

# **BAM-BERICHT Nr. 18**

DER BUNDESANSTALT FÜR  
MATERIALPRÜFUNG (BAM)

BERLIN

**Das Sprödbruchverhalten des Baustahles  
R St 37-2 N in geschweißten Konstruktionen,  
dargestellt mit Hilfe der Methode des  
Temperaturvergleiches**

von Dr.-Ing. Werner Struck



Herausgegeben von der

Bundesanstalt für Materialprüfung (BAM)

1 Berlin 45, Unter den Eichen 87



(0311) 8104-1



01-83 261 bamb d

30 Seiten

9 Bilder

2 Tabellen

70 Seiten Anlagen

Von dem Fachbereich Maschinenbau  
der Technischen Hochschule Darmstadt  
im Jahre 1972 genehmigte Dissertation

**BAM**  
**BERLIN**

<b>1. Einleitung: Zur Tragfähigkeitsbeurteilung von Bauteilen aus Stahl</b>	<b>1</b>
<b>2. Allgemeine Überlegungen</b>	<b>3</b>
2.1 Zum Verformungs- und Bruchverhalten des normalfesten Baustahles im Bauteil	3
2.2 Methoden zur Beurteilung des Sprödbruchverhaltens von Stahl im Bauteil	5
2.3 Zur Methode der Bruchmechanik	6
2.4 Zur Methode des Temperaturvergleiches	7
<b>3. Die Anwendung der Methode des Temperaturvergleiches auf geschweißte Bauteile aus R St 37-2 N</b>	<b>10</b>
3.1 Zweck der Untersuchungen	10
3.2 Zur Auswahl der Störstellen und Herstellung der Proben	10
3.3 Versuchsmaterial	11
3.4 Zusammenfassende Auswertung der Ergebnisse	13
3.5 Zum Versuch der Auswertung anderer veröffentlichter Versuchsergebnisse	16
3.6 Schlußfolgerungen	17
3.7 Laufende und geplante Versuche	17
<b>4. Bemerkenswerte Beobachtungen bei den durchgeführten Untersuchungen und Hinweise zu ihren Deutungen</b>	<b>19</b>
4.1 Bruchausgang in der Schweißnaht	19
4.2 Doppelbrüche	19
4.3 Frühe Anrisse	20
4.4 Unterschiedliches grundsätzliches Verhalten der Störstellen Kn und S zu den Störstellen LF und L St	21
<b>5. Proben, Versuchseinrichtung und Versuchsdurchführung</b>	<b>22</b>
5.1 Einzelheiten zur Probenherstellung und Zuordnung der Proben für die Werkstoffkontrollversuche	22
5.2 Versuchseinrichtung und Versuchsdurchführung	22
<b>6. Versuchsergebnisse</b>	<b>24</b>
6.1 Tabellarische Zusammenfassung der Versuchsergebnisse, Bilder der Bruchflächen und Rißlinien	24
6.2 Zur Abschätzung der Bruch-Nennspannung bei verformungslosem Bruch	24
<b>7. Zur Beurteilung der Sprödbruchgefahr geschweißter Stahlkonstruktionen mit Hilfe des Temperaturvergleiches</b>	<b>26</b>
7.1 Allgemeines zur Anwendung der Untersuchungsergebnisse	26
7.2 Erläuterungen an einem Beispiel	27
7.3 Hinweis auf die Zielrichtung zukünftiger Arbeiten	27
Literaturangaben	29

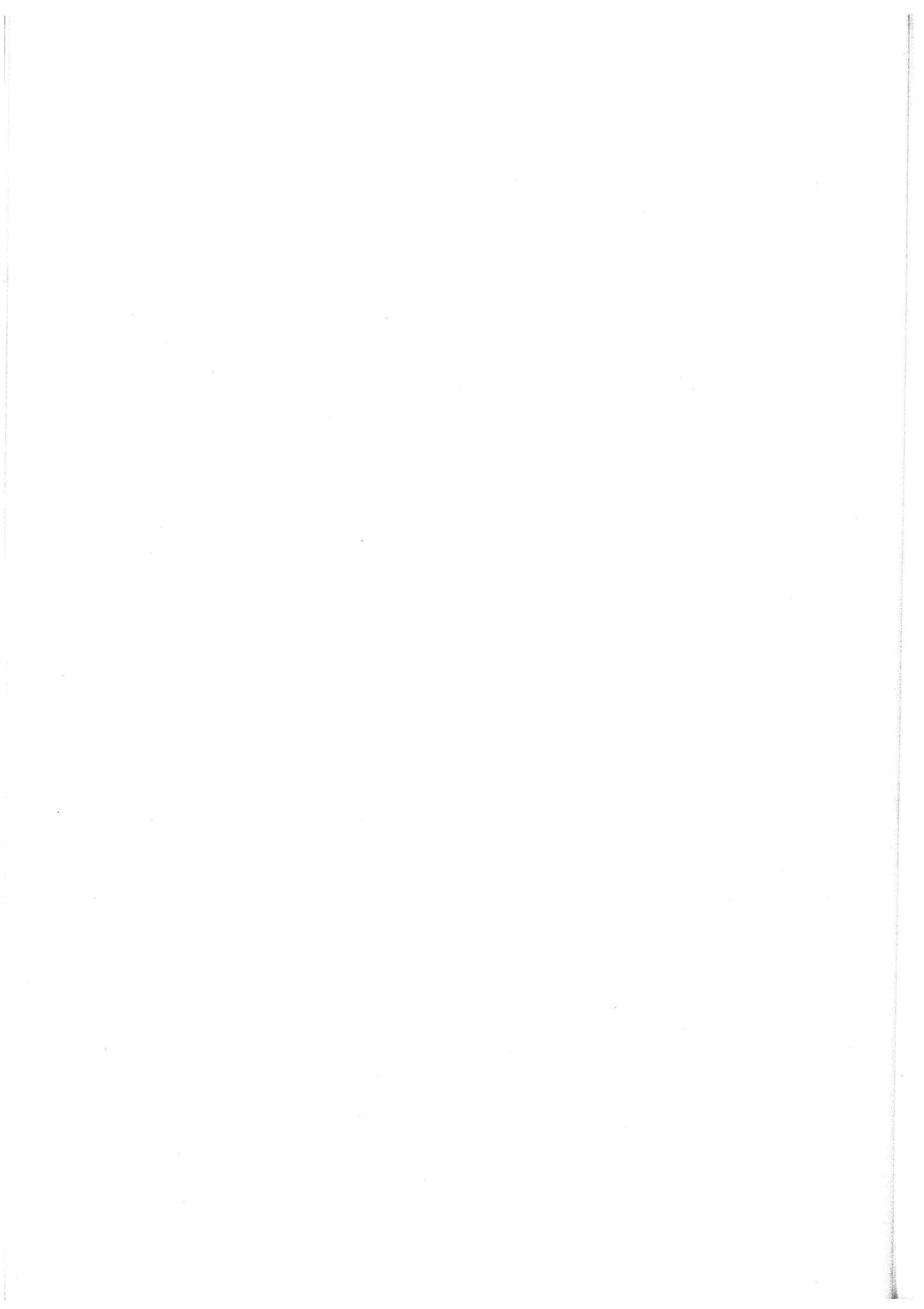
## Verzeichnis der Bilder und Tabellen

Bild Nr.		Seite
1	Abmessungen der bauteilähnlichen Proben	11
2	Häufigkeit der Übergangstemperaturen der ISO-Spitzkerbproben des für die bauteilähnlichen Proben der Versuchsreihe „Einfluß der konstruktiven Ausbildung“ verwendeten Materials	12
3	Übergangstemperaturen der ISO-Spitzkerbproben in Abhängigkeit vom mittleren Korndurchmesser	13
4	Örtliche bleibende Dehnung und Bruch-Nennspannung Störstellenarten: „Knotenblech (Kn)“ „Lasche mit Flanken- und Stirnkehlnaht (LSt)“ „Stumpfstoß (S)“ „Nocken, quergeschweißt (N)“ Walzrichtung : Parallel zur Probenlängsrichtung	13
5	Örtliche bleibende Verformungen und Bruch-Nennspannung Störstellenart : „Lasche nur mit Flankenkehlnaht (LF)“ Einfluß verschiedener ISO-Spitzkerbproben-Übergangstemperaturen Walzrichtung : Parallel zur Probenlängsrichtung	14
6	Örtliche bleibende Dehnungen in Abhängigkeit von der Temperaturdifferenz Walzrichtung : Parallel zur Probenlängsrichtung	14
7	Örtliche Bruch-Nennspannungen in Abhängigkeit von der örtlichen bleibenden Dehnung Walzrichtung : Parallel zur Probenlängsrichtung	15
8	Örtliche bleibende Verformungen und Bruch-Nennspannungen Störstellenarten: „Lasche nur mit Flankenkehlnaht (LF)“ „Knotenblech (Kn)“ Walzrichtung : Senkrecht zur Probenlängsrichtung	16
9	Vergleich der Abhängigkeiten der örtlichen bleibenden Dehnungen von der Temperaturdifferenz bei verschiedener Zuordnung Walzrichtung zur Probenlängsrichtung	16
Tabelle Nr.		
1	Stoffkennwerte aus dem Zugversuch nach DIN 50146, mittlerer Korndurchmesser nach dem Linienschnittverfahren und Werte der chemischen Analyse des Stahles R St 37 - 2 N nach DIN 17000, verwendet bei der Versuchsreihe „Einfluß der konstruktiven Ausbildung“	12
2	Temperaturdifferenz zur Bestimmung der kritischen Temperaturwerte	18

## Verzeichnis der Anlagen

Anlage Nr.		Seite
1 und 2	Einzelheiten zum Schweißen der Störstellen	31
3	Lage der Proben im Blech (schematisch)	32
4	800-Mp-Zugeinrichtung für Stahlflachproben mit Kühlanlage	32
5	800-Mp-Zugeinrichtung für Stahlflachproben mit Kühlanlage, Längsschnitte	33
6	800-Mp-Zugeinrichtung für Stahlflachproben mit Kühlanlage, Querschnitt	33
7	Beispiele für die Temperaturverteilung über die Versuchslänge	33
8	Kompensations-Punktschreiber, Meßbrücke und Vielstellen-Meßanlage zum Messen und Registrieren der Temperaturen, der Gesamtkraft und der Dehnungen während des Versuches	34
9	Beispiele für die Verteilung der bleibenden Dehnung bei $\Delta\vartheta_V = -20$ grad	34
10 a bzw. 10 b	Zahlenwerte der Ergebnisse der Versuche an bauteilähnlichen Proben und der Werkstoffkontrollversuche, Walzrichtung parallel bzw. senkrecht zur Probenlängsrichtung	35/36
11 bis 28	Bruchbilder der Störstelle „Lasche nur mit Flankenkehlnaht“ Walzrichtung: Parallel zur Probenlängsrichtung	37/50
32 bis 37	Bruchbilder der Störstelle „Lasche nur mit Flankenkehlnaht“ dreifache Störstellenlänge Walzrichtung: Parallel zur Probenlängsrichtung	51/55
38 bis 46	Bruchbilder der Störstelle „Knotenblech“ Walzrichtung: Parallel zur Probenlängsrichtung	56/65
47 bis 53	Bruchbilder der Störstelle „Knotenblech“ dreifache Störstellenlänge Walzrichtung: Parallel zur Probenlängsrichtung	66/72
54 bis 58	Bruchbilder der Störstelle „Lasche mit Flanken- und Stirnkehlnaht“ Walzrichtung: Parallel zur Probenlängsrichtung	73/76
59	Bruchbild der Störstelle „Nocken, quergeschweißt“ Walzrichtung: Parallel zur Probenlängsrichtung	77
60 bis 65	Bruchbilder der Störstelle „Stumpfstoß“ Walzrichtung: Parallel zur Probenlängsrichtung	78/80
66 bis 77	Bruchbilder der Störstelle „Lasche nur mit Flankenkehlnaht“ Walzrichtung: Senkrecht zur Probenlängsrichtung	81/92
78 bis 83	Bruchbilder der Störstelle „Knotenblech“ Walzrichtung: Senkrecht zur Probenlängsrichtung	93/99

Die Anlagen Nr. 18, 20, 22, 24, 25, 29 bis 31, 33, 55, 61 bis 63 und 72 sind hier nicht beigefügt, s. Abschn. 6.1





Die Arbeit entstand im Rahmen meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter in der

Bundesanstalt für Materialprüfung (BAM), Berlin,

als Teil der Forschungsaufgabe

„Die Wirkung der Einflußfaktoren beim Spröbruch im Stahl“

verantwortliche Leiter

Prof. Dr.-Ing. Karl Rühl, Vizepräsident in der BAM a.D.  
Prof. Dr.-Ing. Erich Martin, Leitender Direktor in der BAM a.D.

Die Versuche wurden durchgeführt von der Fachgruppe

## 2.2 Tragfähigkeit der Baukonstruktionen

unter Mitarbeit der Fachgruppen

- 1.1 Metallkunde und Metalltechnologie
- 1.2 Mechanisches Verhalten von Metallen und Konstruktionen
- 1.3 Anorganisch-chemische Untersuchungen
- 6.4 Fügetechnik

Ich freue mich, an dieser Stelle danken zu können

Herrn Professor Wiegand

für seine Hinweise und Ratschläge,

Herrn Professor Rühl, dem Initiator der Forschungsaufgabe

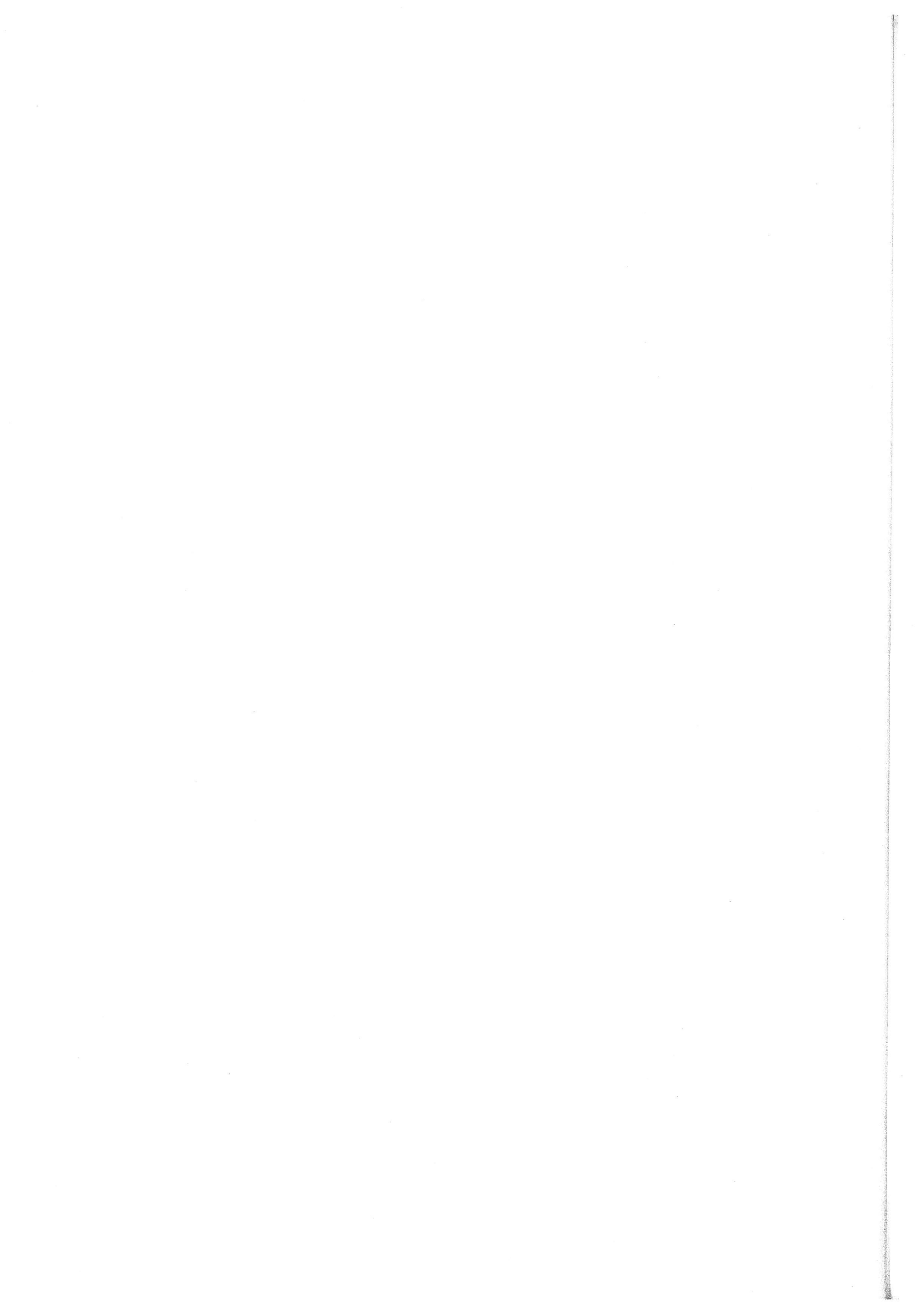
für seine Anregungen und Anleitungen,

Herrn Professor Pfender und Herrn Professor Martin für ihre Unterstützung und ihr meiner Arbeit entgegengebrachtes Interesse sowie

allen Kollegen in den an der Forschungsaufgabe beteiligten Fachgruppen für ihre Bereitschaft zu Gesprächen, die interessante Hinweise lieferten, und für ihre Unterstützung bei der Probenherstellung und den Werkstoffkontrollversuchen.

Mein besonderer Dank gilt meinen Mitarbeitern im Laboratorium 2.24 „Grundlagen und Sonderfragen“, von denen ich stellvertretend für alle nur Herrn J. Riedel nennen kann. Ohne ihre unermüdliche Hilfe wäre die Durchführung der arbeits- und zeitaufwendigen Versuche nicht möglich gewesen.

Der Deutschen Forschungsgemeinschaft sei für die Beteiligung bei der Finanzierung der Untersuchungen gedankt.



Einleitend wird auf die Problematik hingewiesen, die sich aus der Diskrepanz zwischen den notwendigen vereinfachenden Annahmen bei Tragfähigkeitsbeurteilungen von Bauteilen aus Stahl und den Gegebenheiten der Wirklichkeit besonders dann ergibt, wenn das plastische Verformungsvermögen des Materials im Bauteil vermindert ist.

Anschließend wird das Verformungs- und Bruchverhalten des normalfesten Baustahls im Bauteil – unter bewußtem Verzicht auf metallphysikalische Erklärungen – phänomenologisch kurz beschrieben.

Dann werden die Methoden „Bruchmechanik“ und „Temperaturvergleich“, die zur Beurteilung des Sprödbruchverhaltens von Stahl im Bauteil herangezogen werden können, erörtert. Dabei liegt der Schwerpunkt auf einer anschaulichen Darstellung der zugrunde liegenden Gedankengänge, einschränkenden Annahmen und Voraussetzungen sowie der Schwierigkeiten bei der Ermittlung von Zahlenwerten. Die Möglichkeiten der Anwendung der einen oder anderen Methode werden abgewogen.

Die Möglichkeiten der Anwendung der Methode „Bruchmechanik“ auf Schweißkonstruktionen sind in voraussehbarer Zeit noch stark begrenzt. Sie beschränken sich auf die Störstelle „vorhandener Riß in sonst gleichmäßigem Bauteil“. Deshalb werden als Unterlage für die Methode des Temperaturvergleiches die zu Versprödungserscheinungen führenden Temperaturen von normalfestem Baustahl in technischen (praxisnahen) Störstellen und ihr Zusammenhang mit der Übergangstemperatur einer Bezugsstörstelle, hier der ISO-Spitzkerbprobe, ermittelt am unbeanspruchten Material nahe der technischen Störstelle, untersucht. Hierzu sind bisher für 73 bauteilähnliche Proben aus Baustahl R St 37 – 2 N nach DIN 17100 mit Blechdicken von 30 mm und 5 verschiedene Arten von Störstellen (vgl. Bild 1 S. 11) die bleibenden Verformungen und die Bruch-Nennspannungen bei Temperaturen von Raumtemperatur bis - 155°C bestimmt worden. Die Walzrichtung der Bleche war dabei parallel und außerdem z.T. auch senkrecht der Hauptbeanspruchungsrichtung zugeordnet. Bei zwei Störstellenarten wurden auch Kontrollversuche mit dreifacher Störstellenlänge durchgeführt.

Die Ergebnisse zeigen eine eindeutige Abhängigkeit der z.T. bis zu verschwindenden Werten abfallenden bleibenden Verformungen von der Versuchstemperatur einerseits sowie der Art der Störstelle andererseits. Dabei ergaben sich vermin-

derte Bruch-Nennspannungen, die teilweise unterhalb der Fließgrenze bei Raumtemperatur lagen. Ein geometrischer Einfluß der Störstellenlänge ist nicht ersichtlich. (Bilder 4, 5 und 8, S. 13, 14 und 16).

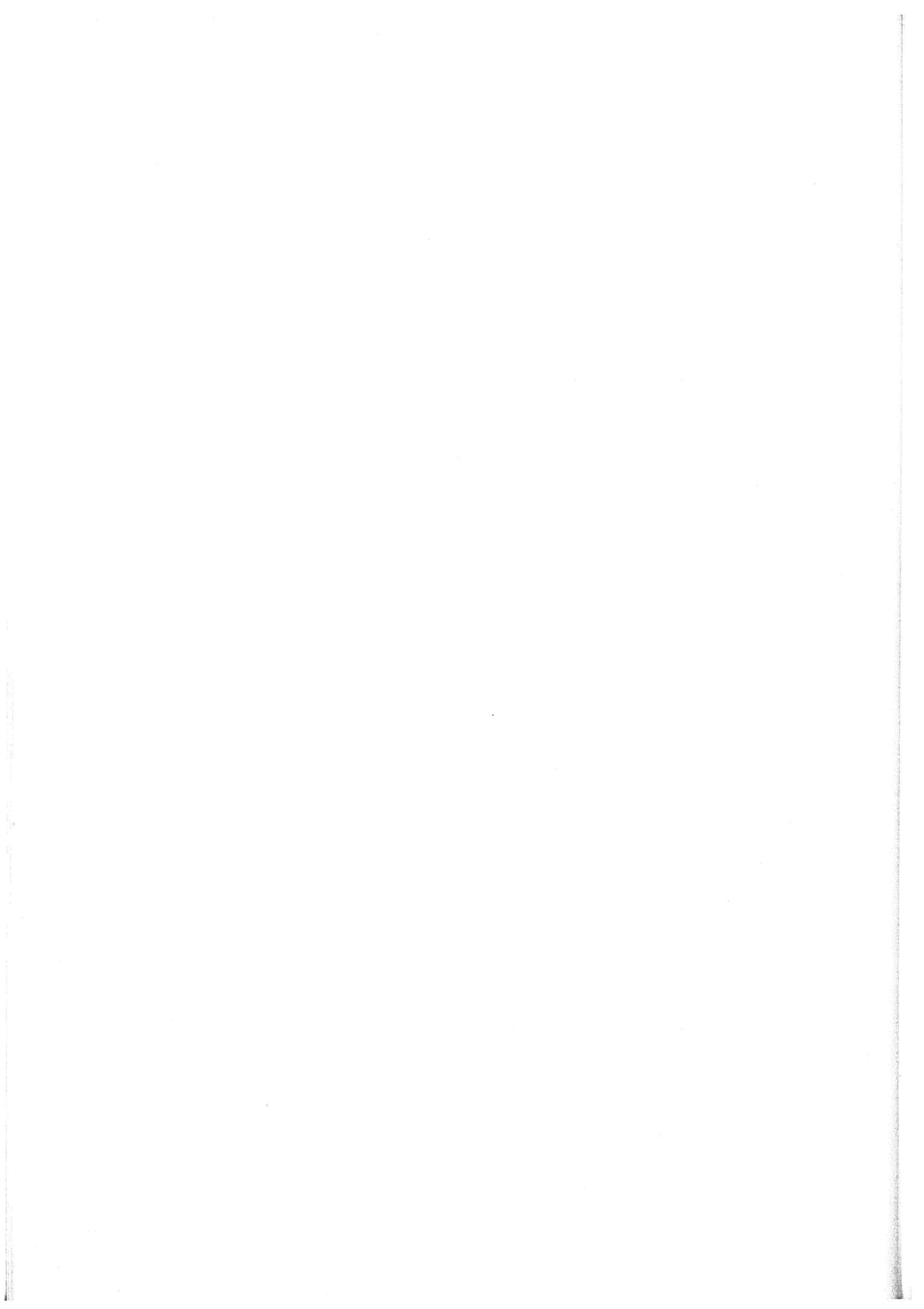
Das Versuchsmaterial mit praktisch gleichen mechanischen und metallphysikalischen Kennwerten sowie chemischen Analysenwerten (Tabelle 1 S. 12), wies unterschiedliche ISO-Spitzkerb-Übergangstemperaturen von ca. -40°C bis - 5°C auf (Bild 2 S. 12). Als Hauptursache kann neben dem Einfluß des Korndurchmessers nur eine unterschiedliche Vorgeschichte vermutet werden (Bild 3 S. 13).

Eine Bestätigung für die Anwendbarkeit der Methode des Temperaturvergleiches ergab sich zusätzlich zu den Ergebnissen aus anderen Versuchen dadurch, daß zwei Gruppen des Versuchsmaterials mit unterschiedlichen ISO-Spitzkerb-Übergangstemperaturen den nahezu gleichen Unterschied bei den sprödbruchwirksamen Temperaturen in einer technischen Störstelle aufwiesen (Bild 5 S. 14).

Der Einfluß der untersuchten Störstellenarten auf die festgestellten Temperaturdifferenzen zwischen den Werten, die bei den technischen Störstellen und den ISO-Spitzkerbproben auftraten, erstreckt sich auf einen Bereich von 100 grd (Bild 6 S. 14). Ein Einfluß der Zuordnung der Walzrichtung zur Hauptbeanspruchungsrichtung konnte nicht festgestellt werden (Bild 9 S. 16). Unter Einrechnung eines die Streuungen berücksichtigenden Sicherheitsabstandes von 6 grd bis 16 grd ergaben sich für den untersuchten Stahl die in Abschnitt 3.6 (S. 18) aufgeführten kritischen Temperaturwerte.

Im Rahmen einer folgenden Reihe einzelner Beobachtungen über Bruchverhalten und Rißbildung wird u.a. auf die Wirkung früher Anrisse hingewiesen, die hinsichtlich des Sprödbruchverhaltens des Bauteils günstig sein kann (Abschnitt 4.3 S. 20 ff, auch Bilder 5 und 8 S. 14 und 16). Details der Versuchsdurchführung und Versuchsauswertung sowie eine tabellarische Zusammenstellung der einzelnen Versuchsergebnisse einschließlich ihrer Zuordnung und die Bruchbilder schließen sich an.

Den Abschluß bildet ein Abschnitt über die Anwendung der Untersuchungsergebnisse bei der Beurteilung der Sprödbruchgefahr geschweißter Stahlkonstruktionen mit einem Hinweis auf die Zielrichtung zukünftiger Arbeiten.



## 1. Einleitung: Zur Tragfähigkeitsbeurteilung von Bauteilen aus Stahl

Bauteile von Geräten, Maschinen, Fahrzeugen und Gebäuden sollen nicht nur entsprechend ihren Verwendungszwecken funktionieren, sondern es soll auch die Gewähr dafür gegeben sein, daß sie nicht vorzeitig und auch noch ohne vorhergehendes warnendes Verhalten zerbrechen.

Deshalb wird bei der Konstruktion solcher Teile versucht, die durch die voraussehbaren äußeren Belastungen, wie Kräfte und Temperaturänderungen, unter Berücksichtigung der Umweltbedingungen, wie Temperaturniveau und Atmosphäre, im Material des Bauteils entstehenden inneren Beanspruchungen, also die Spannungen und Zwangsverformungen, zu ermitteln.

Die so ermittelten Werte dieser Beanspruchungen werden dann mit denjenigen verglichen, von denen man annimmt, daß ihre Größen vom gewählten Werkstoff im Bauteil unter den vorausgesetzten Bedingungen maximal ertragen werden.

Damit dieses Verfahren auch wirklich eine Gewähr gegen vorzeitigen Bruch des Bauteils geben kann, müssen einige Voraussetzungen erfüllt sein.

- 1) Die äußeren Belastungen müssen in Art und Größe richtig vorausgesehen werden können und auch vorausgesehen werden.
- 2) Die Verfahren zur Zuordnung der Beanspruchungen des Materials im Bauteil zu den äußeren Belastungen müssen die maximalen Beanspruchungen nach Ort, Art, Größe und gegenseitiger Beeinflussung in allen Einzelheiten und mit vertretbarem wirtschaftlichen und zeitlichen Aufwand erfassen.
- 3) Die Grenzwerte der Beanspruchungskombinationen, die vom gewählten Werkstoff unter den Bedingungen seiner im Bauteil gegebenen Lage und den Umweltbedingungen noch ertragen werden, müssen aus Materialuntersuchungen bestimmbar sein und auch bestimmt werden.

Die ideale Erfüllung dieser Voraussetzungen ist in den wenigsten Fällen möglich. Der konstruierende Ingenieur hilft sich, indem er meist für die äußere Belastung auf der sicheren Seite liegende vereinfachende Annahmen macht. Auch bei

der Ermittlung der Beanspruchung des Materials im Bauteil infolge der äußeren Belastung und bei der Festlegung der Grenzwerte der Beanspruchungskombinationen, die vom Material im Bauteil noch ertragen werden können, macht er vereinfachende Annahmen. Die Zulässigkeit dieser Annahmen muß in Versuchen überprüft worden sein.

Bei der Aufstellung solcher vereinfachender Annahmen kommt ihm die Eigenschaft mancher Werkstoffe zu Hilfe, von einer bestimmten Beanspruchungshöhe an sich auch ohne nennenswerte Vergrößerung der Beanspruchung stark zu verformen, wie es beim normalfesten Baustahl mit ausgeprägter Streckgrenze der Fall ist. Dadurch können Spannungsspitzen im eingebauten Material durch örtliches Fließen ausgeglichen, ja u.U. sogar in ihrer absoluten Größe verringert werden (Eigenspannungsspitzen nach Entlastung). Dies geschieht ohne Beeinträchtigung der Tragfähigkeit und meist auch ohne Beeinträchtigung der Funktionsfähigkeit eines Bauteils, so daß eine Beurteilung dieser beiden möglich ist, auch ohne die nicht vermeidbaren Spannungsspitzen im Detail genau zu ermitteln.

Verliert jedoch das Material im Bauteil aus bestimmten Gründen sein plastisches Verformungsvermögen, so kann an einer Stelle mit Spannungsspitzen die Beanspruchung des Materials die ertragbaren Grenzwerte erreichen und dort einen Bruch einleiten, bevor die äußere Belastung den einer Beanspruchung ohne Spannungsspitzen entsprechenden Grenzwert erreicht. Es kommt dann also zu den sogenannten spröden Brüchen bei geringen Bruch-Nennspannungen und mit geringer Arbeitsaufnahme des Bauteils bis zum Bruch. Der Gesamtquerschnitt des Bauteils wird dabei zerstört, wenn außerdem eine ausreichende elastische Energie in der Umgebung des gefährdeten Querschnittes gespeichert ist.

Sonst kommt der an einer Stelle durch Spröbruch eingeleitete Riß an einer anderen Stelle zum Stillstand. Das Bauteil trägt dann die äußere Belastung durch Umlagerung der Beanspruchung. Je nach den Umständen kann dann danach die Belastung auch noch erhöht werden.

Gefährlich in diesem Sinne ist für ein Bauteil also das Zusammentreffen von in der Tragfähigkeitsbeurteilung nicht

berücksichtigten, also außerplanmäßigen Spannungsspitzen mit das plastische Verformungsvermögen verringernden Umständen an derselben Stelle des Bauteils.

Ursachen solcher außerplanmäßigen Spannungsspitzen können sein:

- 1) Eigenspannungen infolge Walzen, Schweißen und anderer Temperaturbeanspruchungen,
- 2) Änderung der Querschnittsform des Bauteils infolge Aussparungen – auch ungewollter Art wie Risse –, Anschlußelemente und Versteifungen – auch ungewollter Art wie Einschlüsse im Material –,
- 3) Besondere oder nicht voraussehbare Belastungen wie stoßartige Beanspruchung, konzentrierte Lasten oder nicht planmäßige Biegung.

Ursachen für die Verringerung des plastischen Verformungsvermögens eines Materials im Bauteil können sein:

- 1) Tiefe Temperaturen
- 2) hohe Beanspruchungsgeschwindigkeiten
- 3) räumliche Spannungszustände

Diejenigen Stellen in einem Bauteil, an denen das ungehinderte Entstehen plastischer Verformungen gestört werden kann, die also potentielle Trennbruch-Ausgangsstellen für solche Sprödbrüche darstellen, werden im folgenden als *Störstellen* bezeichnet. Störstellen in diesem Sinne sind also nicht nur „optisch“ bemerkbare Störungen, wie Unterbrechungen oder Materialfehler. Auch „optisch“ nicht besonders zu kennzeichnende Stellen, an denen, durch welche Umstände auch immer, das plastische Verformungsvermögen eingeschränkt ist, sind grundsätzlich als solche Störstellen aufzufassen. Dieses trifft z.B. auch zu, wenn im Innern eines gleichmäßig ausgebildeten Bauteils aus fehlerfreiem Material infolge besonderer Belastungsbedingungen Bereiche mehrachsiger Spannungszustände mit hohem Räumlichkeitsgrad auftreten.

Bei der Beurteilung der Tragfähigkeit von Bauteilen aus Stahl sind also das Verformungs- und das Bruchverhalten des Materials an solchen Störstellen besonders zu beachten, wenn die Wahrscheinlichkeit für Sprödbrüche auf das erforderliche Minimum beschränkt werden soll.

### 2.1 Zum Verformungs- und Bruchverhalten des normalfesten Baustahles im Bauteil

Für den konstruierenden Ingenieur liegt der Werkstoff immer in einer bestimmten Erzeugnisform vor. Deshalb soll, wenn hier das Wort „Material“ benutzt wird, immer der Werkstoff in seiner Erzeugnisform gemeint sein, mit seinen Eigenschaften entsprechend den im jeweiligen Einzelfall wirksam gewordenen Herstellungsbedingungen.

In den Größenordnungen, die bei der Beurteilung der Tragfähigkeit eines Bauteiles berücksichtigt werden müssen, ist das Verformungsverhalten des Materials im Bauteil durch drei Bereiche phänomenologisch beschreibbar.

Im ersten Bereich verhält sich das Material im wesentlichen elastisch. Die Beziehungen zwischen den Beanspruchungen und Verformungen werden mit den Arbeitshypothesen der Elastizitätstheorie ausreichend erfaßt.

Im anschließenden zweiten Bereich nehmen die plastischen Verformungen stark zu, ohne daß eine nennenswerte Vergrößerung der Beanspruchung möglich ist. Das Material fließt. Sein Verhalten ist durch das einer inkompressiblen Flüssigkeit näherungsweise beschreibbar. Die Volumenänderung ist also Null, d.h. – unter Benutzung der auch bei großen Verformungen sinnvollen Definitionen für die bezogenen Längen-, Querschnitts- und Volumenänderungen  $\epsilon = \ln\left(\frac{l}{l_0}\right)$ ,  $\varphi = \ln\frac{A_0}{A}$  und  $\epsilon_v = \ln\frac{V}{V_0}$  –

$$\epsilon_v = \epsilon_x + \epsilon_y + \epsilon_z = 0.$$

Im Fließbereich ist die Dehnung in der dritten Richtung immer von denen in den beiden anderen Richtungen abhängig

$$\epsilon_x = -(\epsilon_y + \epsilon_z) = \varphi_{yz}.$$

Solange nur die Dehnung in einer Richtung sich ungehindert einstellen kann, ist eine Erhöhung der Beanspruchung in einer der anderen Richtungen nicht möglich, selbst wenn die Dehnung in der dritten Richtung behindert wird.

Für den Grenzwert zwischen dem ersten und dem zweiten

Bereich, also für den Fließbeginn, kann die Mehrachsigkeit einer Beanspruchung gut mittels der Hypothese von der konstanten Gestaltsänderungsenergie berücksichtigt werden. Die Vergleichsspannung zum Zustand mit einachsiger Beanspruchung ist also dann [1]

$$\sigma_v = \sigma_1 \sqrt{1 + a^2 + \beta^2 - a \cdot \beta - a \cdot \beta} = \sigma_1 \cdot [a; \beta]$$

mit  $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$  und  $a = \sigma_2/\sigma_1$   $\beta = \sigma_3/\sigma_1$

so daß Fließen beginnt, wenn

$$\sigma_v = \sigma_F \quad \text{d.h.} \quad \sigma_{1F} = \sigma_F / [a; \beta]$$

Wird nach Fließbeginn die Dehnung in den beiden Richtungen y und z, d.h. die Querschnittsänderung  $\varphi_{yz}$  behindert, ist eine Dehnung in der x-Richtung über die Summe ( $\epsilon_y + \epsilon_z$ ) der trotz Behinderung noch möglichen Dehnungen in der y- und der z-Richtung hinaus nur noch durch eine Spannungserhöhung möglich. Wegen des hydrostatischen Verhaltens des Materials in diesem Bereich bedeutet das eine Spannungserhöhung  $\Delta\sigma$  in allen Richtungen. Die Hauptspannungsdifferenzen ändern sich dadurch nicht. Das Material bleibt an dieser Stelle im Fließbereich. Für die x-Richtung bedeutet die Fließverformungsbehinderung in der y- und der z-Richtung eine Verfestigung. Mit zunehmender Verformung ist dann auch eine Beanspruchungserhöhung in dieser Richtung wieder möglich.

Behinderte Verformungen können nicht direkt gemessen werden, da sie nicht auftreten. Deswegen ist für das Material im Bauteil die Grenze zwischen dem zweiten und dritten Bereich nicht eindeutig auf einen Wert festlegbar. Dieser dritte Bereich ist ja dadurch gekennzeichnet, daß in ihm aus werkstoffphysikalischen Gründen Verfestigung auftritt [2]. In diesem Bereich ist also auch bei einachsiger Beanspruchung ohne Verformungsbehinderung in den beiden anderen Richtungen (einachsiger Spannungszustand) eine Zunahme der Verformung wieder mit einer Vergrößerung der Beanspruchung verbunden. Der Hauptanteil der Verformungen ist jedoch plastischer Natur. Dadurch bedingt liegt der Wert der maximal möglichen Belastung des Bauteils durch Erreichen der plastischen Instabilität vor dem eigentlichen

Bruch des Materials. Der Bruch tritt in diesem Falle erst auf im Bereich

$$d(\sigma \cdot A) = d\sigma \cdot A + dA \cdot \sigma < 0, \text{ d.h. } -\frac{dA}{A} \equiv d\varphi > \frac{d\sigma}{\sigma},$$

wenn also die Änderung der Querschnittsverminderung größer ist als die bezogene Spannungszunahme.

Der Bruch ist in solch einem Falle ein Gleitbruch, äußerlich gekennzeichnet durch seine zur Hauptbeanspruchungsrichtung schrägen Gleitbruchflächen. Die Mehrachsigkeit eines Beanspruchungszustandes wird bei diesem Bruchtyp durch die Hypothese, daß die auf dem beim Bruch vorhandenen Querschnitt bezogene maximale Schubspannung maßgebend ist (Schubspannungshypothese), gut berücksichtigt.

Andererseits kann das Material unter bestimmten Umständen auch durch Trennbruch zerstört werden. Dieser Bruchtyp ist dadurch gekennzeichnet, daß die Bruchfläche senkrecht zur Hauptbeanspruchungsrichtung liegt und daß der Mehrachsigkeit eines Beanspruchungszustandes am besten durch die Hauptspannungshypothese Rechnung getragen werden kann. Das Material zerreißt also, wenn die größte Hauptspannung, bezogen auf die verformten Querschnittsflächen, einen bestimmten Wert, die Trennfestigkeit, erreicht.

Ein Trennbruch wird bei dem hier betrachteten Material immer dann eingeleitet, wenn durch Verminderung der Verformungsfähigkeit Normalspannungen an einer Stelle auf den Wert der Trennfestigkeit ansteigen können. Dieses kann der Fall sein, wenn infolge eines mehrachsigen Spannungszustandes mit großem Räumlichkeitsgrad – also Differenz der Hauptspannungen klein gegenüber ihren absoluten Größen – im Augenblick des Fließbeginns der Wert  $\sigma_{1F}$  der Spannung in Hauptbeanspruchungsrichtung sich nur noch wenig vom Wert  $\sigma_T$  der Trennfestigkeit unterscheidet. Wird die örtliche plastische Verformung an der betrachteten Stelle dann behindert, z.B. dadurch, daß infolge großer Spannungsgradienten das nahegelegene Material stützend wirkt, so kann schon eine geringe Zwangsverformung durch die damit verbundene hydrostatische Spannungserhöhung die Spannung in Hauptbeanspruchungsrichtung auf den Wert der Trennfestigkeit treiben,

$$\sigma_1 = \sigma_{1F} + \Delta\sigma \rightarrow \sigma_T.$$

Ein Trennbruch wird eingeleitet, da die maximale Schubspannung

$$\max \tau = \frac{1}{2} (\sigma_1 - \sigma_3)$$

den Wert der Schubfestigkeit noch nicht erreicht hat.

Neben der Art des Spannungszustandes beeinflußt die Temperatur entscheidend das Verhalten des Materials im Bauteil. Die Werte für den Fließbeginn und die Trennfestigkeit werden größer mit abnehmender Temperatur. Der Anstieg der Fließspannung ist dabei progressiv. Das makroskopische Formänderungsvermögen, also die makroskopische Verformung bis zum Bruch wie z.B. die Einschnürung, nimmt da-

gegen ausgehend vom Zustand bei Raumtemperatur erst kaum merklich, dann aber sehr schnell innerhalb einer Temperaturspanne von bis ca. 50 grd auf sehr kleine Werte mit abnehmender Temperatur ab. Schon bei einem ganz gleichmäßig ausgebildeten Bauteil unter Belastung in nur einer Richtung (Zugversuch) tritt solch ein Übergangsbereich von verformungsreichen zu verformungsarmen Brüchen innerhalb einer begrenzten Temperaturspanne auf [3, 4]. Die Temperaturwerte dieses Übergangsbereiches und der Grenzwert, bis zu dem das Formänderungsvermögen absinkt, sind bei gleichem Material von dem jeweiligen Spannungszustand und bei gleichem Spannungszustand von dem jeweiligen Material abhängig.

Das Materialverhalten im Übergangsbereich ist dadurch deutbar, daß dem Auftreten eines makroskopischen Risses eine fortschreitende Werkstoffzerstörung im mikroskopischen Bereich vorausgeht. Über einer bestimmten Temperaturgrenze, die abhängig von der Art des Spannungszustandes ist, verformt sich das Material plastisch bis zum Gleitbruch, ohne daß mikroskopische Zerstörungen auftreten, die später zu einem makroskopischen Trennri führen würden. Unterhalb dieser Temperaturgrenze ist die Möglichkeit für den Beginn der mikroskopischen Zerstörung, aus der später der makroskopische Trennri entsteht, gegeben (Anfang des Übergangsbereiches). Die Vergrößerung einer mikroskopischen Fehlstelle (mikroskopischer Riß) infolge steigender örtlicher Beanspruchung kann je nach Temperatur und nach Art des örtlichen Spannungszustandes mehr oder weniger häufig durch mikroskopisch kleine örtliche plastische Verformungen aufgefangen werden, ehe sich diese Fehlstelle zu einem makroskopischen Trennri entwickelt. Je häufiger dieses Auffangen stattfindet, d.h. je höher die Temperatur im Übergangsbereich ist, desto größere makroskopische plastische Verformungen werden an der potentiellen Trennbruch-Ausgangsstelle bis zum Auftreten des Trennrisses gemessen.

Der dritte Einflußfaktor auf das plastische Verformungsvermögen ist die Beanspruchungsgeschwindigkeit. Zu beachten ist dabei, daß die örtliche Beanspruchungsgeschwindigkeit im Material nicht in jedem Stadium des Bauteils mit der aus der Belastung resultierenden übereinstimmt. Entsteht z.B. ein makroskopischer Riß, so ist für das Material in seiner Umgebung zwischenzeitlich eine große Beanspruchungsgeschwindigkeit vorhanden, auch wenn das Bauteil nur statisch belastet wird.

Eine Zunahme der Dehngeschwindigkeit bewirkt progressive Vergrößerung der Werte für den Fließbeginn [5, 6]. Die Werte für die Trennfestigkeit nehmen weniger stark zu. So kann allein schon durch Erhöhung der Beanspruchungsgeschwindigkeit die Gefahr des Auftretens eines verformungslosen Bruches vergrößert werden.

Beim ungerissenen Bauteil werden im Normalfall von der Belastung her gesehen im örtlich plastischen Bereich die Dehngeschwindigkeiten in der Größenordnung von  $10^0$  bis  $10^3$  %/min liegen. Für diese Dehngeschwindigkeiten unterscheiden sich die Streckgrenzen nur um 10 bis 20 %. Deshalb ist die Beanspruchungsgeschwindigkeit allein für den



Beginn eines makroskopischen Trennrisses meist nicht von entscheidender Bedeutung. Erst wenn man einen im Entstehen begriffenen Riß mit einem vorhandenen vergleicht, wird der Einfluß der örtlichen Beanspruchungsgeschwindigkeit an und vor der Rißspitze eine Rolle spielen.

Bei der Betrachtung des makroskopischen Verhaltens des Stahlmaterials im Bauteil ist also davon auszugehen:

- 1) Das Material hat die phänomenologische Eigenschaft, daß sein plastisches Verformungsvermögen bis zum Bruch in Abhängigkeit von der Temperatur, den örtlichen Spannungsverhältnissen und der örtlichen Beanspruchungsgeschwindigkeit begrenzt ist.
- 2) Der Widerstand des Materials an einer Stelle im Bauteil in einer Richtung gegenüber plastischen Verformungen ist abhängig vom jeweiligen örtlichen Spannungszustand und bei Betrachtung größerer Bereiche von Temperatur und Beanspruchungsgeschwindigkeit auch merklich abhängig von der Temperatur bzw. der Beanspruchungsgeschwindigkeit.
- 3) Das Material kann im Bauteil entweder durch einen Gleitbruch oder durch Trennbruch zerstört werden, je nachdem, ob entsprechend den Umständen im Einzelfall die Beanspruchung zuerst die Schubfestigkeit oder die Trennfestigkeit erreicht.

## 2.2 Methoden zur Beurteilung des Spröbruchverhaltens von Stahl im Bauteil

Im Laufe der letzten Jahrzehnte hat die Forschung auf dem Gebiet der Metallphysik Ergebnisse gebracht, mit deren Hilfe für das Verhalten der Metalle, ausgehend vom Einkristall bis zum Vielkristall, immer verfeinertere Hypothesen aufgestellt werden konnten z.B. [7, 2]. Man bemüht sich heute mit Erfolg, die im makroskopischen Bereich in Erscheinung tretenden Eigenschaften des vielkristallinen Werkstoffes Stahl den im Mikroskopischen ablaufenden Geschehnissen zuzuordnen.

Der Versuch jedoch, das Spröbruchverhalten des Stahls im Bauteil allein mittels metallphysikalischer Begriffe erfassen zu wollen, ohne die vom Prinzip her gesehen statistisch zusammenfassenden Beschreibungen des makroskopischen Verhaltens zu benutzen, ist voraussichtlich für die absehbare Zukunft zum Scheitern verurteilt. Weder für den Menschen noch für große Rechner kann man voraussetzen, daß sie in ausreichendem Maße verfügbare Kapazität besitzen werden, um die bei der Betrachtung größerer Bereiche notwendigerweise zu berücksichtigende Vielzahl mikroskopischer Größen verarbeiten zu können.

Es wird deshalb Aufgabe der Metallphysik bleiben, ursächliche Zusammenhänge für das Verhalten einer begrenzten Menge des Werkstoffes Stahl unter gegebenen Randbedingungen aufzudecken und zu formulieren. Muß man dagegen das aus dem Werkstoff Stahl gefertigte Material im Bauteil beurteilen, so sind zweckmäßigerweise Verfahren zu benutzen, die von den im Makroskopischen in Erscheinung tretenden Eigenschaften des Materials ausgehen.

Aus heutiger Sicht gibt es drei Methoden, um zu vermeiden, daß Störstellen Ausgangsstellen für verformungslose Trennbrüche werden:

- 1) Man vermeidet grundsätzlich Störstellen im Bauteil.
- 2) Man ermittelt die detaillierten Beanspruchungszustände an allen Störstellen des Bauteils und sorgt durch konstruktive Maßnahmen und geeignete Auswahl des Materials an den Störstellen dafür, daß die Werte dieser Beanspruchungszustände unter den vom Material noch bei gegebenen Umständen ertragbaren Grenzwerten bleiben; das bedeutet Sicherheit gegenüber einem möglichen Spröbruch.
- 3) Man wählt das Material und die konstruktive Ausbildung der Störstellen so aus, daß unter den zu erwartenden Betriebsumständen (z.B. Temperaturen) das plastische Verformungsvermögen des Materials an den Störstellen noch zum Ausgleich der Spannungsspitzen ausreicht; das bedeutet Vermeiden der Spröbruchgefahr.

Die erste Methode ist nur in sehr begrenztem Umfang anwendbar. Wenn das Auftreten von Rissen nicht auszuschließen ist, dann ist auch bei konstruktiv sehr gleichmäßig ausgebildeten Bauteilen die Wahrscheinlichkeit für Vorhandensein von gefahrbringenden Störstellen gegeben.

Die zweite Methode verlangt, daß die detaillierten Beanspruchungszustände an den Störstellen auch wirklich für alle denkbaren Belastungsfälle durch Rechnung oder Versuch ermittelt werden können. Dieses ist aber nur in Einzelfällen möglich. Oft fehlen die theoretischen oder meßtechnischen Möglichkeiten, oder zeitliche und wirtschaftliche Gründe sprechen dagegen. Außerdem ist ein großer Sicherheitsfaktor im Verhältnis zu dem unter nicht spröbruchgefährdeten Umständen erforderlich, weil Unvorhergesehenes in Art und Größe der Belastung nicht mehr durch örtliche plastische Verformungen abgefangen werden kann. Wie schnell Unvorhergesehenes allein schon durch das oft wenig beeinflussbare und noch öfter unbemerkt bleibende Abweichen der Bedingungen beim praktischen Herstellen und beim Betrieb von den planend vorausgesetzten eintreten kann, werden wohl alle für Herstellung, Abnahme oder Betrieb Verantwortlichen mindestens schon einmal erfahren haben. Es ist also sinnvoll, diese Methode nur anzuwenden, wenn die Anwendung der anderen nicht möglich ist.

Dieses ist der Fall, wenn für die geforderten Betriebsumstände kein Material mehr gefunden werden kann, das in der Störstelle ein Bruchverhalten mit ausreichend großen plastischen Verformungen garantiert. So z.B., wenn bei den sogenannten höchstfesten Stählen schon bei Raumtemperatur verformungsarmes oder verformungsloses Verhalten an Störstellen beim Bruch nicht verhindert werden kann. Entsprechendes gilt auch für den Bereich der normalfesten Baustähle bei sehr tiefen Betriebstemperaturen.

Für diese Fälle bemüht man sich, mit Hilfe der „Bruchmechanik“, z.B. [8, 9, 10, 11, 12], diejenige Spannung zu errechnen, die in Abhängigkeit von Verformungsvorgeschichte, Beanspruchungsgeschwindigkeit, Betriebstemperatur, Stör-

stellenart und -abmessung von einem Material gerade noch ohne Bruch ertragen wird.

Bei der Anwendung der dritten Methode ist es erforderlich, einen Beurteilungskennwert zu haben, der es erlaubt, unter Berücksichtigung der Betriebsumstände, d.h. bei normalen Verhältnissen unter Berücksichtigung der Betriebstemperatur, Material und Störstellenform so zu kombinieren, daß noch zum Ausgleich der Spannungsspitzen ausreichendes plastisches Verformungsvermögen immer vorhanden ist. Dann kann man die weitere Beurteilung des Bauteilverhaltens so durchführen, als ob keine Gefahr verformungsloser Brüche bestehe.

Hierzu wurde von Rühl [13, 14] die Methode des Vergleichs der Übergangstemperatur des Materials an der Störstelle im Bauteil zu der einer Bezugsstörstelle in einer Laborprobe propagiert.

### 2.3 Zur Methode der „Bruchmechanik“

Die Erarbeitung der Grundlagen für diese Methode ist bisher nur für die Störstellenart „vorhandener Riß in sonst gleichmbigem Bauteil“ in Angriff genommen worden.

Für diesen verhältnismäßig einfachen Fall einer Störstellenart gelang es mittels der Elastizitätstheorie einen Faktor  $K$  (Spannungsintensitätsfaktor) zu definieren, der den Spannungszustand im Bereich der Spitze eines Risses in einem Blech unter Voraussetzung rein elastischen Materialverhaltens kennzeichnet in Abhängigkeit von Riform, -lage und größe, der Größe der äußeren Belastung und den Randbedingungen des Bleches, und zwar ist es bei dieser Betrachtungsweise [9] der Verlauf des Spannungsanstieges im Bereich um die Rißspitze, der von  $K$  charakterisiert wird.

Das wirkliche Materialverhalten bedingt, daß an der Rißspitze praktisch immer, wenn z.T. auch sehr kleine Zonen mit auch plastischen Verformungen auftreten. Erst dadurch ist erklärbar, daß an der Rißspitze eines vorhandenen Risses nicht schon durch kleinste äußere Belastung ein Anriß entsteht. Die wirkliche Rißspitze ist also weniger scharf als die gedachte bei rein elastischem Materialverhalten.

Vergrößerung der Belastung bedeutet größeren  $K$ -Wert, einen größeren Wert der plastischen Verformung in der Rißspitze und auch ein Größerwerden des plastischen Bereiches um die Rißspitze. Wird an der Rißspitze der Wert der ertragbaren plastischen Verformung überschritten, so entsteht dort ein Anriß. Eine Störstelle mit neuer Abmessung, (größere Länge des vorhandenen Risses), liegt vor. Ein neuer größerer  $K$ -Wert gilt, kurzfristig herrscht eine größe Beanspruchungsgeschwindigkeit beim Aufbau des neuen Spannungszustandes und das Material an der Rißspitze hat eine andere Verformungsvorgeschichte. Hat das Material bei den vorliegenden Betriebsumständen noch genügend Verformungsfähigkeit an der neuen Rißspitze, bedarf es einer weiteren Vergrößerung der Belastung, wenn wieder ein Anriß an der neuen Rißspitze erfolgen soll.

Von Anriß zu Anriß wird die Verformungsvorgeschichte des Materials, in das die jeweils neue Rißspitze eindringt, hinsichtlich der bis zum ertragbaren Grenzwert noch zur Verfügung stehenden plastischen Verformung ungnztiger. (Die Rißspitze wird „schärfer“.) So kommt es zu einer durch die Summierung der neuen Anrisse vergrößerten Abmessung der Störstelle „vorhandener Riß . . .“, ab der jeder neue Anriß mit seiner Spitze in ein Material dringt, das kein ausreichendes spannungsspitzen-ausgleichendes plastisches Verformungsvermögen mehr besitzt, die Spannungsspitze der Rißspitze so immer wieder auf die Größe der Trennbruchfestigkeit schnellt und das Blech zerreißt, ohne daß eine weitere Erhöhung der äußeren Belastung erforderlich ist. Der zu Beginn des Zustandes des Weiterreiens ohne Belastungserhöhung gehörende  $K$ -Wert wird als kritischer Wert mit  $K_C$  bezeichnet.

Bei einem ebenen Verformungszustand an der Rißspitze (dickes Blech) ergibt sich der kleinste  $K_C$ -Wert, der für den Fall, daß die Riebenen sich in Richtung ihrer Normalen voneinander entfernen, mit  $K_{IC}$  bezeichnet wird.

Diese mit Rizhigkeit bezeichnete Größe  $K_{IC}$  wird auch als ein Werkstoffkennwert aufgefaßt, der die mittlere Reißspannung und die aus der Hypothese der Mikrostützwirkung hergeleitete Ersatzstrukturlnge zusammengefaßt [10].

Aus den elastizitätstheoretischen Betrachtungen ergibt sich, daß

$$K_C \sim \sigma \cdot \sqrt{\pi a_C} \text{ bzw. } \sim \sigma_C \cdot \sqrt{\pi \cdot a} \quad \text{ist,}$$

wobei  $\sigma$  die Beanspruchungsgröße bzw.  
 $\sigma_C$  die kritische Beanspruchungsgröße und  
 $a_C$  die kritische Größe des Risses bzw.  
 $a$  die Rißgröße

kennzeichnen.

Die Zone plastischer Verformung wird durch eine fiktive Riverlngerung berücksichtigt.

Der Wert  $K_C$  für die Störstellenart „vorhandener Riß in sonst gleichmbigem Bauteil“ hängt ab von

dem Spannungszustand  
dieser wieder ist abhängig von

Rilage im Blech,  
Riform,  
Rißgröße,  
Verhältnis Blechdicke zu Rißgröße,  
Blechrandbedingungen,  
Eigenspannungen,

der Vorgeschichte des Materials  
der Beanspruchungsgeschwindigkeit  
der Temperatur.

Hat man für eine bestimmte Kombination der Einflußparameter aus einem Versuch den Wert  $K_C$  über die Beanspru-

chungsgröße  $\sigma$  und die kritische Größe des Risses  $a_c$  bestimmt, so kann man für eben diese aber auch nur diese Einflußparameter – Kombination für jede Rißgröße  $a$  (Störstellenabmessung) die zum Bruch führende Beanspruchungsgröße  $\sigma_c$  errechnen. Da man die gesetzmäßige Abhängigkeit von Störstellenabmessungen und zum Bruch führender Beanspruchungsgröße dieser Störstellenart ermitteln konnte, genügt also hier für jede Kombination der übrigen Einflußparameter „ein“ (abgesehen von statistischen Überlegungen) Versuch.

Die Störstellenart „vorhandener Riß in sonst gleichmäßigem Bauteil“ ist aber nicht a priori die gefährlichste. Man denke sich eine Störstelle ohne makroskopischen Riß, an der ein dreiachsiger Zugspannungszustand z.B. durch Eigen- und Fremdeinwirkungen infolge zügiger äußerer Belastung aufgebaut wird. Dann gibt es eine Beanspruchungsgröße, bei der unter den gegebenen Umständen das Verformungsvermögen erschöpft ist und ein makroskopischer Riß entsteht. Im Bereich der Rißspitze wird jetzt ein neuer Spannungszustand, entsprechend dem einer Störstellenart „vorhandener Riß in nicht gleichmäßigem Bauteil“ mit großer Beanspruchungsgeschwindigkeit aufgebaut. In zwei wesentlichen Punkten unterscheidet sich dieser Fall von dem der Störstellenart „vorhandener Riß in sonst gleichmäßigem Bauteil“ unter zügiger Belastung:

- 1) Die Beanspruchungsgeschwindigkeit ist bedeutend größer.
- 2) Die Rißspitze dringt in ein Material mit u.U. ganz anderer, ungünstigerer Verformungsvorgeschichte ein, so vor allem, wenn Schweißverbindungen oder Kerben mit mechanischer Vorverformung, z.B. gestanzte Löcher, als Störstellen vorhanden sind.

Der erste Punkt bedeutet, daß im Falle eines an der Störstelle von Anfang an vorhandenen makroskopischen Risses die zum Weiterreißen und dann zum Bruch führende Belastung größer sein kann als in dem Fall, bei dem der Riß erst bei höherer Belastung entsteht. Der zweite Punkt bedeutet, daß beim vorhandenen Riß in sonst gleichmäßigem Bauteil mehr plastische Verformung bis zum Trennbruch zur Verfügung stehen kann und damit erst bei größerer Belastung Bruch eintritt.

Ist es erforderlich, bei der Beurteilung eines Bauteils hinsichtlich seines Sprödbbruchverhaltens sich der „Bruchmechanik“ zu bedienen und hat dieses Bauteil auch andere Störstellenarten als „vorhandener Riß in sonst gleichmäßigem Bauteil“, so genügt die Beurteilung mit einem  $K_{IC}$ -Wert, ermittelt bei einer Parameter-Kombination entsprechend der letztgenannten Störstellenart, nicht. Man muß vielmehr bei der Ermittlung des auch als Bruchzähigkeit oder Bruchwiderstand bezeichneten  $K_{IC}$ -Wertes dann auch diejenigen Einflußparameter-Kombinationen einstellen, die den anderen Störstellenarten entsprechen.

Auf diesem Gebiet sind nach Wissen des Autors noch keine Unterlagen vorhanden. Es müßte für die einzelnen technisch gebräuchlichen Störstellenarten die Beziehung zwischen Störstellenabmessungen, Spannungszustand und

Verformungsgeschichte des Materials an der potentiellen Trennbruchausgangsstelle unter Berücksichtigung des Materialverhaltens bei den Herstellungsbedingungen und bei der Betriebstemperatur aufgestellt werden. Dann brauchte man die Belastungsgröße, bei der ein Riß auftritt, den neuen Spannungszustand in der Rißspitze und die Beanspruchungsgeschwindigkeit, mit der er aufgebaut wird. Darauf müßte man iterativ das Material suchen, dessen Bruchwiderstand eine endliche Rißgröße bei einer dieser Rißgrößen und den vorstehend aufgeführten Umständen entsprechenden Beanspruchungsgröße ermöglicht.

Schon dieser unvollständige Versuch der Beschreibung der Erfordernisse einer solchen Beurteilungsmethode im Fall komplizierter Störstellen zeigt den sehr großen Schwierigkeitsgrad bei der Ermittlung der Grundlagen und bei der Anwendung. Deshalb sollte man diese Methode nur anzuwenden versuchen, wenn die Anwendung anderer durchaus nicht möglich ist.

#### 2.4 Zur Methode des Temperaturvergleiches

Bei dieser Methode wird davon ausgegangen, daß für das Material an jeder Störstelle in einem Bauteil oder in einem als Probe im Labor benutzten Teil in Abhängigkeit von der Temperatur ein Übergang existiert vom Bruch mit für Spannungsspitzenausgleich ausreichend großen plastischen Verformungen über den verformungsarmen zum verformungslosen, also spröden Bruch mit der Gefahr niedriger äußerer Bruchlast. Damit existiert für das Material in jeder Störstelle auch eine Temperatur, über der keine verformungslosen Brüche mehr auftreten, die Übergangstemperatur des Materials in der Störstelle  $S, \vartheta_{Ü,S}$ .

Ist die Betriebstemperatur an der Störstelle im Bauteil dann sicher größer als die Übergangstemperatur des verwendeten Materials in der Störstelle, so braucht ein Sprödbbruch nicht mehr erwartet zu werden.

Ermittelt werden muß also die Übergangstemperatur des Materials in einer Störstelle. Sie hängt ab

von der Beanspruchungsgeschwindigkeit  $\dot{p}$  gegeben durch die Art der äußeren Belastung

von dem Spannungszustand an der potentiellen Trennbruchausgangsstelle

mit einem von Störstellenart und -abmessungen abhängigen Anteil  $\sigma_p$  infolge äußerer Belastung einschließlich Temperaturunterschiede nach Ort und Zeit und

mit einem störtstellenspezifischen Anteil infolge herstellungsbedingter Eigenspannungen  $\sigma_{S,E}$

von der Vorgeschichte des Materials an der potentiellen Trennbruchausgangsstelle

mit einem willkürlichen Anteil  $\epsilon_0(t)$ , entsprechend den im jeweiligen Einzelfall vorliegenden Herstellungsbedingungen der Materialerzeugnisse (z.B. Bleche, Walzprofile) und

mit einem störstellenspezifischen Anteil  $\epsilon_s(t)$ , entsprechend den Herstellungsbedingungen der Störstelle (plastische Verformungen infolge Schweißspannung, infolge mechanischer Bearbeitung)

von der Übergangstemperatur  $\vartheta_{\dot{U}, 0, 0}$  des Werkstoffes ohne Störstelle und „ohne“ Vorgeschichte bedingt durch die metallphysikalischen Gegebenheiten.

Eine getrennte Bestimmung von  $\vartheta_{\dot{U}, 0, 0}$  und  $\epsilon_0(t)$  ist praktisch nicht möglich, da der Werkstoff immer in der Form eines bestimmten Materials vorliegt (s. Abschn. 2.1).

Das Spröbruchverhalten des jeweils betrachteten Materials wird also gekennzeichnet durch die Übergangstemperatur  $\vartheta_{\dot{U}, 0}$  dieses Materials ohne Störstelle, aber mit seiner im jeweiligen Einzelfall für die betrachtete Erzeugnisform wirksam gewordene Vorgeschichte. In metallphysikalischer Hinsicht ursprünglich gleicher Werkstoff, der aber bis zum Zeitpunkt des Einbaues in eine Störstelle verschiedene Vorgeschichte erlebt hat, wird hier also als unterschiedliches Material betrachtet.

Somit gilt für die Übergangstemperatur eines Materials in einer Störstelle

$$\vartheta_{\dot{U}, S} = \vartheta_{\dot{U}, S}(\dot{p}; \sigma_p; \sigma_{S, E}; \epsilon_S(t); \vartheta_{\dot{U}, 0}).$$

Zwischen der Übergangstemperatur des Materials in einer Störstelle  $i$  und der des Materials ohne Störstelle besteht im allgemeinen eine Differenz

$$\Delta\vartheta_{i/0} = \vartheta_{\dot{U}, i} - \vartheta_{\dot{U}, 0}.$$

Für die weiteren Überlegungen wird postuliert:

„Die Übergangstemperatur jeder Störstelle ändert sich in demselben Maße wie die Übergangstemperatur des Materials ohne Störstelle, m. a. W. der Wert von  $\Delta\vartheta$  ist für jede Störstellenart bestimmter Abmessungen unter gegebenen Belastungsverhältnissen ein Eigenwert und unabhängig von dem Wert von  $\vartheta_{\dot{U}, 0}$ “.

Wenn dem so ist, dann ist aber auch die Differenz zwischen den Übergangstemperaturen des gleichen Materials in zwei beliebigen Störstellenarten bestimmter Abmessungen unabhängig von dem Wert von  $\vartheta_{\dot{U}, 0}$ .

Ermittelt man also die Differenz der Übergangstemperaturen aller interessierenden Störstellenarten,  $i$ , unter den interessierenden Belastungsverhältnissen zu der einer bestimmten, hier als Bezugsstörstelle  $B$  bezeichneten, und bestimmt die Abhängigkeiten dieser Differenzen von den Störstellenabmessungen, so kann man für jedes Material in einer dieser Störstellenarten bestimmter Abmessung die Übergangstemperatur für die interessierenden Belastungszustände bestimmen, sofern die Übergangstemperatur des Materials in der Bezugsstörstelle bekannt ist.

$$\vartheta_{\dot{U}, i} = \vartheta_{\dot{U}, B} + \Delta\vartheta_{i/B}$$

Das vorstehend aufgeführte Postulat einer möglichst einfachen Gesetzmäßigkeit wird bis auf weiteres als Arbeitshypothese für den Bereich der normalfesten Baustähle verwendet. Die bisherigen Versuchsergebnisse [13; 14; 15; 16; 17; 4] unterstützten diese Hypothese.

Auf andere Stahlgruppen, bei denen das Spröbruchverhalten des Materials, z.B. durch die Umstände beim Schweißen oder der mechanischen Bearbeitung, grundsätzlich anders beeinflusst wird als bei dem hier betrachteten normalfesten Baustahl, sind die für diesen Baustahl in den Störstellen,  $i$ , ermittelten  $\Delta\vartheta_{i/B}$ -Werte natürlich nicht ohne weiteres zu übertragen. Dieses wäre nur möglich, wenn man eine Bezugsstörstelle  $B$  verwenden würde, bei deren Herstellung die Beeinflussung des Spröbruchverhaltens des Materials immer entsprechend der ist, die bei Herstellen der Störstelle im Bauteil auftritt.

Beim Heranziehen von Versuchsergebnissen zum Stützen oder Verwerfen dieser Arbeitshypothese von der konstanten Differenz der Übergangstemperatur zweier Störstellenarten ist besonders die Tatsache zu beachten, daß das Verhalten des Werkstoffes Stahl gegenüber Spröbruch sehr leicht durch unbemerkten Einfluß verändert werden kann.

So wurde z.B. bei dem hier angewandten Versuchsmaterial, das aus einer Charge stammte und bei dem alle Teilschnitte hinsichtlich mechanischer Eigenschaften und chemischer Zusammensetzung nur geringe Unterschiede aufwiesen, unterschiedliches Spröbruchverhalten, gekennzeichnet durch Unterschiede bei der Übergangstemperatur der ISO-Spitzkerbprobe von maximal 35 grad, festgestellt. Einerseits konnten diese Unterschiede auf die Abhängigkeit der Übergangstemperatur vom Korndurchmesser zurückgeführt werden. Andererseits ergaben sich so große Unterschiede aber auch bei gleichen Korndurchmessern. Menge und Art der nichtmetallischen Einschlüsse geben auch keine Erklärung für letztgenannte Unterschiede. Dagegen weisen die Ergebnisse der Bestimmung der Übergangstemperatur an normalgeglühten und an reckgealterten ISO-Spitzkerbproben auf eine möglicherweise verschiedene örtliche Vorgeschichte des Materials als Ursache hin. Hier hat also der Einfluß eines oder mehrerer Parameter, deren Art und Größe nur noch im nachherein als Kombination in der Auswirkung auf das Spröbruchverhalten feststellbar ist, den Einfluß der Parameter mit meßbarer Größe im ganzen Bereich überdeckt. So kann also bei gleichem Ausgangswerkstoff und gleicher Größe der meßbaren Einflußparameter das Spröbruchverhalten des Materials im Bauteil an gleichen, nur örtlich verschiedenen Störstellen entscheidende Unterschiede aufweisen.

Bei einem Vergleich der Übergangstemperaturdifferenz  $\Delta\vartheta_{i_1, i_2}$  zwischen den zwei verschiedenen Störstellen  $i_1$  und  $i_2$  eines Materials 1 mit bestimmtem Spröbruchverhalten,  $\vartheta_{\dot{U}, 0, 1}$ , mit der entsprechenden eines Materials 2 mit anderem Spröbruchverhalten,  $\vartheta_{\dot{U}, 0, 2}$ , ist also sehr sorgfältig darauf zu achten, daß jeweils das Material bei den beiden verschiedenen Störstellen auch wirklich gleiches Spröbruchverhalten im Zustand ohne Störstelle zeigt.

Die Wahrscheinlichkeit, daß der etwaige Tatbestand

$$\vartheta_{1\ddot{U},o}(i_1) \neq \vartheta_{1\ddot{U},o}(i_2)$$

und / oder

$$\vartheta_{2\ddot{U},o}(i_1) \neq \vartheta_{2\ddot{U},o}(i_2)$$

unbemerkt bleibt bei Versuchsergebnissen, die zur Beurteilung der Arbeitshypothese herangezogen werden können, ist nicht gering. Ein großer Teil der Streuungen und sicher auch der Widersprüche zu dieser Arbeitshypothese würde sich wahrscheinlich auf diesen Tatbestand zurückführen lassen.

Dieses ist eine der praktischen Hauptschwierigkeiten, wenn man mittels Versuchsergebnissen Hypothesen im Bereich des Problemkreises „Sprödbbruchverhalten des Materials im Bauteil“ beurteilen will:

Zum einen ist die Wahrscheinlichkeit, daß man ein Versuchsmaterial mit an allen Orten gleichem Verhalten gegenüber Sprödbbruch bekommt, praktisch Null. Zum anderen hat jede Probe zur Untersuchung einer Störstellenart eine endliche Größe, so daß Wirkungen der Einflußfaktoren auf das Sprödbbruchverhalten des Materials ohne Störstelle nur bedingt ermittelt werden können. Schließlich sind Versuche in diesem Bereich meist mit großen Kosten verbunden, so daß es oft nicht möglich ist, durch eine Vielzahl gleichartiger Versuche und mittels statistischer Auswertmethoden vorstehend aufgeführte Hindernisse zu umgehen.

Bei der Ermittlung grundlegender Versuchsergebnisse für die Methode des Temperaturvergleiches ist diese praktische Hauptschwierigkeit besonders gegeben. Geht es doch darum, das Verhalten des Materials in den technisch gebräuchlichen Störstellenarten zu untersuchen. Das aber verlangt bauteilähnliche Proben, d.h. Proben mit Störstellen, die hinsichtlich der gegenseitigen Beeinflussung von Material, Abmessungen, Herstellungsbedingungen und Belastung weitgehend den Störstellen im Bauteil bei der Anwendung entsprechen, wodurch in vielen Fällen große Probeabmessungen nicht zu vermeiden sind.

Die Abmessungen der Proben für die Bezugsstörstelle und auch der Aufwand für das Versuchsverfahren und die Auswertung der Ergebnisse dagegen sollten klein gehalten werden können, denn die Versuche an diesen Proben werden zur Einstufung des Materials, das verbraucht werden soll, solange immer wieder durchgeführt werden, wie die Beurteilungsmethode angewendet wird.

Für die augenblickliche Zeitspanne bietet sich als Bezugsstörstelle die ISO-Spitzkerbe im Schlagbiegeversuch an. Sie ist weitgehend international eingeführt, mit Kerbschlagbiegeversuchen hat man schon viel Erfahrungen gesammelt, und der Aufwand für Kosten und Durchführung der entsprechenden Versuche hält sich in annehmbaren Grenzen. (Es sollte aber dabei darauf geachtet werden, daß mindestens der Übergangsbereich und der Anfang der Tieflage der Kerbschlagzähigkeit ermittelt wird.)

### 3. Die Anwendung der Methode des Temperaturvergleiches auf geschweißte Bauteile aus R St 37 - 2 N

#### 3.1 Zweck der Untersuchungen

Es besteht die Aussicht, daß die Bruchmechanik einen ausreichenden Maßstab zur Beurteilung der Tragfähigkeit von Bauteilen liefern wird, bei denen nur die Störstellengruppe „vorhandener Riß in sonst gleichmäßigem Bauteil“ auftreten kann. Auch für die Strstellengruppe „mechanische Kerben“ ist eine entsprechende Hoffnung berechtigt [18].

Anders dagegen sieht es aus bei der Strstellengruppe „Schweißverbindungen“. Hier kann in absehbarer Zeit nicht mit der Lösung des Problems „Sprödbruchverhalten“ auf analytischem Wege in Verbindung mit Werkstoffkennwerten gerechnet werden. Sowohl für die Berechnung der wirklichen Beanspruchungsverhältnisse an den potentiellen Trennbruch-Ausgangsstellen infolge Eigenspannungszuständen und äußerer Belastung als auch für die Ermittlung der jeweiligen Vorgeschichte des Materials eben dort und in der näheren Umgebung läßt sich aus jetziger Sicht keine praktisch verwirklichbare Methode erkennen.

Deshalb ist es Zweck der Untersuchungen, für diese Strstellengruppe „Schweißverbindungen“ Unterlagen zur Methode des Temperaturvergleiches zu schaffen, um damit dem konstruierenden Ingenieur eine zeitliche und wirtschaftlich vertretbare Beurteilungshilfe in die Hand zu geben. Mit den hier vorgelegten Untersuchungen ist ein entsprechendes Forschungsprogramm begonnen worden.

Als Ausgangswerkstoff für das Versuchsmaterial ist der Stahl R St 37 - 2 N ausgewählt worden, da er bei Schweißkonstruktionen für normale Zwecke z.Zt. am häufigsten verwendet wird. Mittels der Versuche und ihrer Ergebnisse ist damit folgende Aufgabe zu lösen:

Bestimmung der Übergangstemperaturen des Materials aus dem Stahl R St 37 - 2 N in technisch gebräuchlichen Störstellen bei Schweißkonstruktionen unter zügiger äußerer Belastung,

und gleichlaufend damit

Bestimmung der Übergangstemperatur desselben Materials in einer Bezugsstörstelle unter bestimmter äußerer Bela-

stungsart, hier die ISO-Spitzkerbe belastet im Schlagbiegeversuch, und Bildung der Differenz dieser beiden Übergangstemperaturen in Abhängigkeit von der Art der technisch gebräuchlichen Störstelle.

#### 3.2 Zur Auswahl der Störstellen und Herstellung der Proben

Wirtschaftliche und zeitliche Gründe verlangen, bei der Vielzahl der technisch gebräuchlichen Störstellenarten eine Auswahl zu treffen. Einzelheiten dazu sind im folgenden beschrieben, dem Bild 1 können die Störstellenabmessungen entnommen werden.

Daß in der Strstellengruppe „Schweißverbindungen“ schon der Stumpfstoß mit x-Naht (Strstellenkurzzeichen S) als Störstelle anzusprechen ist, bestätigen Vergleichsversuche zwischen einer Probe ohne Störstelle und einer mit der Störstelle S. Hier ergaben sich bei praktisch gleicher Versuchstemperatur (- 145°C und - 143°C) und gleicher Nennspannung in Probenlängsrichtung (48,5 kp/mm<sup>2</sup> und 49,4 kp/mm<sup>2</sup>) bei der Probe mit Stumpfstoß geringere Verformungswerte, nämlich 63 ‰ bleibende Dehnung in Probenlängsrichtung gegenüber 85 ‰, (s. auch Bild 4) bzw. 27 ‰ bezogene Breitenänderung der Proben gegenüber 40 ‰.

Als weitere Störstellenart wurde ein mit Kehlnähten quer zur Hauptbeanspruchungsrichtung auf die Grundprobe geschweißter Nocken (Strstellenkurzzeichen N) in Betracht gezogen, als Prototyp für geschweißte Anschlüsse senkrecht zur Hauptbeanspruchungsrichtung ohne flächenhaft wirkende Versteifung.

Als dritte Störstellenart ist die mit Stirn- und Flankenkehlnhten angeschweißte Lasche (Strstellenkurzzeichen LSt) untersucht worden, als Prototyp einer angeschweißten Querschnittsverstärkung mit Flächenwirkung aber nur allmählicher Querschnittsvergrößerung.

Als Pendant dazu wird als Störstellenart die *nur* mit Flankenkehlnhten angeschweißte Lasche (Strstellenkurzzeichen LF) untersucht, als Prototyp sowohl für eine angeschweißte Querschnittsverstärkung mit Flächenwirkung und

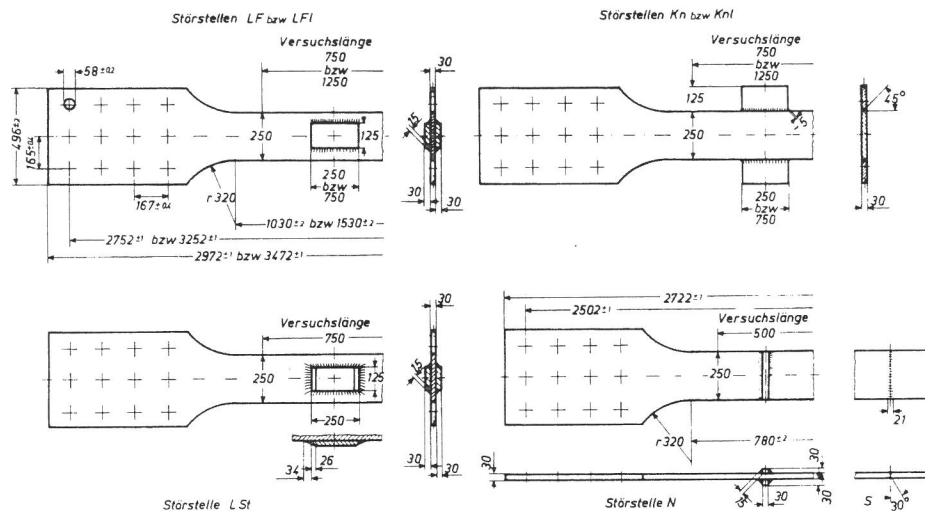


Bild 1  
Abmessungen der bauteilähnlichen Proben

— in Hauptbeanspruchungsrichtung gesehen — punktförmigem Querschnittsprung als auch für einen geschweißten Anschluß mit endenden Kehlnähten parallel zur Hauptbeanspruchungsrichtung.

Schließlich ist als Störstellenart das mit K-Naht parallel zur Hauptbeanspruchungsrichtung in Blechebene angeschweißte Knotenblech (Störstellenkurzzeichen Kn) ausgewählt worden, als Prototyp sowohl für einen entsprechenden geschweißten Anschluß als auch für einen angeschweißten Querschnittsprung in Blechebene.

Der Einfluß der Blechdicke soll später untersucht werden durch ihre Variation von 20 über 30 bis 40 mm. Die Versuchsreihe „Einfluß der konstruktiven Ausbildung“, also der Vergleich der verschiedenen Störstellenarten untereinander, ist mit der mittleren Blechdicke 30 mm durchgeführt worden.

Dem geometrischen Einfluß der Störstellenlänge wurde nachgegangen durch Kontrollversuche mit dreifacher Störstellenlänge bei den Störstellenarten LF und Kn.

Bei aus Blechen zusammengeschweißten Bauteilen können wirtschaftliche Gründe eine Verarbeitung der Bleche auch mit der Walzrichtung senkrecht zur Hauptbeanspruchungsrichtung wünschenswert erscheinen lassen. Deshalb sind in einer Versuchsreihe „Einfluß der Walzrichtung“ Störstellen sonst gleicher Art, aber mit verschiedener Zuordnung der Walzrichtung zur Hauptbeanspruchungsrichtung untersucht worden. Verwendet wurden die Störstellenarten LF und Kn, ebenfalls mit 30 mm Blechdicke und Material, das aus der gleichen Charge stammen soll wie das der Versuchsreihe „Einfluß der konstruktiven Ausbildung“.

Die Störstellen wurden an einem 250 mm breiten Blechstreifen symmetrisch zur Mittelebene bzw. Mittellinie angebracht. Die Walzrichtung der Blechstreifen verlief parallel bzw. senkrecht zu ihren Längsrichtungen. Die Hauptbeanspruchung war eine Zwangsverformung in Blechstreifenlängsrichtung.

Die Breiten der Laschen und Knotenbleche sind so gewählt worden, daß sich gegenüber den ungestörten Blechstreifen eine Querschnittsvergrößerung von 100% ergibt. Die Summe der Dicken der Flankenkehlnähte ist gleich der Dicke des durch sie angeschweißten Materials. Links und rechts jeder Störstelle in Blechstreifenlängsrichtung wurde ein Stück ungestörter Blechstreifen vorgesehen, dessen Länge gleich der Blechstreifenbreite ist. So ist an den Enden der Versuchslänge ein über die Querschnittsfläche gleichmäßiger Beanspruchungszustand zu erwarten.

Für die Störstellen wurde das Metall-Lichtbogenschweißen von Hand angewendet mit Stabelektroden vom Typ Ti VIII s. Vor dem Überschweißen mit der nächsten Raupe ließ man die Naht auf eine Temperatur von  $\leq 200^\circ\text{C}$  abkühlen (Kontrolle mit Schmelzstift  $198^\circ\text{C}$ ). Bei diesem Verfahren sind die größten Eigenspannungen infolge Schweißen zu erwarten. — So werden nach [19], Fig. 6 ... 11 bei einer Wärmebehandlung bei  $200^\circ\text{C}$ , 1 bis 2,5 Stunden lang, nur etwa 3% der Spannungen beseitigt. Bringt man die Spannungswerte aus [20] in Abhängigkeit von der entsprechenden Temperatur und extrapoliert, so ergibt sich, daß bei einer Temperatur von  $\approx 350^\circ\text{C}$  über die Dauer von 4 Stunden noch keine Spannungen abgebaut werden. — Durch dieses Verfahren wird auch der Einfluß eliminiert, der sich bei unterschiedlicher Nahtlänge durch die unterschiedlichen Nahttemperaturen beim Aufschweißen der neuen Raupe ergeben würde.

(Weitere Einzelheiten zur Probenherstellung und Zuordnung der Proben für die Werkstoffkontrollversuche s. Abschn. 5.1).

### 3.3 Versuchsmaterial

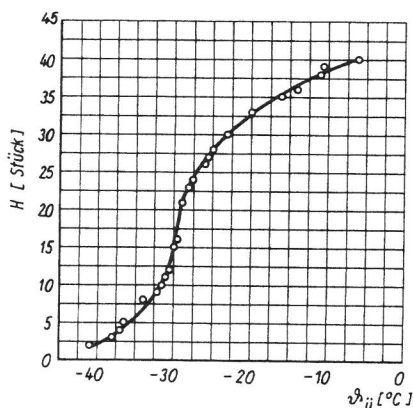
Als Material für die Versuchsreihe „Einfluß der konstruktiven Ausbildung“ wurden 30 mm dicke und 1,5 m breite Bleche aus Baustahl R St 37 - 2 N nach DIN 17 100 verwendet.

Die Bleche sollen alle aus einer Charge stammen. Die Stoffkennwerte aus dem Zugversuch nach DIN 50 146 an Proben in Walzrichtung, die mittleren Korndurchmesser nach dem Linienschnittverfahren und die Werte der chemischen Analyse kann man der Tabelle 1 entnehmen.

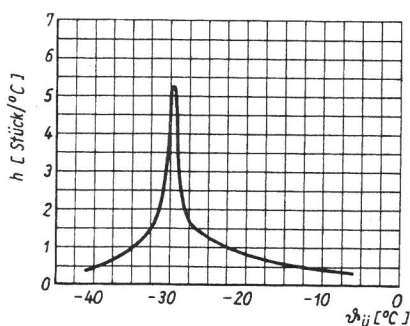
Tabelle 1

Stoffkennwerte aus dem Zugversuch nach DIN 50 146, mittlerer Korndurchmesser nach dem Linienschnittverfahren und Werte der chemischen Analyse des Stahles R St-2 N nach DIN 17 100, verwendet bei der Versuchsreihe „Einfluß der konstruktiven Ausbildung“

	Zugfestigkeit $\beta_z$ $\frac{kp}{mm^2}$	Streckgrenze $\beta_s$ $\frac{kp}{mm^2}$	Bruchdehnung $\delta_5$ %	Brucheinschnürung $\psi$ %	mittl. Korndurchmesser $10^{-3} mm$	chemische Analyse							
						C	P	S	N <sub>2</sub>	Si	Mn	Al	Cu
						%							
Mittelwert	42,4	26,1	38,8	66	21,8	0,13	0,035	0,018	0,005	0,28	0,63	0,071	0,027
Standardabweichung	0,53	0,64	1,42	1,8	2,53	0,000	0,0032	0,0000	0,0000	0,014	0,000	0,0045	0,0000
gemessener kleinster Wert	41,6	25,3	36,5	62	18,5	0,12	0,029	0,015	0,004	0,26	0,61	0,064	0,023
gemessener größter Wert	43,1	27,5	41,1	68	28,0	0,14	0,041	0,021	0,007	0,31	0,65	0,079	0,029
Anzahl der Meßwerte	19	19	19	19	31	24	24	24	24	24	24	24	24
garantierte Werte nach DIN 17 100	37 bis 45	$\geq 24$	$\geq 25$	—	—	< 0,19	< 0,055	< 0,055	< 0,008	—	—	—	—



$\vartheta_U$ : Übergangstemperatur der ISO-Spitzkerbprobe längs zur Walzrichtung für  $a_k = 3,5 \text{ kp/cm}^2$   
 H: Summenhäufigkeit =  $H(\vartheta_U)$  = Anzahl derjenigen Werte der Übergangstemperatur, die  $\leq$  einem bestimmten Wert  $\vartheta_U$  sind



h: Häufigkeit =  $dH/d\vartheta_U$

Die Übergangstemperaturen der ISO-Spitzkerbprobe längs zur Walzrichtung für eine Kerbschlagzähigkeit  $a_k = 3,5 \text{ kp/cm}^2$ , als Kennzeichen für das Spröbruchverhalten des für diese Versuchsreihe verwendeten Stahles, sind hinsichtlich der Häufigkeit ihres Auftretens auf Bild 2 dargestellt. Danach lag das Maximum der Häufigkeitsverteilung der Werte der gemessenen Übergangstemperaturen bei  $-30^\circ\text{C}$ . Von diesem Wert ergaben sich Abweichungen nach höheren Übergangstemperaturen hin bis zu über  $20 \text{ grad}$ . Einem Teil der Abweichungen konnte als Ursache Unterschied der Korndurchmesser zugewiesen werden, Bild 3. Nach einer Anregung von Varga [21] wurden hier die Wertepaare Übergangstemperatur/Korndurchmesser in einem  $(\vartheta_{abs}^{-1}; d^{-1/2})$ -Koordinatensystem eingetragen.

Es liegen zwei deutlich getrennte Gruppen vor. Entsprechend der auf die Überlegungen von Cottrell aufgebauten Gleichung

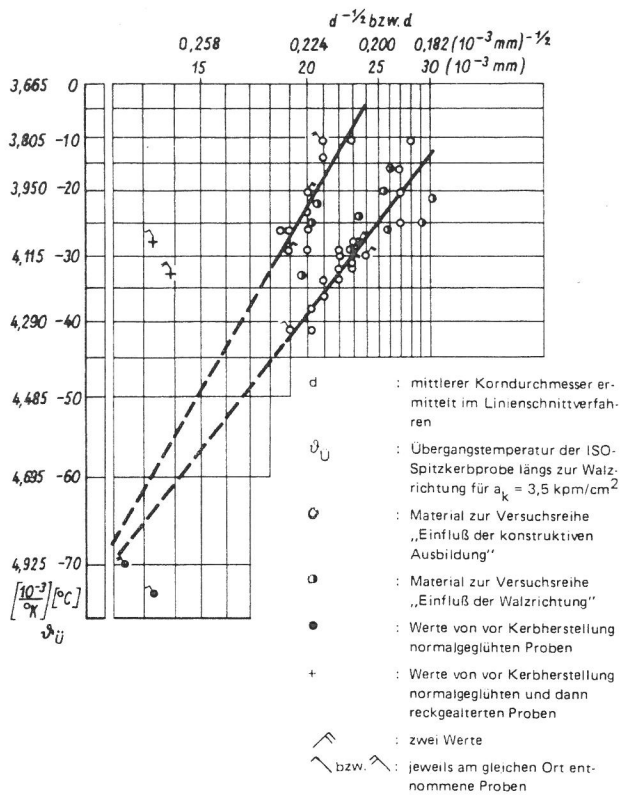
$$\vartheta_U^{-1} = \vartheta_0^{-1} + k_g \cdot d^{-1/2}$$

sind für diese beiden Gruppen die Regressionsgeraden eingezeichnet worden. Danach ist als Ursache für das unterschiedliche Spröbruchverhalten neben dem Parameter Korndurchmesser auch noch ein anderer Parameter oder eine Parameterkombination wirksam gewesen.

Aus den Werten der chemischen Analyse und auch aus Art und Menge der nichtmetallischen Einschlüsse konnten keine Anhaltspunkte für die Ursache dieser Gruppenbildung gewonnen werden.

Bild 2 Häufigkeitsverteilung der Übergangstemperaturen der ISO-Spitzkerbproben des für die bauteilähnlichen Proben der Versuchsreihe „Einfluß der konstruktiven Ausbildung“ verwendeten Materials





**Bild 3**  
Übergangstemperaturen der ISO-Spitzkerbproben in Abhängigkeit vom mittleren Korndurchmesser

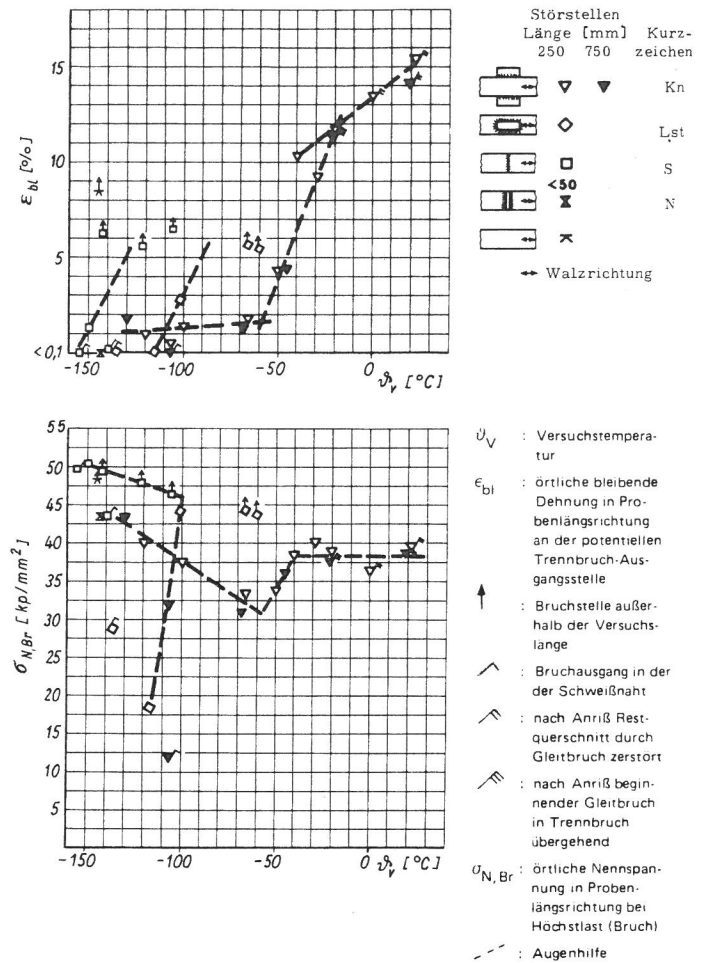
Aus den Blechen von den Stellen, an denen Extremwerte der Übergangstemperatur festgestellt worden waren, sind zusätzlich Übergangstemperaturen an ISO-Spitzkerbproben bestimmt worden, die vor Kerbherstellung normalgeglüht bzw. normalgeglüht und reckgealtert (10 % Stauchung; 250°C 30 min lang) worden waren. Die Werte sind ebenfalls in Bild 3 eingetragen. Das Material, das im Anlieferungszustand bei gleichem Korndurchmesser eindeutig unterschiedliches Spröbruchverhalten zeigt, verhält sich nach dem Normalglühen bei kleinen Abmessungen und auch nach anschließender Reckalterung gleich. Dieses Ergebnis dient als Anhaltspunkt dafür, die Ursache für das unterschiedliche Spröbruchverhalten bei sonst gleichen Werten der meßbaren Einflußparameter in der unterschiedlichen Vorgeschichte zu vermuten.

Die Tatsache des hinsichtlich des Spröbruchverhaltens nicht einheitlichen Versuchsmaterials war also als gegeben hinzunehmen.

Für das Material, das zur Versuchsreihe „Einfluß der Walzrichtung“ verwendet worden ist, kann die gleiche Schlussfolgerung gelten. Die Zuordnung der Übergangstemperaturen der ISO-Spitzkerbproben zu den mittleren Korndurchmessern, ebenfalls in Bild 3 eingetragen, zeigt grundsätzlich kein anderes Bild.

### 3.4 Zusammenfassende Auswertung der Ergebnisse

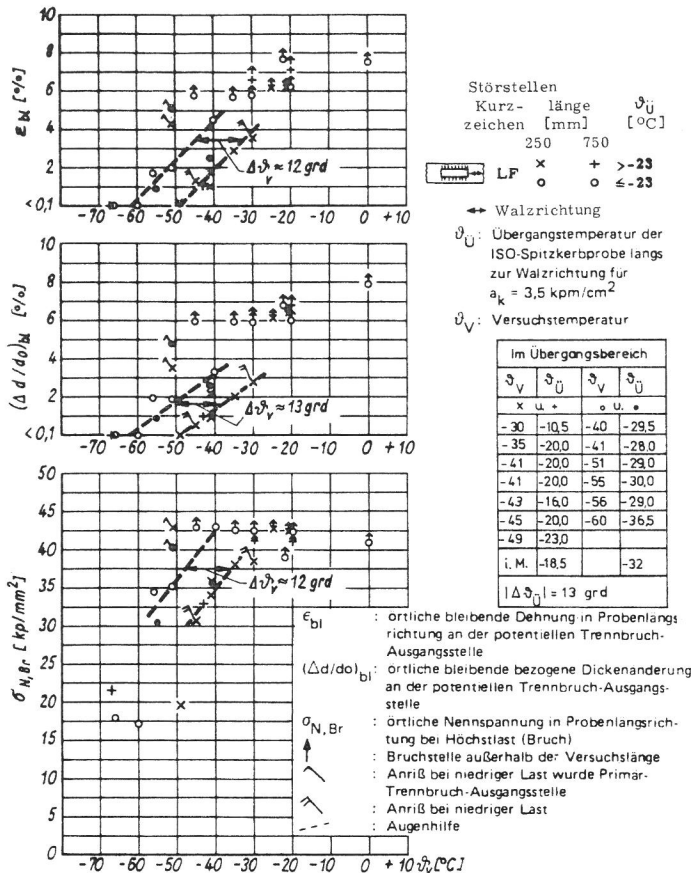
(Beschreibung der Versuchseinrichtung und -durchführung sowie Einzelheiten zu den Versuchsergebnissen und ihrer Auswertung s. Abschn. 5.2 und 6.)



**Bild 4**  
Örtliche bleibende Dehnung und Bruch-Nennspannung  
Störstellenarten: „Knotenblech (Kn)“  
„Lasche mit Flanken- und Stirnkehlnaht (LSt)“  
„Stumpfstoß (S)“  
„Nocken, quergeschweißt (N)“  
Walzrichtung : Parallel zur Probenlängsrichtung

Die Ergebnisse der Versuche der Reihe „Einfluß der konstruktiven Ausbildung“ sind auf den Bildern 4 und 5 dargestellt. Als Kennzeichen für das Spröbruchverhalten dienen die bleibenden Verformungen und die Bruch-Nennspannungen infolge äußerer Belastung an der Stelle, von der der Trennbruch ausging bzw. von der der Trennbruchausgang zu erwarten gewesen wäre, der sog. potentiellen Trennbruch-Ausgangsstelle.

Diese gemessenen bleibenden Verformungen infolge äußerer Belastung sind natürlich nicht identisch mit den plastischen Verformungen des Materials bis zum Bruch. Die Anteile an plastischen Verformungen, die vor der Nullmessung infolge Eigenspannungszuständen entstehen, sind in den Meßwerten ja nicht enthalten. Die gemessenen Werte liefern also nur eine Aussage darüber, ob der Gesamtquerschnitt des Bauteils in Verbindung mit der Störstellenart bei dem betrachteten Material und der eingestellten Temperatur noch ausreichend plastisches Verformungsvermögen in sich besitzt, um einen Spröbruch mit geringer Arbeitsaufnahme des Bauteils zu vermeiden.



**Bild 5**  
 Örtlich bleibende Verformungen und Bruch-Nennspannung  
 Störstellenart : „Lasche nur mit Flankenkehlnaht (LF)“  
 Einfluß verschiedener ISO-Spitzkerbproben-Übergangstemperaturen  
 Walzrichtung : Parallel zur Probenlängsrichtung

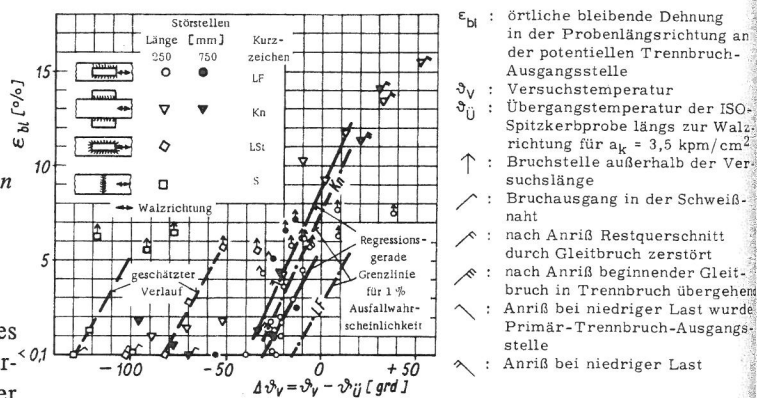
Alle Störstellenarten zeigten das erwartete Verhalten des Überganges vom verformungsreichen zum verformungsarmen bzw. verformungslosen Bruch in Abhängigkeit von der Temperatur während der Beanspruchung. Außerdem ergibt sich bei einem Teil ein eindeutiger Abfall der Bruch-Nennspannungen beginnend im Bereich der verformungsarmen Brüche bis zu Werten, die unter dem der Streckgrenzen aus dem Zugversuch bei Raumtemperatur liegen, bei verformungslosen Brüchen.

Die Ergebnisse der Kontrollversuche mit dreifacher Störstellenlänge bei den Störstellen Kn und LF passen sich gut in das Gesamtbild ein. Ein geometrischer Einfluß der Störstellenlänge war also nicht ersichtlich. Deshalb wurde bei der weiteren Auswertung kein Unterschied zwischen einfacher und dreifacher Störstellenlänge gemacht.

Es ergab sich weiter die Möglichkeit, die der Methode des Temperaturvergleiches zugrundeliegende Arbeitshypothese nachzuprüfen, die besagt, daß der Wert von  $\Delta\vartheta_{i/B} = \vartheta_{U,i} - \vartheta_{U,B}$  unabhängig vom Wert  $\vartheta_{U,0}$  ist (s. auch Abschnitt 2.4). Falls sie zutrifft, müssen Materialien mit Unterschieden der Übergangstemperaturen  $\vartheta_U$  in der Spitzkerbprobe die gleichen Unterschiede bei den versprödungswirksamen Temperaturen in technischen Störstellen zeigen.

Bei der Störstelle LF konnte das untersuchte Material in zwei Gruppen,  $\vartheta_U > -23^\circ\text{C}$  und  $\vartheta_U \leq -23^\circ\text{C}$  zusammengefaßt werden. Die mittleren  $\vartheta_U$ -Werte, die zu den in den Übergangsbereich fallenden bauteilähnlichen Proben gehören, waren  $-18,5^\circ\text{C}$  und  $-32^\circ\text{C}$ , der Unterschied also ca. 13 grd. In Bild 5 sind die Werte der bleibenden Verformungen und der Bruch-Nennspannungen dieser beiden Materialgruppen mit verschiedenen Symbolen gekennzeichnet. Man erkennt, daß die Versuchswerte im Übergangsbereich sich ebenfalls in zwei Reihen ordnen, die um nahezu denselben Betrag wie die mittleren  $\vartheta_U$ -Werte ( $\Delta\vartheta_V \approx 12$  grd und  $\approx 13$  grd) auseinanderliegen.

Wendet man nach dieser Bestätigung die Hypothese auf die Ergebnisse an, um das unterschiedliche Sprödbbruchverhalten des in dieser Hinsicht nicht einheitlichen Versuchsmaterials zu eliminieren, und transformiert die Versuchsergebnisse auf ein gedachtes Versuchsmaterial mit  $\vartheta_{U,ISO} = 0^\circ\text{C}$ , so ergibt sich eine Darstellung entsprechend Bild 6. Hierzu wurde für jeden Versuch die Differenz zwischen der gemessenen Versuchstemperatur und der zu der entsprechenden Trennbruch-Ausgangsstelle gehörenden ISO-Spitzkerb-Übergangstemperatur gebildet. Auf diese Weise können alle Ergebnisse einer Störstellenart zusammen betrachtet werden.



**Bild 6**  
 Örtliche bleibende Dehnungen in Abhängigkeit von der Temperaturdifferenz  
 Walzrichtung : Parallel zur Probenlängsrichtung

Für die Störstelle Kn kann das Verhalten der bauteilähnlichen Proben mit verformungsarmen Brüchen im Übergangsbereich,  $-35$  grd  $< \Delta\vartheta_V \leq +15$  grd, bis auf den einen Wert bei  $\Delta\vartheta_V = -10$  grd sehr gut durch eine Gerade dargestellt werden. Für die Störstelle LF wird gleiches Verhalten in ihrem Übergangsbereich,  $-30$  grd  $< \Delta\vartheta_V \leq -10$  grd, angenommen und durch die für die betreffenden Punkte geltende Regressionsgerade gekennzeichnet. Nicht berücksichtigt wurde dabei der zu den Ausnahmen gehörende Versuchswert (s. Abschnitt 4.3) bei  $\Delta\vartheta_V = -25$  grd. Bei den anderen beiden Störstellen S und LSt stehen für die Darstellung im Übergangsbereich zu wenig Werte zur Verfügung, um in gleicher Weise vorzugehen. So ist der Verlauf durch Gerade dargestellt, deren Lage schätzungsweise angenommen wurde.

Die Abhängigkeit der Bruch-Nennspannung von der im je-

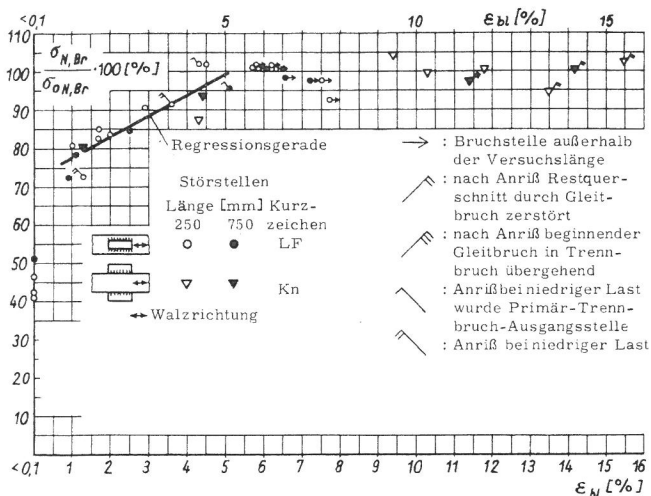


Bild 7  
Örtliche Bruch-Nennspannung in Abhängigkeit von der örtlichen bleibenden Dehnung  
Walzrichtung : Parallel zur Probenlängsrichtung

weiligen Fall möglich gewordenen bleibenden Dehnung in Spannungsrichtung, Bild 7, zeigt, daß mit dem Abfall der Bruch-Nennspannung gegenüber den Werten bei verformungsreichem Bruch zu rechnen ist, wenn die gegebenen Umstände nur noch bleibende Dehnungen von weniger als ca. 5 % zulassen. Für einen vollständigen Ausgleich der Spannungsspitzen waren mindestens ca. 5 % bleibende Dehnung erforderlich. – Bei diesen Zahlenangaben für die bleibende Dehnung ist aber zu beachten, daß es sich hier nur um interpolierte Werte einer über 20 mm Meßstrecke gemittelten Dehnung handelt. – Ließen die Umstände nur bleibende Dehnungen  $< 0,1\%$  zu, trat also verformungsloser Bruch auf, so ergaben sich Bruch-Nennspannungen, die bei 50 % und weniger derjenigen bei verformungsreichem Bruch lagen, und damit z.T. unter der im Zugversuch ermittelten Streckgrenze.

Für die Beurteilung des Spröbruchverhaltens liegen somit zwei kritische Temperaturwerte vor. Zum einen derjenige,  $(\vartheta_{Krit.})_1$ , unter der ein verformungsarmer Bruch ( $\epsilon_{bl} < \approx 5\%$ ) und damit die Gefahr verminderter Bruch-Nennspannungen zu erwarten ist, zum anderen derjenige,  $(\vartheta_{Krit.})_2$ , über der ein verformungsloser Bruch ( $\epsilon_{bl} < 0,1\%$ ) mit Bruch-Nennspannungen unter der Streckgrenze nicht eintritt.

Diese Werte kann man für die untersuchten Störstellen entsprechend dem Verlauf des Verformungsverhaltens im Übergangsbereich aus Bild 6 bei  $\epsilon_{bl} = 5\%$  und  $\epsilon_{bl} < 0,1\%$  entnehmen.

Unbeantwortet ist noch die Frage, welcher Abstand von diesen kritischen Werten, die aus dem mittleren Verhalten ermittelt werden können, einzuhalten ist, um sicher zu gehen, daß die Aussage auch für den Einzelfall gilt. Gesucht ist also diejenige Linie im Übergangsbereich, unter der mit bestimmter Aussagewahrscheinlichkeit  $W$  nur noch ein geringer Teil  $\epsilon\%$  aller möglichen Versuchswerte läge. Da im interessierenden Bereich im statistischen Sinne nur wenige Versuchswerte (für Kn 5, für LF 13 verformungsarme Brü-

che) zur Verfügung stehen, kann die Schätzung der Grenzlinien nur näherungsweise durchgeführt werden. Nimmt man an, daß die durch die Regressionsgerade gegebene Funktion das physikalische Gesetz exakt wiedergäbe und die Abweichungen der einzelnen Versuchsergebnisse von dieser Geraden zufällig und identisch für jedes  $\Delta\vartheta_V$  normalverteilt sind, so hat man es nur noch mit einer eindimensionalen Zufallsgröße zu tun, für die sich auf üblichem Weg, z.B. nach [22], ein Schätzwert für die  $\epsilon\%$ -Fraktile bestimmen läßt. Dieser Wert kann dann als Abstand einer entsprechenden Grenzgeraden von der Regressionsgeraden aufgefaßt werden. Für eine Aussagewahrscheinlichkeit von  $W = 95\%$  sind für die Störstellen Kn und LF die nach dieser Näherung ermittelten Grenzlinien für  $\epsilon = 1\%$  Ausfallwahrscheinlichkeit in Bild 6 eingetragen. Somit ergibt sich für die Störstelle Kn der Sicherheitsabstand vom mittleren Verhalten in der Größe von 6 grad und für die Störstelle LF in der Größe von 16 grad.

Der näherungsweisen Schätzung bei den Störstellen S und LSt wird folgende Überlegung zugrundegelegt:

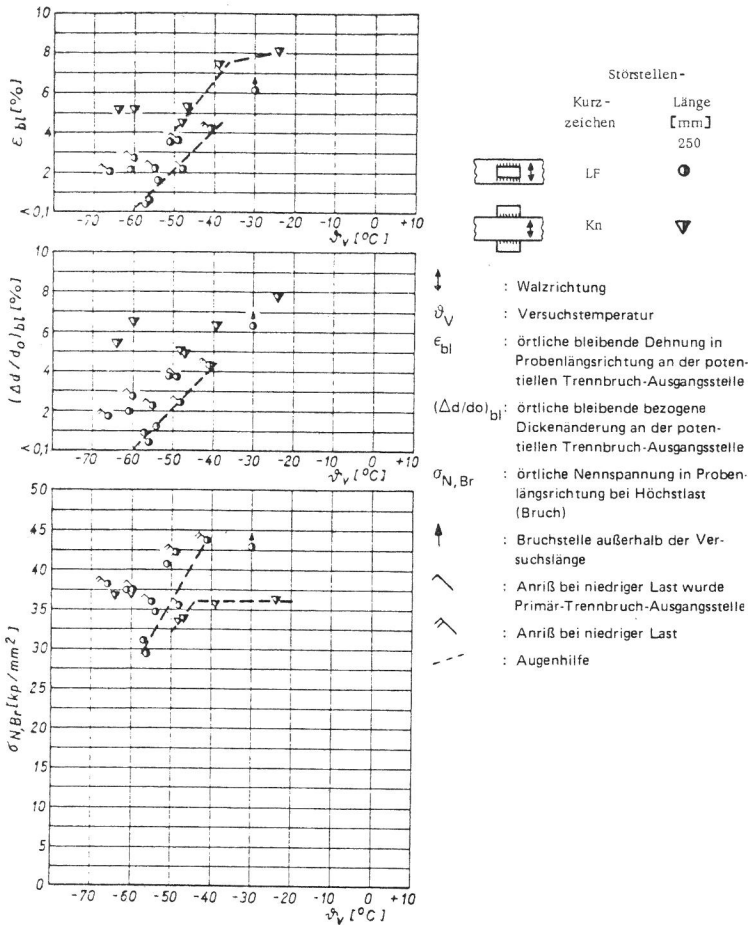
Versuche mit  $\epsilon_{bl} < 0,1$  liegen bei der Störstelle LF in ihrem Übergangsbereich nicht links von der Regressionsgeraden. Deswegen kann man annehmen, daß man sich auf der sicheren Seite befindet, wenn man für die Störstelle LSt die Gerade für den geschätzten mittleren Verlauf durch den Versuchspunkt mit  $\epsilon_{bl} < 0,1\%$  gehen läßt und die Grenzlinie für 1%-Ausfallwahrscheinlichkeit um 16 grad zu den höheren Temperaturen verschoben denkt. Bei dieser Störstelle sind größere Streuungen als bei der Störstelle LF nicht zu erwarten, da wegen der besseren konstruktiven Ausbildung eine gleichmäßigere Herstellung wahrscheinlicher ist.

Bei der Störstelle S muß man, um sicher zu gehen, annehmen, daß der eine gemessene Wert im Übergangsbereich auch auf der Grenzlinie für 99 % Ausfallwahrscheinlichkeit liegen könnte und deshalb als Sicherheitsabstand den doppelten Zahlenwert einsetzen. Da die Störstelle S in ihrem Verhalten mehr der Störstelle Kn ähnelt – keine verformungslosen Brüche in untersuchtem Bereich, sofern der Bruchausgang nicht in der Schweißnaht lag, und damit auch keinen Abfall der Bruch-Nennspannung unter den Wert der Streckgrenze, sondern in der Regel zunehmende Werte mit abnehmender Temperatur, Bild 4, – genügte hier der Sicherheitsabstand von  $2 \times 6 = 12$  grad. Da dieses aber kleiner als der einfache Wert der Störstelle LF wäre, wird auch hier der Wert von 16 grad empfohlen.

Für die Störstelle N liegt nur das Ergebnis eines Versuches vor, da sich herausstellte, daß es sich bei dem für weitere Versuche vorgesehenen Material um eine andere Stahlqualität handelt. Aufgrund dieses einen Versuches kann nur vermutet werden, daß die Störstelle N sich günstiger verhält als die Störstelle LSt, aber ungünstiger als die Störstelle S, Bild 4.

Die Ergebnisse der Versuche an bauteilähnlichen Proben mit Walzrichtung senkrecht zur Probenlängsrichtung sind in Bild 8 dargestellt.

Bei der Störstelle LF ist ein Abfall der bleibenden Verfor-



**Bild 8**  
 Örtliche bleibende Verformungen und Bruch-Nennspannungen  
 Störstellenarten: „Lasche nur mit Flankenkehlnaht (LF)“  
 „Knotenblech (Kn)“  
 Walzrichtung : Senkrecht zur Probenlängsrichtung

mungen und auch der Bruch-Nennspannungen in Abhängigkeit von der Versuchstemperatur deutlich im Übergangsbereich sichtbar. Dieser Bereich ist zum Gebiet höherer Temperaturen hin eindeutig begrenzt. Ein verformungsloser Bruch konnte für Temperaturen bis zu  $-66^{\circ}\text{C}$  hier nicht erzwungen werden, damit auch kein Abfall der Bruch-Nennspannungen auf Werte unter der Fließgrenze bei Raumtemperatur.

Bei der Störstellenart Kn konnte im untersuchten Temperaturbereich,  $-23^{\circ}\text{C}$  bis  $-64^{\circ}\text{C}$ , und bei der geringen Anzahl der zur Verfügung stehenden Proben der Abfall der bleibenden Verformungen nur am Anfang des Übergangsbereiches festgestellt werden. Die beiden bei tieferen Temperaturen untersuchten Proben zeigten zu große Verformungen im Verhältnis zu den erwarteten Werten. Eine Deutung der Ursache dafür konnte nicht gefunden werden. Die Bruchbilder und die Dehnungsmessungen während des Versuches geben keine Anhaltspunkte für Besonderheiten.

Um den etwaigen Einfluß der Zuordnung der Walzrichtung zur Probenlängsrichtung erkennen zu können, sind für die Störstellenarten LF und Kn die Ergebnisse der Versuche mit Walzrichtung parallel und senkrecht zur Probenlängsrichtung in Bild 9 zusammen dargestellt. Dabei wurde wieder zur Elimination des unterschiedlichen Spröbruchverhaltens des in dieser Hinsicht nicht einheitlichen Versuchsmaterials die

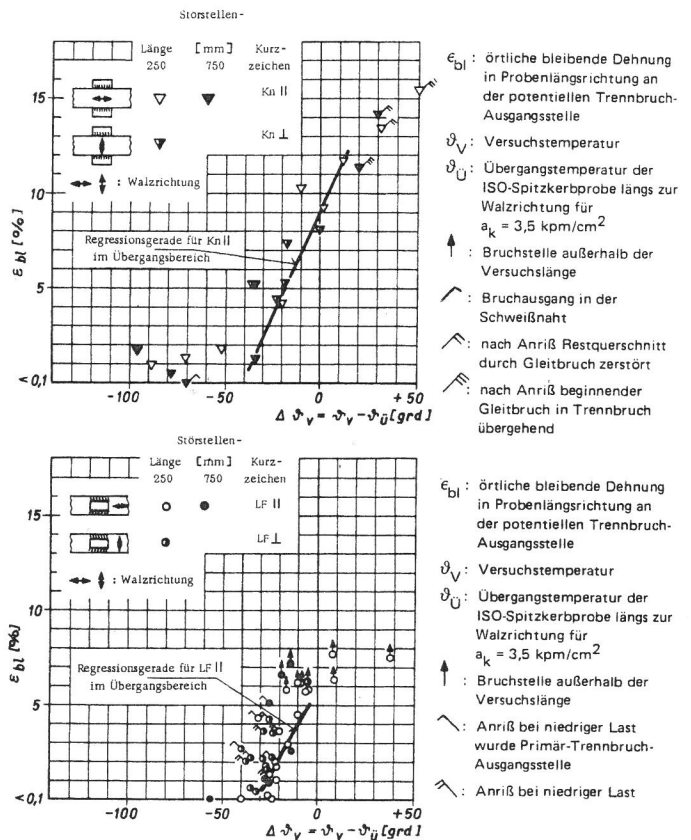
Differenz zwischen der gemessenen Versuchstemperatur und der zur entsprechenden Trennbruch-Ausgangsstelle gehörenden ISO-Spitzkerb-Übergangstemperatur aufgetragen.

Der Vergleich zeigt, daß die Störstellen mit der Walzrichtung senkrecht zur Hauptbeanspruchungsrichtung praktisch gleiches, auf keinen Fall aber ungünstigeres Spröbruchverhalten aufweisen als diejenigen, bei denen die Walzrichtung parallel zur Hauptbeanspruchungsrichtung verläuft.

### 3.5 Zum Versuch der Auswertung anderer veröffentlichter Versuchsergebnisse

Es wurde versucht, kritische Temperaturwerte ( $\vartheta_{\text{Krit}}$ )<sub>1,2</sub> für andere Störstellenarten, wie „mechanische Kerbe in sonst ungestörtem Blech“ oder „mechanische Kerbe in Schweißnahtnähe zusammengeschweißter Bleche“, aus veröffentlichten Ergebnissen von Versuchen an Proben mit bauteilähnlichen Abmessungen zu ermitteln. Damit sollten durch Differenzbildung zu den Übergangstemperaturen zugehöriger Kerbschlagbiegeproben als Bezugsstörstelle zusätzliche Werte für die Beurteilung von Stahl im Bauteil mittels der Methode des Temperaturvergleiches gewonnen werden. Dieses Bemühen mußte als zu wenig erfolgversprechend aufgegeben werden. Man erhält zu unsichere Werte.

Bei den dem Autor zur Kenntnis gelangten Versuchen – Quellenangaben umfassend in [23, 24] – wurde nämlich das Hauptaugenmerk auf die geringe Nennspannung beim



**Bild 9**  
 Vergleich der Abhängigkeiten der örtlichen bleibenden Dehnungen von der Temperaturdifferenz bei verschiedener Zuordnung Walzrichtung zur Probenlängsrichtung

Bruch infolge zusätzlicher Belastung gerichtet. Die Größe dieser Nennspannungen im Einzelfall ist jedoch gar nicht das Wesentliche. Beachtet werden muß vielmehr die Gefahr, daß Brüche bei geringen Nennspannungen auftreten können. Diese Gefahr wird aber in erster Linie angezeigt durch die Größe der infolge der Umstände möglichen, an der potentiellen Trennbruch-Ausgangsstelle auftretenden bleibenden Verformung. Ist diese kleiner als ein bestimmter Grenzwert oder gar Null, so kann, muß aber nicht, schon bei niedriger zusätzlicher Belastung ein Bruch entstehen.

Oder anders ausgedrückt:

Bricht eine Probe bei einer bleibenden Verformung, die kleiner als der Grenzwert ist, aber unter normal hoher Nennspannung infolge äußerer Belastung, so bedeutet das nur, daß man in diesem speziellen Einzelfall andere die Spannungshöhe beeinflussende Beanspruchungen wie Eigen- spannungen oder Spannungen aus ungewollten Abweichungen von der Nennbelastung nicht vorhanden waren. Es bleibt aber die Gefahr, daß in anderen Einzelfällen unter den gegebenen Umständen Brüche mit niedriger Nennspannung im Bauwerk auftreten können.

Deswegen muß also das Spröbruchverhalten eines Materials in einer Störstelle mit Hilfe der unter den jeweiligen Umständen möglichen bleibenden Verformung an der potentiellen Trennbruch-Ausgangsstelle dieser Störstelle beurteilt werden.

Veröffentlichungen von Ergebnissen dieser Art konnten aber nicht gefunden werden. In den Fällen, in denen bleibende Verformungen mitgeteilt werden, sind diese nicht nahe den Trennbruch-Ausgangsstellen gemessen worden, sondern ihnen liegen größere, meist über die ganze Versuchslänge reichende Meßlängen zugrunde. Dann aber sind die Meßwerte im wesentlichen nur simultan zu den Bruch-Nennspannungen, da der Anteil der örtlichen plastischen Verformung an der Trennbruch-Ausgangsstelle nur klein ist gegenüber der Summe der Verformungen über die große Meßlänge. Außerdem ist der untersuchte Temperaturbereich meist nicht weit genug, so daß Anfang und/oder Ende des Übergangsbereiches nicht sicher zu erkennen sind. Auch werden für die als Bezugsstörstelle hier verwendete ISO-Spitzkerbprobe nur ein Wert, für alle Proben gelten sollend, oder wenige, den Proben nicht zugeordnete Werte angegeben. Die Ergebnisse dieser Versuche sind also zur Ermittlung bestimmter sicherer Werte für die hier gesuchten Temperaturdifferenzen nicht brauchbar.

Aus dem Vorläufer [16] zu den hier berichteten Versuchsreihen läßt sich folgendes entnehmen:

Untersucht wurde die Störstellenart „zur Trägerrichtung parallellaufende Schweißnaht im Zugflansch eines Biegeträgers“. Die Zugflansche waren aus 20 mm bzw. 40 mm dickem Breitflachstahl, 200 mm breit, hergestellt. Verwendet wurde ein Stahl, bezeichnet mit MR St 37 - 3, mit einer Übergangstemperatur der ISO-Spitzkerbprobe von

$\vartheta_{Ü,ISO} = -1$  bis  $-6^{\circ}C$ , im Mittel  $-4^{\circ}C$  bei 6 Werten

und einem mittleren Korndurchmesser um  $28 \cdot 10^{-3}$  mm und  $36 \cdot 10^{-3}$  mm.

Bruchausgangsstelle war die Wurzel der Schweißnaht.

Unter der Annahme, daß auch für diese Störstellenart ein Sicherheitsabstand in der Größe von 16 grd gegenüber dem aus dem mittleren Verhalten sich ergebenden kritischen Temperaturwert ausreicht, erhält man mit

$$(\Delta\vartheta)_{1,2} \approx [(\vartheta_{krit})_{1,2} - \vartheta_{Ü,ISO}]_{mittel} + 16 \text{ grd}$$

$$(\Delta\vartheta)_1 \approx -14 \text{ grd}$$

$$(\Delta\vartheta)_2 < -60 \text{ grd}$$

Ein Unterschied zwischen dem 20 mm und 40 mm dicken Breitflachstahl-Material ist für die Werte der Temperaturdifferenz aus den Versuchsergebnissen nicht abzulesen.

### 3.6 Schlußfolgerungen

Für den Baustahl R St 37 - 2 N sind bei Blechdicken um 30 mm in Abhängigkeit von der konstruktiven Ausbildung folgende kritische Temperaturwerte zu beachten:

$\vartheta < (\vartheta_{krit})_1$  : Verformungsarmer Bruch und Gefahr verminderter Bruch-Nennspannungen infolge äußerer Belastung sowie verminderter Arbeitsaufnahme des Bauteiles bis zum Bruch sind zu erwarten.

$\vartheta > (\vartheta_{krit})_2$  : Verformungsloser Bruch mit Bruch-Nennspannung infolge äußerer Belastung unter der bei Raumtemperatur im Zugversuch gemessenen Streckgrenze sowie nur elastische Arbeitsaufnahme der Bauteile bis zum Bruch sind nicht zu erwarten.

wobei

$$(\vartheta_{krit})_{1,2} = \vartheta_{Ü,ISO} + (\Delta\vartheta)_{1,2}$$

mit

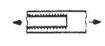

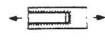
$\vartheta_{Ü,ISO}$  : Übergangstemperatur der ISO-Spitzkerbprobe längs zur Walzrichtung für  $a_K = 3,5 \text{ kpm/cm}^2$

$\Delta\vartheta$  : Temperaturdifferenz nach Tabelle 2

Voraussetzung für die Anwendung der kritischen Temperaturwerte ist, daß die Schweißnähte einwandfrei sind, so daß der Bruchausgang nur in der Wärmeeinflußzone des Grundmaterials am geometrischen Übergang von Schweißnaht zum Grundmaterial zu erwarten ist.

### 3.7 Laufende und geplante Versuche

Dem Einfluß der Blechdicke auf die Differenz zwischen den Übergangstemperaturen der Störstelle im Bauteil und der Bezugsstörstelle wird z.Zt. an Versuchen mit den Störstellen „Lasche nur mit Flankenkehlnaht (LF)“ und „Knotenblech (Kn)“ nachgegangen. Hierbei werden zusätzlich zu den bisher durchgeführten Versuchen mit 30 mm dicken Ble-

	$(\Delta\theta)_1$ grad	$(\Delta\theta)_2$ grad
 <p>Hauptbeanspruchungsrichtung;</p> <p>Blechdicke 30 mm</p> <p>angeschweißte Querschnittsverstärkung mit sprungförmigem Übergang geschweißter Anschluß mit endenden Kehlnähten parallel zur Hauptbeanspruchungsrichtung</p>	+ 12	- 15
 <p>Hauptbeanspruchungsrichtung;</p> <p>Blechdicke 30 mm</p> <p>in Blechebene mit K-Naht angeschweißter Querschnittsprung oder Anschluß</p>	- 12	< - 90
 <p>Hauptbeanspruchungsrichtung;</p> <p>Blechdicke 30 mm</p> <p>angeschweißte Querschnittsverstärkung mit allmählichem Übergang</p>	- 40	- 66

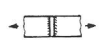
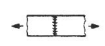

	$(\Delta\theta)_1$ grad	$(\Delta\theta)_2$ grad
 <p>Hauptbeanspruchungsrichtung;</p> <p>Blechdicke 30 mm</p> <p>geschweißter Anschluß mit Kehlnähten senkrecht zur Hauptbeanspruchungsrichtung</p>	$\leq - 40$ $> - 85$	$\leq - 66$ $> - 110$
 <p>Hauptbeanspruchungsrichtung;</p> <p>Blechdicke 30 mm</p> <p>Stumpfstoß mit X-Naht senkrecht zur Hauptbeanspruchungsrichtung</p>	- 85	< - 110
 <p>Hauptbeanspruchungsrichtung; (nach [16], siehe Abschnitt 3.5)</p> <p>Blechdicke 20 mm und 40 mm</p> <p>V-Naht im Blech parallel zur Hauptbeanspruchungsrichtung</p>	- 14	< - 60

Tabelle 2  
Temperaturdifferenz zur Bestimmung der kritischen Temperaturwerte

chen solche mit 20 mm und 40 mm Dicke durchgeführt.

Die Dicke wurde vorläufig nach oben mit 40 mm begrenzt, entsprechend der im normalen Stahlbau üblichen größten

Dicke. (Mit der Versuchseinrichtung könnten auch noch Proben mit Blechdicken bis 60 mm aus St 37 untersucht werden.)

Geplant sind weiterhin Vergleichsversuche voraussichtlich mit den Störstellen LF und Kn und 30 mm dicken Blechen aus Werkstoff anderer Güte, z.B. St 52.

#### 4. Bemerkenswerte Beobachtungen bei den durchgeführten Untersuchungen und Hinweise zu ihren Deutungen

##### 4.1 Bruchausgang in der Schweißnaht

Versuche mit Bruchausgang in der Schweißnaht ergaben sich je einer bei den Störstellen Kn und LSt und zwei bei der Störstelle S, Bild 4, Symbol  $\wedge$ , und zwar

Störstelle	Probe Nr.	Anlage Nr.
Kn	11/1.6.3	49
LSt	8/1.2.5	58
S	16/1.7.2	60
	19/1.7.6	64

Diese Versuche wiesen praktisch verformungslose Brüche,  $\epsilon_{bl} \leq 0,1 \%$  und bis auf einen (19/1.7.6) auch verminderte Bruch-Nennspannungen auf.

Die Fotos der Bruchquerschnitte zeigen deutlich den Bruchausgang in der Schweißnaht.

Bei einer Wertegruppe einer bestimmten Temperatur-Belastungs-Kombination, bei der noch kein Anriß an einer der normalen potentiellen Trennbruch-Ausgangsstelle erfolgt, kann an anderer Stelle ein Bruchausgang initiiert werden, wenn dort eine ungewollte Störstelle vorhanden ist, die gegenüber der betrachteten bei gleicher Temperatur geringeres plastisches Verformungsvermögen bis zum Bruch hat. Dieses kann z.B. der Fall sein bei einem Einschluß, bei dem das umgebende Material im Verhältnis zu seinen Abmessungen sehr dick ist.

Bis zum Bruchbeginn an der ungewollten Störstelle brauchen an den potentiellen Trennbruch-Ausgangsstellen der untersuchten Störstelle noch keine plastischen Verformungen aufgetreten zu sein. Die schlagartige Änderung des Beanspruchungszustandes kann außerdem einen Trennbruch erzwingen, der auch in dem Material weiterläuft, das sonst unter normalen Umständen nicht verformungslos gebrochen wäre, Versuch 11/1.6.3, Anlage 49.

Erwähnenswert sind auch die Risse parallel zur Hauptbeanspruchungsrichtung durch die aufgeschweißten Laschen der Störstelle LSt im Versuch 8/1.2.5, deren Auftreten nicht gedeutet werden konnte.

##### 4.2 Doppelbrüche

Bei den Störstellen LF und Kn traten auch Doppelbrüche, d.h. zwei Trennbruchflächen, an jedem Ende der Störstelle

eine, auf, bzw. es zeigten sich Ansätze zu Doppelbrüchen. Bei den letzteren sind die durch die ganze Blechdicke gehenden Risse deutlich zu erkennen, die vom Ort einer der potentiellen Trennbruch-Ausgangsstellen ausgehend nach außen (Störstelle LF) bzw. nach innen (Störstelle Kn) verlaufen.

Doppelbrüche bzw. Ansätze dazu sind zu sehen: Für die Versuche mit Walzrichtung parallel zur Probenlängsrichtung bei der Störstelle LF bei

$\Delta\vartheta_v$ grad	$\epsilon_{bl}$ %	Probe Nr.	Anlage Nr.
- 10	4,5	1/1.1.3	13 a und b
- 15	2,9	3/1.1.5	15
- 20	3,6	3/1.1.7	17
- 21	1,0	20/1.1.11	21
- 22	2,0	20/1.1.13	23
- 27	1,7	22/1.1.16	26
- 31	4,3	22/1.1.18	28
- 40	< 0,1	6/1.1.9	19

und bei der Störstelle Kn bei

$\Delta\vartheta_v$ grad	$\epsilon_{bl}$ %	Probe Nr.	Anlage Nr.
+ 12	11,8	5/1.3.6	43
+ 2	9,3	4/1.3.2	39
- 10	10,3	5/1.3.5	42
- 89	1,0	8/1.3.9	46 a und b

Für die Versuche mit „Walzrichtung senkrecht zur Probenlängsrichtung“ bei der Störstelle LF bei

$\Delta\vartheta_v$ grad	$\epsilon_{bl}$ %	Probe Nr.	Anlage Nr.
- 26	1,6	24/5.1.2	67
- 28	3,6	27/5.1.5	70
- 28	2,1	24/5.1.1	66
- 35	2,2	28/5.1.11	76
- 38	2,0	25/5.1.9	74 a und b
- 40	2,7	28/5.1.12	77

und bei Störstelle Kn bei

$\Delta\vartheta_v$ grad	$\epsilon_{bl}$ %	Probe Nr.	Anlage Nr.
- 22	4,5	23/5.3.2	79
- 34	5,2	23/5.3.1	78 a und b
- 35	5,2	26/5.3.6	83

Diese Doppelbrüche dürften ohne das Phänomen der Werkstoffzerstörung durch sich überlagernde Spannungswellen kaum erklärbar sein.

### 4.3 Frühe Anrisse

Bei einigen Versuchen mit der Störstellenart LF traten an potentiellen Trennbruch-Ausgangsstellen Risse auf, bevor die größte Last erreicht war, im folgenden als frühe Anrisse bezeichnet. Dieses kann man anhand der Bruchbilder an der besonderen Ausbildung einer stehengebliebenen Reißfront um den Ort einer potentiellen Trennbruch-Ausgangsstelle erkennen und/oder anhand der während des Versuches gemessenen Dehnung nahe der potentiellen Trennbruch-Ausgangsstelle, deren Anstieg in einem bestimmten Lastintervall deutlich zurückblieb als Folge der Entlastung durch den Anriß.

Ein Anriß entsteht, wenn die Spannung senkrecht zur Reißfläche einen bestimmten Grenzwert, die Trennfestigkeit, erreicht, unabhängig davon wie die verschiedenen spannungserzeugenden Ursachen anteilig an der Spannungshöhe beteiligt sind.

Hat man an einer Stelle einen hohen Spannungswert infolge eines örtlich begrenzten Eigenspannungszustandes, so liefert schon eine niedrige äußere Belastung, zumal wenn sie an der Stelle verhältnismäßig große Spannungsspitzen verursacht, den zusätzlichen Spannungsbetrag, der zum Erreichen der Trennfestigkeit und damit zum Anriß führt. Über den Gesamtquerschnitt des Bauteils gesehen ist in diesem Fall jedoch die vor dem Anriß gespeicherte Energie nur gering. Der kleine Energiebetrag, der beim Anriß durch den Abbau des örtlichen Eigenspannungszustandes frei wird, kann unter gegebenen günstigen Umständen von dem Restquerschnitt aufgefangen werden. Dabei breitet sich die Reißfläche strahlenförmig vom Reiß-Ausgangspunkt ausgehend, soweit aus, bis die Reißfront in ein Material dringt, dessen Vorgeschichte und Spannungszustand im Zusammenhang mit der Art des an der Reißfront sich aufbauenden Spannungszustandes unter den gegebenen Umständen wie Temperatur und Beanspruchungsgeschwindigkeit an der Reißfront noch genügend große plastische Verformung erlauben, um das Ansteigen der Spannungsspitzen in der Reißspitze auf den Wert der Trennfestigkeit zu vermeiden.

Gleichzeitig muß sich der Riß dabei soweit öffnen, daß sich in seiner Umgebung die Verformungen genügend ändern können, damit der vor dem Anriß von der späteren Reißfläche übertragene Beanspruchungsanteil nun vom Restquerschnitt übernommen werden kann.

Der Ort der hohen Spannungsspitzen ist somit von der Stelle mit Verformungsfähigkeit vermindender Vorgeschichte des Materials und großer Räumlichkeit des Spannungszustandes verlegt in einen weniger gefährlichen Bereich, in dem meist noch genügend plastisches Verformungsvermögen vorhanden ist, um auch eine Erhöhung der äußeren Belastung ohne Weiterreißen zu ertragen. Dabei kann der Bereich der plastischen Verformungen an der zum Stillstand gekommenen Reißfront sich so vergrößern, daß er später im Bruchbild dem bloßen Auge schon durch die dunklere Färbung auffällt.

Ein früher Anriß kann also gegebenenfalls eine, hinsichtlich des Spröbruchverhaltens gefährliche Störstelle in eine weniger gefährliche verwandeln.

Je nach den Umständen im Einzelfall, an welcher Stelle das plastische Verformungsvermögen bei Belastungserhöhung zuerst erschöpft ist, wird an der Reißfront ein Weiterreißen oder an der nächstgefährdeten potentiellen Trennbruch-Ausgangsstelle ein neuer Anriß verursacht, wenn die entsprechenden Spannungsspitzen erneut die Werte der Trennfestigkeit erreichen. Gleichzeitig sind die Spannungen und elastischen Verformungen, also ist die gespeicherte Energie, im gesamten Querschnitt größer, auch das Material im gesamten Querschnitt ist stärker plastisch verformt und somit ist die Wahrscheinlichkeit für einen Trennbruch des gesamten Querschnittes größer als zum Zeitpunkt des frühen Anrisses.

Anrisse vor Erreichen der Höchstlast konnten deutlich bei Versuchen mit der Störstellenart LF erkannt werden in den Fällen

Walzrichtung: Parallel zur Probenlängsrichtung

$\Delta\vartheta_v$ grad	$\epsilon_{bl}$ %	$\sigma_{N,R}/\sigma_{N,Br}$	Probe Nr.	Anlage Nr.
1. - 20	3,6	nicht gem.	3/1.1.7	17
2. - 25	1,3	21,0	3/1.1.6	16
3. - 25	5,1	16,4	10/1.4.5	35
4. - 31	4,3	14,6	22/1.1.18	28

Walzrichtung: Senkrecht zur Probenlängsrichtung

5. - 23	2,2	11,3	25/5.1.8	73
6. - 25	4,2	67,0	25/5.1.6	71
7. - 28	3,6	nicht gem.	27/5.1.5	70
8. - 35	2,2	17,2	28/5.1.11	76
9. - 38	2,0	nicht gem.	25/5.1.9	74
10. - 40	2,7	46,2	28/5.1.12	77

Außer in den Fällen 4 und 7 kann man diese frühen Anrisse schon an der linsenförmigen Reißfläche auf den Bruchbildern erkennen.

Im Falle 4 ist es nur aus dem Verlauf der Dehnungen sicher deutbar. Hier kann es sich nur um einen kleinen, d.h. örtlich sehr begrenzten Anriß gehandelt haben. Zum einen ist nämlich die Reißfläche auf dem Bruchbild nicht deutlich er-



kennbar und zum anderen sind die Werte der bleibenden Dehnungen – gemessen über 20 mm Meßlänge – nach dem Bruch an dieser Stelle gleich denen an den anderen potentiellen Trennbruch-Ausgangsstellen. In den anderen Fällen mit deutlich größerer Reißfläche sind die Werte der bleibenden Dehnungen an den Reißstellen dagegen kleiner als an den anderen potentiellen Trennbruch-Ausgangsstellen.

Im Falle 7 liegt der frühe Anriß nicht in der späteren Bruchfläche, sondern etwas dahinter. Man erkennt dieses deutlich auf dem Bild, das den Bruchquerschnitt von oben zeigt.

Die Veränderung von Ort und Art einer Störstelle infolge Anriß am Ort der potentiellen Trennbruch-Ausgangsstelle der ursprünglichen Störstelle kann die Beanspruchungsumstände so beeinflussen, daß die potentielle Trennbruch-Ausgangsstelle der neu entstandenen Störstelle nicht Bruchausgang für einen Trennbruch des gesamten Querschnittes zu werden braucht, sondern daß der Bruch dann von einem bis dahin unbeschädigt gebliebenen Bereich einer anderen potentiellen Trennbruch-Ausgangsstelle der Störstelle ursprünglichen Typs ausgehen kann.

So lag in den Fällen 1, 2, 6, 7 und 9 die primäre Ausgangsstelle für den späteren Trennbruch des gesamten Querschnittes an einem anderen Ort, während bei den anderen der Anriß auch primäre Ausgangsstelle für den Trennbruch war. Um auch für den Fall, in dem der Anriß mit deutlich größerer Reißfläche primäre Ausgangsstelle für den Trennbruch wurde, einen vergleichbaren Wert der bleibenden Dehnung für die Versuchsauswertung zu bekommen, ist der entsprechende Wert derjenigen potentiellen Trennbruch-Ausgangsstelle genommen worden, die der Reißfront am nächsten liegt.

Die bleibenden Verformungen und auch die Bruch-Nennspannungen dieser Versuche zeigen deutlich, Bilder 5 und 8 bzw. 6 und 9 Symbole  $\wedge$  und  $\wedge$ , daß ein Reiß, entstanden an einer Störstelle z.B. bei niedriger äußerer Belastung, hinsichtlich des Spröbruchverhaltens eines Bauteils weniger gefährlich sein kann als die unversehrte Störstelle selbst.

Bei den Versuchen mit der Störstellenart Kn traten an potentiellen Trennbruch-Ausgangsstellen zum Teil ebenfalls Anrisse vor Erreichen der größten Last auf. Man kann diese an dem Störstellenquerschnitt noch sehen, der nicht Bruchquerschnitt wurde. Im Bruchquerschnitt selbst konnte jedoch nie ein größerer spröder Anriß mit zum Stillstand gekommener Reißfront wie bei der Störstellenart LF erkannt werden. In engster Umgebung des Trennbruchausganges ist vielmehr manchmal eine faserartige Struktur zu sehen, die darauf hindeutet, daß dem Bruch des Gesamtquerschnittes eine auf engem Bereich begrenzte Zerstörung nach dem Gleitbruchtyp vorausgegangen ist.

#### 4.4 Unterschiedliches grundsätzliches Verhalten der Störstellen Kn und S zu den Störstellen LF und LSt

Bei den Störstellen „Lasche nur mit Flankenkehlnaht“, (LF), und „Lasche mit Flanken- und Stirnkehlnaht“, (LSt), traten verformungslose Brüche ( $\epsilon_{bl} < 0,1\%$ ) unter bestimmten Temperaturwerten mit Bruch-Nennspannungen kleiner als die bei Raumtemperatur am Zugstab gemessene Streckgrenze auf. Dieses konnte bei den Störstellen „Knotenblech“, (Kn), und „Stumpfstöß“, (S), im Bereich untersuch-

ter Temperaturen bis herunter zu  $-130^{\circ}\text{C}$  bzw.  $-150^{\circ}\text{C}$  nicht beobachtet werden, sofern der Bruchausgang nicht in der Schweißnaht lag. Ein Vergleich des Verhaltens der Störstellen hinsichtlich der Abhängigkeit der bleibenden Dehnungen und der Bruch-Nennspannungen von der Versuchstemperatur zeigt deutlich diesen Unterschied im grundsätzlichen Verhalten, Bilder 4 und 5.

Besonders überschaubar lassen dieses die Ergebnisse der Versuche mit der Störstelle Kn erkennen. In einem bestimmten Temperaturbereich ist, wie auch bei den anderen Störstellen, ein starker Abfall der bleibenden Verformung mit abnehmender Temperatur vorhanden. Jedoch reicht dieser Abfall nicht bis zu Werten  $< 0,1\%$ , sondern endet bei Werten zwischen  $1\%$  und  $2\%$ . Entsprechend fallen auch die Bruch-Nennspannungen nicht auf Werte ab, die unter der Streckgrenze liegen. Mit abnehmender Temperatur steigen sie wieder an bis auf Werte größer als die Bruch-Nennspannungen bei verformungsreichen Brüchen dieser Störstelle, bei der Störstelle S sogar auf Werte größer als die am Zugstab bei Raumtemperatur gemessene Zugfestigkeit.

Die Ursache hierfür wird im Zusammenwirken von Erhöhung der Streckgrenze und der Trennfestigkeit bei abnehmender Temperatur mit dem quasi ebenen Spannungszustand an diesen Störstellen bis zum Beginn des Fließens gesehen.

Bei dieser Störstelle mit dem quasi ebenen Spannungszustand ohne räumliche geometrische Versteifung kann das Material erst verhältnismäßig ungehindert zu fließen beginnen, da senkrecht zu den seitlichen Oberflächen die Verformungen nicht behindert werden. Erst ab einer bestimmten Größe der plastischen Verformungen wird die Störstelle als solche durch Behinderung der weiteren plastischen Verformungen wirksam. Dadurch wurden auch bei sehr tiefen Temperaturen an den Trennbruchausgangsstellen immer noch plastische Verformungen in der Größenordnung von  $10\%$  gemessen. Zu erwarten ist, daß diese plastischen Verformungen nicht mehr auftreten werden, wenn die Temperaturen in die Nähe der Werte kommen, bei denen das Material bei einachsigen Zug verformungslos bricht.

Während also bei den Störstellen LF und LSt die Verhältnisse infolge der räumlichen Wirkung der Störstelle bewirken, daß der Übergangsbereich direkt in einen verformungslosen Bereich mit  $\epsilon_{bl} < 0,1\%$  und  $\sigma_{N,Br} < \beta_s$  führt, ist bei der Störstelle Kn – und vermutlich auch bei der Störstelle S – auch bei Temperaturen unterhalb des Übergangsbereiches immer erst noch eine bestimmte plastische Verformung erforderlich, um die bei der entsprechenden Temperatur zum Trennbruch erforderlichen Beanspruchungsverhältnisse zu erzeugen. Dadurch werden die Spannungsspitzen in Hauptbeanspruchungsrichtung soweit ausgeglichen, daß sich für die Bruch-Nennspannung unter Berücksichtigung der mit fallender Temperatur steigenden Streckgrenze und Trennfestigkeit keine Werte  $< \beta_s$  ergeben, sondern daß die Werte wieder ansteigen.

Ähnliches Verhalten zeigt auch der Verlauf der Netto-Nennspannung 400 mm breiter mit mechanischen Randkerben versehener Blechstreifen unter Zugbeanspruchung, [25] Fig. 2.

## 5. Proben, Versuchseinrichtung und Versuchsdurchführung

### 5.1 Einzelheiten zur Probenherstellung und Zuordnung der Proben für die Werkstoffkontrollversuche

Die bauteilähnlichen Proben werden immer je drei aus einem Blech mit 1,5 m Breite und entsprechender Länge herausgebrannt.

Ihre Abmessungen können dem Bild 1, Einzelheiten zum Schweißen den Anlagen 1 und 2 und weitere Einzelheiten der Herstellung dem Abschnitt 3.2 entnommen werden. Aus dem Restmaterial an einem Ende der Bleche stammt das Material für die Querschnittsversteifungen. Das übrige steht für etwaige spätere Versuche an Laborproben mit anderen Bezugsstörstellen zur Verfügung, falls die Entwicklung der Normen und Richtlinien zur Klassifizierung der Stähle dieses erforderlich macht.

Die Proben für die Werkstoffkontrollversuche zur Bestimmung der Übergangstemperatur der ISO-Spitzkerbprobe, der Werkstoffkennwerte aus dem Zugversuch, der Korngröße und der nichtmetallischen Einschlüsse werden aus dem Material geschnitten, das beim Herausbrennen der Kontur im Bereich der Versuchslänge abfällt. Auf diese Weise liegen vor allem die Kerbschlagbiegeproben möglichst nahe an den potentiellen Trennbruch-Ausgangsstellen. Die Späne für die chemische Analyse werden jeweils, gleichmäßig über den Probenquerschnitt verteilt, 20 mm bis 40 mm hinter dem Bruchquerschnitt entnommen.

Die Zuordnung der Entnahmestellen für die Werkstoffkontrollversuche zur Lage der bauteilähnlichen Proben im Blech ist schematisch auf Anlage 3 dargestellt.

Die 15 mm dicken Rohlinge für die ISO-Spitzkerbprobe werden so aus den Blechen herausgearbeitet, daß eine ihrer Seiten mit der Blechoberfläche zusammenfällt. Die Kerbrichtung läuft parallel zur Blechdickenrichtung, also senkrecht zur Blechoberfläche. Die Dicke der Zugstäbe ist gleich der Blechdicke.

### 5.2 Versuchseinrichtung und Versuchsdurchführung

Die Versuche an den bauteilähnlichen Proben werden in ei-

ner besonders dafür zusammengebauten Zugeinrichtung durchgeführt, Anlage 4. Diese ist auf dem Aufspannfeld in der Prüfhalle der Abteilung Bauwesen der BAM montiert.

Die meisten ihrer Einzelteile passen in das vorhandene Baukastensystem für Aufbauten von Prüfeinrichtungen auf dem Aufspannfeld. Ein großer Teil konnte sogar dem Lagerbestand entnommen werden. So wird vermieden, daß nach Beenden dieser besonderen Versuche eine große kostspielige Anlage brachliegt.

Vier hydraulische Arbeitszylinder erzwingen über Querhäupter, Traversen und Haltebleche die Verformung in Probenlängsrichtung, Anlage 5. Sie können dabei insgesamt bis zu 800 Mp belastet werden. Die größte erzwingbare Längenänderung der Probe beträgt 720 mm. Sie kann allerdings nur in vier Stufen mit Zwischenentlastungen erreicht werden. Die Proben werden zwischen den Halteblechen mit Steckbolzen aus vergütetem Stahl gehalten. Diese Bolzen sind auf der Seite, an der die Probe anliegt, konisch. Sie werden wechselseitig so weit hineingetrieben, daß alle Bolzen von vornherein gleichzeitig anliegen. Es ist möglich, Proben mit einer stufenweise veränderlichen Prüflänge bis zu 1230 mm und einem Querschnitt bis zu  $(60 \cdot 500) \text{ mm}^2$  einzubauen. Dazu können die Haltebleche in 8-cm-Stufen gegenüber den Traversen versetzt werden. Die Verbindung zwischen Traversen und Halteblechen besteht aus hochfesten Schrauben, die vorgespannt werden.

Die beim Bruch der Probe freiwerdende Energie treibt die zusammengeschraubten Querhäupter, Traversen und Haltebleche zusammen mit dem Probenbruchstück in Probenlängsrichtung auseinander. Diese Gleitbewegung wird durch Bahnen geführt, die an dem Aufspannfeld befestigt sind. Die Bewegung ist begrenzt durch Prellblöcke. Gegen diese prallen die an den Traversen befestigten Puffer. Hierbei wird etwa 2/3 der Energie durch Reibung in den Puffern dem Bewegungsvorgang entzogen. Das Rückprallen verhindert eine Keilklemmvorrichtung. Ab einer bestimmten Querhauptstellung (Puffer berühren Prellblock) beginnen hierzu Gewichte über Draht und Rolle, Keile in die Klemmstellung zu ziehen.

Im Bereich der Prüflänge umgibt ein Kühlbehälter die Probe, Anlage 6. Das gasförmige Kühlmittel wird von oben in den Kühlbehälter eingeblasen und von unten abgesaugt. Ein regelbarer Ventilator erzwingt dazu Kühlgas-Umströmgeschwindigkeiten an der Probe bis zu 10 m/s. Für Versuchstemperaturen bis zu ca.  $-75^{\circ}\text{C}$  wird Kohlendioxidgas verwendet. In einem Wärmetauscher wird dieses Gas meanderförmig über große, mit festem  $\text{CO}_2$  bedeckte Flächen geleitet. So wird es immer wieder vor Eintritt in den Kühlbehälter auf die tiefstmögliche Temperatur abgekühlt. Die Versuchstemperatur kann geregelt werden durch die Umlaufgeschwindigkeit des Ventilators und durch Öffnen und Schließen eines Bypasses, durch den ein Teil des Kühlgases unter Umgehen des Wärmetauschers strömen kann. Hiermit kann die Versuchstemperatur auf  $\pm 1$  grad konstant gehalten werden. Für Versuchstemperaturen unter ca.  $-75^{\circ}\text{C}$  wird in den Gasstromlauf zusätzlich durch Düsen flüssiger Stickstoff eingespritzt. Auch hierbei konnten die Versuchstemperaturen auf  $\pm 1$  grad konstant gehalten werden [26]. Die tiefste Versuchstemperatur betrug  $-155^{\circ}\text{C}$ . Sie war nach 100 Minuten Kühldauer erreicht<sup>1)</sup>.

Die Temperatur der bauteilähnlichen Probe wird mittels Thermolemente gemessen. Als maßgebend angesehen und als Versuchstemperatur  $\vartheta_v$  bezeichnet wird der am Bruchquerschnitt gemessene Wert bzw. bei Versuchen mit Bruch außerhalb der Versuchslänge das Mittel der an den beiden potentiellen Trennbruch-Querschnitten gemessenen Werte. Die Temperaturdifferenz über die Probenbreite und Probenstärke ist weniger als 1 grad. Die Temperaturverteilung über die Versuchslänge ist an einigen Beispielen auf der Anlage 7 zu sehen.

Belastet wird zügig mit ca. 4 bis 6 ( $\text{kp}/\text{mm}^2$ )/min, bis das Ansteigen der Temperatur an den potentiellen Trennbruch-Querschnitten ein Fließen über größere Bereiche anzeigt. Bis zu diesem Belastungsniveau werden nach jeweils 2 bis 2,5  $\text{kp}/\text{mm}^2$  Belastungsanstieg die Dehnungen an den potentiellen Trennbruch-Ausgangsstellen gemessen. Nach dem Beginn des Fließens über größere Bereiche erfolgt die Belastung in Stufen von ebenfalls 2 bis 2,5  $\text{kp}/\text{mm}^2$ . Die Last wird erst dann über den Wert der jeweiligen Laststufe weiter gesteigert, wenn die vorgesehene Versuchstemperatur an den potentiellen Trennbruch-Querschnitten wieder erreicht ist. Die durch den Widerstand der Probe entstehende

Gesamtkraft in Probenlängsrichtung wird mit Hilfe von Dehnungsmeßstreifen über die Verformung der Haltebleche registriert. Daraus kann die Nennspannung, bei der Bruch eintritt, ermittelt werden, sofern die durch Biegen infolge ungewollter, aber nicht immer vermeidbarer Probenverkrümmung auftretende Ungleichmäßigkeit in der Spannungsverteilung durch plastische Verformungen vor dem Bruch ausgeglichen wird. Bei Versuchstemperaturen, bei denen mit der Möglichkeit gerechnet werden mußte, daß dieser Ausgleich nicht eintritt, werden nahe den potentiellen Trennbruch-Ausgangsstellen die örtlichen Dehnungen mit Hilfe von Dehnungsmeßstreifen während des Versuches mit gemessen. So kann auch für die Fälle des verformungslosen Bruches eine vergleichbare Bruch-Nennspannung angegeben werden.

Die Werte der Geber für die Temperaturen und für die Gesamtkraft, ermittelt aus den Dehnungen an den Halteblechen, werden mittels eines Kompensations-Punktdruckers registriert. Die Dehnungsmeßstreifen auf der Probe nahe den potentiellen Trennbruch-Ausgangsstellen und auch der Ausgang der Meßbrücke für die Dehnungsmeßstreifen auf den Halteblechen sind an eine Vielstellen-Meßanlage angeschlossen und werden bei jeder Laststufe in schneller Folge hintereinander (5 Stck/sec) abgefragt und die Meßwerte auf Lochstreifen registriert, Anlage 8.

Zum Ermitteln der bleibenden örtlichen Dickenänderung und der bleibenden örtlichen Dehnung in Hauptbeanspruchungsrichtung an der Trennbruch-Ausgangsstelle werden vor und nach dem Versuch an den potentiellen Trennbruch-Ausgangsstellen die Dicke des Bleches bzw. die Länge von 20 mm langen, durch Kügelchen markierten Meßstrecken gemessen.

Zum Messen dieser Meßstrecken dient eine durch entsprechende Füße ergänzte Meßuhr mit 1/100 mm-Skaleneinteilung, so daß bei dieser Anordnung eine Dehnungsablesung von 0,5 ‰ möglich ist bei einer erforderlichen Maximaldehnung von mindestens 150 ‰. Da die bleibenden Dehnungen meist nicht direkt an der Trennbruch-Ausgangsstelle gemessen werden können, müssen ihre Werte durch Interpolation ermittelt werden. Beispiele für die Verteilung der bleibenden Dehnung in der Nähe der Störstelle zeigt die Anlage 9. Der zur Auswertung verwendete Wert wird derjenigen Meßreihe entnommen, die der Trennbruch-Ausgangsstelle am nächsten liegt. Bei Bruch außerhalb der Versuchslänge werden die Werte der bleibenden Dehnungen an den potentiellen Trennbruch-Ausgangsstellen gemittelt.

1) Idee, Konstruktion und Erprobung der Kühlanlage:  
Dipl.-Ing. E. Nehring.

## 6. Versuchsergebnisse

### 6.1 Tabellarische Zusammenstellung der Versuchsergebnisse, Bilder der Bruchflächen und Rißlinien

Die Zahlenwerte der Ergebnisse, sowohl der Versuche an den bauteilähnlichen Proben als auch der Werkstoffkontrollversuche sind auf den Anlagen 10a und 10b tabelliert. Sie sind dort entsprechend den Störstellenformen in Gruppen zusammengestellt und nach fallender Temperaturdifferenz  $\Delta\vartheta_V$  geordnet. Die Ergebnisse der Werkstoffkontrollversuche stehen immer in der Zeile derjenigen bauteilähnlichen Probe, aus der oder deren Nähe das Versuchsmaterial für die Kontrollversuche entnommen worden ist. Da wegen der Kosten nicht für jede der bauteilähnlichen Proben Werkstoffkontrollversuche durchgeführt werden konnten, ist bei der Übergangstemperatur aus dem Kerbschlagbiegeversuch und bei dem mittleren Korndurchmesser ein Teil der Werte doppelt aufgeführt. Bei den Werten aus dem Zugversuch nach DIN 50 146 ist dieses nur insoweit getan worden, als für jedes Blech einmal in jeder Gruppe Werte stehen sollten.

Für jede bauteilähnliche Probe liegt weiterhin ein Blatt vor, auf dem neben den Hauptwerten der Versuchsergebnisse vor allem die Bilder der Bruchfläche zu sehen sind, Anlage 11 bis 83. Diese Blätter sind nach Störstellenformen entsprechend der Reihenfolge auf Anlage 10a bzw. b und innerhalb jeder Störstellenform nach der laufenden Nummer (letzte Zahl der Probennummer) geordnet.

Auf jeder dieser Anlagen ist außerdem ein Diagramm entsprechend Bild 6 bzw. 9 mit der Zusammenstellung der Versuchsergebnisse in der Form der Abhängigkeit der bleibenden Dehnung  $\epsilon_{bl}$  von der Temperaturdifferenz  $\Delta\vartheta_V$  dargestellt, auf dem der Punkt für die jeweilige Probe durch einen Hinweis Pfeil gekennzeichnet ist. Dieses soll die Einordnung in das Gesamtbild der Ergebnisse erleichtern.

Für die Proben, die außerhalb der Versuchslänge brachen und dadurch keine Bruchflächen an der Störstelle haben, sind diese Anlagen hier nicht beigefügt. Ausnahmen bilden die Anlagen 12 und 54, die beispielhaft das Bild einer solchen, außerhalb der Versuchslänge gebrochenen Probe zeigen.

Bei Doppelbrüchen bzw. Ansätzen dazu sind die Bilder beider Bruchflächen auf hintereinanderliegenden, mit a und b bezeichneten Anlagen bzw. ist das Rißbild am anderen Störstellenende auf derselben Anlage zu sehen. Davon zu unterscheiden sind bei der Störstelle LF die Anrisse, die im wesentlichen nur die Schweißnahtenden vom Material des Blechstreifens lösen, wie z.B. auf Anlage 12 zu sehen ist.

Trennbruch-Ausgangsstellen sind meist deutlich an dem aus diesem Punkt strahlenförmig auseinanderlaufenden Muster des Bruchbildes zu erkennen.

Sind zwei solcher Stellen im Bild eines Bruchquerschnittes zu erkennen, so wird diejenige als entscheidend behandelt und als primäre Bruchausgangsstelle bezeichnet, von der der Bruch, nach der Bruchlinie zu urteilen, früher ausging oder schneller fortschritt, z.B. linke Stelle auf Anlage 11 oder rechte Stelle auf Anlage 19, bzw. deren von ihr ausgehende Teilbruchfläche den größeren Anteil der Gesamtbruchfläche stellt, z.B. rechte Stelle auf Anlage 34 oder auf der Frontlinie des Anrisses links im Bild auf Anlage 35.

### 6.2 Zur Abschätzung der Bruch-Nennspannung bei verformungslosem Bruch

Als Bruch-Nennspannung in Probenlängsrichtung wird diejenige auf die vor Belastung vorhandene Querschnittsfläche des unversteiften Blechstreifens bezogene Last bezeichnet, die maximal im Versuch erreicht werden kann. Vereinfachend ausgedrückt handelt es sich also dabei um die zusätzliche mittlere Spannung in Blechstreifenlängsrichtung infolge äußerer Belastung in Blechstreifenlängsrichtung beim Bruch.

Für den Fall, daß ungleiche Beanspruchung an den potentiellen Trennbruch-Ausgangsstellen aus Biegespannungen infolge Probenverkrümmung nicht durch Fließen ausgeglichen werden kann, also bei Brüchen mit  $\epsilon_{bl} < 0,1 \%$ , wurde die über die Haltebleche gemessene Nennspannung mittels der Ergebnisse der Dehnungsmessungen nahe den potentiellen Trennbruch-Ausgangsstellen entsprechend folgenden Überlegungen korrigiert:

Die im elastischen Bereich aus der an einer potentiellen Trennbruch-Ausgangsstelle, i, gemessenen Dehnung ermittelte örtliche Spannung

$$\sigma_i = E \cdot \epsilon_{el,i}$$

enthält gegenüber dem über den Querschnitt gemittelten Spannungswert

$$\bar{\sigma}_N = P/F_0$$

die Erhöhung infolge „Kerbe“

$$\Delta\sigma_K = \sigma_K \cdot \bar{\sigma}_N$$

und die infolge ungewollter Biegung

$$\Delta\sigma_{Bg,i} = \sigma_{Bg,i} \cdot \bar{\sigma}_N$$

also  $\sigma_i = \bar{\sigma}_N + \Delta\sigma_K + \Delta\sigma_{Bg,i} = \sigma_K + \Delta\sigma_{Bg,i}$ .

Bei einem Versuchsablauf ohne Biegung würde für alle vier potentiellen Trennbruch-Ausgangsstellen eines Querschnittes

$$\sigma_i = \sigma_K$$

sein.

Für einen Versuchsablauf mit Biegung muß nun derjenige Vergleichswert  $\bar{\sigma}_{N,Bg}$  für die Nennspannung ermittelt werden, dessen Verhältnis zur örtlich an der Bruchausgangsstelle vorhandenen Spannung  $\sigma_i$  gleich dem der Nennspannung  $\bar{\sigma}_N$  bei einem Versuchsablauf ohne Biegung zur an den potentiellen Trennbruch-Ausgangsstellen dann vorhandenen Spannung  $\sigma_K$  ist, also

$$\bar{\sigma}_{N,Bg}/\sigma_i = \bar{\sigma}_N/\sigma_K$$

Die an den vier symmetrisch liegenden potentiellen Trennbruch-Ausgangsstellen eines Querschnittes gemessenen Spannungen  $\sigma_j$  unterscheiden sich nur um den Anteil aus der Biegung. Ihr mittlerer Wert entspricht also der Spannung  $\sigma_K$  bei einem Versuchsablauf ohne Biegung, also

$$\sigma_K = \frac{1}{4} \sum_{j=1}^4 \sigma_j = \frac{1}{4} E \sum_{j=1}^4 \epsilon_{el,j}$$

Damit ergibt sich für die gesuchte korrigierte Spannung, bezogen auf den Bruchausgang i die Beziehung

$$\bar{\sigma}_{N,Bg} = \frac{\sigma_i}{\sigma_K} \cdot \bar{\sigma}_N = \frac{\epsilon_{el,i}}{\frac{1}{4} \sum_{j=1}^4 \epsilon_{el,j}} \cdot \bar{\sigma}_N$$

Dieser Wert wird als örtliche Nennspannung bezeichnet. Die beim Versuch unter Berücksichtigung etwaiger Biegung gemessene größte Nennspannung  $\sigma_{N,Br}$  ergibt sich also für den Fall eines nicht verformungslosen Bruches aus

$$\sigma_{N,Br} = \bar{\sigma}_{N,Br}$$

und für den Fall eines verformungslosen Bruches aus

$$\sigma_{N,Br} = \bar{\sigma}_{N,Bg,Br}$$

Aus versuchstechnischen Gründen kann aber nicht genau an den potentiellen Trennbruch-Ausgangsstellen gemessen werden, d.h. für die aus der Messung m ermittelten Werte gilt

$$\sigma_{i,m} < \sigma_i ; \sigma_{K,m} < \sigma_K$$

Damit ergibt sich auch für den aus der Messung zu ermittelnden Vergleichswert

$$\bar{\sigma}_{N,Bg,m} \neq \bar{\sigma}_{N,Bg}$$

Man kann jedoch abschätzen, in welchen Grenzen der richtige Vergleichswert  $\bar{\sigma}_{N,Bg}$  liegt.

Es ist nämlich mit

$$\bar{\sigma}_{N,Bg} = \frac{\sigma_K + \Delta\sigma_{Bg,i}}{\sigma_K} \bar{\sigma}_N \quad \text{und}$$

$$\bar{\sigma}_{N,Bg,m} = \frac{\sigma_{K,m} + \Delta\sigma_{Bg,i,m}}{\sigma_{K,m}} \bar{\sigma}_N$$

$$\frac{\bar{\sigma}_{N,Bg}}{\bar{\sigma}_{N,Bg,m}} = \frac{1 + \frac{\Delta\sigma_{Bg,i}}{\sigma_K}}{1 + \frac{\Delta\sigma_{Bg,i,m}}{\sigma_{K,m}}}$$

Ungünstigenfalls ist

$$\sigma_K \gg \sigma_{K,m}$$

und damit  $\frac{\Delta\sigma_{Bg,i}}{\sigma_K} \ll \frac{\Delta\sigma_{Bg,i,m}}{\sigma_{K,m}}$ ,

während günstigenfalls

$$\sigma_K = \sigma_{K,m} \quad \text{und} \quad \Delta\sigma_{Bg,i} = \Delta\sigma_{Bg,i,m}$$

ist.

Somit ergeben sich die Grenzen zu

$$1 \leq \frac{\bar{\sigma}_{N,Bg}}{\bar{\sigma}_{N,Bg,m}} \leq \frac{1}{1 + \frac{\Delta\sigma_{Bg,i,m}}{\sigma_{K,m}}}$$

mit

$$\frac{\Delta\sigma_{Bg,i,m}}{\sigma_{K,m}} = \frac{\epsilon_{el,i,m} \cdot \frac{1}{4} \sum_{j=1}^4 \epsilon_{el,j,m}}{\frac{1}{4} \sum_{j=1}^4 \epsilon_{el,j,m}}$$

Für die bisher aufgetretenen 7 Fälle des verformungslosen Bruches mit  $\epsilon_{bl} < 0,1\%$  ergeben sich so folgende Grenzwerte:

$\vartheta_v$	$\bar{\sigma}_{N,Bg,Br,m} \approx \sigma_{N,Br}$	Grenzwerte	Probe Nr.
°C	kp/mm <sup>2</sup>		
- 60	17,2	$1 > \sigma_{N,Br} / \bar{\sigma}_{N,Bg,Br,m} > 0,81$	1./1.1.1
- 67	17,9	$1 < \dots < 1,04$	6./1.1.9
- 107	11,9	$1 > \dots > 0,93$	11./1.6.3
- 107	32,0	$1 < \dots < 1,02$	12./1.6.4
- 116	18,5	$1 > \dots > 0,81$	8./1.2.4
- 136	28,8	$1 < \dots < 1,04$	8./1.2.5

Das bedeutet also, daß die richtigen Werte für die Bruch-Nennspannung bei diesen Versuchen mit verformungslosem Bruch von denen bei der Auswertung der Ergebnisse angegebenen, höchstens in diesem angegebenen Bereich abweichen können.

## 7. Zur Beurteilung der Sprödbruchgefahr geschweißter Stahlkonstruktionen mit Hilfe des Temperaturvergleiches

### 7.1 Allgemeines zur Anwendung der Untersuchungsergebnisse

Für den konstruierenden Ingenieur ist nicht das Sprödbruchverhalten des Werkstoffes Stahl an sich von Interesse, sondern vielmehr das Verhalten des immer in einer bestimmten Erzeugnisform verarbeiteten Materials unter den besonderen örtlichen Gegebenheiten der Störstellen in der Konstruktion. Dieses Verhalten wird jeweils durch eine Mehrzahl von Parametern maßgebend beeinflusst. Einer davon ist immer die Temperatur, bei der das Material in der Konstruktion beansprucht wird, die sog. Betriebstemperatur.

Zu jeder Kombination von Einflußparametern, also zu jeder Störstellenart, gehört ein Temperaturwert, unter dem das plastische Verformungsvermögen des Materials an der betrachteten Stelle der Konstruktion so vermindert ist, daß Spannungsspitzen durch örtliches plastisches Fließen nicht mehr über den Querschnitt ausgeglichen werden können. Damit besteht für die betrachtete Stelle in der Konstruktion die Gefahr eines Trennrisses und je nach den Umständen in den anliegenden Konstruktionsbereichen auch die Gefahr eines Trennbruches des Konstruktionsquerschnittes bei verminderten Bruch-Nennspannungen und entsprechend geringer Arbeitsaufnahme des Konstruktionsteiles. Dieser als Übergangstemperatur der Störstelle in der Konstruktion bezeichnete Temperaturgrenzwert ist abhängig von der Störstellenart und der Art des eingebauten Materials.

Liegt die Betriebstemperatur einer Störstelle über ihrer Übergangstemperatur unter Berücksichtigung des verwendeten Materials, so besteht für diese Störstelle keine Sprödbruchgefahr.

Ist man an eine bestimmte Störstellenart konstruktiv gebunden, so muß man dafür so ein Material wählen, daß mit ihm die Störstellenart eine Übergangstemperatur hat, die niedriger als die Betriebstemperatur ist. Kann aus technischen oder wirtschaftlichen Gründen solches Material nicht verwendet werden, so muß man die Konstruktion so ändern, daß anstelle der zuerst vorgesehenen Störstellenart sich eine andere ergibt mit niedrigerer Übergangstemperatur. Liegen verschiedene Störstellenarten in einem Konstruktionsbereich mit

gleicher Betriebstemperatur, muß das Material so gewählt werden bzw. muß die Konstruktion in dem Bereich so gestaltet werden, daß auch die ungünstigste Störstelle unter Berücksichtigung des zur Verfügung stehenden Materials noch eine Übergangstemperatur hat, die kleiner als die Betriebstemperatur ist.

Wenn diese Bedingung erfüllt ist, kann der Konstruktionsbereich hinsichtlich seiner Tragfähigkeit in der üblichen Weise beurteilt werden, ohne daß man noch Sprödbruchgefahr zu berücksichtigen ist.

Die Übergangstemperaturen verschiedener Störstellenarten können ermittelt werden über

$$\vartheta_{\dot{U},\text{Konstruktion}} = (\vartheta_{\text{krit}})_{1 \text{ oder } 2} = \vartheta_{\dot{U},\text{ISO}} + \Delta\vartheta_{1 \text{ oder } 2}$$

mit

$\vartheta_{\dot{U},\text{Konstruktion}}$  : Gesuchte Übergangstemperatur des Konstruktionsteiles mit der zu beurteilenden Störstelle

$(\vartheta_{\text{krit}})_{1,2}$  : Den Übergangsbereich der Störstellenart eingrenzende Temperaturwerte, entsprechend Abschnitt 3.6, S. 17.

$\vartheta_{\dot{U},\text{ISO}}$  : Übergangstemperatur beim Kerbschlagbiegeversuch für  $\alpha_k = 3,5 \text{ kpm/cm}^2$  an ISO-Spitzkerbproben, die aus dem zu verarbeitenden Material im Anlieferungszustand gefertigt werden müssen.

$\Delta\vartheta_{1 \text{ oder } 2}$  : Temperaturdifferenz nach Tabelle 2, S. 18, in Abhängigkeit von der Störstellenart

Dabei ist zu beachten, daß die Werte der Tabelle 2 vorläufig nur für Stähle, die dem St 37 entsprechen, und für Blechdicken  $\leq 30 \text{ mm}$  gelten. Das bedeutet, sie können vorläufig nur dann auf andere Stahlsorten übertragen werden, wenn sichergestellt ist, daß das Sprödbruchverhalten des Materials beim Herstellen der Störstelle nicht anders beeinflusst wird, als das des St 37.

In den Zahlenwerten der Tabelle 2 ist ein Sicherheitsabstand von 6 grd bzw. 16 grd dergestalt berücksichtigt, daß für ungünstigere Werte nur eine Eintreffwahrscheinlichkeit von ca. 1 % gilt, wobei diese Aussage mit einer Aussagewahrscheinlichkeit von ca. 95 % statistisch gesichert ist.

Im folgenden soll an einem Beispiel die einfache Anwendung des Verfahrens verdeutlicht werden.

## 7.2 Erläuterungen an einem Beispiel

Beurteilt werden sollte eine geschweißte Stahlbau-Konstruktionsart, mit der man ungeschützt im Freien auch bei Temperaturen von  $-30^{\circ}\text{C}$  noch ohne Sprödbruchgefahr arbeiten können soll.

Die meisten Störstellen sind von der „quasi ebenen“ Art, bei der eine Behinderung der plastischen Verformungen in allen drei Richtungen nicht von Anfang an zu erwarten ist (s. auch Abschnitt 4.4.), entsprechend Störstelle Kn, Bild 1, S. 11 bzw. 2. Zeile der Tabelle 2, S. 18. An einigen Stellen waren dagegen verhältnismäßig steife Anschlüsse mit endenden Kehlnähten parallel zur Hauptbeanspruchungsrichtung vorgesehen, entsprechend Störstelle LF, Bild 1 bzw. 1. Zeile der Tabelle 2. Die Blechdicken sind nicht größer als 30 mm.

Bei Verwendung von R St-2 nach DIN 17 100 ohne besondere Zusatzprüfung muß man mit einer Übergangstemperatur der ISO-Spitzkerbprobe von

$$\vartheta_{\text{Ü,ISO}} \leq + 10^{\circ}\text{C}$$

rechnen.

Für die erste erwähnte Störstellenart Kn würde das bedeuten: Verformungsarme Trennbrüche sind möglich, denn

$$(\vartheta_{\text{krit}})_1 \leq (+ 10 - 12)^{\circ}\text{C} = - 2^{\circ}\text{C} > - 30^{\circ}\text{C} ,$$

aber

Sprödbrüche mit Bruch-Nennspannungen, die kleiner als die Fließgrenze bei Raumtemperatur sind, brauchen nicht erwartet zu werden, denn

$$(\vartheta_{\text{krit}})_2 < (+ 10 - 90) = - 80^{\circ}\text{C} < - 30^{\circ}\text{C} .$$

Für die andere Störstellenart LF ergibt sich:

Sprödbrüche mit geringen Bruch-Nennspannungen sind nicht auszuschließen, denn

$$(\vartheta_{\text{krit}})_2 \leq (+ 10 - 15)^{\circ}\text{C} = - 5^{\circ}\text{C} > - 30^{\circ}\text{C}.$$

Wird dagegen St 37-3 N verwendet, für den eine Übergangstemperatur der ISO-Spitzkerbprobe von  $\vartheta_{\text{Ü,ISO}} \leq - 20^{\circ}\text{C}$  nach DIN 17 100 zu erwarten ist, so kann man auch für die ungünstigere Störstellenart LF sagen:

Verformungsarme Trennbrüche sind zwar noch möglich, denn

$$(\vartheta_{\text{krit}})_1 \leq (- 20 + 12)^{\circ}\text{C} = - 8^{\circ}\text{C} > - 30^{\circ}\text{C}$$

aber Sprödbrüche mit Bruch-Nennspannungen unterhalb der Fließgrenze sind nicht zu erwarten, denn

$$(\vartheta_{\text{krit}})_2 \leq (- 20 - 15)^{\circ}\text{C} = - 35^{\circ}\text{C} < - 30^{\circ}\text{C} .$$

Nach diesen Überlegungen konnte im vorliegenden Fall empfohlen werden,

1. so zu konstruieren, daß Störstellen von der ungünstigeren Art LF nicht vorkommen, und

2. entweder St 37-3 N zu verwenden (auch ein verformungsarmer Trennbruch wäre dann nicht zu erwarten)

oder R St 37-2 N zu verwenden, wenn es als zulässig angesehen wird, daß der Sicherheitsfaktor gegenüber Bruch gegebenenfalls auf den gegenüber Fließlast absinkt ( ein Trennbruch bei Nennspannungen in der Größe der Fließspannung ist nämlich nicht auszuschließen).

## 7.3 Hinweis auf die Zielrichtung zukünftiger Arbeiten

Es gehört zu den Aufgaben der Metallphysik, die ursächlichen Zusammenhänge für das Verhalten des Stahles als Stoff im mikroskopischen Bereich aufzudecken und die in diesem Bereich ablaufenden Geschehnisse den im Makroskopischen in Erscheinung tretenden allgemeinen Eigenschaften des Stahles als Werkstoff zuzuordnen.

Zur Beurteilung des Verhaltens des Stahles als verbauter Material in der Konstruktion müssen Verfahren herangezogen werden, die von dem makroskopischen Verhalten des Materials und den durch Konstruktion und Betriebsumstände im Makroskopischen definierten Rand- und Nebenbedingungen ausgehen.

Für die Fälle, in denen die Beanspruchungen in der Konstruktion auch örtlich detailliert *und* sicher ermittelt werden können, werden in diesem Sinne die zukünftigen Arbeiten auf dem Gebiet der Bruchmechanik die Kenntnisse so erweitern, daß auch kompliziertere Störstellenarten als „vorhandener Riß in sonst gleichmäßigem Bauteil“ mittels Spannungsberechnung gegen Sprödbruch gesichert werden können.

In der Mehrzahl der Fälle geschweißter Stahlkonstruktionen aber wird es technisch sinnvoller und wirtschaftlich zweckmäßiger sein, durch geeignete Kombinationen von Konstruktionsdetail und Materialart Sprödbruchgefahr grundsätzlich auszuschalten. Die Methode des Temperaturvergleiches ist ein dazu geeignetes Verfahren. Zukünftige Arbeiten, die weitere Unterlagen für diese Methode schaffen, müssen in drei Richtungen zielen:

1) Erweiterung der jeweils durch Versuche abzusichernden Kenntnisse über die Differenzen zwischen den Übergangstemperaturen von Störstellen in der Konstruktion und Bezugsstörstelle in der Laborprobe, vor allem auch im Hinblick auf die etwaigen Einflüsse verschiedener Ma-

terialdicken, Schweißdetails und Stahlsorten (Erweiterung auf allgemeine Baustähle).

- 2) Suche nach einer Laborprobe mit einer Bezugsstörstelle, bei der es möglich ist, das Sprödbruchverhalten der verschiedenen Materialien in derselben Weise zu beeinflussen wie es beim Herstellen der verschiedenen Störstellenarten in der Konstruktion geschieht. (Wenn z.B. beim Herstellen der Konstruktion das Material an einer Störstelle kaltverformt wird, sollte eine entsprechende Kaltverformung auch an der Bezugsstörstelle möglich sein.) Dann käme man bei einer Störstellenart mit einem Temperaturdifferenzwert für alle Stahlsorten aus.

- 3) Untersuchungen zur rechnerischen Bestimmung der maximal möglichen plastischen Verformungen von Störstellenarten und der für einen vollen Spannungsausgleich im zur Störstelle gehörenden Querschnitt mindestens erforderlichen plastischen Verformung jeweils in Abhängigkeit von der Betriebstemperatur.

Dann können die benötigten Temperaturdifferenzwerte für die verschiedensten Störstellen durch Interpolation zwischen durch Versuche abgesicherten Störstellenarten berechnet werden.



- [ 1 ] Rühl, Karl: Die Tragfähigkeit metallischer Baukörper in Bautechnik und Maschinenbau  
Verlag von Wilhelm Ernst & Sohn, Berlin 1952
- [ 2 ] Macherauch, Eckard: Die plastische Verformung von Vielkristallen  
Zeitschrift für Metallkunde 55 (1964) S. 60/82
- [ 3 ] Fracture, An Advanced Treatise  
edited by Harold Liebowitz  
Volume I: Microscopic and Macroscopic Fundamentals  
ACADEMIC PRESS New York and London 1968  
S. 397
- [ 4 ] Kochendörfer, Albert und Horst Jürgen Schreiner:  
Versuche über den Einfluß der Korngröße und des Spannungszustandes auf die Übergangstemperaturen von Stahl und Vergleich der Ergebnisse mit denen der Versetzungstheorie des Sprödbruchs  
Stahl u. Eisen 89 (1969) S. 1053/61
- [ 5 ] Rühl, K.: Die Sprödbruchsicherheit von Stahlkonstruktionen  
Werner Verlag Düsseldorf 1959
- [ 6 ] Krish, Alfred und Ramaswamy Lakshmanan:  
Der Einfluß von Geschwindigkeit und Prüfmaschine auf Streckgrenze und Zugfestigkeit von Stahl  
Forschungsberichte des Landes Nordrhein-Westfalen Nr. 2069  
Westdeutscher Verlag Köln und Opladen, 1970
- [ 7 ] Kochendörfer, Albert: Physikalische Grundlagen der Formänderungsfestigkeit der Metalle  
Stahleisen-Sonderberichte Heft 5 1963  
und Ergänzung 1966 Heft 5 1967  
Verlag Stahleisen m.b.H., Düsseldorf
- [ 8 ] Heckel, Klaus: Einführung in die technische Anwendung der Bruchmechanik  
Carl Hauser Verlag München 1970
- [ 9 ] Ernst-Mach-Institut: Einführungskursus in die Bruchmechanik  
veranstaltet von der Abteilung für Festkörpermechanik  
Leiter: Priv.-Doz. Dr. F. Kerkhof  
Freiburg im Breisgau, Juni 1969
- [10] Radaj, D.: Zur Didaktik und Geschichte der Bruchmechanik  
Materialprüfung 12 (1970) S. 236/37
- [11] Fracture, An Advanced Treatise  
edited by Harold Liebowitz  
Volume 4: Engineering Fracture Design  
ACADEMIC PRESS New York and London 1969
- [12] Randak, Alfred und Klaus Vetter: Überblick über Verfahren zur Prüfung der Zähigkeit hochfester Stähle  
Archiv für Eisenhüttenwesen 40. Jahrgang (1969) S. 285/295
- [13] Rühl, K.: Die Sprödbruchsicherheit von Stahlkonstruktionen  
Werner Verlag Düsseldorf 1959
- [14] Rühl, K.: Möglichkeiten und Gesichtspunkte für die Auswertung von Zähigkeitsprüfungen zur Beurteilung der Sprödbruchsicherheit  
Materialprüfung Bd. 8 (1966) S. 8/18
- [15] Rühl, K.: Neue ausländische Entwicklungen auf dem Gebiet des Sprödbruches  
Schweißen und Schneiden 13 (1961) S. 271/78
- [16] Rühl, Schönherr, Struck: Wege und Versuche zur Beurteilung der Sprödbbruchgefahr geschweißter Bauteile  
Schweißen und Schneiden 16 (1964) S. 1/9
- [17] McGeedy, L.J.: Fracture Characteristics of Welded Quenched and Tempered Steels in Various Specimens  
Welding Journal Research Supplement, 1968  
S. 563-s/570-s

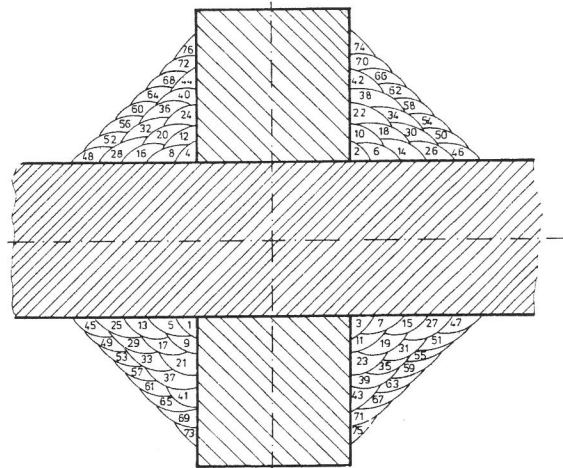
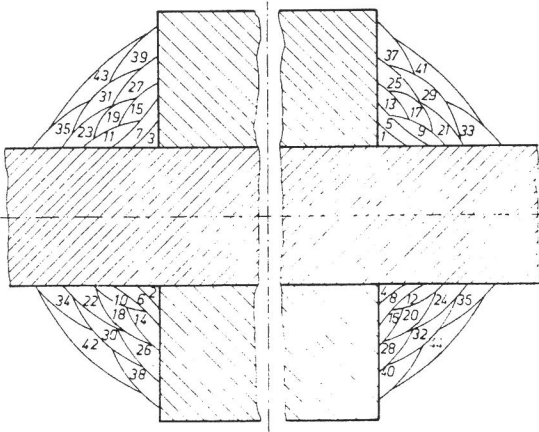
- [18] Clausmeyer, H.: Einfluß von Kerbspannungszuständen auf die Versprödung von Stahl – Zähigkeit und Trennbruchsicherheit  
Konstruktion 21 (1969) S. 225/35
- [19] IIW Doc X-346-65
- [20] Tummers, G.E.: Summary Reportion Stress Relaxation Data  
Kurzfassung von W. Schönherr in  
Schweißen und Schneiden 16 (1964) S. 195, Bild 1
- [21] Varga, T.: Korngröße und Übergangstemperatur von Baustählen  
Schweizer Archiv 1967 S. 85/89
- [22] Struck, W.: Zur Berechnung von einseitigen, unteren Grenzwerten (Fraktilen) bei der statistischen Auswertung von Meßergebnissen  
Materialprüfung Bd. 9 (1967) S. 218/22
- [23] Rühl, K.: Möglichkeiten und Gesichtspunkte für die Auswertung von Zähigkeitsprüfungen zur Beurteilung der Sprödbruchsicherheit  
Materialprüfung Bd. 8 (1966) Nr. 1 S. 8/18
- [24] Hall, W.J., H. Kihara, W. Soete u. A.A. Wells:  
Brittle Fracture of Welded Plates  
Prentice-Hall, Inc./Englewood Cliffs. N.J. 1967
- [25] Kazuo Ikeda, Yoshio Akita, Hiroshi Kihara: The Deep Notch Test and Brittle Fracture Initiation  
Welding Journal Research Supplement, 1967,  
S. 133-s/144-s
- [26] Struck, W. u. E. Nehring: Bruchversuche an bauteilähnlichen Proben im Rahmen von Untersuchungen über die Wirkung der Einflußfaktoren beim Sprödbruch im Stahl  
Fachbuchreihe „Schweißtechnik“, Bd. 53 (1968)  
Teil 1 S. 173/187

Einzelheiten zum Schweißen der Störstellen (schematisch)

Einzelheiten zum Schweißen der Störstellen (schematisch)

Störstelle „Lasche nur mit Flankenkehlnaht“

Störstelle „Nocken, quergeschweißt“

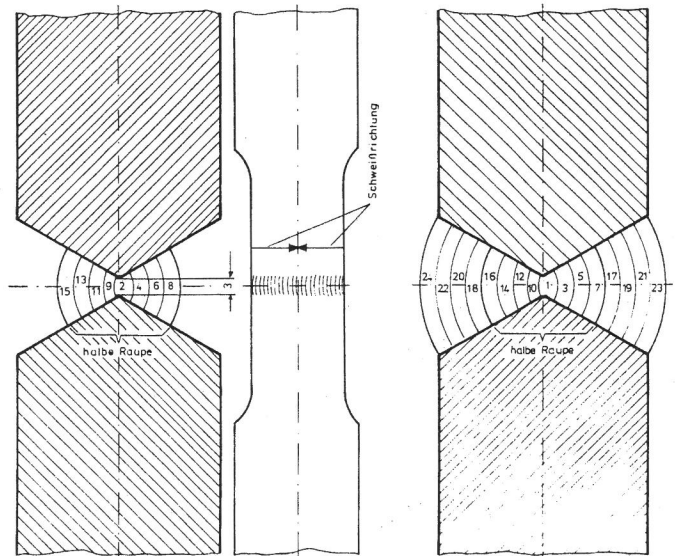
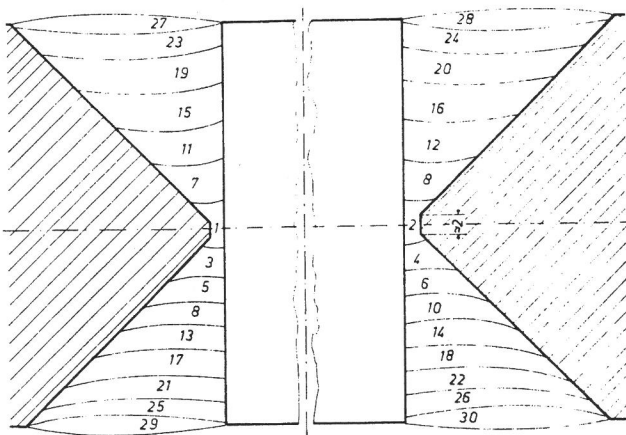


Raupe	Elektrode	Schweißstrom
Nr.	$\phi$ mm	Amp.
1 ... 4	4	180
5 ... 8	5	275
9 ... 40	5	255
41 ... 44	5	270

Raupe	Elektrode	Schweißstrom
Nr.	$\phi$ mm	Amp.
1 ... 12	4	180
13 ... 72	4	175
73 ... 76	3,25	140

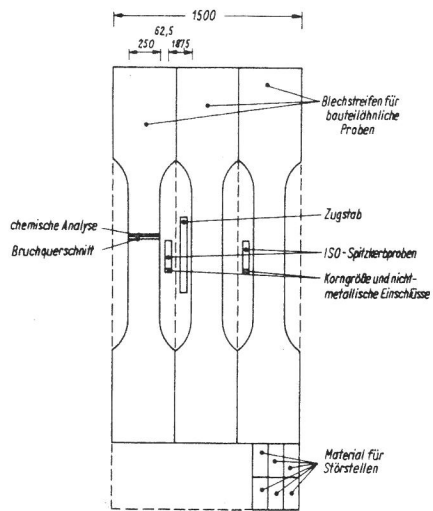
Störstelle „Knotenblech“

Störstelle „Stumpfstoß“



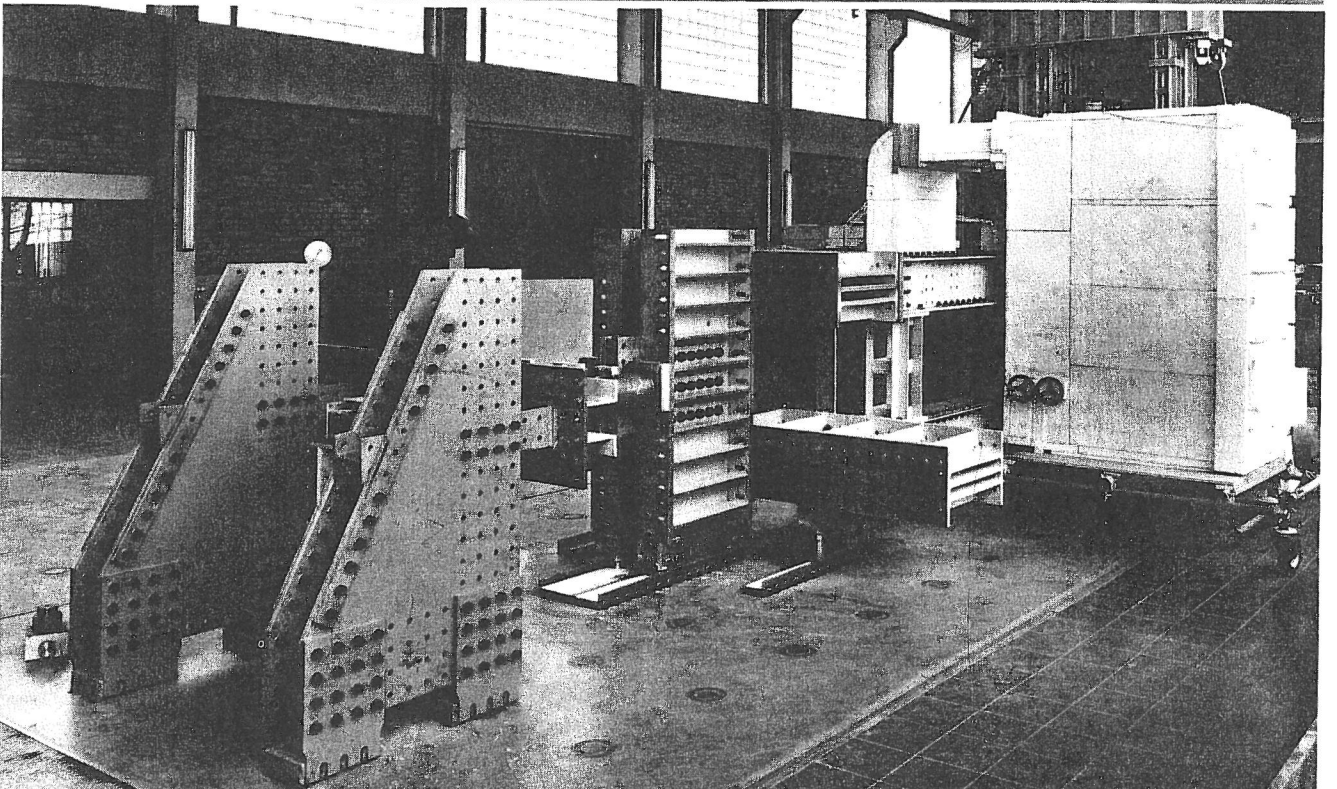
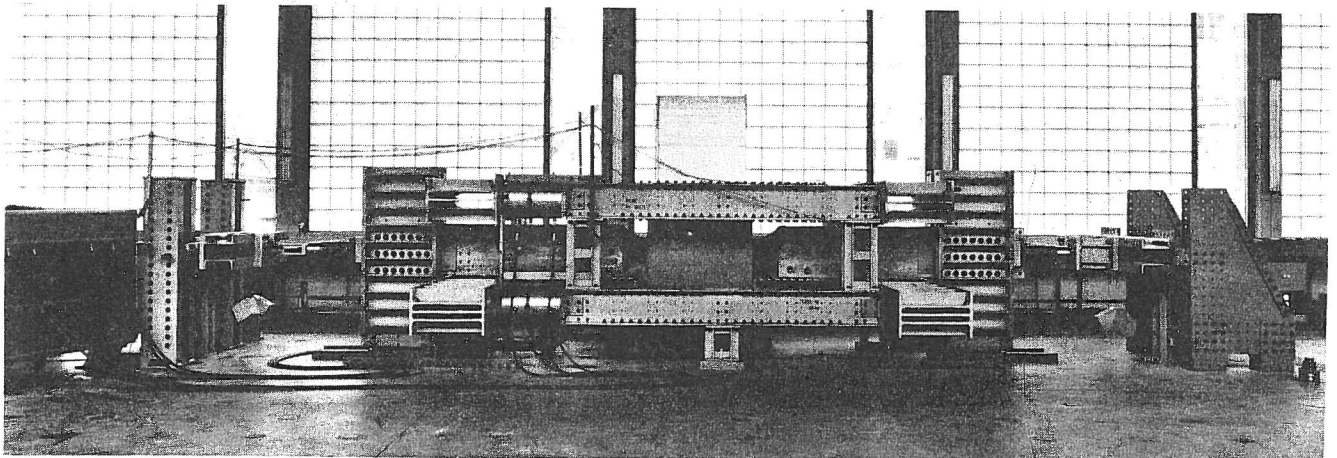
Raupe	Elektrode	Schweißstrom
Nr.	$\phi$ mm	Amp.
1 + 2	3,25	155
3 ... 8	4	235
9 ... 20	5	285
21 ... 26	5	260
27 ... 30	5	240

Raupe	Elektrode	Schweißstrom
Nr.	$\phi$ mm	Amp.
1 + 2	3,25	130
3 ... 14	3,25	145
15 ... 22	4	190
23 + 24	4	170



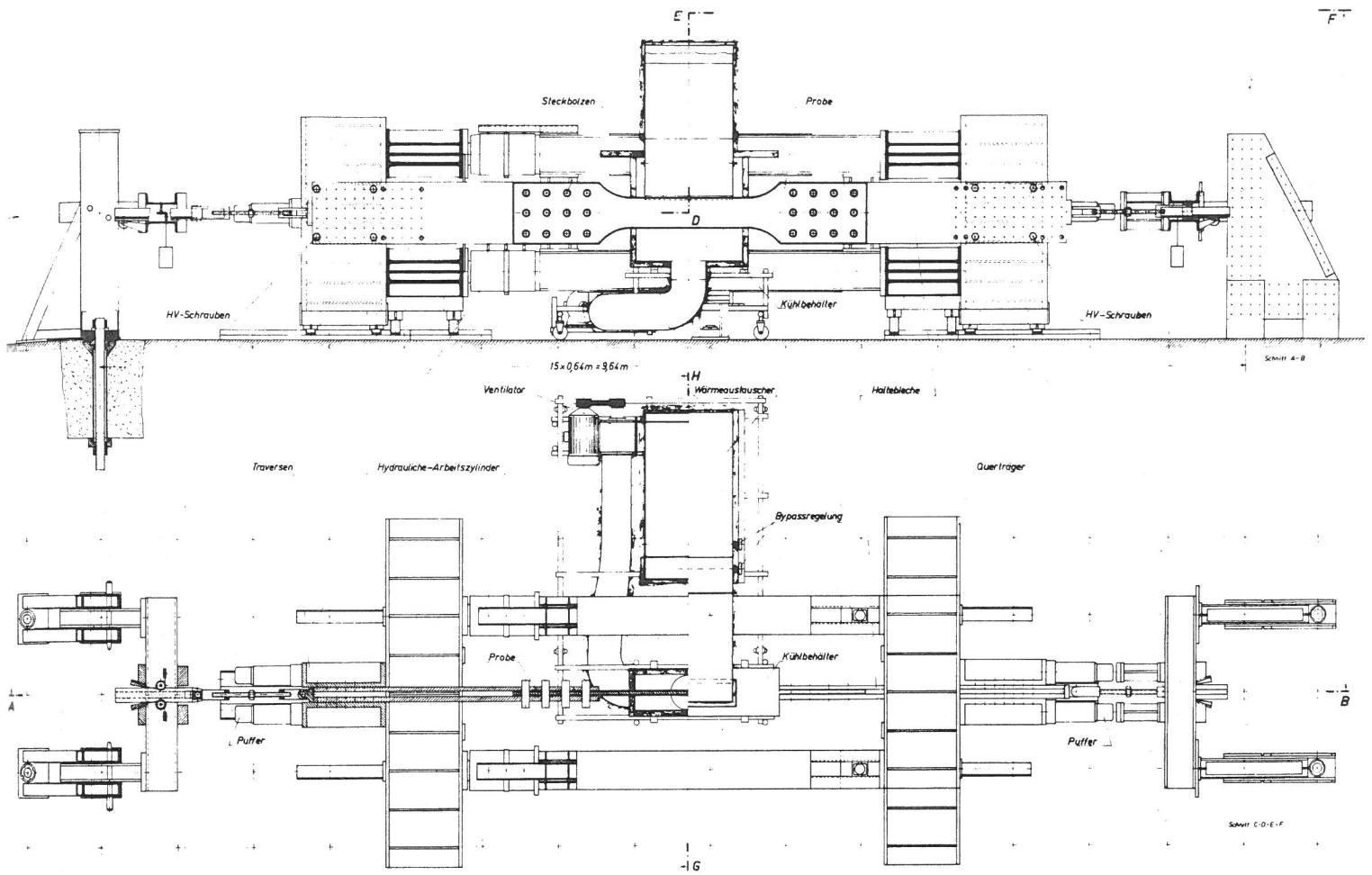
Lage der Proben im Blech (schematisch)

800-Mp-Zugeinrichtung für Stahl Flachproben mit Kühlanlage



800-Mp-Zugvorrichtung für Stahl Flachproben mit Kühlanlage  
Längsschnitte

Anlage 5

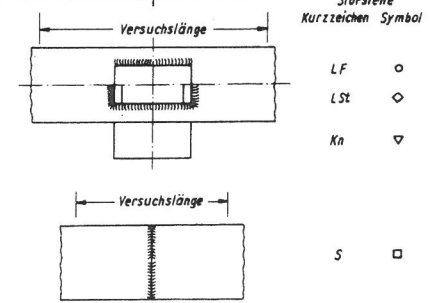
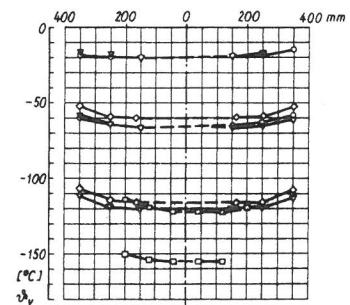
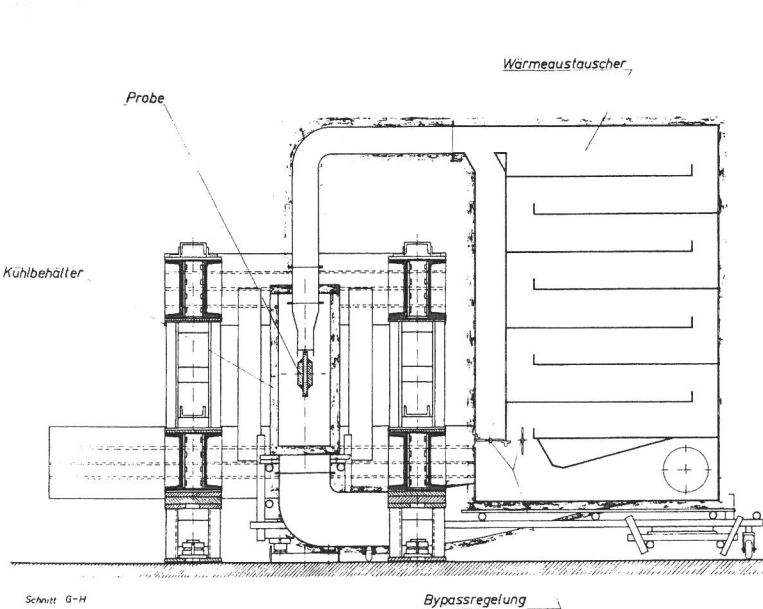


Anlage 6

Anlage 7

800-Mp-Zugvorrichtung für Stahl Flachproben mit Kühlanlage  
Querschnitt

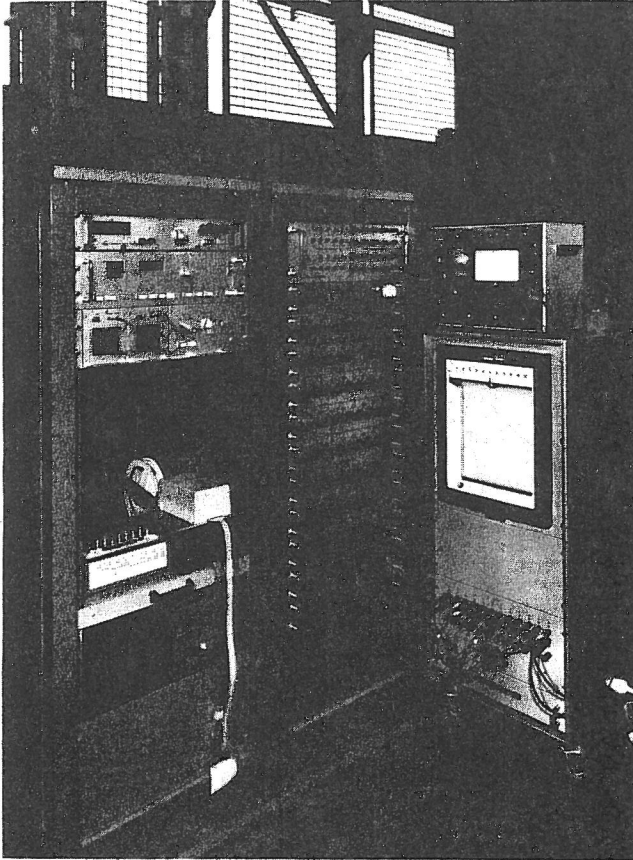
Beispiele für die Temperaturverteilung über die Versuchslänge



Störstelle	Kurzzeichen	Symbol
LF	○	
LSt	◇	
Kn	▽	
S	□	

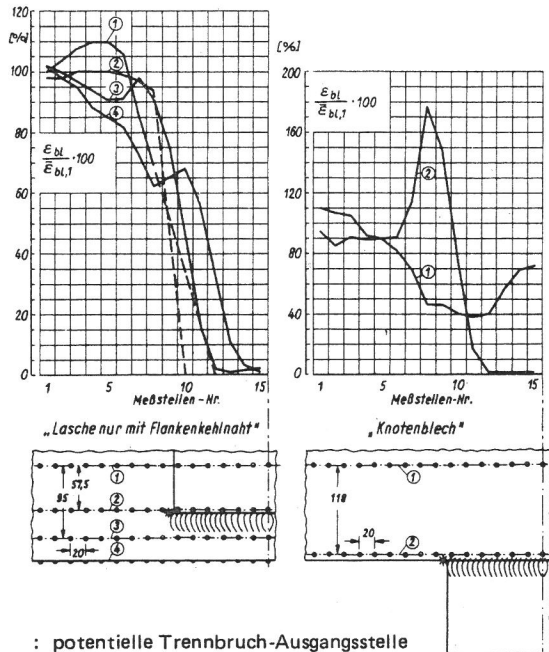
Anlage 8

Kompensations-Punktschreiber, Meßbrücke und Vielstellen-Meßanlage zum Messen und Registrieren der Temperaturen, der Gesamtkraft und der Dehnungen während des Versuches



Anlage 9



Beispiele für die Verteilung der bleibenden Dehnung  $\Delta\vartheta_V = -20$  grad



- \* : potentielle Trennbruch-Ausgangsstelle
- $\epsilon_{bl}$  : örtliche bleibende Dehnung in Probenlängsrichtung gemittelt über 20 mm
- $\epsilon_{bl,1}$  : Mittelwert der  $\epsilon_{bl}$  an allen Meßreihenenden der Probe

Blech-/ Probennummer der bauteiltähnlichen Proben	Verwendet für Versuche mit Störstellenform, Blechdicke, Walzrichtung zur Probenrichtung	mit Temperaturdifferenz	örtliche Dehnung	bleibende bezogene Dickenänderung
			$\Delta\vartheta_V$	an der potentiellen Trennbruch-Ausgangsstelle $\epsilon_{bl}$ ( $\Delta d/d_0$ ) <sub>bl</sub>
			1)	
	Maße in mm	grad	%	%
6/1.1.8		+ 38	7,5	7,9
7/1.1.10		+ 9	6,3	6,0
1/1.1.2		+ 8	7,7	6,8
21/1.1.14		- 5	5,8	5,9
20/1.1.12		- 6	5,7	5,9
22/1.1.19		- 9	6,2	6,1
13/1.1.20		- 10	6,2	6,4
1/1.1.3		- 10	4,5	3,3
3/1.1.5		- 15	2,9	2,0
21/1.1.15		- 16	5,8	5,9
3/1.1.7	30	- 20	3,6	2,8
22/1.1.17		- 21	1,7	2,2
20/1.1.11	parallel	- 21	1,0	0,9
20/1.1.13		- 22	2,0	1,9
1/1.1.1		- 24	< 0,1	< 0,1
3/1.1.6		- 25	1,3	0,5
2/1.1.4		- 26	0,2	< 0,1
21/1.1.16		- 27	1,7	1,9
22/1.1.18		- 31	4,3	3,5
6/1.1.9		- 40	< 0,1	< 0,1
10/1.4.4		- 13	2,5	2,6
9/1.4.1		- 14	7,2	6,8
9/1.4.3		- 19	6,6	6,2
10/1.4.5		- 25	5,1	4,8
10/1.4.6	30	- 25	0,9	0,9
13/1.4.7	parallel	- 27	1,1	1,0
9/1.4.2		- 56	< 0,1	< 0,1
4/1.3.4		+ 51	15,5	14,6
5/1.3.7		+ 32	13,5	14,4
5/1.3.6		+ 12	11,8	16,6
4/1.3.2	250	+ 2	9,3	11,7
5/1.3.5		- 10	10,3	12,0
4/1.3.3	30	- 20	4,3	5,0
2/1.3.1		- 52	1,8	3,7
7/1.3.8	parallel	- 71	1,4	1,0
8/1.3.9		- 89	1,0	0,2
13/1.6.7		+ 30	14,2	19,7
11/1.6.2	750	+ 20	11,4	12,4
12/1.6.6		- 22	4,4	4,7
11/1.6.1	30	- 34	1,3	0,3
11/1.6.3		- 70	< 0,1	< 0,1
12/1.6.4	parallel	- 78	0,5	0,4
12/1.6.5		- 96	1,8	0,8
6/1.2.2		- 34	5,5	4,4
2/1.2.1		- 52	5,7	5,0
7/1.2.3	30	- 70	2,8	2,2
8/1.2.4		- 82	< 0,1	< 0,1
8/1.2.5	parallel	- 102	< 0,1	< 0,1
17/1.7.4		- 78	6,5	3,9
17/1.7.3		- 92	5,6	3,1
16/1.7.2	30	- 99	0,1	0,2
19/1.7.5	parallel	- 118	6,3	3,4
19/1.7.7		- 122	1,3	0,7
19/1.7.6		- 130	< 0,1	0,1



Blech/Proben- nummer der bauteilähnlichen Proben	Verwendet für Versuche mit Störstellen- form, Beachdicke Walzrichtung zur Proberrichtung	mit Tempera- turdifferenz $\Delta\vartheta_V$	örtliche Dehnung	bleibende bezogene Dicken- änderung	örtliche Bruch- Nenn- spannung in Proben- längsrich- tung	Temperatur beim Versuch	Übergangstemperatur aus Kerbschlagbiege- versuchen $\vartheta_U$ 1)	mittlerer Korndurchmesser 5)	
								2)	3)
an der potentiellen Trennbruch-Ausgangsstelle									
Maße in mm	1)	$\epsilon_{bl}$	$(\Delta d/d_o)_{bl}$	$\sigma_{N, Br}$	$\vartheta_V$	2)	3)	2)	3)
	grad	%	%	kp/mm <sup>2</sup>	oC	oC	oC	10 <sup>-3</sup> mm	10 <sup>-3</sup> mm
25/5.1.7	- 5	6,2	6,3	42,9	- 30	- 25		20,3	
25/5.1.8	- 23	2,2	2,4	35,4	- 48		- 25 <sup>4)</sup>		20,3 <sup>4)</sup>
24/5.1.3	- 23	3,5	3,7	40,7	- 51		- 28		23,4
27/5.1.6	- 25	4,2	4,3	43,6	- 41	- 16		26,0	
24/5.1.2	- 26	1,6	1,2	34,6	- 54		- 28 <sup>4)</sup>		23,4 <sup>4)</sup>
27/5.1.5	 - 28	3,6	3,7	42,1	- 49		- 21 <sup>4)</sup>		30,3 <sup>4)</sup>
24/5.1.1	30	- 28	2,1	2,0	37,4	- 61	- 33	19,7	
28/5.1.10	senkrecht	- 32	0,4	0,9	31,0	- 57	- 25		29,1
28/5.1.11		- 35	2,2	2,2	35,8	- 55	- 20 <sup>4)</sup>		25,4 <sup>4)</sup>
27/5.1.4		- 35	0,6	0,4	29,3	- 56	- 21	30,3	
25/5.1.9		- 38	2,0	1,7	38,1	- 66	- 28	23,4	
28/5.1.12		- 40	2,7	2,8	38,4	- 60	- 20	25,4	
26/5.3.4		+ 0	8,1	7,8	36,3	- 24	- 24	23,4	
23/5.3.3	 - 17	7,4	6,3	35,6	- 39	- 22		20,7	
26/5.3.5		- 18	5,3	4,9	33,7	- 47	- 29 <sup>4)</sup>	22,8 <sup>4)</sup>	
23/5.3.2	30	- 22	4,5	5,0	33,5	- 48	- 26 <sup>4)</sup>	25,8 <sup>4)</sup>	
23/5.3.1	senkrecht	- 34	5,2	6,5	36,9	- 60	- 26		25,8
26/5.3.6		- 35	5,2	5,4	36,6	- 64	- 29		22,8

Fußnote siehe Anlage 10a



Proben-Nr. 1/1.1.1  
 Werkstoff R St 37 - 2 N  
 Walzrichtung zur Probenlängsrichtung parallel  
 Blechdicke  $d_o = 30$  mm

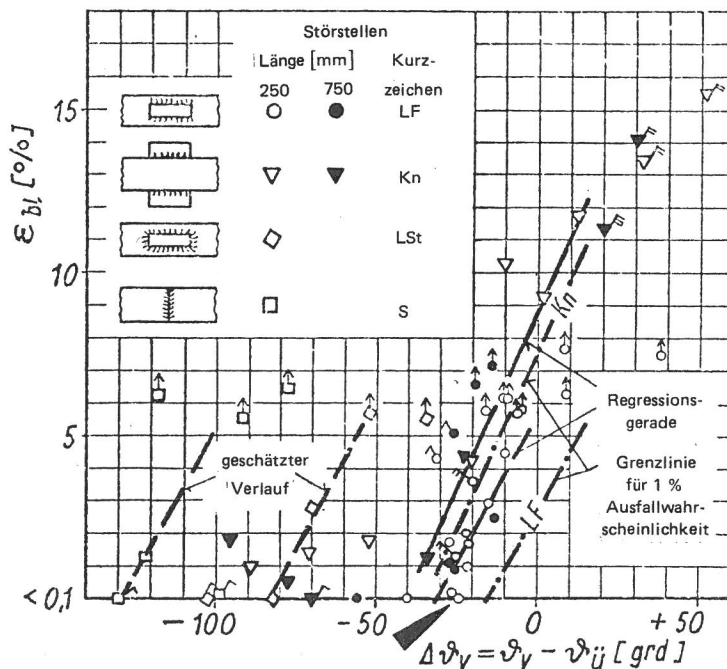
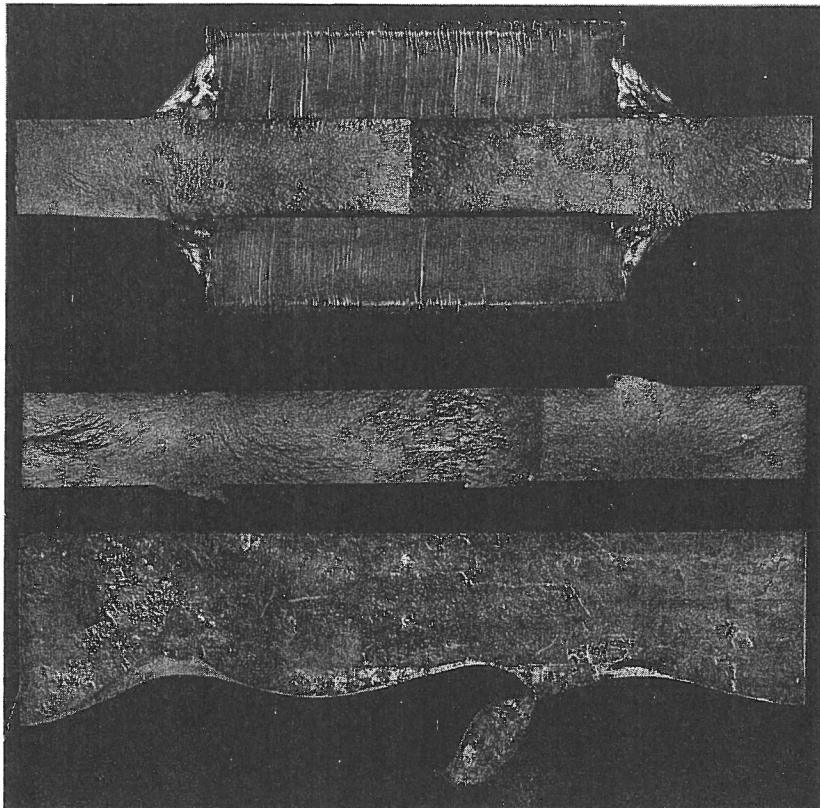
Störstellenform (Länge in mm) 

Übergangstemperatur aus Kerbschlagbiegeversuch längs Walzrichtung  $\vartheta_{ü} = -36,5$  °C  
 Versuchstemperatur  $\vartheta_v = -60$  °C

örtl. bl. Dehnung a.d. potentiellen Trennbruch-Ausgangsstelle  $\epsilon_{bl} = < 0,1$  %

örtl. bl. bezogene Dickenänderung  $(\Delta d/d_o)_{bl} = < 0,1$  %

örtl. Bruch-Nennspannung in Probenlängsrichtung  $\sigma_{N,Br} = 19,1$  kp/mm<sup>2</sup>



- $\epsilon_{bl}$  : örtliche bleibende Dehnung in Probenlängsrichtung an der potentiellen Trennbruch-Ausgangsstelle
- $\vartheta_v$  : Versuchstemperatur
- $\vartheta_{ü}$  : Übergangstemperatur der ISO-Spitzkerbprobe längs zur Walzrichtung für  $a_k = 3,5$  kpm/cm<sup>2</sup>
- ↑ : Bruchstelle außerhalb der Versuchslänge
- ↗ : Bruchausgang in der Schweißnaht
- ↘ : nach Anriß Restquerschnitt durch Gleitbruch zerstört
- ↖ : nach Anriß beginnender Gleitbruch in Trennbruch übergehend
- ↙ : Anriß bei niedriger Last wurde Primär-Trennbruch-Ausgangsstelle
- ↗ : Anriß bei niedriger Last

Proben-Nr.

1/1.1.2

Anlage 12

Werkstoff

R St 37 - 2 N

Walzrichtung zur Probenlängsrichtung

parallel

Blechedicke

$d_o = 30$  mm

Störstellenform (Länge in mm)



Übergangstemperatur aus Kerbschlagbiegeversuch längs Walzrichtung

$\vartheta_{\bar{u}} = -29,5$  °C

Versuchstemperatur

$\vartheta_V = -22$  °C

örtl. bl. Dehnung a.d. potentiellen

$\epsilon_{bl} = 7,7$  %

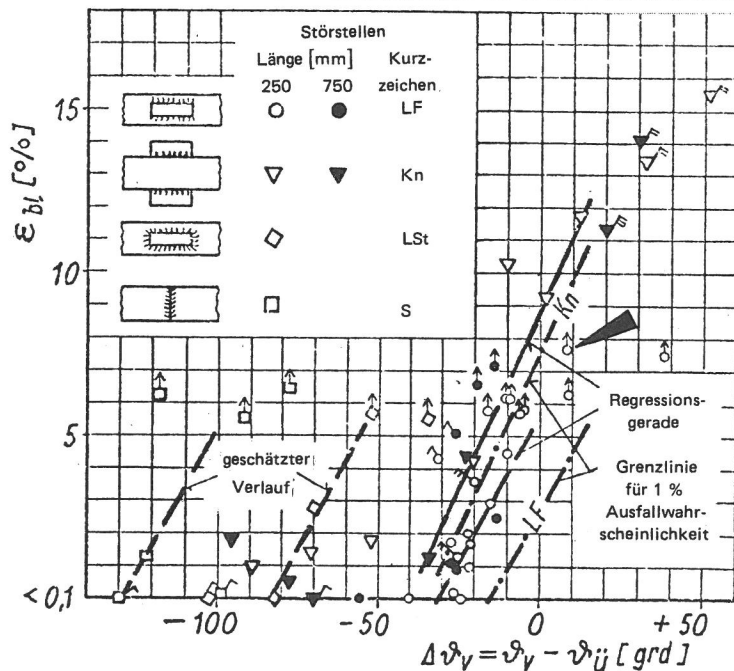
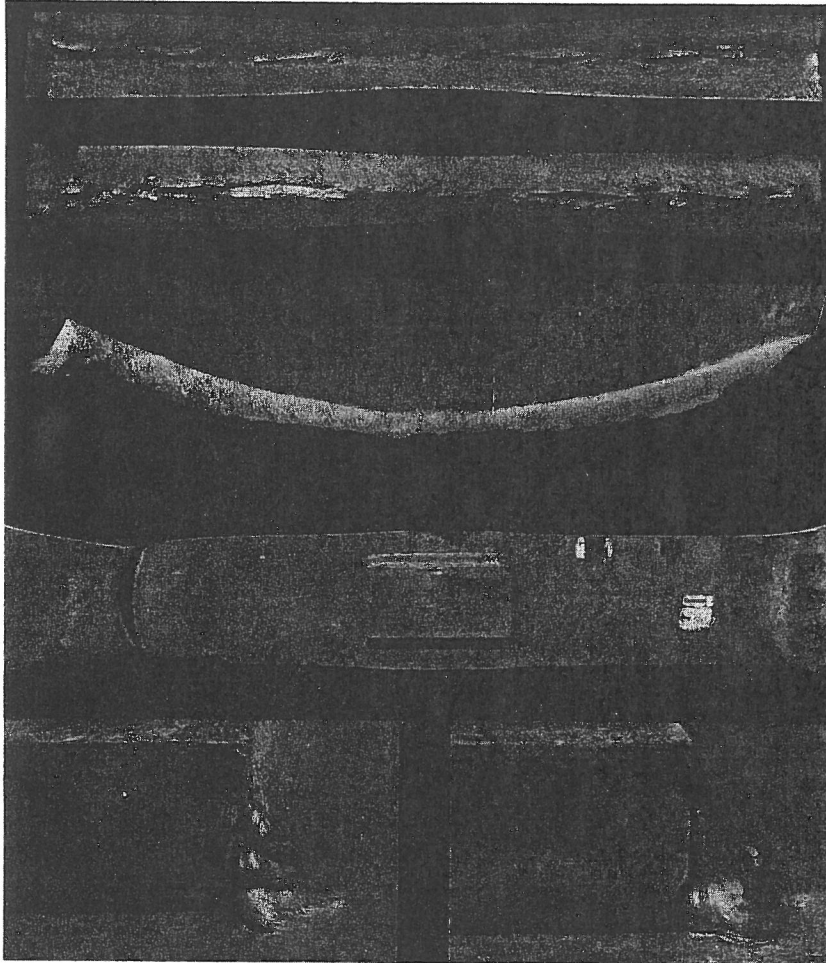
Trennbruch-Ausgangsstelle

$(\Delta d/d_o)_{bl} = 6,8$  %

örtl. bl. bezogene Dickenänderung

$\sigma_{N,Br} = 39$  kp/mm<sup>2</sup>

örtl. Bruch-Nennspannung in Probenlängsrichtung



$\epsilon_{bl}$  : örtliche bleibende Dehnung in Probenlängsrichtung an der potentiellen Trennbruch-Ausgangsstelle

$\vartheta_V$  : Versuchstemperatur

$\vartheta_{\bar{u}}$  : Übergangstemperatur der ISO-Spitzkerbprobe längs zur Walzrichtung für  $a_k = 3,5$  kpm/cm<sup>2</sup>

↑ : Bruchstelle außerhalb der Versuchslänge

∧ : Bruchausgang in der Schweißnaht

↗ : nach Anriß Restquerschnitt durch Gleitbruch zerstört

↘ : nach Anriß beginnender Gleitbruch in Trennbruch übergehend

↖ : Anriß bei niedriger Last wurde Primär-Trennbruch-Ausgangsstelle

↗ : Anriß bei niedriger Last

Proben-Nr. 1/1.1.3  
 Werkstoff R St 37 - 2 N  
 Walzrichtung zur Probenlängsrichtung parallel  
 Blechdicke  $d_o = 30$  mm

Störstellenform (Länge in mm)



Übergangstemperatur aus Kerbschlagbiegeversuch längs Walzrichtung

$\vartheta_{\ddot{u}} = -29,5$  °C

Versuchstemperatur

$\vartheta_V = -40$  °C

örtl. bl. Dehnung a.d. potentiellen Trennbruch-Ausgangsstelle

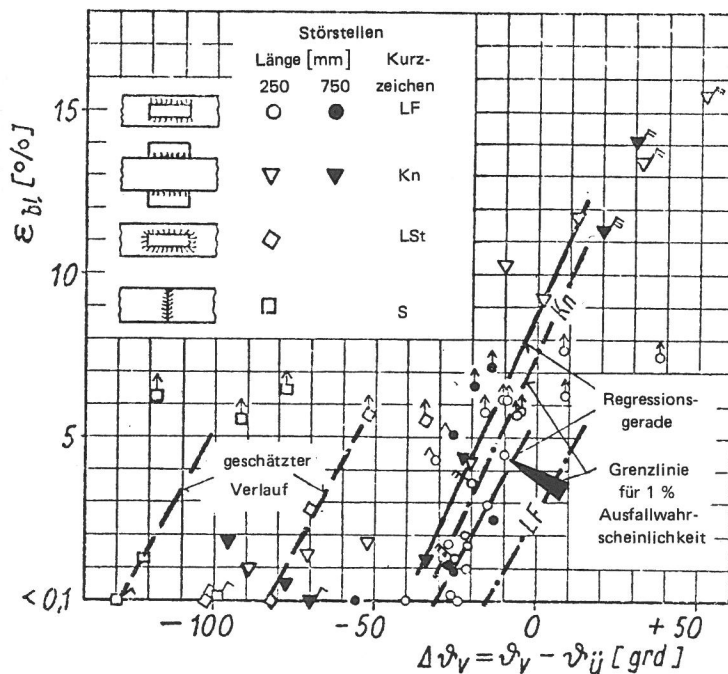
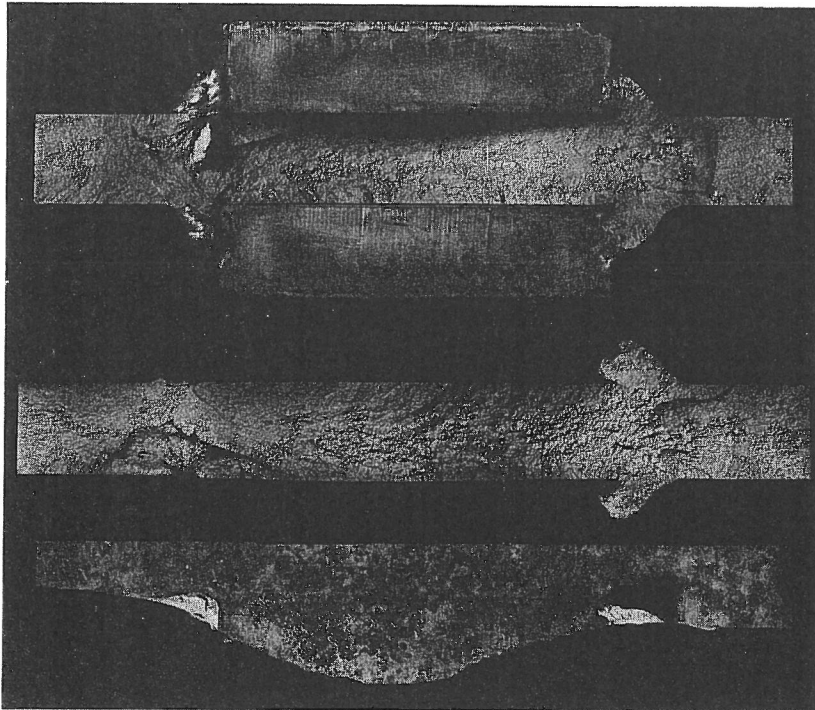
$\epsilon_{bl} = 4,5$  %

örtl. bl. bezogene Dickenänderung

$(\Delta d/d_o)_{bl} = 3,3$  %

örtl. Bruch-Nennspannung in Probenlängsrichtung

$\sigma_{N,Br} = 43$  kp/mm<sup>2</sup>



- $\epsilon_{bl}$  : örtliche bleibende Dehnung in Probenlängsrichtung an der potentiellen Trennbruch-Ausgangsstelle
- $\vartheta_V$  : Versuchstemperatur
- $\vartheta_{\ddot{u}}$  : Übergangstemperatur der ISO-Spitzkerbprobe längs zur Walzrichtung für  $a_k = 3,5$  kpm/cm<sup>2</sup>
- ↑ : Bruchstelle außerhalb der Versuchslänge
- ∧ : Bruchausgang in der Schweißnaht
- ↗ : nach Anriß Restquerschnitt durch Gleitbruch zerstört
- ↘ : nach Anriß beginnender Gleitbruch in Trennbruch übergehend
- ↖ : Anriß bei niedriger Last wurde Primär-Trennbruch-Ausgangsstelle
- ↙ : Anriß bei niedriger Last

Proben-Nr. 1/1.1.3  
 Werkstoff R St 37 - 2 N  
 Walzrichtung zur Probenlängsrichtung parallel  
 Blechdicke  $d_0 = 30$  mm

Störstellenform (Länge in mm)

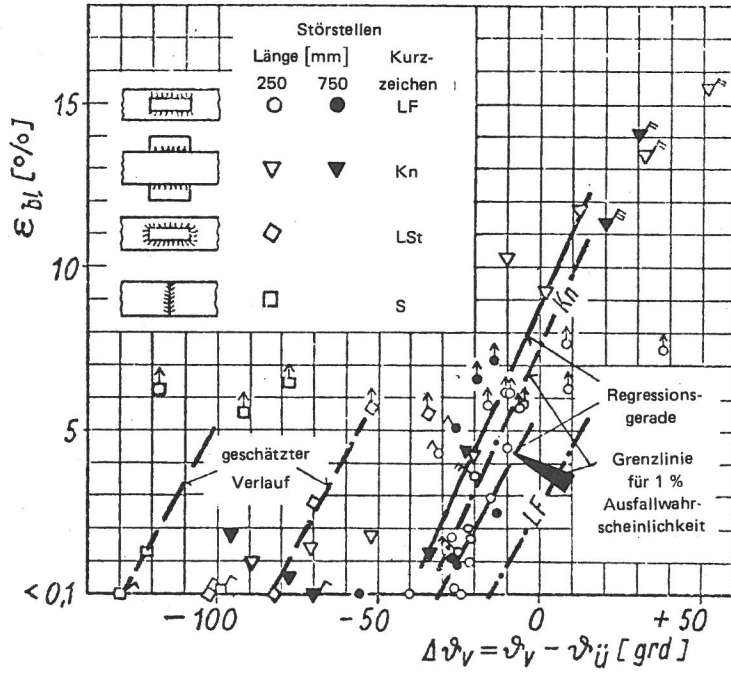
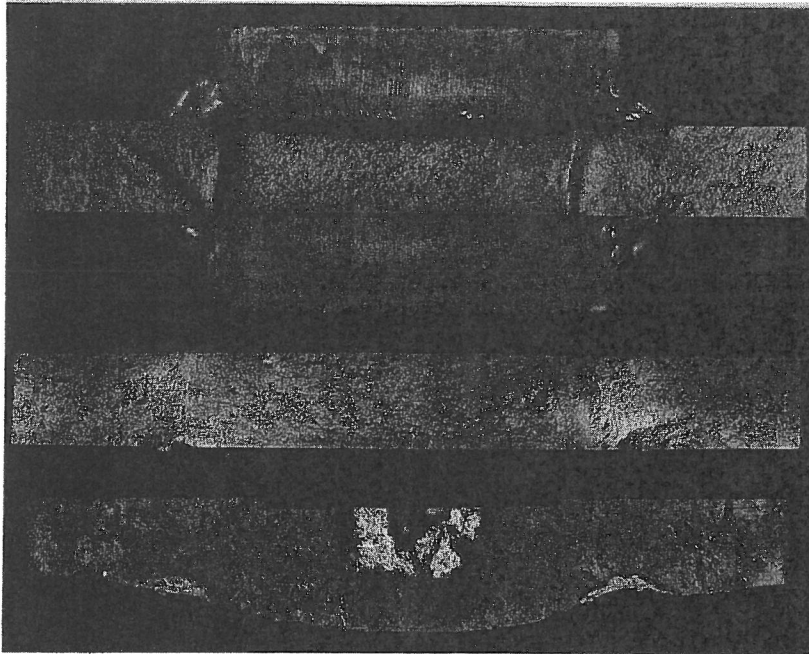
Übergangstemperatur aus Kerbschlagbiegeversuch längs Walzrichtung  $\vartheta_{\ddot{u}} = -29,5$  °C

Versuchstemperatur  $\vartheta_V = -40$  °C

örtl. bl. Dehnung a.d. potentiellen Trennbruch-Ausgangsstelle  $\epsilon_{bl} = 4,5$  %

örtl. bl. bezogene Dickenänderung  $(\Delta d/d_0)_{bl} = 3,3$  %

örtl. Bruch-Nennspannung in Probenlängsrichtung  $\sigma_{N Br} = 43$  kp/mm<sup>2</sup>



- $\epsilon_{bl}$  : örtliche bleibende Dehnung in Probenlängsrichtung an der potentiellen Trennbruch-Ausgangsstelle
- $\vartheta_V$  : Versuchstemperatur
- $\vartheta_{\ddot{u}}$  : Übergangstemperatur der ISO-Spitzkerbprobe längs zur Walzrichtung für  $a_k = 3,5$  kpm/cm<sup>2</sup>
- ↑ : Bruchstelle außerhalb der Versuchslänge
- ↗ : Bruchausgang in der Schweißnaht
- ↘ : nach Anriß Restquerschnitt durch Gleitbruch zerstört
- ↖ : nach Anriß beginnender Gleitbruch in Trennbruch übergehend
- ↙ : Anriß bei niedriger Last wurde Primär-Trennbruch-Ausgangsstelle
- ↗ : Anriß bei niedriger Last

Proben-Nr. 2/1.1.4  
 Werkstoff R St 37 - 2 N  
 Walzrichtung zur Probenlängsrichtung parallel  
 Blechdicke  $d_o = 30$  mm

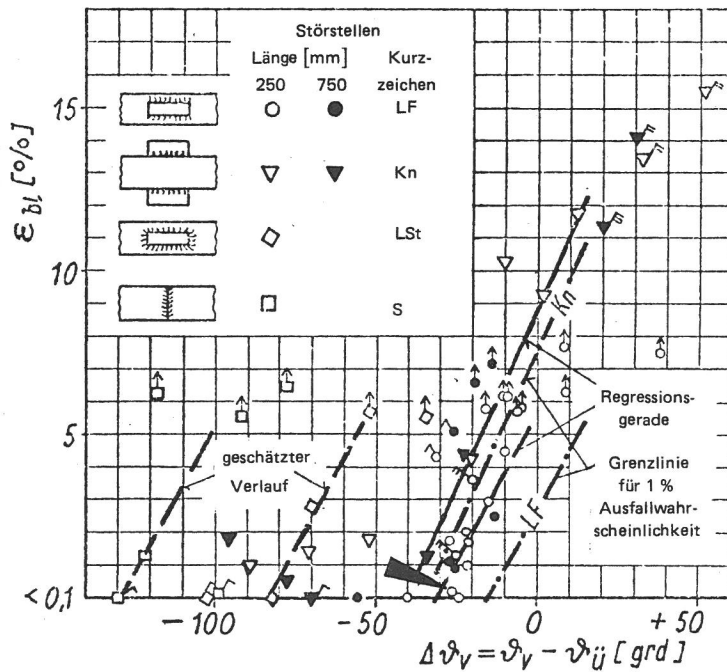
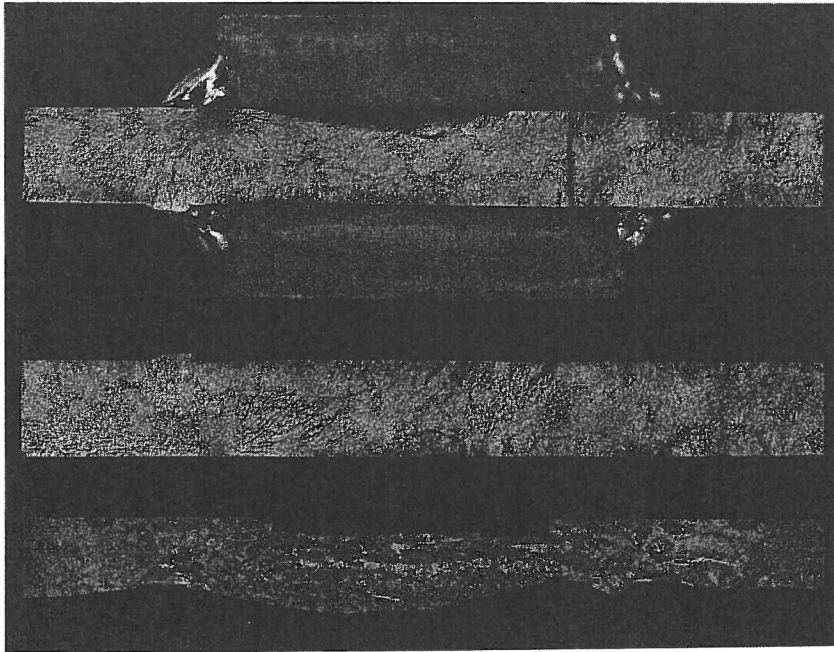
Störstellenform (Länge in mm) 

Übergangstemperatur aus Kerbschlagbiegeversuch längs Walzrichtung  $\vartheta_{\bar{u}} = -23,0$  °C  
 Versuchstemperatur  $\vartheta_v = -49$  °C

örtl. bl. Dehnung a.d. potentiellen Trennbruch-Ausgangsstelle  $\epsilon_{bl} = 0,2$  %

örtl. bl. bezogene Dickenänderung  $(\Delta d/d_o)_{bl} < 0,1$  %

örtl. Bruch-Nennspannung in Probenlängsrichtung  $\sigma_{N,Br} = 19,6$  kp/mm<sup>2</sup>



- $\epsilon_{bl}$  : örtliche bleibende Dehnung in Probenlängsrichtung an der potentiellen Trennbruch-Ausgangsstelle
- $\vartheta_v$  : Versuchstemperatur
- $\vartheta_{\bar{u}}$  : Übergangstemperatur der ISO-Spitzkerbprobe längs zur Walzrichtung für  $a_k = 3,5$  kpm/cm<sup>2</sup>
- ↑ : Bruchstelle außerhalb der Versuchslänge
- ↗ : Bruchausgang in der Schweißnaht
- ↘ : nach Anriß Restquerschnitt durch Gleitbruch zerstört
- ↖ : nach Anriß beginnender Gleitbruch in Trennbruch übergehend
- ↙ : Anriß bei niedriger Last wurde Primär-Trennbruch-Ausgangsstelle
- ↗ : Anriß bei niedriger Last

Proben-Nr. 3/1.1.5  
 Werkstoff R St 37 - 2 N  
 Walzrichtung zur Probenlängsrichtung parallel  
 Blechdicke  $d_o = 30$  mm

Störstellenform (Länge in mm)



Übergangstemperatur aus Kerbschlagbiegeversuch längs Walzrichtung

$\vartheta_{ü} = -20,0$  °C

Versuchstemperatur

$\vartheta_v = -35$  °C

örtl. bl. Dehnung a.d. potentiellen Trennbruch-Ausgangsstelle

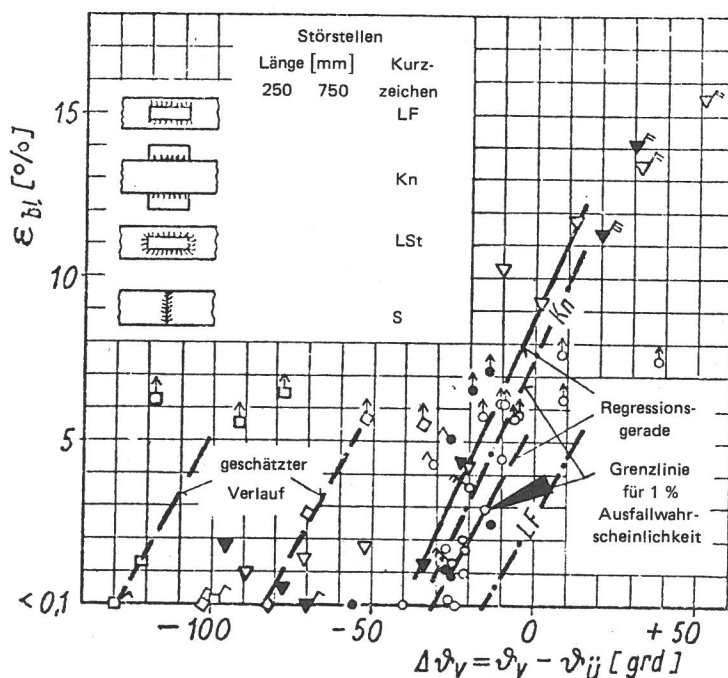
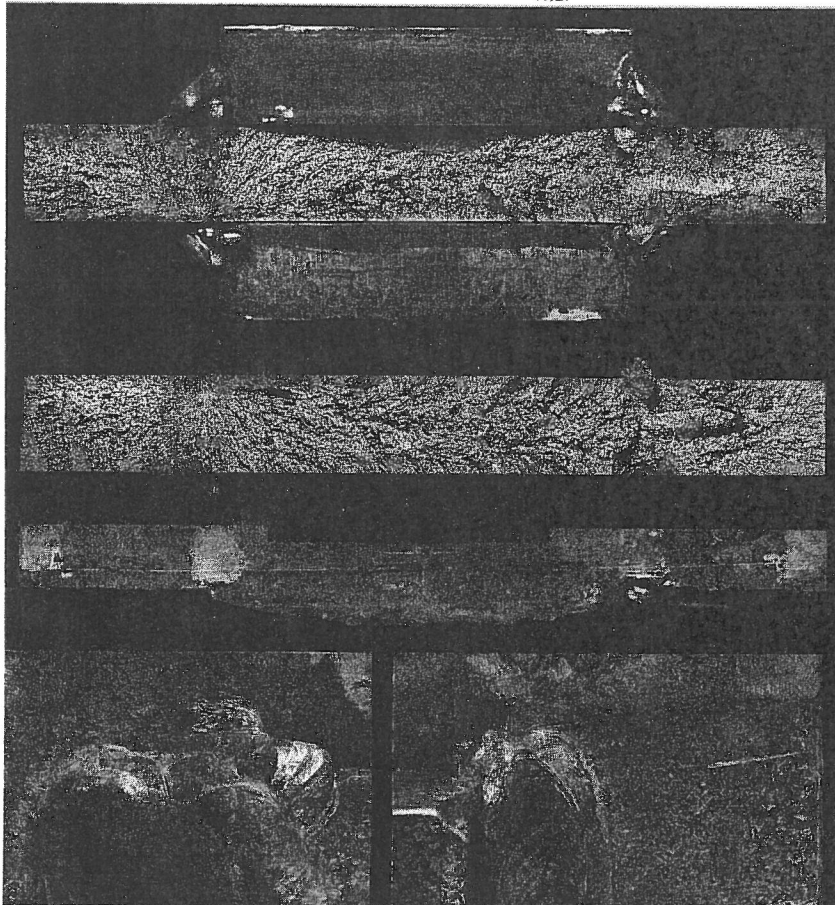
$\epsilon_{bl} = 2,9$  %

örtl. bl. bezogene Dickenänderung

$(\Delta d/d_o)_{bl} = 2,0$  %

örtl. Bruch-Nennspannung in Probenlängsrichtung

$\sigma_{N.Br} = 38,2$  kp/mm<sup>2</sup>



- $\epsilon_{bl}$  : örtliche bleibende Dehnung in Probenlängsrichtung an der potentiellen Trennbruch-Ausgangsstelle
- $\vartheta_v$  : Versuchstemperatur
- $\vartheta_{ü}$  : Übergangstemperatur der ISO-Spitzkerbprobe längs zur Walzrichtung für  $a_k = 3,5$  kpm/cm<sup>2</sup>
- ↑ : Bruchstelle außerhalb der Versuchslänge
- ∧ : Bruchausgang in der Schweißnaht
- ∧ : nach Anriß Restquerschnitt durch Gleitbruch zerstört
- ∧ : nach Anriß beginnender Gleitbruch in Trennbruch übergehend
- ∧ : Anriß bei niedriger Last wurde Primär-Trennbruch-Ausgangsstelle
- ∧ : Anriß bei niedriger Last

Proben-Nr. 3/1.1.6  
 Werkstoff R St 37 - 2 N  
 Walzrichtung zur Probenlängsrichtung parallel  
 Blechdicke  $d_o = 30$  mm

Störstellenform (Länge in mm) 

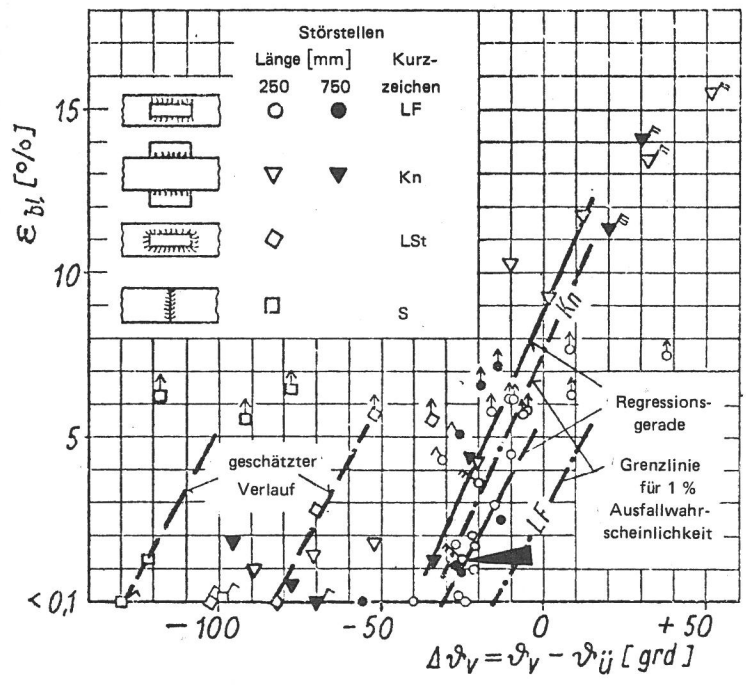
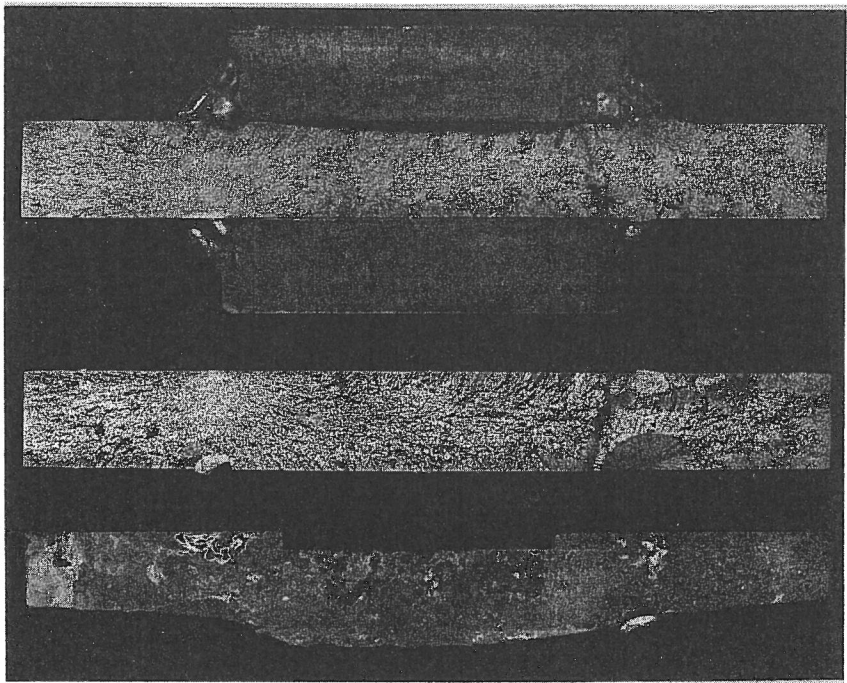
Übergangstemperatur aus Kerbschlagbiegeversuch längs Walzrichtung  $\vartheta_{ü} = -20,0$  °C

Versuchstemperatur  $\vartheta_v = -45$  °C

örtl. bl. Dehnung a.d. potentiellen Trennbruch-Ausgangsstelle  $\epsilon_{bl} = 1,3$  %

örtl. bl. bezogene Dickenänderung  $(\Delta d/d_o)_{bl} = 0,5$  %

örtl. Bruch-Nennspannung in Probenlängsrichtung  $\sigma_{N,Br} = 30,6$  kp/mm<sup>2</sup>



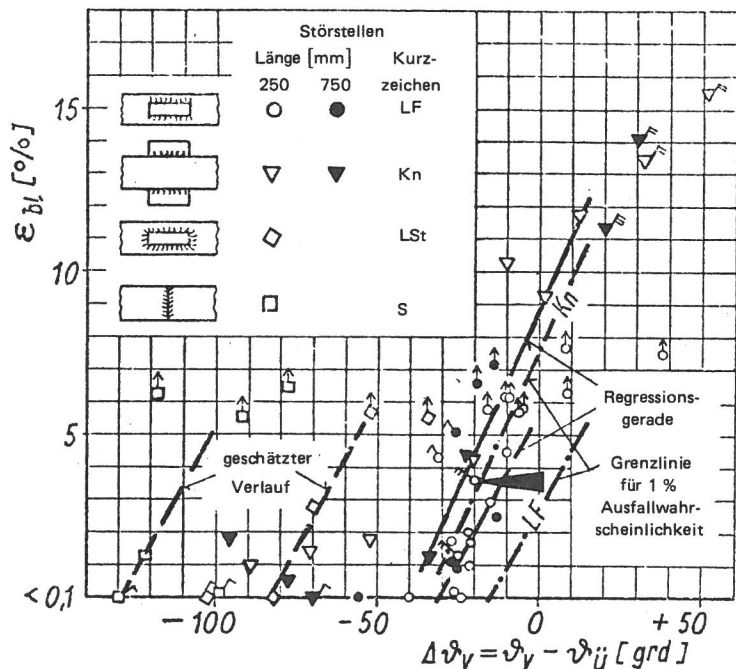
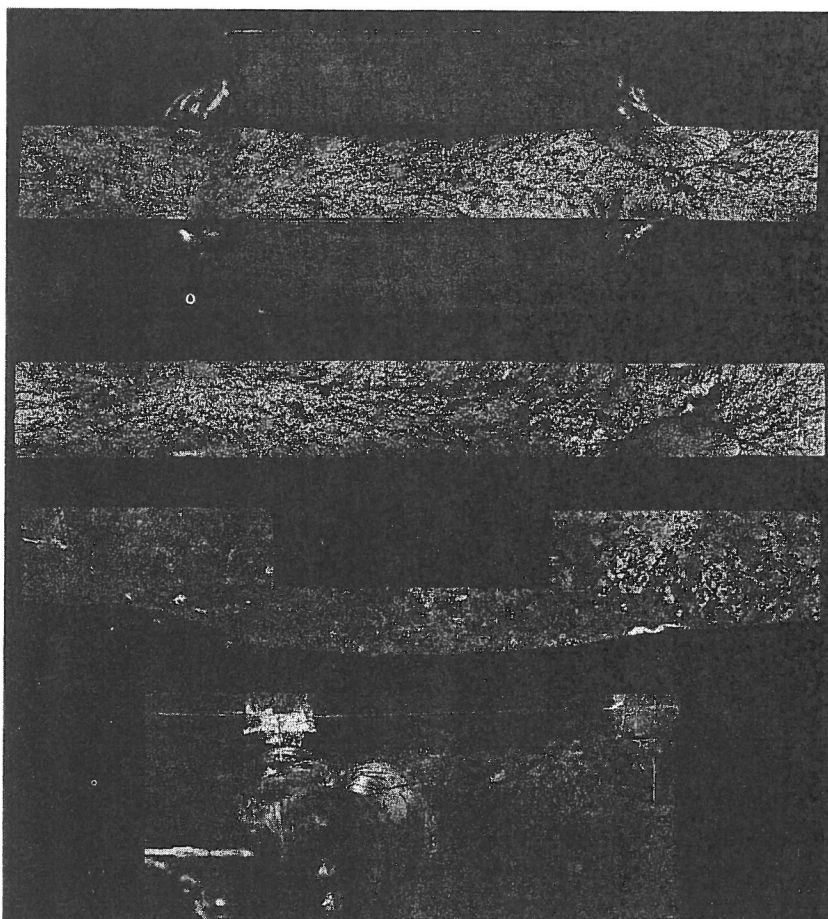
- $\epsilon_{bl}$  : örtliche bleibende Dehnung in Probenlängsrichtung an der potentiellen Trennbruch-Ausgangsstelle
- $\vartheta_v$  : Versuchstemperatur
- $\vartheta_{ü}$  : Übergangstemperatur der ISO-Spitzkerbprobe längs zur Walzrichtung für  $a_k = 3,5$  kpm/cm<sup>2</sup>
- ↑ : Bruchstelle außerhalb der Versuchslänge
- ∧ : Bruchausgang in der Schweißnaht
- ↗ : nach Anriß Restquerschnitt durch Gleitbruch zerstört
- ↘ : nach Anriß beginnender Gleitbruch in Trennbruch übergehend
- ↖ : Anriß bei niedriger Last wurde Primär-Trennbruch-Ausgangsstelle
- ↙ : Anriß bei niedriger Last

Proben-Nr. 3/1.1.7  
 Werkstoff R St 37 - 2 N  
 Walzrichtung zur Probenlängsrichtung parallel  
 Blechdicke  $d_o = 30$  mm

Störstellenform (Länge in mm) 

Übergangstemperatur aus Kerbschlagbiegeversuch längs Walzrichtung  $\vartheta_{\ddot{u}} = -10,5$  °C  
 Versuchstemperatur  $\vartheta_v = -30$  °C

örtl. bl. Dehnung a.d. potentiellen Trennbruch-Ausgangsstelle  $\epsilon_{bl} = 3,6$  %  
 örtl. bl. bezogene Dickenänderung  $(\Delta d/d_o)_{bl} = 2,8$  %  
 örtl. Bruch-Nennspannung in Probenlängsrichtung  $\sigma_{N,Br} = 38,5$  kp/mm<sup>2</sup>



- $\epsilon_{bl}$  : örtliche bleibende Dehnung in Probenlängsrichtung an der potentiellen Trennbruch-Ausgangsstelle
- $\vartheta_v$  : Versuchstemperatur
- $\vartheta_{\ddot{u}}$  : Übergangstemperatur der ISO-Spitzkerbprobe längs zur Walzrichtung für  $a_k = 3,5$  kpm/cm<sup>2</sup>
- ↑ : Bruchstelle außerhalb der Versuchslänge
- ↙ : Bruchausgang in der Schweißnaht
- ↘ : nach Anriß Restquerschnitt durch Gleitbruch zerstört
- ↗ : nach Anriß beginnender Gleitbruch in Trennbruch übergehend
- ↖ : Anriß bei niedriger Last wurde Primär-Trennbruch-Ausgangsstelle
- ↗ : Anriß bei niedriger Last



Proben-Nr. 6/1.1.9  
 Werkstoff R St 37 - 2 N  
 Walzrichtung zur Probenlängsrichtung parallel  
 Blechdicke  $d_o = 30$  mm

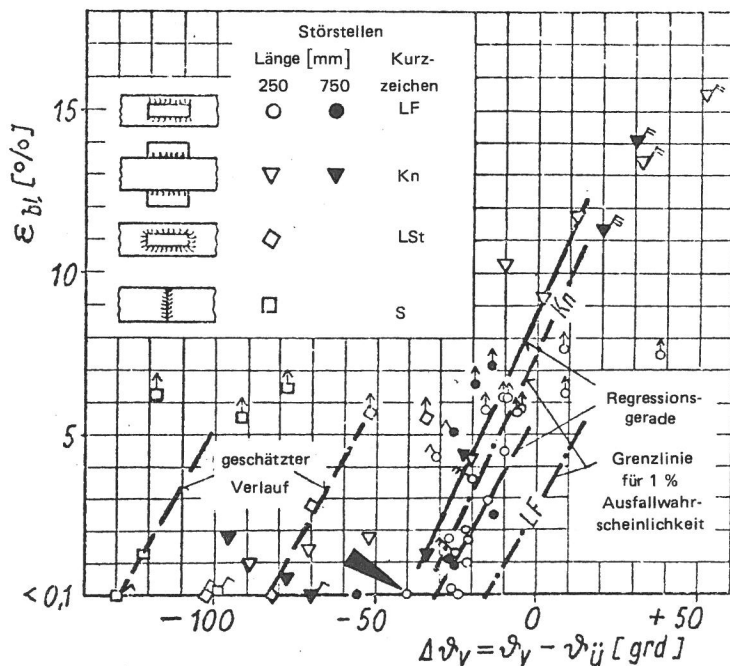
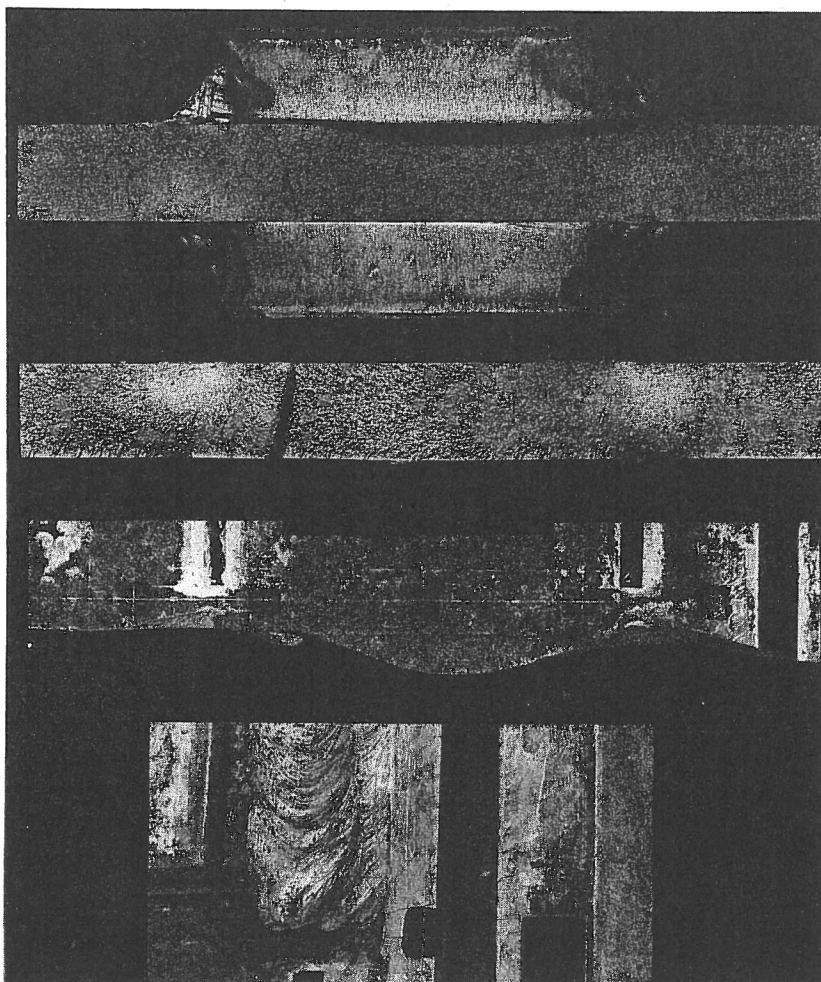
Störstellenform (Länge in mm) 

Übergangstemperatur aus Kerbschlagbiegeversuch längs Walzrichtung  $\vartheta_{Ü} = -26,0$  °C  
 Versuchstemperatur  $\vartheta_V = -66$  °C

örtl. bl. Dehnung a.d. potentiellen Trennbruch-Ausgangsstelle  $\epsilon_{bl} = < 0,1$  %

örtl. bl. bezogene Dickenänderung  $(\Delta d/d_o)_{bl} = < 0,1$  %

örtl. Bruch-Nennspannung in Probenlängsrichtung  $\sigma_{N,Br} = 19,6$  kp/mm<sup>2</sup>



- $\epsilon_{bl}$  : örtliche bleibende Dehnung in Probenlängsrichtung an der potentiellen Trennbruch-Ausgangsstelle
- $\vartheta_V$  : Versuchstemperatur
- $\vartheta_{Ü}$  : Übergangstemperatur der ISO-Spitzkerbprobe längs zur Walzrichtung für  $a_k = 3,5$  kpm/cm<sup>2</sup>
- ↑ : Bruchstelle außerhalb der Versuchslänge
- ↗ : Bruchausgang in der Schweißnaht
- ↘ : nach Anriß Restquerschnitt durch Gleitbruch zerstört
- ↖ : nach Anriß beginnender Gleitbruch in Trennbruch übergehend
- ↙ : Anriß bei niedriger Last wurde Primär-Trennbruch-Ausgangsstelle
- ↘ : Anriß bei niedriger Last

Proben-Nr.  
Werkstoff  
Walzrichtung zur Probenlängsrichtung  
Blechdicke

20/1.1.11  
R St 37 - 2 N  
parallel  
 $d_o = 30 \text{ mm}$

Störstellenform (Länge in mm)



Übergangstemperatur aus Kerbschlagbiegeversuch  
längs Walzrichtung

$\vartheta_{\bar{u}} = -20,0 \text{ } ^\circ\text{C}$

Versuchstemperatur

$\vartheta_v = -41 \text{ } ^\circ\text{C}$

örtl. bl. Dehnung a.d. potentiellen  
Trennbruch-Ausgangsstelle

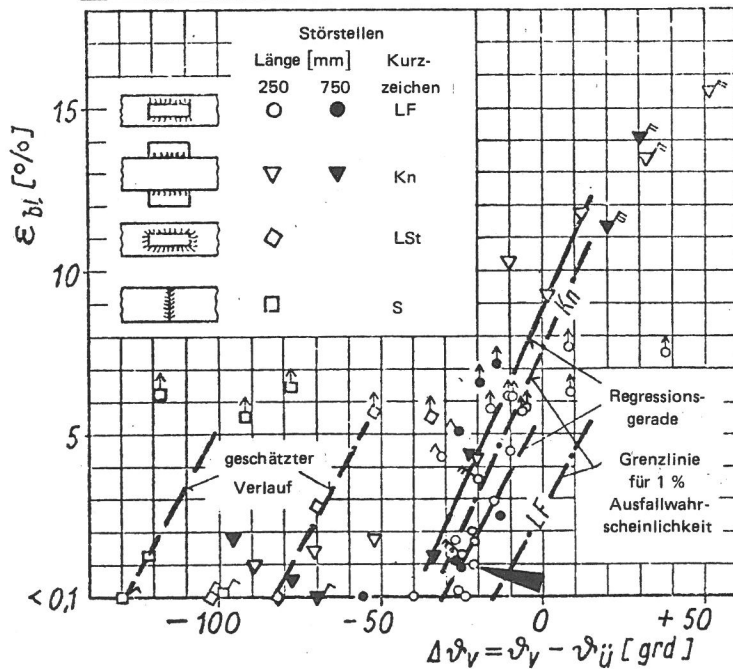
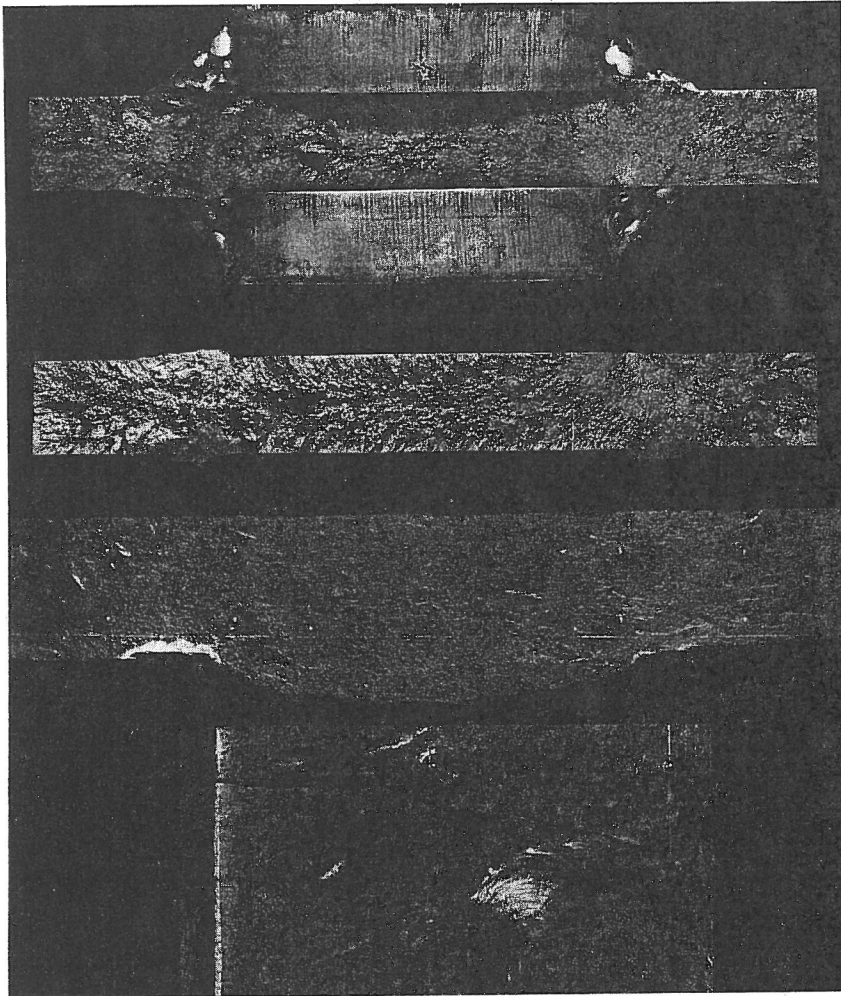
$\epsilon_{bl} = 1,0 \text{ } \%$

örtl. bl. bezogene Dickenänderung

$(\Delta d/d_o)_{bl} = 0,9 \text{ } \%$

örtl. Bruch-Nennspannung in Probenlängsrichtung

$\sigma_{N,Br} = 34,1 \text{ kp/mm}^2$



- $\epsilon_{bl}$  : örtliche bleibende Dehnung in Probenlängsrichtung an der potentiellen Trennbruch-Ausgangsstelle
- $\vartheta_v$  : Versuchstemperatur
- $\vartheta_{\bar{u}}$  : Übergangstemperatur der ISO-Spitzkerbprobe längs zur Walzrichtung für  $a_k = 3,5 \text{ kpm/cm}^2$
- ↑ : Bruchstelle außerhalb der Versuchslänge
- ↗ : Bruchausgang in der Schweißnaht
- ↘ : nach Anriß Restquerschnitt durch Gleitbruch zerstört
- ↖ : nach Anriß beginnender Gleitbruch in Trennbruch übergehend
- ↙ : Anriß bei niedriger Last wurde Primär-Trennbruch-Ausgangsstelle
- ↘ : Anriß bei niedriger Last

Proben-Nr.  
Werkstoff  
Walzrichtung zur Probenlängsrichtung  
Blechdicke

20/1.1.13  
R St 37 - 2 N  
parallel  
 $d_o = 30 \text{ mm}$

Anlage 23

Störstellenform (Länge in mm)



Übergangstemperatur aus Kerbschlagbiegeversuch  
längs Walzrichtung

$\vartheta_{\ddot{u}} = -29,0 \text{ }^\circ\text{C}$

Versuchstemperatur

$\vartheta_v = -51 \text{ }^\circ\text{C}$

örtl. bl. Dehnung a.d. potentiellen  
Trennbruch-Ausgangsstelle

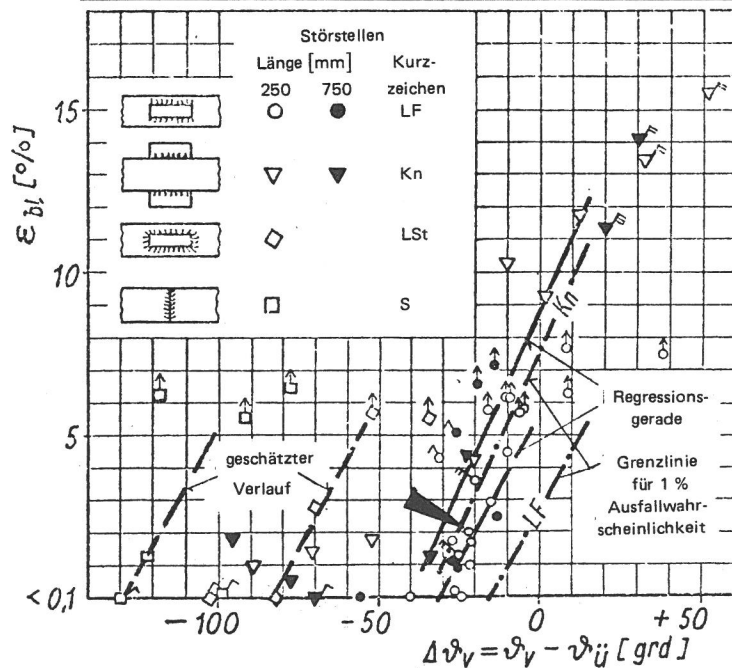
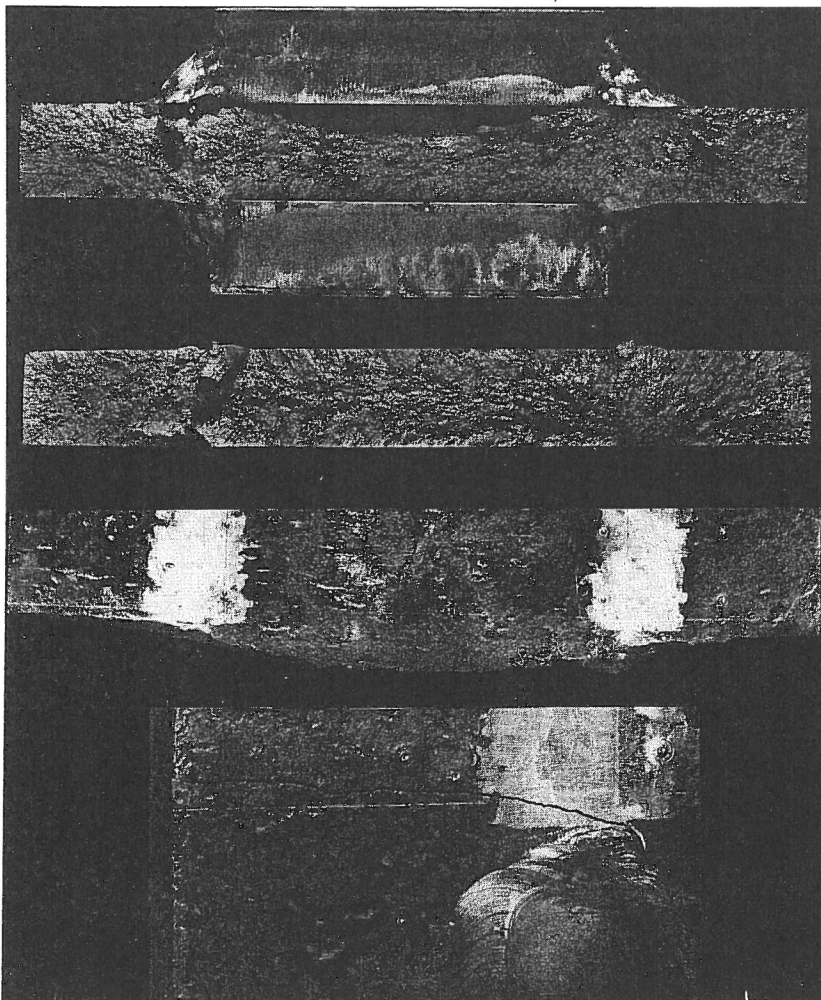
$\epsilon_{bl} = 2,0 \%$

örtl. bl. bezogene Dickenänderung

$(\Delta d/d_o)_{bl} = 1,9 \%$

örtl. Bruch-Nennspannung in Probenlängsrichtung

$\sigma_{N,Br} = 35,2 \text{ kp/mm}^2$



- $\epsilon_{bl}$  : örtliche bleibende Dehnung in Probenlängsrichtung an der potentiellen Trennbruch-Ausgangsstelle
- $\vartheta_v$  : Versuchstemperatur
- $\vartheta_{\ddot{u}}$  : Übergangstemperatur der ISO-Spitzkerbprobe längs zur Walzrichtung für  $a_k = 3,5 \text{ kpm/cm}^2$
- ↑ : Bruchstelle außerhalb der Versuchslänge
- ↗ : Bruchausgang in der Schweißnaht
- ↘ : nach Anriß Restquerschnitt durch Gleitbruch zerstört
- ↖ : nach Anriß beginnender Gleitbruch in Trennbruch übergehend
- ↙ : Anriß bei niedriger Last wurde Primär-Trennbruch-Ausgangsstelle
- ↘ : Anriß bei niedriger Last

Proben-Nr. 21/1.1.16  
 Werkstoff R St 37 - 2 N  
 Walzrichtung zur Probenlängsrichtung parallel  
 Blechdicke  $d_0 = 30$  mm

Störstellenform (Länge in mm) 

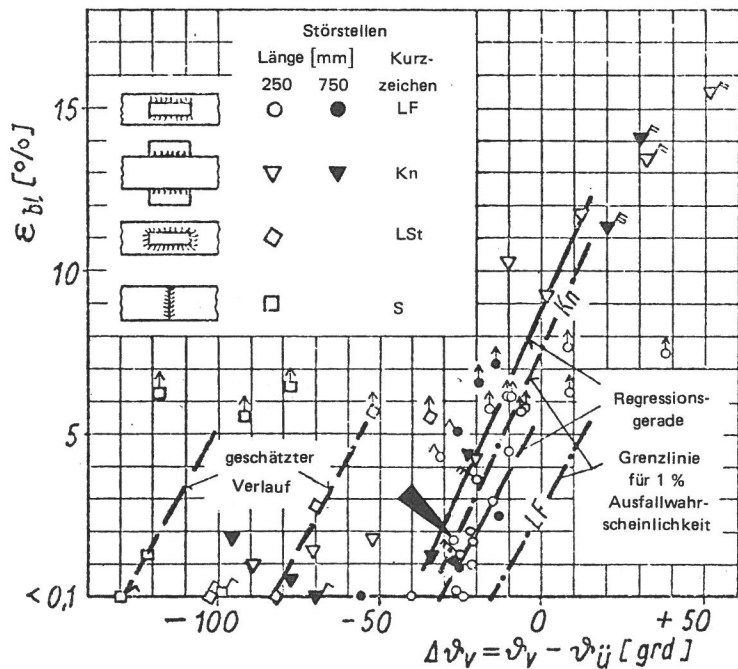
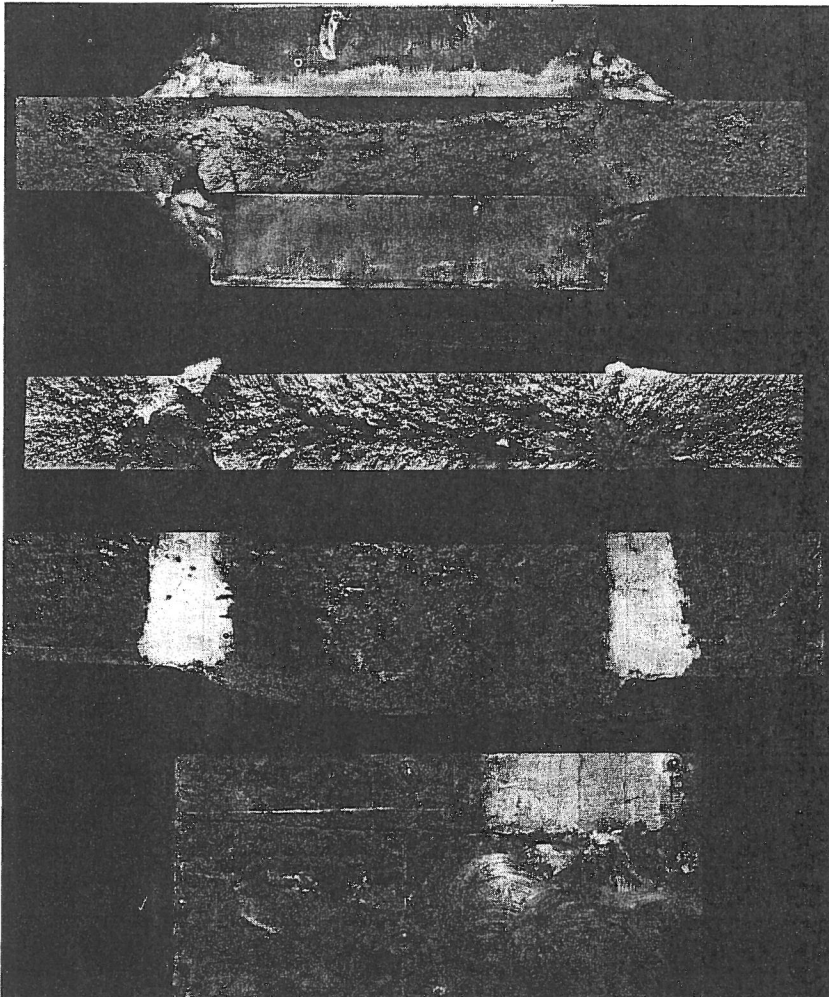
Übergangstemperatur aus Kerbschlagbiegeversuch  
 längs Walzrichtung  $\vartheta_{\ddot{u}} = -29,0$  °C

Versuchstemperatur  $\vartheta_V = -56$  °C

örtl. bl. Dehnung a.d. potentiellen  
 Trennbruch-Ausgangsstelle  $\epsilon_{bl} = 1,7$  %

örtl. bl. bezogene Dickenänderung  $(\Delta d/d_0)_{bl} = 1,9$  %

örtl. Bruch-Nennspannung in Probenlängsrichtung  $\sigma_{N,Br} = 34,6$  kp/mm<sup>2</sup>



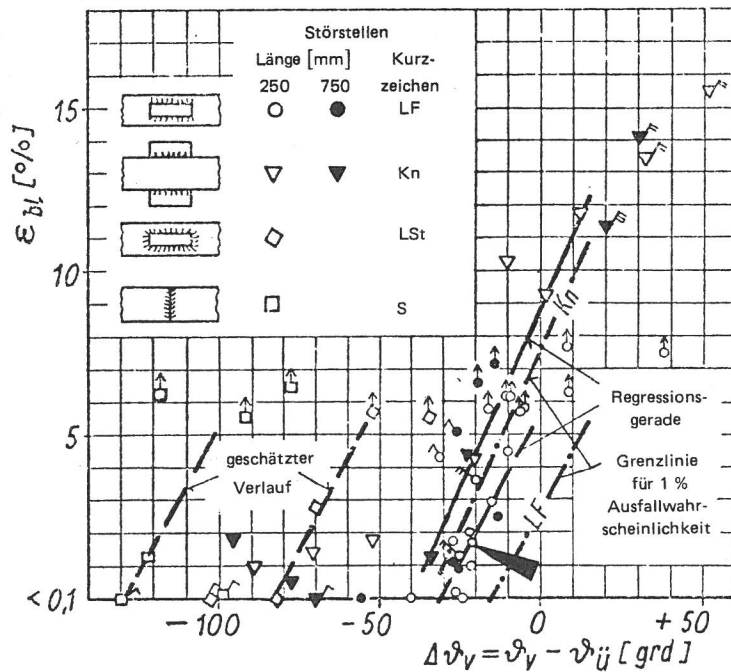
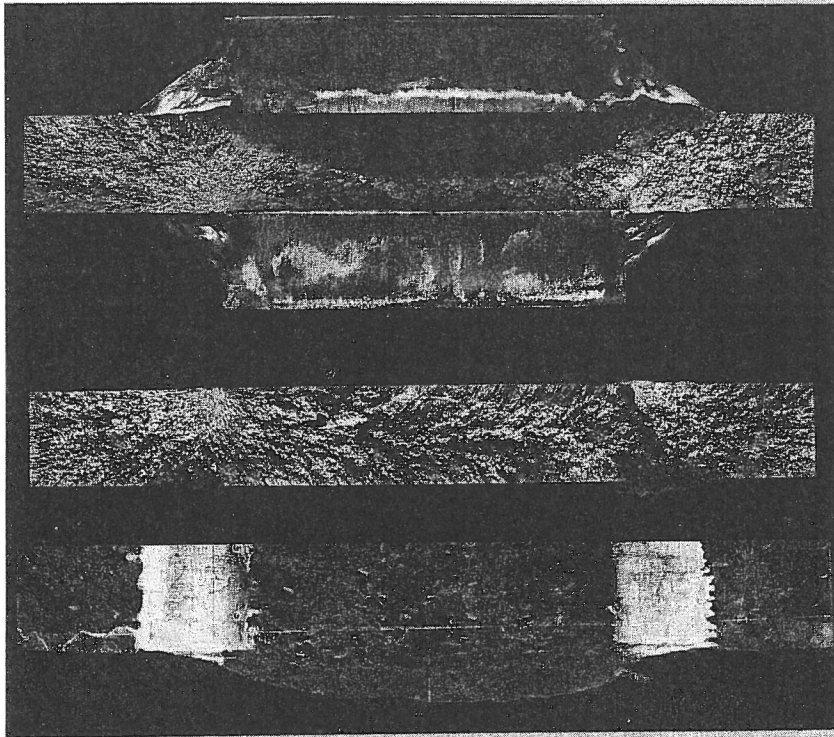
- $\epsilon_{bl}$  : örtliche bleibende Dehnung in Probenlängsrichtung an der potentiellen Trennbruch-Ausgangsstelle
- $\vartheta_V$  : Versuchstemperatur
- $\vartheta_{\ddot{u}}$  : Übergangstemperatur der ISO-Spitzkerbprobe längs zur Walzrichtung für  $a_k = 3,5$  kpm/cm<sup>2</sup>
- ↑ : Bruchstelle außerhalb der Versuchslänge
- ↙ : Bruchausgang in der Schweißnaht
- ↘ : nach Anriß Restquerschnitt durch Gleitbruch zerstört
- ↗ : nach Anriß beginnender Gleitbruch in Trennbruch übergehend
- ↖ : Anriß bei niedriger Last wurde Primär-Trennbruch-Ausgangsstelle
- ↗ : Anriß bei niedriger Last

Proben-Nr. 22/1.1.17  
 Werkstoff R St 37 - 2 N  
 Walzrichtung zur Probenlängsrichtung parallel  
 Blechdicke  $d_o = 30$  mm

Störstellenform (Länge in mm)



Übergangstemperatur aus Kerbschlagbiegeversuch  
 längs Walzrichtung  $\vartheta_{Ü} = -20,0$  °C  
 Versuchstemperatur  $\vartheta_V = -41$  °C  
 örtl. bl. Dehnung a.d. potentiellen  
 Trennbruch-Ausgangsstelle  $\epsilon_{bl} = 1,7$  %  
 örtl. bl. bezogene Dickenänderung  $(\Delta d/d_o)_{bl} = 2,2$  %  
 örtl. Bruch-Nennspannung in Probenlängsrichtung  $\sigma_{N,Br} = 35,8$  kp/mm<sup>2</sup>



- $\epsilon_{bl}$  : örtliche bleibende Dehnung in Probenlängsrichtung an der potentiellen Trennbruch-Ausgangsstelle
- $\vartheta_V$  : Versuchstemperatur
- $\vartheta_U$  : Übergangstemperatur der ISO-Spitzkerbprobe längs zur Walzrichtung für  $a_k = 3,5$  kpm/cm<sup>2</sup>
- ↑ : Bruchstelle außerhalb der Versuchslänge
- ∧ : Bruchausgang in der Schweißnaht
- ↗ : nach Anriß Restquerschnitt durch Gleitbruch zerstört
- ↘ : nach Anriß beginnender Gleitbruch in Trennbruch übergehend
- ↖ : Anriß bei niedriger Last wurde Primär-Trennbruch-Ausgangsstelle
- ↙ : Anriß bei niedriger Last

Proben-Nr.  
Werkstoff  
Walzrichtung zur Probenlängsrichtung  
Blechedicke

22/1.1.18  
R St 37 - 2 N  
parallel  
 $d_o = 30 \text{ mm}$

Störstellenform (Länge in mm)



Übergangstemperatur aus Kerbschlagbiegeversuch  
längs Walzrichtung

$\vartheta_{\ddot{u}} = -20,0 \text{ } ^\circ\text{C}$

Versuchstemperatur

$\vartheta_v = -51 \text{ } ^\circ\text{C}$

örtl. bl. Dehnung a.d. potentiellen  
Trennbruch-Ausgangsstelle

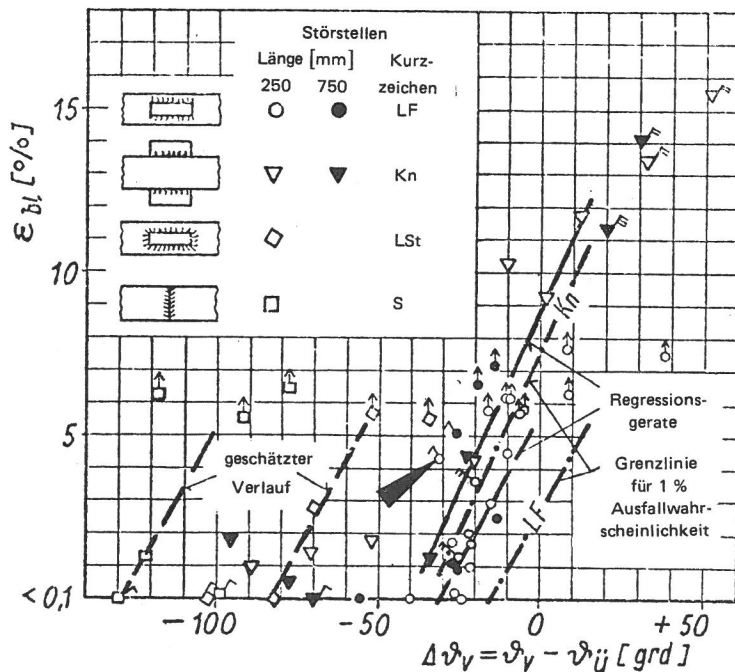
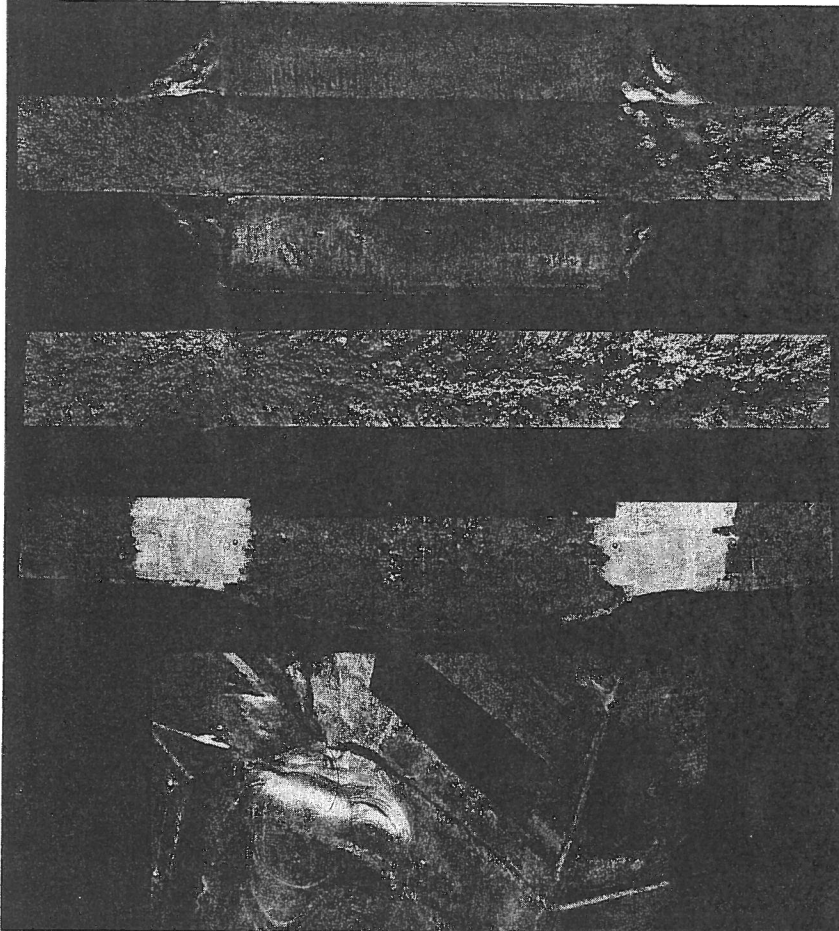
$\epsilon_{bl} = 4,3 \%$

örtl. bl. bezogene Dickenänderung

$(\Delta d/d_o)_{bl} = 3,5 \%$

örtl. Bruch-Nennspannung in Probenlängsrichtung

$\sigma_{N,Br} = 43,0 \text{ kp/mm}^2$

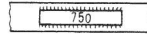


- $\epsilon_{bl}$  : örtliche bleibende Dehnung in Probenlängsrichtung an der potentiellen Trennbruch-Ausgangsstelle
- $\vartheta_v$  : Versuchstemperatur
- $\vartheta_{\ddot{u}}$  : Übergangstemperatur der ISO-Spitzkerbprobe längs zur Walzrichtung für  $a_k = 3,5 \text{ kpm/cm}^2$
- ↑ : Bruchstelle außerhalb der Versuchslänge
- ↗ : Bruchausgang in der Schweißnaht
- ↘ : nach Anriß Restquerschnitt durch Gleitbruch zerstört
- ↖ : nach Anriß beginnender Gleitbruch in Trennbruch übergehend
- ↙ : Anriß bei niedriger Last wurde Primär-Trennbruch-Ausgangsstelle
- ↗ : Anriß bei niedriger Last

Proben-Nr.  
 Werkstoff  
 Walzrichtung zur Probenlängsrichtung  
 Blechdicke

9/1.4.2  
 R St 37 - 2 N  
 parallel  
 $d_o = 30 \text{ mm}$

Störstellenform (Länge in mm)



Übergangstemperatur aus Kerbschlagbiegeversuch  
 längs Walzrichtung

$\vartheta_{\ddot{u}} = -11,0 \text{ } ^\circ\text{C}$

Versuchstemperatur

$\vartheta_V = -67 \text{ } ^\circ\text{C}$

örtl. bl. Dehnung a.d. potentiellen  
 Trennbruch-Ausgangsstelle

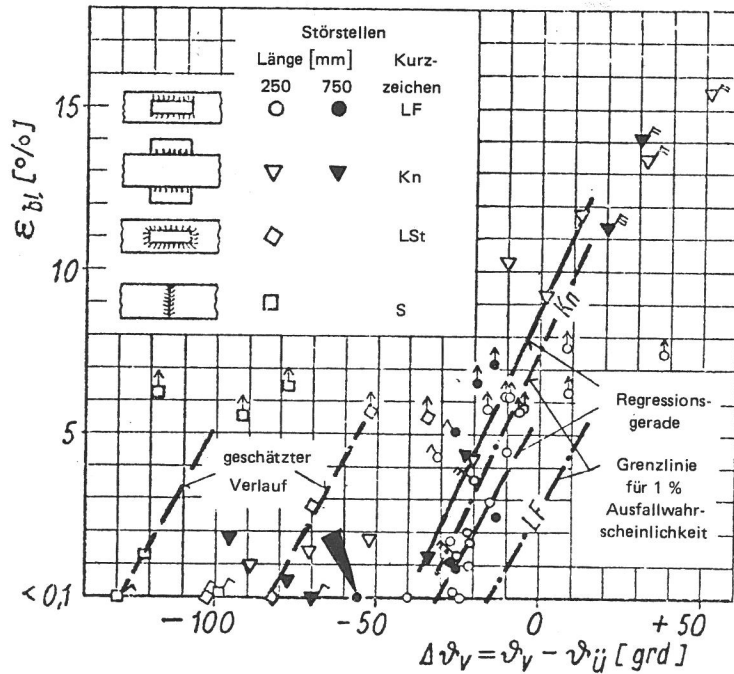
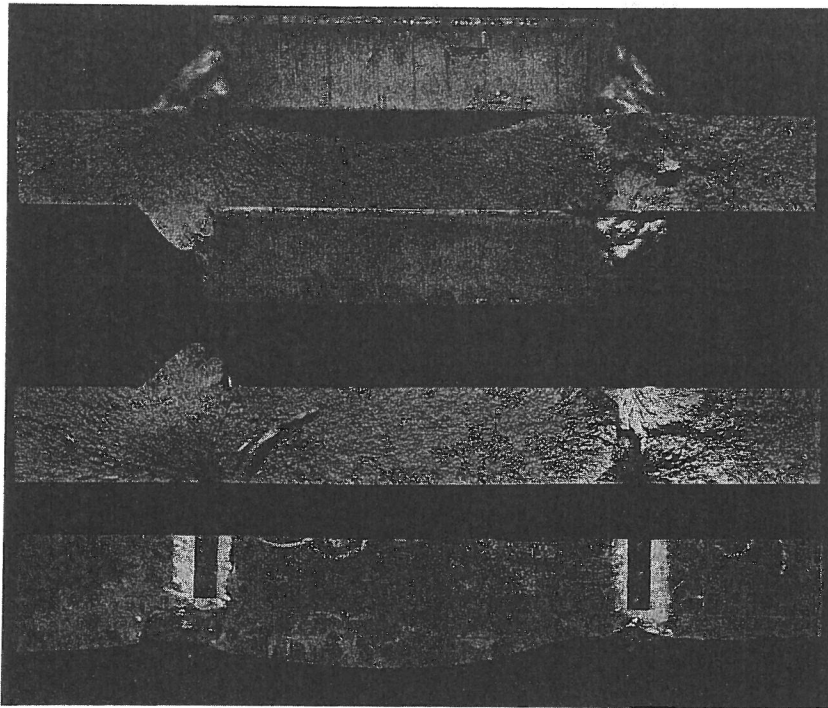
$\epsilon_{bl} = < 0,1 \%$

örtl. bl. bezogene Dickenänderung

$(\Delta d/d_o)_{bl} = < 0,1 \%$

örtl. Bruch-Nennspannung in Probenlängsrichtung

$\sigma_{N,Br} = 29,8 \text{ kp/mm}^2$



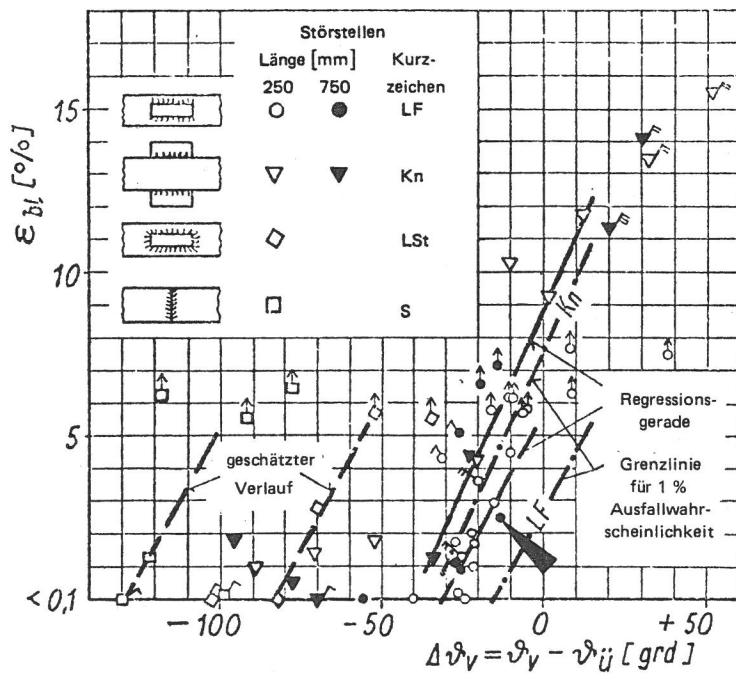
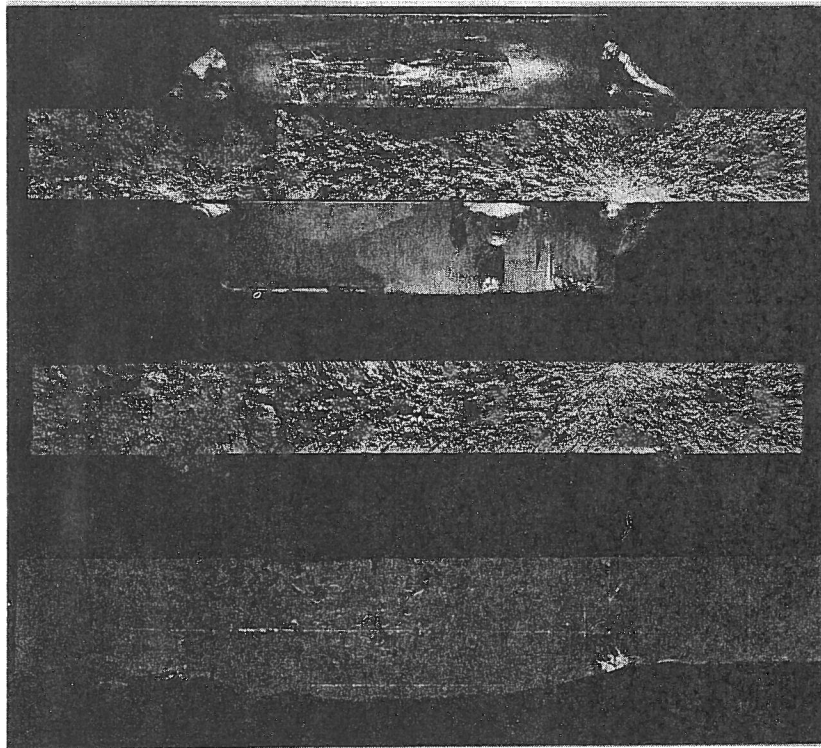
- $\epsilon_{bl}$  : örtliche bleibende Dehnung in Probenlängsrichtung an der potentiellen Trennbruch-Ausgangsstelle
- $\vartheta_V$  : Versuchstemperatur
- $\vartheta_{\ddot{u}}$  : Übergangstemperatur der ISO-Spitzkerbprobe längs zur Walzrichtung für  $a_k = 3,5 \text{ kpm/cm}^2$
- ↑ : Bruchstelle außerhalb der Versuchslänge
- ↙ : Bruchausgang in der Schweißnaht
- ↘ : nach Anriß Restquerschnitt durch Gleitbruch zerstört
- ↗ : nach Anriß beginnender Gleitbruch in Trennbruch übergehend
- ↖ : Anriß bei niedriger Last wurde Primär-Trennbruch-Ausgangsstelle
- ↗ : Anriß bei niedriger Last

Proben-Nr. 10/1.4.4  
 Werkstoff R St 37 - 2 N  
 Walzrichtung zur Probenlängsrichtung parallel  
 Blechdicke  $d_o = 30$  mm

Störstellenform (Länge in mm) 

Übergangstemperatur aus Kerbschlagbiegeversuch längs Walzrichtung  $\vartheta_{Ü} = -28,0$  °C  
 Versuchstemperatur  $\vartheta_V = -41$  °C

örtl. bl. Dehnung a.d. potentiellen Trennbruch-Ausgangsstelle  $\epsilon_{bl} = 2,5$  %  
 örtl. bl. bezogene Dickenänderung  $(\Delta d/d_o)_{bl} = 2,6$  %  
 örtl. Bruch-Nennspannung in Probenlängsrichtung  $\sigma_{N,Br} = 35,6$  kp/mm<sup>2</sup>

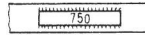


- $\epsilon_{bl}$  : örtliche bleibende Dehnung in Probenlängsrichtung an der potentiellen Trennbruch-Ausgangsstelle
- $\vartheta_V$  : Versuchstemperatur
- $\vartheta_{Ü}$  : Übergangstemperatur der ISO-Spitzkerbprobe längs zur Walzrichtung für  $a_k = 3,5$  kpm/cm<sup>2</sup>
- ↑ : Bruchstelle außerhalb der Versuchslänge
- ↗ : Bruchausgang in der Schweißnaht
- ↘ : nach Anriß Restquerschnitt durch Gleitbruch zerstört
- ↖ : nach Anriß beginnender Gleitbruch in Trennbruch übergehend
- ↙ : Anriß bei niedriger Last wurde Primär-Trennbruch-Ausgangsstelle
- ↗ : Anriß bei niedriger Last



Proben-Nr. 10/1.4.5  
 Werkstoff R St 37 - 2 N  
 Walzrichtung zur Probenlängsrichtung parallel  
 Blechdicke  $d_0 = 30$  mm

Störstellenform (Länge in mm)



Übergangstemperatur aus Kerbschlagbiegeversuch längs Walzrichtung

$$\vartheta_{\ddot{u}} = -26,0 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Versuchstemperatur

$$\vartheta_V = -51 \text{ } ^\circ\text{C}$$

örtl. bl. Dehnung a.d. potentiellen Trennbruch-Ausgangsstelle

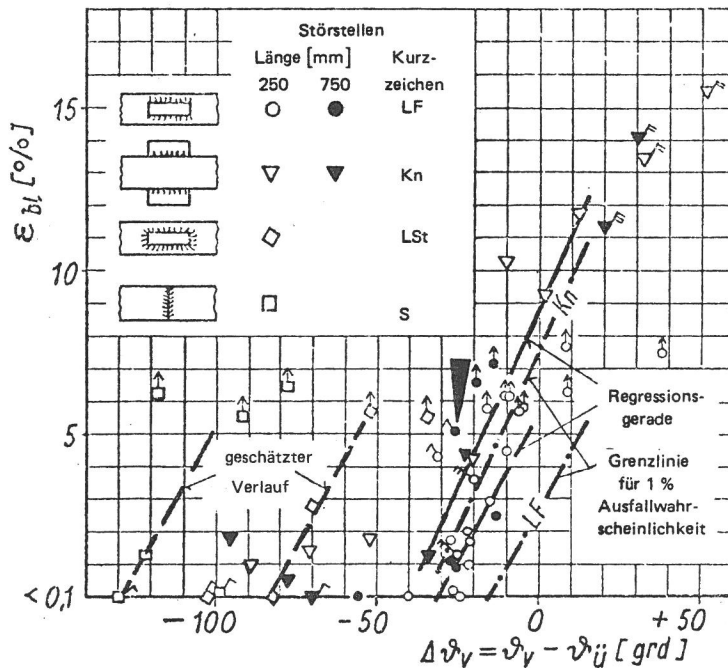
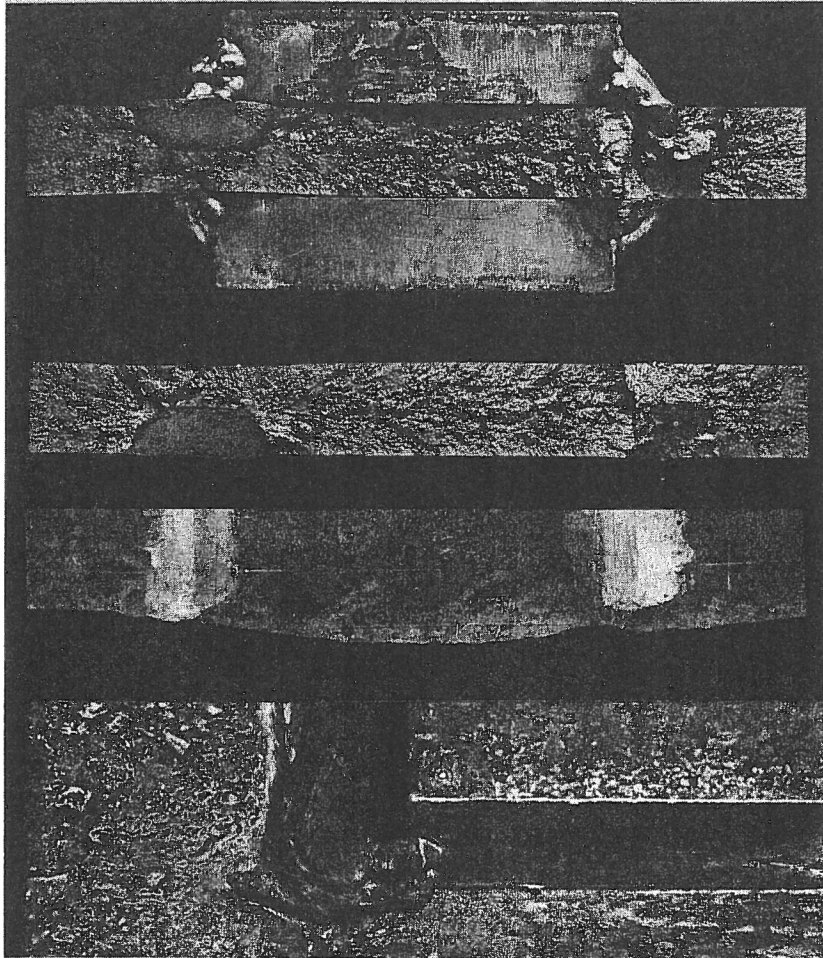
$$\epsilon_{bl} = 5,1 \%$$

örtl. bl. bezogene Dickenänderung

$$(\Delta d/d_0)_{bl} = 4,8 \%$$

örtl. Bruch-Nennspannung in Probenlängsrichtung

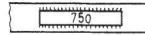
$$\sigma_{N,Br} = 40,2 \text{ kp/mm}^2$$



- $\epsilon_{bl}$  : örtliche bleibende Dehnung in Probenlängsrichtung an der potentiellen Trennbruch-Ausgangsstelle
- $\vartheta_V$  : Versuchstemperatur
- $\vartheta_{\ddot{u}}$  : Übergangstemperatur der ISO-Spitzkerbprobe längs zur Walzrichtung für  $a_k = 3,5 \text{ kpm/cm}^2$
- ↑ : Bruchstelle außerhalb der Versuchslänge
- ↗ : Bruchausgang in der Schweißnaht
- ↘ : nach Anriß Restquerschnitt durch Gleitbruch zerstört
- ↖ : nach Anriß beginnender Gleitbruch in Trennbruch übergehend
- ↙ : Anriß bei niedriger Last wurde Primär-Trennbruch-Ausgangsstelle
- ↘ : Anriß bei niedriger Last

Proben-Nr. 10/1.4.6  
 Werkstoff R St 37 - 2 N  
 Walzrichtung zur Probenlängsrichtung parallel  
 Blechdicke  $d_o = 30$  mm

Störstellenform (Länge in mm)



Übergangstemperatur aus Kerbschlagbiegeversuch längs Walzrichtung

$\vartheta_{\ddot{u}} = -30,0$  °C

Versuchstemperatur

$\vartheta_v = -55$  °C

örtl. bl. Dehnung a.d. potentiellen Trennbruch-Ausgangsstelle

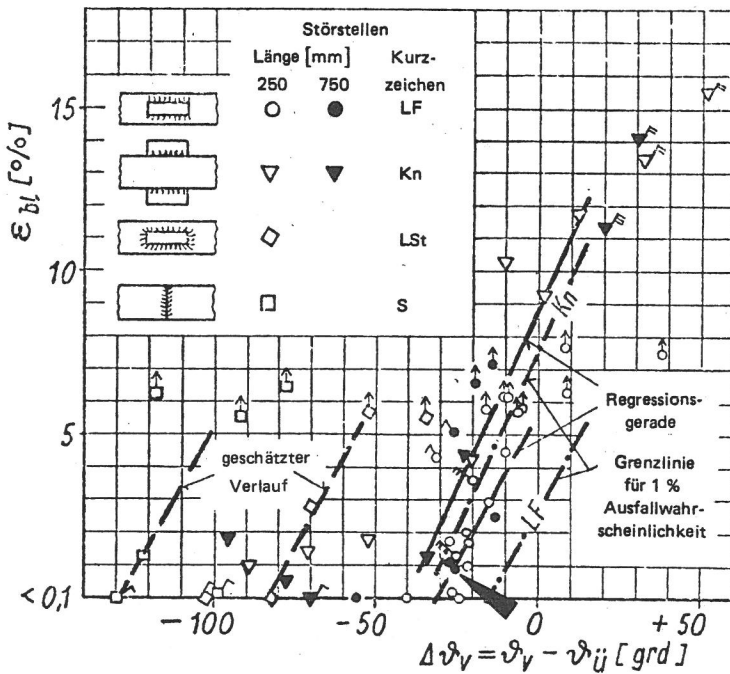
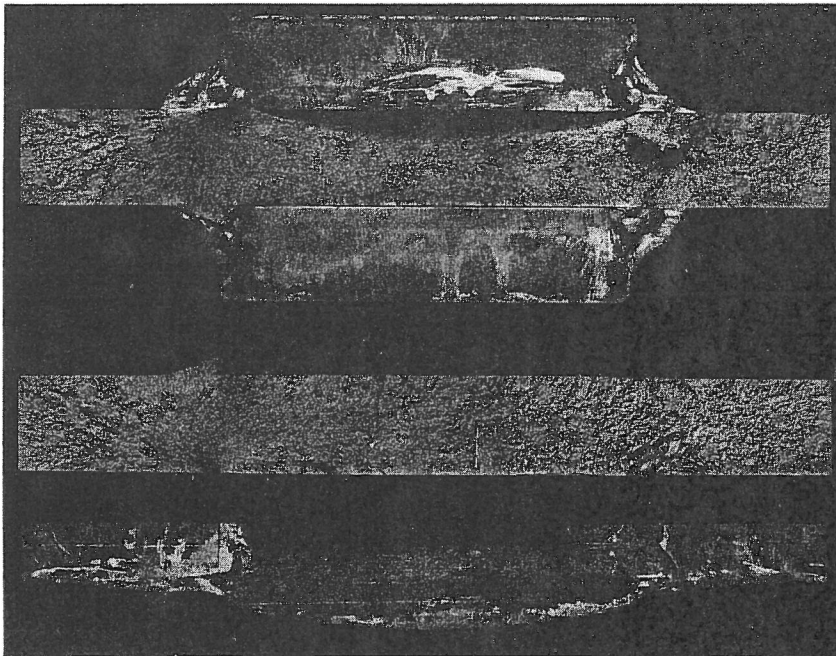
$\epsilon_{bl} = 0,9$  %

örtl. bl. bezogene Dickenänderung

$(\Delta d/d_o)_{bl} = 0,9$  %

örtl. Bruch-Nennspannung in Probenlängsrichtung

$\sigma_{N,Br} = 30,4$  kp/mm<sup>2</sup>

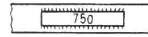


- $\epsilon_{bl}$  : örtliche bleibende Dehnung in Probenlängsrichtung an der potentiellen Trennbruch-Ausgangsstelle
- $\vartheta_v$  : Versuchstemperatur
- $\vartheta_{\ddot{u}}$  : Übergangstemperatur der ISO-Spitzkerbprobe längs zur Walzrichtung für  $a_k = 3,5$  kpm/cm<sup>2</sup>
- ↑ : Bruchstelle außerhalb der Versuchslänge
- ↙ : Bruchausgang in der Schweißnaht
- ↘ : nach Anriß Restquerschnitt durch Gleitbruch zerstört
- ↗ : nach Anriß beginnender Gleitbruch in Trennbruch übergehend
- ↖ : Anriß bei niedriger Last wurde Primär-Trennbruch-Ausgangsstelle
- ↗ : Anriß bei niedriger Last

Proben-Nr.  
Werkstoff  
Walzrichtung zur Probenlängsrichtung  
Blechedicke

13/1.4.7  
R St 37 - 2 N  
parallel  
 $d_0 = 30 \text{ mm}$

Störstellenform (Länge in mm)



Übergangstemperatur aus Kerbschlagbiegeversuch  
längs Walzrichtung

$\vartheta_{\ddot{u}} = -16,0 \text{ }^\circ\text{C}$

Versuchstemperatur

$\vartheta_V = -43 \text{ }^\circ\text{C}$

örtl. bl. Dehnung a.d. potentiellen  
Trennbruch-Ausgangsstelle

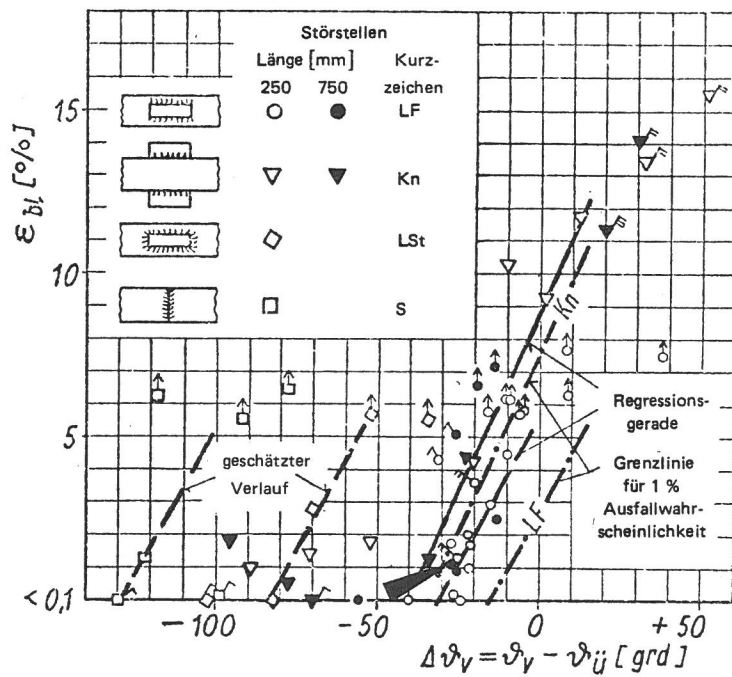
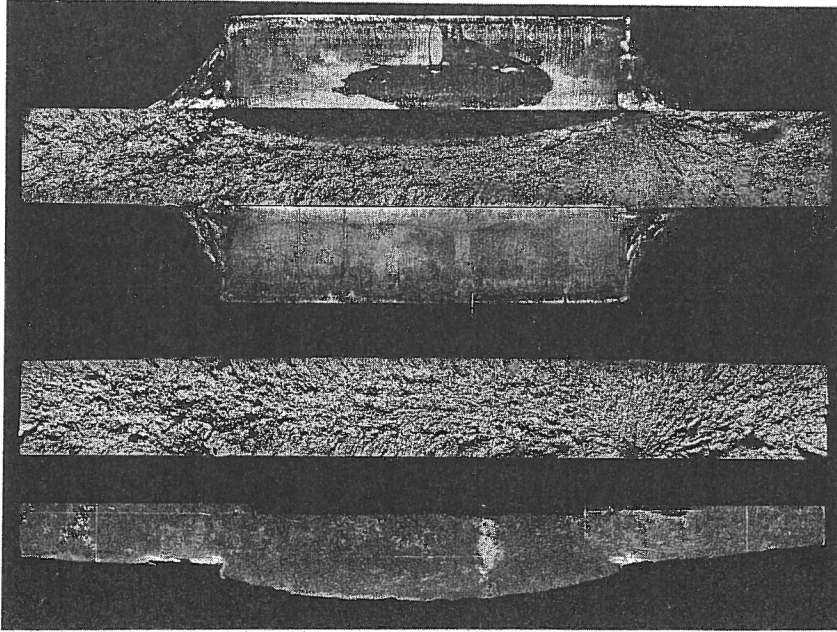
$\epsilon_{bl} = 1,1 \%$

örtl. bl. bezogene Dickenänderung


$(\Delta d/d_0)_{bl} = 1,0 \%$

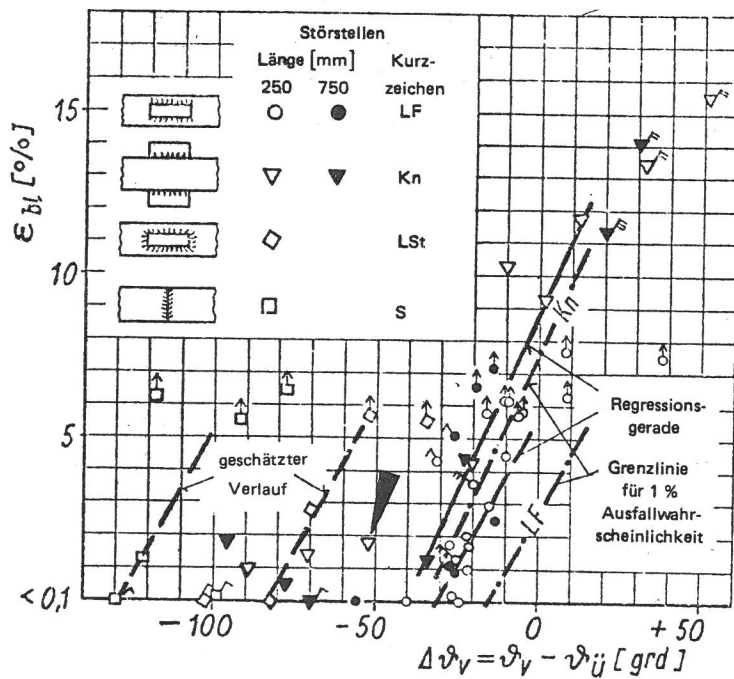
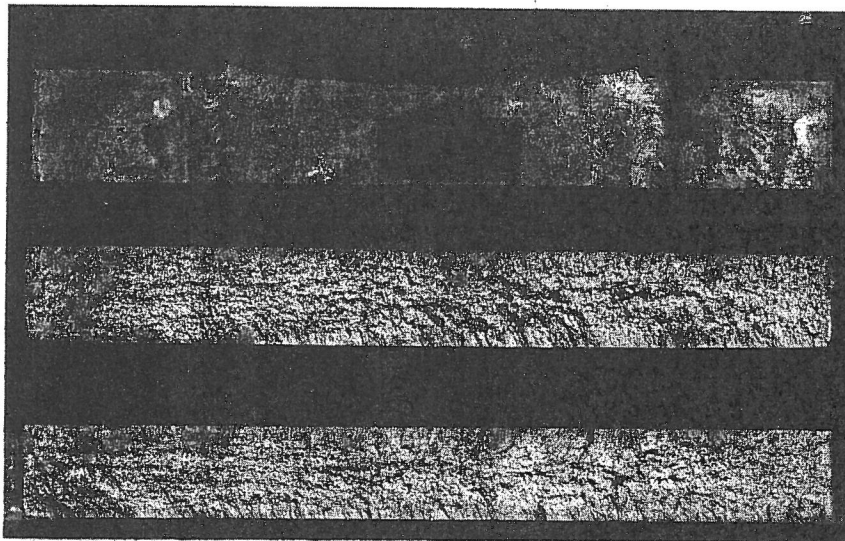
örtl. Bruch-Nennspannung in Probenlängsrichtung

$\sigma_{N.Br} = 32,9 \text{ kp/mm}^2$



- $\epsilon_{bl}$  : örtliche bleibende Dehnung in Probenlängsrichtung an der potentiellen Trennbruch-Ausgangsstelle
- $\vartheta_V$  : Versuchstemperatur
- $\vartheta_{\ddot{u}}$  : Übergangstemperatur der ISO-Spitzkerbprobe längs zur Walzrichtung für  $a_k = 3,5 \text{ kpm/cm}^2$
- ↑ : Bruchstelle außerhalb der Versuchslänge
- ↗ : Bruchausgang in der Schweißnaht
- ↘ : nach Anriß Restquerschnitt durch Gleitbruch zerstört
- ↖ : nach Anriß beginnender Gleitbruch in Trennbruch übergehend
- ↙ : Anriß bei niedriger Last wurde Primär-Trennbruch-Ausgangsstelle
- ↗ : Anriß bei niedriger Last

Proben-Nr.	2/1.3.1
Werkstoff	R St 37 - 2 N
Walzrichtung zur Probenlängsrichtung	parallel
Blehdicke	$d_o = 30 \text{ mm}$
Störstellenform (Länge in mm)	
Übergangstemperatur aus Kerbschlagbiegeversuch längs Walzrichtung	$\vartheta_{ü} = -14,0 \text{ °C}$
Versuchstemperatur	$\vartheta_v = -66 \text{ °C}$
örtl. bl. Dehnung a.d. potentiellen Trennbruch-Ausgangsstelle	$\epsilon_{bl} = 1,8 \%$
örtl. bl. bezogene Dickenänderung	$(\Delta d/d_o)_{bl} = 3,7 \%$
örtl. Bruch-Nennspannung in Probenlängsrichtung	$\sigma_{N,Br} = 33,5 \text{ kp/mm}^2$



- $\epsilon_{bl}$  : örtliche bleibende Dehnung in Probenlängsrichtung an der potentiellen Trennbruch-Ausgangsstelle
- $\vartheta_v$  : Versuchstemperatur
- $\vartheta_{ü}$  : Übergangstemperatur der ISO-Spitzkerbprobe längs zur Walzrichtung für  $a_k = 3,5 \text{ kpm/cm}^2$
- $\uparrow$  : Bruchstelle außerhalb der Versuchslänge
- $\wedge$  : Bruchausgang in der Schweißnaht
- $\text{---}$  : nach Anriß Restquerschnitt durch Gleitbruch zerstört
- $\text{---}$  : nach Anriß beginnender Gleitbruch in Trennbruch übergehend
- $\text{---}$  : Anriß bei niedriger Last wurde Primär-Trennbruch-Ausgangsstelle
- $\text{---}$  : Anriß bei niedriger Last

Proben-Nr. 4/1.3.2  
 Werkstoff R St 37 - 2 N  
 Walzrichtung zur Probenlängsrichtung parallel  
 Blechdicke  $d_o = 30$  mm

Störstellenform (Länge in mm)



Übergangstemperatur aus Kerbschlagbiegeversuch längs Walzrichtung

$\vartheta_{\ddot{u}} = -30,5$  °C

Versuchstemperatur

$\vartheta_V = -29$  °C

örtl. bl. Dehnung a.d. potentiellen Trennbruch-Ausgangsstelle

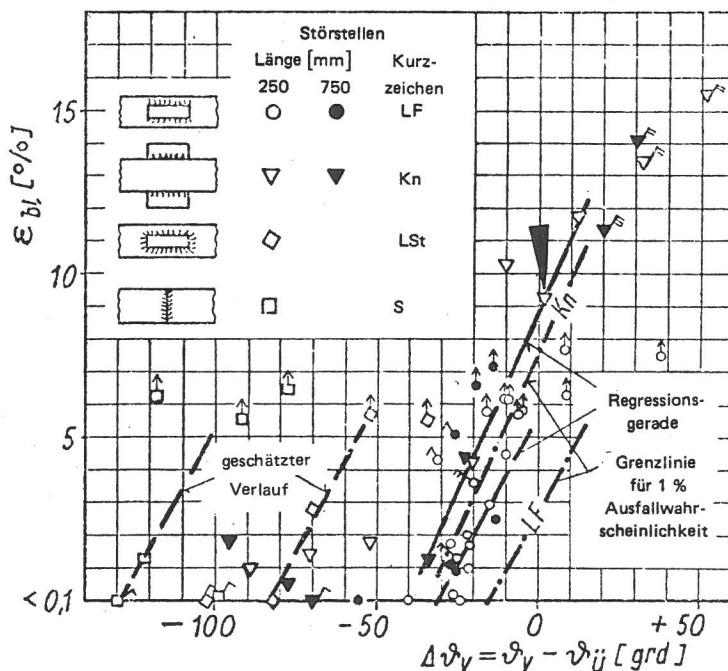
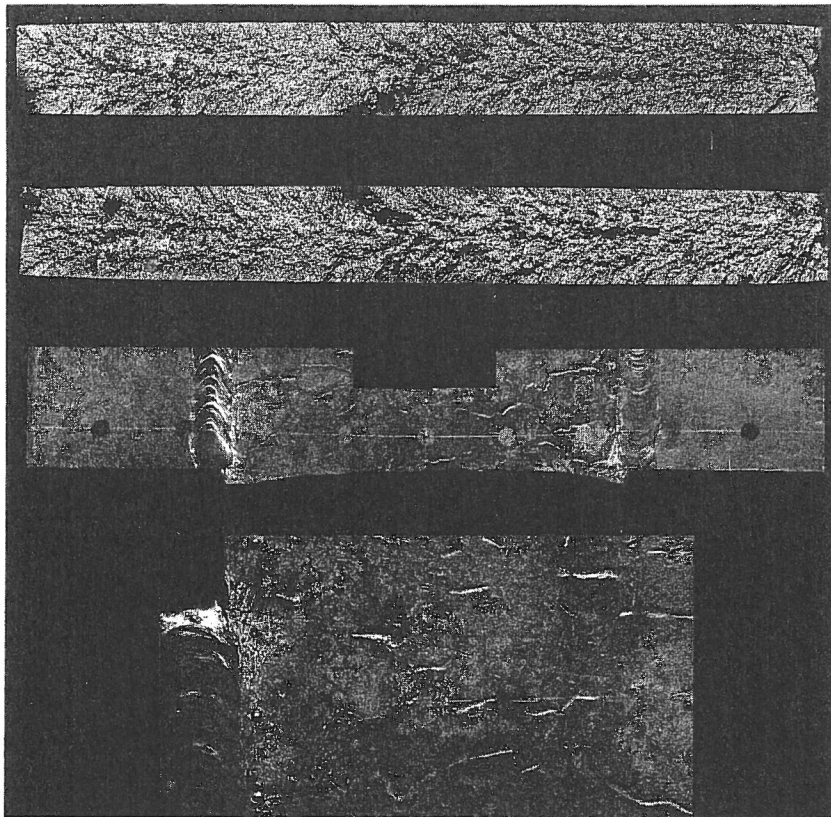
$\epsilon_{bl} = 9,3$  %

örtl. bl. bezogene Dickenänderung

$(\Delta d/d_o)_{bl} = 11,7$  %

örtl. Bruch-Nennspannung in Probenlängsrichtung

$\sigma_{N,Br} = 40,2$  kp/mm<sup>2</sup>



- $\epsilon_{bl}$  : örtliche bleibende Dehnung in Probenlängsrichtung an der potentiellen Trennbruch-Ausgangsstelle
- $\vartheta_V$  : Versuchstemperatur
- $\vartheta_{\ddot{u}}$  : Übergangstemperatur der ISO-Spitzkerbprobe längs zur Walzrichtung für  $a_k = 3,5$  kpm/cm<sup>2</sup>
- ↑ : Bruchstelle außerhalb der Versuchslänge
- ∧ : Bruchausgang in der Schweißnaht
- ↗ : nach Anriß Restquerschnitt durch Gleitbruch zerstört
- ↘ : nach Anriß beginnender Gleitbruch in Trennbruch übergehend
- ↖ : Anriß bei niedriger Last wurde Primär-Trennbruch-Ausgangsstelle
- ↙ : Anriß bei niedriger Last

Proben-Nr. 4/1.3.3  
 Werkstoff R St 37 - 2 N  
 Walzrichtung zur Probenlängsrichtung parallel  
 Blechdicke  $d_o = 30$  mm

Störstellenform (Länge in mm)



Übergangstemperatur aus Kerbschlagbiegeversuch längs Walzrichtung

$\vartheta_{Ü} = -30,5$  °C

Versuchstemperatur

$\vartheta_V = -50$  °C

örtl. bl. Dehnung a.d. potentiellen Trennbruch-Ausgangsstelle

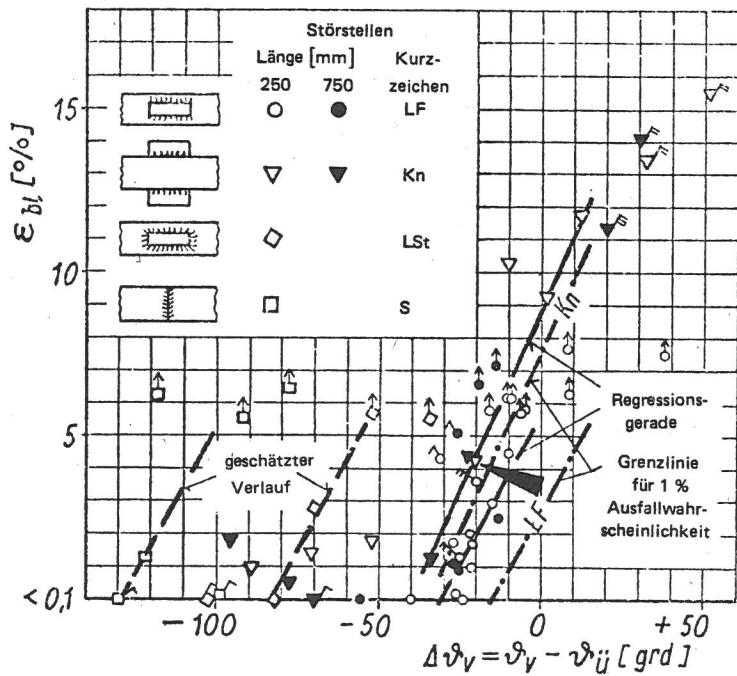
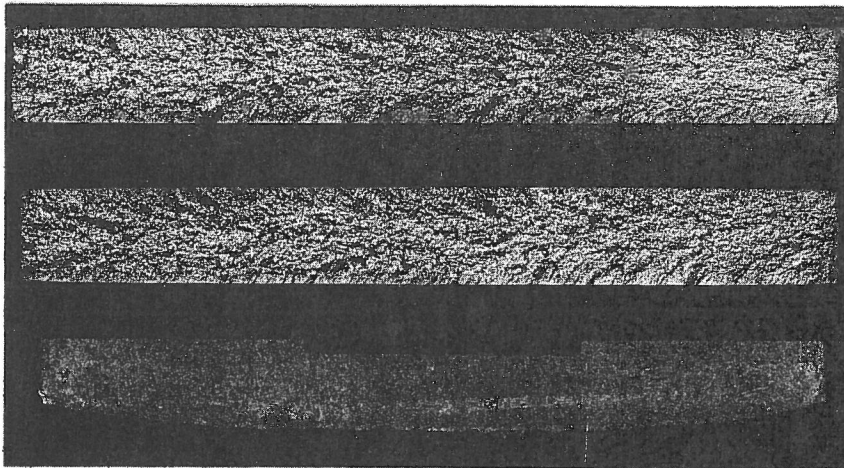
$\epsilon_{bl} = 4,3$  %

örtl. bl. bezogene Dickenänderung

$(\Delta d/d_o)_{bl} = 5,0$  %

örtl. Bruch-Nennspannung in Probenlängsrichtung

$\sigma_{N,Br} = 33,8$  kp/mm<sup>2</sup>



- $\epsilon_{bl}$  : örtliche bleibende Dehnung in Probenlängsrichtung an der potentiellen Trennbruch-Ausgangsstelle
- $\vartheta_V$  : Versuchstemperatur
- $\vartheta_{Ü}$  : Übergangstemperatur der ISO-Spitzkerbprobe längs zur Walzrichtung für  $a_k = 3,5$  kpm/cm<sup>2</sup>
- ↑ : Bruchstelle außerhalb der Versuchslänge
- ∧ : Bruchausgang in der Schweißnaht
- ↗ : nach Anriß Restquerschnitt durch Gleitbruch zerstört
- ↘ : nach Anriß beginnender Gleitbruch in Trennbruch übergehend
- ↖ : Anriß bei niedriger Last wurde Primär-Trennbruch-Ausgangsstelle
- ↙ : Anriß bei niedriger Last

Proben-Nr. 4/1.3.4  
 Werkstoff R St 37 - 2 N  
 Walzrichtung zur Probenlängsrichtung parallel  
 Blechdicke  $d_0 = 30$  mm

Störstellenform (Länge in mm)



Übergangstemperatur aus Kerbschlagbiegeversuch längs Walzrichtung

$\vartheta_{Ü} = -29,0$  °C

Versuchstemperatur

$\vartheta_V = +22$  °C

örtl. bl. Dehnung a.d. potentiellen Trennbruch-Ausgangsstelle

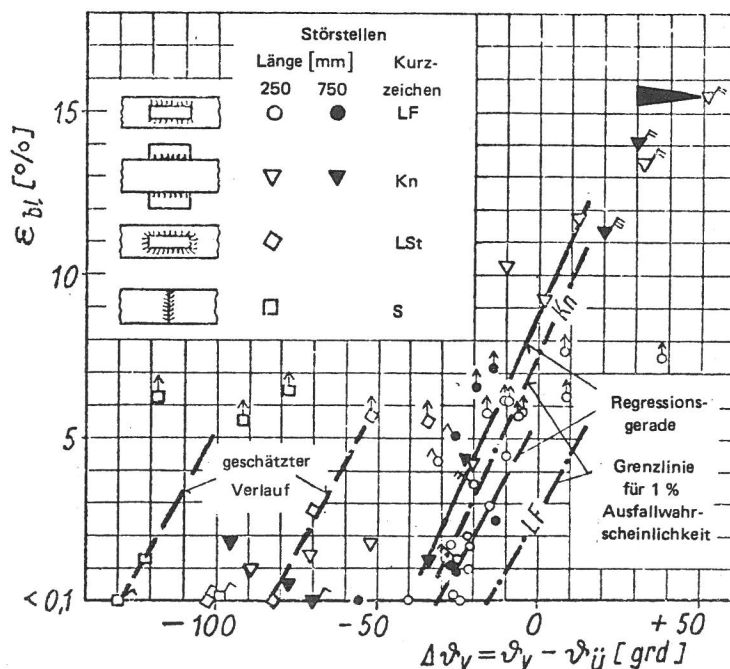
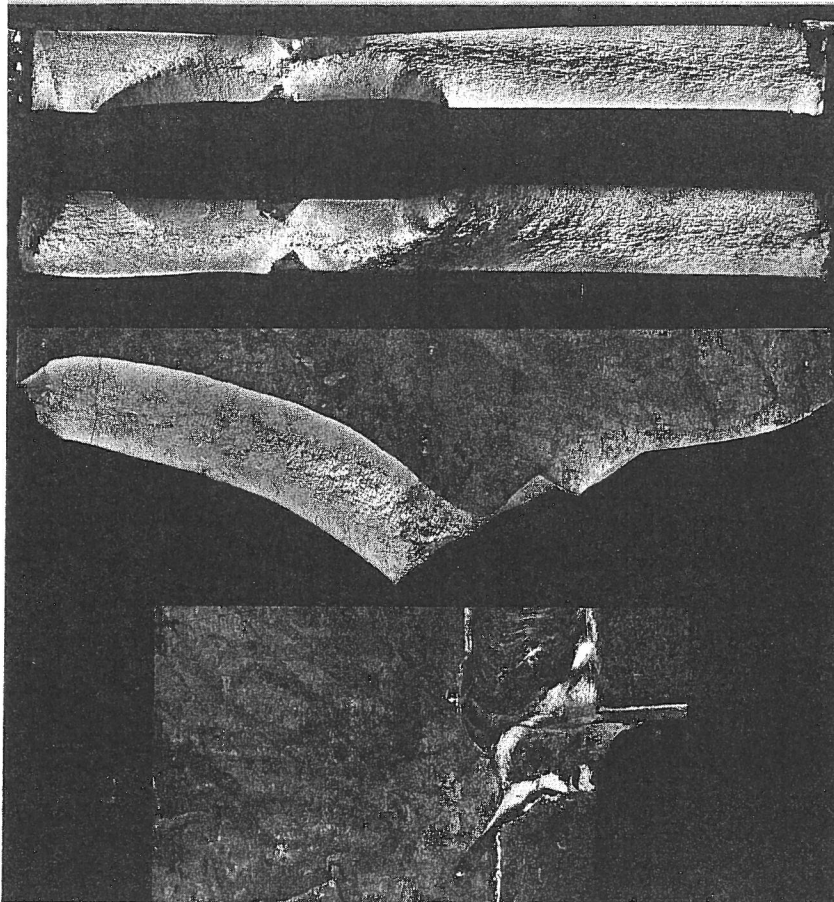
$\epsilon_{bl} = 15,5$  %

örtl. bl. bezogene Dickenänderung


$(\Delta d/d_0)_{bl} = 14,6$  %

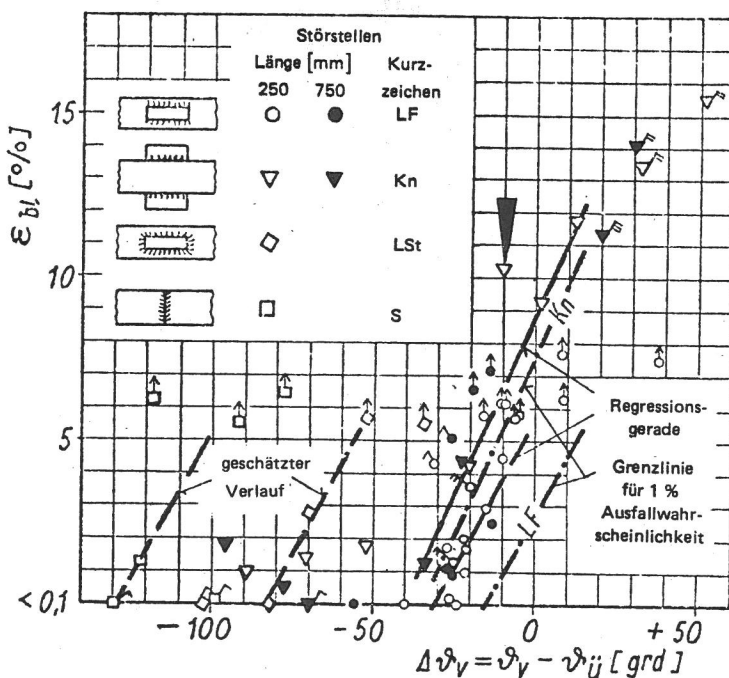
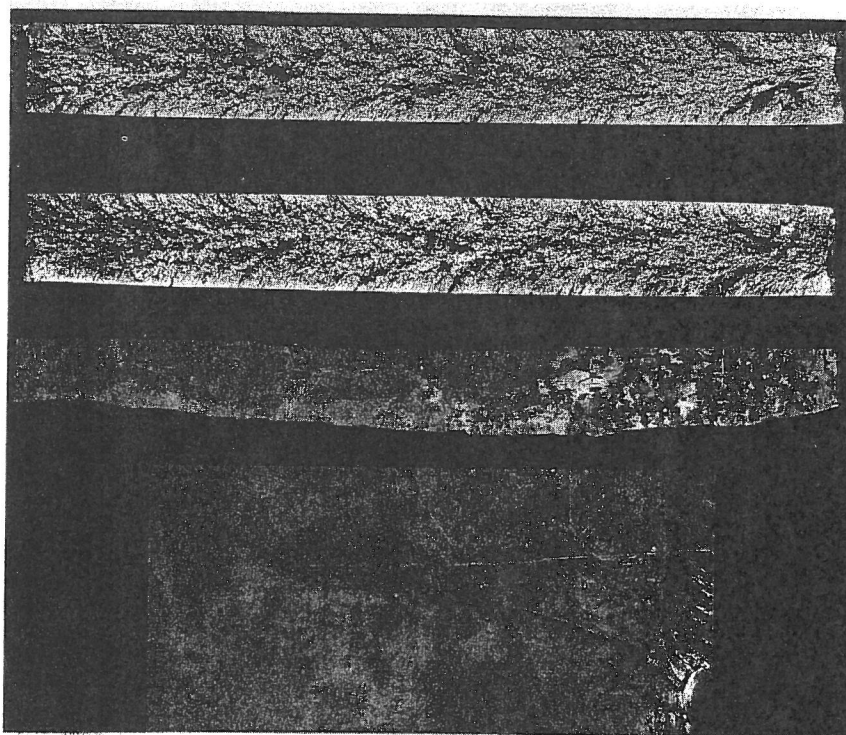
örtl. Bruch-Nennspannung in Probenlängsrichtung

$\sigma_{N,Br} = 39,6$  kp/mm<sup>2</sup>



- $\epsilon_{bl}$  : örtliche bleibende Dehnung in Probenlängsrichtung an der potentiellen Trennbruch-Ausgangsstelle
- $\vartheta_V$  : Versuchstemperatur
- $\vartheta_U$  : Übergangstemperatur der ISO-Spitzkerbprobe längs zur Walzrichtung für  $a_k = 3,5$  kpm/cm<sup>2</sup>
- ↑ : Bruchstelle außerhalb der Versuchslänge
- ↗ : Bruchausgang in der Schweißnaht
- ↘ : nach Anriß Restquerschnitt durch Gleitbruch zerstört
- ↖ : nach Anriß beginnender Gleitbruch in Trennbruch übergehend
- ↙ : Anriß bei niedriger Last wurde Primär-Trennbruch-Ausgangsstelle
- ↗ : Anriß bei niedriger Last

Proben-Nr.	5/1.3.5
Werkstoff	R St 37 - 2 N
Walzrichtung zur Probenlängsrichtung	parallel
Blechdicke	$d_o = 30 \text{ mm}$
Störstellenform (Länge in mm)	
Übergangstemperatur aus Kerbschlagbiegeversuch längs Walzrichtung	$\vartheta_{\ddot{u}} = -30,0 \text{ } ^\circ\text{C}$
Versuchstemperatur	$\vartheta_V = -40 \text{ } ^\circ\text{C}$
örtl. bl. Dehnung a.d. potentiellen Trennbruch-Ausgangsstelle	$\epsilon_{bl} = 10,3 \%$
örtl. bl. bezogene Dickenänderung	$(\Delta d/d_o)_{bl} = 12,0 \%$
örtl. Bruch-Nennspannung in Probenlängsrichtung	$\sigma_{N,Br} = 38,5 \text{ kp/mm}^2$



- $\epsilon_{bl}$  : örtliche bleibende Dehnung in Probenlängsrichtung an der potentiellen Trennbruch-Ausgangsstelle
- $\vartheta_V$  : Versuchstemperatur
- $\vartheta_{\ddot{u}}$  : Übergangstemperatur der ISO-Spitzkerbprobe längs zur Walzrichtung für  $a_k = 3,5 \text{ kpm/cm}^2$
- ↑ : Bruchstelle außerhalb der Versuchslänge
- ∧ : Bruchausgang in der Schweißnaht
- ↗ : nach Anriß Restquerschnitt durch Gleitbruch zerstört
- ↘ : nach Anriß beginnender Gleitbruch in Trennbruch übergehend
- ↖ : Anriß bei niedriger Last wurde Primär-Trennbruch-Ausgangsstelle
- ↙ : Anriß bei niedriger Last



Proben-Nr. 5/1.3.6  
 Werkstoff R St 37 - 2 N  
 Walzrichtung zur Probenlängsrichtung parallel  
 Blechdicke  $d_o = 30$  mm

Störstellenform (Länge in mm)



Übergangstemperatur aus Kerbschlagbiegeversuch längs Walzrichtung

$\vartheta_{\ddot{u}}$  = -32,0 °C

Versuchstemperatur

$\vartheta_v$  = -20 °C

örtl. bl. Dehnung a.d. potentiellen Trennbruch-Ausgangsstelle

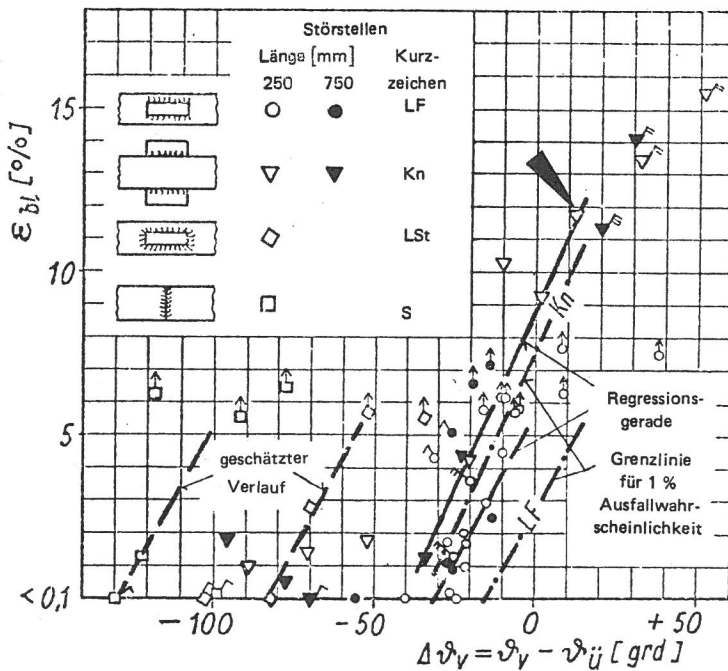
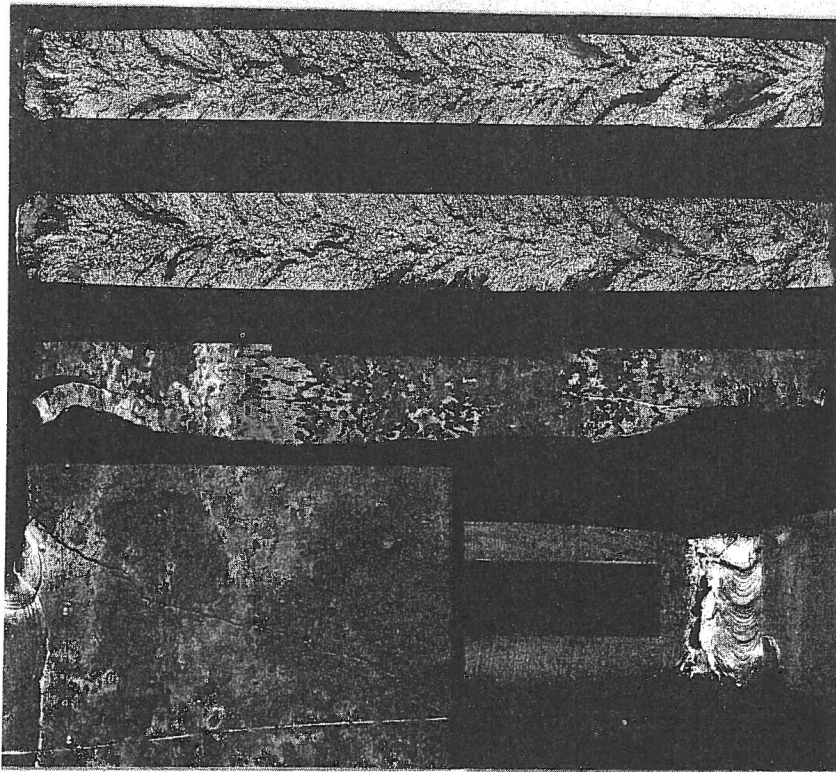
$\epsilon_{bl}$  = 11,8 %

örtl. bl. bezogene Dickenänderung


$(\Delta d/d_o)_{bl}$  = 16,6 %

örtl. Bruch-Nennspannung in Probenlängsrichtung

$\sigma_{N,Br}$  = 39,9 kp/mm<sup>2</sup>

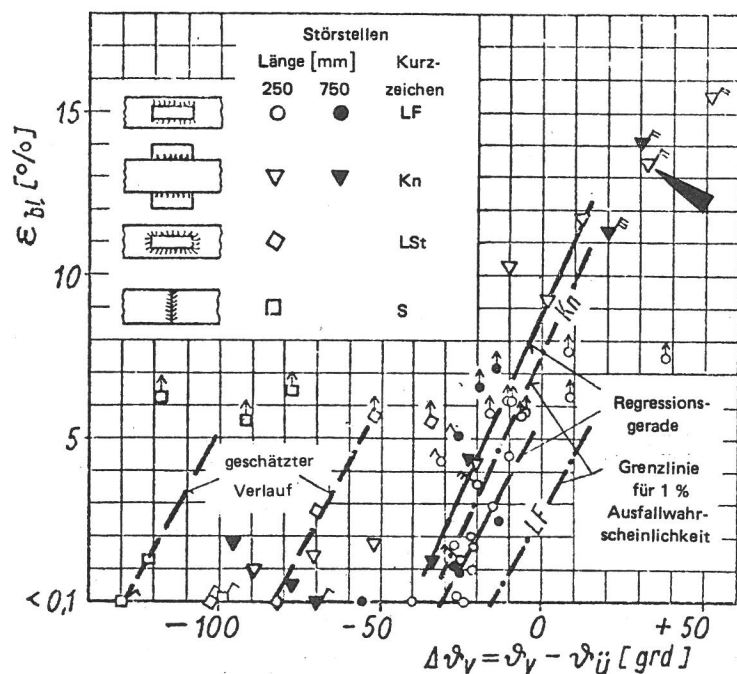
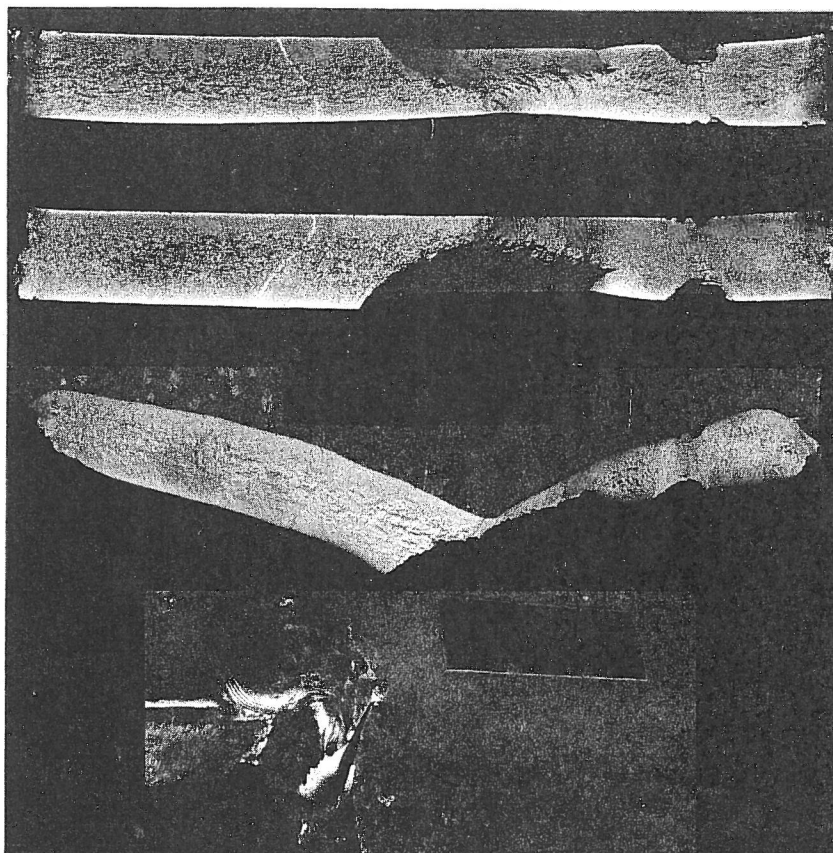


- $\epsilon_{bl}$  : örtliche bleibende Dehnung in Probenlängsrichtung an der potentiellen Trennbruch-Ausgangsstelle
- $\vartheta_v$  : Versuchstemperatur
- $\vartheta_{\ddot{u}}$  : Übergangstemperatur der ISO-Spitzkerbprobe längs zur Walzrichtung für  $a_k = 3,5$  kpm/cm<sup>2</sup>
- ↑ : Bruchstelle außerhalb der Versuchslänge
- ↗ : Bruchausgang in der Schweißnaht
- ↘ : nach Anriß Restquerschnitt durch Gleitbruch zerstört
- ↖ : nach Anriß beginnender Gleitbruch in Trennbruch übergehend
- ↙ : Anriß bei niedriger Last wurde Primär-Trennbruch-Ausgangsstelle
- ↗ : Anriß bei niedriger Last


Proben-Nr. 5/1.3.7  
 Werkstoff R St 37 - 2 N  
 Walzrichtung zur Probenlängsrichtung parallel  
 Blechdicke  $d_0 = 30$  mm  
 Störstellenform (Länge in mm) 

Übergangstemperatur aus Kerbschlagbiegeversuch  
 längs Walzrichtung  $\vartheta_{ü} = -32,0$  °C  
 Versuchstemperatur  $\vartheta_v = 0$  °C

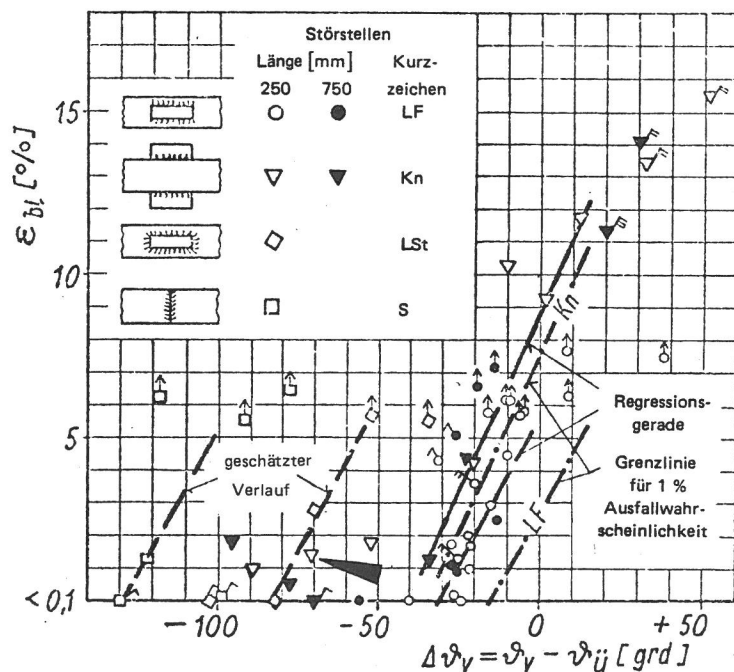
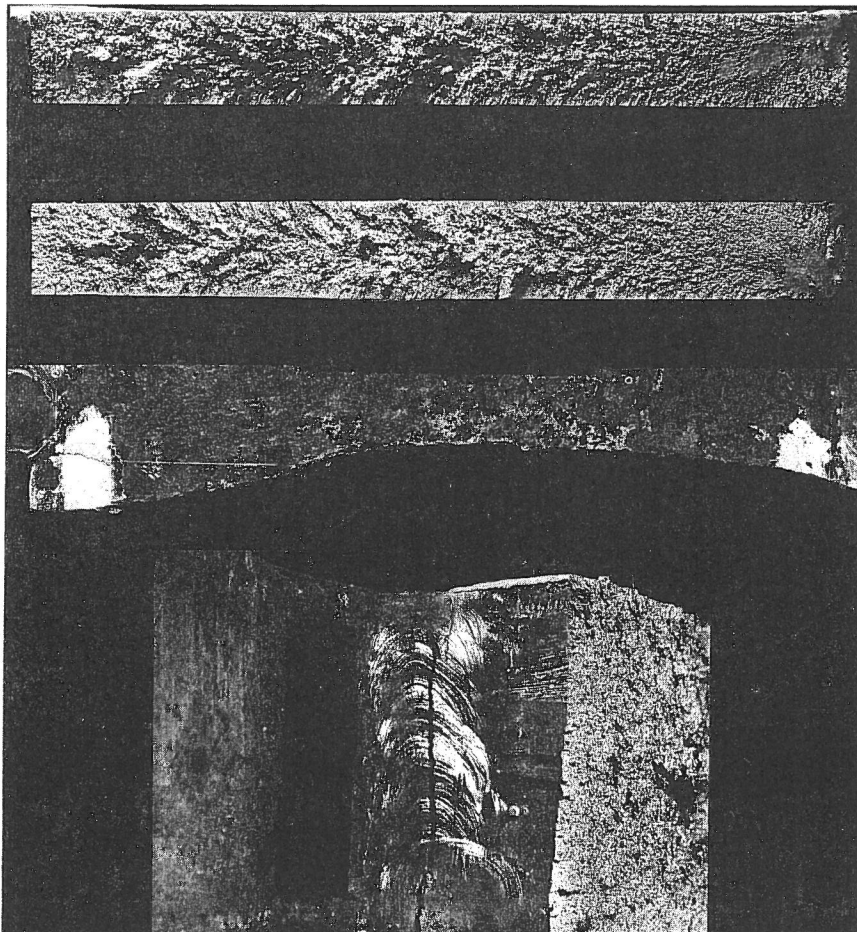
örtl. bl. Dehnung a.d. potentiellen  
 Trennbruch-Ausgangsstelle  $\epsilon_{bl} = 13,5$  %  
 örtl. bl. bezogene Dickenänderung  $(\Delta d/d_0)_{bl} = 14,4$  %  
 örtl. Bruch-Nennspannung in Probenlängsrichtung  $\sigma_{N,Br} = 36,4$  kp/mm<sup>2</sup>



- $\epsilon_{bl}$  : örtliche bleibende Dehnung in Probenlängsrichtung an der potentiellen Trennbruch-Ausgangsstelle
- $\vartheta_v$  : Versuchstemperatur
- $\vartheta_{ü}$  : Übergangstemperatur der ISO-Spitzkerbprobe längs zur Walzrichtung für  $a_k = 3,5$  kpm/cm<sup>2</sup>
- ↑ : Bruchstelle außerhalb der Versuchslänge
- ↗ : Bruchausgang in der Schweißnaht
- ↘ : nach Anriß Restquerschnitt durch Gleitbruch zerstört
- ↖ : nach Anriß beginnender Gleitbruch in Trennbruch übergehend
- ↙ : Anriß bei niedriger Last wurde Primär-Trennbruch-Ausgangsstelle
- ↗ : Anriß bei niedriger Last

Proben-Nr. 7/1.3.8  
 Werkstoff R St 37 - 2 N  
 Walzrichtung zur Probenlängsrichtung parallel  
 Blechdicke  $d_0 = 30$  mm  
 Störstellenform (Länge in mm) 

Übergangstemperatur aus Kerbschlagbiegeversuch  
 längs Walzrichtung  $\vartheta_{\ddot{u}} = - 29,0$  °C  
 Versuchstemperatur  $\vartheta_V = - 100$  °C  
 örtl. bl. Dehnung a.d. potentiellen  
 Trennbruch-Ausgangsstelle  $\epsilon_{bl} = 1,4$  %  
 örtl. bl. bezogene Dickenänderung  $(\Delta d/d_0)_{bl} = 1,0$  %  
 örtl. Bruch-Nennspannung in Probenlängsrichtung  $\sigma_{N,Br} = 37,5$  kp/mm<sup>2</sup>



- $\epsilon_{bl}$  : örtliche bleibende Dehnung in Probenlängsrichtung an der potentiellen Trennbruch-Ausgangsstelle
- $\vartheta_V$  : Versuchstemperatur
- $\vartheta_{\ddot{u}}$  : Übergangstemperatur der ISO-Spitzkerbprobe längs zur Walzrichtung für  $a_k = 3,5$  kpm/cm<sup>2</sup>
- ↑ : Bruchstelle außerhalb der Versuchslänge
- ∧ : Bruchausgang in der Schweißnaht
- ↗ : nach Anriß Restquerschnitt durch Gleitbruch zerstört
- ↘ : nach Anriß beginnender Gleitbruch in Trennbruch übergehend
- ↖ : Anriß bei niedriger Last wurde Primär-Trennbruch-Ausgangsstelle
- ↙ : Anriß bei niedriger Last

Proben-Nr. 8/1.3.9  
 Werkstoff R St 37 - 2 N  
 Walzrichtung zur Probenlängsrichtung parallel  
 Blechdicke  $d_o = 30$  mm

Störstellenform (Länge in mm)



Übergangstemperatur aus Kerbschlagbiegeversuch  
längs Walzrichtung

$\vartheta_{\bar{u}} = -31,0$  °C

Versuchstemperatur

$\vartheta_V = -120$  °C

örtl. bl. Dehnung a.d. potentiellen  
Trennbruch-Ausgangsstelle

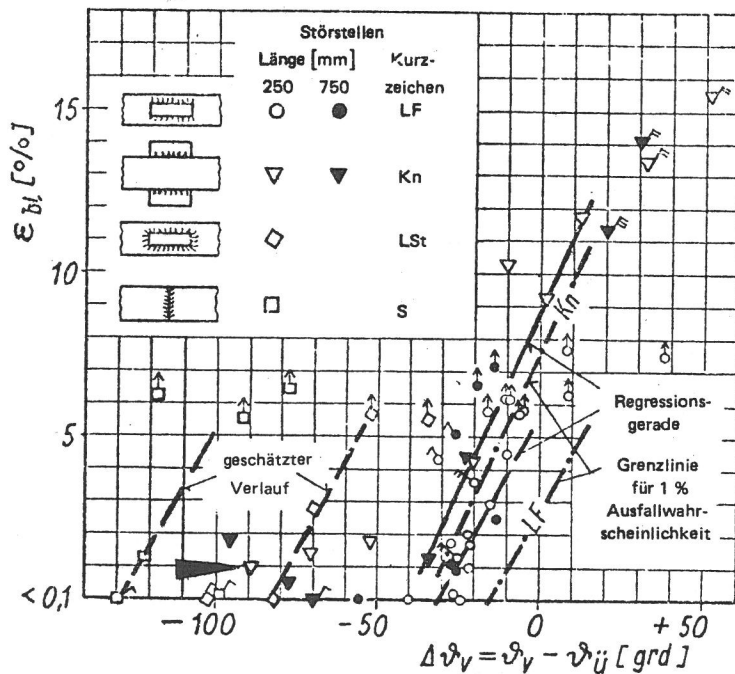
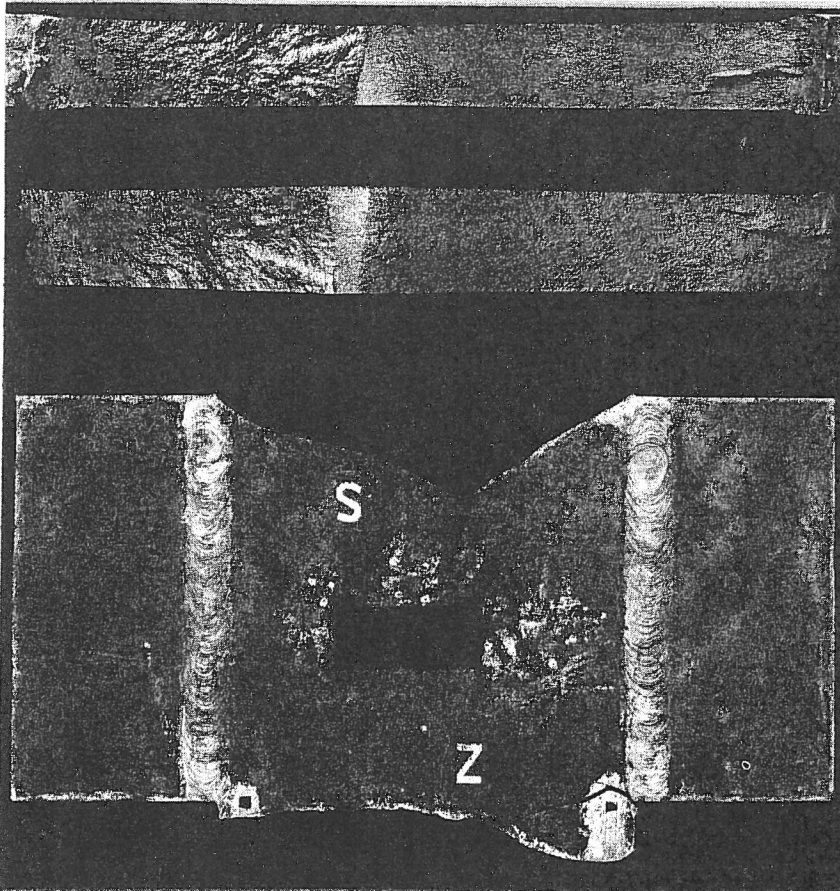
$\epsilon_{bl} = 1,0$  %

örtl. bl. bezogene Dickenänderung

$(\Delta d/d_o)_{bl} = 0,2$  %

örtl. Bruch-Nennspannung in Probenlängsrichtung

$\sigma_{N,Br} = 40,0$  kp/mm<sup>2</sup>



- $\epsilon_{bl}$  : örtliche bleibende Dehnung in Probenlängsrichtung an der potentiellen Trennbruch-Ausgangsstelle
- $\vartheta_V$  : Versuchstemperatur
- $\vartheta_{\bar{u}}$  : Übergangstemperatur der ISO-Spitzkerbprobe längs zur Walzrichtung für  $a_k = 3,5$  kpm/cm<sup>2</sup>
- ↑ : Bruchstelle außerhalb der Versuchslänge
- ↙ : Bruchausgang in der Schweißnaht
- ↘ : nach Anriß Restquerschnitt durch Gleitbruch zerstört
- ↗ : nach Anriß beginnender Gleitbruch in Trennbruch übergehend
- ↖ : Anriß bei niedriger Last wurde Primär-Trennbruch-Ausgangsstelle
- ↗ : Anriß bei niedriger Last

Proben-Nr. 8/1.3.9  
 Werkstoff R St 37 - 2 N  
 Walzrichtung zur Probenlängsrichtung parallel  
 Blechdicke  $d_o = 30$  mm

Störstellenform (Länge in mm)



Übergangstemperatur aus Kerbschlagbiegeversuch längs Walzrichtung

$\vartheta_{Ü} = - 31,0$  °C

Versuchstemperatur

$\vartheta_V = - 120$  °C

örtl. bl. Dehnung a.d. potentiellen Trennbruch-Ausgangsstelle

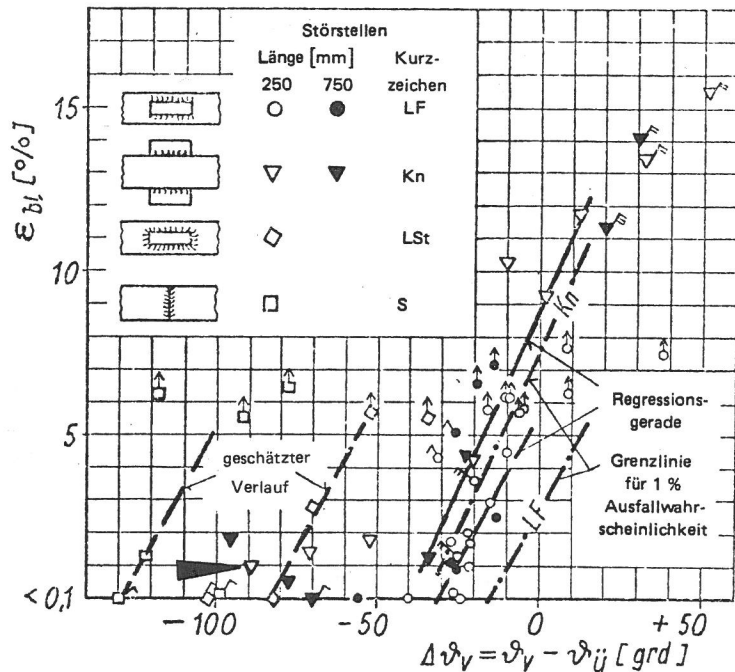
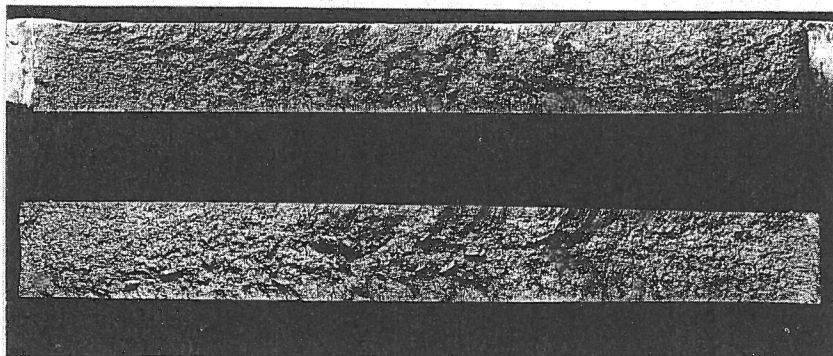
$\epsilon_{bl} = 1,0$  %

örtl. bl. bezogene Dickenänderung

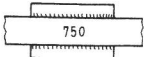
$(\Delta d/d_o)_{bl} = 0,2$  %

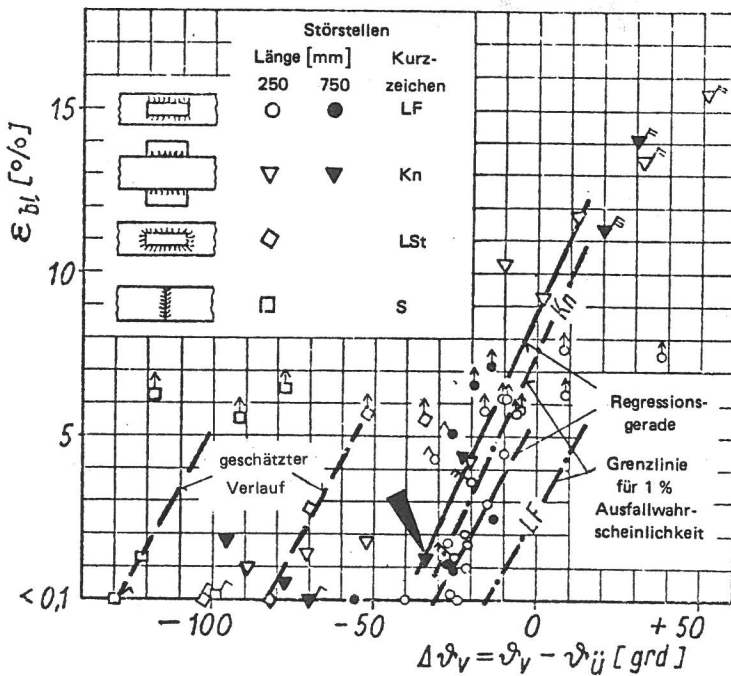
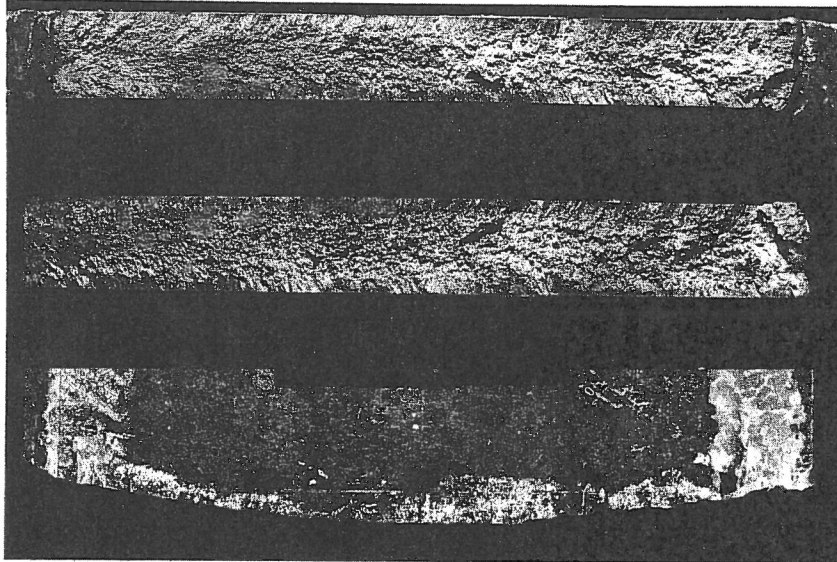
örtl. Bruch-Nennspannung in Probenlängsrichtung

$\sigma_{N,Br} = 40,0$  kp/mm<sup>2</sup>



- $\epsilon_{bl}$  : örtliche bleibende Dehnung in Probenlängsrichtung an der potentiellen Trennbruch-Ausgangsstelle
- $\vartheta_V$  : Versuchstemperatur
- $\vartheta_{Ü}$  : Übergangstemperatur der ISO-Spitzkerbprobe längs zur Walzrichtung für  $a_k = 3,5$  kpm/cm<sup>2</sup>
- ↑ : Bruchstelle außerhalb der Versuchslänge
- ∧ : Bruchausgang in der Schweißnaht
- ↗ : nach Anriß Restquerschnitt durch Gleitbruch zerstört
- ↘ : nach Anriß beginnender Gleitbruch in Trennbruch übergehend
- ↖ : Anriß bei niedriger Last wurde Primär-Trennbruch-Ausgangsstelle
- ↙ : Anriß bei niedriger Last

Proben-Nr.	11/1.6.1
Werkstoff	R St 37 - 2 N
Walzrichtung zur Probenlängsrichtung	parallel
Blehdicke	$d_o = 30 \text{ mm}$
Störstellenform (Länge in mm)	
Übergangstemperatur aus Kerbschlagbiegeversuch längs Walzrichtung	$\vartheta_{\ddot{u}} = -34,0 \text{ }^\circ\text{C}$
Versuchstemperatur	$\vartheta_V = -68 \text{ }^\circ\text{C}$
örtl. bl. Dehnung a.d. potentiellen Trennbruch-Ausgangsstelle	$\epsilon_{bl} = 1,3 \%$
örtl. bl. bezogene Dickenänderung	$(\Delta d/d_o)_{bl} = 0,3 \%$
örtl. Bruch-Nennspannung in Probenlängsrichtung	$\sigma_{N,Br} = 31,0 \text{ kp/mm}^2$

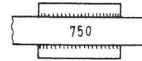


- $\epsilon_{bl}$  : örtliche bleibende Dehnung in Probenlängsrichtung an der potentiellen Trennbruch-Ausgangsstelle
- $\vartheta_V$  : Versuchstemperatur
- $\vartheta_{\ddot{u}}$  : Übergangstemperatur der ISO-Spitzkerbprobe längs zur Walzrichtung für  $a_k = 3,5 \text{ kpm/cm}^2$
- ↑ : Bruchstelle außerhalb der Versuchslänge
- ↙ : Bruchausgang in der Schweißnaht
- ↘ : nach Anriß Restquerschnitt durch Gleitbruch zerstört
- ↗ : nach Anriß beginnender Gleitbruch in Trennbruch übergehend
- ↖ : Anriß bei niedriger Last wurde Primär-Trennbruch-Ausgangsstelle
- ↙ : Anriß bei niedriger Last

Proben-Nr.  
Werkstoff  
Walzrichtung zur Probenlängsrichtung  
Blechedicke

11/1.6.2  
R St 37 - 2 N  
parallel  
 $d_o = 30 \text{ mm}$

Störstellenform (Länge in mm)



Übergangstemperatur aus Kerbschlagbiegeversuch  
längs Walzrichtung

$\vartheta_{\bar{u}} = -41,0 \text{ } ^\circ\text{C}$

Versuchstemperatur

$\vartheta_V = -21 \text{ } ^\circ\text{C}$

örtl. bl. Dehnung a.d. potentiellen  
Trennbruch-Ausgangsstelle

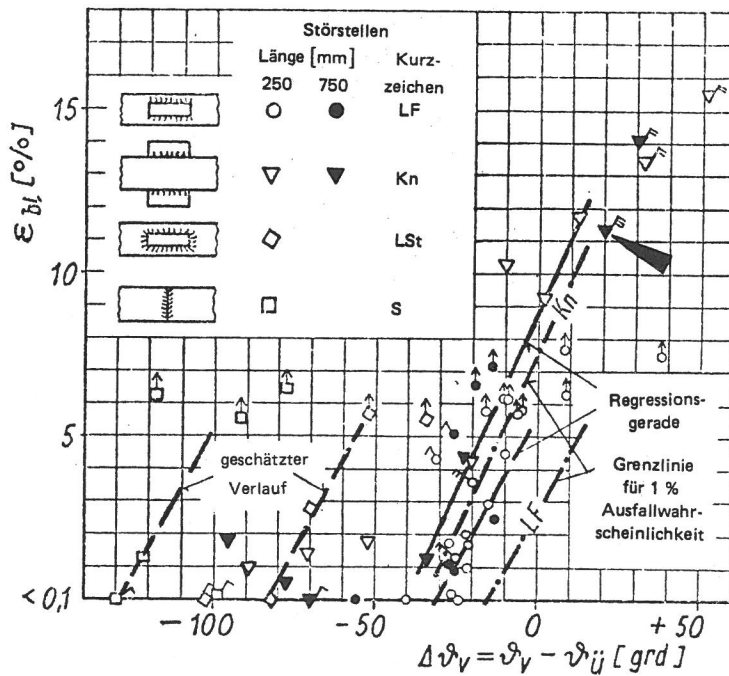
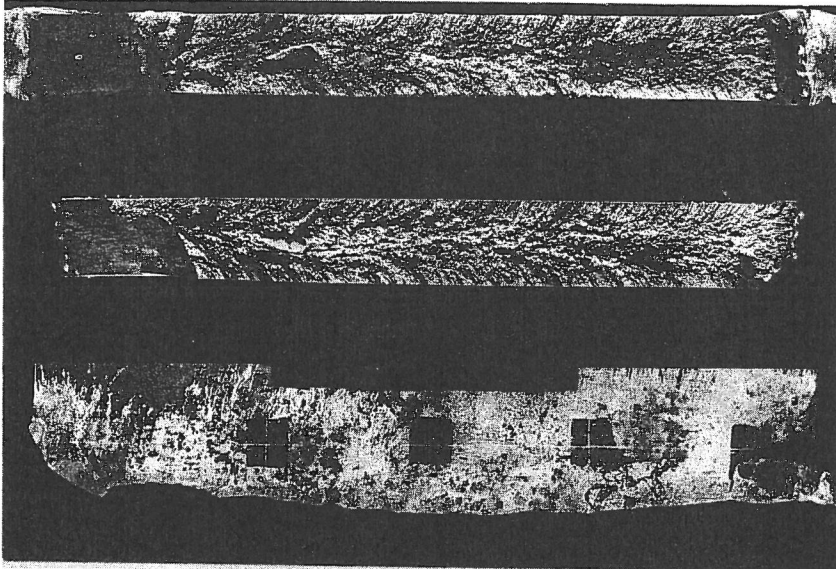
$\epsilon_{bl} = 11,4 \%$

örtl. bl. bezogene Dickenänderung

$(\Delta d/d_o)_{bl} = 12,4 \%$

örtl. Bruch-Nennspannung in Probenlängsrichtung

$\sigma_{N,Br} = 37,6 \text{ kp/mm}^2$



$\epsilon_{bl}$  : örtliche bleibende Dehnung  
in Probenlängsrichtung an  
der potentiellen  
Trennbruch-Ausgangsstelle

$\vartheta_V$  : Versuchstemperatur

$\vartheta_{\bar{u}}$  : Übergangstemperatur der ISO-  
Spitzkerbprobe längs zur Walz-  
richtung für  $a_k = 3,5 \text{ kpm/cm}^2$

↑ : Bruchstelle außerhalb  
der Versuchslänge

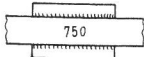
∧ : Bruchausgang in der  
Schweißnaht

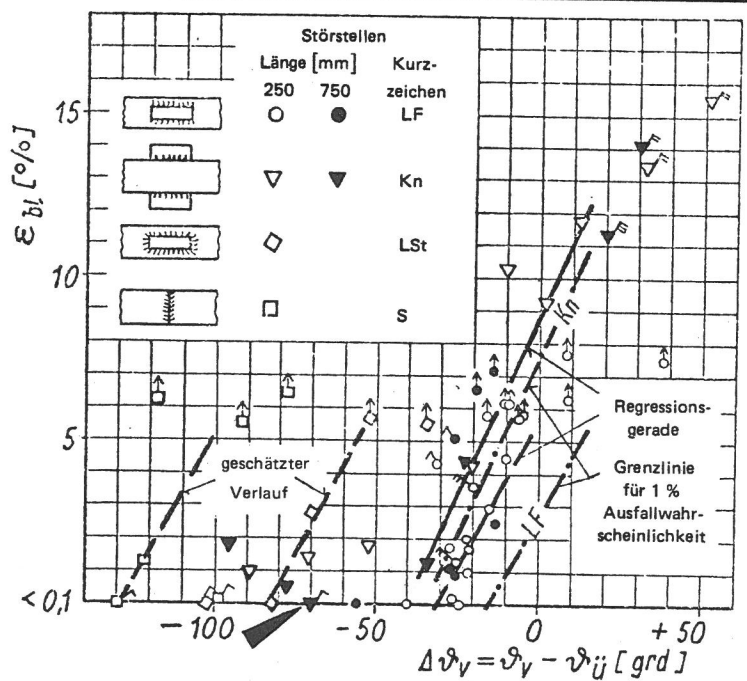
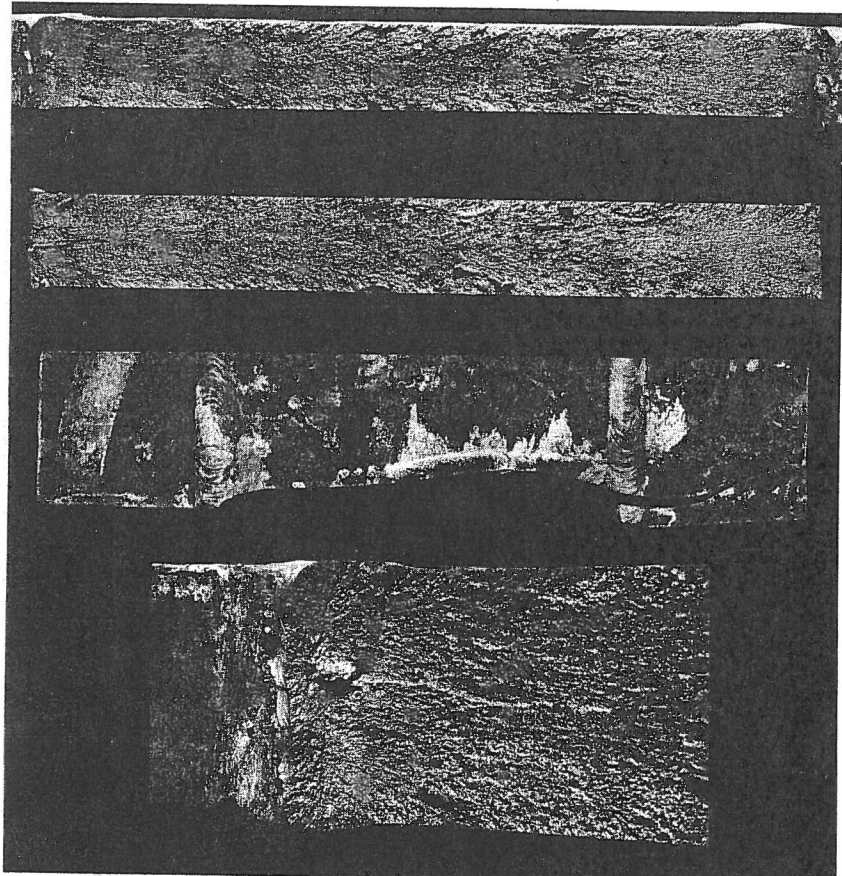
↗ : nach Anriß Restquerschnitt  
durch Gleitbruch zerstört

↘ : nach Anriß beginnender Gleit-  
bruch in Trennbruch übergehend

↖ : Anriß bei niedriger Last wurde  
Primär-Trennbruch-Ausgangs-  
stelle

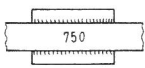
↙ : Anriß bei niedriger Last

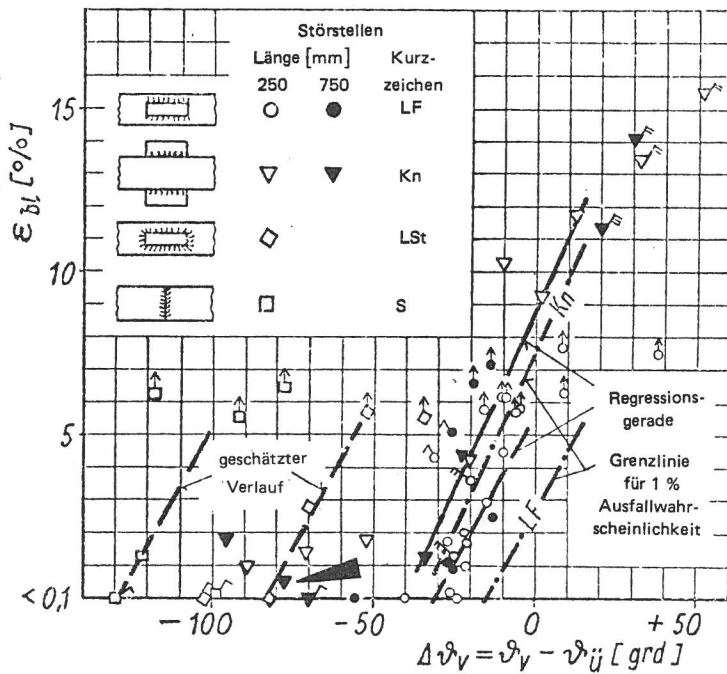
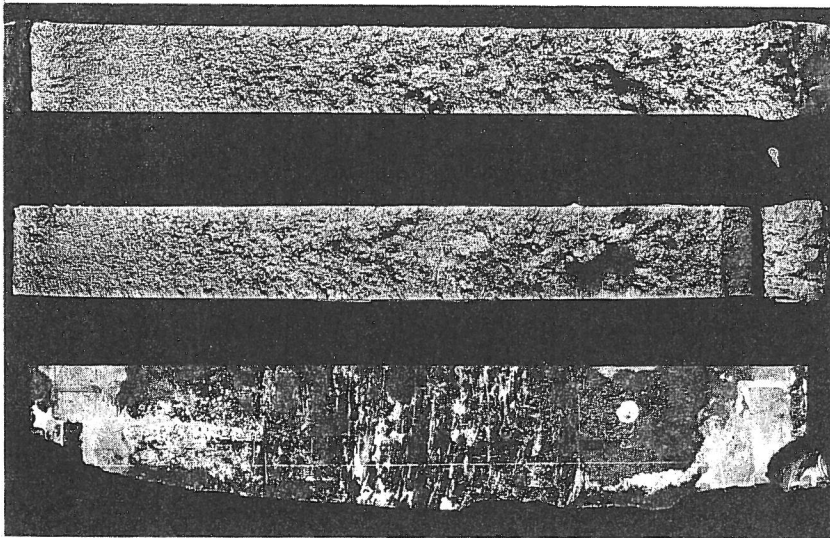
Proben-Nr. 11/1.6.3  
 Werkstoff R St 37 - 2 N  
 Walzrichtung zur Probenlängsrichtung parallel  
 Blechdicke  $d_o = 30$  mm  
 Störstellenform (Länge in mm)   
 Übergangstemperatur aus Kerbschlagbiegeversuch längs Walzrichtung  $\vartheta_{\ddot{u}} = -37,0$  °C  
 Versuchstemperatur  $\vartheta_V = -107$  °C  
 örtl. bl. Dehnung a.d. potentiellen Trennbruch-Ausgangsstelle  $\epsilon_{bl} = < 0,1$  %  
 örtl. bl. bezogene Dickenänderung  $(\Delta d/d_o)_{bl} = < 0,1$  %  
 örtl. Bruch-Nennspannung in Probenlängsrichtung  $\sigma_{N,Br} = 12,7$  kp/mm<sup>2</sup>



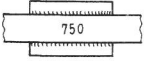
- $\epsilon_{bl}$  : örtliche bleibende Dehnung in Probenlängsrichtung an der potentiellen Trennbruch-Ausgangsstelle
- $\vartheta_V$  : Versuchstemperatur
- $\vartheta_{\ddot{u}}$  : Übergangstemperatur der ISO-Spitzkerbprobe längs zur Walzrichtung für  $a_k = 3,5$  kpm/cm<sup>2</sup>
- ↑ : Bruchstelle außerhalb der Versuchslänge
- ↙ : Bruchausgang in der Schweißnaht
- ↘ : nach Anriß Restquerschnitt durch Gleitbruch zerstört
- ↗ : nach Anriß beginnender Gleitbruch in Trennbruch übergehend
- ↖ : Anriß bei niedriger Last wurde Primär-Trennbruch-Ausgangsstelle
- ↗ : Anriß bei niedriger Last

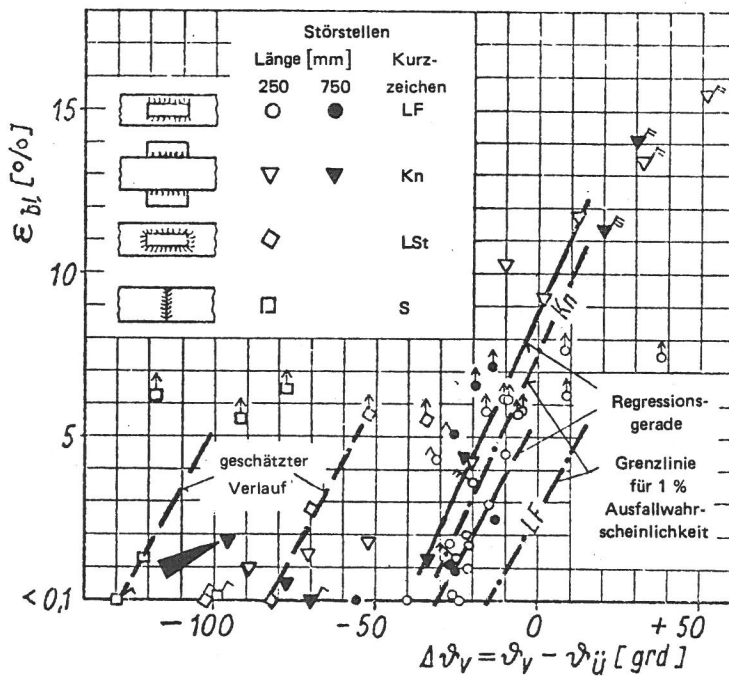
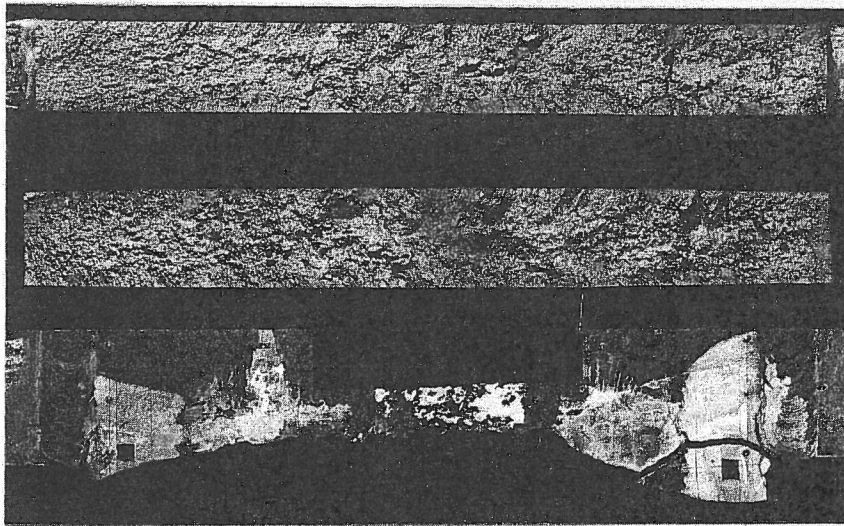


Proben-Nr.	12/1.6.4
Werkstoff	R St 37 - 2 N
Walzrichtung zur Probenlängsrichtung	parallel
Blechdicke	$d_0 = 30 \text{ mm}$
Störstellenform (Länge in mm)	
Übergangstemperatur aus Kerbschlagbiegeversuch längs Walzrichtung	$\vartheta_{\ddot{u}} = -29,0 \text{ }^\circ\text{C}$
Versuchstemperatur	$\vartheta_V = -107 \text{ }^\circ\text{C}$
örtl. bl. Dehnung a.d. potentiellen Trennbruch-Ausgangsstelle	$\epsilon_{bl} = 0,5 \%$
örtl. bl. bezogene Dickenänderung	$(\Delta d/d_0)_{bl} = 0,4 \%$
örtl. Bruch-Nennspannung in Probenlängsrichtung	$\sigma_{N,Br} = 35,9 \text{ kp/mm}^2$



- $\epsilon_{bl}$  : örtliche bleibende Dehnung in Probenlängsrichtung an der potentiellen Trennbruch-Ausgangsstelle
- $\vartheta_V$  : Versuchstemperatur
- $\vartheta_{\ddot{u}}$  : Übergangstemperatur der ISO-Spitzkerbprobe längs zur Walzrichtung für  $a_k = 3,5 \text{ kpm/cm}^2$
- ↑ : Bruchstelle außerhalb der Versuchslänge
- ↗ : Bruchausgang in der Schweißnaht
- ↘ : nach Anriß Restquerschnitt durch Gleitbruch zerstört
- ↖ : nach Anriß beginnender Gleitbruch in Trennbruch übergehend
- ↙ : Anriß bei niedriger Last wurde Primär-Trennbruch-Ausgangsstelle
- ↗ : Anriß bei niedriger Last

Proben-Nr.	12/1.6.5
Werkstoff	R St 37 - 2 N
Walzrichtung zur Probenlängsrichtung	parallel
Blechedicke	$d_0 = 30 \text{ mm}$
Störstellenform (Länge in mm)	
Übergangstemperatur aus Kerbschlagbiegeversuch längs Walzrichtung	$\vartheta_{\ddot{u}} = -34,0 \text{ }^\circ\text{C}$
Versuchstemperatur	$\vartheta_V = -130 \text{ }^\circ\text{C}$
örtl. bl. Dehnung a.d. potentiellen Trennbruch-Ausgangsstelle	$\epsilon_{bl} = 1,8 \text{ } \%$
örtl. bl. bezogene Dickenänderung	$(\Delta d/d_0)_{bl} = 0,8 \text{ } \%$
örtl. Bruch-Nennspannung in Probenlängsrichtung	$\sigma_{N,Br} = 43,4 \text{ kp/mm}^2$

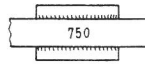


- $\epsilon_{bl}$  : örtliche bleibende Dehnung in Probenlängsrichtung an der potentiellen Trennbruch-Ausgangsstelle
- $\vartheta_V$  : Versuchstemperatur
- $\vartheta_{\ddot{u}}$  : Übergangstemperatur der ISO-Spitzkerbprobe längs zur Walzrichtung für  $a_k = 3,5 \text{ kpm/cm}^2$
- ↑ : Bruchstelle außerhalb der Versuchslänge
- ↗ : Bruchausgang in der Schweißnaht
- ↘ : nach Anriß Restquerschnitt durch Gleitbruch zerstört
- ↖ : nach Anriß beginnender Gleitbruch in Trennbruch übergehend
- ↙ : Anriß bei niedriger Last wurde Primär-Trennbruch-Ausgangsstelle
- ↗ : Anriß bei niedriger Last

Proben-Nr.  
Werkstoff  
Walzrichtung zur Probenlängsrichtung  
Blechedicke

12/1.6.6  
R St 37 - 2 N  
parallel  
 $d_o = 30 \text{ mm}$

Störstellenform (Länge in mm)



Übergangstemperatur aus Kerbschlagbiegeversuch  
längs Walzrichtung

$\vartheta_{\ddot{u}} = -23,0 \text{ }^\circ\text{C}$

Versuchstemperatur

$\vartheta_v = -45 \text{ }^\circ\text{C}$

örtl. bl. Dehnung a.d. potentiellen  
Trennbruch-Ausgangsstelle

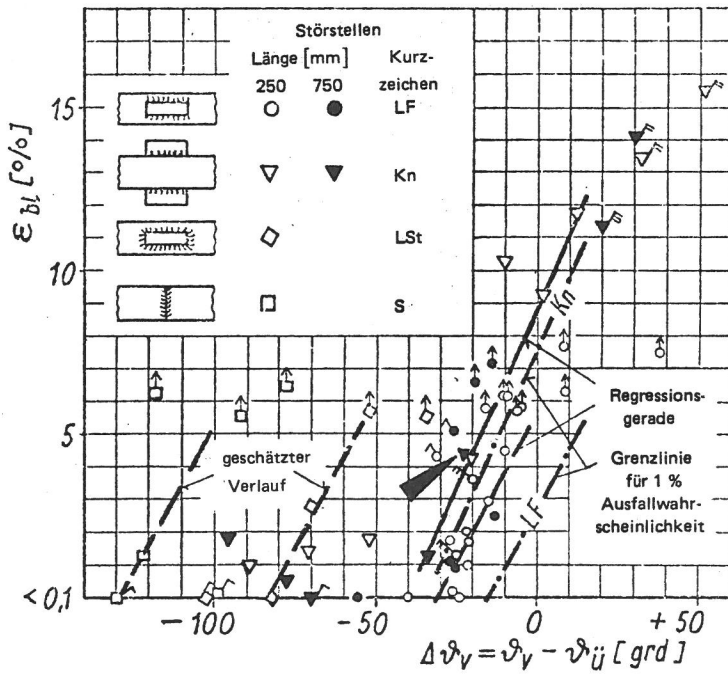
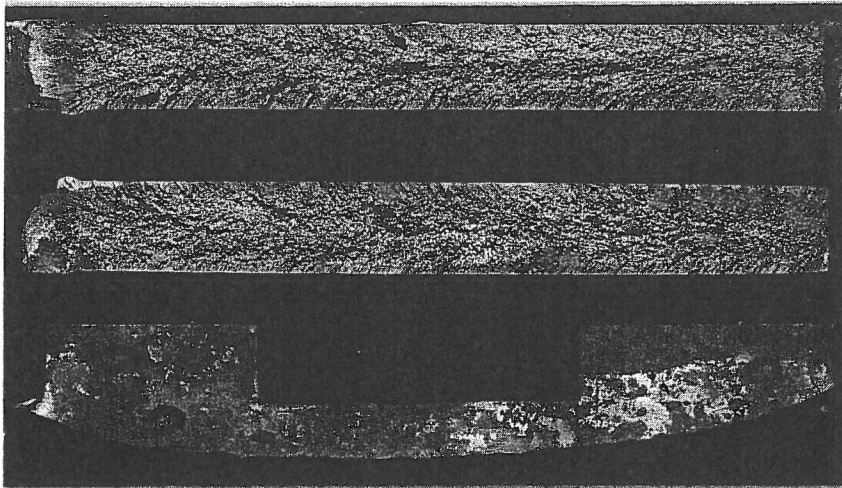
$\epsilon_{bl} = 4,4 \text{ } \%$

örtl. bl. bezogene Dickenänderung

$(\Delta d/d_o)_{bl} = 4,7 \text{ } \%$

örtl. Bruch-Nennspannung in Probenlängsrichtung

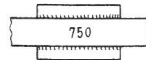
$\sigma_{N,Br} = 36,1 \text{ kp/mm}^2$



- $\epsilon_{bl}$  : örtliche bleibende Dehnung in Probenlängsrichtung an der potentiellen Trennbruch-Ausgangsstelle
- $\vartheta_v$  : Versuchstemperatur
- $\vartheta_{\ddot{u}}$  : Übergangstemperatur der ISO-Spitzkerbprobe längs zur Walzrichtung für  $a_k = 3,5 \text{ kpm/cm}^2$
- ↑ : Bruchstelle außerhalb der Versuchslänge
- ↗ : Bruchausgang in der Schweißnaht
- ↘ : nach Anriß Restquerschnitt durch Gleitbruch zerstört
- ↙ : nach Anriß beginnender Gleitbruch in Trennbruch übergehend
- ↖ : Anriß bei niedriger Last wurde Primär-Trennbruch-Ausgangsstelle
- ↗ : Anriß bei niedriger Last

Proben-Nr. 13/1.6.7  
 Werkstoff R St 37 - 2 N  
 Walzrichtung zur Probenlängsrichtung parallel  
 Blechdicke  $d_o = 30$  mm

Störstellenform (Länge in mm)



Übergangstemperatur aus Kerbschlagbiegeversuch längs Walzrichtung

$$\vartheta_{\bar{U}} = -11,0 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Versuchstemperatur

$$\vartheta_V = +19 \text{ } ^\circ\text{C}$$

örtl. bl. Dehnung a.d. potentiellen Trennbruch-Ausgangsstelle

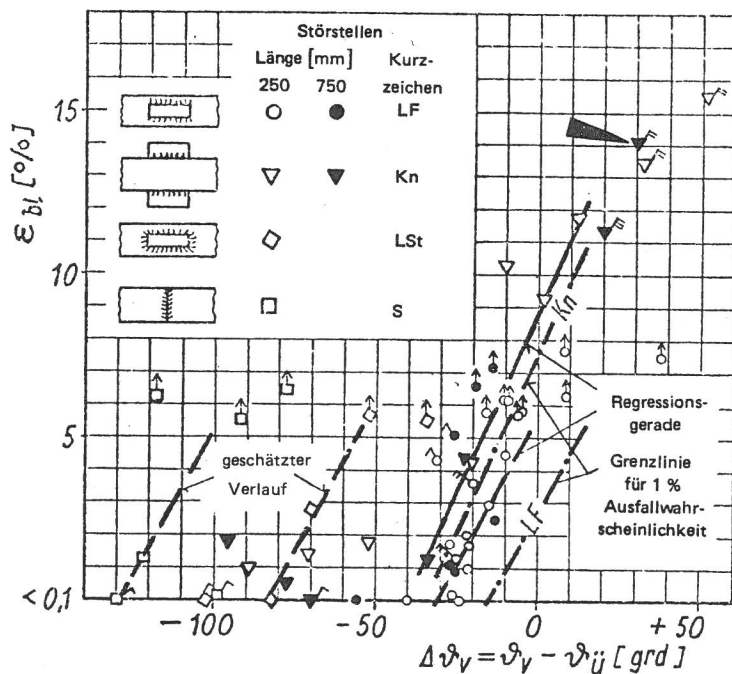
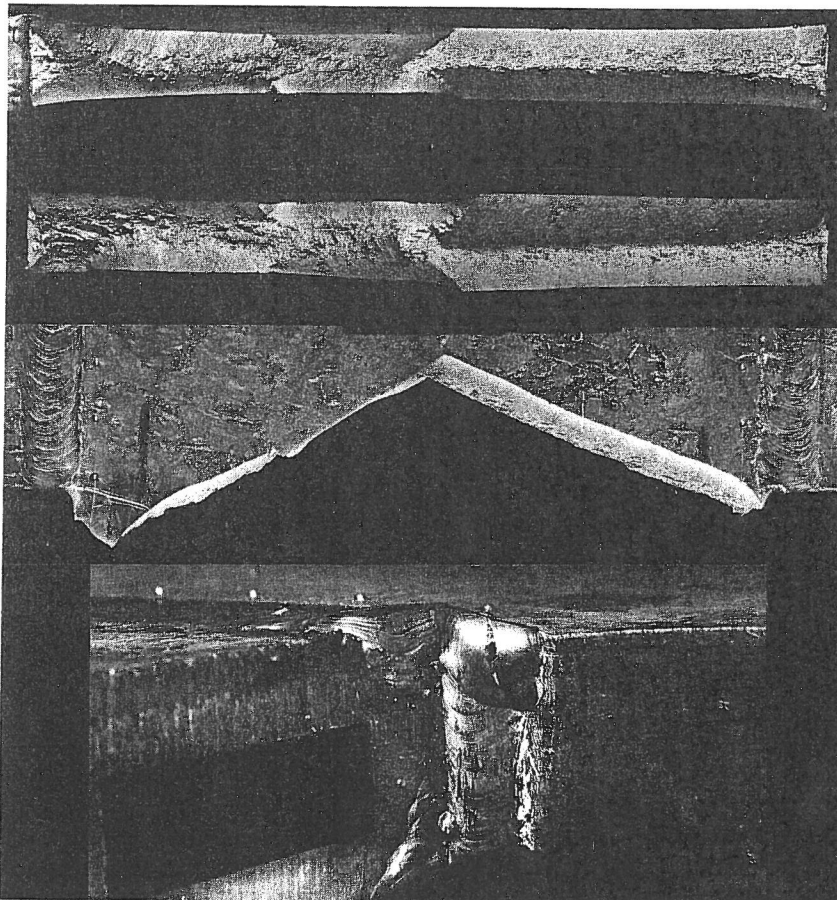
$$\epsilon_{bl} = 14,2 \%$$

örtl. bl. bezogene Dickenänderung

$$(\Delta d/d_o)_{bl} = 19,7 \%$$

örtl. Bruch-Nennspannung in Probenlängsrichtung

$$\sigma_{N,Br} = 38,7 \text{ kp/mm}^2$$



- $\epsilon_{bl}$  : örtliche bleibende Dehnung in Probenlängsrichtung an der potentiellen Trennbruch-Ausgangsstelle
- $\vartheta_V$  : Versuchstemperatur
- $\vartheta_{\bar{U}}$  : Übergangstemperatur der ISO-Spitzkerbprobe längs zur Walzrichtung für  $a_k = 3,5 \text{ kpm/cm}^2$
- ↑ : Bruchstelle außerhalb der Versuchslänge
- ∧ : Bruchausgang in der Schweißnaht
- ↗ : nach Anriß Restquerschnitt durch Gleitbruch zerstört
- ↘ : nach Anriß beginnender Gleitbruch in Trennbruch übergehend
- ↖ : Anriß bei niedriger Last wurde Primär-Trennbruch-Ausgangsstelle
- ↙ : Anriß bei niedriger Last

Proben-Nr. 2/1.2.1  
 Werkstoff R St 37 - 2 N  
 Walzrichtung zur Probenlängsrichtung parallel  
 Blechdicke  $d_o = 30$  mm

Störstellenform (Länge in mm)



Übergangstemperatur aus Kerbschlagbiegeversuch  
 längs Walzrichtung

$\vartheta_{ü} = -14,0$  °C  
 $\vartheta_{ü} = -23,0$  °C

Versuchstemperatur

$\vartheta_v = -66$  °C

örtl. bl. Dehnung a.d. potentiellen  
 Trennbruch-Ausgangsstelle

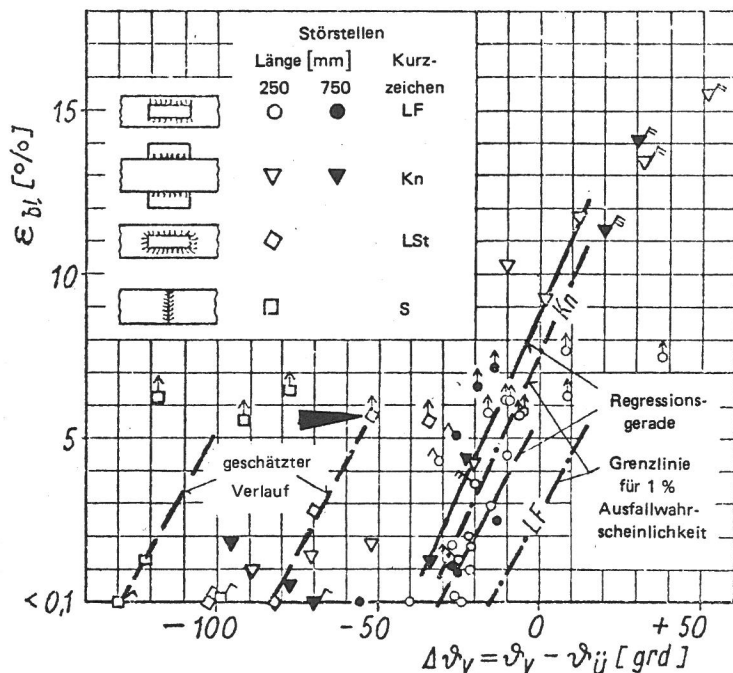
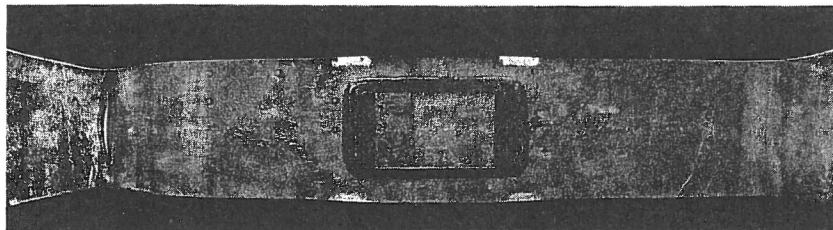
$\epsilon_{bl} = 5,7$  %

örtl. bl. bezogene Dickenänderung

$(\Delta d/d_o)_{bl} = 5,0$  %

örtl. Bruch-Nennspannung in Probenlängsrichtung

$\sigma_{N,Br} = 44,4$  kp/mm<sup>2</sup>



- $\epsilon_{bl}$  : örtliche bleibende Dehnung in Probenlängsrichtung an der potentiellen Trennbruch-Ausgangsstelle
- $\vartheta_v$  : Versuchstemperatur
- $\vartheta_{ü}$  : Übergangstemperatur der ISO-Spitzkerbprobe längs zur Walzrichtung für  $a_k = 3,5$  kpm/cm<sup>2</sup>
- ↑ : Bruchstelle außerhalb der Versuchslänge
- ↗ : Bruchausgang in der Schweißnaht
- ↘ : nach Anriß Restquerschnitt durch Gleitbruch zerstört
- ↖ : nach Anriß beginnender Gleitbruch in Trennbruch übergehend
- ↙ : Anriß bei niedriger Last wurde Primär-Trennbruch-Ausgangsstelle
- ↗ : Anriß bei niedriger Last

Proben-Nr. 7/1.2.3  
 Werkstoff R St 37 - 2 N  
 Walzrichtung zur Probenlängsrichtung parallel  
 Blechdicke  $d_o = 30$  mm

Störstellenform (Länge in mm)



Übergangstemperatur aus Kerbschlagbiegeversuch längs Walzrichtung

$$\vartheta_{\ddot{U}} = - 31,5 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Versuchstemperatur

$$\vartheta_V = - 101 \text{ } ^\circ\text{C}$$

örtl. bl. Dehnung a.d. potentiellen Trennbruch-Ausgangsstelle

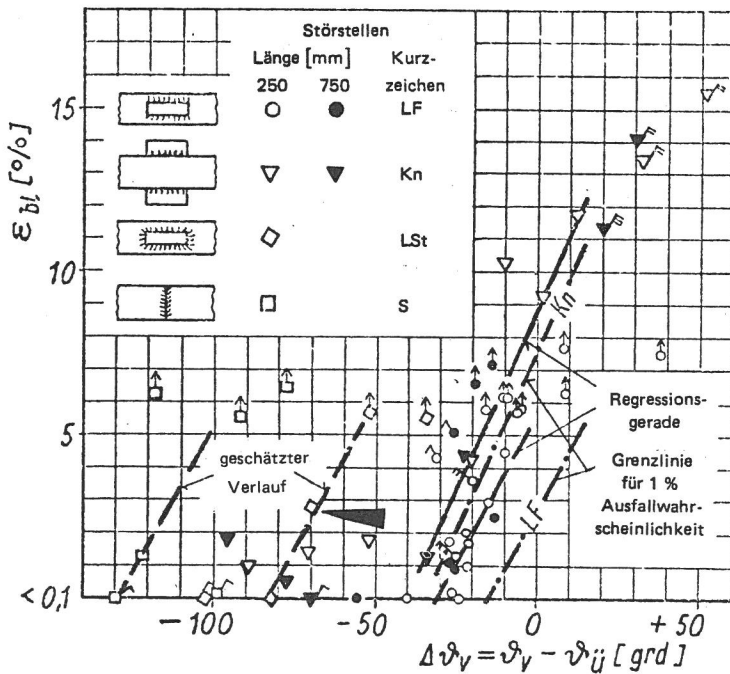
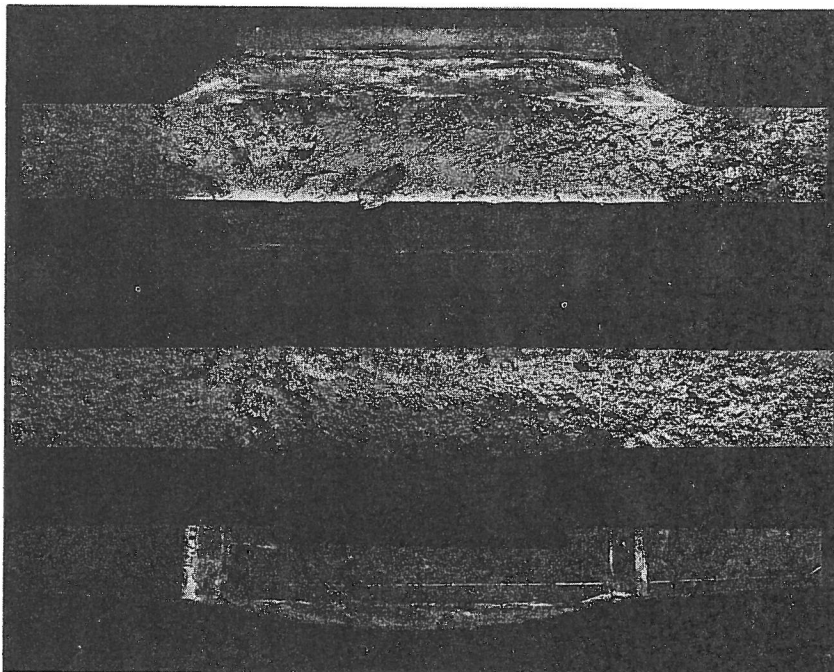
$$\epsilon_{bl} = 2,8 \%$$

örtl. bl. bezogene Dickenänderung

$$(\Delta d/d_o)_{bl} = 2,2 \%$$

örtl. Bruch-Nennspannung in Probenlängsrichtung

$$\sigma_{N,Br} = 44,1 \text{ kp/mm}^2$$



- $\epsilon_{bl}$  : örtliche bleibende Dehnung in Probenlängsrichtung an der potentiellen Trennbruch-Ausgangsstelle
- $\vartheta_V$  : Versuchstemperatur
- $\vartheta_{\ddot{U}}$  : Übergangstemperatur der ISO-Spitzkerbprobe längs zur Walzrichtung für  $a_k = 3,5 \text{ kpm/cm}^2$
- $\uparrow$  : Bruchstelle außerhalb der Versuchslänge
- $\wedge$  : Bruchausgang in der Schweißnaht
- $\wedge$  : nach Anriß Restquerschnitt durch Gleitbruch zerstört
- $\wedge$  : nach Anriß beginnender Gleitbruch in Trennbruch übergehend
- $\wedge$  : Anriß bei niedriger Last wurde Primär-Trennbruch-Ausgangsstelle
- $\wedge$  : Anriß bei niedriger Last

Proben-Nr.  
Werkstoff  
Walzrichtung zur Probenlängsrichtung  
Blechdicke

8/1.2.4  
R St 37 - 2 N  
parallel  
 $d_0 = 30 \text{ mm}$

Störstellenform (Länge in mm)



Übergangstemperatur aus Kerbschlagbiegeversuch  
längs Walzrichtung

$\vartheta_{\bar{U}} = -34,0 \text{ } ^\circ\text{C}$

Versuchstemperatur

$\vartheta_V = -116 \text{ } ^\circ\text{C}$

örtl. bl. Dehnung a.d. potentiellen  
Trennbruch-Ausgangsstelle

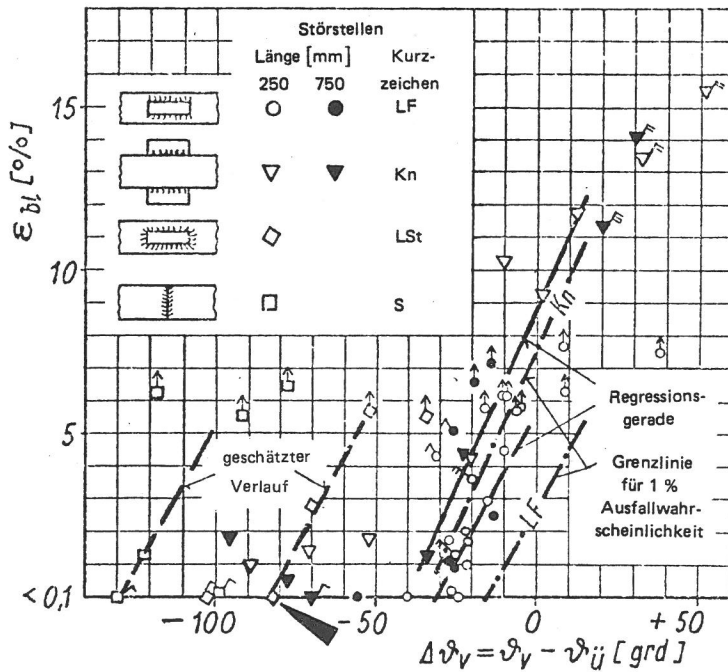
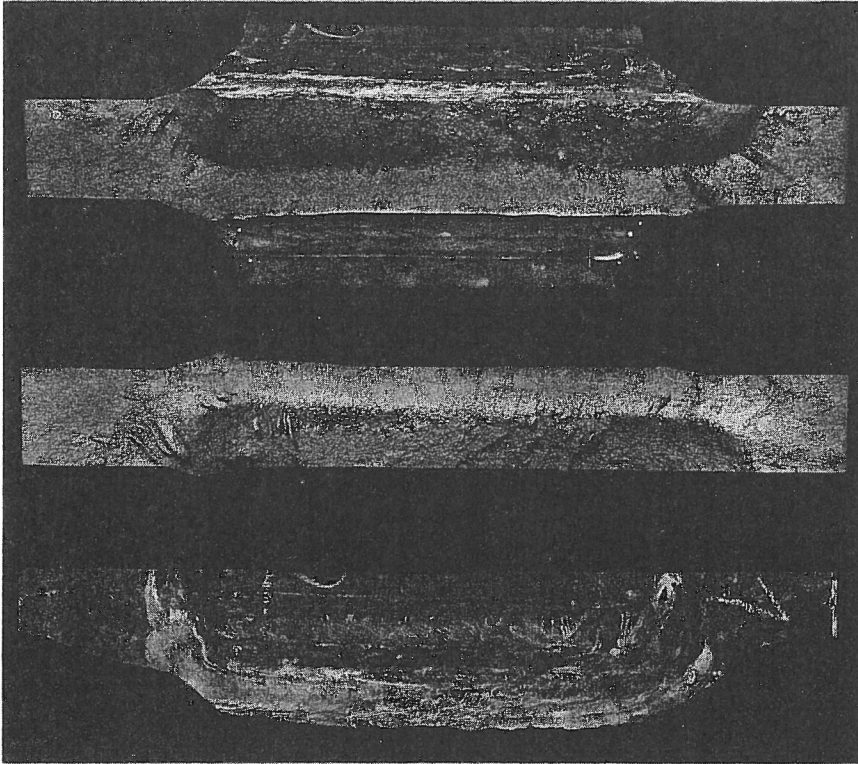
$\epsilon_{bl} = < 0,1 \%$

örtl. bl. bezogene Dickenänderung


$(\Delta d/d_0)_{bl} = < 0,1 \%$

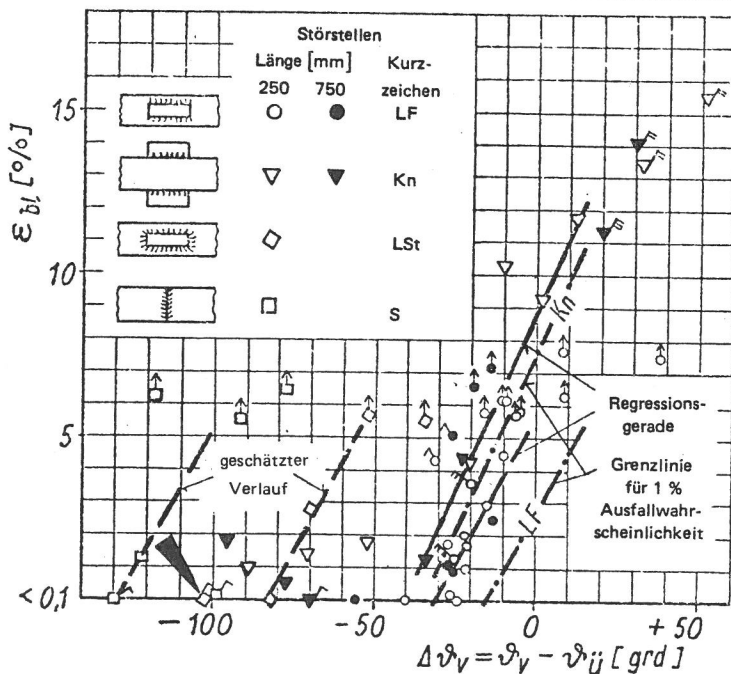
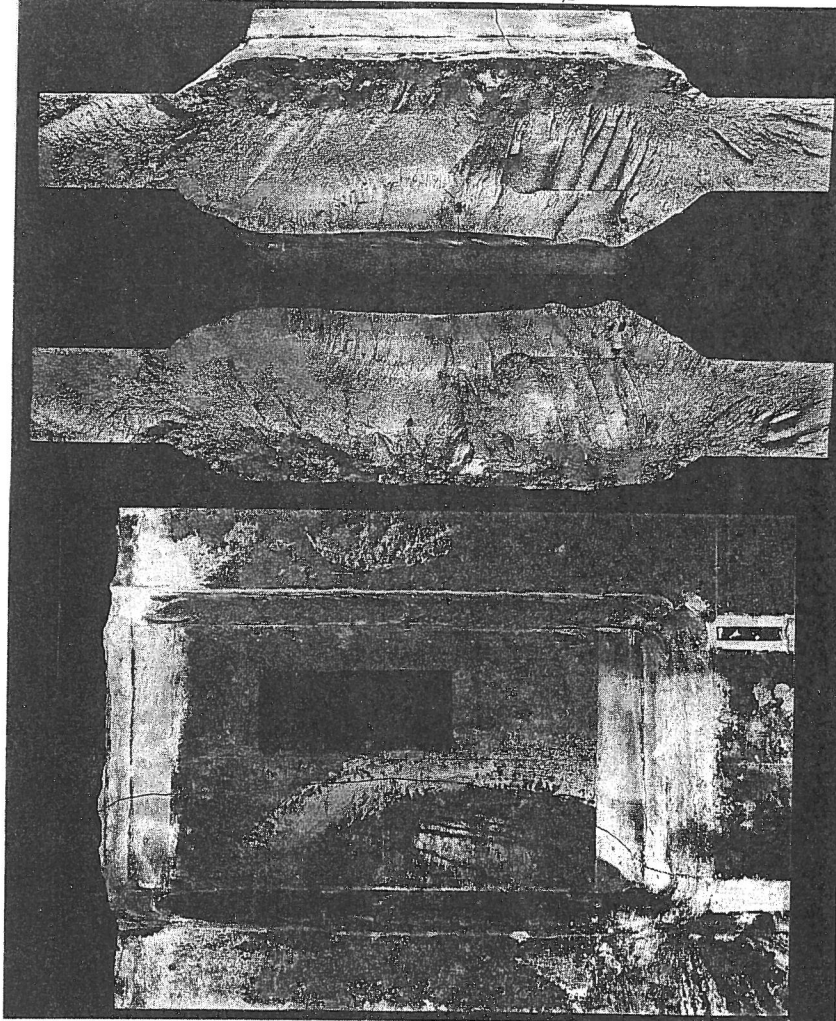
örtl. Bruch-Nennspannung in Probenlängsrichtung

$\sigma_{N.Br} = 20,4 \text{ kp/mm}^2$




- $\epsilon_{bl}$  : örtliche bleibende Dehnung in Probenlängsrichtung an der potentiellen Trennbruch-Ausgangsstelle
- $\vartheta_V$  : Versuchstemperatur
- $\vartheta_{\bar{U}}$  : Übergangstemperatur der ISO-Spitzkerbprobe längs zur Walzrichtung für  $a_k = 3,5 \text{ kpm/cm}^2$
- ↑ : Bruchstelle außerhalb der Versuchslänge
- ∧ : Bruchausgang in der Schweißnaht
- ↗ : nach Anriß Restquerschnitt durch Gleitbruch zerstört
- ↘ : nach Anriß beginnender Gleitbruch in Trennbruch übergehend
- ↖ : Anriß bei niedriger Last wurde Primär-Trennbruch-Ausgangsstelle
- ↙ : Anriß bei niedriger Last

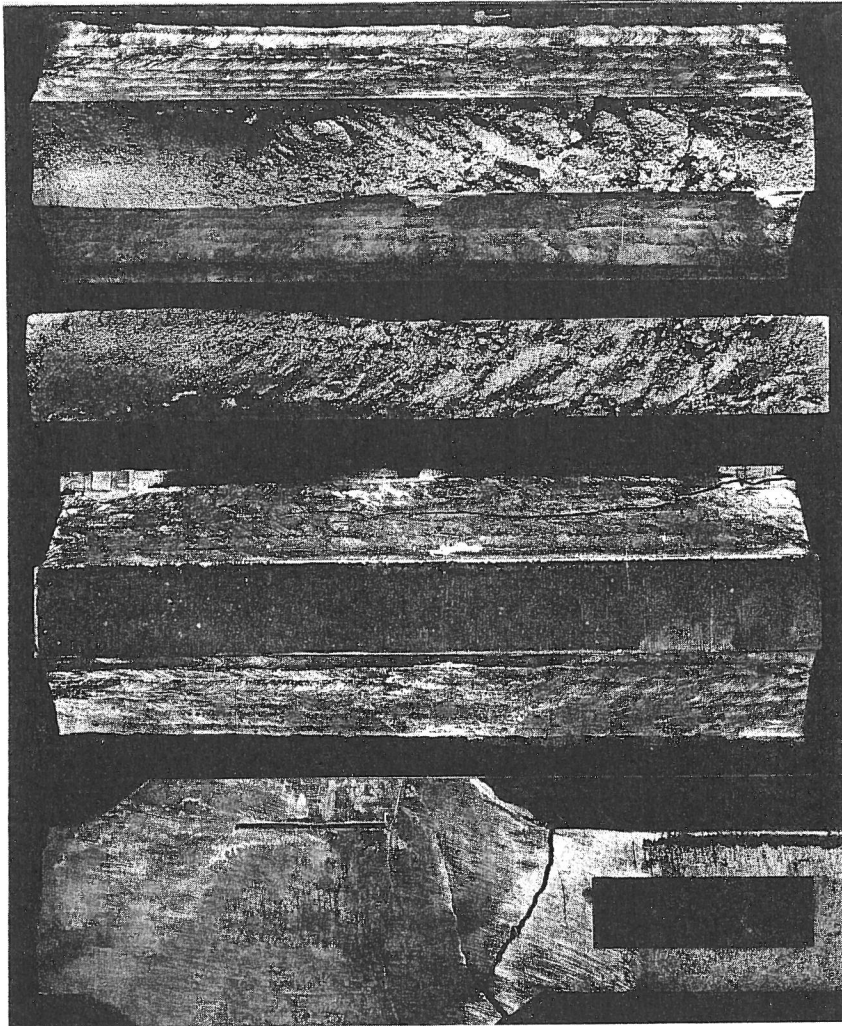
Proben-Nr.	8/1.2.5
Werkstoff	R St 37 - 2 N
Walzrichtung zur Probenlängsrichtung	parallel
Blechedicke	$d_o = 30 \text{ mm}$
Störstellenform (Länge in mm)	
Übergangstemperatur aus Kerbschlagbiegeversuch längs Walzrichtung	$\vartheta_{Ü} = - 34,0 \text{ °C}$
Versuchstemperatur	$\vartheta_V = - 136 \text{ °C}$
örtl. bl. Dehnung a.d. potentiellen Trennbruch-Ausgangsstelle	$\epsilon_{bl} = < 0,1 \text{ %}$
örtl. bl. bezogene Dickenänderung	$(\Delta d/d_o)_{bl} = < 0,1 \text{ %}$
örtl. Bruch-Nennspannung in Probenlängsrichtung	$\sigma_{N,Br} = 29,4 \text{ kp/mm}^2$



- $\epsilon_{bl}$  : örtliche bleibende Dehnung in Probenlängsrichtung an der potentiellen Trennbruch-Ausgangsstelle
- $\vartheta_V$  : Versuchstemperatur
- $\vartheta_{Ü}$  : Übergangstemperatur der ISO-Spitzkerbprobe längs zur Walzrichtung für  $a_k = 3,5 \text{ kpm/cm}^2$
- ↑ : Bruchstelle außerhalb der Versuchslänge
- ↙ : Bruchausgang in der Schweißnaht
- ↘ : nach Anriß Restquerschnitt durch Gleitbruch zerstört
- ↗ : nach Anriß beginnender Gleitbruch in Trennbruch übergehend
- ↖ : Anriß bei niedriger Last wurde Primär-Trennbruch-Ausgangsstelle
- ↙ : Anriß bei niedriger Last



Proben-Nr.	16/1.8.2
Werkstoff	R St 37 - 2 N
Walzrichtung zur Probenlängsrichtung	parallel
Blechdicke	$d_o = 30$ mm
Störstellenform (Länge in mm)	
Übergangstemperatur aus Kerbschlagbiegeversuch längs Walzrichtung	$\vartheta_{\ddot{u}} = - 37,0$ °C
Versuchstemperatur	$\vartheta_v = - 144$ °C
örtl. bl. Dehnung a.d. potentiellen Trennbruch-Ausgangsstelle	$\epsilon_{bl} = < 0,1$ %
örtl. bl. bezogene Dickenänderung	$(\Delta d/d_o)_{bl} = < 0,1$ %
örtl. Bruch-Nennspannung in Probenlängsrichtung	$\sigma_{N,Br} = 43,7$ kp/mm <sup>2</sup>



Proben-Nr. 16/1.7.2  
 Werkstoff R St 37 - 2 N  
 Walzrichtung zur Probenlängsrichtung parallel  
 Blechdicke  $d_0 = 30$  mm

Störstellenform (Länge in mm)



Übergangstemperatur aus Kerbschlagbiegeversuch längs Walzrichtung

$\vartheta_{\bar{u}} = -41,0$  °C

Versuchstemperatur

$\vartheta_v = -140$  °C

örtl. bl. Dehnung a.d. potentiellen

$\epsilon_{bl} = 0,1$  %

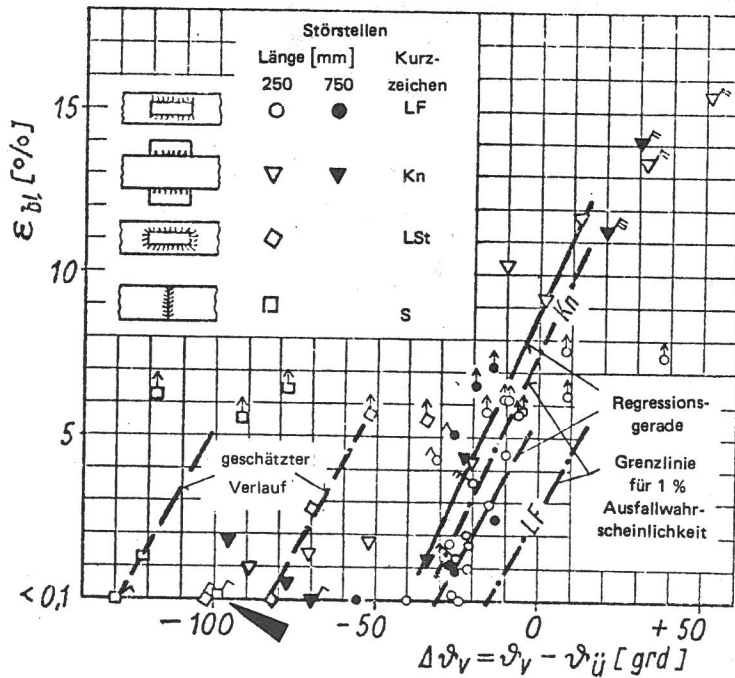
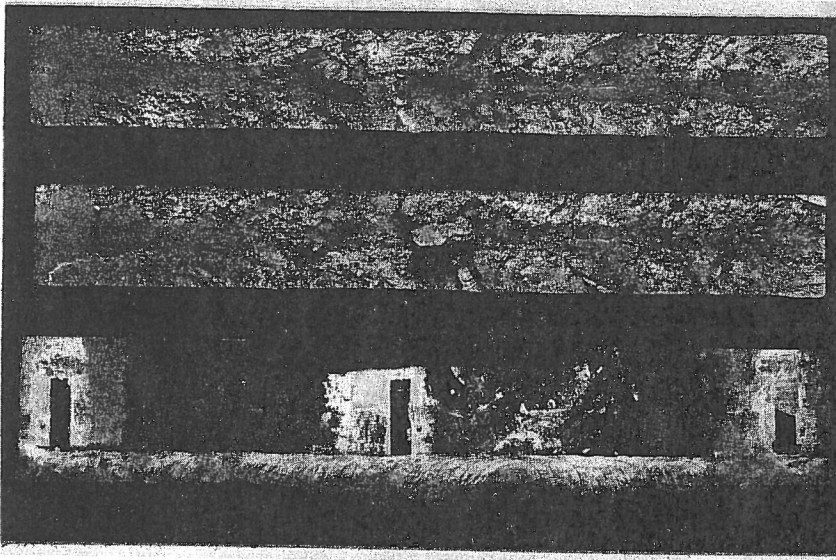
Trennbruch-Ausgangsstelle

$(\Delta d/d_0)_{bl} = 0,2$  %

örtl. bl. bezogene Dickenänderung

$\sigma_{N Rr} = 43,5$  kp/mm<sup>2</sup>

örtl. Bruch-Nennspannung in Probenlängsrichtung



- $\epsilon_{bl}$  : örtliche bleibende Dehnung in Probenlängsrichtung an der potentiellen Trennbruch-Ausgangsstelle
- $\vartheta_v$  : Versuchstemperatur
- $\vartheta_{\bar{u}}$  : Übergangstemperatur der ISO-Spitzkerbprobe längs zur Walzrichtung für  $a_k = 3,5$  kpm/cm<sup>2</sup>
- ↑ : Bruchstelle außerhalb der Versuchslänge
- ↗ : Bruchausgang in der Schweißnaht
- ↘ : nach Anriß Restquerschnitt durch Gleitbruch zerstört
- ↖ : nach Anriß beginnender Gleitbruch in Trennbruch übergehend
- ↙ : Anriß bei niedriger Last wurde Primär-Trennbruch-Ausgangsstelle
- ↗ : Anriß bei niedriger Last

Proben-Nr. 19/1.7.6  
 Werkstoff R St 37 - 2 N  
 Walzrichtung zur Probenlängsrichtung parallel  
 Blechdicke  $d_o = 30$  mm

Störstellenform (Länge in mm)



Übergangstemperatur aus Kerbschlagbiegeversuch  
 längs Walzrichtung

$\vartheta_{\ddot{u}} = -25,5$  °C

Versuchstemperatur

$\vartheta_v = -155$  °C

örtl. bl. Dehnung a.d. potentiellen  
 Trennbruch-Ausgangsstelle

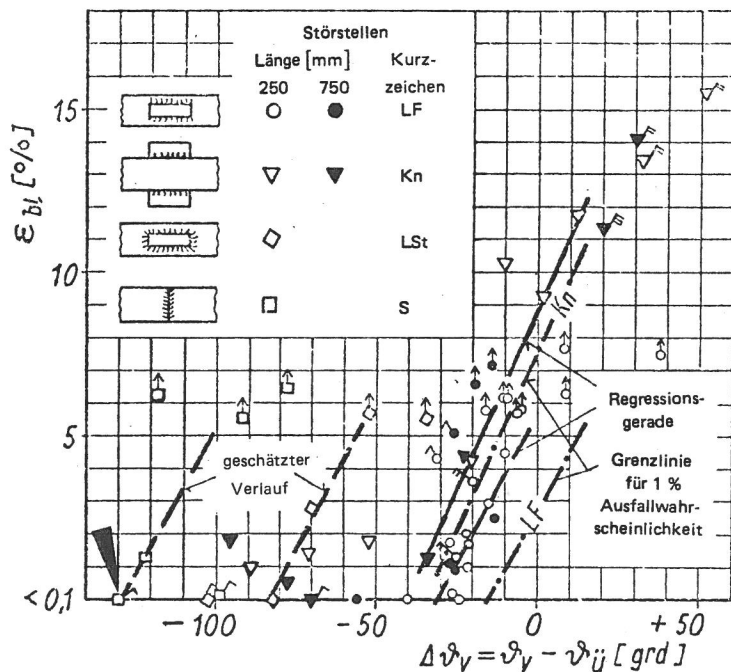
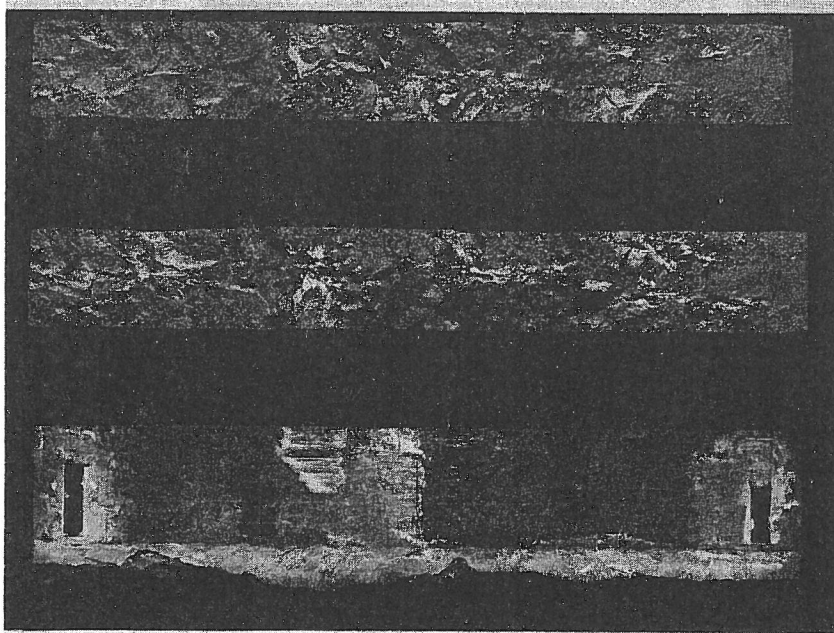
$\epsilon_{bl} = < 0,1$  %

örtl. bl. bezogene Dickenänderung

$(\Delta d/d_o)_{bl} = 0,1$  %

örtl. Bruch-Nennspannung in Probenlängsrichtung

$\sigma_{N,Br} = 49,8$  kp/mm<sup>2</sup>



- $\epsilon_{bl}$  : örtliche bleibende Dehnung in Probenlängsrichtung an der potentiellen Trennbruch-Ausgangsstelle
- $\vartheta_v$  : Versuchstemperatur
- $\vartheta_{\ddot{u}}$  : Übergangstemperatur der ISO-Spitzkerbprobe längs zur Walzrichtung für  $a_k = 3,5$  kpm/cm<sup>2</sup>
- ↑ : Bruchstelle außerhalb der Versuchslänge
- ∧ : Bruchausgang in der Schweißnaht
- ↗ : nach Anriß Restquerschnitt durch Gleitbruch zerstört
- ↘ : nach Anriß beginnender Gleitbruch in Trennbruch übergehend
- ↖ : Anriß bei niedriger Last wurde Primär-Trennbruch-Ausgangsstelle
- ↙ : Anriß bei niedriger Last

Proben-Nr. 19/1.7.7  
 Werkstoff R St 37 - 2 N  
 Walzrichtung zur Probenlängsrichtung parallel  
 Blechdicke  $d_o = 30$  mm

Störstellenform (Länge in mm)



Übergangstemperatur aus Kerbschlagbiegeversuch längs Walzrichtung

$\vartheta_{\bar{u}} = -27,5$  °C

Versuchstemperatur

$\vartheta_v = -150$  °C

örtl. bl. Dehnung a.d. potentiellen Trennbruch-Ausgangsstelle

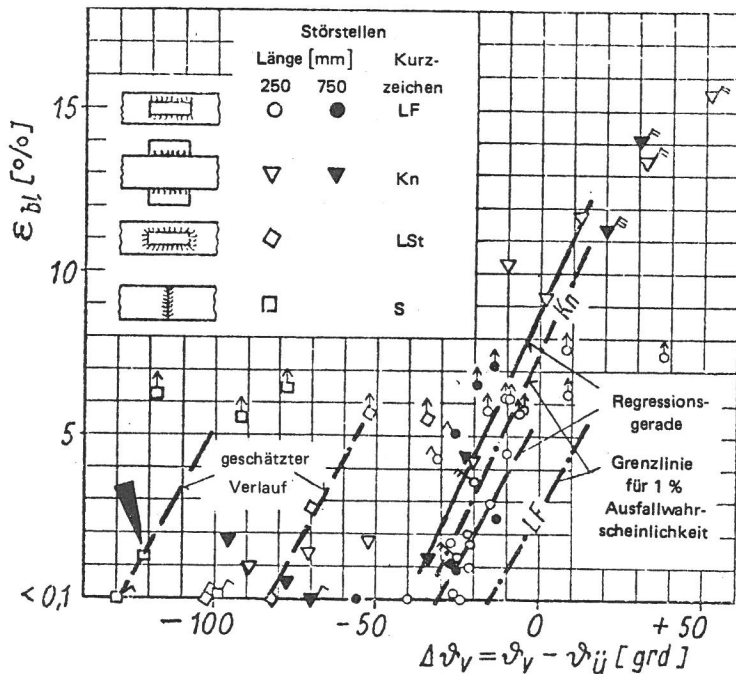
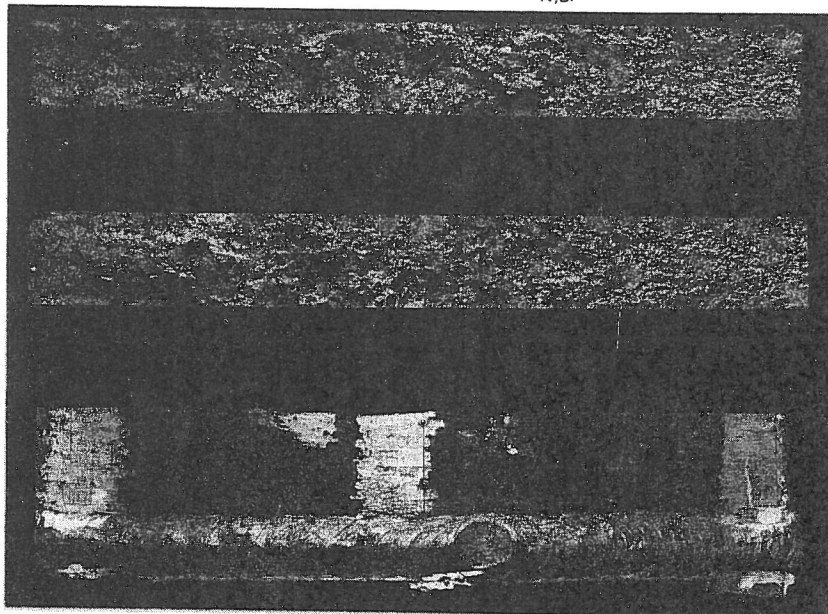
$\epsilon_{bl} = 1,3$  %

örtl. bl. bezogene Dickenänderung

$(\Delta d/d_o)_{bl} = 0,7$  %

örtl. Bruch-Nennspannung in Probenlängsrichtung

$\sigma_{N,Br} = 50,4$  kp/mm<sup>2</sup>



- $\epsilon_{bl}$  : örtliche bleibende Dehnung in Probenlängsrichtung an der potentiellen Trennbruch-Ausgangsstelle
- $\vartheta_v$  : Versuchstemperatur
- $\vartheta_{\bar{u}}$  : Übergangstemperatur der ISO-Spitzkerbprobe längs zur Walzrichtung für  $a_k = 3,5$  kpm/cm<sup>2</sup>
- ↑ : Bruchstelle außerhalb der Versuchslänge
- ↙ : Bruchausgang in der Schweißnaht
- ↘ : nach Anriß Restquerschnitt durch Gleitbruch zerstört
- ↗ : nach Anriß beginnender Gleitbruch in Trennbruch übergehend
- ↖ : Anriß bei niedriger Last wurde Primär-Trennbruch-Ausgangsstelle
- ↗ : Anriß bei niedriger Last

Proben-Nr. 24/5.1.1  
 Werkstoff R St 37 - 2 N  
 Walzrichtung zur Probenlängsrichtung senkrecht  
 Blechdicke  $d_0 = 30$  mm

Störstellenform (Länge in mm) 

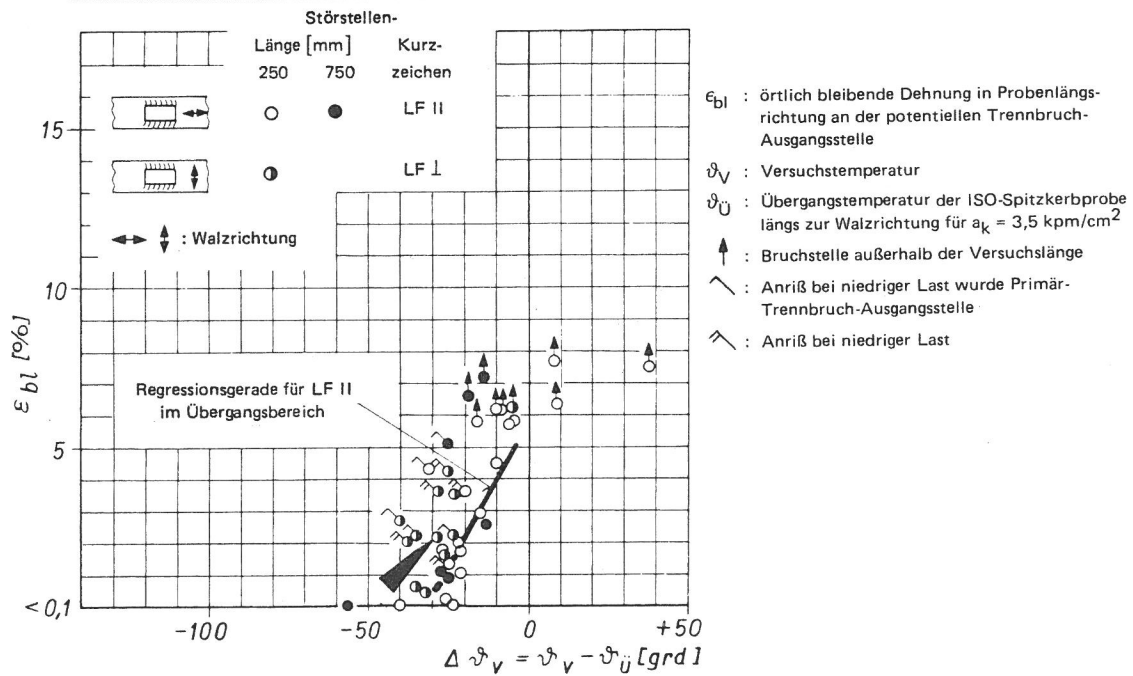
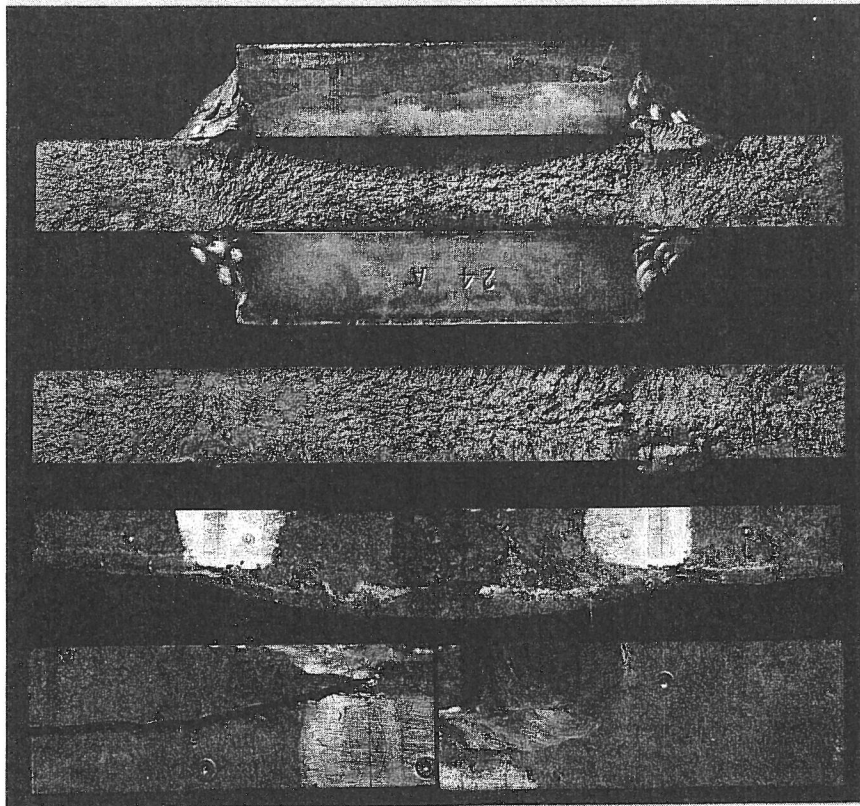
Übergangstemperatur aus Kerbschlagbiegeversuch längs Walzrichtung  $\vartheta_{\bar{U}} = -33$  °C

Versuchstemperatur  $\vartheta_V = -61$  °C

örtl. bl. Dehnung a.d. potentiellen Trennbruch-Ausgangsstelle  $\epsilon_{bl} = 2,1$  %

örtl. bl. bezogene Dickenänderung  $(\Delta d/d_0)_{bl} = 2,0$  %

örtl. Bruch-Nennspannung in Probenlängsrichtung  $\sigma_{N Rr} = 37,4$  kp/mm<sup>2</sup>



Proben-Nr.

24/5.1.2

Werkstoff

R St 37 - 2 N

Walzrichtung zur Probenlängsrichtung

senkrecht

Blechdicke

$d_o = 30$  mm

Störstellenform (Länge in mm)



Übergangstemperatur aus Kerbschlagbiegeversuch  
längs Walzrichtung

$\vartheta_{\bar{u}} = -28$  °C

Versuchstemperatur

$\vartheta_v = -54$  °C

örtl. bl. Dehnung a.d. potentiellen  
Trennbruch-Ausgangsstelle

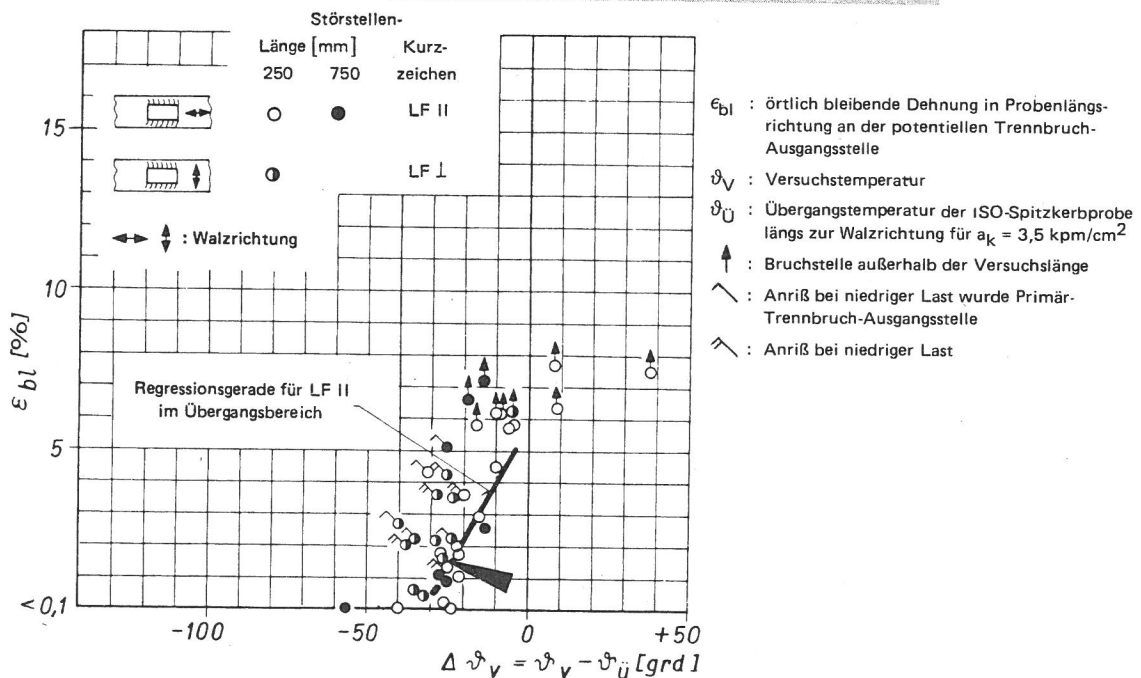
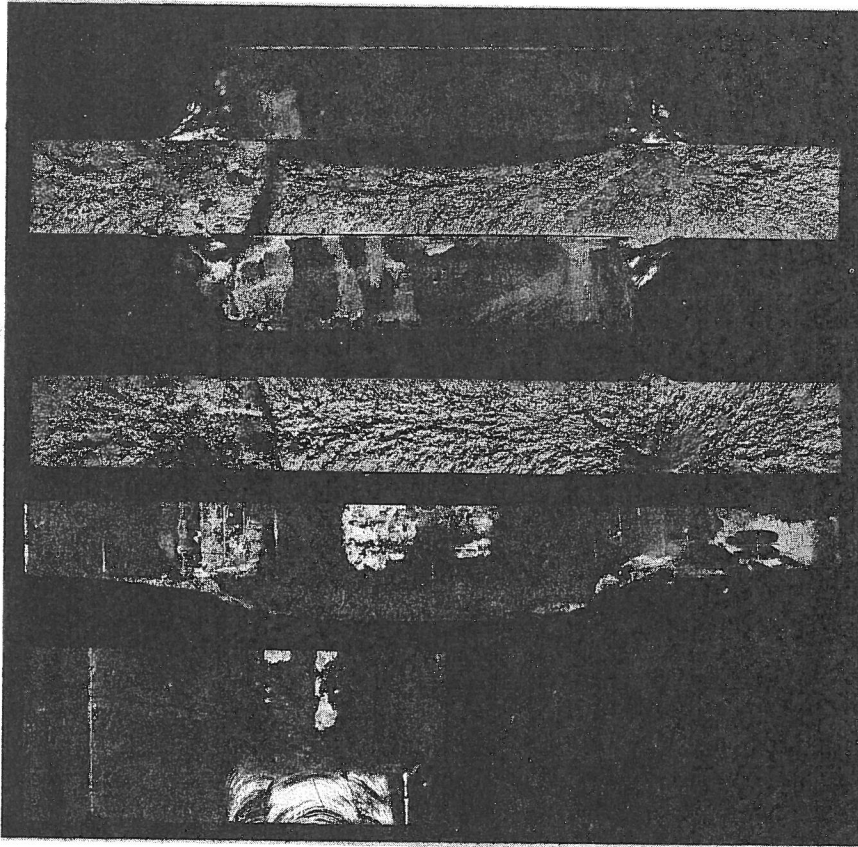
$\epsilon_{bl} = 1,6$  %

örtl. bl. bezogene Dickenänderung

$(\Delta d/d_o)_{bl} = 1,2$  %

örtl. Bruch-Nennspannung in Probenlängsrichtung

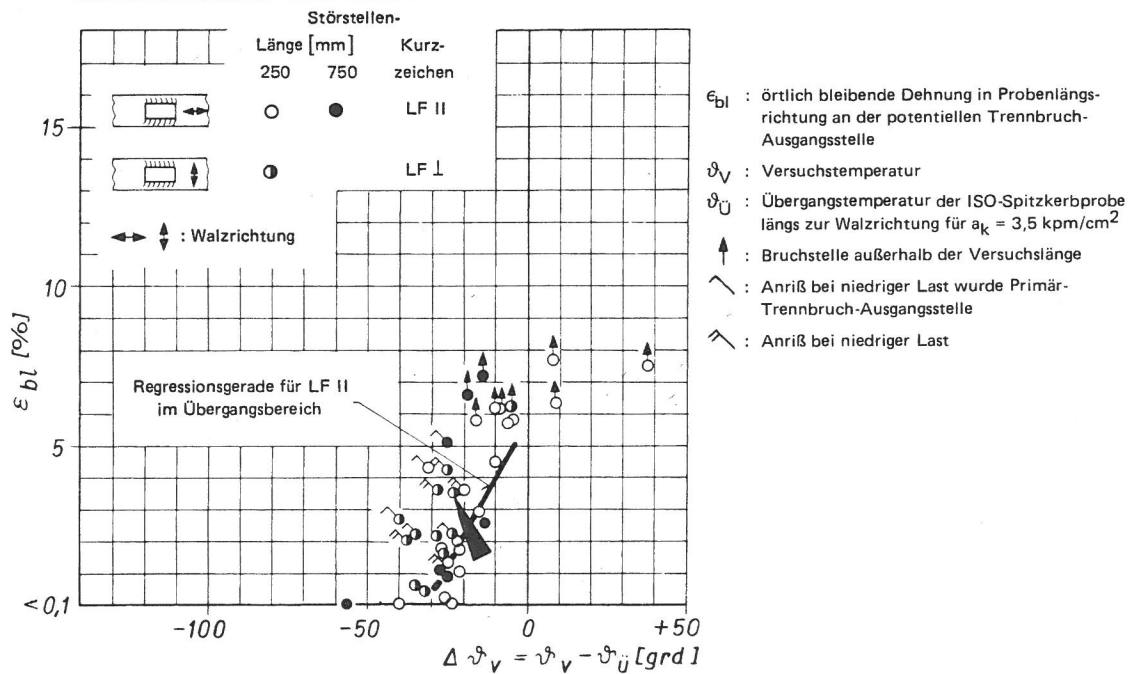
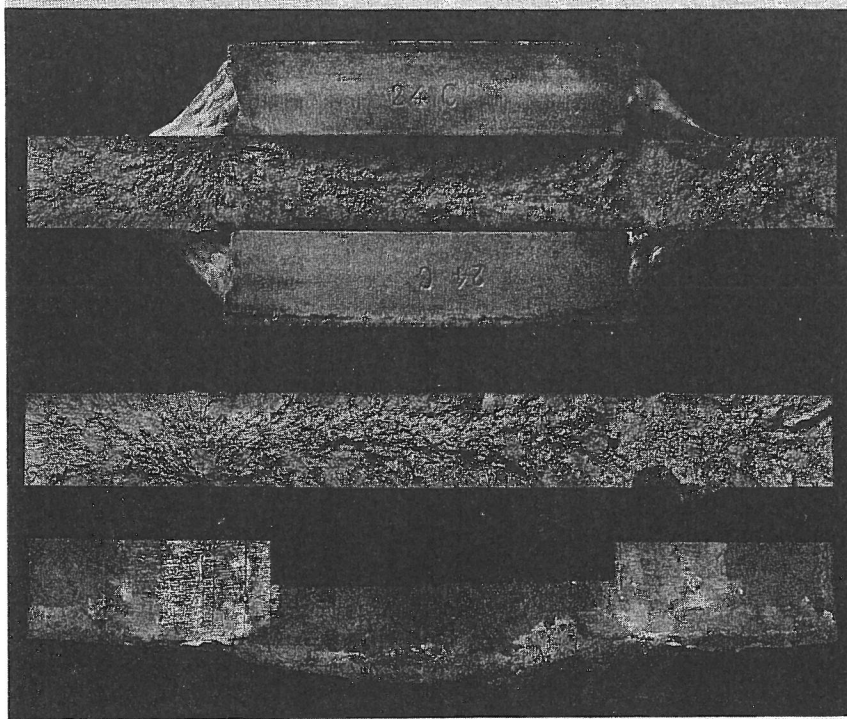
$\sigma_{N,Br} = 34,6$  kp/mm<sup>2</sup>



Proben-Nr. 24/5.1.3  
 Werkstoff R St 37 - 2 N  
 Walzrichtung zur Probenlängsrichtung senkrecht  
 Blechdicke  $d_o = 30$  mm

Störstellenform (Länge in mm) 

Übergangstemperatur aus Kerbschlagbiegeversuch  
 längs Walzrichtung  $\vartheta_{\ddot{u}} = -28$  °C  
 Versuchstemperatur  $\vartheta_v = -51$  °C  
 örtl. bl. Dehnung a.d. potentiellen  
 Trennbruch-Ausgangsstelle  $\epsilon_{bl} = 3,5$  %  
 örtl. bl. bezogene Dickenänderung  $(\Delta d/d_o)_{bl} = 3,7$  %  
 örtl. Bruch-Nennspannung in Probenlängsrichtung  $\sigma_{N,Br} = 40,7$  kp/mm<sup>2</sup>



Proben-Nr.  
Werkstoff  
Walzrichtung zur Probenlängsrichtung  
Blechdicke

27/5.1.4  
R St 37 - 2 N  
senkrecht  
 $d_o = 30 \text{ mm}$

Anlage 69

Störstellenform (Länge in mm)



Übergangstemperatur aus Kerbschlagbiegeversuch  
längs Walzrichtung

$\vartheta_{\bar{u}} = -21 \text{ } ^\circ\text{C}$

Versuchstemperatur

$\vartheta_V = -56 \text{ } ^\circ\text{C}$

örtl. bl. Dehnung a.d. potentiellen  
Trennbruch-Ausgangsstelle

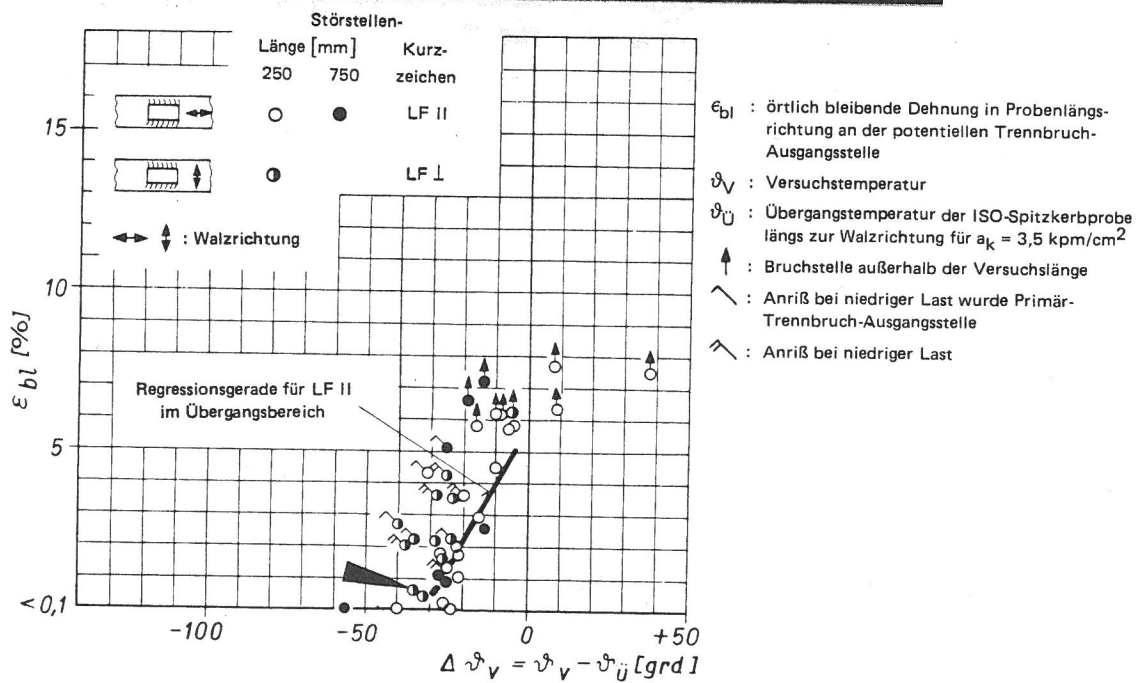
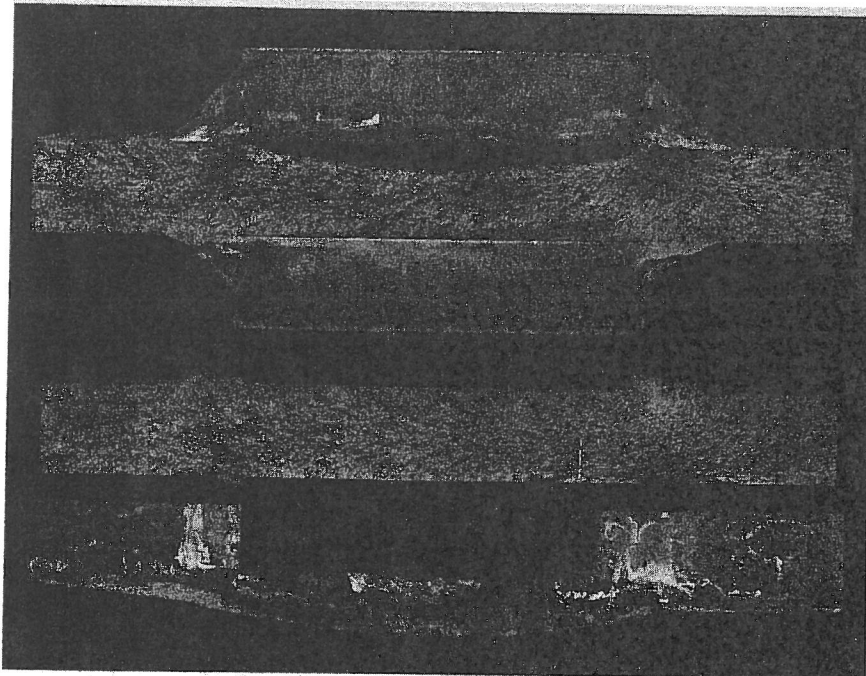
$\epsilon_{bl} = 0,6 \%$

örtl. bl. bezogene Dickenänderung

$(\Delta d/d_o)_{bl} = 0,4 \%$

örtl. Bruch-Nennspannung in Probenlängsrichtung

$\sigma_{N,Br} = 29,3 \text{ kp/mm}^2$

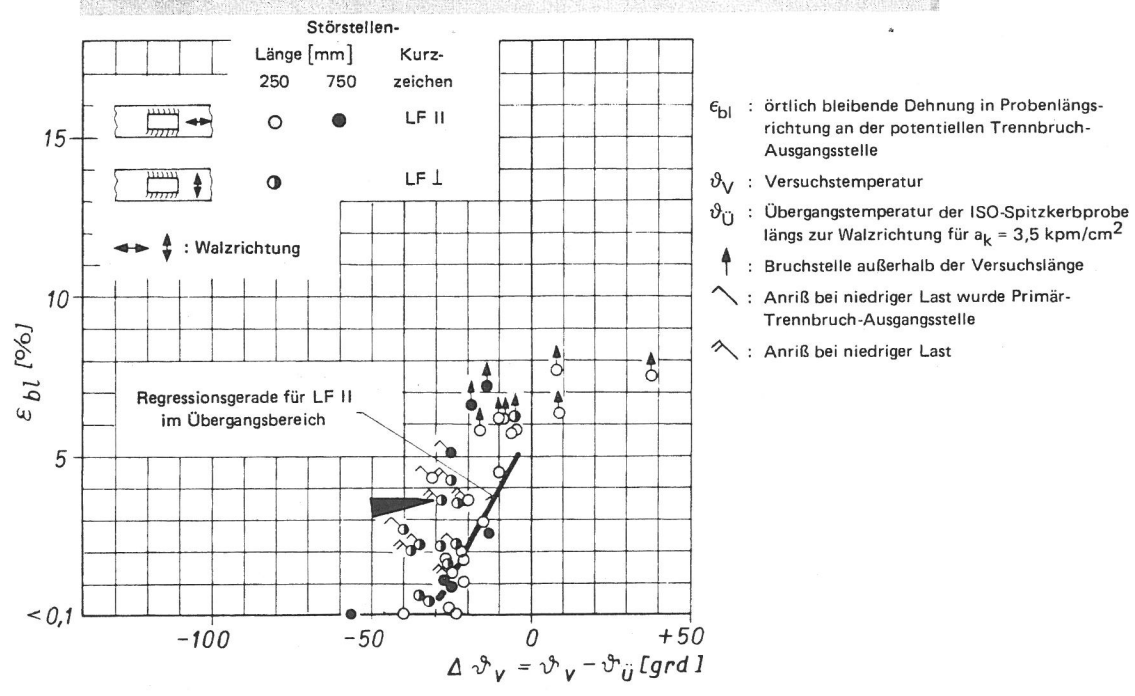
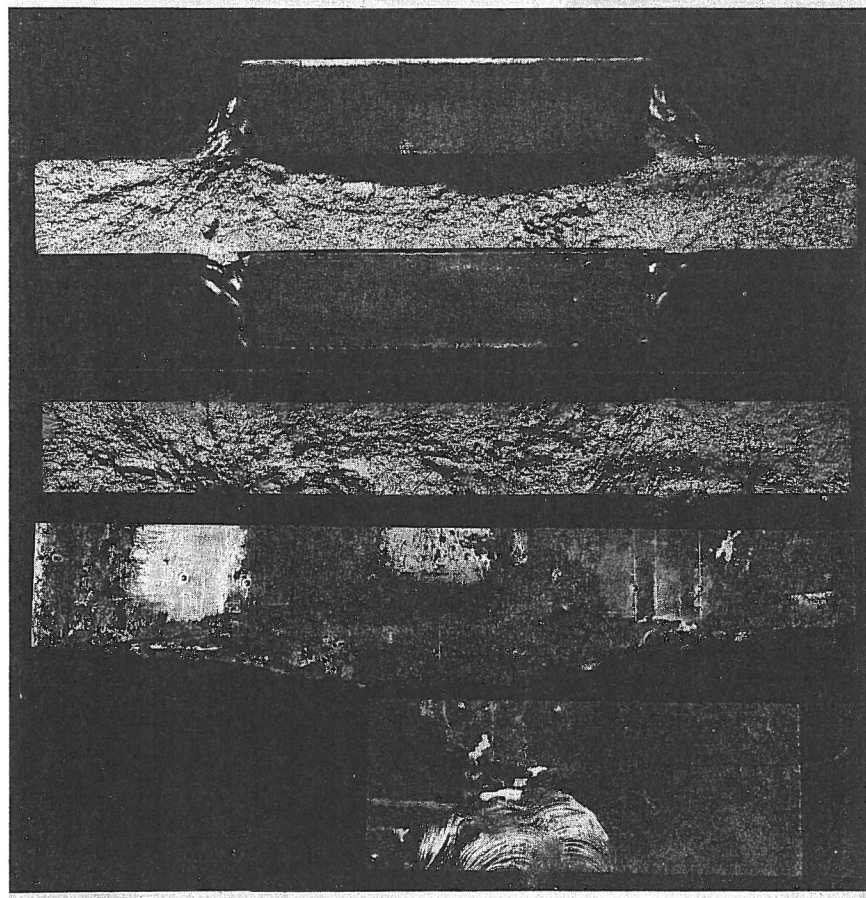




Proben-Nr. 27/5.1.5  
 Werkstoff R St 37 - 2 N  
 Walzrichtung zur Probenlängsrichtung senkrecht  
 Blechdicke  $d_o = 30$  mm

Störstellenform (Länge in mm) 250

Übergangstemperatur aus Kerbschlagbiegeversuch längs Walzrichtung  $\vartheta_{\bar{u}} = -21$  °C  
 Versuchstemperatur  $\vartheta_V = -49$  °C  
 örtl. bl. Dehnung a.d. potentiellen Trennbruch-Ausgangsstelle  $\epsilon_{bl} = 3,6$  %  
 örtl. bl. bezogene Dickenänderung  $(\Delta d/d_o)_{bl} = 3,7$  %  
 örtl. Bruch-Nennspannung in Probenlängsrichtung  $\sigma_{N,Br} = 42,1$  kp/mm<sup>2</sup>



Proben-Nr. 27/5.1.6  
 Werkstoff R St 37 - 2 N  
 Walzrichtung zur Probenlängsrichtung senkrecht  
 Blechdicke  $d_o = 30$  mm

Störstellenform (Länge in mm) 

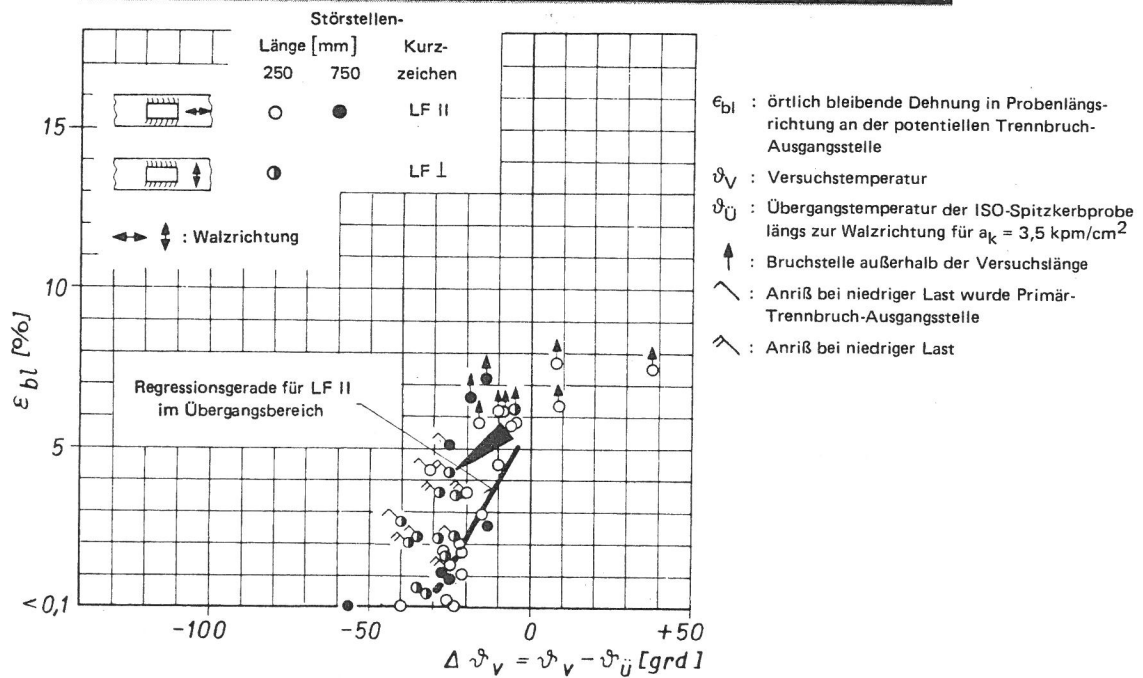
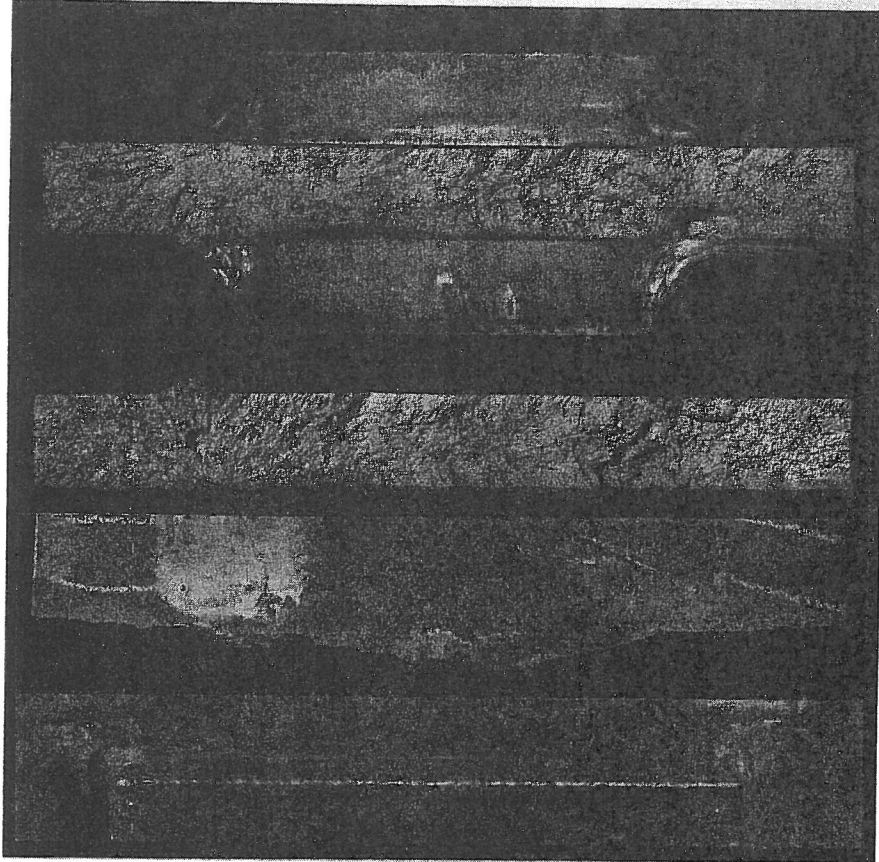
Übergangstemperatur aus Kerbschlagbiegeversuch längs Walzrichtung  $\vartheta_{\bar{u}} = -16$  °C

Versuchstemperatur  $\vartheta_V = -41$  °C

örtl. bl. Dehnung a.d. potentiellen Trennbruch-Ausgangsstelle  $\epsilon_{bl} = 4,2$  %

örtl. bl. bezogene Dickenänderung  $(\Delta d/d_o)_{bl} = 4,3$  %

örtl. Bruch-Nennspannung in Probenlängsrichtung  $\sigma_{N.Br} = 43,6$  kp/mm<sup>2</sup>



Proben-Nr. 25/5.1.8  
 Werkstoff R St 37 - 2 N  
 Walzrichtung zur Probenlängsrichtung senkrecht  
 Blechdicke  $d_o = 30$  mm

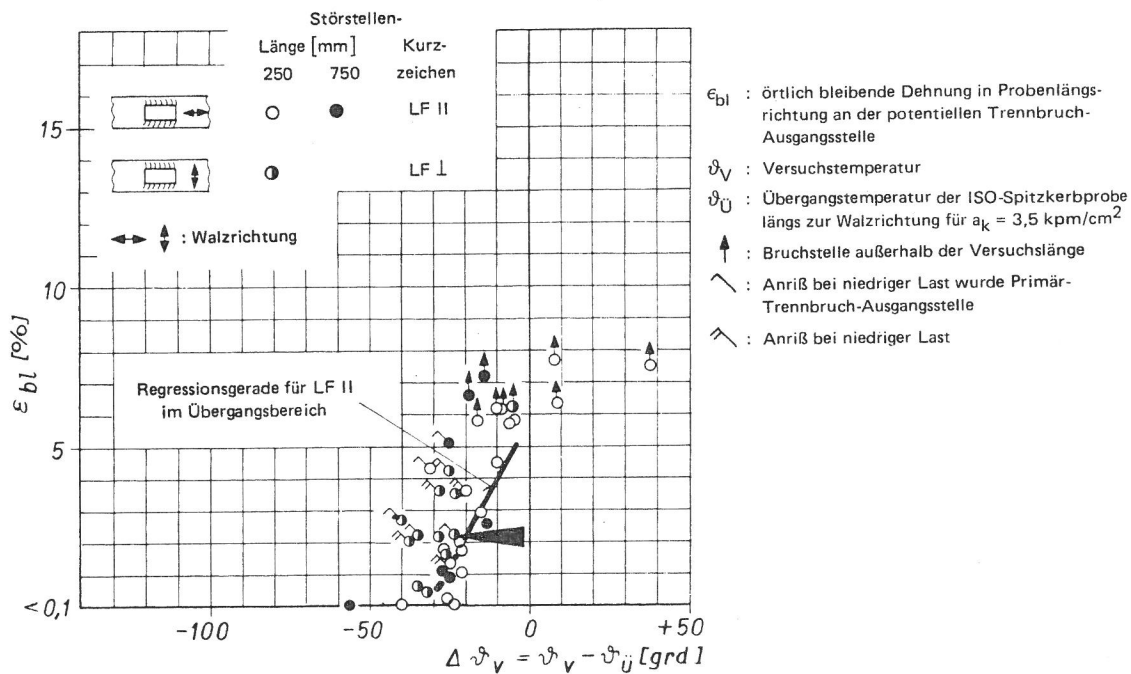
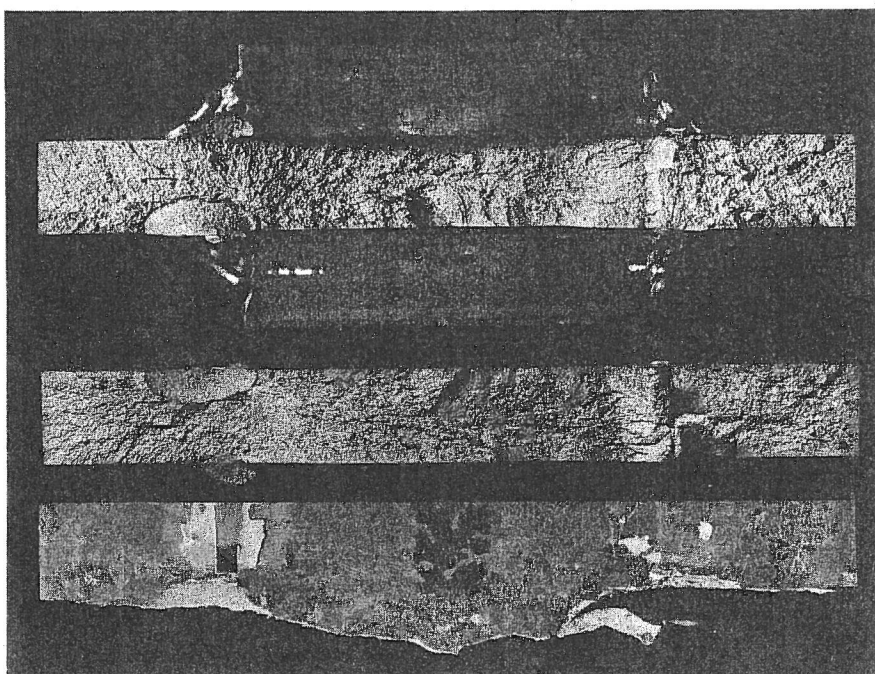
Störstellenform (Länge in mm) 250

Übergangstemperatur aus Kerbschlagbiegeversuch längs Walzrichtung  $\vartheta_{\ddot{u}} = -25$  °C  
 Versuchstemperatur  $\vartheta_V = -48$  °C

örtl. bl. Dehnung a.d. potentiellen Trennbruch-Ausgangsstelle  $\epsilon_{bl} = 2,2$  %

örtl. bl. bezogene Dickenänderung  $(\Delta d/d_o)_{bl} = 2,4$  %

örtl. Bruch-Nennspannung in Probenlängsrichtung  $\sigma_{N.Br} = 35,4$  kp/mm<sup>2</sup>



Proben-Nr. 25/5.1.9  
 Werkstoff R St 37 - 2 N  
 Walzrichtung zur Probenlängsrichtung senkrecht  
 Blechdicke  $d_o = 30$  mm

Störstellenform (Länge in mm)



Übergangstemperatur aus Kerbschlagbiegeversuch längs Walzrichtung

$\vartheta_{\bar{u}} = -28$  °C

Versuchstemperatur

$\vartheta_v = -66,5$  °C

örtl. bl. Dehnung a.d. potentiellen

$\epsilon_{bl} = 2,0$  %

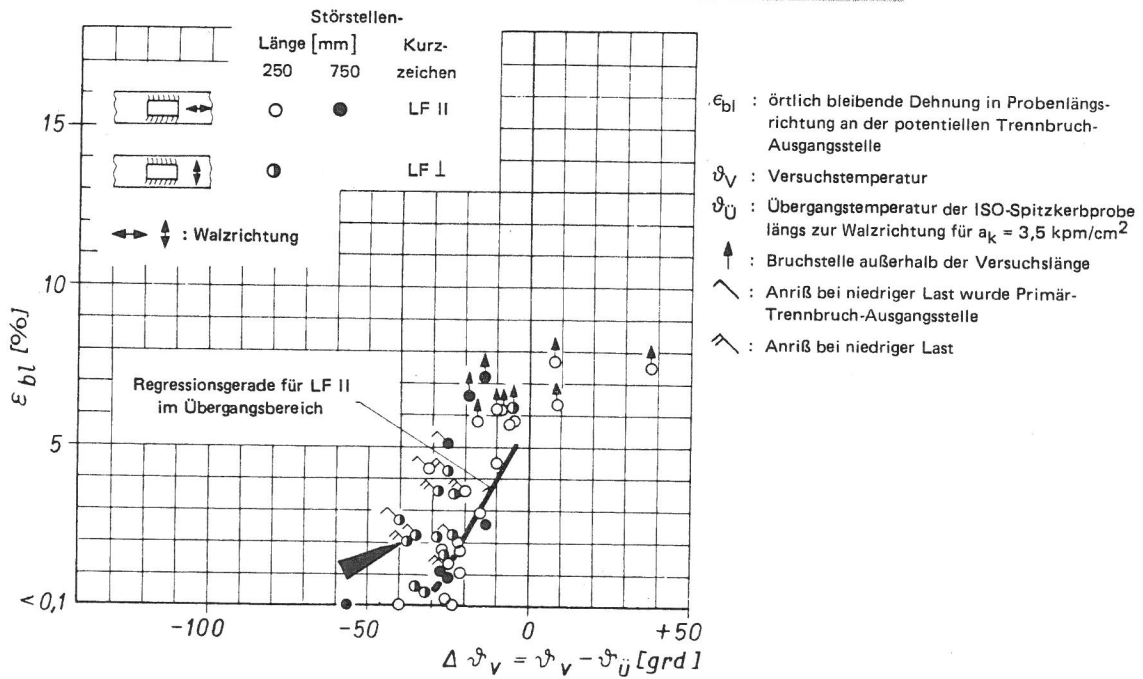
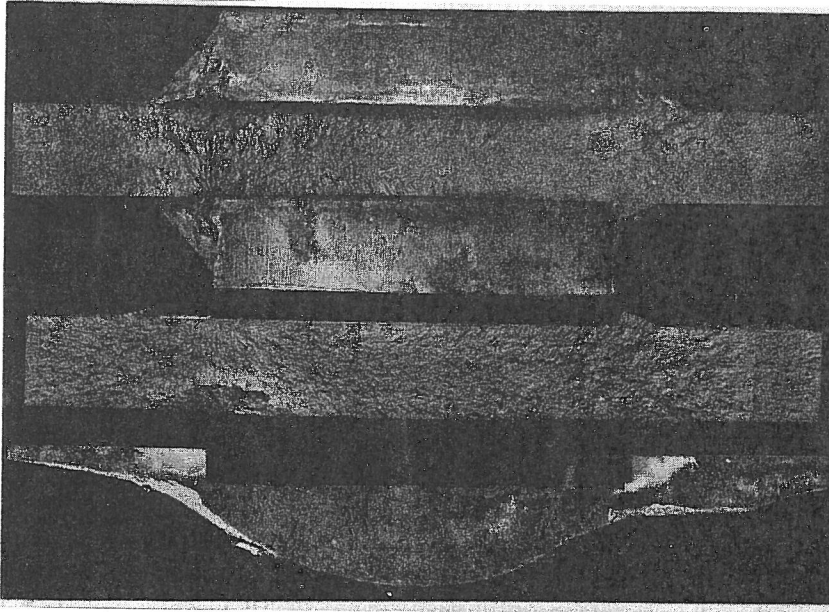
Trennbruch-Ausgangsstelle

$(\Delta d/d_o)_{bl} = 1,7$  %

örtl. bl. bezogene Dickenänderung

örtl. Bruch-Nennspannung in Probenlängsrichtung

$\sigma_{N,Br} = 38,1$  kp/mm<sup>2</sup>



Proben-Nr. 25/5.1.9  
 Werkstoff R St 37 - 2 N  
 Walzrichtung zur Probenlängsrichtung senkrecht  
 Blechdicke  $d_o = 30$  mm

Störstellenform (Länge in mm)



Übergangstemperatur aus Kerbschlagbiegeversuch  
 längs Walzrichtung

$$\vartheta_{\bar{U}} = -28 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Versuchstemperatur

$$\vartheta_V = -66,5 \text{ } ^\circ\text{C}$$

örtl. bl. Dehnung a.d. potentiellen  
 Trennbruch-Ausgangsstelle

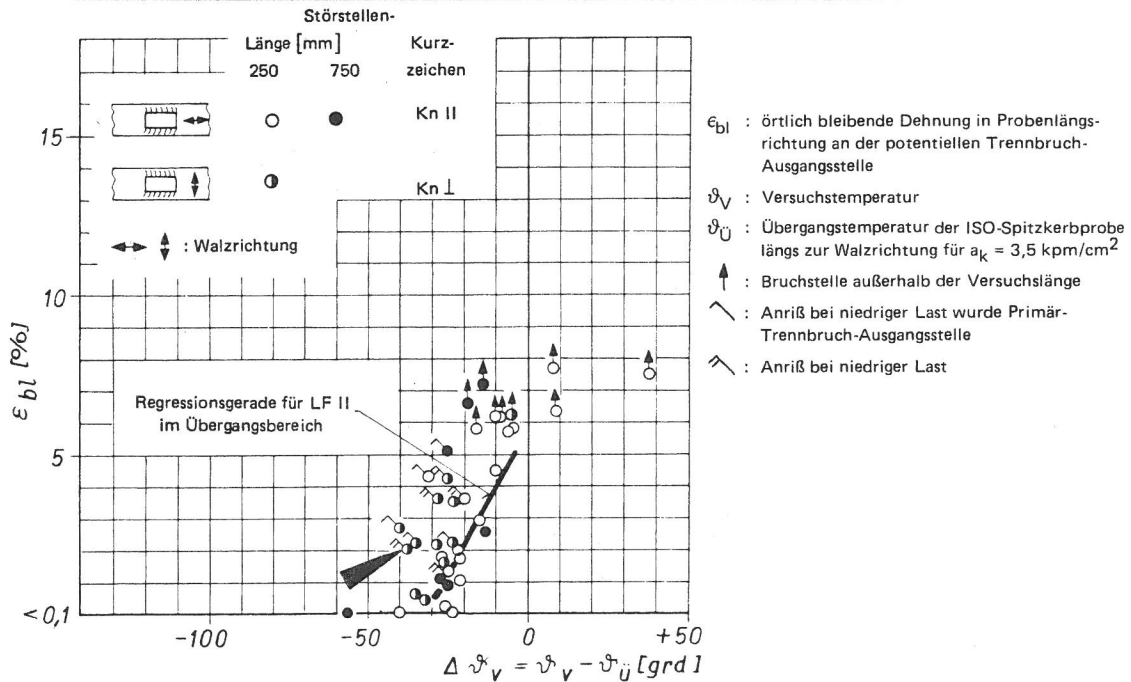
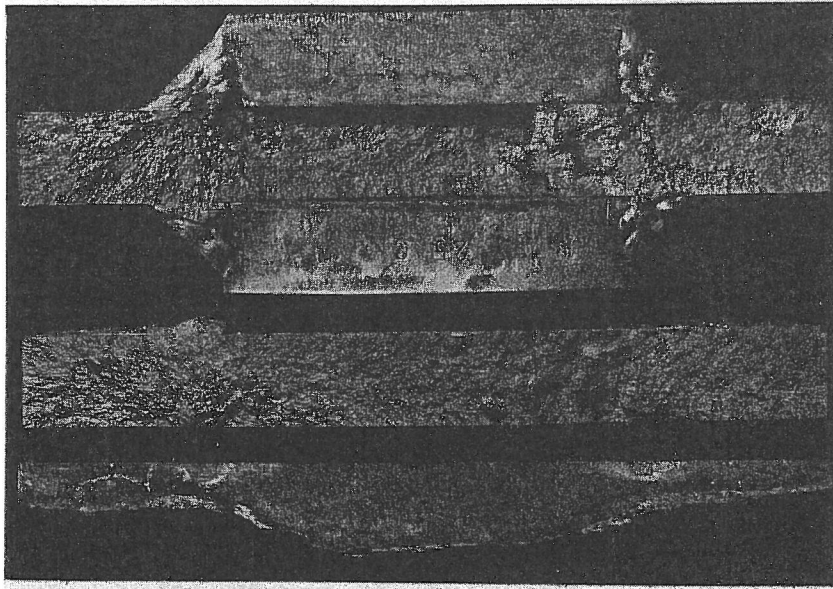
$$\epsilon_{bl} = 2,0 \%$$

örtl. bl. bezogene Dickenänderung

$$(\Delta d/d_o)_{bl} = 1,7 \%$$

örtl. Bruch-Nennspannung in Probenlängsrichtung

$$\sigma_{N,Br} = 38,1 \text{ kp/mm}^2$$



Proben-Nr.  
Werkstoff  
Walzrichtung zur Probenlängsrichtung  
Blechdicke

28/5.1.10  
R St 37 - 2 N  
senkrecht  
 $d_o = 30$  mm

Störstellenform (Länge in mm)



Übergangstemperatur aus Kerbschlagbiegeversuch  
längs Walzrichtung

$\vartheta_{\ddot{u}}$  = -25 °C

Versuchstemperatur

$\vartheta_V$  = -57 °C

örtl. bl. Dehnung a.d. potentiellen  
Trennbruch-Ausgangsstelle

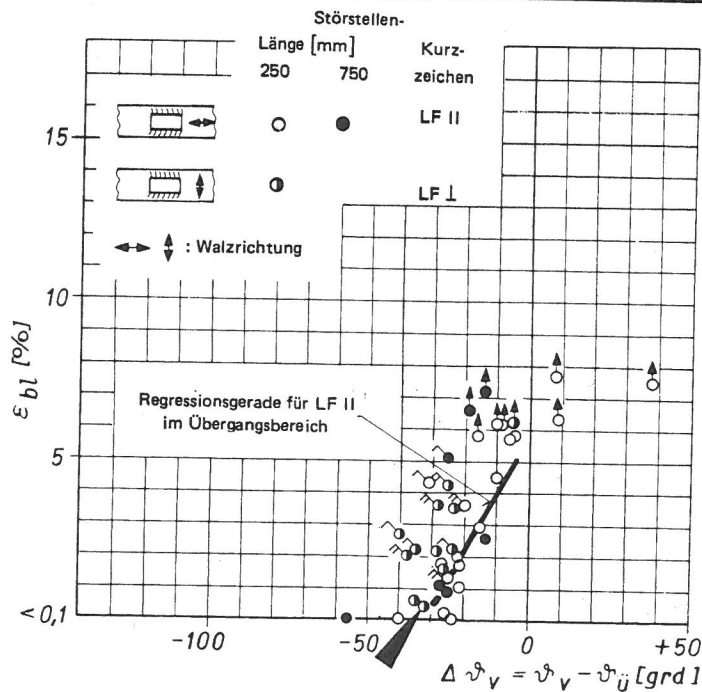
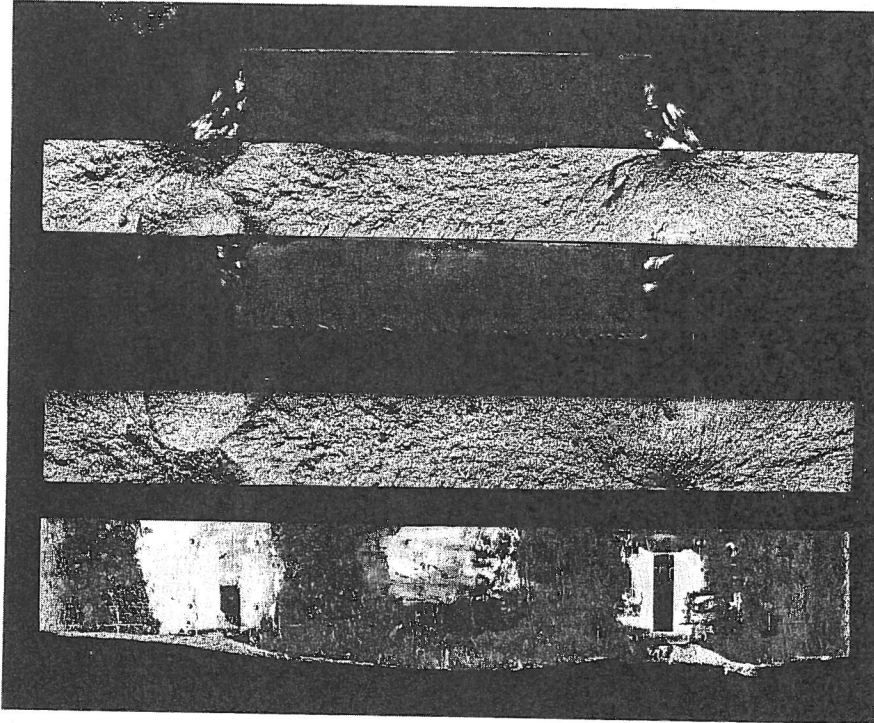
$\epsilon_{bl}$  = 0,4 %

örtl. bl. bezogene Dickenänderung

$(\Delta d/d_o)_{bl}$  = 0,9 %

örtl. Bruch-Nennspannung in Probenlängsrichtung

$\sigma_{N,Br}$  = 31,0 kp/mm<sup>2</sup>



- $\epsilon_{bl}$  : örtlich bleibende Dehnung in Probenlängsrichtung an der potentiellen Trennbruch-Ausgangsstelle
- $\vartheta_V$  : Versuchstemperatur
- $\vartheta_{\ddot{u}}$  : Übergangstemperatur der ISO-Spitzkerbprobe längs zur Walzrichtung für  $a_k = 3,5$  kpm/cm<sup>2</sup>
- ↑ : Bruchstelle außerhalb der Versuchslänge
- ↖ : Anriß bei niedriger Last wurde Primär-Trennbruch-Ausgangsstelle
- ↗ : Anriß bei niedriger Last

Proben-Nr.  
 Werkstoff  
 Walzrichtung zur Probenlängsrichtung  
 Blechdicke

28/5.1.11  
 R St 37 - 2 N  
 senkrecht  
 $d_o = 30 \text{ mm}$

Störstellenform (Länge in mm)



Übergangstemperatur aus Kerbschlagbiegeversuch  
 längs Walzrichtung

$\vartheta_{\text{Ü}} = -20 \text{ °C}$

Versuchstemperatur

$\vartheta_{\text{V}} = -55 \text{ °C}$

örtl. bl. Dehnung a.d. potentiellen  
 Trennbruch-Ausgangsstelle

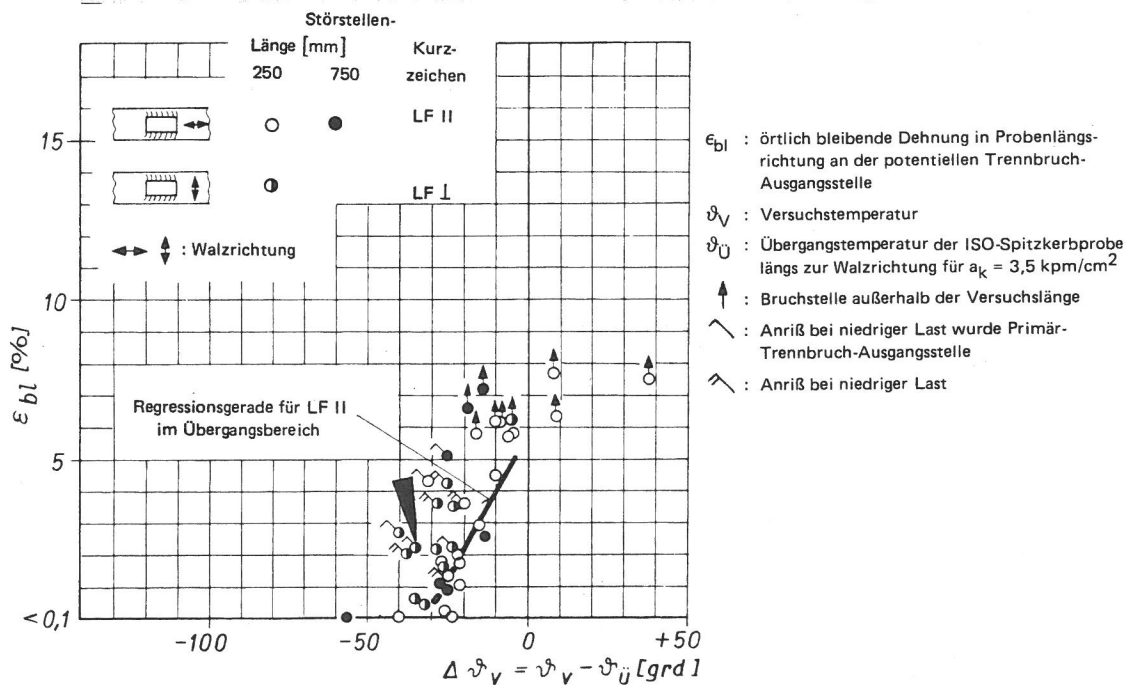
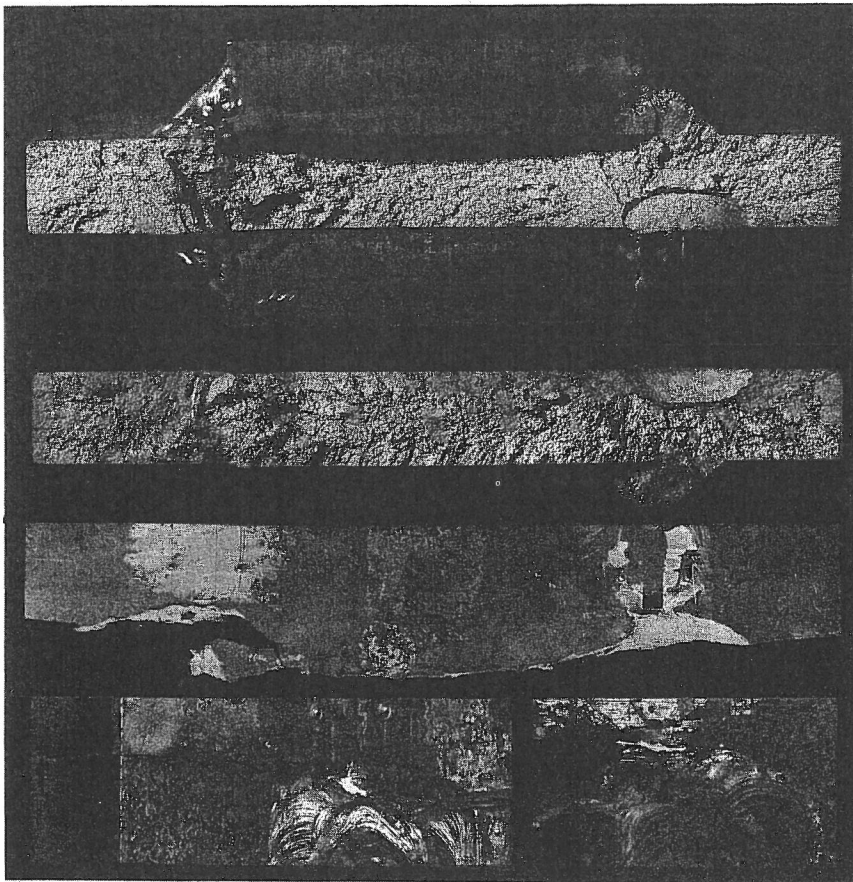
$\epsilon_{\text{bl}} = 2,2 \%$

örtl. bl. bezogene Dickenänderung

$(\Delta d/d_o)_{\text{bl}} = 2,2 \%$

örtl. Bruch-Nennspannung in Probenlängsrichtung

$\sigma_{\text{N,Br}} = 35,8 \text{ kp/mm}^2$



Proben-Nr.  
Werkstoff  
Walzrichtung zur Probenlängsrichtung  
Blechdicke

28/5.1.12  
R St 37 - 2 N  
senkrecht  
 $d_o = 30 \text{ mm}$

Störstellenform (Länge in mm)



Übergangstemperatur aus Kerbschlagbiegeversuch  
längs Walzrichtung

$\vartheta_{\ddot{u}} = -20 \text{ } ^\circ\text{C}$

Versuchstemperatur

$\vartheta_V = -59,5 \text{ } ^\circ\text{C}$

örtl. bl. Dehnung a.d. potentiellen

$\epsilon_{bl} = 2,7 \%$

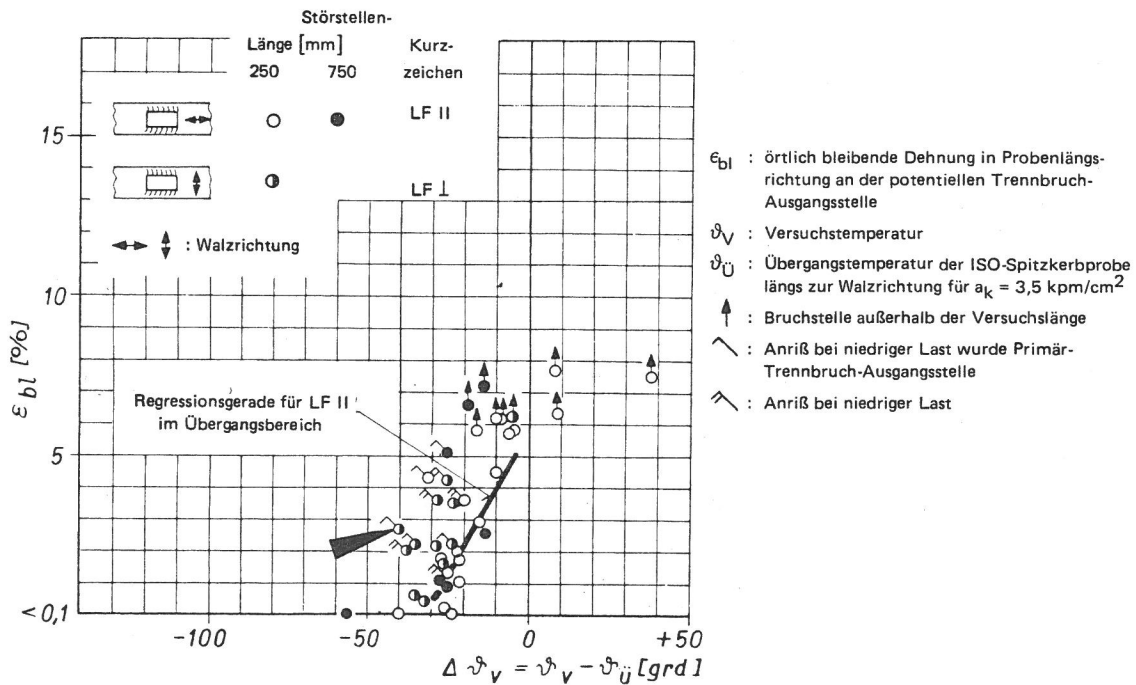
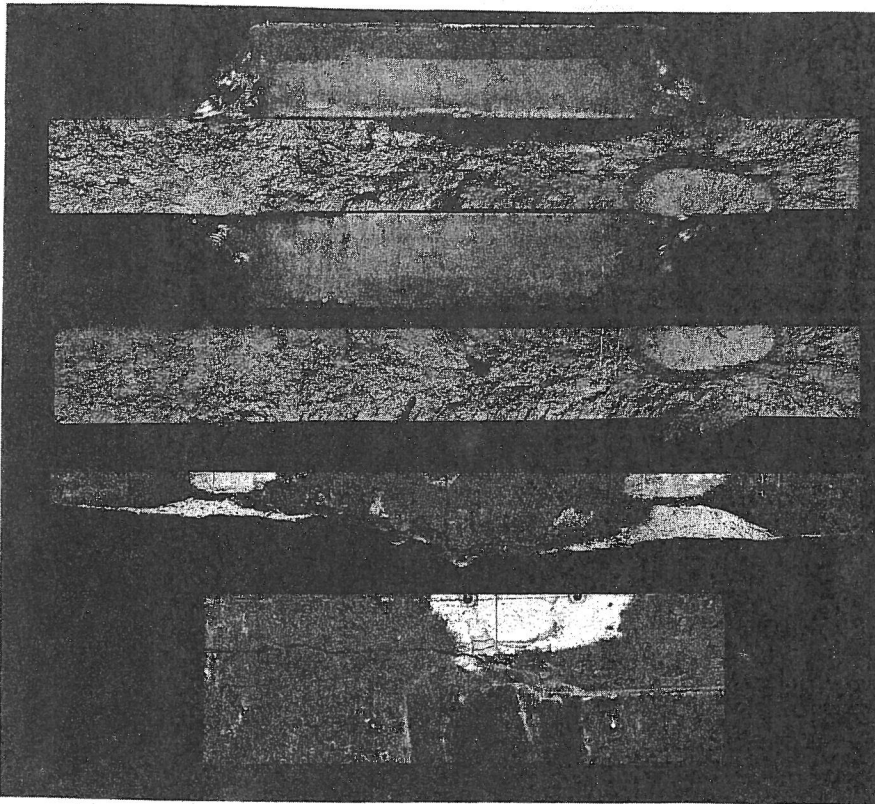
Trennbruch-Ausgangsstelle

$(\Delta d/d_o)_{bl} = 2,8 \%$


örtl. bl. bezogene Dickenänderung

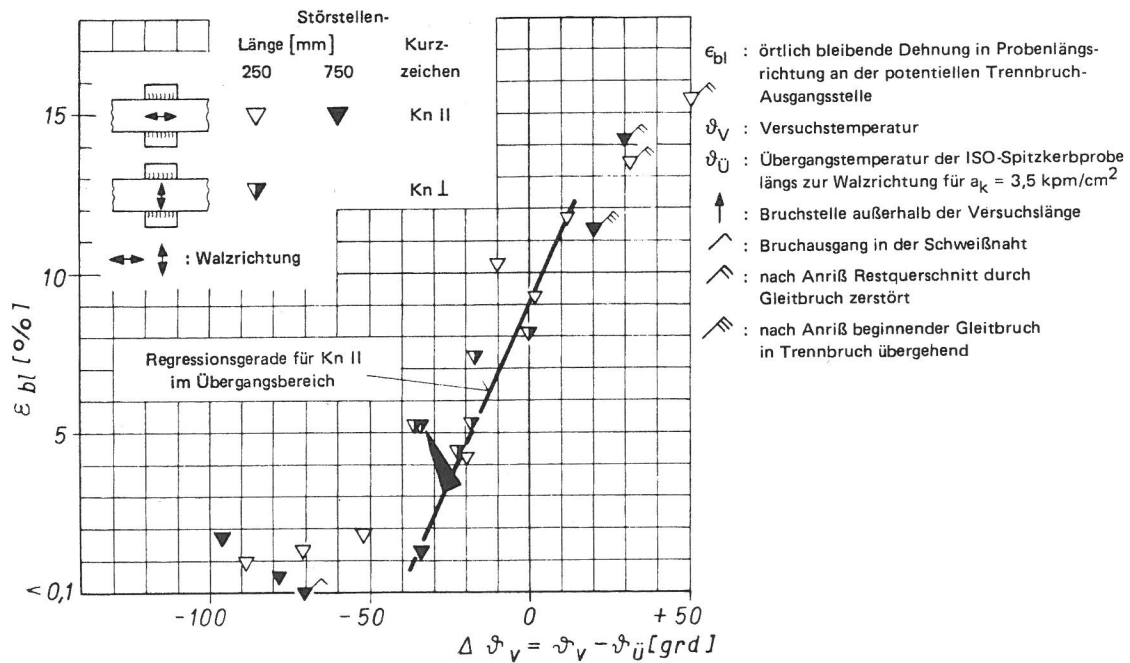
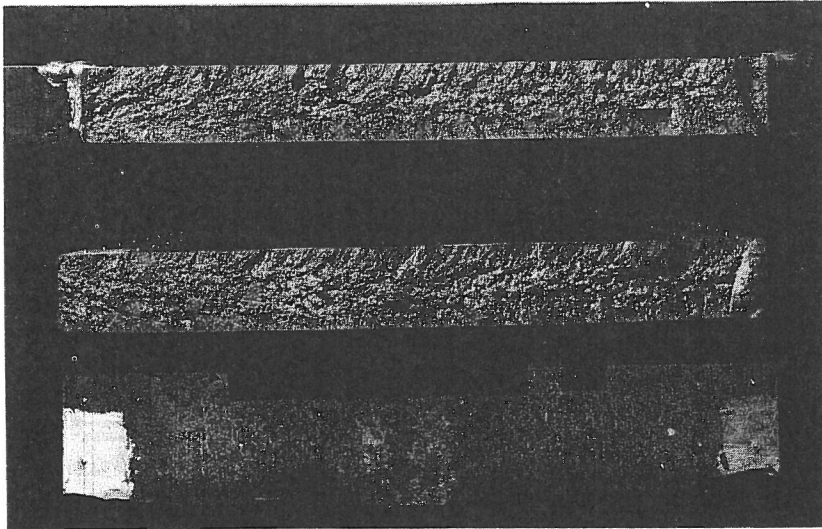
$\sigma_{N,Br} = 38,4 \text{ kp/mm}^2$

örtl. Bruch-Nennspannung in Probenlängsrichtung





Proben-Nr.	23/5.3.1
Werkstoff	R St 37 - 2 N
Walzrichtung zur Probenlängsrichtung	senkrecht
Blechedicke	$d_o = 30 \text{ mm}$
Störstellenform (Länge in mm)	
Übergangstemperatur aus Kerbschlagbiegeversuch längs Walzrichtung	$\vartheta_{\ddot{u}} = -26 \text{ }^\circ\text{C}$
Versuchstemperatur	$\vartheta_v = -60 \text{ }^\circ\text{C}$
örtl. bl. Dehnung a.d. potentiellen Trennbruch-Ausgangsstelle	$\epsilon_{bl} = 5,2 \%$
örtl. bl. bezogene Dickenänderung	$(\Delta d/d_o)_{bl} = 6,5 \%$
örtl. Bruch-Nennspannung in Probenlängsrichtung	$\sigma_{N,Br} = 36,9 \text{ kp/mm}^2$



Proben-Nr.  
 Werkstoff  
 Walzrichtung zur Probenlängsrichtung  
 Blechdicke

23/5.3.1  
 R St 37 - 2 N  
 senkrecht  
 $d_o = 30 \text{ mm}$

Störstellenform (Länge in mm)



Übergangstemperatur aus Kerbschlagbiegeversuch  
 längs Walzrichtung

$\vartheta_{\ddot{u}} = -26 \text{ }^\circ\text{C}$

Versuchstemperatur

$\vartheta_v = -60 \text{ }^\circ\text{C}$

örtl. bl. Dehnung a.d. potentiellen  
 Trennbruch-Ausgangsstelle

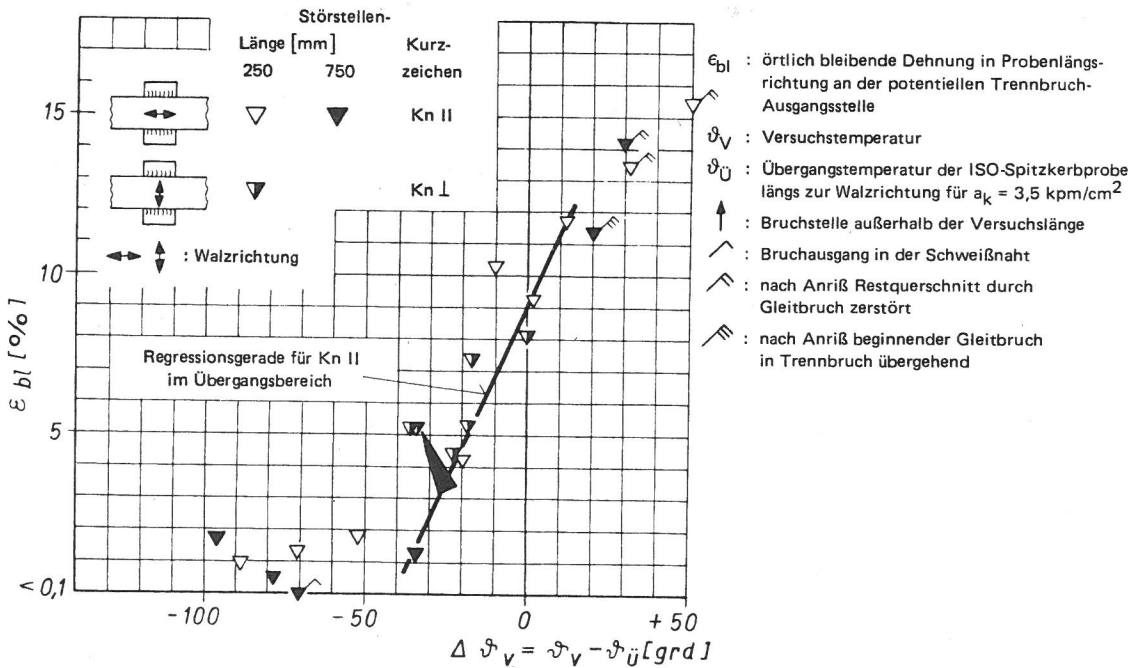
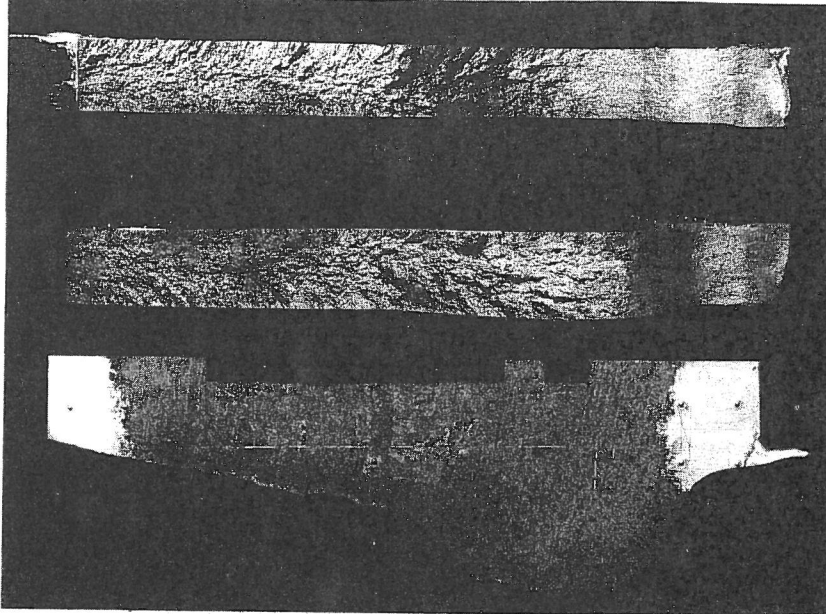
$\epsilon_{bl} = 5,2 \%$

örtl. bl. bezogene Dickenänderung

$(\Delta d/d_o)_{bl} = 6,5 \%$

örtl. Bruch-Nennspannung in Probenlängsrichtung

$\sigma_{N,Br} = 36,9 \text{ kp/mm}^2$



Proben-Nr. 23/5.3.2  
 Werkstoff R St 37 - 2 N  
 Walzrichtung zur Probenlängsrichtung senkrecht  
 Blechdicke  $d_o = 30$  mm

Störstellenform (Länge in mm)



Übergangstemperatur aus Kerbschlagbiegeversuch längs Walzrichtung

$\vartheta_{Ü} = -26$  °C

Versuchstemperatur

$\vartheta_V = -48$  °C

örtl. bl. Dehnung a.d. potentiellen Trennbruch-Ausgangsstelle

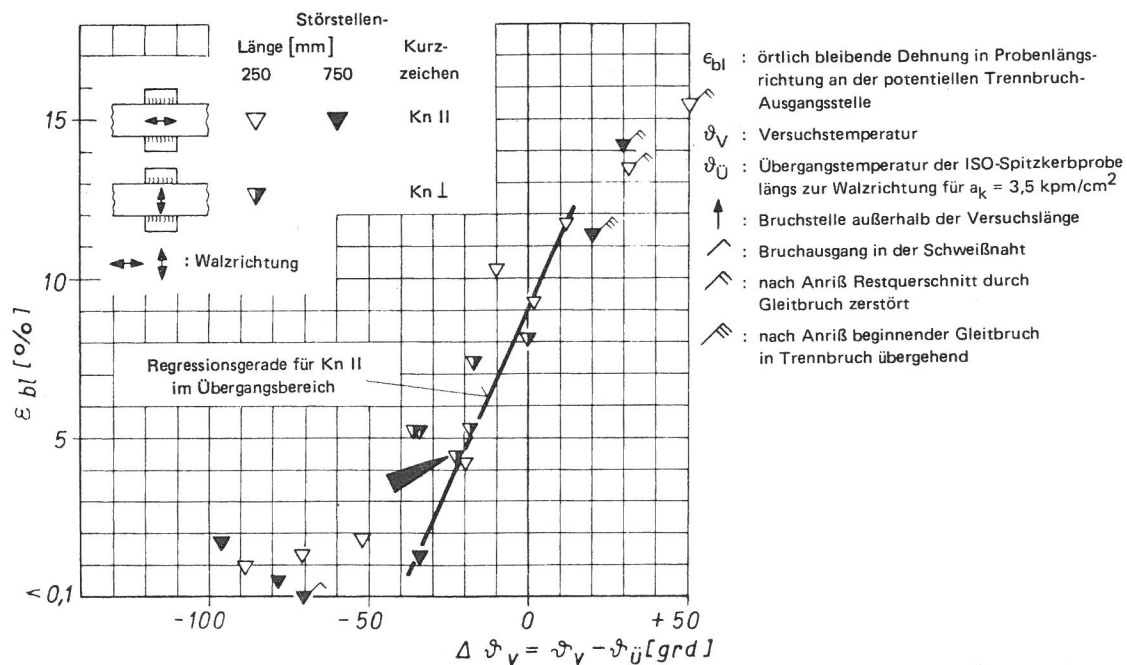
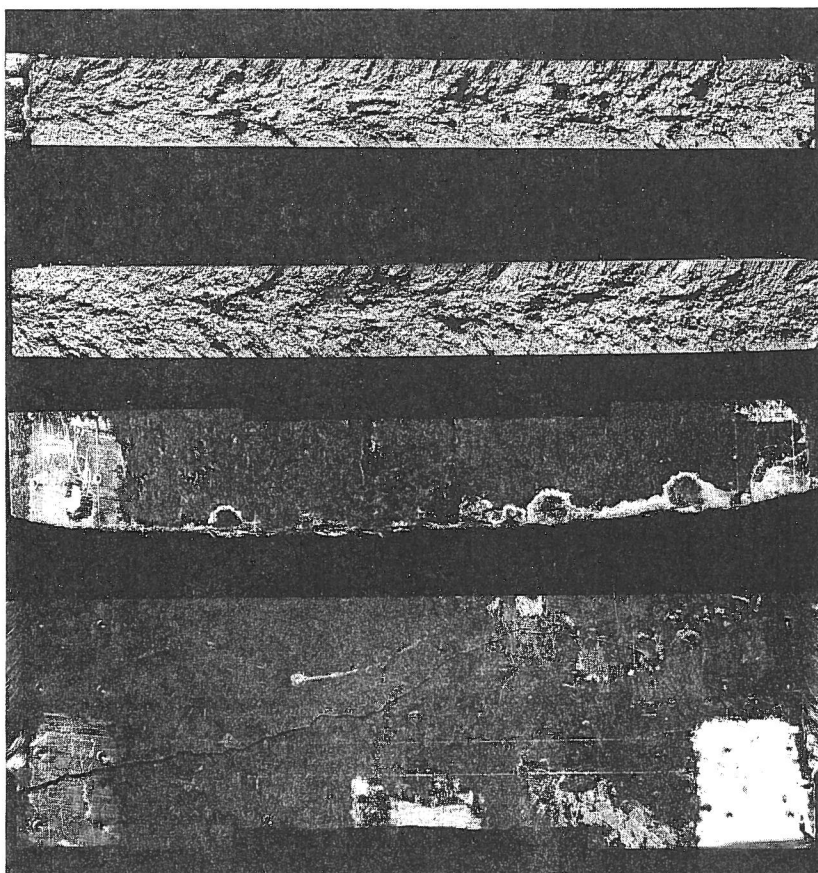
$\epsilon_{bl} = 4,5$  %


örtl. bl. bezogene Dickenänderung

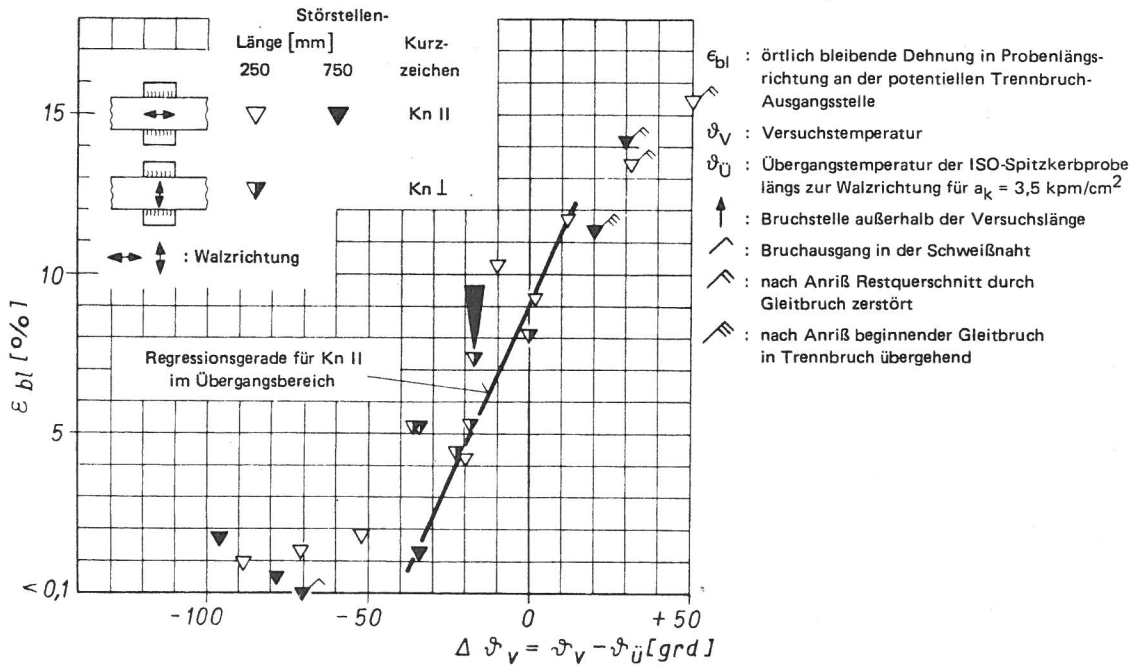
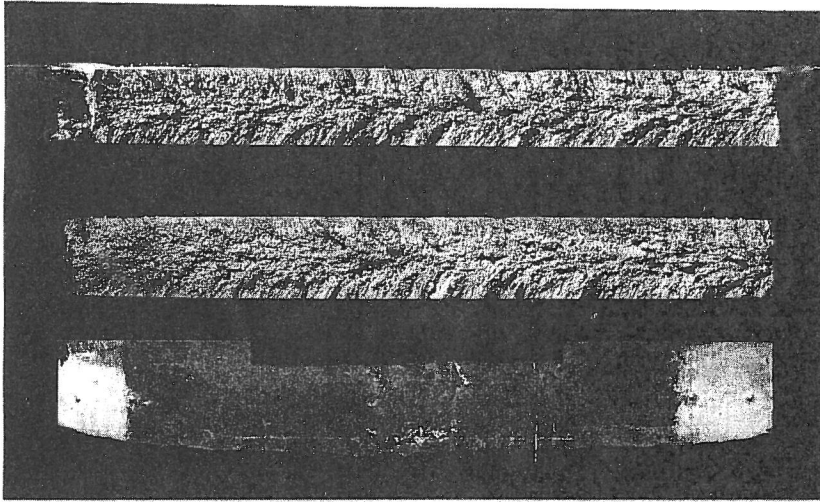
$(\Delta d/d_o)_{bl} = 5,0$  %

örtl. Bruch-Nennspannung in Probenlängsrichtung

$\sigma_{N,Br} = 33,5$  kp/mm<sup>2</sup>



Proben-Nr.	23/5.3.3
Werkstoff	R St 37 - 2 N
Walzrichtung zur Probenlängsrichtung	senkrecht
Blechdicke	$d_0 = 30 \text{ mm}$
Störstellenform (Länge in mm)	
Übergangstemperatur aus Kerbschlagbiegeversuch längs Walzrichtung	$\vartheta_{Ü} = -22 \text{ °C}$
Versuchstemperatur	$\vartheta_V = -39 \text{ °C}$
örtl. bl. Dehnung a.d. potentiellen Trennbruch-Ausgangsstelle	$\epsilon_{bl} = 7,4 \%$
örtl. bl. bezogene Dickenänderung	$(\Delta d/d_0)_{bl} = 6,3 \%$
örtl. Bruch-Nennspannung in Probenlängsrichtung	$\sigma_{N,Br} = 35,6 \text{ kp/mm}^2$



Proben-Nr. 26/5.3.4  
 Werkstoff R St 37 - 2 N  
 Walzrichtung zur Probenlängsrichtung senkrecht  
 Blechdicke  $d_o = 30$  mm

Störstellenform (Länge in mm)



Übergangstemperatur aus Kerbschlagbiegeversuch längs Walzrichtung

$\vartheta_{\ddot{u}} = -24$  °C

Versuchstemperatur

$\vartheta_v = -23,5$  °C

örtl. bl. Dehnung a.d. potentiellen Trennbruch-Ausgangsstelle

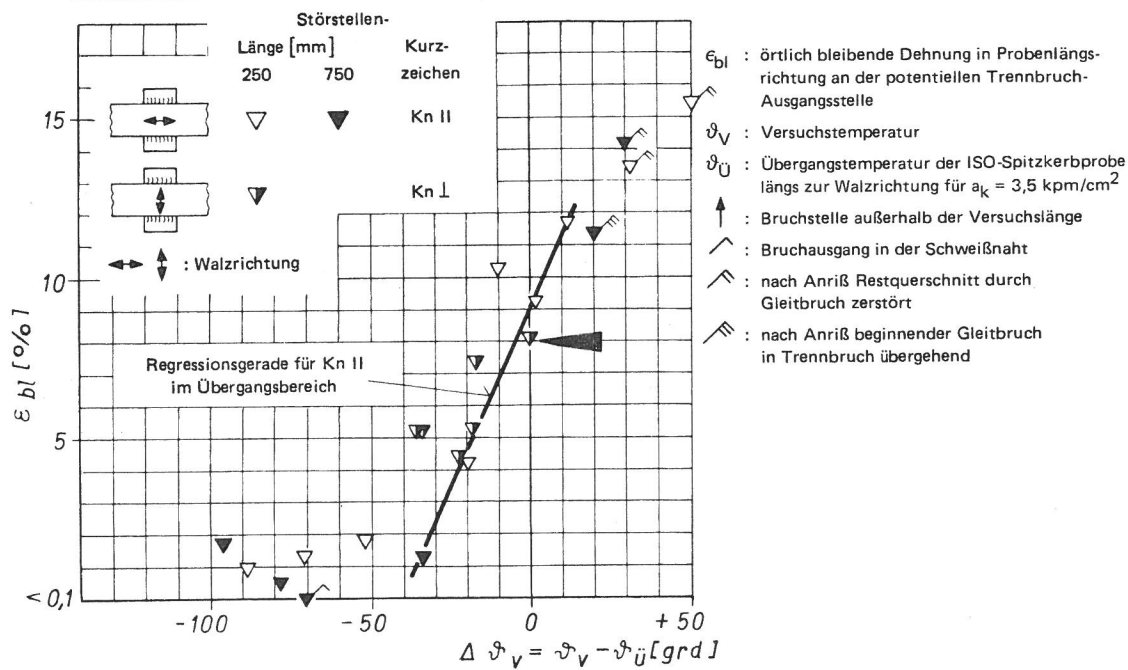
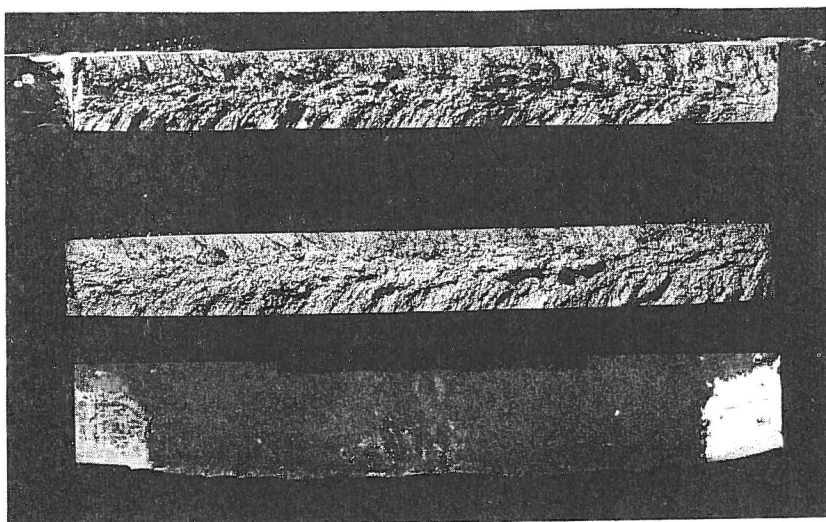
$\epsilon_{bl} = 8,1$  %


örtl. bl. bezogene Dickenänderung

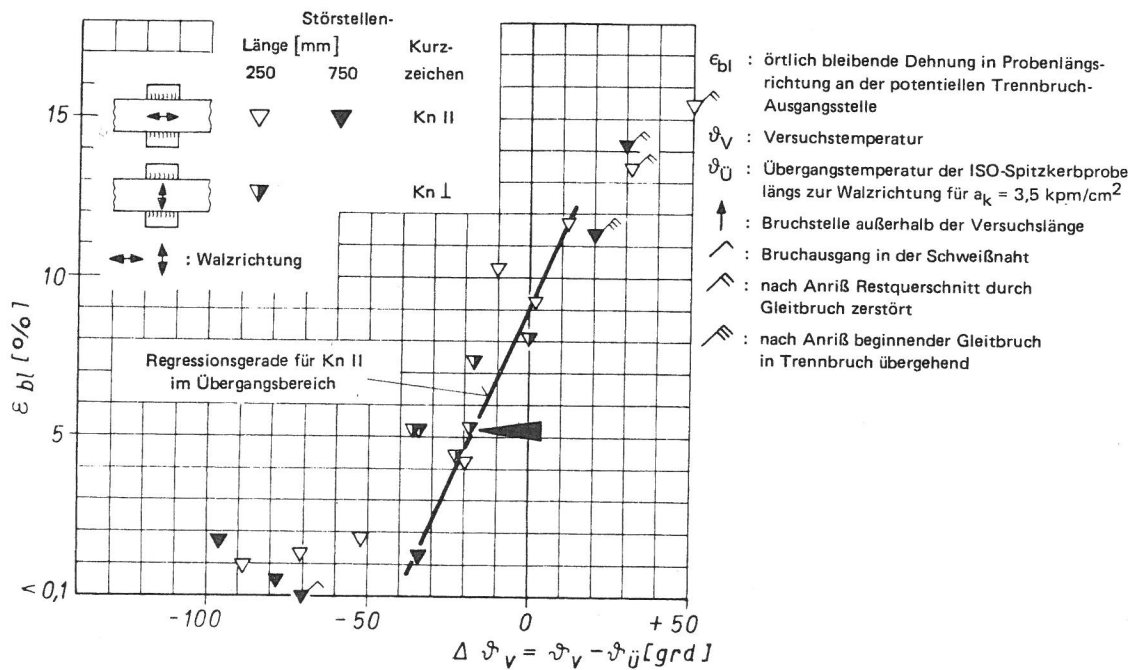
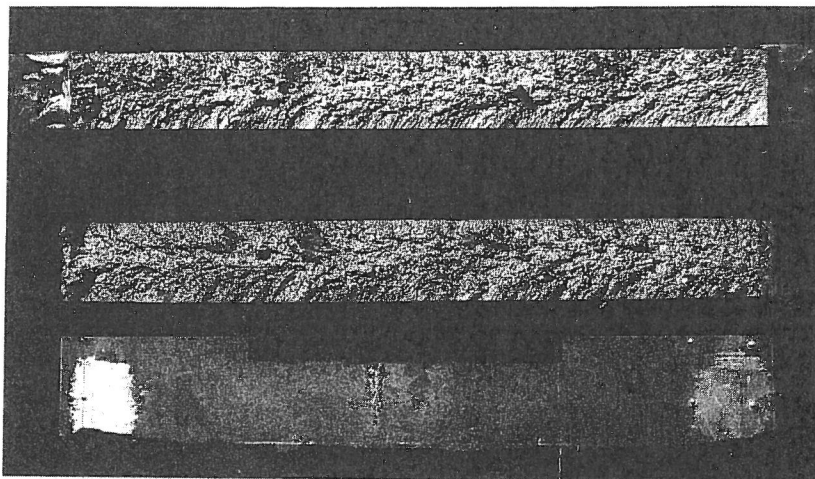
$(\Delta d/d_o)_{bl} = 7,8$  %


örtl. Bruch-Nennspannung in Probenlängsrichtung

$\sigma_{N,Br} = 36,3$  kp/mm<sup>2</sup>



Proben-Nr.	26/5.3.5
Werkstoff	R St 37 - 2 N
Walzrichtung zur Probenlängsrichtung	senkrecht
Blechedicke	$d_o = 30 \text{ mm}$
Störstellenform (Länge in mm)	
Übergangstemperatur aus Kerbschlagbiegeversuch längs Walzrichtung	$\vartheta_{\ddot{u}} = -29 \text{ }^\circ\text{C}$
Versuchstemperatur	$\vartheta_v = -46,5 \text{ }^\circ\text{C}$
örtl. bl. Dehnung a.d. potentiellen Trennbruch-Ausgangsstelle	$\epsilon_{bl} = 5,3 \%$
örtl. bl. bezogene Dickenänderung	$(\Delta d/d_o)_{bl} = 4,9 \%$
örtl. Bruch-Nennspannung in Probenlängsrichtung	$\sigma_{N,Br} = 33,7 \text{ kp/mm}^2$



Proben-Nr.	26/5.3.6
Werkstoff	R St 37 - 2 N
Walzrichtung zur Probenlängsrichtung	senkrecht
Blechdicke	$d_o = 30 \text{ mm}$
Störstellenform (Länge in mm)	
Übergangstemperatur aus Kerbschlagbiegeversuch längs Walzrichtung	$\vartheta_{\ddot{u}} = -29 \text{ }^\circ\text{C}$
Versuchstemperatur	$\vartheta_v = -64 \text{ }^\circ\text{C}$
örtl. bl. Dehnung a.d. potentiellen Trennbruch-Ausgangsstelle	$\epsilon_{bl} = 5,2 \text{ } \%$
örtl. bl. bezogene Dickenänderung	$(\Delta d/d_o)_{bl} = 5,4 \text{ } \%$
örtl. Bruch-Nennspannung in Probenlängsrichtung	$\sigma_{N,Br} = 36,6 \text{ kp/mm}^2$

