auch beim V.H-Walzen einige Nachteile. Beim V.V-Walzen mit Flachwalze wird die Hundeknochendicke mit zunehmender Gesamtbreitenabnahme zu groß. Beim V.H-Walzen ist die Verminderung der Zentrumsdicke stärker und die Ausbeute des Walzstahlfertigerzeugnisses bei der Flachwalze schlechter als bei der Kaliberwalze. Daraus erklärt sich, daß die Flachwalze für die Vertikalwalze für die Breitenabnahme der Brammen nicht geeignet ist.

Zuletzt wurde zum Ermitteln der Einwirkung des Walzens für die Breitenabnahme auf die Makrostruktur und auf die mechanischen Eigenschaften der stranggegossenen Brammen die experimentelle Untersuchung durchgeführt, und die die im folgenden dargestellte Wirkung andeutende Ergebnisse wurden erworben.

8) Der beim Gießen erzeugte Stengelkristall in der Breitenrichtung an den Breitenseiten wird durch die Wiederholung des Vertikal- und Horizontalwalzens zerdrückt, und dadurch werden die mechanischen Eigenschaften, besonders die Dehnbarkeit an den Brammenseiten verbessert.

Wie oben dargestellt wurde, wurden in der vorliegenden Arbeit die zahlreichen Erkenntnisse um die Planung und praktische Anwendung der Anlage für die Breitenabnahme der Brammen erworben. Für die Rechnung der Walzeigenschaften beim Vertikalwalzen der Bramme und beim Horizontalwalzen des hundeknochenförmigen Walzgutes, die anhand der bisherigen Walztheorien nicht analysiert werden konnten, wurde ein rechnerisches Modell mit starr-plastischen Finite-Elemente-Verfahren vorgeschlagen, und das verlässige Berechnungsverfahren wurde

festgestellt. Aber in der Untersuchung über das unständige Umformverhalten am Kopf- und Fußende der Bramme bleiben noch viele Probleme offen, die baldmöglichst gelöst werden sollten. So kann diese Arbeit keinen Abschluß darstellen.

S C H R I F T T U M

- 1) Karman, Th.v.: Z. angew. Math. Mech., 5(1925), S.139.
- 2) Orowan, E.: Proc. Inst. Mech. Eng., 150-4(1943), S.140
- 3) Saito, Y.: J. Japan Soc. Tech. Plasticity, 11-117(1970), S.737.
- 4) Nakajima, H.; Watanabe, K.: 19th Japanese Joint Conf. for Tech. of Plasticity, (1968), 201.
- 5) MacGregor, C.W.; Palme, R.B.: Final Report to ASME Committee on Plastic Flow of Metals, (1958).
- 6) Yokoi, T.; Yoshihara, K.: 25th Japanese Joint Conf. for Tech. of Plasticity, (1974), 110.
- 7) Yanagimito, S.: J. Japan Soc. Tech. Plasticity, 5-40 (1964), S.315.
- 8) Gokyu, I.; Kihara, J.; Mae, Y.: J. Japan Soc. Tech. Plasticity, 11-108(1970), S.11.
- 9) Kihara, J.; Ishiguro, K.: 26th Japanese Joint Conf. for Tech. of Plasticity, (1975), 107.
- 10) Kihara, J.; Ishiguro, K.: 1976 Japanese Spring Conf. for Tech. of Plasticity, (1976), 106.
- 11) Kato, K.; Saito, Y.; Moriga, M.: 26th Japanese Spring Conf. for Tech. of Plasticity, (1975), 118.
- 12) Nagata, S.; Kamiyama, F.; Kawaharada, M.; Nakajima, H.; Yanagimito, S.: 1977 Japanese Spring Conf. for Tech. of Plasticity, (1977), 132.
- 13) Nagata, S.; Kamiyama, F.; Kawaharada, M.; Nakajima, H.: 1978 Japanese Spring Conf. for Tech. of Plasticity, (1978), 115.
- 14) Kato, K.; Saito, Y.; Ayata, N.; Nakagawa, Y.; Shiina, H.: 28th Japanese Joint Conf. for Tech. of Plasticity, (1977), 130.
- 15) Saito, Y.; Ayata, N.; Kato, K.: 1978 Japanese Spring Conf. for Tech. of Plasticity, (1978), 225.
- 16) Pawelski, O.; Piber, V.: Stahl u. Eisen 100-17(1980), S. 937.
- 17) Nagata, S.; Kawaharada, M.; Nakajima, H.; Kamiyama, F.: 97th ISIJ Meeting, (1979), S303.

- 18) Nagata, S.; Kawaharada, M.; Nakajima, H.; Kamiyama, F.: 98th ISIJ Meeting, (1979), S832.
- 19) Watanabe, K.; Tokita, H.; Nakajima, H.: 93rd ISIJ Meeting, (1977), S213.
- 20) Watanabe, K.; Tokita, H.; Nakajima, H.: 96th ISIJ Meeting, (1978), S697.
- 21) Nagata, S.; Kawaharada, M.; Nakajima, H.; Kamiyama, F.: 98th ISIJ Meeting, (1979), S833.
- 22) Suzuki, K.; Okamoto, R.; Harii, T.; Imamura, Y.; Sugita, K.: 1980 Japanese Spring Conf. for Tech. of Plasticity, (1980), 109.
- 23) Hino, H.; Osono, R.; Tsukamoto, K.; Morimoto, K.; Masumoto, M.: 1981 Japanese Spring Conf. for Tech. of Plasticity, (1981), 105.
- 24) Tanaka, A.; Miyashita, M.; Tanabe, N.; Sadamasu, T.: 1981 Japanese Spring Conf. for Tech. of Plasticity, (1981), 101.
- 25) Tanaka, A.; Miyashita, M.; Ishimatsu, M.; Mori, T.: 1981 Japanese Spring Conf. for Tech. of Plasticity, (1981), 102.
- 26) Tanaka, A.; Miyashita, M.; Wada, T.; Tanabe, N.: 1981 Japanese Spring Conf. for Tech. of Plasticity, (1981), 103.
- 27) Tanaka, A.; Miyashita, M.; Abe, K.; Miyamoto, T.: 1981 Japanese Spring Conf. for Tech. of Plasticity, (1981), 104.
- 28) Hamauzu, S.; Nakajima, H.; Amemura, A.; Chino, S.: 101st ISIJ Meeting, (1981), S346.
- 29) Hamauzu, S.; Tokita, H.; Nakajima, H.; Okamoto, R.; Tajima, K.: 32nd Japanese Joint Conf. for Tech. of Plasticity, (1981), 117.
- 30) Hamauzu, S.; Tokita, H.; Nakajima, H.; Okamoto, R.; Tajima, K.: 1982 Japanese Spring Conf. for Tech. of Plasticity, (1982), 129.
- 31) Hamauzu, S.; Nakajima, H.; Okamoto, R.; Tokita, H.; Tajima, K.: 33rd Japanese Joint Conf. for Tech. of Plasticity, (1982), 104.
- 32) Ibata, O.; Kokubo, I.; Hirano, H.: 28th Japanese Joint Conf. for Tech. of Plasticity, (1977), 135.
- 33) Ibata, O.; Ueda, N.; Kokubo, I.; Hirano, H.: 1979 Japanese Spring Conf. for Tech. of Plasticity, (1979), 331.

- 34) Hamauzu, S.; Ishii, K.; Kawaharada, M.: 31st Japanese Joint Conf. for Tech. of Plasticity, (1980), 323.
- 35) Kinoshita, K.; Tanda, O.; Hamauzu, S.; Ishii, K.: 32nd Japanese Joint Conf. for Tech. of Plasticity, (1981), 116.
- 36) Tarui, M.; Seki, T.; Tasoe, N.: 1980 Japanese Spring Conf. for Tech. of Plasticity, (1980), 111.
- 37) Machidome, M.; Naoi, T.; Nishide, T.; Hamada, K.; Ueki, S.; Miyake, H.: 1980 Japanese Spring Conf. for Tech. of Plasticity, (1980), 112.
- 38) Tokita, H.; Watanabe, K.; Nakajima, H.; Kikuma, T.: 101st ISIJ Meeting, (1981), S344.
- 39) Hiramatsu, T.; Oki, M.: 102nd ISIJ Meeting, (1981), S1031.
- 40) Nagata, S.; Kawaharada, M.; Nakajima, H.; Kamiyama, F.: 99th ISIJ Meeting, (1980), S292.
- 41) Niwa, F.; Matsuda, M.; Ono, T.; Matoba, T.; Adaka, M.; Nohara, Y.: 104th ISIJ Meeting, (1982), S1121.
- 42) Kimura, H.; Abe, H.; Hadano, S.; Yanai, H.; Sonoda, T.; Amiya, H.: 104th ISIJ Meeting, (1982), S1126.
- 43) Tokita, H.; Watanabe, K.; Nakajima, H.; Kikuma, T.: 100th ISIJ Meeting, (1980), S970.
- 44) Ibata, O.; Kawatani, Y.; Kokubo, I.; Hirano, H.: 101st ISIJ Meeting, (1981), S345.
- 45) Matoba, T.; Adaka, M.; Niwa, F.; Matsuda, M.; Nohara, Y.; Iwasaki, I.: 103rd ISIJ Meeting, (1982), S358.
- 46) Yamaguchi, M.; Misaka, K.; Kono, T.; Shibahara, T.; Nunokawa, T.; Koriki, M.: 31st Japanese Joint Conf. for Tech. of Plasticity, (1980), 331.
- 47) Hamauzu, S.; Ishii, K.; Nakajima, H.; Kawaharada, M.; Yamamoto, S.: 1981 Japanese Spring Conf. for Tech. of Plasticity, (1981), 107.
- 48) Takuda, H.; Kokado, J.; Hatta, N.; Mori, K.: 32nd Japanese Joint Conf. for Tech. of Plasticity, (1981), 118.
- 49) Takuda, H.; Kokado, J.; Hatta, N.; Mori, K.: 32nd Japanese Joint Conf. for Tech. of Plasticity, (1981), 119.
- 50) Kokado, J.; Hatta, N.; Takuda, H.: 102nd ISIJ Meeting, (1981), S1032.

- 51) Kokado, J.; Hatta, N.; Takuda, H.: 1982 Japanese Spring Conf. for Tech. of Plasticity, (1982), 130.
- 52) Kokado, J.; Takuda, H.; Kawanami, T.; Watanabe, K.: 83rd Symposium of Japan Soc. Tech. Plasticity. (1983), S.13.
- 53) Kokado, J.; Hatta, N.; Takuda, H.: 105th ISIJ Meeting, (1983), S349.
- 54) Kokado, J.; Hatta, N.; Takuda, H.: 105th ISIJ Meeting, (1983), S464.
- 55) Kokado, J.; Hatta, N.; Takuda, H.: 106th ISIJ Meeting, (1983), A221.
- 56) Kokado, J.; Hatta, N.; Takuda, H.: Trans. ISIJ, 23-12 (1983).
- 57) Takuda, H.; Mori, K.; Hatta, N.; Kokado, J.: J. Japan Soc. Tech. Plasticity, 23-262(1982), S.1103.
- 58) Takuda, H.; Mori, K.; Hatta, N.; Kokado, J.: J. Japan Soc. Tech. Plasticity, 24-264(1983), S.39.
- 59) Kokado, J.; Hatta, N.; Takuda, H.: J. Japan Soc. Tech. Plasticity, 24-268(1983), S.456.
- 60) Kokado, J.; Hatta, N.; Takuda, H.; Kawanami, T.; Watanabe, K.; Ichikawa, S.: J. Japan Soc. Tech. Plasticity, 24-273 (1983), S.1047.
- 61) Kokado, J.; Hatta, N.; Takuda, H.: J. Japan Soc. Tech. Plasticity, 24-274(1983), S.1158.
- 62) Kokado, J.; Hatta, N.; Takuda, H.: Archiv für das Eisenhüttenwesen, 54-12(1983), S.491.
- 63) Kokado, J.; Hatta, N.; Takuda, H.; Li, H.; Zhang, M.: J. Japan Soc. Tech. Plasticity, 25-277(1984), S.123.
- 64) Mori, K.; Shima, S.; Osakada, K.: Bull. JSME, 23-178 (1980), S.516, S.523.
- 65) Mori, K.; Shima, S.; Osakada, K.: J. Japan Soc. Tech. Plasticity, 21-234(1980), S.593.
- 66) Shima, S.; Oyane, M.: Int. J. Mech. Sci., 18(1976), S.285.
- 67) Hill, R.: J. Mech. Phys. Solids 5-1(1956), S.66.
- 68) Tomita, Y.; Sowerby, R.: Int. J. Mech. Sci., 20-6(1978), S.361.
- 69) Mori, K.; Osakada, K.: J. Japan Soc. Tech. Plasticity, 23-260(1982), S.897.

- 70) Mori, K.; Osakada, K.: Numerical Method in Industrial Forming Process, (1982), S.747.
- 71) Shida, S.: J. Japan Soc. Tech. Plasticity, 10-103(1969), S.610.
- 72) Chijiwa, K.; Hatamura, Y.; Hasegawa, N.: J. ISIJ Tetsu to Hagané, 66-5(1980), S.496.

L E B E N S L A U F

Persönliches: Hirohiko Takuda,
geboren am 21.4.1955 in Osaka Japan als Sohn
von damals Angestellter Jihei Kitani und
seiner Ehefrau Tokiko Kitani, geborene Takuda;
verheiratet seit 1981 mit Hitomi Takuda,
geborene Maeda; ein Sohn

Schulbildung: Volksschule, Mittelschule und Höhere Schule
in Osaka

Studium: März 1978 Abschluß des Studiums an der natur-
wissenschaftlichen Fakultät der Universität
Kyoto als Diplom-Naturwissenschaftler;
März 1980 Abschluß des Studiums am technischen
Forschungskurs der Universität Kyoto als
Master-Ingenieur

Tätigkeit: Seit 1980 Assistent am Institut für Bergbau-
und Hüttenmaschinen der Universität Kyoto

