



KfK 4796
Oktober 1990

Verfahren zur Störgrößenkompensation bei instrumentierten Kerbschlagbiegeversuchen

**C. Wassilew, M. Rieth, B. Dafferner
Institut für Material- und Festkörperforschung
Projekt Kernfusion**

Kernforschungszentrum Karlsruhe

KERNFORSCHUNGSZENTRUM KARLSRUHE

Institut für Material- und Festkörperforschung

Projekt Kernfusion

KfK 4796

**Verfahren zur Störgrößenkompensation
bei instrumentierten Kerbschlagbiegeversuchen**

C. Wassilew
M. Rieth *
B. Dafferner

* Universität Karlsruhe (TH)

Kernforschungszentrum Karlsruhe GmbH, Karlsruhe

Als Manuskript gedruckt
Für diesen Bericht behalten wir uns alle Rechte vor

Kernforschungszentrum Karlsruhe GmbH
Postfach 3640, 7500 Karlsruhe 1

ISSN 0303-4003

Kurzfassung

Die bestehenden Auswertevorschriften für instrumentierte Kerbschlagbiegeversuche sind unzureichend. Die Bestimmung der charakteristischen Kennwerte ist zu ungenau. Es treten sogar bei sehr einfachen und scheinbar gut strukturierten Kurven erhebliche Streuungen zwischen den von verschiedenen Personen ermittelten Kenngrößen auf.

Um die damit verbundenen Unsicherheiten bei der Versuchsauswertung auf ein Minimum zu reduzieren, wurde ein Verfahren zur Störgrößenkompensation entwickelt. Das Verfahren ermöglicht eine objektive, einheitliche, dadurch reproduzierbare und wesentlich genauere Bestimmung der aus instrumentierten Kerbschlagbiegeversuchen entnehmbaren Materialkenngrößen.

Das Verfahren basiert auf Methoden der digitalen Signalverarbeitung und generiert aus der mit Schwingungen überlagerten Kraft-Weg-Kurve eine Ausgleichskurve. Der elastische Bereich der Probe kann dadurch gegenüber bisherigen Auswertemethoden exakt bestimmt werden.

Das Störgrößenkompensationsverfahren läßt sich an ein bestehendes rechnergestütztes Auswertesystem anpassen.

Perturbation Compensating Procedure for Instrumented Impact Tests

Abstract

The existing evaluation instructions for instrumented impact tests are insufficient. The determination of the material specific internal variables is therefore inaccurate. The material specific variables determined from very simple and apparently well structured curves carried out by different persons show considerable biases.

To reduce these uncertainties to a minimum, a perturbation compensating procedure has been developed. The procedure renders a objective, uniform, thereby reproducible and more accurate evaluation of the material specific internal variables supplied by instrumented impact tests.

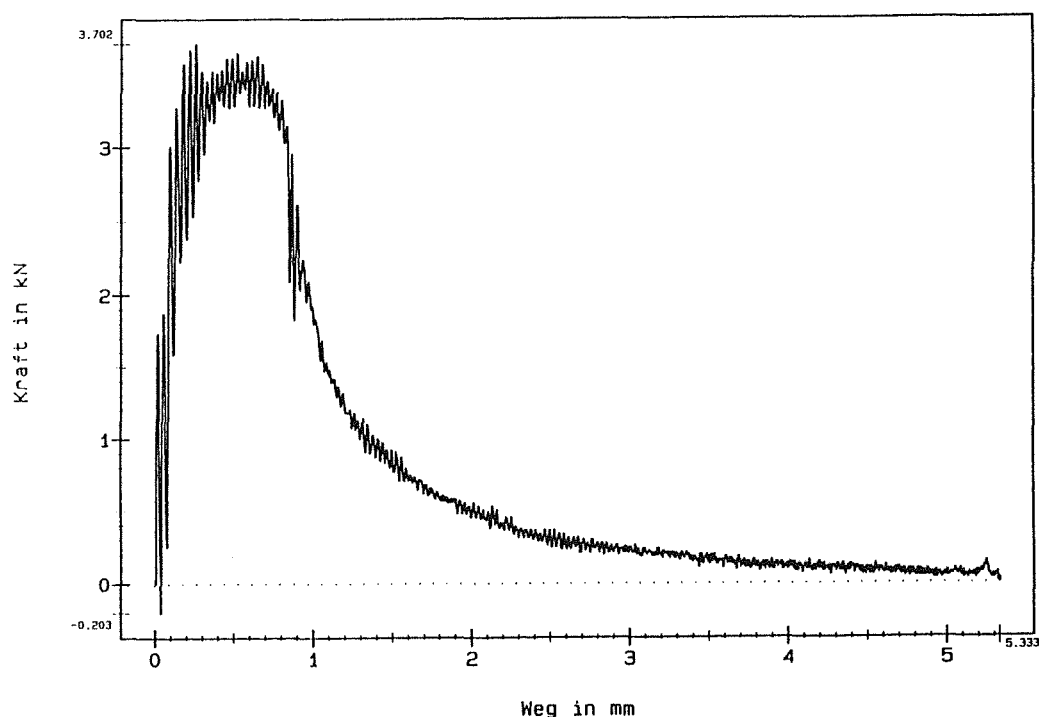
The procedure bases upon methods of digital signal processing and generates a perturbation free force-strain curve. The elastic range of the force-strain curve as well as the different plastic ranges and the crack initiation respectively the crack arrest variables obtained by implementing the procedure mentioned above are definitely more closely related to the true material characteristics compared with previous evaluation methods.

The perturbation compensating procedure can be adapted to existing computer based evaluation systems.

Einleitung

Bei instrumentierten Kerbschlagbiegeversuchen erhält man ein Kraft-Zeit-Signal, das in hohem Maße von Schwingungen überlagert ist (s. Abbildung 1). Die Ursache hierfür liegt in der Schwingungsfähigkeit der Meßapparatur und der Probe. Die instrumentierte Finne der Kerbschlagmaschine bildet zusammen mit der Probe ein nichtlineares Schwingungssystem höherer Ordnung. Dadurch wird die Probe während des Versuchs oszillierend mechanisch belastet und schließlich durch das Widerlager bewegt. Das Ergebnis ist eine Kraft-Zeit- bzw. Kraft-Weg-Kurve, wie sie von den wesentlich langsameren Zerreiversuchen her bekannt ist. Sie ist jedoch von abklingenden Schwingungen unterschiedlicher Frequenz überlagert /3/.

Abbildung 1: Typische Kraft-Weg-Kurve mit überlagerten Schwingungen



Für die Auswertung nach SEP 1315 /1/ sind vier charakteristische Kenngrößen aus der Kraft-Weg-Kurve zu ermitteln (s. Anhang A). Der Prüfer muß zuerst verschiedene Ausgleichskurven in die Kraft-Weg-Kurve einzeichnen, um dann die material-spezifischen Kenngrößen ungefähr abschätzen zu können.

Für die Bestimmung des K_{Id} -Werts nach der äquivalenten Energiemethode ASTM E 24.01 /2, 3/ müssen zwei materialspezifische Kenngrößen ermittelt werden (s. Anhang B).

Auf Grund der überlagerten Schwingungen gestaltet sich die Ermittlung dieser einzelnen Kenngrößen als sehr schwierig. Außerdem zieht jeder Prüfer die Ausgleichskurven etwas anders, so daß die auf diese Weise ermittelten Kenngrößen mit subjektiven Fehlern behaftet sind. So ergeben sich besonders für die Punkte F_{gy} und F_m je nach Interpretation der Kraft-Weg-Kurve erheblich unterschiedliche Werte. Die Auswertung nach der äquivalenten Energiemethode ist hiervon genauso betroffen.

In einem Test wurden drei Experimente von verschiedenen Prüfern nach SEP 1315 ausgewertet. Dabei traten allein bei der Bestimmung von F_{gy} so erhebliche Differenzen auf, daß von Reproduzierbarkeit und einheitlicher Auswertung keine Rede sein kann (s. Tabelle 1).

Tabelle 1: Ergebnis eines Auswertetests

| V 1 | F_{gy} | s_{gy} | F_m | s_m | F_u | s_u | F_a | s_a |
|----------------|----------|----------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| \emptyset | 3,9 | 23,9 | 1,0 | 3,9 | 0,6 | 1,7 | 4,2 | 1,0 |
| Δ_{max} | 12,6 | 56,9 | 3,7 | 14,0 | 2,4 | 4,0 | 14,6 | 1,6 |

| V 2 | F_{gy} | s_{gy} | F_m | s_m | F_u | s_u | F_a | s_a |
|----------------|----------|----------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| \emptyset | 8,8 | 21,7 | 0,6 | 4,8 | 1,0 | 1,7 | 2,9 | 0,7 |
| Δ_{max} | 29,1 | 66,6 | 1,8 | 16,7 | 3,9 | 6,0 | 9,2 | 2,4 |

| V 3 | F_{gy} | s_{gy} | F_m | s_m | F_u | s_u | F_a | s_a |
|----------------|----------|----------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| \emptyset | 18,9 | 25,8 | 0,7 | 4,4 | 0,7 | 0,9 | 4,6 | 1,6 |
| Δ_{max} | 63,0 | 80,0 | 2,5 | 11,4 | 2,6 | 3,2 | 17,2 | 6,9 |

\emptyset durchschnittliche Abweichung vom Mittelwert in %

Δ_{max} maximale Abweichung zweier Auswertungsergebnisse in %

In den entsprechenden Empfehlungen und Normen für die Auswertung von Kerbschlagbiegeversuchen wurde bis jetzt noch kein Verfahren angegeben, das eine zuverlässige Konstruktion der Ausgleichskurven ermöglicht. Im Folgenden soll deshalb ein speziell hierfür entwickeltes Verfahren vorgestellt werden, das die Bestimmung der materialspezifischen Kennwerte bei der Auswertung der Versuchsdaten sicherer, genauer und unabhängig vom Prüfer macht.

Das Schwingungsextraktionsverfahren "Störgrößenkompensation"

Der Name "Störgrößenkompensation" wurde von einem Verfahren aus der Regelungstechnik übernommen, bei dem der Einfluß von Störungen auf ein dynamisches System unterdrückt wird. Bei diesem Verfahren müssen die Störungen nur qualitativ bekannt sein, die quantitative Ausdehnung spielt dabei keine Rolle.

Man kann diesen Sachverhalt auf die Kraftkurve beim Kerbschlagbiegeversuch übertragen. Für die Auswertung wird nach SEP 1315 eine glatte Ausgleichskurve benötigt, die maximal vier Bereiche enthalten kann: den linear elastischen Bereich, den nichtlinear plastischen Bereich, den verformungsarmen Rißpropagationsbereich und eventuell einen Restbereich. Die reelle Kraft-Weg-Kurve ist aber von Schwingungen überlagert. Die Schwingungen stören die Auswertung und können deshalb als Störgrößen bezeichnet werden, da sie die Bestimmung der materialspezifischen Kenngrößen zum Teil erheblich beeinträchtigen können. Sie sind im Sinne der Meßtechnik keine Störungen, da sie ja tatsächlich auf die Probe einwirken. Die qualitative Form der Störgrößen ist bekannt: schwach gedämpfte Schwingungen von unterschiedlicher Frequenz. Das Ziel der Störgrößenkompensation ist nun die Extraktion der Schwingungen von der wahren Kraft-Zeit-Kurve.

Die Trennung erfolgt bei dem hier gezeigten Verfahren im Spektralbereich. Dazu wird das Kraftsignal zunächst in mehrere stetige Bereiche unterteilt. Der erste Bereich erstreckt sich dabei vom Versuchsbeginn bis zum Kraftmaximum. Der zweite Bereich schließt sich daran an und geht bis zum Kraftabfall, falls vorhanden. Der letzte Bereich erstreckt sich bis zum Versuchsende.

Schwingungen mit hohen Amplituden treten hauptsächlich im ersten Bereich auf. In den folgenden Kurventeilen klingen die Schwingungen ab. Um den Rahmen des Berichtes nicht zu sprengen, soll im Folgenden nur der erste Bereich erörtert werden. Die Vorgehensweise ist bei den anderen Bereichen hierzu analog.

Nun erfolgt für jeden Kurventeil eine Transformation in ein (annähernd) bandbegrenztes, akusales Signal. Dies wird durch periodische Fortsetzung und entsprechende Zeitverschiebung erreicht. Anschließend erfolgt eine Fouriertransformation (s. Abbildung 2 und 3).

Abbildung 2: erster Kurvenbereich

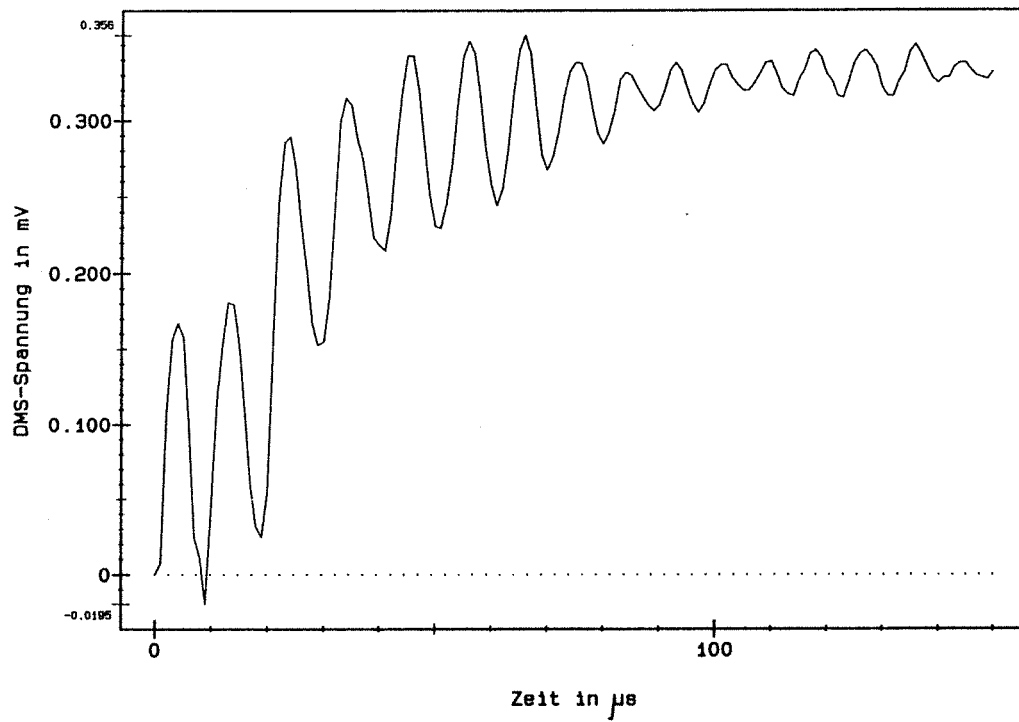
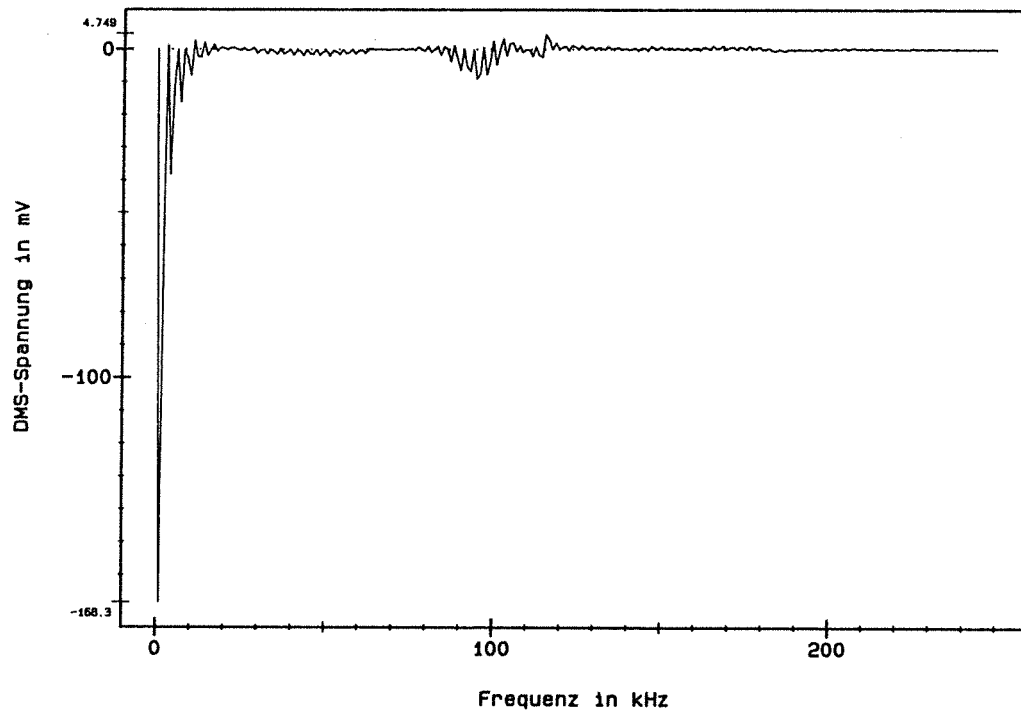


Abbildung 3: Spektralkurve nach Fouriertransformation

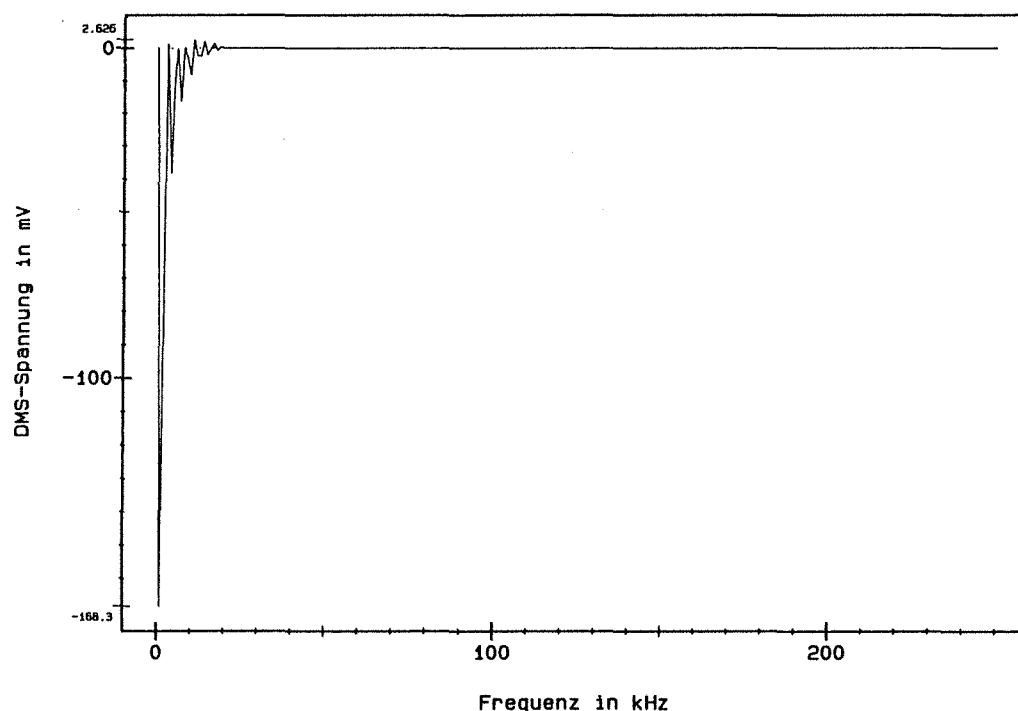


Grundsätzlich erscheinen Dauerschwingungen im Spektralbereich als Impulse über den jeweiligen Frequenzen. Bei abklingenden Schwingungen werden die zugehörigen Impulse etwas aufgefächert, sie verschwimmen /4, 5, 6/.

Die der Kraft-Weg-Kurve überlagerten Schwingungen sind nun im Spektralbereich als aufgefächerte Impulsbündel gut erkennbar: bei 30-60 kHz, bei 90-110 kHz und bei 115 kHz (s. Abbildung 3). Die gewünschte Ausgleichskurve bildet den Hauptanteil zwischen 0 und ca. 25 kHz. Der Bereich zwischen 115 kHz und der Bandgrenze setzt sich hauptsächlich aus Signal- und Quantisierungsrauschen zusammen. Deshalb kann dieser Bereich bei einem modernen Datenerfassungssystem gegenüber den anderen Bereichen vernachlässigt werden.

An dieser Stelle kann jetzt die Schwingungsextraktion vorgenommen werden. Dazu werden die Frequenzbereiche, die die Schwingungen oder Signalrauschen verursachen, zu Null gesetzt (s. Abbildung 4).

Abbildung 4: *Spektralkurve nach Störgrößenkompensation*



Abschließend erfolgt dann eine inverse Fouriertransformation mit anschließender Entfaltung. Das Resultat ist die wahre Kraft-Zeit- bzw. Kraft-Weg-Kurve (s. Abbildung 5 und 6).

Abbildung 5: erster Kurvenbereich nach Störgrößenkompensation

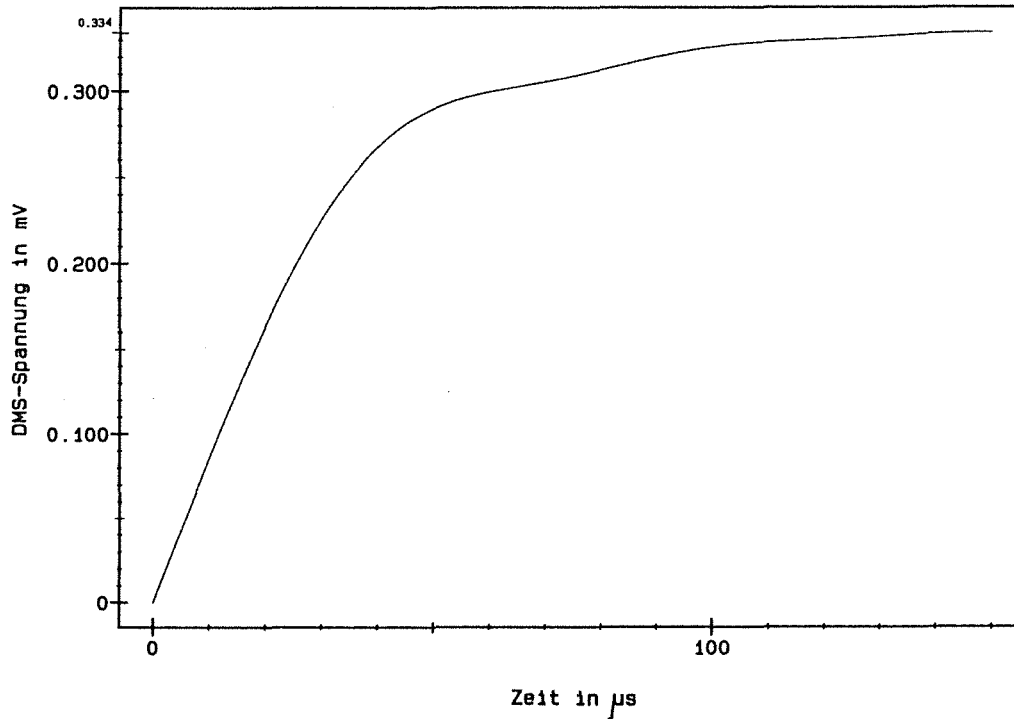
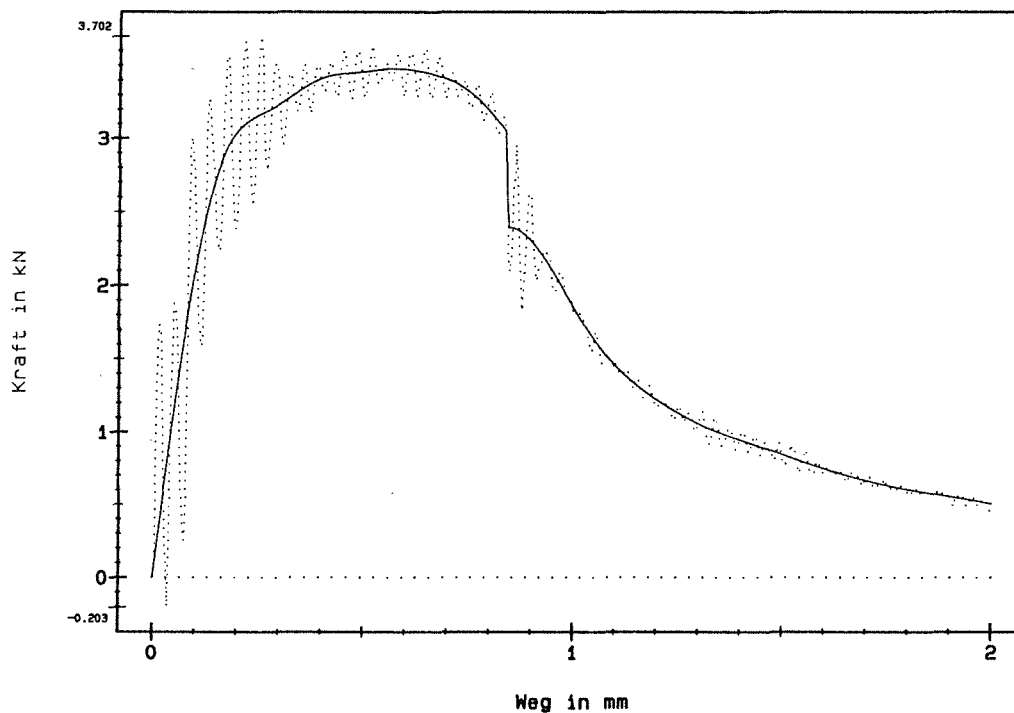


Abbildung 6: die gesamte Kraftkurve vor und nach Störgrößenkompensation



Aus Abbildung 6 ist deutlich erkennbar, daß die Auswertung unter Verwendung dieser Kurve "streuungsfreie" und somit wesentlich genauere Werte liefert. **Damit steht zunächst rein formal ein Hilfsmittel zur Verfügung, das die objektive und einheitliche Bestimmung der charakteristischen Kennwerte bei der Auswertung instrumentierter Kerbschlagbiegeversuche ermöglicht.**

Die Realisierung der Störgrößenkompensation ist prinzipiell auf jedem Rechner möglich. Das Verfahren kann entweder als Zusatzprogramm implementiert oder in eine bestehende Auswertesoftware übernommen werden /7/.

Für die Fouriertransformationen bietet sich der FFT-Algorithmus (Fast Fourier Transform) an. Der hierbei auftretende Leckeffekt kann durch die Verwendung geeigneter Fensterfunktionen gedämpft werden /4/.

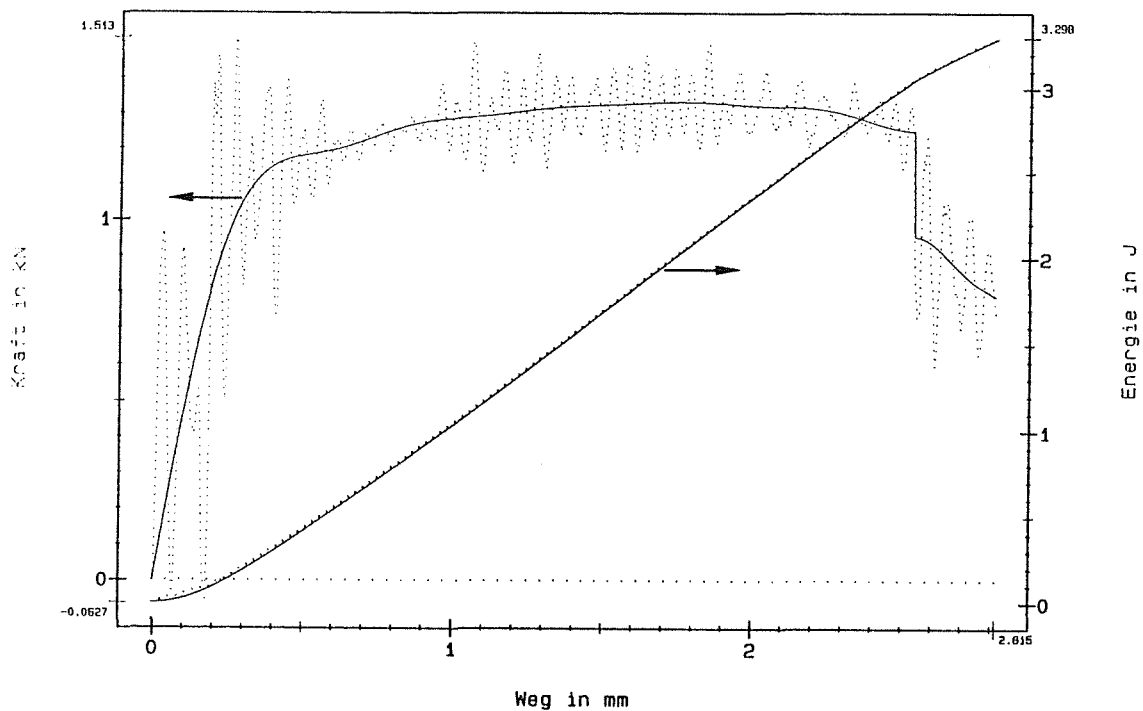
Das Störgrößenkompensationsverfahren beruht auf der Trennung des Schwingungsanteils vom wahren Kurvenanteil im Spektralbereich. Daher muß die obere Grenzfrequenz des wahren Kurvenanteils kleiner sein als die niedrigste Frequenz der überlagerten Schwingungen. Diese Bedingung ist bei den Kurvenformen C bis F nach SEP 1315 (d.h. kein Bruch im linearen Bereich) erfüllt. Bei den Kurvenformen A und B (Bruch im linearen Bereich) tritt eine Überlappung des Ausgleichskurven- und Schwingungsanteils durch das sogenannte "Gibbs'sche Phänomen" auf. Man könnte diesen Effekt eventuell durch nichtlineare Transformationen im Zeitbereich vermeiden. Aufgrund der Sonderbehandlung bei der Auswertung dieser beiden Fälle kann auf diesen zusätzlichen Aufwand jedoch verzichtet werden.

Die Störgrößenkompensation wurde in einer bestehenden instrumentierten Kerbschlagbiegeversuchsanlage integriert /7, 8/. Eine kleine Auswahl von Experimenten ist im Anhang C und D dargestellt.

Die physikalische Interpretation der Störgrößenkompensation

Bei einem Vergleich zwischen der Schlagenergie des ursprünglichen Versuchs und der Schlagenergie des kompensierten Versuchs stellt man fest, daß die beiden Kurven nur im linearen Bereich voneinander abweichen. Die Abweichungen sind sehr gering (s. Abbildung 7).

Abbildung 7: Vergleich der Schlagenergie



Das bedeutet, daß dem Kraftsignal durch die Störgrößenkompensation zu keinem Zeitpunkt Energie entzogen wurde. Die Flächen unter den beiden Kraft-Weg-Kurven stimmen an jedem Punkt und auch abschnittsweise überein, d.h. es wurde nur ein Bereich aus dem Spektrum entfernt, der dem System keine Energie zuführt oder entzieht.

Wären durch die Kompensation Anteile der Ausgleichskurve betroffen gewesen, so würde sich diese Übereinstimmung zwischen den beiden Energieverläufen nicht einstellen.

Diese Eigenschaft kann zur Überprüfung des Wahrheitsgehalts der für die Bestimmung der materialspezifischen Kenngrößen erstellten extrahierten Kurve herangezogen werden. Die erzielte Übereinstimmung in den Energieverläufen ist das Gütezeichen des Störgrößenkompensationsverfahrens.

Bei näherer Betrachtungsweise verliert das Verfahren der Störgrößenkompensation seinen formalen Charakter und gewinnt dafür an physikalischer Anschaulichkeit.

Eine besondere Bedeutung erlangt das Störgrößenkompensationsverfahren bei der Bestimmung der Kenngrößen F_{gy} und s_{gy} .

Diese Kenngrößen kennzeichnen den Übergang vom linear-elastischen zum nichtlinear-plastischen Bereich. Mit den bisherigen Methoden ist es nicht möglich diesen Übergang objektiv und genau zu bestimmen (s. Tabelle 1). Dies gestaltet sich durch die Anwendung der Störgrößenkompensation wesentlich einfacher und sicherer. Die Hook'sche Gerade und der Übergang zum nichtlinear-plastischen Bereich kann somit exakter und vorallem reproduzierbar bestimmt werden. Die Begründung dafür ist einleuchtend:

Im elastischen Bereich stellt die Einheit "Probe-Hammerfinne" ein lineares, zeitinvariantes System dar. Die Probe wird oszillierend belastet, es entsteht jedoch noch keine bleibende Verformung. Das Kraftsignal kann daher ohne Einschränkungen in zwei Komponenten - einem linearer Anteil und einem Schwingungsanteil - zerlegt werden. Die Zerlegung gestattet es den jeweiligen Einfluß auf die Probe getrennt zu betrachten. Da im elastischen Bereich der Schwingungsanteil keinen Einfluß auf das Verhalten der Probe nimmt, kann er eliminiert werden. Übrig bleibt dann nur noch der exakte proportionale Kraft-Weg-Anteil. Dieser Anteil charakterisiert den linear-elastischen, den Hook'schen Bereich.

Das Störgrößenkompensationsverfahren ist also nicht nur ein reiner Formalismus zur Generierung von Ausgleichkurven, sondern basiert auf mathematisch-physikalischen Überlegungen.

Bewertung des Störgrößenkompensationsverfahrens

Das vorgestellte Verfahren gestattet eine objektive und genauere Ermittlung der charakteristischen Kenngrößen eines instrumentierten Kerbschlagbiegeversuchs. Aus dem in Tabelle 2 dargestellten Vergleich zwischen den von verschiedenen Personen an sehr einfachen und gut strukturierten Primärversuchskurven durchgeführten Testauswertungen mit den störgrößenkompensierten, wahren Kurven geht hervor, daß die systematischen Abweichungen zum Teil erheblich sein können.

Tabelle 2: Vergleich der Auswertungen mit und ohne Störgrößenkompensation

| | F_{gy} | s_{gy} | F_m | s_m | F_u | s_u | F_a | s_a |
|-----|----------|----------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| V 1 | 47,1 | 10,0 | -0,7 | -14,5 | -0,8 | -0,8 | 6,7 | 0,8 |
| V 2 | 24,3 | 20,0 | -1,1 | -1,8 | 1,6 | 0,0 | 3,3 | 0,0 |
| V 3 | 44,6 | 50,0 | -0,8 | 4,9 | 0,0 | 0,0 | 12,9 | 0,0 |

Abweichungen der Mittelwerte $\bar{\sigma}$ aus Tabelle 1 von der Computerauswertung mit Störgrößenkompensation

Am größten sind die Abweichungen bei der Bestimmung von F_{gy} und s_{gy} . Das ist zu erwarten, da bei diesen Kenngrößen die Streuungen, die sich aus der herkömmlichen, in SEP 1315 vorgeschlagenen Auswertemethode ergaben, auch am größten waren (s. Tabelle 1). Das bedeutet, daß die Interpretation des elastischen Bereichs nach den empfohlenen Richtlinien nicht nur einen subjektiven Fehler enthält, sondern viel mehr noch mit einem erheblichen systematischen Fehler behaftet ist.

Die Vorteile der Störgrößenkompensation liegen auf der Hand. Das Verfahren gestattet eine objektive und wesentlich genauere Bestimmung der charakteristischen Kenngrößen sowie deren Reproduzierbarkeit.

Das Verfahren ermöglicht außerdem noch übersichtliche Vergleiche zwischen verschiedenen Versuchen für Parameterstudien (s. Anhang D).

Eine hier nicht näher behandelte Eigenschaft besteht in der Unterdrückung eventueller Störeinstreuungen bei der Meßwerterfassung.

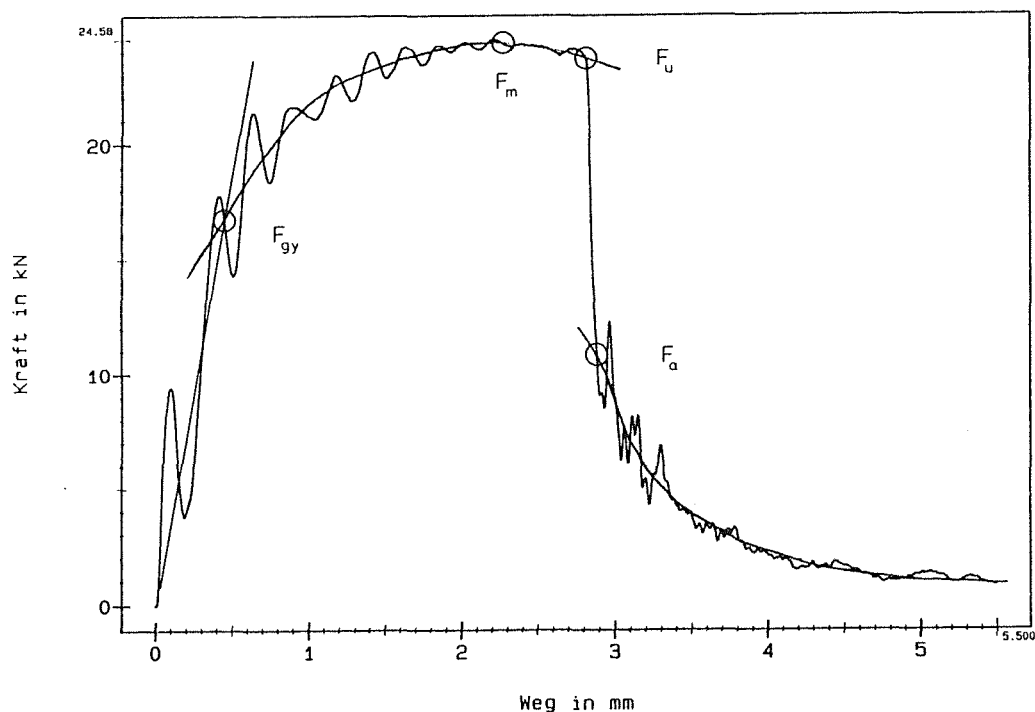
Das Verfahren kann in jedem bestehenden rechnergestützten Auswertesystem implementiert werden. Der einzige Nachteil liegt in dem relativ hohen Softwareaufwand, welcher für die angestrebte bedienerfreundliche und sichere Realisierung der Analysen erforderlich ist.

Anmerkung

Das Verfahren zur Störgrößenkompensation bei instrumentierten Kerbschlagbiegeversuchen wurde von cand. el. Michael Rieth, Universität Karlsruhe (TH), entwickelt. Es wurde mit der 15 J - Kerbschlagversuchsanlage des IMF getestet.

Anhang A

Ermittlung der charakteristischen Werte der Kraft und des Weges beim Kerbschlagbiegeversuch nach SEP 1315



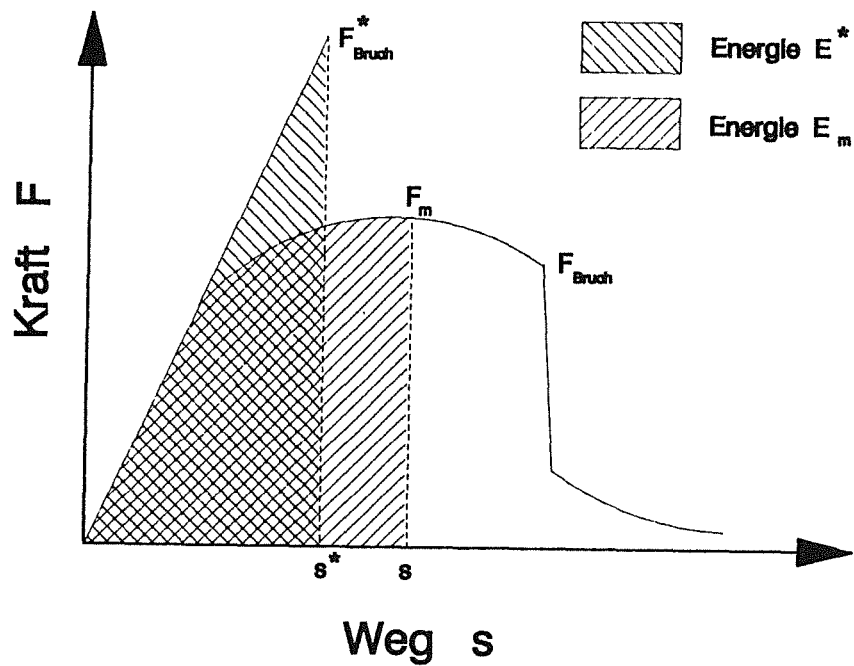
Zunächst müssen die Ausgleichskurven gezogen werden. Eine Gerade durch den Steilanstieg zur Charakterisierung des linearen Bereichs. Eine Ausgleichskurve durch den Bereich der plastischen Verformung. Und eine Ausgleichskurve durch den Teil, der sich eventuell an den Steilabfall anschließt.

Danach sind die folgende Kräfte mit dem dazugehörigen Wegen zu ermitteln:

1. Die Kraft F_{gy} ergibt sich aus dem Schnittpunkt der Ausgleichskurven vom Steilanstieg und vom Bereich der plastischen Verformung.
2. Die Kraft F_m ist das Kraftmaximum der Ausgleichskurve vom Bereich der plastischen Verformung.
3. Die Kraft F_u wird ermittelt als Kraft im Schnittpunkt der Ausgleichskurve und des Steilabfalls.
4. Die Kraft F_a ergibt sich aus dem Schnittpunkt des Steilabfalls und der Ausgleichskurve des sich anschließenden Teils.

Anhang B

Ermittlung der charakteristischen Werte der Kraft und des Weges nach der äquivalenten Energiemethode

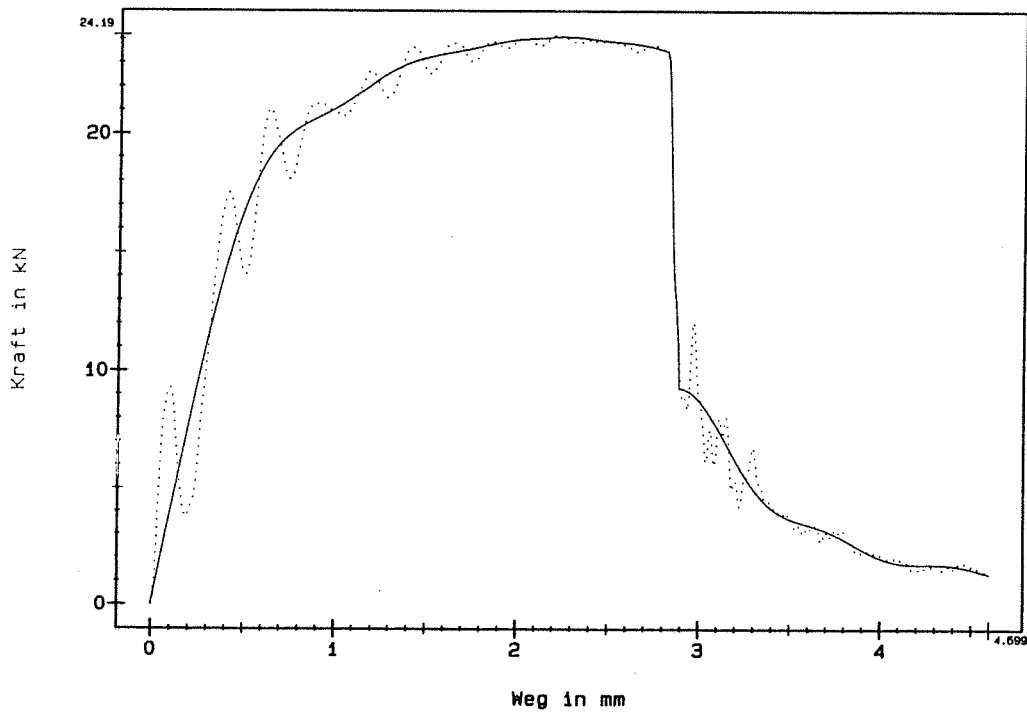
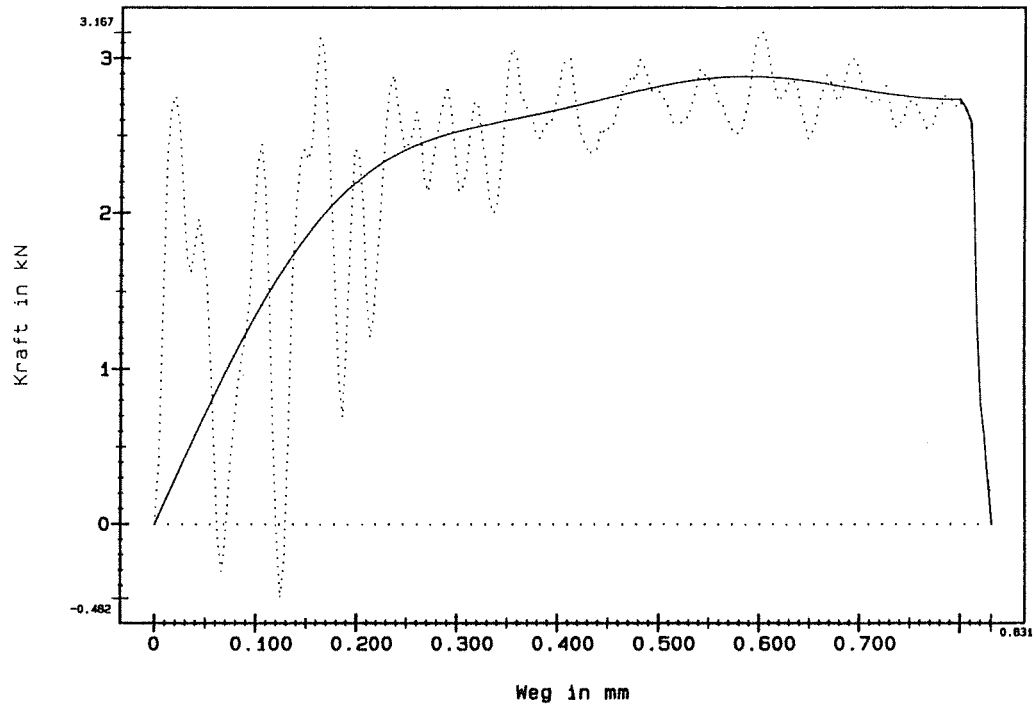


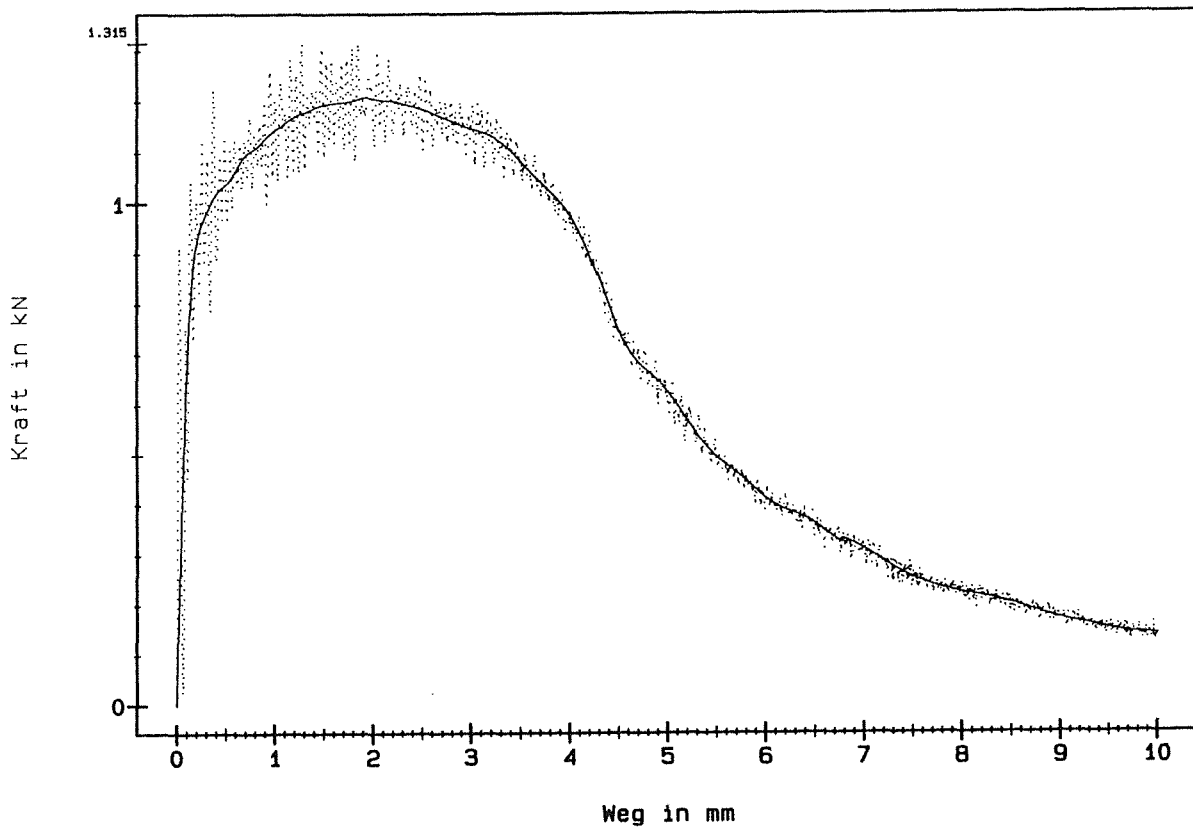
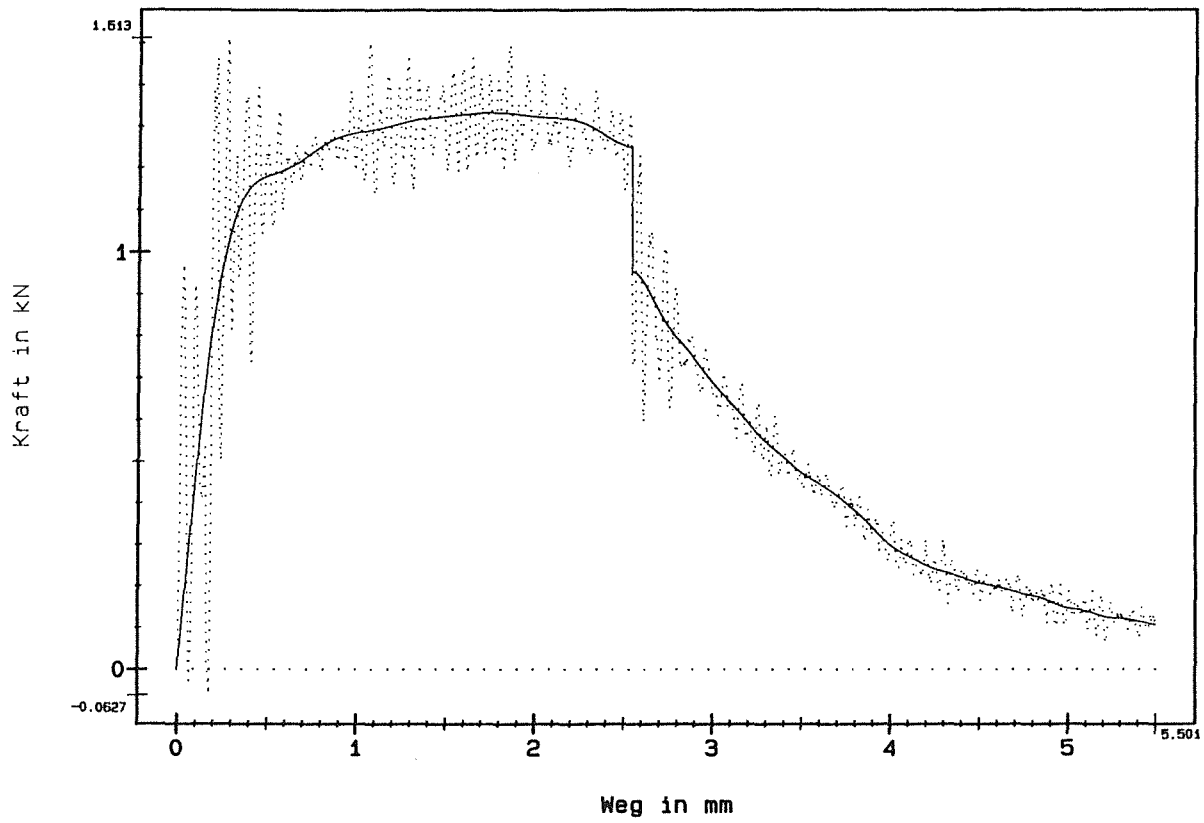
Es wird die Fläche unter der Kraftkurve bis zum Punkt F_m berechnet. Diese wird als Energie E_m bezeichnet. Nun wird der lineare Kraftanstieg bis zu dem Punkt F_{Bruch}^* verlängert, bis die Fläche darunter (Energie E^*) mit der Fläche E_m übereinstimmt. Als Ergebnis erhält man den äquivalenten Bruchwert F_{Bruch}^*, s^* .

Für die Auswertung der mit Schwingungen überlagerten Kraftkurve bedeutet das die Ermittlung des linearen Anstiegs und des Kraftmaximums der Ausgleichskurve.

Anhang C

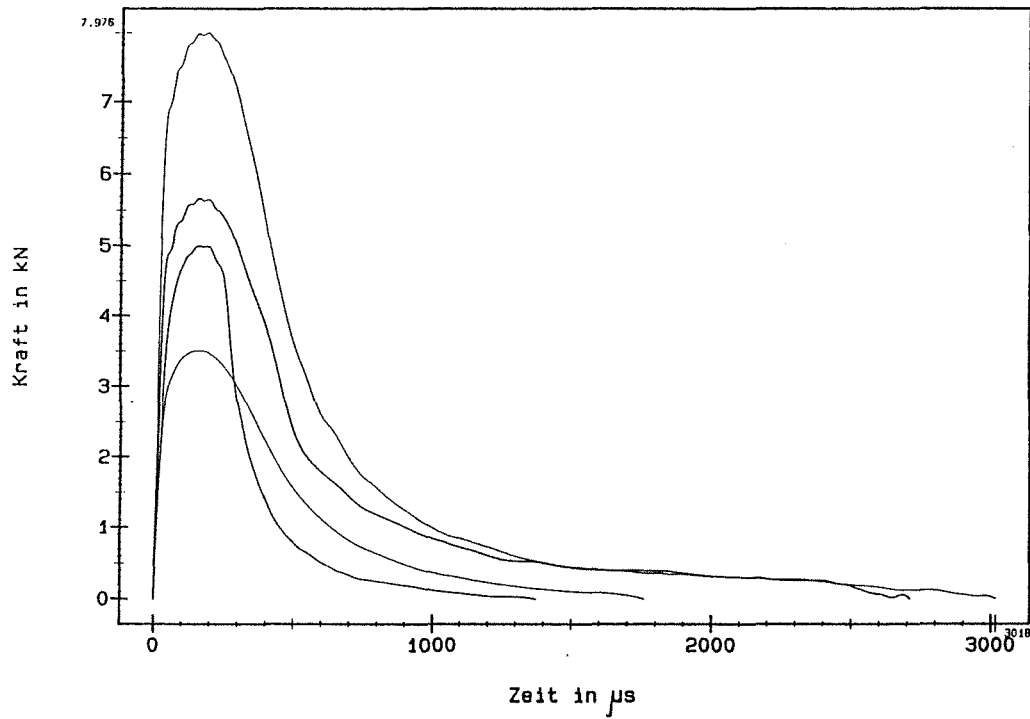
Beispiele für die Störgrößenkompensation anhand einiger Versuche





Anhang D

Beispiel für die übersichtliche Gegenüberstellung mehrerer Kurven nach der Störgrößenkompensation



Literatur

/1/ SEP 1315, STAHL-EISEN-Prüfblätter des Vereins Deutscher Eisenhüttenleute, "Kerbschlagbiegeversuch mit Ermittlung von Kraft und Weg, Empfehlungen zur Durchführung und Auswertung", Verlag Stahleisen mbH, Düsseldorf

/2/ ASTM E 24.01, "Practice for determining lower bounds on plain strain fracture toughness of steels using equivalent energy methodology", The American Society for Testing Materials, Philadelphia

/3/ J.F. Kalthoff, A.P. Reisch, "Instrumentierter Kerbschlagbiegeversuch zur Ermittlung bruchmechanischer Kennwerte", Deutscher Verband für Materialprüfung e.V., Berlin

/4/ K.D. Kammeyer, K. Kroschel, "Digitale Signalverarbeitung", B.G. Teubner, Stuttgart

/5/ O. Föllinger, "Laplace- und Fourier-Transformationen", AEG-Telefunken, Frankfurt

/6/ H. Wolf, "Nachrichtenübertragung", Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg

/7/ M. Rieth, "KSV-PLOT, ein Softwarepaket zur rechnergestützten Auswertung von Kerbschlagbiegeversuchen", M. Rieth Hard- und Software, Karlsruhe

/8/ M. Rieth, "KSV-MWA, ein Softwarepaket zur rechnergestützten Erfassung von Kerbschlagbiegeversuchsdaten", M. Rieth Hard- und Software, Karlsruhe