



Technical Note GKSS/WMG/97/3
interner Bericht

Programm zur Berechnung von Weibullspannungen und zur Anpassung der Weibullparameter

J. Schicker, W. Brocks, D. Steglich

März 1997
2. überarbeitete Auflage Juli 2001

Institut für Werkstofforschung
GKSS-Forschungszentrum Geesthacht

Inhaltsverzeichnis

1	EINLEITUNG	3
1.1	Das BEREMIN-Modell für Spaltbruch	3
1.2	Ermittlung der Weibull-Parameter	5
2	PROGRAMMBESCHREIBUNG	7
2.1	Überblick	7
2.2	Installation des Programms	12
2.2.1	benötigte Quelldateien	12
2.2.2	Compilieren und Binden mit ABAQUS	13
2.3	Start des Programms	14
2.4	Zusammenfassung der vollständigen Aufrufsyntax	15
2.5	Berechnungsvorschriften	16
2.5.1	Importdaten aus ABAQUS	16
2.5.2	Berechnung der Volumina	17
2.5.3	Berechnung der WEIBULL-Spannungen, Normierung	18
2.5.4	Anpassung der Weibull-Parameter	20
3	EINGABEN	21
3.1	Allgemeines	21
3.2	Eingabedatei	22
3.3	Primäridentifizier	22
3.3.1	*ANPASSUNG	24
3.3.2	*BEREICH	25
3.3.3	*DICKE	26
3.3.4	*FILFILE	27
3.3.5	*KOORDINATEN	29
3.3.6	*MITTELWERT	30
3.3.7	*SONSTIGEWEIFULLBERECHNUNG	34
3.3.8	*SYMMETRIE	36
3.3.9	*WEIBULL	37
3.3.10	*ZUORDNUNG	38
4	ANGABEN FÜR ABAQUS	40
5	BEISPIEL: GEKERBTE RUNDZUGPROBE	43
5.1	Berechnung der Weibullspannungen zu allen Lastschritten	46
5.2	Anpassung des Parameters m an experimentell ermittelte Bruchkräfte	47
5.3	Anpassung des Parameters m an experimentell ermittelte Brucheinschnürungen	48
6	LITERATUR	52

1 EINLEITUNG

Die Modelle der klassischen Bruchmechanik gründen sich auf zwei alternative Betrachtungsweisen, die Spannungsintensität am Riß und den Energiefluß zur Rißspitze. Für linear elastisches oder hyperelastisches Material führen jedoch beide Ansätze auf äquivalente, d.h. ineinander überführbare bruchmechanische Beanspruchungsgrößen, nämlich Spannungsintensitätsfaktor K , Energiefreisetzungsrate G oder J -Integral, und auf diesen basierende Versagenskriterien. Eine Unterscheidung zwischen "lokalen" und "globalen" Kriterien ist vor diesem Hintergrund überflüssig. Schwierigkeiten bei der Anwendung von Versagenskriterien treten jedoch auf, wenn Bruchereignisse von der Probengröße und -geometrie abhängen, was sowohl auf Auswirkungen der statistischen Verteilung bruchauslsender Fehlstellen als auch unterschiedlicher Verformungsbehinderung ("constraint") zurückzuführen ist. Diese Probleme haben das Interesse an Modellen mikromechanischer Prozesse der Werkstoffschädigung in jüngerer Zeit steigen lassen.

Während es für die Berechnung der Beanspruchungsparameter der klassischen Bruchmechanik in einschlägigen Handbüchern eine Vielzahl analytischer exakter oder näherungsweise Lösungen für gängige Proben- und einfache Bauteilgeometrien gibt und die Bestimmung der entsprechenden Materialkenngrößen in Normen festgelegt ist, setzt die Anwendung lokaler Versagenskriterien für elastisch-plastisches Material numerische Analysen mit der Finite-Elemente-Methode voraus. Der vorliegende Bericht beschreibt ein Programm zur Berechnung von Beanspruchungsgrößen und Anpassung von Materialparametern für Spaltbruch ferritischer Sthle. Das Programm¹ arbeitet als Postprocessor für das FE-Programm ABAQUS/Standard und erfat ebene, axialsymmetrische und räumliche Festkrperelemente mit linearen und quadratischen Verschiebungsansätzen.

1.1 Das BEREMIN-Modell für Spaltbruch

Aufbauend auf einer statistischen Theorie der Festigkeit spröder Werkstoffe von WEIBULL [1, 2] hat die französische Autorengruppe BEREMIN [3, 4] ein Spaltbruchmodell für Bauteile aus ferritischen Sthlen entwickelt, das auch unter dem Namen "local approach" bekannt geworden ist. Es ist abgeleitet aus Beobachtungen an spröde brechenden Werkstoffen, bei denen Mikrorisse versagensauslsend sind. Mit ihm werden Aussagen über die Spaltbruchwahrscheinlich-

¹ programmiert von Johannes Schicker, Weimarische Straße 20, 10715 Berlin

keit einer Struktur unter einem vorgegebenen Belastungszustand gemacht. Das Modell geht von folgenden drei grundlegenden Annahmen aus:

- Mikrorißverteilung

In einem repräsentativen Volumenelement (RVE) vom Volumen V_0 wird die Wahrscheinlichkeit, einen Mikroriß der Länge l zu finden durch die Dichtefunktion

$$P(l) = \frac{\alpha}{l^\beta} \quad , \quad \alpha > 0, \beta > 1 \quad (1)$$

beschrieben. Mikrorisse in ferritischen Stählen entstehen während der Belastung des Werkstoffs durch verschiedene Mechanismen des Versetzungsaufstaus an Korngrenzen, sich schneidenden Gitterebenen, eingeschlossenen Teilchen usw., setzen also plastische Deformationen des Materials voraus [5]. Es werden deshalb nur Volumenelemente aus plastizierten Bereichen der Struktur in die spätere Berechnung der Versagenswahrscheinlichkeit einbezogen.

- Spaltbruchkriterium

Es gelte das GRIFFITHSche Kriterium [6] für den Zusammenhang zwischen der Mikrorißlänge l und der für das Ausbreiten des Mikrorisses kritischen Normalspannung σ_{lc} bzw. der anliegenden Normalspannung σ_c und der kritischen Mikrorißlänge l_c

$$\sigma_{lc} = \sqrt{\frac{C}{l}} \quad \text{bzw.} \quad l_c = \frac{C}{\sigma_c^2} \quad (2)$$

wobei C eine Werkstoffkonstante ist. Für ein Volumenelement (i), das durch die maximale Hauptspannung $\sigma_i^{(i)}$ belastet ist, beträgt die Versagenswahrscheinlichkeit damit

$$P_f^{(i)} = \int_{l_c^{(i)}}^{\infty} P(l) dl = \frac{V_i}{V_0} \left(\frac{\sigma_i^{(i)}}{\sigma_u} \right)^m \quad (3)$$

wobei

$$m = 2\beta - 2 \quad \text{und} \quad \sigma_u = \sqrt{C} \sqrt[m]{\frac{m}{2\alpha}} \quad (4)$$

- Annahme des schwächsten Gliedes ("weakest link")

Versagen der ganzen Struktur tritt ein, wenn einer der Mikrorisse, der "gefährdetste", instabil wird. Die akkumulierte Versagenswahrscheinlichkeit folgt der (zweiparametrischen) WEIBULL-Verteilung

$$P_f(\sigma_w) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{\sigma_w}{\sigma_u}\right)^m\right] \quad (5)$$

mit der "WEIBULL-Spannung"

$$\sigma_w = \left[\sum_{i=1}^{n_{pl}} (\sigma_I^{(i)})^m \frac{V_i}{V_0} \right]^{\frac{1}{m}} \quad (6)$$

Dabei ist n_{pl} die Anzahl aller in der bisher durchlaufenen Belastungsgeschichte plastizierten Volumenelemente.

Der Exponent m der Wahrscheinlichkeitsfunktion (5) heißt WEIBULL-Modul und ist ein Maß für die Streuung der kritischen WEIBULL-Spannungen um die Referenzspannung σ_u , bei der die Versagenswahrscheinlichkeit 63.2% beträgt. P_f ist die akkumulierte Versagenswahrscheinlichkeit bis zu einem gegebenen Beanspruchungszustand, die von der Ausfallwahrscheinlichkeit innerhalb eines Belastungsintervalls unterschieden werden muß.

1.2 Ermittlung der Weibull-Parameter

Die WEIBULL-Parameter m und σ_u werden gewöhnlich an einer Serie von Kerbzugversuchen, also einer Stichprobe aus der den Werkstoff beschreibenden Grundgesamtheit, in Verbindung mit FE-Analysen der Kerbzugversuche ermittelt [7, 8]. Die Versagensereignisse werden nach der Methode der "größten Wahrhaftigkeit" ("maximum likelihood") an eine WEIBULL-Verteilung angepaßt [9]. Die Versuche werden bei einer Temperatur durchgeführt, bei der Spaltbruch überwiegt und duktile Schädigung vernachlässigbar ist. Die FE-Analysen dienen der Ermittlung der Spannungsverteilung in der Kerbzugprobe, die für die Berechnung der WEIBULL-Spannung beim jeweiligen Versagenseintritt (Bruch) erforderlich ist. Als Beanspruchungsgröße für ein bei einer Probe eingetretenes Bruchereignis im Vergleich zur FE-Rechnung kann prinzipiell eine Kraft (Bruchkraft) oder eine Verschiebung (z.B. Brucheinschnürung) verwendet werden.

Die minimale Größe der Elemente in den FE-Rechnungen hat sich an der Größe V_0 des RVE zu orientieren. Deshalb sollten bei Verwendung eines feineren FE-Netzes die lokalen Spannungen über mehrere Elemente hinweg gemittelt werden. Einfacher ist es jedoch, in Bereichen hoher Spannungsgradienten, also z.B. an Rissen, als kleinste Elemente solche vom Volumen V_0

einzuführen [4, 10]. Kerbzugproben haben den Vorteil, daß die auftretenden Spannungsgradienten relativ gering sind und deshalb der Einfluß der Größe V_0 auf die WEIBULL-Spannungen vernachlässigbar ist.

Werden N Proben getestet und in der Reihenfolge ihres Spaltbruchversagens geordnet, kann der Probe (j) die Versagenswahrscheinlichkeit

$$P_f^{(j)} = \frac{j-0.5}{N} \quad (7)$$

zugeordnet werden [9]. Ausgehend von einem Startwert für m wird für jede Probe aus den in der FE-Rechnung ermittelten Spannungen mit Gl. (6) eine WEIBULL-Spannung $\sigma_w^{(j)}$ beim Bruch berechnet. Durch Anpassen an die Funktion (5), d.h. Bestimmung einer Näherungslösung für

$$\frac{j-0.5}{N} = 1 - \exp\left[-\left(\frac{\sigma_w^{(j)}}{\sigma_u}\right)^m\right] \quad , \quad j = 1, \dots, N \quad (8)$$

werden daraus ein neues m und ein σ_u berechnet. In einem iterativen Verfahren kommt man so zu den WEIBULL-Parametern m und σ_u für die vorliegende Stichprobe.

Die WEIBULL-Parameter für einen Werkstoff, also für die Grundgesamtheit aller aus diesem Material erzeugbaren Proben, können aus einer endlichen Stichprobe jedoch immer nur näherungsweise bestimmt werden. Das angewendete Maximum-Likelihood-Verfahren liefert im Vergleich mit anderen Verfahren Schätzwerte, die den (unbekannten) Parametern der Grundgesamtheit am nächsten kommen [9]. Die Vertrauensgrenzen um diese Schätzwerte sind umso enger, je größer der Umfang N der Stichprobe ist; sie sind tabelliert vorzufinden [11]. Das Schätzverfahren ist nur asymptotisch erwartungstreu, d.h. der Schätzwert aus einer endlichen Stichprobe weicht verfahrensbedingt vom wahren Wert ab. Diese systematische Abweichung ("bias") kann über einen ebenfalls tabellierten Bias-Faktor korrigiert werden. Zu einer vollständigen WEIBULL-Auswertung gehören demnach die Angaben

- des Referenzvolumens V_0 ,
- der Schätzwerte der WEIBULL-Parameter m und σ_u ,
- der Vertrauensbereiche bezüglich eines bestimmten Vertrauensniveaus,
- des bias-korrigierten WEIBULL-Exponenten.

2 PROGRAMMBESCHREIBUNG

Das auf den folgenden Seiten beschriebene Programm wurde konzipiert, um im Anschluß an eine FE-Rechnung einer Bruchmechanikprobe deren WEIBULL-Parameter und -Spannungen zu bestimmen. Es ist zum einen mit dem Programm möglich, eine Anpassung der WEIBULL-Parameter m und σ_u an gegebene Bruchereignisse mittels der maximum-likelihood-Methode für unterschiedliche Beanspruchungsgrößen vorzunehmen, zum zweiten können mit dem Programm WEIBULL-Spannungen für beliebige Beanspruchungszustände berechnet werden, wenn der Parameter m bekannt ist. Beide Berechnungen sind unabhängig voneinander möglich, es kann aber auch in einem einzigen Programmlauf zuerst eine Anpassung der Parameter vorgenommen werden, und sofort daran anschließend während des gleichen Programmlaufs mit dem im ersten Schritt angepaßten Wert m für andere Werte der Beanspruchung eine Berechnung der WEIBULL-Spannungen vorgenommen werden.

2.1 Überblick

Mit den in den Kapiteln 3.3.1 und 3.3.7 beschriebenen Primäridentifiern ”*ANPASSUNG“ und ”*SONSTIGEWEIFULLBERECHNUNG“ wird dem Programm mitgeteilt, ob eine Anpassung der WEIBULL-Parameter m und σ_u oder eine Berechnung der WEIBULL-Spannungen vorgenommen werden soll. Werden beide angegeben erfolgt zuerst eine Anpassung und anschließend mit dem angepaßten Wert für m eine Berechnung der WEIBULL-Spannungen.

- Anpassung der WEIBULL-Parameter und Berechnung der WEIBULL-Spannungen

Als Beanspruchungszustände für die Anpassung der WEIBULL-Parameter kommen sowohl Kraftzustände als auch Verschiebungszustände infrage. Analog können WEIBULL-Spannungen für Verschiebungszustände wie auch für Kraftzustände berechnet werden. Da die Berechnung der WEIBULL-Spannungen aber vom Wert der Beanspruchungsgröße unabhängig ist, kann diese genausogut auch für die in der vorangegangenen FE-Rechnung abgelegten Belastungsinkremente vorgenommen werden, unabhängig vom Wert einer für die Parameteranpassung relevanten Beanspruchungsgröße. Wird innerhalb eines einzigen Programmlaufs sowohl eine Parameteranpassung wie auch eine anschließende (WEIBULL-) Spannungsberechnung durchgeführt, kann nur eine Beanspruchungsgröße gewählt werden, die dann für beide Berechnungsarten als ”Zuordnungsgröße“ maßgeblich ist. Es ist aber möglich, die Berechnung der WEIBULL-Spannungen im Anschluß an eine Parameteranpassung auch für in der vorangegange-

nen FE-Rechnung abgelegte Belastungsinkremente vorzunehmen. In diesem Fall ist nach dem Primäridentifizier **”*SONSTIGEWEIFULLBERECHNUNG“** die Option **”#STEP“** zu verwenden (Kapitel 3.3.7). Soll eine Berechnung für Beanspruchungsgrößen vorgenommen werden, so ist statt dessen die Option **”#LAST“** zu verwenden. Die Werte der dazugehörigen **”Lastliste“** werden dann als Werte der gewählten Beanspruchungsgröße verstanden, für die eine Berechnung der WEIBULL-Spannungen durchgeführt werden soll, und sie müssen vom gleichen Typ sein wie die für eine eventuell vorgeschaltete Parameteranpassung gewählt. Entsprechend sind die Werte, die unter der Option **”#LISTE“** des Primäridentifiziers **”*ANPASSUNG“** angegeben werden als Werte der gewählten Beanspruchungsgröße zu verstehen, die je einem Bruchereignis zugeordnet werden.

- Zuordnung von Werten einer Beanspruchungsgröße zu Inkrementen der FE-Rechnung

Die Wahl der Beanspruchungsgröße kann dem Programm auf zwei Arten mitgeteilt werden. Zum einen gibt der Primäridentifizier **”*ZUORDNUNG“** (Kapitel 3.3.10) die Möglichkeit, bestimmten Belastungsinkrementen eine Zahl zuzuordnen, die dann den Wert der Beanspruchungsgröße zum Zeitpunkt dieses Belastungsinkrements darstellt. Es muß sich hierbei nicht um einen in der FE-Rechnung bestimmten oder bestimmbaren Wert handeln (für das Programm ist es auch unerheblich, ob der Wert eine physikalisch sinnvolle Größe darstellt), lediglich die Einhaltung von Monotonie im Sinne, daß bei zunehmender Rechenzeit eine kontinuierliche Steigerung respektive Minderung des Wertes erfolgt, ist dabei einzuhalten. Die Verwendung dieser Option ist in erster Linie dann interessant, wenn im Anschluß an eine ressourcenintensive Rechnung die Werte der Beanspruchungsgröße im Ergebnisfile von ABAQUS (**”fil-File“**) nicht abgelegt sind, aber auf anderem Wege für einzelne Belastungsinkremente noch bestimmt werden können, oder diese Werte mit den vorhandenen Optionen des WEIBULL-Programms nicht aus dem fil-File bestimmbar sind. Die andere und sicherlich auch komfortablere Möglichkeit, dem Programm eine Zuordnung von Beanspruchungsgrößen und Lastinkrementen mitzuteilen, ist diese direkt aus dem fil-File lesen zu lassen. Hierzu muß eine der beiden möglichen Folgezeilen **”#KAFT,...“** oder **”#VERSCHIEBUNG,...“** des Primäridentifiziers **”*FILFILE“** (Kapitel 3.3.4) gewählt werden. Voraussetzung ist dann aber, daß die entsprechenden Werte tatsächlich in **GEEIGNETER FORM** im fil-File abgelegt sind. Eine Angabe des Primäridentifiziers **”*ZUORDNUNG“** kann dann entfallen.

- Wahl der Beanspruchungsgröße

Im Programm sind zwei unterschiedliche Beanspruchungsarten als Zuordnungsgrößen zwischen Lastschritten bzw. Lastinkrementen der FE-Rechnung und Bruchereignissen der realen Versuchsreihen vorgesehen und können direkt aus dem fil-File bestimmt und zugeordnet werden: der Wert eines Kraftzustandes oder der Wert einer Verschiebungsgröße. Beide Beanspruchungsarten sind an Knoten des FE-Netzes angesiedelte Werte. Während aber Verschiebungs-

zustände, z.B. die Probeneinschnürung, an einem einzelnen Knoten bestimmbar sind, sind Kraftzustände im allgemeinen nicht an einem einzelnen Knoten bestimmbar, wodurch eine unterschiedliche Behandlung dieser beiden Beanspruchungsarten erforderlich ist.

Kapitel 4 gibt darüber Auskunft, wie die Werte der Beanspruchungsgrößen im fil-File abgelegt werden müssen, daß das Programm diese lesen kann². Insbesondere wenn eine Kraftkomponente als zugeordnete Beanspruchungsgröße gewählt wird ist zu beachten, daß das Programm alle Werte einer Komponente der Reaktionskräfte eines kompletten "Nodesets" aufaddiert verwendet, was die Zusammenfassung der entsprechenden Knoten unter einem "Nodeset" und Ausgabe der Reaktionskräfte dieses Nodesets für diesen Fall zwingend erfordert!

Sowohl Kraft- wie Verschiebungszustände sind an eine Raumrichtung gekoppelt. Im Programm sind nur Raumrichtungen parallel zu den globalen Achsrichtungen des FE-Netzes vorgesehen. Es ist also nur möglich eine einzelne Komponente, z.B. die x-Komponente, der jeweiligen Beanspruchungsgröße aus dem fil-File zuzuordnen. Dafür dient die Angabe von "Richtung" in der Folgezeile "#Kraft,Nodeset=...,Richtung=..." bzw. "#Verschiebung,Knoten=...,Richtung=..." des Primäridentifiers "*FILFILE".

- Vielfache der Beanspruchungsgröße und Berücksichtigung der Symmetrie

Optional ist die Angabe eines Faktors in Bezug auf diese Folgezeilen von "*FILFIL". Dieser Faktor ist dafür vorgesehen, die gelesene Beanspruchungsgröße multiplikativ zu korrigieren, beispielsweise um einer negativen Verschiebung eine (positive) Einschnürung zuzuordnen oder die Last eines ebenen Elementnetzes der Dicke 1 für eine beliebige andere Dicke zu korrigieren. Soll hingegen die Symmetrie einer Probe berücksichtigt werden, so ist zu beachten, daß mithilfe der Angabe eines Faktors zwar die Beanspruchungsgröße verändert werden kann, also beispielsweise die Reißaufweitung verdoppelt, hiermit die Vervielfältigung des Elementnetzes für die WEIBULL-Spannung aber noch keine Berücksichtigung erfährt in dem Sinn, daß dann auch die Anzahl der plastizierten Integrationspunkte, ihrer Volumina oder ihrer Hauptspannungen bereits abgehandelt wäre. Für diesen Fall müssen die vom Programm berechneten WEIBULL-Spannungen „von Hand“ um einen entsprechenden Faktor korrigiert werden. Dieser Faktor ergibt sich aus (6) und beträgt zur Korrektur einer einfachsymmetrischen Probe, von der nur eine Hälfte elementiert und berechnet wurde $2^{1/m}$, oder ganz allgemein bei einer n-fach symmetrischen Probe, von der nur der k-te Teil elementiert und berechnet wurde: $k^{1/m}$, $k=2^n$. Derselbe Korrekturfaktor ist entsprechend (22) auch für den bei der Anpassung berechneten Wert σ_u zu multiplizieren, während für die Anpassung des WEIBULL-Parameters m dieser Faktor ohne Bedeutung ist, da sich hier konstante Faktoren herauskürzen (21).

² die Fehlermeldung "die ersten beiden Zuordnungswerte sind gleich" bedeutet in vielen Fällen, daß die Werte der Beanspruchungsgröße nicht oder nicht in geeigneter Form im fil-File abgelegt wurden, so daß sie vom Programm nicht erkannt werden konnten und die Voreinstellung 0 beibehalten wurde.

Mit dem ab Version 2 des Programms neu eingefügten Primäridentifiers `”*SYMMETRIE“`, der dem Wert k gleichgesetzt wird, läßt sich dies jetzt auch vom Programm berücksichtigen.

- Interpolation zwischen Inkrementen

Da i.a. Inkrementsschritte nicht genau auf die Werte der Beanspruchungsgröße fallen, für die eine Berechnung der WEIBULL-Spannungen erfolgen soll, interpoliert das Programm Zustände zwischen abgelegten Inkrementen. Diese Interpolation verläuft linear zwischen zwei benachbarten Inkrementen, von denen ihr Zustand in Bezug auf die Beanspruchungsgröße bekannt ist und zwischen denen sich der gesuchte Zustand befindet, indem sämtliche relevanten Werte, Hauptspannungen, plastische Vergleichsdehnungen und gegebenenfalls Knotenkoordinaten (wenn mit Volumina am verschobenen Elementnetz gerechnet wird) linear in dem Verhältnis geteilt werden, in dem der gesuchte Zustand sich zwischen den benachbarten bekannten Zuständen befindet. Mit diesen Werten erfolgt dann die Berechnung. Eine Extrapolation erfolgt nicht, so daß eine Berechnung der WEIBULL-Spannungen nur für Zustände der Beanspruchungsgröße möglich ist, die sich zwischen dem Kleinst- und dem Größtwert der den abgelegten Inkrementen zugeordneten Beanspruchungszuständen befinden.

- Mittelung von Hauptspannungen innerhalb von Elementen

Die Berechnung von WEIBULL-Spannungen (6) aus einer FE-Rechnung erfolgt natürlicherweise über Integrationspunkte, da hier Spannungs- und Verzerrungswerte vorliegen und an diesen Punkten die Berechnung der Elementteilmolumina erfolgt. Soll die Berechnung stattdessen aber elementweise vorgenommen werden bietet das Programm die Möglichkeit mit über ein Element gemittelten Hauptspannungswerten zu rechnen. Die Berechnung der WEIBULL-Spannung erfolgt dann mit dem gemittelten Elementspannungswert und dem Volumen des gesamten Elements anstelle der Summe der einzelnen Integrationspunktanteile. Bei Mittelung von Hauptspannungen im Element kommt dann der Frage, wann ein Element als plastiziert gilt, besondere Bedeutung zu, wenn nicht alle Integrationspunkte den gleichen Plastizitätszustand aufweisen. Das Programm bietet hier die Möglichkeit zwischen verschiedenen Kriterien zu wählen. Ob und ggf. wie im Element zu mitteln ist, wird dem Programm mit dem Primäridentifier `”*MITTELWERT“` (Kapitel 3.3.6) mitgeteilt. Hier ist zu beachten, daß eine Mittelung der Hauptspannungswerte im Element die Defaulteinstellung des Programms ist und daß ein Element dann als plastiziert gilt, wenn mindestens ein Integrationspunkt plastiziert ist (`”*Mittelwert“`, `”#Mittel=1“`, `”#ANZGP=1“`). Soll also integrationspunktweise verfahren werden, muß dies dem Programm mittels dieses Primäridentifiers mitgeteilt werden (`”*Mittelwert“`, `”#Mittel=0“`).

- Volumenberechnung

Die Volumenterme, die bei der Berechnung der WEIBULL-Spannungen benötigt werden, werden vom Programm selbst "FEM-mäßig" mittels der Knotenkoordinaten, des Elementtyps und der lokalen GAUSS-schen Integrationspunktkoordinaten berechnet. Hierzu verwendet das Programm (interne) Tabellen, die die Konvention von ABAQUS bezgl. der Anzahl und Numerierung der Integrationspunkte und der Knoten in Abhängigkeit vom (ABAQUS-) Elementtyp berücksichtigen. Es ist dadurch gewährleistet, daß z. B. bei axialsymmetrischen Elementen der volle 2π -Volumeninhalt berücksichtigt wird, genauso wie bei krummlinigen oder 3D-Elementen das Volumen richtig berechnet wird. Eine Eingabe ist hierfür nicht erforderlich, da das Programm dies am Elementtyp, wie ihn ABAQUS übergibt, erkennt. Bei ebenen Elementen kann auf diese Weise aber nur die Elementfläche berechnet werden, wobei eine Dicke von 1 zur Volumenberechnung unterstellt wird. Soll eine andere Dicke berücksichtigt werden, kann dies dem Programm über den Primäridentifizier "**Dicke=..." (Kapitel 3.3.3) gesagt werden. Das Programm bietet darüberhinaus die Möglichkeit, die Berechnung der Volumenterme statt am unverschobenen Netz mit den aktuellen Werten der verschobenen Knoten zu berechnen. Dazu wird das Programm mit der Angabe des Primäridentifiziers "**KOORDINATEN" zusammen mit der Option "=UPDATE" (Kapitel 3.3.5) veranlaßt. Die Voraussetzung hierfür ist aber die vorangegangene Ablage der entsprechenden Knotenkoordinaten im fil-File. Welche Angaben dazu im ABAQUS-Input-File zu machen sind, ist in Kapitel 4 dargestellt.

Die Eingabe eines Wertes ungleich 1 bei "**SYMMETRIE" (Kapitel 3.3.8) wirkt sich zuerst multiplikativ bei der Berechnung des Volumens aus.

- Weitere Hinweise

Kapitel 4 gibt darüberhinaus Auskunft welche Angaben im ABAQUS-Inputfile zu machen sind, damit das Programm überhaupt eine Berechnung der WEIBULL-Spannungen nach (6) durchführen kann.

Um möglichst hohe numerische Stabilität zu erzielen arbeitet das Programm intern mit zwei Normierungsfaktoren Näheres dazu ist in Kapitel 2.5.3 dargestellt.

2.2 Installation des Programms

2.2.1 benötigte Quelldateien

Zur Installation des Programms sind folgende Dateien erforderlich:

1. C-Quelldateien (*.c):

main.c
ablform.c
bufmng.c bzw. pufmng.c³
echoles.c
einles.c
eleinfo.c
filio.c
fitm.c
formf.c
gpkoo.c
initdef.c
jacoby.c
koo1.c
lesfil.c⁴
likeli.c
mkweibull.c
sigu.c
sigw.c
speicher.c
volumen.c

2. Fortran-Quelldatei (*.f):

initfp.f

³ Die Funktionen der Datei pufmng.c benutzen andere Funktionen zu Dateioperation als die Funktionen der Datei bufmng.c, sind aber sonst gleich. Die Funktionen, die in bufmng.c benutzt werden, hatten sich auf einer DEQ-Alpha-Workstation mit UNIX als unstabil erwiesen, weshalb sie durch die Funktionen der Datei pufmng.c ersetzt wurden. Im übrigen sind die Dateien gegeneinander austauschbar

⁴ ab Version 2 (2-701) gibt es 2 Dateien lesfil_alpha.c und lesfil_noalpha.c, die sich in den Präprocessor-Anweisungen '#define initfp initfp_', ... unterscheiden

3. C-Includedateien (*.h):

Abaqus-Konvention.h
dimension.h
form.h
includes.h
types.h
weibull.h

4. makefile:

makefile⁵

2.2.2 Compilieren und Binden mit ABAQUS

Zur Anbindung an ABAQUS-STANDARD muß bekannt sein, in welchem Dateiverzeichnis sich die ABAQUS-Libraries **shr** und **interface** befinden⁶; unter UNIX heißen diese Libraries **shr.a** und **interface.a**. (Üblicherweise gibt es eine ABAQUS-Subdirectory **lib**; unter UNIX: `/.../..abaqus../lib`)

Dann kann mit einem Editor in der Datei **makefile** die Zeile:

```
ABA_LIB_DIR = <abaqus_lib_dir>/
```

ergänzt werden: für `<abaqus_lib_dir>` ist die oben beschriebene Directory mit vollem Pfadnamen einzutragen, damit die drei ABAQUS-Routinen **initpf**, **dbrnu** und **dbfile** bei der Übersetzung durch das Programm **make** eingebunden werden können. Dann ist das Programm **make** durch das Kommando **make** zu starten. Das Programm **make** übersetzt die Quelldateien, die im **makefile** beschrieben sind und bindet sie zu einem ausführbaren Programm.

Zum erfolgreichen Binden des Programms benötigt **make** verschiedene Standard-Libraries⁷, die im **makefile** vordefiniert sind. (Unter Umständen können auf einigen Maschinen andere Namen als die im **makefile** vordefinierten Defaultnamen erforderlich werden; hier sind die Manuals der Maschine zu konsultieren.)

⁵ ab Version 2 (2-701) gibt es je ein für die Alpha-Maschinen konfiguriertes und für die IBM-Maschinen konfiguriertes **makefile**: **makefile_alpha** und **makefile_noalpha**

⁶ ab Version 2 (2-701) werden außerdem die Libraries **odb_impl** und **elm** benötigt, außerdem Libraries des Verzeichnisses `<abaqus_lib_dir>/extern/`: für Alpha: **libcxxstd**, für IBM: **libc**.

⁷ dies sind gegenwärtig die **math**. Bibliotheksfunktionen aus `/usr/lib/libm` und bei den Alpha-Maschinen mit ABAQUS 5.8 zusätzlich einige C-Funktionen, die ABAQUS braucht aus `/usr/lib/libcxx`:

LIBC = -lm -lcxx

Im Fall, daß beim Binden des Programms Funktionsnamen als nicht referenzierbar gemeldet werden, hat es sich auch schon bewährt, die Reihenfolge der Objectcode-Dateien und Libraries beim Binden zu variieren.

Der Programmname, unter dem das Programm zur WEIBULL-Spannungsberechnung nach erfolgreichem Binden gestartet wird, ist im makefile definiert, und hat den gegenwärtigen Defaultnamen **sigw1**.

Gegenwärtig wurden

```
ABA_LIB_DIR=/usr/abaqus58/lib/
```

und die einzubindende FORTRAN-Standard-Library

für die IBM-Maschinen /usr/lib/libxlf90.a:

```
LIB_F= -lxlf90
```

und für die Alpha-Maschinen /usr/lib/libfor.a und /usr/lib/libUfor.a:

```
LIB_F= -lfor -lUfor
```

gesetzt.

2.3 Start des Programms

Um das Programm zur WEIBULL-Spannungsberechnung starten zu können, sind Eingabedateien notwendig (siehe dazu Kapitel 3.1).

Erforderlich ist in jedem Fall ein (binäres) ABAQUS-fil-File (*.fil) und ein (ASCII-) Eingabefile für das Programm. Die Erstellung des Eingabefiles ist in Kapitel 3.2 beschrieben.

Die zur Erstellung eines benutzbaren ABAQUS-fil-Files notwendigen Angaben im ABAQUS-Inputfile (*.inp) sind in Kapitel 4 beschrieben.

Der Name des ausführbaren Programms läßt sich im makefile bestimmen (siehe dazu Kapitel 2.2.2) und heißt gegenwärtig **sigw1**. Der Defaultname des Eingabefiles ist **weibull.inw**.

Im einfachsten Fall, wenn das Eingabefile den Defaultnamen (Def.: weibull.inw) besitzt und der Name des fil-Files im Eingabefile steht (siehe Kapitel 3.3.4), kann das Programm durch einfachen Aufruf gestartet werden:

```
$ sigw1
```

Soll das Programm als Hintergrundprozess gestartet werden und die Bildschirmausgabe in ein Log-File weibull.log umgeleitet werden, so erfolgt der einfache Aufruf durch das Kommando:

```
$ sigw1 > weibull.log 2>&1 &
```

(Der Befehlssteil `2>&1` kann weggelassen werden, wenn Fehlermeldungen des Betriebssystems weiterhin auf dem Bildschirm ausgegeben werden sollen.)

Um dem Programm eine vom Default abweichende Eingabedatei mitzuteilen ist die Option `i=<filename>` vorgesehen, wobei `<filename>` durch den Namen der zu benutzenden Eingabedatei zu ersetzen ist.

Ebenso kann dem Programm der Name des fil-Files durch die Option `f=<filfile>` übergeben werden. Hierbei ist `<filfile>` durch den Namen des fil-Files zu ersetzen, wobei `'.fil'` des Dateinamens wegzulassen ist. (Ein evtl. in `*.fil_old` o.ä. umbenanntes fil-File kann also nicht gelesen werden, da die im Programm benutzten ABAQUS-Routinen, die den Inhalt des fil-Files auslesen und übergeben zwingend einen Dateinamen mit Endung `'.fil'` vorschreiben.)

Die Reihenfolge der beiden Optionen ist nicht vorgeschrieben, genauso darf eine der beiden Optionen allein angegeben werden.

Der fil-Filename in der Kommandozeile hat auf jeden Fall Vorrang gegenüber einem ggf. im Eingabefile zugewiesenen fil-File. Diese Option kann dazu benutzt werden, eine einmal erstellte Eingabedatei auf mehrere unterschiedliche fil-Files anzuwenden.

2.4 Zusammenfassung der vollständigen Aufrufsyntax

<pre>\$ sigw1 i=inputfile [f=filfile] [>logfile] [2>&1] [&]</pre>	
<pre>[]</pre>	bezeichnet optionale Eingaben.
<pre>inputfile</pre>	ist der Name des Eingabefiles; ist <code>inputfile = weibull.inw</code> , so kann die Option entfallen
<pre>filfile</pre>	ist der Name des fil-Files und ist ohne <code>'.fil'</code> anzugeben.
<pre>>logfile</pre>	Default: Bildschirm
<pre>2>&1</pre>	lenkt die Diagnoseausgaben des Betriebssystems ins Logfile
<pre>&</pre>	erzeugt einen Hintergrundprozeß

2.5 Berechnungsvorschriften

Es kann aus vielerlei Gründen nützlich sein, wenn der Nutzer des Programms weiß, wie die Daten aus einem FE-Lauf weiterverarbeitet werden. Es soll deshalb im folgenden dargestellt werden, wie das vorliegende Programm die ABAQUS-Daten zur Berechnung der WEIBULL-Spannungen und zur Anpassung der WEIBULL-Parameter m und σ_u verwendet.

2.5.1 Importdaten aus ABAQUS

Das hier beschriebene Programm ist mit einer Einleseroutine ausgestattet, die als Standard-schnittstelle zum FE-Programm ABAQUS konstruiert wurde, um die benötigten Rohdaten direkt aus dem fil-File von ABAQUS beziehen zu können. Die Daten, die das Programm benötigt sind die Knotenkoordinaten und Elementdefinitionen des FE-Netzes, die max. Hauptspannungen an jedem Integrationspunkt, die Information über plastizierte Integrationspunkte und wahlweise die Knotenkoordinaten des verschobenen Netzes, die Verschiebungen an einzelnen Knoten und/oder die Reaktionskräfte an Sets von Knoten. Die Anweisungen an ABAQUS, damit diese im fil-File abgelegt werden, sind im Kapitel 4 beschrieben. Wie die Daten aus dem fil-File zu lesen sind, ist in den Handbüchern zum Programm ABAQUS unter dem Kapitel "FORMAT OF FILE OUTPUT" zu finden. Hier soll gezeigt werden, welche "Record Keys" zum Einlesen der WEIBULL-Rohdaten verwendet werden.

Als allgemeine Information werden die Daten der keys 1921 und 1922 (ABAQUS-Version, Anzahl der Knoten und Elemente und gelesener Header des ABAQUS-Jobs) ausgegeben. Die Knoten- und Elementdaten werden bei den Keys 1900 und 1901 gelesen.

Alle Lastschritt/-inkrement-Daten werden in einer Schleife zwischen den keys 2000 (start of record) und 2001 (end of record) gelesen: Bei key 2000 werden alle Variablen neu initialisiert, bei key 2001 werden alle gefundenen Werte für die Weiterverarbeitung zwischengespeichert, wobei eine Prüfung stattfindet, ob für alle relevanten Integrationspunkte plast. Verzerrungskomponenten und Hauptspannungen eingetragen wurden. Hier findet auch die Berechnung der Volumenterme statt.

Innerhalb dieser Schleife werden die beiden keys 1911 und 1 zur Einordnung der folgenden Werte ausgewertet.

Plastische Bereiche werden über die Größe der plastischen Verzerrungen im Integrationspunkt bestimmt. Dazu wird der letzte Wert des keys 22 (PEMAG) benutzt. Die Hauptspannungen werden unter dem key 401 gesucht; hier wird der maximale Wert verwendet. Beim key 101

wird der Wert der passenden Komponente für die Verschiebung des Knotens benutzt, der für die Zuordnung der Verschiebungsbeanspruchung aus dem fil-File genannt wird (vgl. Kapitel 3.3.4); alternativ dazu werden bei key 104 die Reaktionskräfte derjenigen Knoten aufsummiert, die dem nodeset angehören, welches zur Zuordnung der Kraftbeanspruchung aus dem fil-File genannt wird. Sollen Volumina am verschobenen Elementnetz berechnet werden, werden schließlich noch die "updated coordinates" des keys 107 gelesen.

2.5.2 Berechnung der Volumina

Die Berechnung der Volumenterme, die bei der Berechnung der WEIBULL-Spannungen benötigt werden, geschieht durch Ermittlung der Einzelvolumina im Einflußbereich jeden Integrationspunktes. Werden im Fall der Mittelung der Hauptspannungen über ein ganzes Element (vgl. Kapitel 3.3.6) Elementvolumenterme benötigt, so werden diese durch Summation der Teilvolumina berechnet:

$$V_{Ele} = \sum_{alle\ IP} V_{IP} \cdot \quad (9)$$

Zur Volumenberechnung wird die Information der Integrationsordnung und der Anzahl der Stützstellen (Knoten) eines Elements benötigt, welche für die üblichen 2-D, 3-D und rotations-symmetrischen Elemente von ABAQUS (bis 3 Knoten und bis zu 3 Integrationspunkten je Raumrichtung des normierten Elements) intern im Programm tabelliert sind. Es gilt hier die übliche Konvention der Integrationspunktkoordinaten:

$$\xi = \begin{cases} 0.0 & \text{bei 1 Intgr.Punkt} \\ \pm 0.57735... & \text{bei 2 Integr. Punkten} \\ \pm 0.77459... & \text{Randpunkt bei 3 Integr. Punkten} \\ 0.0 & \text{Mittelpunkt bei 3 Integrationspunkten} \end{cases} \quad (10)$$

mit den Gewichtungsfaktoren

$$w = \begin{cases} 2.0 & \text{bei 1 Intgr.Punkt} \\ 1.0 & \text{bei 2 Integr. Punkten} \\ 0.555... & \text{Randpunkt bei 3 Integr. Punkten} \\ 0.888... & \text{Mittelpunkt bei 3 Integrationspunkten .} \end{cases} \quad (11)$$

Die Anzahl der Integrationspunkte ist hierbei pro Richtung zu verstehen. Es gelten außerdem die üblichen Formfunktionen für jede Richtung i im normierten Koordinatensystem:

$$\varphi_i = \begin{cases} \frac{1}{2}(1 \pm \xi_i) & \text{bei 2 Stützstellen (Knoten)} \\ \pm \frac{1}{2} \xi_i (1 \pm \xi_i) & \text{Randstützstelle bei 3 Stützstellen} \\ (1 + \xi_i)(1 - \xi_i) & \text{Mittenstützstelle bei 3 Stützstellen} \end{cases} \quad (12)$$

und ihrer Kombinationen, $\Phi_i = \varphi_k \varphi_l$, $i=1, \dots, N$, wobei N die Anzahl der Elementknoten ist.

Werden die Ableitungen der Formfunktionen nach den normierten Koordinaten ξ_j für jede Stützstelle i , $\partial \Phi_i(\xi_1, \xi_2, \xi_3) / \partial \xi_j = \Phi_{i,j}$, in einer Matrix \mathbf{H} angeordnet:

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} \Phi_{i,1} \\ \Phi_{i,2} \\ \Phi_{i,3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Phi_{1,1} & \Phi_{2,1} & \dots & \Phi_{N,1} \\ \Phi_{1,2} & \Phi_{2,2} & \dots & \Phi_{N,2} \\ \Phi_{1,3} & \Phi_{2,3} & \dots & \Phi_{N,3} \end{bmatrix} \quad (13)$$

und werden die Koordinatenkomponenten der Knoten in einer Matrix \mathbf{X} angeordnet:

$$\mathbf{X} = \begin{bmatrix} x_1 & x_2 & \dots & x_N \\ y_1 & y_2 & \dots & y_N \\ z_1 & z_2 & \dots & z_N \end{bmatrix} \quad (14)$$

so ist das zu einem Integrationspunkt gehörige Volumen V_{ip} :

$$V_{ip} = |\mathbf{H}\mathbf{X}^T| \cdot w_1 w_2 w_3, \quad (15)$$

Dabei sind in den $\Phi_i(\xi_1, \xi_2, \xi_3)$ für die ξ_j die Koordinaten ξ , η und ζ des Integrationspunktes im normierten Elementkoordinatensystem einzutragen.

Für den Spezialfall ebener Elemente ist $w_3=1$, die Komponente in z-Richtung der Formfunktionen Φ_i aller Knoten i , φ_3 , sind gleich 1 und die Matrizen \mathbf{H} und \mathbf{X} sind dann nur noch vom Typ $N \times 2$, dafür wird zur Volumenberechnung die Dicke (vgl. Kapitel 3.3.3) hinzumultipliziert.

Der weitere Spezialfall rotationssymmetrischer Elemente wird wie ebene Elemente im x-z-Koordinatensystem behandelt, wobei aber die Elementfläche mit 2π multipliziert wird, um das Volumen zu erhalten.

Im Anschluß an die Berechnung des Einzelvolumens wird der Faktor n , der aus Symmetriebedingungen (Kap. 3.3.8) resultiert, jedem Teilvolumen hinzumultipliziert.

2.5.3 Berechnung der WEIBULL-Spannungen, Normierung

Nach (6) kann die WEIBULL-Spannung geschrieben werden:

$$\sigma_w = \left[\frac{1}{V_0} \sum_{Ele=1}^{Anz.Ele} S_{Ele} \right]^{\frac{1}{m}}. \quad (16)$$

Hierbei ist S_{Ele} gleich 0, wenn alle Integrationspunkte des Elements elastisch sind und während der gesamten Belastungsgeschichte elastisch waren.

Wird für die Berechnung der WEIBULL-Spannungen keine Mittelung der Hauptspannungen über das Element vorgenommen (vgl. Kapitel 3.3.6), so wird S_{Ele}

$$S_{Ele} = \sum_{GP=1}^{Anz.Ele-GP} S_{GP} \quad \text{mit } S_{GP} = \begin{cases} 0 & \text{wenn GP nicht plastiziert} \\ (\sigma_I)_{GP}^m V_{GP} & \text{wenn GP plastiziert.} \end{cases} \quad (17)$$

Wird hingegen ein Mittelwert für die Elementhauptspannung $(\sigma_M)_{Ele}$ gebildet, wird S_{Ele}

$$S_{Ele} = (\sigma_M)_{Ele}^m V_{Ele} \quad (18)$$

Hierbei sind V_{GP} bzw. V_{Ele} das Volumen des Integrationspunkts (15) bzw. das Elementvolumen (9).

Um weitgehende numerische Stabilität zu erzielen, werden die Hauptspannungen mit einem konstanten Faktor c normiert:

$$\sigma_I^* = \sigma_I \cdot c. \quad (19)$$

Wird hiermit

$$\sigma_w^* = \left[\frac{1}{V_0} \sum_B (\sigma_I^*)_B^m V_B \right]^{\frac{1}{m}} \quad (20)$$

gebildet (B sind die Bereiche - Integrationspunkte bzw. Elemente - über die die Summation durchgeführt wird), kann die Weibull-Spannung durch Division von σ_w^* durch c erhalten werden.

Das Programm benutzt eine doppelte Normierung (19): zum einen werden alle verwendeten Hauptspannungen (die, deren zugeh. Integrationspunkt plastiziert ist) bereits beim Einlesen mit einem Normierungsfaktor c_1 nach (19) multipliziert, der erst bei der Ausgabe der WEIBULL-Spannungen wieder herausgeteilt wird, so daß für die Parameteranpassung über mehrere Inkremente normierte Spannungswerte vorliegen, und zum zweiten werden bei jeder Berechnung der WEIBULL-Spannung, also innerhalb eines Belastungsinkrements, ein zweiter Normierungsfaktor c_2 auf die gleiche Art appliziert, der bereits direkt nach der Ziehung der m -ten Wurzel wieder herausgeteilt wird. Diese Normierungsfaktoren werden dadurch gewonnen, daß der

jeweils erste im Programm vorgefundene Wert für die Hauptspannungen als reziproker Normierungsfaktor ($c=1/\sigma_r$) verwandt wird.

2.5.4 Anpassung der Weibull-Parameter

Die Anpassung des WEIBULL-Parameters m mittels der maximum-likelihood-Methode geschieht in einer doppelt geschachtelten Schleife:

In einer äußeren Schleife werden mit einem vorgeschätzten Parameter m (Startwert siehe Kapitel 3.3.9) die Weibull-Spannungen für alle N Bruchereignisse, an die der Parameter anzupassen ist, berechnet.

In der inneren Schleife wird die Lösung der nichtlinearen Gleichung

$$f(m) = \frac{N}{m} + \sum_{i=1}^N \ln \sigma_{wi} - N \frac{\sum_{i=1}^N \sigma_{wi}^m \ln \sigma_{wi}}{\sum_{i=1}^N \sigma_{wi}^m} = 0 \quad (21)$$

mittels eines Newton-Verfahrens gesucht, hierbei sind die σ_w aus dem vorgeschätzten m als Konstanten anzusehen. Diese Schleife wird abgebrochen wenn $|f(m)|$ in (21) das Kriterium für "FASTNULL" ("*ANPASSUNG", Kapitel 3.3.1) erreicht hat.

In der äußeren Schleife wird dann die Abweichung des neuen m , $\Delta m = m_{neu} - m_{alt}$, auf Unterschreiten der Grenze "EPSM" ("*ANPASSUNG", Kapitel 3.3.1) geprüft.

Ist der Parameter m hinreichend angepaßt, wird σ_u berechnet:

$$\sigma_u = \left(\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \sigma_{wi}^m \right)^{\frac{1}{m}} \quad (22)$$

Bei Angabe eines Faktors mittels "SYMMETRIE" (vgl. Kapitel 3.3.8) berücksichtigt σ_u die Symmetrie bereits, ein Faktor $k^{1/m}$ ist nicht mehr nötig.

3 EINGABEN

3.1 Allgemeines

Das Programm `sigw1` liest alle benötigten Daten aus Dateien. Folgende Dateien sind vorgesehen:

1. ABAQUS-Ergebnis-File (*.fil-File: "fil-File")
2. Eingabefile für `sigw1`. ("Eingabefile")
3. Datei mit einer Zuordnungstabelle von im ABAQUS-fil-File abgelegten Lastschritt- und Inkrement-Nummern und zugehörigen Lastzuständen ("Zuordnungsfile").
4. Datei mit Lastzuständen oder Lastschritten/Inkrementen, in denen eine WEIBULL-Berechnung durchzuführen ist ("Auswertungsfile").
5. Datei mit experimentellen Bruch- oder Verschiebungswerten für die Anpassung der WEIBULL-Parameter m und σ_u ("Experimentefile").

Das fil-File muß binär erzeugt werden, die übrigen Dateien sind ASCII-Files. Das fil-File und das Eingabefile sind obligatorisch, wohingegen die übrigen Files nicht vorhanden sein müssen. Die Namen dieser Files sind frei wählbar, wobei allerdings berücksichtigt werden muß, daß das fil-File grundsätzlich vom Typ *.fil sein muß.

Die Angabe des Inputfile kann auf der Kommandozeile mit der Option `i=<filename>` vorgenommen werden.

Wird in der Eingabezeile kein Inputfile mit der Option `i=` vorgenommen, so wird vom Programm versucht das **Default-Inputfile** `weibull.inw` zu lesen.

Die Angabe des fil-Files kann optional in der Kommandozeile oder im Eingabefile vorgenommen werden. Hierbei gilt, daß wenn das fil-Files sowohl in der Kommandozeile wie auch im Eingabefile angegeben wird, der Namen aus der Kommandozeile Vorrang genießt.

Zur Eingabe der Filenamen in der Kommandozeile siehe das Kapitel 2.3: "Start des Programms"

3.2 Eingabedatei

Der Aufbau der Eingabedatei ist dem Aufbau der ABAQUS-Eingabedatei nachempfunden, um eine ähnliche Syntax zu unterstützen.

Aufbau:

- ** Kommentarzeile
- * Primäridentifizier
- * Primäridentifizier=Qualifizier
- * Primäridentifizier
- # Sekundäridentifizier
- Wertetabelle

Kommentarzeilen beginnen mit ** und sind überall in der Eingabedatei zulässig, Leerzeilen sind zulässig. Leerzeichen (Blanks) sind sowohl am Zeilenanfang als auch zwischen den einzelnen Identifiern möglich, nicht aber innerhalb dieser (** gibt keine Kommentarzeile, *DI CKE=2 wird nicht erkannt, aber * DICKE = 2 ist zulässig).

Alle primären Identifizier beginnen mit *. Für jeden primären Identifizier sind bestimmte Folgezeilen notwendig, möglich oder nicht definiert. Für einige definierte Folgezeilen von Primäridentifizier sind weitere (sekundäre) Identifizier vorgesehen, diese sind zur Unterscheidung der primären mit # einzuleiten.

Sekundäre Identifizier werden nur in Folgezeilen von primären Identifiern erkannt, also bevor der nächste Primäridentifizier beginnt. Sind nach primären Identifiern Folgezeilen erforderlich, so wird nicht nach neuen Primäridentifiern gesucht, bevor mindestens die erforderlichen Folgezeilen erkannt wurden. Primäridentifizier können in jeder beliebigen Reihenfolge angegeben werden. Genauso dürfen Sekundäridentifizier in jeder beliebigen Reihenfolge zwischen dem zugehörigen Primäridentifizier und dem nächsten Primäridentifizier stehen.

Gleitpunktkommawerte können formatfrei eingegeben werden (z.B. sind die Eingaben *DICKE=2, *DICKE=2.00 und *DICKE=2.0e0 äquivalent).

3.3 Primäridentifizier

Die folgende Liste zeigt die möglichen Primäridentifizier und gibt Kurzhinweise zu ihrer Verwendung; die genaue Beschreibung erfolgt in den Kapiteln 3.3.1 bis 3.3.10.

[] bezeichnet optionale Angaben.

(Def.: ...) gibt einen möglichen Defaultwert an; soll dieser Verwendung finden, kann die Eingabe entfallen.
 (Folgezeilen) hier wird ein Hinweis auf die zugehörigen Folgezeilen gegeben.
 Signifikanz: die ersten 3 Zeichen nach * sind für die Erkennung relevant; der Rest ist dabei beliebig.
 Primäridentifizier werden sowohl in Groß- wie in Kleinschreibung erkannt.

*ANPASSUNG[=*filename*] Wenn Parameteranpassung erfolgen soll. *filename*:
 Filename für experimentelle Daten
 (Def.: Eingabe erfolgt in anschl. Folgezeilen)
 (Folgezeilen) Max. Anzahl Iterationen und Tabelle mit experimentellen Werten (Bruchlasten oder Verschiebungen); Abbruchkriterien für Iteration.

*BEREICH Ist noch nicht implementiert

*DICKE=*wert* Dicke bei ebenen Elementen (Def.: *DICKE=1.0)

*FILFILE[=*filename*] Name des fil-Files (ohne .fil); (Eingabe in der Kommandozeile hat Vorrang.)
 (Folgezeilen) Zuordnung: Step - Belastung aus fil-File.

*KOORDINATEN=*option* *option* = UPDATE oder ORIGINAL
 (Def.: *KOORDINATEN=ORIGINAL)

*MITTELWERT=*num* wird zur Mittelung im Element gebraucht (Def.: ja)

*SONSTIGEWEIFULLBERECHNUNG[=*filename*]
 Wenn WEIBULL-Berechnung außerhalb der Parameteranpassung durchgeführt werden soll. *filename*:
 Filename des Auswertungsfiles. (Def.: Eingabe erfolgt in anschl. Folgezeilen).
 (Folgezeilen) Lastschritte oder Zustände zur Berechnung von σ_w

*SYMMETRIE=*n* Berücksichtigung von Symmetrieeigenschaften beim Volumen (Def.: *SYMMETRIE=1.0)

*WEIBULL wird immer gebraucht
 (Folgezeilen) Exponent m und V_0

*ZUORDNUNG[=*filename*] Name des Zuordnungsfiles.
 (Def.: Eingabe erfolgt in anschl. Folgezeilen)
 (Folgezeilen) Zuordnungstabelle Step - Belastung

3.3.1 *ANPASSUNG

(optional)

Optionen: *=filename*

Folgezeilen:

#M_MAXIT= <i>anzahl</i>	Max. Anzahl Iterationen für <i>m</i> (äußere Schleife)
#NEWTON_MAXIT= <i>anzahl</i>	Max. Anzahl Iterationen des Newton-Algorithmus zur Nullstellensuche (innere Schleife)
#EPSM= <i>wert</i>	Abbruchkriterium der äußeren Schleife ($\Delta m \leq \text{eps}m$)
#FASTNULL= <i>wert</i>	Abbruchkriterium für die innere Schleife. ($ f \leq \text{eps}N$)
#LIST: <i>liste</i>	Liste der experimentellen Bruchkräfte oder Verschiebungen (Einschnürung, Reißaufweitung), formatfrei. Leerzeichen, Zeilenumbrüche und Kommata gelten als Trennzeichen.

Ohne die Angabe von *ANPASSUNG erfolgt keine Parameteranpassung für den Exponenten *m* und für σ_u .

Wird die Option *=filename* nicht angegeben, so sind in der(n) Folgezeile(n) eine Liste experimentell ermittelter Bruchlasten einzugeben.

Wird die Option #M_MAXIT nicht angegeben, so gilt #M_MAXIT=20.

Ebenso gilt ohne die Option #NEWTON_MAXIT die Defaulteinstellung #NEWTON_MAXIT=20.

Wird die Option #EPSM nicht angegeben, so gilt #EPSM=0.1.

Wird die Option #FASTNULL nicht angegeben, so gilt #FASTNULL=0.01.

Die Anzahl signifikanter Zeichen nach # ist 1.

Die Reihenfolge der Folgezeilen ist beliebig, wenn berücksichtigt wird, daß die Liste der experimentellen Bruchwerte in der Zeile nach dem Wort 'LIST:' zusammenhängend sein muß.

Es werden Groß- und Kleinbuchstaben erkannt.

Wird die Option *=filename* angegeben, so wird diese Liste aus dem angegebenen File gelesen; die Liste in den Folgezeile(n) wird dann ignoriert, falls sie vorhanden ist.

In diesem File können sowohl die Listenwerte, wie auch Kommentarzeilen und Leerzeilen stehen;

das Erkennungszeichen 'List:' soll nicht im File stehen.

3.3.2 *BEREICH

(optional)

Optionen:

Folgezeilen:

Ist noch nicht implementiert

3.3.3 *DICKE

(optional)

Optionen: =wert

Folgezeilen: keine

Wird *DICKE angegeben, so ist von der Option Gebrauch zu machen.

Wird *DICKE nicht angegeben, so gilt *DICKE=1.0

Besteht das System aus räumlichen oder rotationssymmetrischen Elementen, wird die Dicke ignoriert.

Besteht das System aus ebenen Elementen, so wird die Dicke bei der Berechnung der Volumenterme benutzt.

3.3.4 *FILFILE

(erforderlich; bei Angabe des Filenamens in der Kommandozeile: optional)

Optionen: =filename

Folgezeilen:

#KRAFT,NODESET=*name*,RICHTUNG=*richtung*[,FAKTOR=*factor*]

#VERSCHIEBUNG,KNOTEN=*num*,RICHTUNG=*richtung*[,FAKTOR=*factor*]

Der Name des fil-Files ist immer erforderlich; er kann sowohl hier, als auch in der Kommandozeile angegeben werden. Der Name wird ohne `.fil` angegeben. Wird der Name in der Eingabe der Kommandozeile angegeben, so hat dieser Vorrang vor dem hier angegebenen. Die Option =filename kann dann hier auch entfallen.

Soll eine Zuordnung abgelegter Lastschritte aus ABAQUS mit Bruchzuständen (Last oder Verschiebung) durch Werte aus dem fil-File stattfinden, so ist eine der beiden Optionen #KRAFT... oder #VERSCHIEBUNG... anzugeben.

Diese Zuordnung kann alternativ durch den Primäridentifizier *ZUORDNUNG aus einer eigenen Wertetabelle erfolgen (siehe auch: *ZUORDNUNG, Kap. 3.3.10).

Wird sowohl der Primäridentifizier *ZUORDNUNG als auch *FILFIL, #KRAFT bzw. #VERSCHIEBUNG zur Zuordnung benutzt, so ist letztere maßgeblich.

Sollen die Lastschritte einer Bruchlast zugeordnet werden, so ist die Folgezeile

#KRAFT,NODESET=*name*,RICHTUNG=*richtung*[,FAKTOR=*factor*] zu verwenden.

Dafür müssen die Reaktionskräfte eines *NODESET von ABAQUS im fil-File abgelegt sein. Es reicht nicht aus, die Reaktionskräfte aller Knoten abzulegen, sondern es muß explizit ein NODESET gebildet werden und dafür die Reaktionskräfte ausgegeben werden. Die Kraft errechnet sich aus der Summe der Reaktionskräfte des NODESETS in die spezifizierte Richtung (äußere Kräfte).

Die Eingabe eines Faktors bewirkt, daß die beschriebenen Kräfte mit dem angegebenen Faktor multipliziert werden. Beispielsweise läßt sich hiermit die Dicke einer ebenen Probe berücksichtigen.

Sollen die Lastschritte einer Verschiebung zugeordnet werden, so ist die Folgezeile

#VERSCHIEBUNG,KNOTEN=*num*,RICHTUNG=*richtung*[,FAKTOR=*factor*]

einzugeben.

Für *num* ist die globale Knotennummer anzugeben.

Die Eingabe eines Faktors wirkt dabei auf die Verschiebung. Hiermit kann beispielsweise aus einer negativen Verschiebung eine positive Einschnürung errechnet werden (FAKTOR=-2.0 zur Bestimmung von Δd).

Für Richtung gilt: x=1, y=2, z=3; bzw r=1, z=2 bei rotationssymmetrischen Elementen. Die Richtung ist immer anzugeben. (z.B.: RI=2)

Die Eingabe eines Faktors ist optional. Ohne Eingabe eines Faktors gilt immer: Faktor=1.0

Beispiel für die Eingabe im ABAQUS-Inp.-File für die Erzeugung eines Nodesets 'LOAD' fuer alle Punkte des Lastangriffs und die Anweisung zur Ausgabe der Reaktionskräfte auf das fil-File:

```
*NSET,NSET=LOAD
1, 2, ... (Knotennummern)
...
*NODE FILE,NSET=LOAD
RF
```

3.3.5 *KOORDINATEN

(optional)

Optionen: =ORIGINAL
 =UPDATE

Folgezeilen: keine

Wird *KOORDINATEN angegeben, so ist von einer der Optionen Gebrauch zu machen.

Wird *KOORDINATEN nicht angegeben, so gilt *KOORDINATEN=ORIGINAL.

Die Optionen werden in Groß- und Kleinbuchstaben erkannt.

Die Anzahl signifikanter Zeichen nach = ist 1.

Die Volumenterme der WEIBULL-Berechnung werden durch die Knotenkoordinaten des Elementnetzes mitbestimmt. Normalerweise werden hierfür die Koordinaten des unverformten Netzes benutzt (*KOORDINATEN=ORIGINAL).

Mit der Eingabe von *KOORDINATEN=UPDATE werden die Koordinaten des verformten Elementnetzes benutzt.

Um diese Option benutzen zu können, müssen die aktualisierten Koordinaten von ABAQUS im fil-File abgelegt werden, z. B.:

```
*NODE FILE, NSET=Name  
COORD
```

3.3.6 *MITTELWERT

(optional)

Optionen: keine

Folgezeilen:

#MITTEL=*num1* Art der Mittelwertbildung; *num1*=0: keine Mittelwertbildung

#ANZGP=*num2* Anzahl Integrationspunkte, die plastisch sein müssen, damit das Element als plastisch gilt. (Nur bei Mittelung im Element: wenn *num1*≠0)

Die Nummer *num1* bestimmt die Art der Mittelwertberechnung im Element:

num1 = 0: es findet keine Mittelung statt.

num1 = 1, 2 oder 3: Max. Hauptspannungen werden im Element gemittelt.

Eine Mittelung findet immer über alle Gaußpunkte im Element statt.

num1 = 1, *num1* = 2 und *num1* = 3 unterscheidet sich nur in der Behandlung unvollständig plastizierter Elemente:

Bei *num1* = 1 fließen die Hauptspannungswerte aller Integrationspunkte in den Mittelwert ein;

bei *num1* = 2 fließen nur die Hauptspannungswerte der plastischen Integrationspunkte ein, werden aber über das Gesamtelement verteilt;

bei *num1* = 3 fließen nur die Hauptspannungswerte der plastischen Integrationspunkte ein, werden aber über die plastische Fläche gemittelt.

num2 bestimmt, ab wievielen plastizierten Integrationspunkten das Element als plastiziert zu gelten hat (nur bei *num1* > 0). *num2* kann die Werte

1, 2, 3, ... , bis Anzahl Gaußpunkte pro Element

-1: alle Gaußpunkte

-2: die Hälfte aller Gaußpunkte im Element (bei ungerader Anzahl: > 1/2) annehmen.

(Bei unterschiedlichen Elementtypen wirkt -1 oder -2 auf jedes Element.)

Ohne die Angabe von *MITTELWERT wird eine Mittelwertberechnung im Element durchgeführt, und es gilt: ***num1* = 2, *num2* = 1.**

Bei *num1* = 0 findet keine Mittelung statt, sondern jeder Gaußpunkt fließt mit seinen eigenen Werten ($\sigma_i, \epsilon_v^{pl}$) in die WEIBULL-Berechnung ein.

Berechnungsvorschrift eines ebenen Elements:

Der Beitrag S_{Ele} zur WEIBULL-Spannung (16) eines 2-D-Elements mit I Integrationspunkten in 1-Richtung und J Integrationspunkten in 2-Richtung berechnet sich:

a) ohne Mittelung ($num1 = 0$):

$$S_{\text{Ele}} = \sum_{k=1}^K (\sigma_{I,k}^m V_k) \quad (23)$$

hierbei läuft k über alle K plastizierten Integrationspunkte ($K \leq I * J$); $num2$ hat hier keine Bedeutung. V_k ist der Volumenanteil () des Integrationspunkts k.

b) mit Mittelung ($num1 \neq 0$):

$$S_{\text{Ele}} = \sigma_{I,\text{Mittel}}^m V_{\text{Ele}} \quad (24)$$

hierbei ist V_{Ele} das Elementvolumen

$$V_{\text{Ele}} = \sum_{k=1}^{I*J} V_k \quad (25)$$

und

$$\sigma_{I,\text{Mittel}} = \frac{\sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \sigma_{I,ij} w_i w_j}{\sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J w_i w_j} \quad \text{für } num1=1 \quad (\text{Mittelung aller IP: } \Sigma \text{ IP} / \Sigma \text{ IP}) \quad (26)$$

Mittelung der plastizierten Integrationspunkte:

$$\sigma_{I,\text{Mittel}} = \frac{\sum_{i=1}^{I'} \sum_{j=1}^{J'} \sigma_{I,ij} w_i w_j}{\sum_{i=1}^{I'} \sum_{j=1}^{J'} w_i w_j} \quad \text{für } num1=2 \quad (\Sigma \text{ der pl. IP} / \Sigma \text{ IP}) \quad (27)$$

$$\sigma_{I,\text{Mittel}} = \frac{\sum_{i=1}^{I'} \sum_{j=1}^{J'} \sigma_{I,ij} w_i w_j}{\sum_{i=1}^{I'} \sum_{j=1}^{J'} w_i w_j} \quad \text{für } num1=3 \quad (\Sigma \text{ der pl. IP} / \Sigma \text{ pl. IP}) \quad (28)$$

wenn die Anzahl der plastizierten Integrationspunkte größer oder gleich $num2$ ist, andernfalls ist $\sigma_{I,\text{Mittel}} = 0$;

w_i, w_j sind die Gewichtungsfaktoren des Integrationspunkts in i bzw. j -Richtung, I', J' sind Anzahl der plastizierten Integrationspunkte.

Für $num1 = 1$ werden alle $I * J$ Integrationspunkte in jede Richtung betrachtet,

bei $num1 = 2$ werden nur die $I' * J'$ plastizierten Integrationspunkte betrachtet, aber auf die ganze Elementfläche verteilt,

bei $num1 = 3$ werden nur die $I' * J'$ plastizierten Integrationspunkte betrachtet.

Beispiel:

Die Fließspannung eines Netzes sei nur in einem Integrationspunkt eines 2D-4Knoten-Elements mit voller Integration überschritten. Die Elementkantenlängen seien 0.05×0.05 mm, die Elementdicke ($\rightarrow 3.6 * DICKE$) ist 1 mm, gerechnet wird mit Originalkoordinaten ($\rightarrow 3.8 * KOORDINATEN$), $V_0 = 0.001$, es sei $m = 22$.

Für das Element gilt $w_i = w_j = 1$.

Die maximalen Hauptspannungen $\sigma_{I,k}$ der einzelnen Integrationspunkte seien:

IP-Nummer k	$\sigma_{I,k}$	elast./plast.
1	185.5	el.
2	973.4	plastiziert
3	379.1	el.
4	664.3	el

Die WEIBULL-Spannung berechnet sich damit:

a) ohne Mittelung ($num1 = 0$):

$$S_{Ele} = \sum_{k=1}^K (\sigma_{I,k}^m V_k) = \sigma_{I,2}^m V_k = 973.4^{22} \cdot 0.000625$$

$$\sigma_w = \left[\frac{1}{V_0} \sum_{Ele=1}^{Anz.Ele} S_{Ele} \right]^{\frac{1}{m}} = \left(\frac{0.000625}{0.001} \right)^{\frac{1}{22}} 973.4 = 952.4$$

b) mit Mittelung ($num1 \neq 0$):

bei $num2 \neq 1$: $\sigma_w = 0$

bei $num2 = 1$:

für $num1=1$ (Mittelung aller IP):

$$\sigma_{I,Mittel} = \frac{\sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \sigma_{I,ij} w_i w_j}{\sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J w_i w_j} = \frac{185.5 + 973.4 + 379.1 + 664.3}{4} = 550.575$$

$$S_{Ele} = \sigma_{I,Mittel}^m V_{Ele} = 550.575^m \cdot 0.0025$$

$$\sigma_w = \left[\frac{1}{V_0} \sum_{Ele=1}^{Anz.Ele} S_{Ele} \right]^{\frac{1}{m}} = \left(\frac{0.0025}{0.001} \right)^{\frac{1}{22}} 550.575 = 573.99$$

für $numI=2$ (Mittelung der pl. IP/A_{Ele}):

$$\sigma_{I,Mittel} = \frac{\sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \sigma_{I,ij} w_i w_j}{\sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J w_i w_j} = \frac{973.4}{4} = 243.35$$

$$\sigma_w = \left[\frac{1}{V_0} \sum_{Ele=1}^{Anz.Ele} S_{Ele} \right]^{\frac{1}{m}} = \left(\frac{0.0025}{0.001} \right)^{\frac{1}{22}} 243.35 = 253.70$$

für $numI=3$ (Mittelung der pl. IP/A_{pl}):

$$\sigma_{I,Mittel} = \frac{\sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \sigma_{I,ij} w_i w_j}{\sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J w_i w_j} = \frac{973.4}{1} = 973.4$$

$$\sigma_w = \left[\frac{1}{V_0} \sum_{Ele=1}^{Anz.Ele} S_{Ele} \right]^{\frac{1}{m}} = \left(\frac{0.0025}{0.001} \right)^{\frac{1}{22}} 973.4 = 1014.80$$

3.3.7 *SONSTIGEWEIFULLBERECHNUNG

(optional)

Optionen: =*filename*

Folgezeilen:

#STEP=ALLE

#STEP

stepliste [step] , incr

[step] , incr

:

:

#LAST

lastliste last.1 last.2 ...

... last.n

Ohne Angabe von *SONSTIGEWEIFULLBERECHNUNG erfolgt keine Berechnung der WEIBULL-Spannung außerhalb der Parameteranpassung.

Wird die Option =*filename* nicht angegeben, so ist eine der drei Möglichkeiten von Folgezeilen einzugeben. In diesen wird bestimmt, mit welchen Laststufen die WEIBULL-Berechnung durchgeführt wird.

Wird eine Liste von Lastschritten oder Inkrementen angegeben, so müssen diese im fil-File abgelegt sein. Mit der Zusatzoption =ALLE werden alle abgelegten Lastschritte selektiert.

Wird eine Liste von Lastzuständen ausgewählt, so wird ggf. zwischen abgelegten Lastschritten interpoliert. Außerhalb des abgelegten Bereichs ist eine Interpolation nicht möglich.

Lastzustände können Verschiebungen oder Kräfte sein. (Vgl. *FILFILE und *ZUORDNUNG)

Auswahl von Lastzuständen setzt voraus, daß entweder in *FILFILE oder in *ZUORDNUNG eine Zuordnung von Lastschritten mit Lastzuständen vorgenommen wird. Diese Zuordnung muß vom Typ her mit der hier gewählten korrelieren.

Groß- und Kleinschreibung wird erkannt.

Anzahl signifikanter Zeichen nach # ist 1.

Anzahl signifikanter Zeichen für ALLE ist 1

Eingaben:

#STEP=ALLE (Keine weiteren Eingaben)

#STEP

stepliste Liste der Lastschritte und Inkremente

#LAST

Lastliste der Kräfte oder Verschiebungen (Einschnürung, Rißaufweitung), formatfrei.
Leerzeichen, Kommata und Zeilenumbrüche gelten als Trennzeichen.

Aufbau von stepliste:

Die einzelnen Steps sind zeilenweise einzugeben.

step und *incr* sind Loadstep und Increment von ABAQUS.

Die Angabe von *step* ist optional. Wird *step* nicht angegeben, so gilt *step* =1, wird *step* nicht in jeder Zeile angegeben, so gilt die Nummer des Steps bis zur nächsten Angabe von *step*. Inkrementnummern sind mit Kommata von Stepnummern zu trennen. Wird keine Stepnummer angegeben, so ist das Komma trotzdem anzugeben, um zu zeigen daß die Nummer eine Inkrementnummer darstellt.

Beispiel:

```
*SONSTIGE
#STEP
** Hier wird die Weibullberechnung in den Zuständen von Lastschritt 1,
** Incr 5, LS 2, Incr. 1, 2 und 3 und im LS 3, Incr. 1 und 2 durchge-
führt
, 5
2, 1
, 2
, 3
3, 1
, 2
```

Werden die Listen der Berechnungszustände aus einem File gelesen, so gilt die gleiche Konvention für das File. Der Header #STEP bzw. #LAST müssen dann im File an erster Stelle stehen.

Kommentarzeilen im File sind erlaubt.

Hinweis: wird sowohl eine Parameteranpassung als auch eine Berechnung außerhalb dieser durchgeführt, so erfolgt die 'sonstige' Berechnung im Anschluß an die Parameteranpassung mit dem angepaßten Exponenten.

3.3.8 *SYMMETRIE

(optional)

Optionen: $=n$

Folgezeilen: keine

Wird *SYMMETRIE angegeben, so ist von der Option Gebrauch zu machen.

Wird *SYMMETRIE nicht angegeben, so gilt *SYMMETRIE=1.0

Mit dem Wert n wird die Symmetrie einer Probe bei der Berechnung der Volumenterme berücksichtigt. Jedes Volumenelement wird mit dem Faktor n multipliziert.

Typische Werte für n sind: 2 bei einfachsymmetrischen Proben (z.B.: CT, Rundzug)
4 bei doppelsymmetrischen Proben (MT)

3.3.9 *WEIBULL

(immer erforderlich)

Optionen: keine

Folgezeilen:

#M=*zahl* Exponent m

#VOL0=*zahl* V_0

Defaultwert für VOL0 ist 1.0

Die Eingabe für m ist erforderlich.

Eingabe für V_0 ist optional.

Die Reihenfolge der Eingabe ist beliebig.

Anzahl signifikanter Zeichen nach # ist 1.

Der eingegebene Wert für m ist bei Parameteranpassung der Startwert.

Wird bei einem Aufruf des Programms sowohl eine Parameteranpassung als auch eine 'sonstige Berechnung' durchgeführt, so ist m der Startwert für die Parameteranpassung, die 'sonstige Berechnung' erfolgt daran anschließend mit dem in der Parameteranpassung ermittelten m .

Wird nur eine Weibullberechnung ohne vorrausgehende Parameteranpassung ('sonstige Berechnung') durchgeführt, so wird mit dem hier eingegebenen Exponenten gerechnet.

3.3.10 *ZUORDNUNG

(optional)

Optionen: \Rightarrow *filename*

Folgezeilen:

[#NURZAHL]

zuordnungsliste [step] , *incr* , *zugeh. Lastzustand*

Eine Zuordnung von abgelegten Lastschritten und Inkrementen von ABAQUS mit Lastzuständen ist erforderlich, wenn entweder eine Parameteranpassung mit *ANPASSUNG erfolgen soll, oder wenn eine 'sonstige' Weibullberechnung zu bestimmten Lastzuständen, die nicht lediglich durch Lastschrittnummern definiert sind, erfolgen soll (vgl. *SONSTIGEWEIFULLBERECHNUNG). Diese Zuordnung kann entweder direkt mit Angaben gemacht werden, die dem fil-File entnommen werden (siehe *FILFILE), oder mit Angaben, die unter dieser Primäridentifizierung gemacht werden. (Eine Zuordnungsvorschrift für das fil-File hat Vorrang gegenüber einer mit *ZUORDNUNG gemachten.)

Wird die Option \Rightarrow *filename* nicht gemacht, so ist die Zuordnungsliste hier anzugeben, sonst wird sie aus dem angegebenen File gelesen. Die Beschreibung der Zuordnungsliste und des Sekundäridentifiers #NURZAHL gilt dann für die Datei.

Die Zuordnungsliste ordnet den im fil-File abgelegten Lastschritt-Inkrementen eine Lastzustandsgröße zu. Die Lastzustandsgröße kann eine Kraft oder eine Verschiebung sein.

Die Zuordnungsliste in Verbindung der Sekundäridentifikation #NURZAHL besteht aus Zahlen, die jedem im fil-File abgelegten Lastschritt-Inkrement eine Lastzustandsgröße zuordnet. Die Eingabe der Zuordnungsliste erfolgt dann formatfrei. Leerzeichen bzw. Zeilenumbrüche gelten als Trennzeichen.

Ohne die Sekundäridentifikation #NURZAHL kann selektiv einigen oder allen abgelegten Lastschritt-Inkrementen eine Lastzustandsgröße zugeordnet werden. Die Eingabe erfolgt dann zeilenweise analog der Zusatzoption #STEP in *SONSTIGEWEIFULLBERECHNUNG.

Aufbau der Zuordnungsliste ohne die Sekundäridentifikation #NURZAHL:

Die einzelnen Steps sind zeilenweise einzugeben.

step und *incr* sind Loadstep und Increment von ABAQUS.

Die Angabe von *step* ist optional. Wird *step* nicht angegeben, so gilt *step* =1, wird *step* nicht in jeder Zeile angegeben, so gilt die Nummer des Steps bis zur nächsten Angabe von *step*. Inkre-

mentnummern sind mit Kommata von Stepnummern zu trennen. Wird keine Stepnummer angegeben, so ist das Komma trotzdem anzugeben, um zu zeigen daß die Nummer eine Inkrementnummer darstellt. Die Lastzustandsgröße wird mittels Komma von der Angabe des Inkrements abgetrennt.

Beispiel:

```
*ZUORDNUNG
** Hier wird den Lastschritten 1, Incr 5, LS 2, Incr. 1, 2 und 3 und LS
** 3, Incr. 1 und 2 je ein Lastzustand (hier äußere Kraft) zugeordnet.
, 5 , 24.235
2, 1 , 25.100
, 2 , 25.45690339
, 3 , 25.9317
3, 1 , 26.721
, 2 , 27.3412
```

4 ANGABEN FÜR ABAQUS

Das Programm zur Berechnung der Weibullspannungen wurde als Schnittstelle zum Finite-Elemente-Programm ABAQUS/Standard Version 5.6 der Firma HKS implementiert. Als Voraussetzung zum Einsatz des Programms ist ein fil-File durch ABAQUS zu erstellen, das bestimmte Informationen enthält, die zur Berechnung der Weibullspannungen benötigt werden.

Zur Berechnung werden die Daten des Elementnetzes, die maximalen Hauptspannungen und die plastischen Vergleichsverzerrungen an den Integrationspunkten der Elemente gebraucht. Außerdem ist ein Belastungsparameter als Kennwert für die Zuordnung zu experimentellen Werten erforderlich, der auch aus dem fil-File ermittelt werden kann. Dieser Belastungsparameter kann üblicherweise eine Kraft, als Bruchkraft, oder eine Verschiebung, als Einschnürung oder Reißaufweitung, bei Bruch sein.

Um diese Daten im fil-File ablegen zu lassen, sind entsprechende Angaben im Eingabefile *.inp für den ABAQUS-Lauf zu machen. Diese Angaben sollen hier kurz erläutert werden, ohne dabei das ABAQUS-Manual ersetzen zu wollen.

- Notwendige Angaben

Um die Informationen des Elementnetzes ins fil-File schreiben zu lassen, sind keine weiteren Angaben notwendig, da diese Daten automatisch von ABAQUS bei der Erstellung eines fil-Files eingefügt werden.

Da die Hauptspannungen und plastischen Vergleichsverzerrungen Werte an Integrationspunkten darstellen ist die Option 'EL FILE' zu benutzen, während an Knoten auftretende Kräfte und Verschiebungen mit der Option 'NODE FILE' zu bestimmen sind.

Da die Hauptspannungen und plastischen Vergleichsverzerrungen im ganzen Bereich des Festkörpers benötigt werden, müssen diese mit einer geeigneten Maßname für alle Elemente ausgegeben werden, während die Belastungsparameter nur an ausgewählten Punkten benötigt werden.

Eine gute Lösung stellt die Möglichkeit dar, Element- und Knotensets zu bilden. So kann etwa durch Festlegung eines Elementsets 'ALL', dem alle Elemente der Festkörperstruktur zugewiesen werden, die Ausgabe der Hauptspannungen und der plastischen Vergleichsverzerrungen dadurch erreicht werden, daß die Anweisung:


```
*EL FILE, ELSET=ALL  
SP, PE
```

im ABAQUS-Inputfile benutzt wird.

- Beanspruchungen als Zuordnungsparameter

Da bei den verschiebungsbestimmten Belastungsparametern jeweils nur ein Knoten eine Rolle spielt, reicht es aus, wenn die Ausgabe der Verschiebungen entweder nur für diesen einzelnen Knoten, oder auch für beliebig viele andere Knoten der Struktur erreicht wird. Der Knoten wird bei der Eingabe zum Weibull-Programm durch seine globale Knotennummer bestimmt. Wenn der Knoten mit dieser Nummer im fil-File abgelegt wurde, ist die zugehörige Information für das Weibull-Programm eindeutig. Die Anweisung zur Ausgabe einer Knotenverschiebung lautet:

```
*NODE FILE, NODESET= . . .  
U
```

wobei hier auch einzelne Knotennummern statt eines NODESETS angegeben werden können.

Im Gegensatz zu einem Belastungsparameter, der durch Knotenverschiebung bestimmt ist, bezieht sich ein Kraft-Belastungsparameter häufig auf mehrere Knoten einer Struktur, ohne daß damit grundsätzlich alle Knoten mit einer äußeren Randbedingung gemeint sein müssen. Um hier Eindeutigkeit ohne aufwendige Knotenlisten für das Weibull-Programm erzielen zu können, liest das Weibullprogramm für den Fall, daß eine Zuordnung der berechneten Lastschritte mit einer Kraftkomponente gewünscht wird, den Namen eines NODESETS. Die Kräfte aller Knoten (und einer Raumrichtung) dieses NODESETS bilden additiv die Kraftkomponente, die Verwendung finden soll. Hierbei ist die Anzahl der zugehörigen Knoten beliebig. Damit dieses NODESET unter diesem Bezeichner im fil-File abgelegt wird, ist es erforderlich, explizit die Ausgabe der Kräfte dieses NODESETS zu verlangen. Es reicht keinesfalls aus, die Reaktionskräfte an allen Knoten ausgeben zu lassen, sondern in diesem Fall muß zusätzlich die Ausgabe für dieses NODESET erzwungen werden.

Wird beispielsweise ein NODESET 'LOAD' mit allen Lastangriffspunkten einer Struktur gebildet, erfolgt die Ausgabe der Kräfte dieser Punkte durch die Anweisung:

```
*NODE FILE, NODESET=LOAD  
RF
```

- Optional: Knoten des verschobenen Netzes

In einigen Fällen mag es wünschenswert erscheinen, die Volumenterme der Weibullberechnung am verschobenen Elementnetz zu berechnen. Dies könnte durch Addition der Verschiebungen

mit den Ursprungskordinaten geschehen. Da ABAQUS die Möglichkeit bietet, die Koordinaten der verschobenen Knoten direkt ausgeben zu lassen, ist hier aber auf diese Berechnungsmethode verzichtet worden. Stattdessen liest das Programm die 'updated Coordinates' vom file, wenn die Berechnung mit der verschobenen Struktur durchgeführt werden soll. Dazu ist die Anweisung:

```
*NODE FILE, NODESET =ALL  
COORD
```

zu verwenden. Dies gibt nur Sinn, wenn die Koordinaten aller Knoten zur Verfügung stehen. Ob dies erfüllt ist, wird vom Programm geprüft, und bei Nichterfüllung als Fehler behandelt.

- Frequency

Mit der ABAQUS-Option 'FREQUENCY' kann erreicht werden, daß nicht alle Daten in jedem Belastungsincrement ausgegeben werden. Dies macht aber erkennbar nur dann Sinn, wenn für alle an der Weibullberechnung beteiligten Ausgabewerte die gleiche Frequenz verwandt wird.

5 BEISPIEL: GEKERBTE RUNDZUGPROBE

Zur Verifikation des Programms wird die FE-Simulation eines Zugversuchs einer gekerbten Rundzugprobe ($D=10\text{mm}$, $d=5\text{mm}$, $\rho=2\text{mm}$) gemäß den Vorgaben des europäischen "numerical round robin on micromechanical models" [12, 13] durchgeführt. Das folgende Listing ist das ABAQUS-Inputfile (*.inp), mit dem die Rechnung durchgeführt werden kann. Die Bilder zeigen das verwendete FE-Netz sowie die Kraft-Einschnürungskurve, die sich bei der Simulation des Zugversuchs ergibt. Alle vom Nachlaufprogramm zur Bestimmung der Weibullspannungen benötigten Daten werden im *.fil-File abgelegt. Knotenkoordinaten sowie Inzidenztafel werden von externen Dateien eingelesen.

```
*HEADING
ESIS TC8 RR-Phase I: Notched Tensile Bar, 22 NiMoCr 37 at -196 C
*RESTART,WRITE,FREQ=1
*NODE,INPUT=NODE_196.DAT,NSET=ALLE
** KNOTEN IN ROTA-SYM-ACHSE, WOBEI R = 0.
*NSET,NSET=RNULL,GENERATE
    1,    6,  5
    9,    9,  1
   101, 117,  1
   187, 203,  1
** KNOTEN IM LIGAMENT, WOBEI Z = 0.
*NSET,NSET=ZNULL,GENERATE
    1,    2,  1
   13,   35,  1
** BELASTETE KNOTEN
*NSET,NSET=BEL,GENERATE
    9,   11,  1
   85,  100,  1
*NSET,NSET=QUER,GENERATE
    2,    2,  1
*****
** RANDBEDINGUNGEN
**
*BOUNDARY
RNULL,  1
ZNULL,  2
*****
*ELEMENT,INPUT=ELEM_196.DAT,TYPE=CAX8R,ELSET=ALLE
*ELSET,ELSET=CENTRE
    1
*ELSET,ELSET=NROOT
   12
*ELSET,ELSET=ENGQU,GENERATE
    1, 12
*****
*MATERIAL,NAME=NIMOCR
```

```

*ELASTIC,TYPE=ISO
250000.,0.3
*PLASTIC,HARD=ISO
939.0000, 0.0000
959.0000, 0.0212
1000.0000, 0.0430
...
1869.7113, 1.9925
*SOLID SECTION,ELSET=ALLE,MATERIAL=NIMOCR
*STEP,NLGEOM,INC=200
*STATIC,DIRECT
0.005, 0.10
*CONTROLS,PARAMETERS=FIELD,FIELD=DISPLACEMENTS
1.00,1.0,0.01,30.0,0.02,1.E-8,0.001,1.E-8
*CONTROLS,PARAMETERS=TIME INCREMENTATION
15,100,9,16,15,8
*BOUNDARY,OP=MOD,TYPE=DISPLACEMENT
BEL,2,2,0.10
** AUSDRUCKEN INS .DAT-FILE
**
*NODE PRINT,NSET=BEL,TOTALS=YES,FREQ=1
U2,RF2
*NODE PRINT,NSET=QUER,FREQ=1
U1
*EL PRINT,ELSET=ENGQU,FREQ=1,TOTALS=YES
PEEQ,PRESS,MISES,S22,SP3,UVARM1
** ABLEGEN IM .FIL-FILE
**
*NODE FILE,NSET=BEL,FREQ=1
RF
*NODE FILE,NSET=ALLE,FREQ=1
U
*EL FILE,ELSET=ALLE,FREQ=1
PE,SP
*END STEP

```

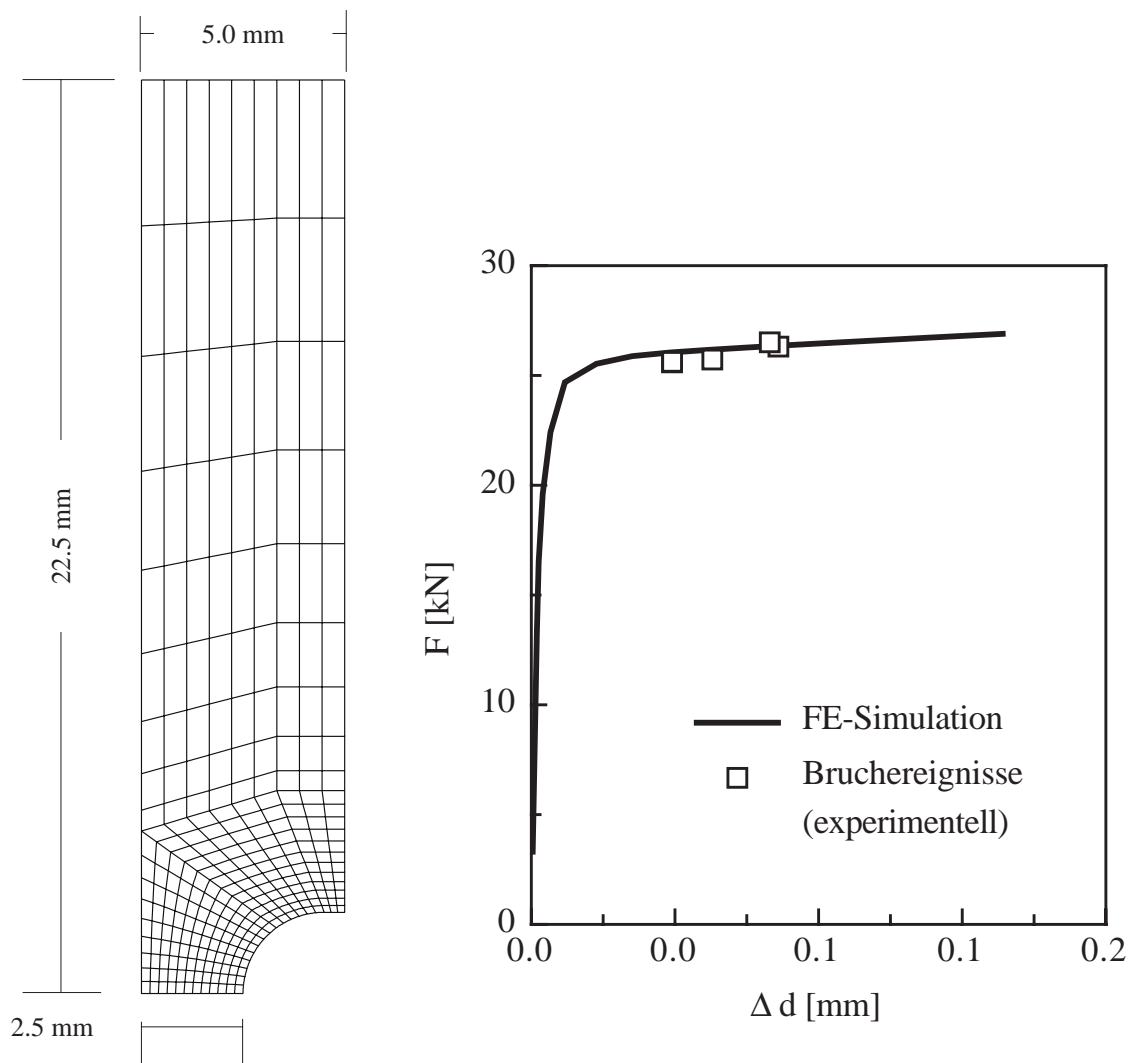


Bild 1: FE-Netz der untersuchten Kerbzugprobe (links) und Kraft- Einschnürungskurve aus der FE-Simulation sowie Bruchereignisse aus Experimenten (rechts)

Analog zur Vorgehensweise in [12, 13] werden anhand von diskreten Schritten der halben Probenverlängerung u_z Zustände der Einschnürung der Probe Δd und der angreifenden Last F identifiziert. Dazu ist lediglich eine FE-Rechnung nötig, bei der die entsprechenden Knotenverschiebungen und -kräfte ausgegeben werden.

Inkrement	äußere vorgegebene erschiebung u_z [mm]	Einschnürung $\Delta d=2u_r$ [mm]	äußere Kraft F [kN]
6	0.03	0.0039	19.600
8	0.04	0.0117	24.691
10	0.05	0.035	25.880
12	0.06	0.061	26.162
14	0.07	0.087	26.365

5.1 Berechnung der Weibullspannungen zu allen Lastschritten

Im ersten Schritt werden zu allen im *.fil-File abgelegten Lastschritten (Inkrementen) die Weibullspannungen für einen festgelegten Wert $m=22$ berechnet. Dazu verwendet man folgendes Eingabefile (*.inw):

```
*****
** Berechnung der Weibullspannungen zu allen
** Lastschritten (Inkrementen)
*****
*FILFILE=ESIS-RR-B
#KRAFT, NODESET=BEL, ri=2
****
*WEIBULL
#M=22.
#VOLO=1.
***
*SONSTIGEWEIFULLBERECHNUNG
#STEP=ALLE
** ende ****
```

Als Ergebnis erhält man die Liste der zu $m=22$ berechneten Spannungen zu allen gespeicherten Inkrementen:

```
Exponent m = 22.000000
Lastschritt, sig_w
1, 0.000000
2, 0.000000
3, 0.000000
4, 0.000000
5, 1087.826073
6, 1186.034568
7, 1313.461094
8, 1453.549041
9, 1575.964491
```

```

10, 1658.390926
11, 1720.814898
12, 1766.820852
13, 1800.969337
14, 1826.562090
15, 1847.292099
16, 1864.297337
17, 1878.682704
18, 1891.477281
19, 1902.969705
20, 1913.615728

```

5.2 Anpassung des Parameters m an experimentell ermittelte Bruchkräfte

Sind die Kräfte bekannt, bei der verschiedene Proben einer Meßreihe gebrochen ist, so kann aus den Bruchlasten der Weibullparameter m sowie die zu den vorgegebenen Lasten gehörenden Weibullspannungen bestimmt werden:

```

*****
** Anpassung der Weibullparameter an vorge-
** gebenen (Bruch)Lasten, Berechnung der
** zugehoerigen Weibullspannungen
*****
*FILFILE=ESIS-RR-B
#KRAFT, NODESET=BEL, RICHTUNG=2
***
*WEIBULL
#M=22.
#VOL0=1.
***
*ANPASSUNG
#LIST:
25596., 25620., 25726., 26314., 26510.
***
** ende ****

```

Obiges Eingabefile liefert folgendes Ergebnis:

```

Exponent m = 16.937344
Zustand, sig_w
25596.000000, 1640.334564
25620.000000, 1645.490226
25726.000000, 1668.915412
26314.000000, 1850.625772
26510.000000, 1893.646822

```

Den entsprechenden Wert für die Referenzspannung beträgt $\sigma_u = 1792.6$ Mpa (dieser Wert muß in der momentan aktuellen Version des Programms aus dem *.log-File oder vom Bildschirm-output abgelesen werden).

5.3 Anpassung des Parameters m an experimentell ermittelte Bruch-einschnürungen

Analog zur Vorgehensweise in Kap. 5.2 gelingt die Anpassung auch bei vorgegebenen Brucheinschnürungen der Proben. Das dazu benötigte Eingabefile lautet:

```
*****
** Anpassung der Weibullparameter an vorge-
** gebenen (Bruch)Einschnuerungen, Berechnung
** der zugehoerigen Weibullspannungen
*****
*FILFILE=ESIS-RR-B
#VERSCHIEBUNG, KNOTEN=2, RICHTUNG=1, F=-2.
****
*WEIBULL
#M=22.
#VOL0=1.
***
*ANPASSUNG
#LIST:
0.049, 0.063, 0.083, 0.086
****
*SONSTIGEWEIFULLBERECHNUNG
#Last
0.049, 0.063, 0.083, 0.086
** ende ****
```

und liefert das Ergebnis

```
Exponent m = 46.612671
Zustand, sig_w
0.049000, 1681.796225
0.063000, 1737.807282
0.083000, 1790.683448
0.086000, 1797.169136
```

Hier beträgt der Wert der Referenzspannung $\sigma_u = 1772.4$ (MPa).

Die Ergebnisse aus den Kapiteln 5.1, 5.2 und 5.3 sind im folgenden tabellarisch zusammengefaßt und in einem Weibull-Diagramm ($P_f; \sigma_w$) dargestellt:

Inkrement / Probe	äußere Kraft [kN]	Einschnürung Δd [mm]	Weibullspannung σ_w [Mpa] ($m=22$)	Weibullspannung σ_w [MPa] ($m=16.9$)	Weibullspannung σ_w [MPa] ($m=46.6$)
6	19.600	0.0039	1186.	1206.	1158.
8	24.691	0.0117	1453.	1498.	1397.
10	25.880	0.035	1658.	1705.	1605.
12	26.162	0.061	1766.	1806.	1732.
14	26.365	0.087	1826.	1863.	1800.
6F	25.596	-		1640.	-
6 Δd	-	0.049		-	1681.
7F	25.620	-		1645.	-
7 Δd	-	0.049		-	1681.
8F	25.726	-		1668.	-
8 Δd	-	0.063		-	1737.
9F	26.314	-		1850.	-
9 Δd	-	0.083		-	1790.
10F	26.510	-		1893.	-
10 Δd	-	0.086		-	1797.

Wie sich auch im europäischen Rundversuch gezeigt hat, hängen der Weibull-Parameter m und damit auch die WEIBULL-Spannungen stark von der Wahl der Beanspruchungsgröße, Bruchkraft oder -einschnürung, ab. Da diese charakteristische Größe ein monoton steigender Parameter sein muß, was bei einer Kraft nicht zwangsläufig gegeben ist, wird üblicherweise eine Verformungsgröße bevorzugt [8].

Fünf Versuche stellen keinesfalls eine ausreichende Stichprobe zur Bestimmung von WEIBULL-Parametern dar. Das gewählte Beispiel dient ausschließlich der Verifikation der Berechnungsalgorithmen.

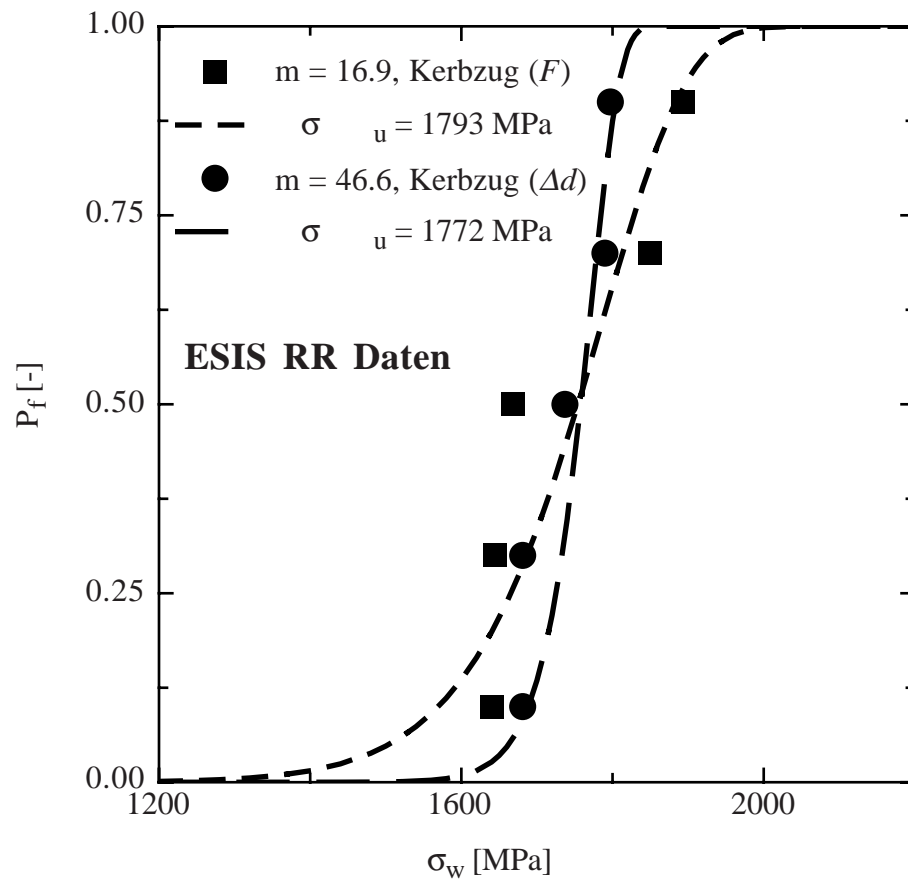


Bild 2: WEIBULL-Diagramm ($P_f ; \sigma_w$) der untersuchten Kerbzugproben

6 LITERATUR

- [1] Weibull, W.: "A statistical theory of the strength of materials", Ingeniørsvetenskapakademien, Nandlinger No. 151, 1939.
- [2] Weibull, W.: "The phenomenon of rupture in solids", Ingeniørsvetenskapakademien, Nandlinger No. 153, 1939.
- [3] Beremin, F.M.: "A local criterion for cleavage fracture of a nuclear pressure vessel steel", Metallurgical Transactions 14A (1983), 2277-2287.
- [4] Mudry, F.: "A local approach to cleavage fracture", Nuclear Engineering and Design 105 (1987), 65-76.
- [5] Stroh, A.N.: "The formation of cracks as a result of plastic flow", Proc. Roy. Soc. A223 (1954), 404.
- [6] Griffith, A.A.: "The phenomena of rupture and flow in solids", Phil. Trans. Roy. Soc. London A221 (1920/21), 163-198.
- [7] Minami, F., Brückner-Foit, A., Munz, D. und Trolldenier, B.: "Estimation procedure for the Weibull parameters used in the local approach", Int. J. Fracture 54 (1992), 197-210.
- [8] ESIS P6-94 D "Draft procedure to measure and calculate local fracture criteria on notched tensile specimens, European Structural Integrity Society, March 1997.
- [9] Khalili, A. and Kromp, K., "Statistical properties of Weibull estimators", J. Materials Science 26 (1991), 6741-6752.
- [10] Brochard, J., Combescure, A., Ignaccolo, S. und Mottet, G.: "On the numerical variabilities in applying the local criterion for cleavage fracture", Proc. SMiRT (Hrsg. K. Kußmaul), Stuttgart, 1993, 303-314.
- [11] DIN-E 51110, Teil 3: "Prüfung von keramischen Hochleistungswerkstoffen, 4-Punkt-Biegeversuch, Statistische Auswertung, Ermittlung der Weibullparameter", Normenausschuss Materialprüfung (NMP) im DIN Deutsches, Institut fuer Normung e.V., Berlin.
- [12] Brocks, W.: "Numerical round robin on micromechanical models", Mechanisms and Mechanics of Damage and Failure (Hrsg. J. Petit), Proc. ECF 11, Poitiers, 03.-06.09.96, Vol. I, 163-168.
- [13] Brocks, W.: „Numerical round robin on micromechanical models“ Report IWM T 8/95, Fraunhofer-Institut für Werkstoffmechanik, Freiburg, March 1995.