

Optimierung eines Simulationsprogramms zur Lebensdauervorhersage von Hoch- temperaturwerkstoffen

**Optimization of a Simulation Software for the Lifetime Prediction
of High Temperature Materials**

D i p l o m a r b e i t

Peng Wang

(Matrikelnummer: 1100145)

aus Liaoning / China

Betreuer: Prof. Dr.-Ing. O. von Stryk
Fachgebiet Simulation und Systemoptimierung
Fachbereich Informatik

Prof. Dr.-Ing. C. Berger
Dr.-Ing. A. Scholz
Fachgebiet und Institut für Werkstoffkunde
Fachbereich Maschinenbau

Laufzeit: 01.05.2007 – 31.07.2007

Technische Universität Darmstadt

Kurzzusammenfassung

Die Lebensdauervorhersage von Hochtemperaturbauteile ist eine sehr wichtige Aufgabe in den aktuellen Forschungsarbeiten. Das Simulationsprogramm *SARA* wurde zu diesem Zweck entwickelt und in der Industrie eingesetzt. Die bei der Simulation benötigten wichtigen Werkstoffdaten werden kontinuierlich geändert, da das neuste Wissen aus aktuellen Forschungen stets in das Programm umgesetzt werden soll. Um an diesen Forderungen anzupassen sind optimierte Datenstrukturen und erhöhte Modularität des Programms zu erwarten. Im Rahmen dieser Arbeit wurden die Optimierung der Datenstruktur und des Programmverlaufs sowie die Modularisierung von *SARA* durchgeführt

Kerben sowie dadurch entstehende mehrachsige Beanspruchungen an der Oberfläche beeinflussen die Lebensdauer von Hochtemperaturbauteilen stark. Um diese Beanspruchungsfälle bei der Simulation zu berücksichtigen wurde *SARA* auf mehrachsige Beanspruchungen erweitert.

Symbolverzeichnis

ε_1	Dehnungsausschlag (Haltephase 1) in %
ε_2	Dehnungsausschlag (Haltephase 2) in %
ε_3	Dehnungsausschlag (Haltephase 3) in %
ε_4	Dehnungsausschlag (Haltephase 4) in %
$\dot{\varepsilon}_r$	Rampendehnungsgeschwindigkeit (kurz: Dehnrage) in %/min
ε_f	Kriechdehnung in %
t_{H1}	Haltezeit (Haltephase 1) in h
t_{H2}	Haltezeit (Haltephase 2) in h
t_{H3}	Haltezeit (Haltephase 3) in h
t_{H4}	Haltezeit (Haltephase 4) in h
t	Beanspruchungsdauer, Zeit in h
t_u	Beanspruchungsdauer bis zum Bruch, Bruchzeit in h
T_{min}	Minimale Temperatur eines Zyklus in °C
T_{max}	Maximale Temperatur eines Zyklus in °C
T_{anf}	Temperatur am Anfang der Relaxation in °C
T_{end}	Temperatur am Ende der Relaxation in °C
σ'_j	Äußere Spannung am Ende der Haltephase j in MPa
σ_j	Äußere Spannung am Anfang der Haltephase j in MPa
$\sigma_{i,j,anf}$	Innere Spannung am Anfang der Haltephase j in MPa
$\sigma_{i,j,end}$	Innere Spannung am Ende der Haltephase j in MPa
σ_w	Wirksamspannung in MPa
$A^{1)}$	Werkstoffkonstant der Ramberg-Osgood-Gleichung

¹⁾ Normbegriff K'

$s^{2)}$	Werkstoffkonstant der Ramberg-Osgood-Gleichung
L_{krit}	Kritisch relative Lebensdauer
L_A	relativer Lebensdaueranteil aus Ermüdung
L_t	relativer Lebensdaueranteil aus Kriechen
N	Wechselzahl
N_A	Anrisswechselzahl
N_{A0}	Bezugsanrisswechselzahl
K	Werkstoffkonstant der Norton-Bailey-Gleichung
m	Werkstoffkonstant der Norton-Bailey-Gleichung
α_1, β_1	Werkstoffkonstant der Manson-Coffin-Gleichung, elastischer Anteil
α_2, β_2	Werkstoffkonstant der Manson-Coffin-Gleichung, plastischer Anteil

²⁾ Normbegriff $1/n'$

Inhaltsverzeichnis

KURZZUSAMMENFASSUNG	I
SYMBOLVERZEICHNIS	III
1 EINLEITUNG	1
2 AUFGABENSTELLUNG	3
3 STAND DES WISSENS.....	7
3.1 Simulationsprogramm <i>SARA</i>	7
3.2 An- und Abfahrverhalten von Komponenten in thermischen Maschinen und Anlagen	8
3.3 Wechselverformungsverhalten	9
3.4 Schadensakkumulation.....	10
3.5 Mehraxiales Verhalten	11
3.6 Aktuelle Forschungsarbeiten	13
4 SIMULATION DES VERHALTENS VON HOCHTEMPERATUR- WERKSTOFFEN	17
4.1 Abstraktion der Beanspruchungsfälle	17
4.2 Kriechen und Ermüdung	18
4.2.1 Kriechen und Relaxation	19
4.2.2 Ermüdung	20

4.3	Konstruktion der Hysteresisschleife	21
4.4	Lebensdaueranalyse.....	25
5	OPTIMIERUNG DER DATENSTRUKTUR UND DES PROGRAMMVERLAUFS	27
5.1	Datenstruktur für Kennwerte	27
5.2	Datenstruktur für Parameter.....	29
5.3	Datenstruktur für Faktoren	29
5.4	Optimierung des Programmverlaufs.....	31
6	MODULARISIERUNG VON SARA.....	35
6.1	Analyse der Programmstruktur von <i>SARA</i>	35
6.2	Modularisierung von <i>SARA</i> mit „Information Hiding“.....	37
7	ERWEITERUNG VON SARA AUF MEHRACHSIGE BEANSPRUCHUNG	39
7.1	Implementierung auf der Grundlage einer inelastischen Finit-Element-Rechnung.....	39
7.2	Implementierung auf der Grundlage der Neuber-Hyperbel-Hypothese	42
8	ERZIELTE ERGEBNISSE DURCH OPTIMIERUNG UND ERWEITERUNG VON SARA	45
8.1	Berechnete Lebensdauer und gemessene Laufzeiten	46
8.2	Berechnungsergebnisse von mehrachsiger Beanspruchung	46
8.3	Schlussfolgerung.....	47
9	ZUSAMMENFASSUNG	49

10	LITERATURVERZEICHNIS.....	51
11	BILDER.....	55

1 Einleitung

Die Forderung nach wirtschaftlicheren und umweltfreundlichen Anlagen im Bereich der Energieversorgung lässt sich im Allgemeinen hauptsächlich durch eine Anhebung von Druck und Temperatur realisieren. Die Erreichung der angestrebten Wirkungsgrade erfordert den Einsatz von warmfesten und hochwarmfesten Werkstoffen. In Anlagen der Kraft- und Wärmeindustrie kommen zahlreiche massive Bauteile aus warmfesten und hochwarmfesten Werkstoffen zum Einsatz, die unterschiedlichen thermisch-mechanischen Beanspruchungen ausgesetzt sind. Somit ist die Lebensdauervorhersage solcher Hochtemperaturbauteile eine sehr wichtige Aufgabe bezüglich Zuverlässigkeit und Sicherheit der Anlagen.

Eine Lebensdauervorhersage von Kraftkomponenten basiert in erster Linie auf Untersuchungen von vorhandenen Bauteilen, wobei neben der Kenntnis der statischen Kriech- und Ermüdungseigenschaften vor allem die Beschreibung des Werkstoffverhaltens unter zeitlich veränderlicher Kriechbeanspruchung und des betriebsähnlichen Kriechermüdungsverhaltens von grundlegender Bedeutung ist. Dafür werden grundsätzlich zwei Vorgehensweisen unterschieden: experimentelle Untersuchungen und auf Rechenmodellen basierende Simulationen. Es wird heutzutage vermehrt auf das Hilfsmittel der rechnergestützten Simulation zurückgegriffen. In Anlehnung an [1] ist eine solche Simulation hauptsächlich auf wirtschaftliche und zeitliche Gründe zurückzuführen, da experimentelle Untersuchungen zur Abbildung der Vielfalt der Parameter meist mit einem hohen Aufwand an Zeit und Kosten verbunden sind. Die Ergebnisse der Simulationen bilden sodann die Entscheidungsgrundlage für Bauteilauslegung, Überwachung und Restlebensdauerabschätzung.

Auf der Grundlage der Erkenntnisse zum Werkstoffverhalten wurde ein rechnergestütztes Verfahren zur Anrissdauer- und Anrisswechselzahlvorhersage als Simulationsprogramm SA-RA (**S**chadens**a**kkumulation zur **R**echner**a**nwendung) am IfW TU Darmstadt entwickelt, das nun infolge neuer Entwicklung der

1 Einleitung

Technik und neuer Anforderung der Kraftwerkindustrie erweitert und optimiert werden muss.

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurde Optimierung und Erweiterung des Simulationsprogramms *SARA* auf mehrachsige Beanspruchung vorgenommen.

.

2 Aufgabenstellung

Aufgaben dieser Diplomarbeit sind:

- 1 Erweiterung und Implementierung des Rechenmodells um mehrachsige Beanspruchungen;
- 2 Optimierung der Datenstruktur und des Programmverlaufs, um die derzeit vergleichsweise langen Rechenzeiten deutlich zu verbessern;
- 3 Modularisierung, um die Wartbarkeit, Wartungsfreundlichkeit und die Wiederverwendbarkeit von Modulen zu gewährleisten;
- 4 Diskussion über die allgemeine informatikbezogene Vorgehensweise bei der Lebensdauersimulation von Hochtemperaturwerkstoffen.

Im Einzelnen handelt es sich bei der **Teilaufgabe 1** um die Erweiterung eines rechnergestützten Anrisslebensdauervorhersageverfahren auf den Fall mehrachsige Kriechermüdigungsbeanspruchung von Kraftwerksbauteilen. Angestrebt wird bei dem am IfW laufenden Forschungsvorhaben der Nachweis der Übertragbarkeit von Lebensdauervorhersageverfahren auf reale mehrachsige Bauteilbeanspruchungsfälle unter Kalt-, Warm- und Heißstartvorgängen.

Bei dem am IfW entwickelten phänomenologischen Ansatz handelt es sich um eine Synthese von zyklischen Spannungs-Dehnungs-Hysteresisschleifen und eine gekoppelte Analyse der rechnerischen Schädigung mithilfe der Ermüdungs- und Kriechanteile überlagernden Schadensakkumulationshypothese. Die Erweiterung auf thermomechanische Beanspruchungsabläufe wurde in einer vorangegangenen Diplomarbeit angegangen [2]. Die Erweiterung auf mehrachsige Beanspruchung ist ein Ziel der vorliegenden Diplomarbeit.

Zur Berücksichtigung der Mehrachsigkeit soll in dem phänomenologischen Ansatz die Möglichkeit geschaffen werden, Beanspruchungszyklen aus einfachen Abschätzungen, Bauteilzeichnungen oder Finit-Element-Rechnungen zu verarbeiten.

Ein erster Lösungsansatz betrifft die Verarbeitung von Berechnungsergebnissen mit der Finit-Element-Methode. Bei dieser Berechnung fallen für mehrachsige Berechnungen zeitabhängige Werte der Spannungen und Dehnungen in allen drei Koordinaten an. Diese lassen sich mithilfe von Hypothesen zu Vergleichspannungen- bzw. Vergleichsdehnungen umsetzen. Ausgehend von diesen Größen erfolgt dann die Berechnung der Lebensdauer mit dem phänomenologischen Rechenmodell *SARA*, wie es bisher nur für einachsige Beanspruchung existiert.

In einem zweiten Lösungsansatz soll speziell für Kerbstellen mit gegebener Kerbgeometrie und damit bekannter Kerbformzahl sowie vorliegender Nennspannung die Möglichkeit eingerichtet werden, mithilfe der Neuber-Hyperbel unter Heranziehung von zyklischen Fließkurven ggf. unter Variation der Haltezeit derselben Dehnungs-Zeitverläufe abzuleiten und wiederum einer Rechnung mit *SARA* zuzuführen. Dabei handelt es sich um eine Abschätzung der maximalen Dehnung im Kerbgrund, worüber in Arbeiten an anderen Stellen gute Erfahrungen für den Fall statische Beanspruchung bei herkömmlichen warmfesten Stählen vorliegen.

Das Ziel der **Teilaufgabe 2** besteht darin, die für die Simulation benötigten Datenstrukturen und die Bearbeitung von Daten (Programmverlauf) so aufeinander zu bestimmen, dass ein optimaler Schnittpunkt zwischen Flexibilität und Effizienz gefunden wird. Die rechnerische Simulation des Werkstoffverhaltens ist im Allgemeinen dadurch geprägt, dass die zur Verfügung stehenden Werkstoffdaten kontinuierlichen Änderungen unterliegen. Dabei sind sowohl inhaltliche als auch formelle Änderungen bezüglich Werkstoffdaten möglich. Eine inhaltliche Änderung, beispielsweise durch neuere Versuchstechnik, ist weniger problematisch, da sich die Änderungen ausschließlich auf die Daten selbst beschränkt. Im Gegensatz dazu kann eine formelle Änderung wie etwa die Darstellung der Temperatur mit Gleitkommazahlen statt ganzer Zahlen zur Erhöhung der Genauigkeit unmittelbar zu einer Änderung des Programmcodes an mehreren Stellen führen.

Darüber hinaus lassen sich Werkstoffdaten auf verschiedener Weise darstellen. Neben der Beschreibung der Werkstoffeigenschaften durch einige wenige Parameter ist eine ausführliche Auflistung bzw. tabellarische Darstellung der aus Versuchen ermittelten Datenpunkte in vielen Fällen unvermeidbar. Entsprechend muss ein Simulationsprogramm mit unterschiedlichen Darstellungsweisen von Daten auskommen. Somit ist die Anpassungsfähigkeit und die Flexibilität bezüglich der Datengegebenheit und im Hinblick auf die zukünftige Entwicklung eine sehr erwünschte Eigenschaft für eine Simulationssoftware für Hochtemperaturwerkstoffe.

Die **Teilaufgabe 3** ist eng mit der zweiten Teilaufgabe verbunden. Durch die Teilaufgabe 3 soll hauptsächlich die Simulationssoftware *SARA* bezüglich Wartbarkeit und Erweiterbarkeit verbessert werden. Dabei sollen die Bedürfnisse der Entwickler von Bauteil berücksichtigt werden. Diese besitzen einerseits als Anwender oft nur beschränkte Programmierkenntnisse besitzen, andererseits müssen sie jedoch als Entwickler den Programmcode ändern, bzw. an den unterschiedlichen Daten anpassen. Dafür wird eine Modularisierung der Anwendung durchgeführt. Die angestrebte Modularität erfüllt man durch die so genannten „Datenabstraktion“, die wiederum in der zweiten Aufgabe beinhaltet ist. Zu erzielen durch die Abstraktion ist dabei die konkrete Implementierung der Datenstruktur für die anderen Segmente des Programms transparent zu halten.

Zum Schluss werden einige Gemeinsamkeiten bei der Simulation von Hochtemperaturwerkstoffen zusammengefasst. Aus dem Blickwinkel der Informatik werden einige allgemeine Aspekte der Simulation diskutiert (**Teilaufgabe 4**).

2 Aufgabenstellung

3 *Stand des Wissens*

3.1 Simulationsprogramm SARA

Das Simulationsprogramm SARA wurde zur Vorhersage des Anrissverhaltens bei mehrstufiger Kriechermüdungsbeanspruchung der beheizten Oberfläche von Kraftwerks- und Turbinenbauteilen (**Bild 1**) für aktuelle Stahlsorten sowie Einzelschmelzen entwickelt. Auf der Grundlage von Regeln zur Beschreibung von zyklischer Verformung und rechnerischer Schädigung ermittelt SARA für beliebig vorgebbare Teilzyklen (An- und Abfahrzyklen) einen Vorhersagewert für Anrissdauer und Anrisswechselzahl.

Die Programmstruktur (**Bild 2**) umfasst einen Eingabeteil zur Eingabe von Werkstoff- und Beanspruchungsdaten, einen Berechnungsteil, der die Synthese der Spannungs-Dehnungs-Hysteresisschleifen und die Ermittlung der rechnerischen Schädigung für Kriechen und Ermüden nach der verallgemeinerten Schadensakkumulationshypothese (Lebensdaueranteilregel für Kriechen und Miner-Regel für Ermüden)

$$\sum \frac{N}{N_{A0}} + \sum \frac{\Delta t}{t_u} = L_A + L_t = L_{krit} \quad (3.1)$$

vornimmt, und schließlich einen Ausgabeteil zur tabellarischen Ausgabe detaillierter Berechnungsergebnisse.

Der Berechnungsteil umfasst in einem ersten Schritt eine Synthese der Hystereseschleife unter Berücksichtigung der bei den hier betrachteten Stählen typischen zyklischen Entfestigung anhand von zyklischen Fließkurven in der vom Wechselzahlverhältnis N/N_A abhängigen Staffelung 0/0,03/0,05/0,1/0,3/0,5/0,8 und 1. In einem zweiten Schritt wird der Lebensdauerverbrauch unter Schädigung

gung durch Kriechen und Ermüden nach der oben angegebenen Schadensakkumulationsregel simuliert. *SARA* benötigt zeitabhängige statische Daten wie Kriechkurven und Zeitbruchkurven sowie zyklische Daten wie Fließkurven und Anrisskennlinien ohne und mit kurzer Haltezeit heran, die als interne Daten gespeichert oder als externe Daten vorgebar sind. Ferner enthält *SARA* experimentell abgeleitete Faktoren zur Berücksichtigung längerer Haltezeiten und Dehnraten sowie eine Prozedur zur Berücksichtigung von unsymmetrischer Zug- und Druckdehnung auf der Grundlage des Smith-Watson-Topper-Parameters.

Die Ergebnisausgabe umfasst in tabellarischer Form die Angabe der Anrisswechselzahl und der Anrissdauer sowie der relativen Lebensdaueranteile für Kriechen und Ermüden. Außerdem werden die Lebensdaueranteile sortiert nach Kalt-, Warm- und Heißstartzyklen in 10 %-Schritten der Anrisswechselzahl ausgegeben.

3.2 An- und Abfahrverhalten von Komponenten in thermischen Maschinen und Anlagen

Hochtemperaturbauteile thermischer Maschinen und Anlagen unterliegen - zeitlich konstanten - primären Kriechbeanspruchungen, die von zeitlich veränderlichen niederfrequenten sekundären Kriechermüdungsbeanspruchungen (LCF + TMF) überlagert werden [3] (Bild 1). Zusätzlich können sich hochfrequente Schwingbeanspruchungen (HCF) überlagern. Die verwendeten Abkürzungen haben folgende Bedeutung:

- LCF: Low Cycle Fatigue
- TMF: Thermal Mechanical Fatigue
- HCF: High Cycle Fatigue

An- und Abfahrvorgänge bewirken in der beheizten Oberfläche massiver Bauteile wie Wellen, Scheiben und Gehäusen von Dampfturbinen eine überwiegend dehnungskontrollierte thermomechanische (TMF-)Ermüdung [4]. Die Hö-

he der dabei auftretenden Dehnungen ist von der sich dabei einstellenden Temperaturänderungsgeschwindigkeit und von Bauteilform und –Geometrie abhängig. Hier ist eine Vielfalt von thermomechanischen Beanspruchungsabläufen bei Kaltstart-, Warmstart- und Heißstartvorgängen vorstellbar [5][6][7][8][9]. Eine temperaturinduzierte Ermüdungsbeanspruchung kann vielfach noch formverstärkt sein. Durch ihre örtliche Konzentration kann eine Ermüdungsbeanspruchung überlagert durch Kriechanteile aus Relaxationsvorgängen zu einer lebensdauerermindernden Anrissbildung führen. Hochfrequente Schwingungsbelastungen (HCF) werden – individuell betrachtet – meistens zu keiner nennenswerten Schädigung von Kraftwerksbauteilen führen. Die Überlagerung von niederfrequenten Beanspruchungen (LCF, TMF) mit HCF-Beanspruchungen wird jedoch zu einer Reduzierung der Lebensdauer führen. Die Parameter, die diese Überlagerung beschreiben, sind bisher wenig untersucht worden. Die angestrebten kürzeren An- und Abfahrzeiten von konventionellen Kraftwerken führen dabei zu einer Verschärfung der Situation.

3.3 Wechselverformungsverhalten

Die Ermüdungsbeanspruchung entsteht durch An- und Abfahrvorgängen, die an der beheizten Oberfläche massiver Bauteile wie Turbinenwellen (Bild 1) zu dehnungsinduzierten Wechselbeanspruchungen führen. Der Verlauf eines Dehnwechselzyklus ergibt in Verbindung mit der resultierenden Spannungsantwort unter der Annahme isothermen Verformungsverhalten eine in guter Näherung geschlossene Hysteresisschleife (**Bild 3**).

Neben der reinen Ermüdung treten bei metallischen Werkstoffen im Hochtemperatureinsatz häufig auch Dehnwechselbeanspruchungen mit überlagerten Zeitstandbeanspruchungen auf. Ein solcher kombinierter Beanspruchungsfall wird auch als Kriechermüdungsbeanspruchung bezeichnet. Das Kriechermüdungsverhalten ist aufgrund seiner komplexen Überlagerung von Ermüden und Kriechen in vereinfachter Weise mittels Standarddehnwechselzyklen ohne sowie mit gleichen oder unterschiedlichen Zug- und Druckhaltezeiten prüftechnisch abzubilden. Hierbei werden die Dehnungsschwingbreite $\Delta\varepsilon$ und die Rampengeschwindigkeit $\dot{\varepsilon}_r$ konstant gehalten. Bei einem betriebsähnlichen Dehnwechselzyklus beträgt der Dehnungsausschlag bei der Abfahrphase ungefähr die Hälfte des Dehnungsausschlags bei der Anfahrphase. Die Betriebsphase ist gekennzeichnet durch eine Gesamtdehnung von nahezu Null.

Zur Beschreibung des zyklischen Spannungs-Dehnungs-Verhaltens wird die zyklische Fließkurve herangezogen, die sich durch den Ansatz von Ramberg-Osgood:

$$\varepsilon_a = \frac{\sigma_a}{E} + \left(\frac{\sigma_a}{A}\right)^s \quad (3.2)$$

beschreiben lässt. Die zyklische Fließkurve kann aus dehnungsgeregelten Standarddehnwechselfersuchen (LCF-Versuchen) ermittelt werden [5][8][9].

Die Werkstoffcharakteristik bei rein wechselnder Zug-Druck-Beanspruchung wird meistens durch die Anrisskennlinien des Werkstoffs beschrieben. Als die bekannteste analytische Beschreibung gilt der Ansatz von Manson und Coffin:

$$\Delta\varepsilon = \alpha_1 \cdot N_A^{\beta_1} + \alpha_2 \cdot N_A^{\beta_2} \quad (3.3)$$

Aus dem Spannungsverlauf bei Standarddehnwechselbeanspruchung mit Haltezeiten bei maximaler Zug- und Druckdehnung geht hervor (Bild 4), dass sich während einer Phase konstanter Dehnung die Spannungsbeträge verringern. Dieser Relaxationsvorgang wird durch die Umwandlung elastischer Dehnungsanteile in Kriechdehnung verursacht. Dem entsprechend lassen sich zur Beschreibung des Relaxationsverhaltens Kriechgleichungen, hier die Norton-Bailey-Gleichung:

$$\varepsilon_f = K \cdot \sigma_w^n \cdot t^m \quad (3.4)$$

Heranziehen [5][10].

3.4 Schadensakkumulation

Klassische Verfahren zur Beurteilung des Ermüdungs- bzw. Kriechermüdungsverhaltens basieren auf einer formalen Beschreibung des Anrissverhaltens durch Anrisskennlinien (Manson-Coffin) aus einachsigen isothermen Experimenten. Alternative Verfahren befassen sich mit einer Akkumulation von rechnerischen Lebensdaueranteilen [5][6][7][8][9][3], die jedoch in der Regel mikrostrukturelle Schädigungsvorgänge wie die Bildung und das Wachstum von Mikrorissen oder Poren nicht direkt berücksichtigen. Dabei wird von einer getrennten Erfassung von Ermüdungsschadensanteilen und Kriechschadensanteilen ausgegangen (Gl. (3.1))

Hierbei handelt es sich um die Miner-Regel für Ermüden und die Lebensdaueranteilregel für Kriechen bzw. Relaxieren (Haltezeiteinfluss). Beide Schadensanteile werden näherungsweise als voneinander unabhängig akkumulierbar betrachtet. Unter Berücksichtigung von zyklischer Ver- bzw. Entfestigung sowie Mittelspannungseinflüssen, einem Ansatz für die innere Spannung und einem Konzept, welches die Wechselwirkung von Kriechen und Ermüden berücksichtigt, ließen sich Werte der kritischen Lebensdauer D_{krit} zwischen 0,5 und 0,9 werkstoff- und temperaturabhängig aus langzeitigen betriebsähnlichen Kriechermüdungsversuchen ableiten [5][6][8][9], wobei als Schadenseintritt die Erreichung einer kennzeichnenden Risslänge in der Größenordnung von 1 mm zugrunde liegt.

Schadensakkumulationshypothesen werden in Regelwerken zur Überwachung von Bauteilen als Lebensdauerzähler [3] angewendet. Dabei werden jedoch unter starker Vereinfachung ausschließlich isotherme Beanspruchungsvorgänge zugrunde gelegt. Deshalb können die Bildung von Schadenssummen und die darauf aufbauende Lebensdauerprognose entweder überkonservativ sein oder auf der unsicheren Seite liegen. Zusätzlich besteht Unsicherheit in der Bewertung der Mehrachsigkeit der Beanspruchung.

In bisherigen Untersuchungen an einem ferritischen Stahl vom Typ 1CrMoNiV und martensitischen Stählen vom Typ 9-10CrMoWVNbN sowie 12CrMoV konnte für den Fall der beheizten Oberfläche massiver Bauteile unter meist isothermer einachsiger Beanspruchung die Eignung dieser Schadenakkumulationshypothese bei der Lebensdauervorhersage (**Bild 5**) gezeigt werden (IfW-Anwenderprogramm SARA).

Ein wichtiges Ergebnis bisheriger Arbeiten ist, dass sich die Schadensakkumulationshypothese auch auf den allgemeinen Fall des mehrstufigen einachsigen Kriechermüdungsbeanspruchungsfalls anwenden ließ [5][6][8][9].

3.5 Mehraxiales Verhalten

Die Absicherung der Hochtemperaturbauteile [7][11] erfolgt vor allem gegen kritische Verformung und gegen Bildung von Makrorissen, teilweise auch gegen Rissfortschritt. Die Spannungsumverteilung durch Kriechen und die resultierende Kriechverformung sind einer dreiachsigen Berechnung mit der ine-

lastischen Finit-Element-Methode zugänglich. Die Wirkung einer überlagerten Dehnwechselbeanspruchung ist hierbei näherungsweise, wenn auch noch nicht mit voller Zykluszahl berechenbar. Grundlage dieser Berechnungen sind Kriechgleichungen und Plastizitätsgleichungen. Die Verallgemeinerung auf den 3D-Fall erfolgt über Vergleichsspannung, Vergleichsdehnung und Kriech- bzw. Fließhypothesen, sowie Zusatzregeln, wie die Dehnungsverfestigungsregel. In zunehmendem Maße werden konstitutive Gleichungen entwickelt (z.B. [7][11]), die eine generelle 3D-Beschreibung des inelastischen Werkstoffverhaltens ermöglichen. Sie beschreiben nicht nur reines Kriechen und Ermüdung, sondern auch z.B. die Relaxation bei Ermüdungsbeanspruchung mit Haltezeit.

Zweiachsige Beanspruchung an der Bauteiloberfläche kann zu Rissbildung unter Kriechermüdungsbeanspruchung führen. Es gibt eine Reihe von Risseinleitungshypothesen, beispielsweise für die Überlagerung von Kriech- und Ermüdungsschadensanteilen bei konventioneller Betrachtung, aber auch Theorien der Schädigungsentwicklung für konstitutive Gleichungen. Sie alle bedürfen einer experimentellen Absicherung, die oft noch durch Versuche an einachsigen beanspruchten Proben erfolgt. Speziell im Kriechermüdungsfall wird das aber nicht mehr als ausreichend erachtet [7][11]. Bei einer zur Rissbildung führenden Schädigung stellt sich beispielsweise die Frage nach der verantwortlichen Spannung. Bei kürzerzeitigen Hochtemperaturbeanspruchungen weisen warmfeste und hochwarmfeste Werkstoffe meist noch ein relativ hohes Verformungsvermögen auf und die von Mises-Vergleichsspannung ist als versagensmaßgebend anzusehen. Mit einer zunehmenden Zeit-Temperatur-Wirkung ist meist ein Rückgang des Verformungsvermögens verbunden und die maximale Zugspannung gewinnt einen stärkeren Einfluss. Auf beide Spannungen und eventuell noch auf die hydrostatische Vergleichsspannung zurückgreifende Versagenshypothesen sind werkstoff- und beanspruchungsabhängig und ihre Anwendung bedarf der Überprüfung durch zweiachsige Experimente [7][11].

Versuche mit mehrachsiger Beanspruchung sind einerseits an Proben mit inhomogener Spannungsverteilung (**Bild 6**) möglich, insbesondere an gekerbten Proben [10][12][13][9], aber auch an fliehkraftbeanspruchten Proben [7][11]. Andererseits sind mehrachsige Versuche an dünnwandigen Rohrproben unter Längs-Zug-Druck und Torsion oder unter Längs-Zug-Druck und Innendruck möglich [7][11]. Von besonderem Interesse für das Studium der Risseinleitung unter Kriechermüdungsbedingungen ist daher eine in den letzten zwei Jahrzehnten verstärkt angewandte biaxiale Prüftechnik an Kreuzproben, auf die in [13] am Beispiel der konventionellen Stähle vom Typ 1CrMoNiV und 12CrMoV näher eingegangen wurde. Entsprechende Experimente werden in der Regel

isotherm durchgeführt. Thermomechanische Versuche mit variablem Temperatur-Zeit-Verlauf, also anisotherme Dehnwechselversuche wurden an Kreuzproben bisher kaum durchgeführt. Das Dehnungsverhältnis $\theta = \varepsilon_x / \varepsilon_y$ ist bei Dehnwechselversuchen im Bereich von -1 bis $+1$ einstellbar und ermöglicht damit die Abbildung proportionaler und nichtproportionaler Beanspruchungen in einem weiten, bauteilrelevanten Bereich.

3.6 Aktuelle Forschungsarbeiten

Für die Entwicklung von Rechenmodellen zur Lebensdauervorhersage von Kraftwerksbauteilen unter thermisch-mechanischer Kriechermüdnungsbeanspruchung fehlt einerseits der Nachweis der Übertragbarkeit der oben angegebenen Schadensakkumulationsregel auf thermomechanische Kriechermüdnungsbeanspruchung (**Bild 7**) und andererseits auf den allgemeinen Fall mehrachsiger Beanspruchung.

Von besonderem Interesse ist hierbei die Quantifizierung der Einflüsse von beschleunigten An- und Abfahrprozessen auf die Lebensdauer von Kraftwerkskomponenten.

Die im AVIF Projekt A 145 entwickelten isothermen Lebensdauermodelle für die LCF-Beanspruchung mit HCF-Überlagerung [14] sollen einen Teil der Ausgangsbasis bilden. Aufgrund der Defizite in der experimentellen Datenbasis über das Verhalten von Stahlwerkstoffen bei TMF mit Haltezeiten bei Maximaltemperatur und/oder überlagerten HCF-Beanspruchungen sind derzeit praktisch keine numerischen Modelle vorhanden, mit denen das Lebensdauerverhalten bei den genannten Beanspruchungen ausreichend genau abgeschätzt werden kann. Das führt zu erheblichen Unsicherheiten bei der Auslegung von Bauteilen sowie zu erhöhtem Zeit- und Kostenaufwand.

Als experimentelle Grundlage für die beabsichtigte Erweiterung des auf der Schadensakkumulationshypothese basierenden phänomenologischen Lebensdauervorhersageverfahrens liegen einachsige Kriechermüdnungsversuche mit betriebsähnlichem Beanspruchungsablauf am Stahl X12CrMoNiWV NbN10-1-1 [5][8][9] bis zu Versuchsdauern von 11000 h vor. Mit der Weiterentwicklung des o.g. phänomenologischen Ansatzes auf Stahlsorten, also auf einer Streubandanalyse basierender Vorhersage, befasste sich [4].

Die für die Werkstoffbeschreibungen benötigten Basisdaten zum Kriech- und Relaxationsverhalten für die genannten Stähle liegen vor [8][9]. Auch hinsichtlich des Standarddehnwechselverhaltens liegen ebenfalls Basisdaten, teilweise auch dehnratenabhängig ohne und mit kurzer Haltezeit vor [4][8][9].

Auf theoretischem Gebiet befasst sich derzeit eine Arbeit am Beispiel moderner 9-10%Chrom-Stähle mit der Modellierung von regelloser Zeitstandbeanspruchung [12]. Die Modellierung einer 3D-Kriech- und Kriechermüdungsbeanspruchung ist Gegenstand eines laufenden Vorhabens [13], das sich jedoch auf die konventionellen 1 und 12%CrMo(Ni)V-Stähle beschränkt. Für Finite-Elemente Analysen wird hierzu am IfW das Programmsystem ABAQUS [9][13] eingesetzt. Ein am IfW installiertes Biaxialprüfsystem zur Prüfung kreuzförmiger Proben ermöglicht die zweiachsige experimentelle Nachbildung der Beanspruchung an der beheizten Oberfläche massiver Bauteile unter isothermer und besonders auch unter thermomechanischer Kriechermüdungsbeanspruchung [13] (**Bild 8**).

Ein phänomenologisches Verfahren zur Synthese des Spannungs-Dehnungspfads für betriebsähnliche Beanspruchungsabläufe mit gekoppelter Ermittlung der rechnerischen Schädigung auf der Basis der Schadensakkumulationshypothese (Gl.3.1) [5][6][7][8][9] – Anwenderprogramm SARA – wird in einem laufenden Forschungsvorhaben am IfW auf thermomechanische Beanspruchungsabläufe gemäß Bild 7 erweitert werden. Für die angestrebte Erweiterung soll auf die theoretischen Ansätze zur Synthese von Hysteresisschleifen unter Heranziehung von temperaturabhängigen zyklischen Fließkurven, zur Entwicklung der inneren Spannung bei gleitenden Temperaturen in Haltezeiten und zum Mittelspannungseinfluss aufgegriffen und umgesetzt werden. Zur Vorhersage der Relaxation in diesen Haltezeiten ist inkrementell die Wirkung des sich über der Temperatur ändernden Elastizitätsmoduls zu berücksichtigen (**Bild 9**). Die rechnerische Ermüdungsschädigung für den Fall mit gleitender Temperatur in den Haltezeiten soll über einen ebenfalls dort beschriebenen Ansatz ermittelt werden, der eine Mittelwertbildung zur Berechnung der Bezugsanrisswechselzahl ausgehend von den Anrisswechselzahlen für die obere und untere Zyklustemperatur vorsieht. HCF-Beanspruchung soll hierbei additiv berücksichtigt werden. Hierzu soll ein Schädigungsansatz herangezogen werden, der die Überlagerung von LCF und HCF vorsieht [15]. Der rechnerische Kriechschadensanteil wird unter Heranziehung temperaturgestaffelter Zeitbruchkurven ermittelt.

Zur Berücksichtigung der Mehrachsigkeit (Bild 8) soll in dem phänomenologischen Ansatz die Möglichkeit geschaffen werden, Beanspruchungszyklen aus einfachen Abschätzungen, Bauteilzeichnungen oder Finit-Element-Rechnungen zu verarbeiten. Dabei ist vorgesehen, die aus solchen Vorgaben resultierenden, zeitabhängigen Vergleichsdehnungen für An- und Abfahrzyklen direkt zur Verarbeitung in *SARA* vorzugeben. Parallel soll speziell für Kerbstellen mit gegebener Kerbgeometrie und damit bekannter Kerbformzahl sowie vorliegender Nennspannung die Möglichkeit eingerichtet werden, mithilfe der Neuber-Hyperbel unter Heranziehung von zyklischen Fließkurven ggf. unter Variation der Haltezeit derselben Dehnungs-Zeitverläufe abzuleiten und wiederum einer Rechnung mit *SARA* zuzuführen. Dabei handelt es sich um eine Abschätzung der maximalen Dehnung im Kerbgrund, worüber in [13] über gute Erfahrungen auch bei warmfesten Stählen und Beanspruchungsfällen mit Haltezeiten berichtet wird.

Das zu entwickelnde Rechenmodell für mehraxiale Beanspruchung soll im Hinblick auf ihre Anwendbarkeit durch Nachrechnung von Bauteilbeanspruchungsfällen überprüft werden.

4 Simulation des Verhaltens von Hochtemperaturwerkstoffen

4.1 Abstraktion der Beanspruchungsfälle

Ein betriebsähnlicher An- und Abfahrvorgang von massiven Bauteilen lässt sich durch 4 Phasen abstrahieren. Der Zyklus beginnt beim Anfahren mit einer Durchhaltephase 1. Es schließt sich eine Haltephase 2 bei der oberen Zyklustemperatur T_{\max} an. Beim Abfahren tritt in der beheizten Oberfläche massiver Bauteile eine Zughaltephase 3 auf. Aus prüftechnischen Gründen wurde zwischen 2 Zyklen eine Haltephase 4 eingeführt.

Um diese betriebsähnlichen Verläufe von thermisch induzierten Dehnungen über Zeit (**Bild 10**), auch Zyklusdaten genannt, zu beschreiben, reicht zwar eine Auflistung von allen Messpunkten völlig aus, ist aber für die spätere Simulation nicht ohne weiteres brauchbar. Einerseits verlaufen die Dehnungen fast stochastisch zwischen einer bestimmten oberen und unteren Grenze, d.h. für z.B. bei gleichen Kaltstartvorgängen (mit gleicher Anfangs- und Endtemperatur, gleicher Anfahr- und Abfahrzeit, usw.) wiederholen sich die Daten auch nicht. Somit hat man schon Schwierigkeiten bei der Datenfassung. Andererseits kann man zwar diese stochastische Verläufe von Dehnungen durch Zufallfaktoren generieren, jedoch ist die spätere Schadenermittlung mit sehr hohem Rechenaufwand verbunden, und so gut wie nichtrealisierbar.

Wenn man die Messdaten von An- und Abfahrvorgängen unter gleichen Bedingungen genau betrachtet, kann man folgende gemeinsame Eigenschaften feststellen:

- 1) Die 4 Rampen haben fast identische Steigungen, die sich als Geraden betrachten lassen;
- 2) Der Dehnungsverlauf innerhalb einer Haltephase wird annähernd als konstant abgebildet;
- 3) Die Übergangsphasen zwischen einer Rampe und der anschließenden Haltephase lassen sich jedoch nicht eindeutig zuordnen.

Aus den obigen Überlegungen ist es gerechtfertigt, eine Abstraktion von den Zyklusdaten durchzuführen (**Bild 11**). Durch die Abstraktion braucht man für einen betriebsähnlichen Zyklus lediglich folgende Daten:

- $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3, \varepsilon_4$; die Dehnungsausschläge der 4 Phasen,
- $t_{H1}, t_{H2}, t_{H3}, t_{H4}$; die Dauer der 4 Haltephasen in Stunden,
- $d\varepsilon_r/dt$; die Rampengeschwindigkeit (Dehnrates $\dot{\varepsilon}_r$),
- T_{\min}, T_{\max} ; minimale Zyklustemperatur; maximale Zyklustemperatur,

Die Übergangsphasen zwischen einer Rampe und der anschließenden Haltephase sind während der Schädigungsberechnung zu behandeln.

4.2 Kriechen und Ermüdung

Statische Beanspruchungen verursacht Kriechen. In den 4 Haltephasen wird die Oberfläche der Bauteile mit annähernd konstanter Dehnung auf Zug bzw. Druck beansprucht. Das Material „kriecht“, und antwortet auf diese statische Beanspruchung mit nachlassenden Spannungen. Wechselbeanspruchungen führen zur Ermüdung mit Rissbildung ausgehend von der Oberfläche. Das Material ermüdet und antwortet auf diese Beanspruchung mit plastischer Verformung. Beispielweise bilden sich beim Kriechen Poren, die zu Mikrorissen zusammenwachsen und

die Ermüdungsrissbildung beschleunigen. Durch Kriechen des Materials wird der Rissfortschritt eingeleitet.

4.2.1 Kriechen und Relaxation

Kriechen und Relaxation sind zwei verschiedene Beanspruchungen mit ähnlichen Wirkungen im Gefüge des Materials. Beim Kriechen lässt sich bei konstanter Spannung die Dehnung nach. Bei Relaxation bleibt die Dehnung konstant, und die Spannung lässt nach. Die Beanspruchung in den 4 Haltephasen wird als Relaxation bezeichnet. Zur Ermittlung des Kriechens werden zahlreiche Versuche durchgeführt, da Kriechen technisch leichter realisierbar ist. Entsprechend gibt es verschiedene Kriechgesetze auf der Grundlage von Messdaten aus Versuchen, auch als Kriechkurve bezeichnet. Zur Behandlung der Relaxation wird Kriechgesetz benötigt.

Eine Kriechkurve hat folgende physikalische Bedeutung. Sie beschreibt bei einer bestimmten Spannung σ und Temperatur T den Zusammenhang von Kriechdehnung und Zeit. Nachfolgend wird eine Kriechkurve mit $\varepsilon = K(T, t)$ bezeichnet.

Alle Kriechkurven eines Werkstoffs bilden aus dem Blickwinkel der Informatik ein Gleichungssystem, dessen Gleichungen jedoch unbekannt sind. Die Daten aus den Versuchen sind mögliche Lösungen für eine Gleichung. Ein Kriechgesetz beinhaltet unterschiedliche Materialparameter, die zu bestimmen sind. Jedoch sind Kriechgesetze nicht vollkommen, da das Problem mathematisch nur schwer lösbar ist, und Kriechgesetze nur 1 oder 2 von den insgesamt 3 Kriechbereichen zufriedenstellend beschreiben können. Deswegen soll bei der Simulation der Relaxation die Möglichkeit geschaffen werden, dass sowohl ein bestimmtes Kriechgesetz, als auch die Kriechkurven aus Versuchen verwendet werden können, so genannte tabellarische Kriechgesetze.

Zur Berechnung der Relaxation dienen die Anfangsspannung σ_0 , die innere Spannung am Anfang der Haltezeit $\sigma_{i,*,anf}$, die innere Spannung am Ende $\sigma_{i,*,end}$, die Anfangs- und Endtemperatur der Relaxation T_{anf}, T_{end} , sowie die Dauer der Haltephase t_H . Die Relaxation im Programm SARA wird mit $Creep(\sigma_0, \sigma_{i,*,anf}, \sigma_{i,*,end}, T_{anf}, T_{end}, t_H)$ bezeichnet. Als Ergebnis wird die relaxierte Endspannung σ' zurückgeliefert.

Um die in den nächsten Kapitel zu behandelnden Themen besser zu erklären, wird nachfolgend das von [2] entwickelte zeitgeregelte Dehnungsverfestigungsverfahren zur Relaxationsberechnung in Pseudocode vereinfacht angegeben:

$$\sigma_{w,0} = \sigma_0 - \sigma_{i^*,anf}$$

$$t_0 = 0$$

Do $l = 1, m$

$$T_l = T_{anf} + i \times (T_{end} - T_{anf}) / m$$

$$t_l = t_{l-1} + t_H / m$$

berechne ε_l mit t_l in der Kriechkurve $K(T_l, \sigma_{w,l})$

berechne $\delta\sigma$ aus ε_l

$$\sigma_{w,l} = \sigma_{w,l-1} + \delta\sigma$$

berechne t_l mit ε_l in der Kriechkurve $K(T_l, \sigma_{w,l})$

od

$$\sigma' = \sigma_{w,m} + \sigma_{i^*,end}$$

4.2.2 Ermüdung

Die einfache Druck-Zug-Beanspruchung, also ohne Haltephasen, bezeichnet man als Standardversuch. Zur Charakterisierung der Ermüdung sind Anrisskennlinien zu erfüllen. Eine Anrisskennlinie beschreibt bei einer gegebenen Temperatur und Rampengeschwindigkeit die maximalen Wechselzahlen bei unterschiedli-

chen Dehnungsschwingbreiten (Zugdehnung +Druckdehnung) unter der einfachen Druck-Zug-Beanspruchung.

Da es in einer betriebsähnlichen Beanspruchung immer Haltephasen gibt, müssen die nach der obigen Methode ermittelten einfachen Anrisswechselzahlen einer Korrektur um diesem Einfluss unterliegen. Der Einfluss der Übergangsphasen wird durch die so genannten Haltezeitfaktoren, die mit der einfachen Anrisswechselzahl zu multiplizieren sind, berücksichtigt, so dass die Übergangsphasen „künstlich“ zu den Rampen und zu den Haltephasen zugeordnet werden können.

Darüber hinaus müssen die Wirkung der wirksame Dehnung ($\varepsilon_3''' - \varepsilon_1'''$, vgl. Abschnitt 4.3) und die Wirkung der Mittelspannung (vgl. Abschnitt 4.3) berücksichtigt werden.

4.3 Konstruktion der Hysteresisschleife

Eine Hysteresisschleife beschreibt den Spannungsverlauf eines Bauteils über der Zeit. Die Hysteresisschleife (**Bild 12**) wird für jeden Beanspruchungszyklus rekonstruiert, um die aus der thermischen Dehnung resultierenden inneren und äußeren Spannungen unter Berücksichtigung der plastischen Verformung zu ermitteln [4]. Die rekonstruierte Hysteresisschleife liefert in SARA alle zustandsbezogenen Informationen eines Bauteils, die für die Berechnung von Schaden aus Ermüdung und Kriechen notwendig sind.

Eine Hysteresisschleife für einen betriebsähnlichen Beanspruchungszyklus besteht aus einer oberen Flankenkurve, einer unteren Flankenkurve und 4 Relaxationsabschnitten.

Die Flankenkurve ist eine verdoppelte zyklische Fließkurve. Eine einfache zyklische Fließkurve kann mit der Ramberg-Osgood-Gleichung (Gl.(3.2)) beschrieben werden. Für die verdoppelte zyklische Fließkurve gibt es nun die folgende Gleichung:

$$\frac{\varepsilon}{2} = \frac{(\sigma/2)}{E} + \left(\frac{\sigma/2}{A}\right)^s \quad (4.1)$$

ε und σ sind keine absolute Dehnungen und Spannungen, sondern relative Dehnung und Spannung zu dem Ausgangspunkt. Die Parameter a und s in den beiden Gleichungen sind jeweils eine Funktion von Wechselzahlverhältnis N/N_A , Temperatur und Rampengeschwindigkeit, und lassen sich durch Experimente abschätzen.

$$A = f_A(T, N/N_A, \dot{\varepsilon}_r).$$

$$s = f_s(T, N/N_A, \dot{\varepsilon}_r).$$

E ist der Elastizitätsmodul, und lässt sich wie folgt bestimmen:

$$E = f_E(T, \dot{\varepsilon}_r).$$

Als Ausgangspunkt für die Konstruktion der Hysteresisschleife für einen Teilzyklus stehen die Zyklusdaten zur Verfügung, nämlich die 4 Dehnungsausschläge $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3, \varepsilon_4$, die 4 Haltezeiten $t_{H1}, t_{H2}, t_{H3}, t_{H4}$, die Rampengeschwindigkeit $\dot{\varepsilon}_r$ und die untere und obere Temperatur T_{anf}, T_{end} . Das Wechselzahlverhältnis N/N_A ist bei der erstmaligen Konstruktion unbekannt, weil die Anrisswechselzahl N_a noch unbekannt ist. Deswegen werden zwei Durchläufe für die Schadenakkumulation benötigt. Bei dem ersten Durchlauf wird das Wechselzahlverhältnis N/N_a auf 0,5 gesetzt. Beim zweiten Durchlauf wird die beim ersten Durchlauf ausgerechnete N_a ist das Wechselzahlverhältnis N/N_A eingesetzt.

Um die in den nächsten Kapitel zu behandelnden Themen besser zu erklären, wird nachfolgend die Implementierung in Pseudocode vereinfacht zusammengefasst:

$$A_1 = f_A(T_{anf}, N/N_A, \dot{\varepsilon}_r)$$

$$s_1 = f_s(T_{anf}, N/N_A, \dot{\varepsilon}_r)$$

$$E_1 = f_E(T_{anf}, \dot{\varepsilon}_r)$$

$$A_2 = f_A(T_{end}, N/N_A, \dot{\varepsilon}_r)$$

$$s_2 = f_s(T_{end}, N/N_A, \dot{\varepsilon}_r)$$

$$E_2 = f_E(T_{end}, \dot{\varepsilon}_r)$$

$t = 1$

Setze die inneren Spannungen auf 0:

$$\sigma_{i,1,anf} = 0, \quad \sigma_{i,1,end} = 0, \quad \sigma_{i,3,anf} = 0, \quad \sigma_{i,3,end} = 0$$

while $\left| (\sigma_{1,t}'' - \sigma_{1,t-1}'') / \sigma_{1,t}'' \right| > 0,05\%$ or $\left| (\sigma_{1,t}' - \sigma_{1,t-1}') / \sigma_{1,t}' \right| > 0,05\%$

do

berechne σ_1 mit $\varepsilon_1 = \frac{\sigma_1}{E_1} + \left(\frac{\sigma_1}{A_1}\right)^{s_1}$

relaxiere mit $\sigma_{1,t}' = \text{Creep}(\sigma_1, \sigma_{1,anf}, \sigma_{1,end}, T_{anf}, T_{end}, t_{H1})$

setzte $\varepsilon_1'' = 1,2 \times \varepsilon_1$, berechne σ_1'' mit $\varepsilon_1'' = \frac{\sigma_1''}{E_1} + \left(\frac{\sigma_1''}{A_1}\right)^{s_1}$

berechne die obere Flankenkurve

mit $\frac{\varepsilon - \varepsilon_1''}{2} = \frac{(\sigma - \sigma_{1,t}'')/2}{E_1} + \left(\frac{(\sigma - \sigma_{1,t}'')/2}{A_1}\right)^{s_1}$

while der Relaxationsendpunkt $(\varepsilon_1, \sigma_1')$ nicht auf der obere

Flankenkurve liegt,

do

verkleinere oder vergrößere ε_1''

die obere Flankenkurve neu berechnen

od

4 Simulation des Verhaltens von Hochtemperaturwerkstoffen

$$\sigma_1''' = \sigma_1'' \times Q(T_{anf}, T_{end})^{1)}$$

$$\varepsilon_1''' = \sigma_1'' + (\sigma_1''' - \sigma_1'')/E_2$$

Berechne σ_3

$$\text{mit } \frac{\varepsilon_3 - \varepsilon_1'''}{2} = \frac{((\sigma_3 - \sigma_1''')/2)}{E_2} + \left(\frac{(\sigma_3 - \sigma_1''')/2}{A_2}\right)_{S_2}$$

relaxiere mit $\sigma_{3,t}' = \text{Creep}(\sigma_3, \sigma_{3,anf}, \sigma_{3,end}, t_{H3})$

setzte $\varepsilon_3'' = 1,2 \times \varepsilon_3$,

berechne $\sigma_{3,t}''$

$$\text{mit } \frac{\varepsilon_3'' - \varepsilon_1'''}{2} = \frac{((\sigma_{3,t}'' - \sigma_1''')/2)}{E_1} + \left(\frac{(\sigma_{3,t}'' - \sigma_1''')/2}{A_1}\right)_{S_1}$$

berechne die untere Flankenkurve

$$\text{mit } \frac{\varepsilon - \varepsilon_3''}{2} = \frac{((\sigma - \sigma_{3,t}'')/2)}{E_1} + \left(\frac{(\sigma - \sigma_{3,t}'')/2}{A_1}\right)_{S_1}$$

while der Relaxationsendpunkt $(\varepsilon_3, \sigma_3')$ nicht auf der untere Flankenkurve liegt,

do

verkleinere oder vergrößere ε_3''

die untere Flankenkurve neu berechnen

od

¹⁾ Verhältnis der Warmstreckgrenzen bei Anfang- und Endtemperatur.

$$\sigma_3''' = \sigma_3'' / Q(T_{anf}, T_{end})$$

$$\varepsilon_3''' = \sigma_3'' + (\sigma_3''' - \sigma_3'') / E_1$$

$$\sigma_{i,1,anf} = \frac{\sigma_3''' + \sigma_1''}{2}$$

$$\sigma_{i,1,end} = \frac{\sigma_3'' + \sigma_1'''}{2}$$

$$\sigma_{i,3,anf} = \frac{\sigma_1''' + \sigma_3''}{2}$$

$$\sigma_{i,3,end} = \frac{\sigma_1'' + \sigma_3'''}{2}$$

$$t = t + 1$$

od.

Die Bedeutung der Umkehrpunkte $(\varepsilon_1'', \sigma_1'')$, $(\varepsilon_1''', \sigma_1''')$, $(\varepsilon_3'', \sigma_3'')$, $(\varepsilon_3''', \sigma_3''')$ sowie die Ermittlung von inneren Spannungen sind aus dem Bild 12 zu entnehmen.

Die Synthese der Spannungs-Dehnungs-Hysteresisschleifen für anisotherme, betriebsähnliche Zyklen wurde im Rahmen einer Diplomarbeit [2] durchgeführt.

4.4 Lebensdaueranalyse

Mit den durch die Synthese der Spannungs-Dehnungs-Hysteresisschleife erhaltenen Daten wird die Lebensdaueranalyse des Bauteils durchgeführt.

Der relative Lebensdaueranteil aus Kriechen L_t lässt sich für einen Zyklus wie nachfolgend ermitteln:

$$L_t = \sum_{j=1}^4 \int_{t=0}^{t_{ij}} \frac{1}{f_{zb}(\sigma_{j,t}, T_{j,t})} dt,$$

wobei $\sigma_{j,t}, T_{j,t}$ der ermittelte Spannungsverlauf und Temperaturverlauf von den 4 Haltephasen sind, und $f_{zb}(\sigma_{j,t}, T_{j,t})$ die durch die Zeitbruchkurve ermittelte Bruchzeit bezeichnet.

Der relative Lebensdaueranteil aus Ermüdung L_a lässt sich für einen Zyklus wie nachfolgend ermitteln:

$$L_a = \frac{1}{N_A},$$

wobei sich N_A durch die Informationen aus der Spannungs-Dehnungs-Hysteresisschleife mithilfe verschiedenen Kennlinien und Faktoren ermitteln lässt.

Die Berechnung für die einzelnen Eingabezyklen wird solange wiederholt, bis die relative kritische Lebensdauer L_{krit} erreicht wird:

$$L_{krit} = \sum L_a + \sum L_t$$

5 Optimierung der Datenstruktur und des Programmverlaufs

Die Optimierung der Datenstruktur umfasst im Rahmen dieser Arbeit hauptsächlich die folgenden Aspekte:

- 1) Gestaltung der Datenstruktur für die möglichen zukünftigen Änderungen
- 2) Gestaltung der Datenstruktur für eine effiziente Berechnung

Unter Werkstoffdaten versteht man die Kennzahlen, die die Eigenschaften und das Verhalten eines Werkstoffs unter verschiedenen thermomechanischen Bedingungen (Spannung, Dehnung, Temperatur usw.) beschreiben. Werkstoffdaten können Kennwerte, Parameter oder Faktoren sein.

5.1 Datenstruktur für Kennwerte

Ein Kennwert besitzt immer eine physikalische Bedeutung, und hat somit auch eine physikalische Einheit (z. B. Stunden). Die Kennwerte sind direkt aus Experimenten ermittelte Daten. Ein Kennwert allein ist bedeutungslos, und er macht nur Sinn, wenn er im Zusammenhang mit anderen Kennwerten steht.

Der Kennwert Anrisswechselzahl gibt an, wie viel Wechselzahlen ein Bauteil unter einer bestimmten Bedingung (Temperatur, Rampengeschwindigkeit) bei einer gegebenen Dehnungsschwingbreite bis zum Anriss überstehen kann. Bei einer konstanten Temperatur und Rampengeschwindigkeit gibt es für jeden gegebenen Dehnungsausschlag immer eine Anrisswechselzahl. Wenn man

die Anrisswechselzahlen und die entsprechenden Dehnungsausschläge in einem kartesischen Koordinatensystem aufträgt, bekommt man eine Kurve, die so genannte Anrisskennlinie (siehe Gl.(3.3)). Mathematisch lässt sich eine Anrisskennlinie wie folgt beschreiben:

$$N_A = f_{T, \dot{\epsilon}_r, t_H}(\Delta \epsilon).$$

Temperatur und Rampengeschwindigkeit lassen sich beliebig kombinieren, und somit ergeben sich mehrere Anrisskennlinien. In SARA wird für jeden Werkstoff eine Kennlinie angegeben, und zwar für die maximale Temperatur und Rampengeschwindigkeit. Diese Kennlinie nennt man Masterkurve. Die Kennlinien unter anderen Kombinationen von Temperaturen und Rampengeschwindigkeiten lassen sich durch die Masterkurve und die entsprechenden Faktoren beschreiben.

Da die anderen Kennwerte bzw. Kennlinien sehr ähnliche Strukturen wie die Anrisskennlinie besitzen, lässt sich die Optimierung der Datenstrukturen für die anderen Kennwerte auch anhand des Beispiels der Anrisskennlinie erläutern.

Bis jetzt wird die Anrisskennlinie durch 2 gekoppelte Arrays implementiert. Array 1 speichert die Dehnungsausschläge in sortierter Reihenfolge (**Bild 13**), Array 2 speichert die entsprechenden Anrisswechselzahlen. Wenn man für einen gegebenen Dehnungsausschlag die Anrisswechselzahl sucht, sucht man den Index des Dehnungsausschlags in dem Array 1, und in der gleichen Position in dem Array 2 steht die Anrisswechselzahl.

Diese Datenstruktur hat folgende Nachteile:

- 1) Die beiden Arrays haben feste Länge. Wenn man mehr Datenpunkte verwenden, muss man die Arrays neu definieren.
- 2) Das ganze Array muss bei der Suche nach dem Index eines Dehnungsausschlags durchlaufen werden, wenn das Array nicht voll besetzt ist. Eine binäre Suche, die bei sortierter Folge sehr effizient ist, kann nicht funktionieren, weil Nullen am Ende des Arrays stehen.

Nun wird die Größe des Arrays so definiert, dass sie mit der möglichen Datenmenge der künftigen Entwicklung mit Sicherheit auskommt. Diese Datenstruktur wird um einen Zähler erweitert (**Bild 14**). Die Anzahl der Datenpunkte wird beim Einlesen mitgezählt und im dem Zähler gespeichert. Der Zähler ermöglicht eine effiziente Suche, da lediglich eine binäre Suche vom Anfang bis zum Zähler durchzuführen ist. Zusätzlich wird ein Zeiger integriert, der die zuletzt zugegriffene Position des Arrays speichert (Bild 14). Diese Idee kommt aus der folgenden Überlegung. Betriebszyklen mit identischen Dehnungsausschlägen, besonders bei dem Rainflow-Verfahren, wobei die Zyklen nach den Dehnungsausschlägen sortiert werden, liegen sehr häufig nebeneinander. Bevor es mit der Suche in dem Array losgeht, wird der Dehnungsausschlag mit dem vom letzten Zyklus verglichen. Falls die beiden identisch sind, wird der Index einfach von dem Zeiger gelesen.

Da eine Suche bei der Berechnung sehr oft vorkommt, lässt sich die Laufzeit bei mehreren Stellen durch die obigen Änderungen ersparen.

5.2 Datenstruktur für Parameter

Parameter sind immer ein Bestandteil eines Materialmodells, das sich im Allgemeinen als eine Gleichung oder ein Gleichungssystem darstellen lässt. Beispiel sind die Parameter a und s aus der Ramberg-Osgood-Fließgleichung. Dank dieser Parameter kann man eine aufwendige Auflistung von Kennwerten wie beim Abschnitt 4.1 durch eine Formel ersetzen. Die Parameter selbst sind wieder von anderen Bedingungen abhängig, wie z.B. Wechselverhältnis, Temperatur usw. Deswegen kann man die Parameter mit der gleichen Datenstruktur wie bei den Kennwerten beschreiben. Die Änderungen wie im Abschnitt 5.1 kann man hier auch entsprechend durchführen.

5.3 Datenstruktur für Faktoren

Faktoren sind die Verhältnisse zwischen Kennwerten bzw. Parametern. Die Struktur von Faktoren ist im Allgemeinen komplizierter als Kennwerte, da mehrere Kombinationen von mehreren Bedingungen berücksichtigt werden müssen.

Wir nehmen hier die Faktoren von Anrisskennlinien als Beispiel. Man benutzt in SARA Faktoren für Kombinationen von einigen Standardtemperaturen und Standardrampengeschwindigkeiten. Für beliebige Kombination von Temperaturen und Rampengeschwindigkeiten lassen sich die Faktoren zwischen den Standardtemperaturen und Standardrampengeschwindigkeiten interpolieren.

$$F_{T,d\varepsilon/dt} = f_{T,\dot{\varepsilon}_r,t_H}(\Delta\varepsilon) / f_{T_{\max},\dot{\varepsilon}_{r,\max},t_H}(\Delta\varepsilon).$$

Bis jetzt wird für jede Standardtemperatur eine baumartige Datenstruktur mit 2 Ebenen implementiert. In der ersten Ebene werden die Standardrampengeschwindigkeiten in sortierter Reihenfolge gespeichert. Unter jeder Standardrampengeschwindigkeit stehen die 2 gekoppelten Arrays von Dehnungsausschlägen und Faktoren (**Bild 15**).

Diese Implementierung war für den isothermen Fall gedacht, wo die Temperatur während der Beanspruchung konstant ist. Bei den anisothermen Beanspruchungen ändert sich nun die Temperatur, und eine Interpolation zwischen Temperaturen ist fast bei jedem Schritt durchzuführen. Mit der obigen Datenstruktur hat man bei der Interpolation ein Problem, nämlich eine Fallunterscheidung muss man bei vielen Stellen machen. Ein ähnlicher Code wie der Folgende taucht bei vielen Stellen auf:

```
IF Temperatur <= Standardtemperatur T1 THEN

    Verwende die Daten für Standardtemperatur T1

ELSE IF Temperatur <= Standardtemperatur T2 THEN

    Verwende die Daten für Standardtemperatur T2

.....

END IF
```

Diese Implementierung ist genau dann problematisch, wenn man die Anzahl der Standardtemperatur ändert. Die Datenstrukturen für neue Standardtempe-

raturen müssen initialisiert werden, und der Programmcode muss bei mehreren Stellen geändert werden. Das ist eine sehr unerwünschte Eigenschaft, und muss bei der neuen Implementierung geändert werden.

Nun wird eine baumartige Datenstruktur mit 3 Ebenen für alle Standardtemperaturen implementiert. In der ersten Ebene stehen nun die Standardtemperaturen. Unter jeder Standardtemperatur stehen die Standarddrampengeschwindigkeiten. In der letzten Ebene werden die 2 gekoppelten Arrays von Dehnungsausschlägen und Faktoren gespeichert (**Bild 16**). Mit dieser Implementierung lassen sich neue Standardtemperaturen einfach in die erste Ebene einfügen, und der Programmcode bleibt unberührt.

5.4 Optimierung des Programmverlaufs

Mit dieser Teilaufgabe soll die Effizienz der Berechnung erhöht werden. Als Ausgangspunkt soll die Komplexität des Algorithmus von SARA anhand O-Notation analysiert werden.

Bei der Berechnung von Relaxation wird bei der Arbeit von [2] das zeitgeregelte Dehnungsverfestigungsverfahren verwendet. Dieses setzt die Anzahl der Iterationsschritte auf m fest. Zur Ermittlung der Relaxationsdehnung bzw. Relaxationszeit werden bei jedem Schritt mehrere Suchvorgänge in der Kriechkurve durchgeführt. Die Laufzeit einer Suche hängt wieder von der Anzahl der Datenpunkte n_1 in einer Kriechkurve ab. Wenn man von einer linearen Suche ausgeht, dann lässt sich die Laufzeit für die Relaxationberechnung einer Haltephase annähernd mit O-Notation wie folgendes darstellen:

$$O(K_1 \times m \times n_1),$$

wobei K_1 eine Konstante ist.

Die Anzahl der Iterationsschritte bei der Relaxation ist der wichtigste Einflussfaktor auf die Laufzeit. Das Unterprogramm zur Relaxationsberechnung wird bei der Konstruktion der Hysteresisschleife für jeden Teilzyklus 4 Mal aufgerufen, da es 4 Haltephasen gibt. Die Konstruktion der Hysteresisschleife wird auch iterativ durchgeführt. Die Konstruktion wird solange wiederholt, bis sich

die Schleife von der beim letzten Schritt konstruierten Schleife kaum unterscheidet. Untersuchungen mit SARA haben aber gezeigt, dass die benötigte Schritte für die Konstruktion einer Hysteresisschleife selten 20 überschritten, wenn man einen Unterschied von 5% bei der wirksamen Spannung toleriert. Somit kann man für die maximalen Schritte einen konstanten Wert K_2 annehmen. Die Laufzeit für die Konstruktion der Hysteresisschleife ergibt sich annähernd mit der O-Notation:

$$O(K_1 \times K_2 \times m \times n_1).$$

Bei der Lebensdaueranalyse werden die hauptsächlich durch Hysteresisschleife gelieferten wirksame Dehnungen und Spannungen zur Berechnung von Dehnwechselschaden verarbeitet. Zur Suche der Anrisswechselzahl werden verschiedene Kennlinien durchgelaufen. Geht man hier von einer linearen Suche aus, dann ergibt sich $O(K_3 \times n_3)$, wobei n_3 die Anzahl der Datenpunkte von Anrisskennlinien und Faktoren. Die aus der Relaxationsberechnung resultierenden Zeit- und Spannungsverläufe mit der Größe m werden zur Berechnung von Zeitstandschaaden verarbeitet. Für jeden von den m Punkten wird eine Suche nach der entsprechenden Bruchzeit durchgeführt. Mit einer linearen Suche kommt man mit $O(K_4 \times m \times n_4)$ aus, wobei n_4 die Anzahl der Datenpunkte von der Zeitbruchkurve ist. Die Laufzeit für die Lebensdaueranalyse ergibt sich insgesamt:

$$O(K_4 \times m \times n_4 + K_3 \times n_3).$$

Die Laufzeit für einen Zyklus ergibt sich aus der Laufzeit für die Konstruktion einer Hysteresisschleife und der Laufzeit für die Lebensdaueranalyse.

$$O(K_1 \times K_2 \times m \times n_1 + K_4 \times m \times n_4 + K_3 \times n_3).$$

Nimmt man $n = \max(n_1, n_2, n_3, n_4)$. Die Konstante kann man aus der O-Notation weglassen. Da $O(m \times n)$ auf jeden Fall $O(n)$ dominiert, kann man $O(n)$ auch weglassen. Somit ergibt sich die gesamte Laufzeit für einen Zyklus:

$$O(m \times n).$$

Im Rahmen dieser Arbeit werden folgende Änderungen zur Verbesserung der Laufzeit durchgeführt:

Wie in Abschnitt 5.1 und Abschnitt 5.3 beschrieben, werden die Datenstrukturen für Kennlinien und Faktoren optimiert. Das ermöglicht eine binäre Suche und die optimale Ausnutzung der Lokalität von Daten. Mit der binären Suche reduziert sich die Laufzeit auf:

$$O(m \times \log n).$$

Die Laufzeit für Lebensdaueranalyse lässt sich theoretisch bei optimalen Bedingungen (beim Rainflow-Verfahren) durch Ausnutzung der Lokalität von Daten sogar weiter auf $O(m)$ reduzieren.

Die Anzahl der Iterationsschritte m bei der Relaxation kann man nicht ohne weiteres reduzieren. Die Genauigkeit der Relaxationsberechnung hängt direkt von der Anzahl der Iterationsschritte ab. Bis jetzt wurde m je nach Anforderungen auf die Genauigkeit immer auf eine feste Zahl gesetzt. Diese Vorgehensweise ist nicht effizient. Die Haltephasen unterscheiden sich bezüglich der Dehnung und Dauer stark voneinander. In einem gleichen Zyklus haben die Phasen 1 und 3 immer größere Dehnungen als die Phasen 2 und 4. Für Haltephasen mit längeren Dauern braucht man für die Relaxationsberechnung mehr Iterationsschritte. Für kürzere Haltephasen braucht man entsprechend weniger Schritte. Bei größeren Dehnungen verursacht eine Haltephase mehr Schaden als bei kleineren Dehnungen, und müssen deswegen mit mehr Iterationsschritten behandelt werden.

Aus dieser Überlegung lassen sich für unterschiedliche Haltephasen auch unterschiedliche Iterationsschritte festlegen. Die Anzahl der Iterationsschritte m wurde als eine Funktion von Dehnung und Haltezeitdauer vor jeder Relaxationsberechnung bestimmt. Die entsprechenden Änderungen wurden im Unterprogramm zur Relaxationsberechnung vorgenommen. Im Durchschnitt hat man eine kleinere m , und somit auch kürzere Laufzeit insgesamt.

6 Modularisierung von SARA

Die Modularität ist eine sehr erwünschte Eigenschaft bei der modernen Softwareentwicklung [16]. Für eine Simulationssoftware für Hochtemperaturwerkstoffe ist diese Eigenschaft von besonderer Bedeutung. Über Hochtemperaturwerkstoffe wird kontinuierlich geforscht. Bei der Simulation fließen nicht nur neue Werkstoffe, sondern auch neues Wissen über Methoden in das Simulationsprogramm ein. Eine Änderung des Programms ist unter Umständen unvermeidbar. Die Modularität eines Programms hilft dabei, diese Änderung auf einen minimalen Umfang zu begrenzen. Zumal bietet die Modularität dem Anwender die Möglichkeit, neues Wissen in das Programm einzubringen, auch wenn er keine tiefgreifenden Programmierkenntnisse hat. Im Rahmen dieser Arbeit wurde im Zusammenhang mit der Optimierung der Datenstrukturen eine Modularisierung des Simulationsprogramms *SARA* durchgeführt.

6.1 Analyse der Programmstruktur von SARA

SARA wurde am Ende der 80er Jahre mit der Programmiersprache Fortran 77 entwickelt. Das Programm wurde stets erweitert, und die neue Erweiterung wurde teilweise mit Fortran 90 implementiert. Viele nützliche Eigenschaften der modernen Programmiersprachen, wie Abstrakte Datenstruktur, Methodenüberladen oder Polymorphismus werden in Fortran kaum unterstützt oder sind nur mit hohem Aufwand zu realisieren. Fortran ist nicht modern und ist nicht objektorientiert [17]. Dennoch ist Fortran in den Ingenieurwissenschaften noch sehr verbreitet insbesondere auch in den Berechnungsabteilungen in den entsprechenden Firmen. Daher wurde Fortran damals ausgewählt und die Entscheidung ist bis heute unumstritten. Inwieweit diese Entscheidung in Zukunft revidiert wird, bleibt abzuwarten.

Trotzdem können die folgenden Gründe die erwünschte Modularisierung auf Basis des vorhandenen Fortran-Codes rechtfertigen. Erstens, Fortran spielt

eine besondere Rolle in der Geschichte der Informatik. Viele Programmierer, besonderes aus dem Forschungsbereich besitzen fortgeschrittene Kenntnisse in Fortran, und sind schon vertraut damit [18]. Zweitens, die neuen Eigenschaften von Fortran 90 wie „Derived Data Typ“ bieten auch die Möglichkeit zur Realisierung von Kapselung und Vererbung [19]. Als letztes hat der in Fortran 90 modularisierte Code hat bezüglich Laufzeit in vielen Fällen deutlich bessere Performanz als der Code in C++ [19].

SARA hat über 50 Unterprogramme. Neben Berechnungsmethoden sind wertvolle Versuchsdaten in Form von tabellarischen Kennlinien und Faktoren gespeichert. Bis jetzt wurden die sämtliche Werkstoffdaten und ein Teil der Zwischenergebnisse in SARA als globale Variable in den so genannten „Common-Blocks“ definiert, und durch „include“ in den Unterprogrammen integriert (**Bild 17**). Mit den „Common-Blocks“ ist die komplette Zugänglichkeit von Variablen zu den „including“ Unterprogrammen verbunden. Die Fehlerfortpflanzung wird auf dieser Weise irrelevant zu dem Kontrollfluss des Programms [15]. Konkret bei dem Fall von SARA wurden folgende Nachteile festgestellt:

- 1) Jedes Unterprogramm hat einen direkten Zugang zu den Daten. Die Implementierung eines Unterprogramms hängt von der Implementierung der zu bearbeitenden Daten ab.
- 2) Die Datenbearbeitung und die richtigen Methoden zur Simulation lassen sich nicht trennen. Der Code ist unübersichtlich und schwer lesbar. Somit wird die Wartbarkeit geschädigt.
- 3) Die Programmstruktur ist unübersichtlich, da der Datenfluss zwischen Unterprogrammen so nicht sichtbar ist
- 4) Die Modularität der Unterprogramme wird verletzt. Die Unterprogramme sind voneinander abhängig, da sie durch Daten gebunden sind.
- 5) Mehrere Unterprogramme kann Zugang zu einem Zwischenergebnis haben. Durch diese Datenflechtung sind Fehler schwerer zu finden.

6.2 Modularisierung von SARA mit „Information Hiding“

Als Kriterium zur Modularisierung eignet sich die sogenannte Datenkapselung (Information Hiding) [20]. Gemeint ist, die Implementierung der Datenstruktur zu verbergen. Dafür werden die „Derived Data Typ“ von Fortran 90 verwendet. Die Definition der neuen Datenstrukturen bzw. die entsprechenden Änderungen des Programmcodes verfolgt eine ähnliche Vorgehensweise wie bei [22] und [19]. Hierbei definiert man die sämtlichen Werkstoffdaten unter dem Begriff „Werkstoff“, und die Werkstoffdaten wurden als Attributen von dem Datentyp „Werkstoff“ implementiert. Der neue Datentyp ist somit ein Oberbegriff von allen Werkstoffdaten. Ein „Werkstoff“ wird bei dem Aufruf des Hauptprogramms initialisiert, und wird den Unterprogrammen übergeben.

Für die Unterprogramme, wie z.B. die Konstruktion der Hysteresisschleife ist nur der Oberbegriff „Werkstoff“ sichtbar. Die konkrete Implementierung von den Werkstoffdaten, wie etwa die Datenstruktur von Anrisskennlinien, bleibt nach Außen transparent (**Bild 18**). Datenverarbeitende Funktionen wie etwa Suche oder Interpolation wurden von den Unterprogrammen getrennt, und als generelle Funktion deklariert. Die Kennwertermittelnden Funktionen werden als Schnittstellen zwischen den Unterprogrammen und Werkstoffdaten eingefügt. Diese sind der so genannten get()-Methoden der Objekt-orientierten Programmiersprache sehr ähnlich. Sie kennen die konkrete Implementierung der Datenstrukturen, aber verbirgt sie nach Außen. Sie liefern anderen Unterprogrammen bei einer vorgegebenen Eingabe nur die ermittelten Kennwerte (Bild 18).

Die vorgeschlagene Modularisierung wurde wie beschrieben umgesetzt und getestet. Testrechnungen ergaben keine unterschiede im Ergebnis der SARA-Rechnung (z.B. Vorhersagewert der Anrisswechselzahl).

Im Folgenden wird ein Abschnitt der Definition von neuen Datentypen dargestellt:

```
Modul werkstoff
```

```
TYPE werkstoff
```

6 Modularisierung von SARA

```
CHARACTER (LEN=20) :: name !Werkstoffnummer

INTEGER :: nr !Werkstoffnummer

..... ! Werkstoffkennwerte

END TYPE werkstoff

End Modul

Modul Bauteil

TYPE bauteil

werkstoff :: material !Material des Bauteils

DOUBLE PRECISION :: L !Verbrauchter Lebensdaueranteil

DOUBLE PRECISION :: Lt ! Lebensdaueranteil aus

                        ! Kriechen

..... ! Andere Zustandsvariablen des Bauteils

END TYPE bauteil

END Modul
```

7 Erweiterung von SARA auf mehrachsige Beanspruchung

Bauteile sind aus nicht immer vermeidbaren konstruktiven Gründen mit Kerben wie Nuten, Absätzen oder Querschnittsübergängen versehen. Eine Kerbe ist zunächst als eine Störung des durch eine äußere Belastung hervorgerufenen Kraftflusses zu verstehen. Als Ergebnis dieser Störung tritt in der Kerbe eine mehrachsige Beanspruchung auf (**Bild 19**). Diese wiederum kann nicht nur die Festigkeit eines Bauteils, sondern auch seine Lebensdauer entscheidend beeinflussen. Im Gegensatz zum ungekerbten Querschnitt, in dem im Allgemeinen ein einachsiger Spannungszustand vorliegt, herrscht in der Kerbumgebung ein mehrachsiger Spannungszustand mit teilweise erhöhten Spannungen vor (**Bild 20**). Durch örtliche Spannungskonzentration kann eine Ermüdungsbeanspruchung zusätzlich überlagert durch Kriechanteile aus Relaxationsvorgängen zu einer Lebensdauerermindernden Anrissbildung führen.

Zur Erweiterung des Simulationsprogramms SARA auf Mehrachsigkeit wurden die nachfolgend beschriebenen zwei Lösungswege als Pre-Prozessoren in SARA implementiert.

7.1 Implementierung auf der Grundlage einer inelastischen Finit-Element-Rechnung

Zur Beschreibung mehrachsiger Spannungszustände kommen Festigkeitshypothesen zur Anwendung. Dabei werden die im Bauteil auftretenden Normal- und Schubspannungen mithilfe analytischer Methoden in eine Vergleichsspannung σ_v umgerechnet und mit einer zulässigen Spannung σ_{zul} verglichen. Bei plastischer Verformung wird in der Regel die Hypothese der Gestaltänderungsenergie verwendet, die davon ausgeht, dass die Materialbeanspruchung

durch den Energieanteil charakterisiert wird, der bei gleich bleibendem Volumen zur Änderung der Gestalt benötigt wird. Bei der Bestimmung der Vergleichsspannung nach der Hypothese der Gestaltänderungsenergie wird die Fließbedingung nach von Mises zugrunde gelegt. Die Vergleichsspannung errechnet sich damit aus den drei Hauptspannungen σ_1 , σ_2 und σ_3 zu:

$$\sigma_v = \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot \sqrt{(\sigma_2 - \sigma_1)^2 + (\sigma_3 - \sigma_2)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2} \quad (7.1)$$

Diese Vergleichsspannung ist auch als von Mises-Vergleichsspannung bekannt und führt den dreiachsigen Spannungszustand auf einen einachsigen Vergleichsfall zurück. Ebenso lässt sich eine plastische Vergleichsdehnung ε_{pv} herleiten:

$$\varepsilon_{pv} = \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot \sqrt{(\varepsilon_{p2} - \varepsilon_{p1})^2 + (\varepsilon_{p3} - \varepsilon_{p2})^2 + (\varepsilon_{p3} - \varepsilon_{p1})^2} \quad (7.2)$$

Bei Ermüdungs- und Kriechermüdungsbeanspruchung können ebenfalls Spannungsumverteilungen, Verformungen und Bauteilversagen mit Hilfe der Finit-Element-Methode berechnet werden und einachsige Werkstoffbeschreibungen auf mehrachsiges Bauteilverhalten übertragen werden. Dabei sind jedoch neben einer Kriechbeschreibung (z.B. Norton-Baily-Gleichung (3.4)) auch Beschreibungen des elastischen Verhaltens (Elastizitätsmodul) und des statischen und zyklischen Fließverhaltens (z.B. Ramberg-Osgood-Gleichung Gl.(3.2)) notwendig.

Der in diesem Abschnitt geschilderte Weg geht von einer dreiachsigen Spannungsverteilung in Abhängigkeit von der Zeit in einer Kerbstelle aus. Ausgangspunkt für die Berechnung sind die einer FE-Rechnung vorliegenden Spannungs-Zeit-Verläufe $\sigma_j(t)$ und die entsprechenden Dehnungs-Zeit-Verläufe $\varepsilon_j(t)$ in allen Achsen. Der Vergleichsspannungs-Zeit-Verlauf $\sigma_v(t)$ wird nach der Gleichung (7.2) errechnet. Da der nach Huber-v.-Mises-Hencky-Gleichung errechnete Werte nur für die inelastische Vergleichsdehnung ε_v liefert, muss der elastische Anteil additiv überlagert werden. Die elastische Vergleichsdehnung ε_{ev} lässt sich aus dem Zusammenhang

$$\varepsilon_{ev} = \frac{\sigma_v}{E}$$

gewinnen, wobei E bei dieser Beanspruchung den zyklischen E-Modul darstellt. Die Gesamtvergleichsdehnung ε_v wird damit zu

$$\varepsilon_V = \varepsilon_{ev} + \varepsilon_{pv}$$

Ein Beispiel eines Beanspruchungszyklusses mit der Vergleichsspannung bzw. Vergleichsdehnung über der Zeit zeigt (**Bild 21**). Zur Verarbeitung mit SARA wird der regellose Verlauf in der Weise abstrahiert, dass ein Zyklus mit An- und Abfahrphase gebildet wird, der sich mit SARA wiederum direkt verarbeiten lässt (Bild 21).

Zur Umsetzung der Rechenmethode wurde folgendes angenommen:

- 1) die Dehnrate $\dot{\varepsilon}_r$ für 4 Rampenphasen sind konstant;
- 2) die Zyklustemperatur bleibt während der gesamten Zyklusdauer konstant.

Im Rahmen dieser Arbeit wurde eine Excel-Anwendung zur grafischen Abstraktion der betriebsnahen Zyklusdaten entwickelt. Die Abstraktion eines betriebsnahen An- und Abfahrzyklus erfolgt durch eine manuelle Anpassung des Verlaufs der Druckhaltephase, der Zughaltephase und der Betriebsphase (**Bild 22**). Der Anwender hat hier mithilfe eines Excel-Makros den oft komplizierten Dehnungs-Zeit-Verlauf durch einen manuellen Eingriff in den Verlauf des betriebsähnlichen Zyklus abzubilden. Der Eingriff erfolgt hierbei durch "Anklicken" der Eckpunkte mithilfe der Maus. Die Steigung wird hierbei stets für alle Rampen gleichzeitig geändert (Annahme: Die Rampendehngeschwindigkeit soll bei allen Phasen gleich sein). Zu bemerken ist hierbei, dass sich die Haltezeiten durch Bewegen der Eckpunkte gleichzeitig mit den Dehnungen ändern.

Als Ergebnis erhält man einen Verlauf bestehend aus Wertpaaren von Dehnung und Zeit (**Bild 23**). Diese Daten werden in einer separaten Excel-Tabelle abgelegt (**Bild 24**). Die Ermittlung der Dauer der Haltezeiten erfolgt durch Bildung der Zeitdifferenzen in Spalte 4. Die zu den Haltezeiten zugehörigen Dehnungsausschläge sind in Spalte 5 angegeben. Ausgehend von dem Abstraktionsvorgang erfolgt die Übernahme der Wertpaare Dehnung und Zeit (Bild 24) in die Eingabedatei von SARA. Man kopiert die ermittelten Werte aus dem Excel-Blatt und fügt sie in eine neue ASCII-Datei ein, und zwar nach der Reihenfolge: Dehnungsausschläge der Phase 1, 2, 3 und 4, Haltezeiten der Phase 1, 2, 3 und 4, die Rampendehngeschwindigkeit und die Zyklustemperatur (**Bild**

25). Diese neue Datei kann man dann als eine Eingabedatei von SARA verwenden.

Zur Anwendung von SARA mit dem in Bild 23, Bild 24 und Bild 25 generierten Zyklus (Fall A) wurde eine Testrechnung durchgeführt. Die Rechnung ergibt für das Beispiel eines modernen 10%Cr-Stahls mit einer Zyklustemperatur von 600 °C eine Anrisswechselzahl $N_{A,A}^* = 243$ (**Bild 26**).

Der Vergleich mit dem Experiment steht noch aus, weil dieses in dem Forschungsvorhaben noch durchzuführen sind. Aus diesem Grund wurde zusätzlich der Fall B im Bild 22 für das gleiche Beispiel wie Fall A mit SARA nachgerechnet. Aus dieser Rechnung ergibt sich die Anrisswechselzahl $N_{A,B}^* = 103$. In **Bild 27** sind die entsprechenden Spannungs-Dehnungs-Hystereseschleifen gegenübergestellt. Erwartungsgemäß ergibt sich im Fall B auf Grund des höheren Dehnungsausschlags die niedrigere Anrisswechselzahl.

7.2 Implementierung auf der Grundlage der Neuber-Hyperbel-Hypothese

Zur Definition der Kerbwirkung für elastische Beanspruchung wird die (Kerb-) Formzahl benutzt (Bild 19), die sich aus dem Quotienten der maximalen Spannungsspitze im Kerbgrund σ_{\max} und der Nennspannung im Kerbquerschnitt σ_{nk} berechnet:

$$K_t = \frac{\sigma_{\max}}{\sigma_{nk}} \quad (7.3)$$

Bei plastischer Verformung ist die Formzahl K_t nicht mehr gültig, da sich sowohl die Kerbgeometrie als auch die Spannungsverteilung während der Verformung ändern. Für die Quantifizierung der Kerbwirkung im überelastischen Bereich kann die Formzahl K_t durch die Dehnungsformzahl K_ε und die Spannungsformzahl K_σ ersetzt werden:

$$K_\sigma \equiv \frac{\sigma_{\max}}{\sigma_n}, K_\varepsilon \equiv \frac{\varepsilon_{\max}}{\varepsilon_n} \quad \text{mit} \quad \frac{\sigma_n}{\varepsilon_n} = E \quad (7.4)$$

Unter der Bedingung eines einachsigen Spannungszustandes und der Nennbeanspruchung im elastischen Bereich kann die von Neuber für statische und zyklische Beanspruchung entwickelte Beziehung herangezogen werden:

$$K_\varepsilon \cdot K_\sigma = K_t^2$$

Durch den Einsatz der Gl. (7.4) ergibt sich die Gleichung

$$\varepsilon_{\max} \cdot \sigma_{\max} = K_t^2 \cdot \frac{\sigma_n^2}{E} \quad (7.5)$$

Welche die so genannte Neuber-Hyperbel beschreibt. Durch den Schnittpunkt der Neuber-Hyperbel mit der Werkstoff-Fließkurve lässt sich unter der Voraussetzung, dass die Nennspannung im elastischen Bereich liegt, die Kerbgrundbeanspruchung ($\sigma_{\max}, \varepsilon_{\max}$) bestimmen (Bild 20). Dieses Neuber-Verfahren zur Bestimmung der Kerbgrundbeanspruchung lässt sich bei zyklischer Beanspruchung unter Hochtemperaturbelastung anwenden [21]. Das dort beschriebene Näherungsverfahren zur Bestimmung von Bauteilversagen im Kerbgrund auf der Grundlage der Neuber-Hyperbel (Bild 20) geht von symmetrischen Zug-Druck-Verformungsverhalten aus.

Der hier vorgestellte Weg geht von der axialen Nennspannung im Kerbgrund aus. Zur Ermittlung der maximalen Spannung σ_{\max} und der maximalen Dehnung ε_{\max} im Kerbgrund wird die Neuber-Hyperbel (Gl.7.5) in einem Spannungs-Dehnungs-Diagramm erstellt und der Schnittpunkt mit der zyklischen Fließkurve gebildet (Bild 20). Die zyklische Fließkurve wird hierbei mit der Ramberg-Osgood-Gleichung (Gl.(3.2)) erstellt. Danach werden anhand des Nennspannungs-Zeit-Verlaufs unter der gegebenen Dehnrates der Maximalspannungs-Zeit-Verlauf und Maximaldehnungs-Zeit-Verlauf festgelegt (**Bild 28; Bild 29**). Der so ermittelte Maximaldehnungs-Zeit-Verlauf wird für Schädigungsberechnung eingesetzt.

Bei Implementierung des obigen Vorgehens im Rahmen des Programms SARA wird zuerst als Eingabe die bauteilabhängige Kerbformzahl K_t benötigt. Sie wird momentan im Programmcode festgelegt, und kann später auch in den Konfigurationsdaten von Bauteilen abgelegt werden. In der Eingabedatei von SARA werden die Dehnungsausschläge in den 4 Phasen durch die Nennspannungen ersetzt. Diese Nennspannungen werden dann durch die Anwendung von Neuber- Hyperbel in maximale Dehnungen umgewandelt. Dafür

wurde ein Unterprogramm entwickelt, und in das Hauptprogramm von SARA integriert. Der entsprechende Code wurde im **Bild 30** dargestellt.

Die Vorgehensweise zur Ermittlung von ε_{\max} wird auf den Druckauschlag (Phase 1) und Zugausschlag (Phase 3) angewendet. Für die Haltephase 2 und 4 werden die Werte ε_{\max} vorläufig sinngemäß auch so errechnet. Hier ist ggf. in der Zukunft eine andere Lösung zu finden. Mit den ermittelten maximalen Dehnungen wird als Zwischenergebnis ein betriebsähnlicher Zyklus erzeugt, mit dem SARA die Lebensdauer des Bauteils weiter berechnen kann.

Für diese Vorgehensweise wurden einige Nachrechnungen durchgeführt. Der zu berechnende Zyklus wurde mit einer Drucknennspannung von -200MPa und einer Zugnennspannung von 150MPa gestaltet (**Bild 31**). Wegen der fehlenden Versuchsdaten steht eine Überprüfung der berechneten Ergebnisse noch aus.

Mittelbar lässt sich die Richtigkeit der Implementierung zu überprüfen, indem man 3 Testrechnungen für Bauteile mit unterschiedlichen Kerbformzahlen K_t durchführt. Die Kerbformzahl K_t beschreibt die Geometrie einer Kerbstelle, und es gilt: je größer die Kerbformzahl einer Kerbstelle ist, desto größere maximale Spannung wurde an dieser Kerbstelle verursacht. Somit führt eine größere Kerbformzahl bei gleichen Zyklusbedingungen immer zu einer kleineren Anrisswechselzahl. Bei den 3 Testrechnungen mit SARA wurden jeweils Werte der Kerbformzahl $K_t=2.0, 2.3, \text{ und } 2.5$ genommen, welche bauteilrelevant sind. Die berechnete Anrisswechselzahl wurde in einer Tabelle (**Bild 32**) dargestellt. Bezüglich der Ergebnisse ist gegen die Richtigkeit der Implementierung nicht einzuwenden. Erwartungsgemäß befindet sich die ausgerechnete Lebensdauer aller drei Testrechnungen in einem vernünftigen Bereich. Die Ausgabedatei aus der Testrechnung mit $K_t=2,3$ wurde im **Bild 33** dargestellt.

8 Erzielte Ergebnisse durch Optimierung und Erweiterung von SARA

Im Rahmen dieser Arbeit ließen sich mehrere Testrechnungen, jeweils mit der bisherigen Version und mit der neuen Version durchführen, um die neue Implementierung zu überprüfen. Als Werkstoff wird X12CrMoWVNbN10-1-1 für die Testrechnung verwendet. Für die erste Rechnung wurde ein betriebsähnlicher Teilzyklus (**Bild 34**) verwendet, Die Dehnungsausschläge bei den 4 Phasen sind -0,433%; 0; 0,217%; 0. Die Dauer der 4 Haltephasen betragen jeweils 0,750; 7,000; 1,500 und 0,750 Stunden. Dieser Zyklus wurde als einer der Standardzyklen für die Forschung sehr viel verwendet. Von diesem verfügt man auch über ausreichende Versuchsdaten. Die Dehnungsschwingbreite ergibt sich bei diesem Zyklus zu 0.65% (Zugdehnung + Druckdehnung). Um einen aussagensfähigen Vergleich der Testrechnungen vorzunehmen, ließen sich die weiteren Testrechnungen auch für Dehnungsschwingbreiten 1.2%, 0.9%, 0.5% und 0.3% durchführen. Die entsprechenden Zyklusdaten erhielt man durch eine Modifikation des obigen Zyklus. Dabei wurden jeweils nur die Druckdehnung ε_1 in Phase 1 und die Zugdehnung ε_3 in Phase 3 geändert, und die anderen Zyklusparameter wie Dauer der Haltephasen, minimale und maximale Temperaturen, bzw. Rampengeschwindigkeiten wurde beibehalten. Da die Zugdehnung ε_3 in Phase 3 bei einem betriebsähnlichen Zyklus immer die Hälfte der Druckdehnung ε_1 in Phase 1 beträgt, setzt man z. B. bei einer Dehnungsschwingbreite von 1.2% die Druckdehnung auf 0.8%.

Zur Testrechnung wurde ein IBM-Laptop vom Modell R52 mit Pentium M 1.73 GHz Prozessor und 512M DDR Arbeitsspeicher. Das Betriebssystem ist Microsoft Windows XP Professional Version 2002 Service Pack 2.

8.1 Berechnete Lebensdauer und gemessene Laufzeiten

Die Testrechnungen mit den bisherigen und neuen Versionen liefern bei gleichen Zyklusdateien immer die identische Anrisswechselzahl. Es ist somit auch bewiesen, dass sich die Relaxation auch mit durchschnittlich weniger Iterationsschritten hinreichend genau berechnen lässt.

Es ist auch festzustellen, dass die Laufzeit der Testrechnungen mit der neuen Version im Vergleich zu der alten Version ungefähr um den Faktor 0,5 verkürzt wurde (**Bild 35**). Diese Verkürzung lässt sich so interpretieren, dass in der neuen Version durchschnittlich wenige Iterationsschritte für die Relaxationsberechnung hinterlegt wurden. Die konstruierten Hysteresisschleifen mit der bisherigen und der neuen Version von SARA bei Dehnungsschwingbreite $\Delta\varepsilon = 0,65\%$ für $N = N_A/2$ wurde im Bild 35 dargestellt. Da die beiden Schleifen weitergehend identisch sind, wird zur Visualisierung die durch die neue Version konstruierte Schleife einheitlich um 0,05% Dehnung nach rechts geschoben.

Die berechnete Lebensdauer in Zyklen (Anrisswechselzahl) wurden im Zusammenhang mit den benötigten Rechenzeiten im **Bild 36** aufgetragen. Eine verkürzte Laufzeit ermöglicht so dann, Bauteile mit längeren Lebensdauern bei gleichem Zeitaufwand simulieren zu können.

8.2 Berechnungsergebnisse von mehrachsiger Beanspruchung

Die Ergebnisse der Nachrechnungen für mehrachsige Beanspruchungen wurden unmittelbar in Kapitel 7 beschrieben. Da die entsprechenden Versuche im Rahmen der Forschungsvorhaben noch durchzuführen sind, steht ein Vergleich der erzielten Ergebnisse mit den Experimenten noch aus. Bei dem im Abschnitt 7.1 geschilderten Weg wurden die Rechnungsergebnisse von zwei Abstrahierungsfällen verglichen. Es ist festzustellen, dass der Abstrahierungsfall mit einer niedrigeren Dehnungsschwingbreite erwartungsgemäß eine größere Anrisswechselzahl ergab. Für den im Abschnitt 7.1 geschilderten Weg wurden 3 Beanspruchungsfälle mit unterschiedlichen Kerbformzahlen nachgerechnet. Die errechneten Anrisswechselzahlen wurden im Bild 32 dargestellt.

Hierbei ergaben sich bei Beanspruchungsfällen mit kleineren Kerbformzahlen größere Anrisswechselzahlen, was auch zu erwarten war.

8.3 Schlussfolgerung

Insgesamt wurde in dieser Arbeit eine Reihe von Verbesserungen zur Modularisierung, zur Erweiterung der Berechnungsmöglichkeiten speziell im Fall einer erweiterten Anzahl von Temperaturen, zur effektiven Berechnung und damit zur Verkürzung der Berechnungszeiten vorgenommen, die alle zum Vorteil für den Anwender bei der Bauteilberechnung sind.

Die Erweiterung auf Mehrachsigkeit ist eine seit längerer Zeit von Seiten der Industrie geforderte Erweiterung [23]. Bereits jetzt gibt es Anfragen nach Fortsetzung dieser Forschungsarbeit.

Das Simulationsprogramm *SARA* ist von der Idee und der Struktur her so aufgebaut, dass Daten aus Hochtemperaturversuchen direkt für die Simulation verwendet werden können. Rechnungen für Verformung und Lebensdauer (Anrisswechselzahl) sind in vergleichsweise kurzer Zeit möglich. Ein Nachteil bezüglich der tabellarischen Darstellung der Werkstoffdaten ist die Verlust an Genauigkeit bei den Ermittlungen von Kennzahlen und Faktoren durch Interpolation. Die berechneten Ergebnisse sind in vielen Fällen empfindlich zu der Darstellungsweise der Werkstoffdaten. Dagegen ist die analytische Beschreibung beispielweise des Kriechverhaltens eine komplexe Aufgabe, wenn man die drei technischen Kriechbereiche genau abbilden will. Auch hier gibt es werkstoffabhängig spezielle Lösungen. Insgesamt sind also hier noch zukünftig weitere Untersuchungen erforderlich.

Alternativ zu *SARA* gibt es für die Simulation von Hochtemperaturwerkstoffen noch Lösungen mit sogenannten konstitutiven Gleichungen. Dieser Ansatz hat zurzeit noch einen entscheidenden Nachteil, dass eine Vielzahl von Parametern zu bestimmen ist, die oft noch keine physikalische Bedeutung haben. Eine besondere Schwierigkeit sind hier aber die extrem hohen Rechenzeiten von Tagen bis Woche. Mit diesem Problem beschäftigt sich die Forschungsarbeit in [24].

9 Zusammenfassung

Eine wirtschaftliche und umweltfreundliche Energiegewinnung ist in den letzten Jahren zum Muss geworden. Diese stellt höhere Forderungen sowohl an den Hochtemperaturwerkstoffen jetziger und künftiger Generation, als auch an die Methoden zur Lebensdauervorhersage von Hochtemperaturbauteilen. Als eine von vielen Forschungsarbeiten in diesem Bereich versucht diese Arbeit das am IfW Darmstadt entwickelte Simulationsprogramm *SARA* hinsichtlich dieser neuen Forderungen zu optimieren und zu erweitern. Die in dem Programm verwendeten Datenstrukturen soll an die möglichen Datenänderungen angepasst werden. Die Laufzeit soll möglichst verkürzt werden. Bei der Programmstruktur ist höhere Modularität zu gewährleisten. Zuletzt ist eine Erweiterung des Programms um die Berechnung mit den mehrachsigen Beanspruchungsfällen vorgesehen.

Im Rahmen dieser Arbeit wurde folgende Aufgaben bearbeitet: in *SARA* verwendeten gekoppelte Arrays als Datenstrukturen für Kennwerte wurden um einen Zeiger und einen Zähler erweitert. Weiter wurden die separaten Datenstrukturen für Faktoren unter verschiedenen Temperaturen zu einer baumartigen Struktur zusammengefasst, sodass das Einfügen von Faktoren von neuen zusätzlichen Standardtemperaturen unproblematisch möglich ist. Durch diese Änderungen an den Datenstrukturen ließ sich nun eine binäre Suche statt der bisherigen linearen Suche implementieren. Zur Verkürzung der Laufzeit wurde die Anzahl der maximalen Iterationsschritte für die Relaxationsberechnung nach Beanspruchungsfällen festgelegt. Als eine weitere wichtige Aufgabe wurde das Programm auf mehrachsige Beanspruchungsfälle erweitert. Daher wurde so vorgenommen, dass die Berechnung von mehrachsigen Beanspruchungsfällen ohne große Programmänderung an der bisherigen Programmstruktur möglich war.

Nun ist eine deutliche kürzere Laufzeit festzustellen, und *SARA* kann einige Beanspruchungsfällen mit kleineren Dehnungsschwingbreiten simulieren. Die Validierung der Erweiterung auf Mehrachsigkeit soll im Rahmen des For-

schungsvorhabens vorgenommen werden. Die entsprechenden mehrachsigen Experimente sind in der nächsten Zeit vorgesehen.

Zusammenfassend ist festzustellen, dass

- 1) die Rechenzeiten von *SARA* jetzt deutlich geringer sind;
- 2) die Datenstruktur übersichtlicher gestaltet wurde;
- 3) die Datenstruktur anpassungsfähiger gestaltet wurde;
- 4) das Programm *SARA* jetzt mehrachsige Beanspruchungsabläufe verarbeiten kann.

10 Literaturverzeichnis

- [1] Stryk, O.: Grundlagen der Modellierung und Simulation (Einführung in Computational Engineering), Folien zur Vorlesung, Darmstadt, 2007.

- [2] Cui, L.: Entwicklung einer rechnergestützten Methode zur Synthese des anisothermen Spannungs-Dehnungs-Verhaltens, Diplomarbeit am IfW, TU Darmstadt (2007).

- [3] Ziebarth, H., Gobrecht, E.: Rechnergestützte Lebensdauerüberwachung von Dampf-turbinen, VDI Bericht 868 (1991).

- [4] Znajda, R.: Betriebsähnliches Langzeitdehnwechselverhalten wichtiger Stahlsorten im Hochtemperaturbereich, Dr. –Ing. Diss., Technische Universität Darmstadt (2006) D17.

- [5] Haase, H., A. Scholz, and Berger, C.: Simulation of multi-stage creep-fatigue behaviour, Proc. of the Eighth Int. Fatigue Congress, A. F. Blom (ed.), Vol. 5/5, Stockholm, 2002, pp. 3133/40.

- [6] Kloos, K.H., Granacher, J. und Scholz, A., Mehrstufige betriebsähnliche Dehnwechselbeanspruchung warmfester Stähle, Mat-wiss. u. Werkstofftech., Vol. 27, 1996, pp. 331–337.

- [7] Schemmel, J., A. Klenk und E. Roos: Numerische Simulation von Kriechermüdungsbeanspruchung bei mehrachsiger Beanspruchung von 1%- und 9%-Cr-Stählen, Vortragsveranstaltung der Arbeitsgemeinschaften Warmfeste Stähle und Hochtemperaturwerkstoffe, Tagungsband, (2002) S. 52-61.

- [8] Scholz, A., Haase, H. und Granacher, J., Programm SARA für die Lebensdauerabschätzung langzeitkriechermüdungsbeanspruchter Oberflächen massiver Bauteile, Hrsg.: VDEh Düsseldorf, 2000, Tagungsband, S. 186–200.

- [9] Schwienheer, M., A. Scholz, H. Haase und C. Berger: Influence of hold times and notches on life time under service-type creep-fatigue loading, Int. Conf. on Low Cycle Fatigue, Eds. Portella, Sehitoglu, Hatanaka, Berlin (2003) S. 245-250.

- [10] Kußmaul, K., Stegmeyer, R.: Modellkörper-Temperaturwechselversuche, MPA-Stuttgart, FVV-Bericht H 362 (1985).

- [11] Bernstein, W., G. Sauermann, K. Maile, A. Jovanovic: Hochtemperatur Bauteillebensdauer II, Abschlußbericht "Umsetzung vorhandener Methoden zur Lebensdauer-ermittlung und –vorhersage für mehrachsig beanspruchte Bauteile unter hohen Temperaturen in ein wissensbasiertes System", AiF-Vorhaben 223, FVV, Heft 713, 2001.

- [12] Berger, C., A. Scholz und A. Simon: Konstitutive 1D-Gleichungen zur Beschreibung des zyklischen und regellosen Zeitstandverhaltens warmfester Kraftwerksstähle, Abschlussbericht über das Vorhaben FKM Nr. 254 (AVIF-Nr. A174), IfW, TU Darmstadt (2002 - 2005) ; siehe auch Dr. Ing. Dissertation, in Druck.

- [13] Samir, A.: Konstitutive Werkstoffbeschreibungen für warmfeste Kraftwerksstähle im Kriech- und Kriechermüdungsbereich am Beispiel des warmfesten Schmiedestahls 28CrMoNiV4-9, Dr. –Ing. Diss., Technische Universität Darmstadt (2007) D17, im Druck.

- [14] Roos, E.: HCF-LCF-Bauteil-Beanspruchung, AVIF-Vorhaben A145, FKM-Nr. 052410, MPA-Stuttgart, FKM-Bericht Heft 277 (2003).

- [15] Ellis, R., Liu, L.: Using data abstraction to guide the restructuring of Fortran, Reverse Engineering for Software Based Systems, IEE Colloquium on 10 Nov 1994, S. 4/1 - 4/5.

- [16] Baldwin, C. Y., Clark, K. B.: Design Rules Volume 1: The power of Modularity, MIT Press, 2000, Kapitel 1-3.
- [17] Lutowski, R.: Object-oriented software development with traditional languages, ACM SIGPLAN Fortran Forum, Vol. 14 Issue 4, 1995, S. 13-18.
- [18] Miller, K. W., Morell, L. J., Stevens, F Dietsche: Adding data abstraction to Fortran software, Software, IEEE Vol. 5, Issue 6, 1988, S. 50-58.
- [19] Norton, C. D., Decyk, V. K., Szymanski, B. K.: On parallel object oriented programming in Fortran 90, ACM SIGAPP Applied Computing Review, Vol. 4, 1996, S. 27-31.
- [20] Parnas, D. L.:On the Criteria to be Used in Decomposing Systems into Modules, Communications of the ACM, 15 (12), 1972, s. 1053-1058.
- [21] Elton, K.N.; Hoffelner, W.; Bertilsson, J.E.: Creep-fatigue lifetime prediction of notched specimens and components, ASME Int. Conf. on Advances Life Prediction Methodes, 1983. S. 165-171.
- [22] Dupee, B. L.: Object oriented methods using Fortran 90, ACM SIGPLAN Fortran Fo-rum, Vol. 13, 1994, S. 21-30.
- [23] Berger, C., Scholz, A. und Cui, L.: Entwicklung von Rechenmodellen zur Lebensdauervorhersage von Kraftwerkbauteilen unter thermisch-mechanischer Kriechermüdungsbeanspruchung, AVIF-Forschungsvorhaben A232 (1/2006-6/2008), IfW, TU-Darmstadt.
- [24] Berger, C., Scholz, A.: Fortschrittliche Methoden zur Parameteridentifizierung und sequentiellen Extrapolation zur Anwendung bei konstitutiven Materialmodellen für Kriech- und Kriechermüdungsbeanspruchung. AVIF-Forschungsvorhaben A242 (2007-2009), IfW, TU-Darmstadt.
- [25] Berger, C.: Werkstoff- und Bauteilfestigkeit, Vorlesungsskript, IfW TU Darm-stadt, 2004.

11 Bilder

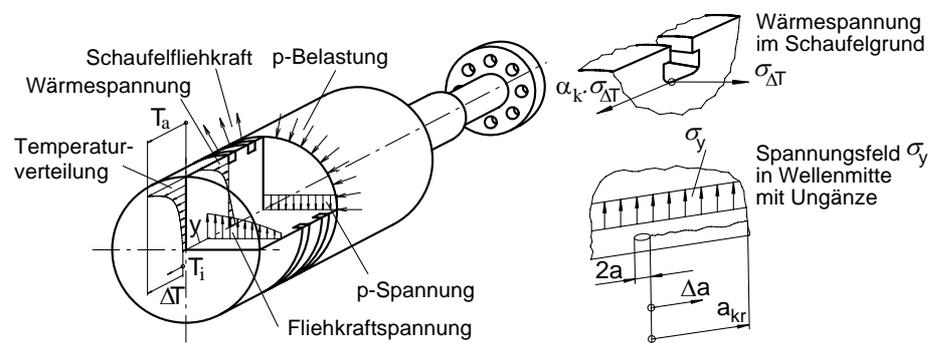


Bild 1. Beanspruchungen in einer Dampfturbinenwelle durch Primär und Sekundär-Beanspruchungen nach [2].

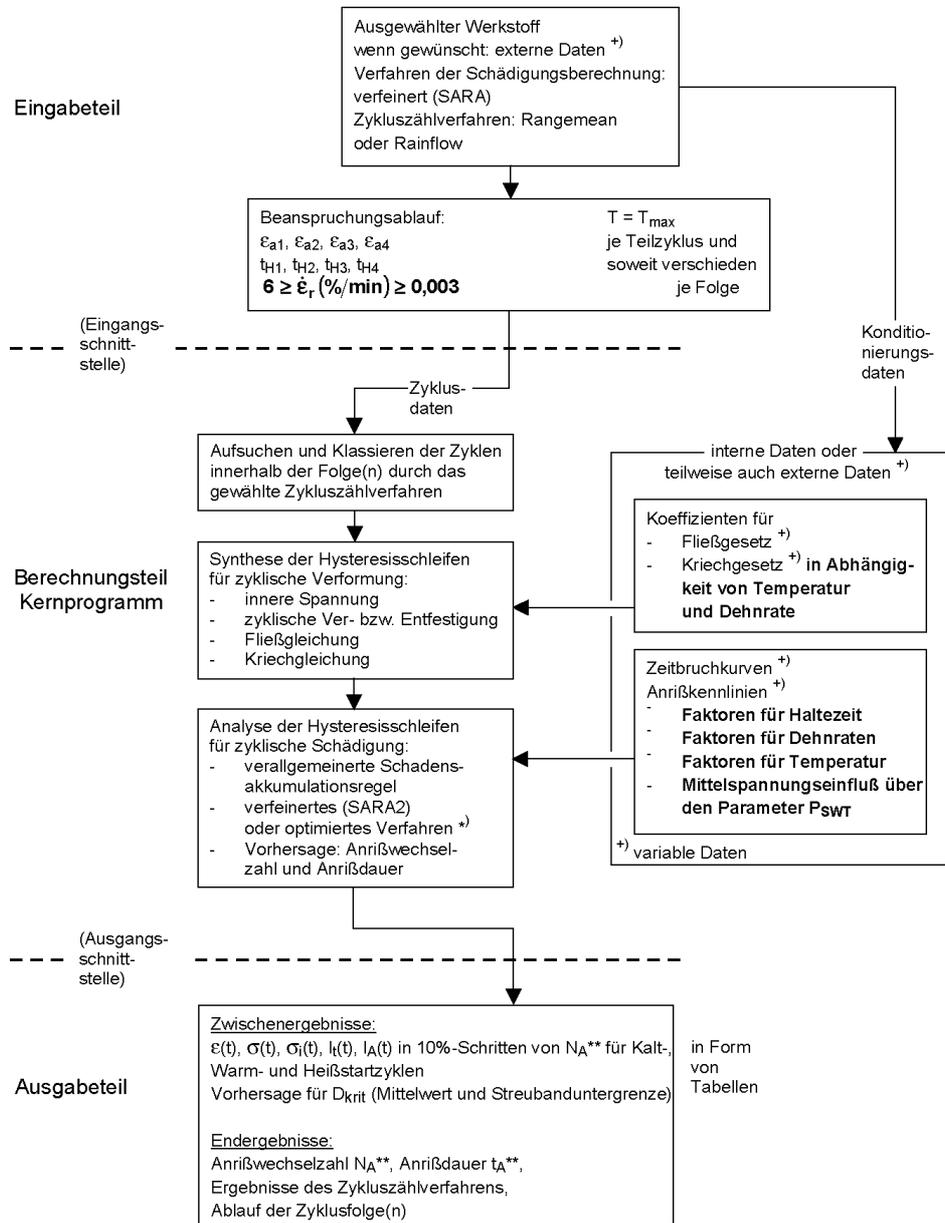


Bild 2. Programmstruktur des Simulationsprogramms SARA 4, teilweise nach [2].

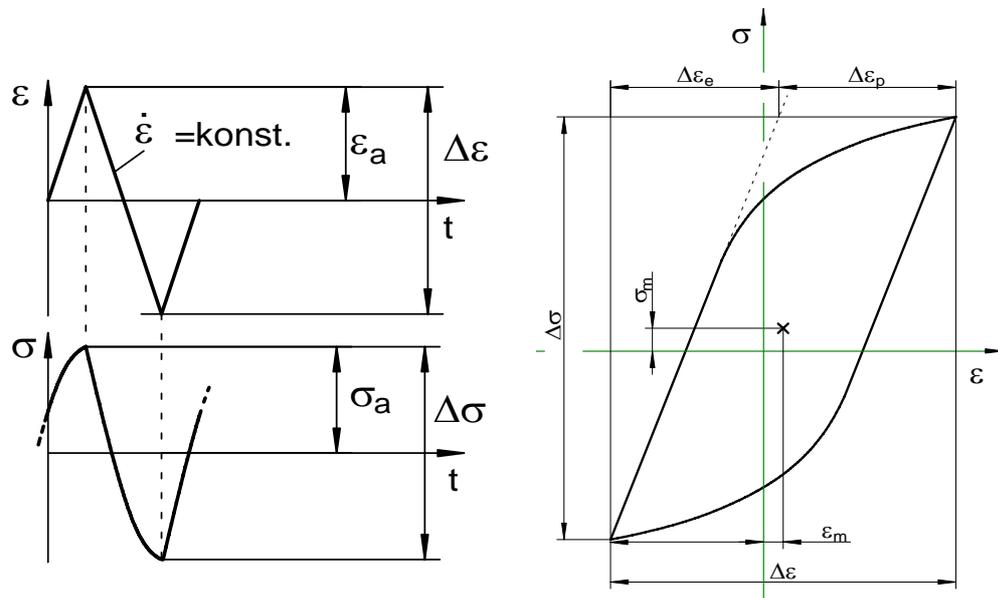


Bild 3. Zyklus (schematisch) eines Standarddehnwechselfersuchs ohne Haltezeit und konstanter Rampengeschwindigkeit $\dot{\epsilon}$ nach [2].

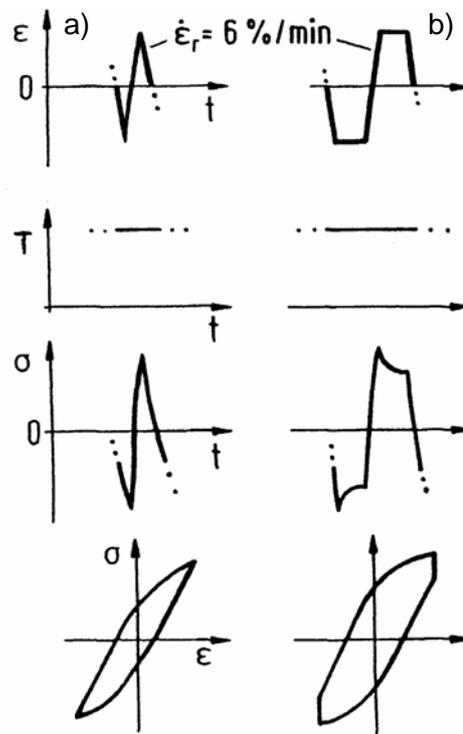


Bild 4. Schematische Darstellung von Standarddehnwechselfzyklen a) ohne und b) mit Haltezeit zur Nachbildung betrieblicher Beanspruchungsverhältnisse nach [5].

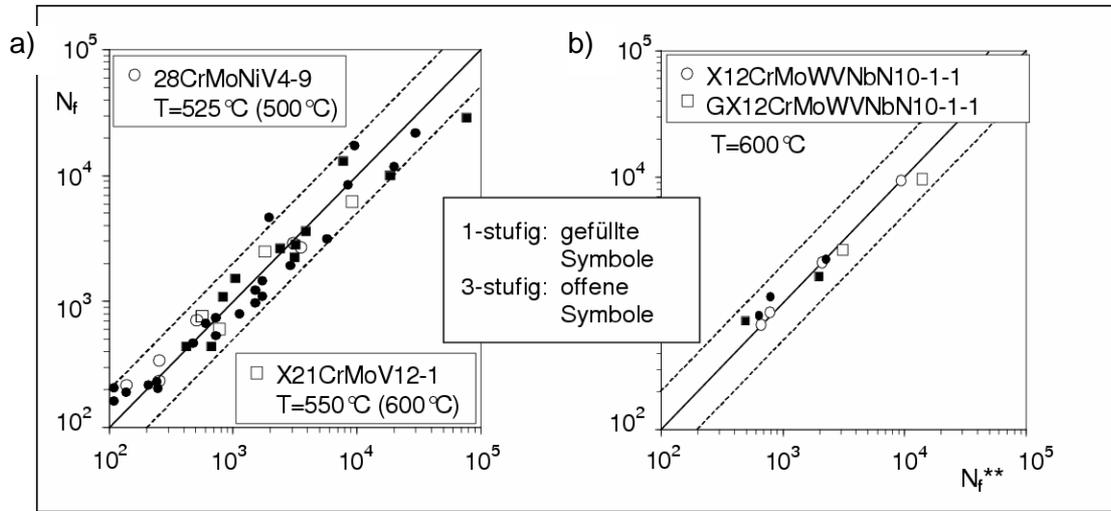


Bild 5. Vorhergesagte Anrisswechselzahl N_f^{**} und in Langzeitversuchen ermittelte Anrisswechselzahl N_f bei betriebsähnlicher Kriechermüdigungsbeanspruchung, Vorhersage mit SARA, (a) 28CrMoNiV4-9 und X21CrMoV12-1, (b) X12CrMoWVNbN10-1-1 und GX12CrMoWVNbN10-1-1, nach [5][6][7][8][9]

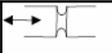
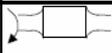
Proben für mehraxiale Beanspruchung	aufgebrachte Beanspruchung	Spannungsverlauf	Risslenleitung	Besonderheiten im Kriechermüdigungsversuch
gekerbte Probe	 Zug, Zug-Druck	Inhomogen	lokal	
dünnwandiges Rohr	 Zug, Zug-Druck + Innendruck Z)	homogen *)	lokal x)	aufwändige Absicherung, Knicken und Beulen möglich
	 Zug, Zug-Druck + Torsion	homogen *)	lokal x)	Knicken und Beulen möglich, hoher Schubspannungsanteil
umlaufende Probe	 Filehkraft	Inhomogen	lokal x)	aufwändige Absicherung
Kreuzprobe	 Biaxiale Zug-Druck-Kräfte +)	homogen	flächig	Knicken und Beulen ausschließbar, y)
*) nicht bei Einkristall-Werkstoffen x) schwierig oder nicht beobachtbar z) auch Biegung + Innendruck		+) In beliebigem Verhältnis einstellbar y) bei EK-Werkstoffen ist in gewissen Fällen ein Anriss außerhalb der Prüfzone nicht ausschließbar		

Bild 6. Übersicht über typische Proben zur Abbildung der mehraxialen Beanspruchung [13]

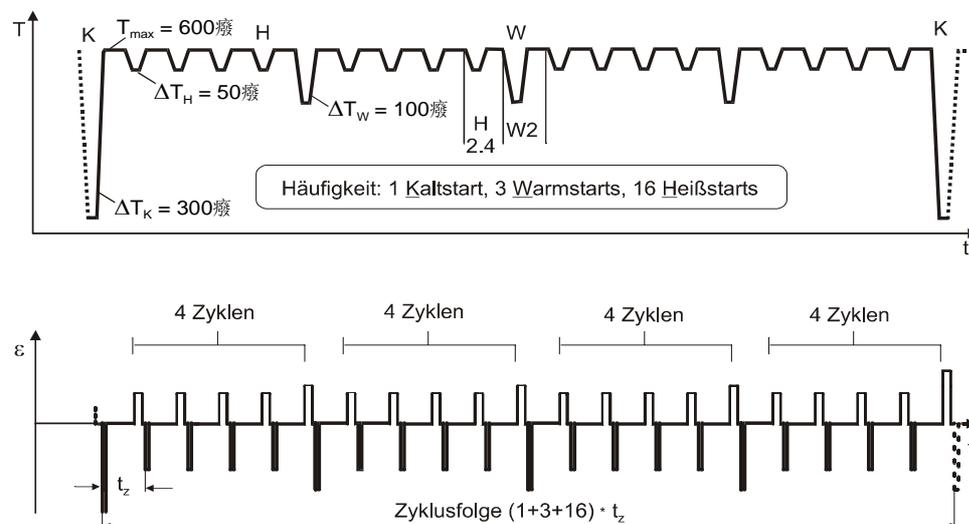


Bild 7. Dreistufiger betriebsähnlicher Temperatur- und Dehnungszeitverlauf zur Nachbildung von An- und Abfahrvorgängen mit einer für Mittellastturbinen typischen Mischung von Kalt-, Warm- und Heißstartzyklen [5][6][7][8][9].

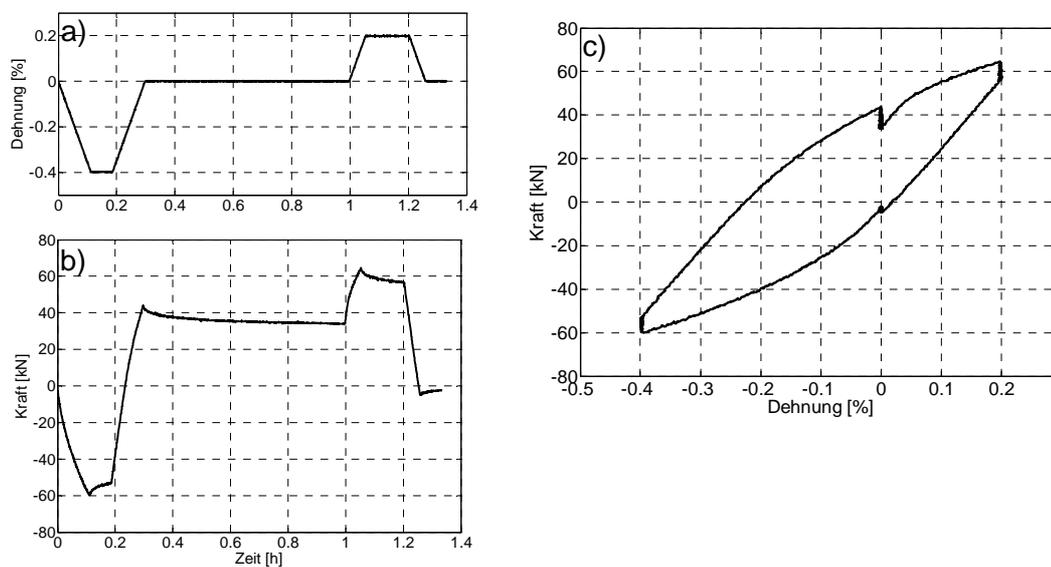


Bild 8. An einer Kreuzprobe unter Dehnungsregelung (a) gemessene Hysteresisschleife (b) und Verlauf der zyklischen Relaxation (c), Darstellung beschränkt auf eine Achse [13] zur Nachbildung der mehrachsigen Beanspruchung an der beheizten Oberfläche massiver Bauteile.

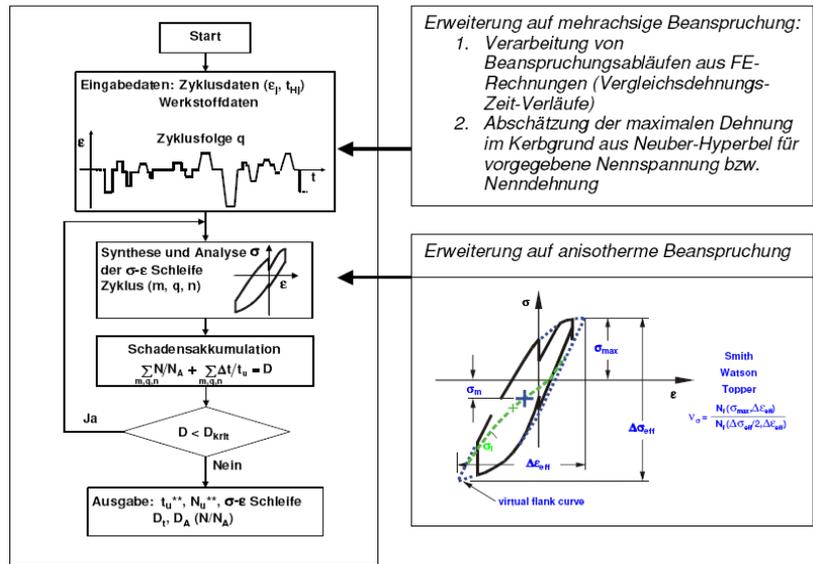


Bild 9. Zum Ablauf bei der Anwendung des phänomenologischen Verfahrens [4].

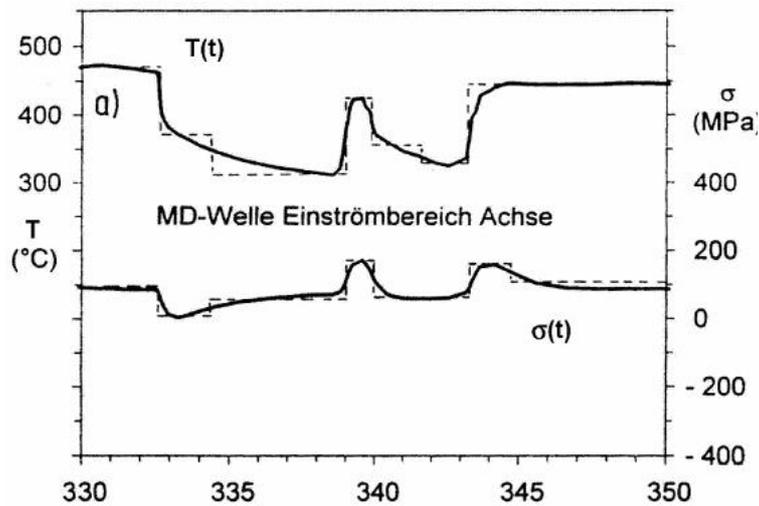


Bild 10. Gemessener Temperatur- und Spannungsverlauf am Einströmbereich.

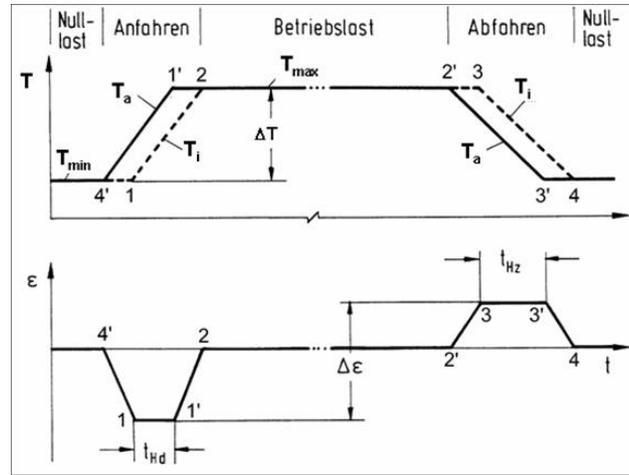


Bild 11. Abstrahierte Temperatur und Spannungsverlauf [2].

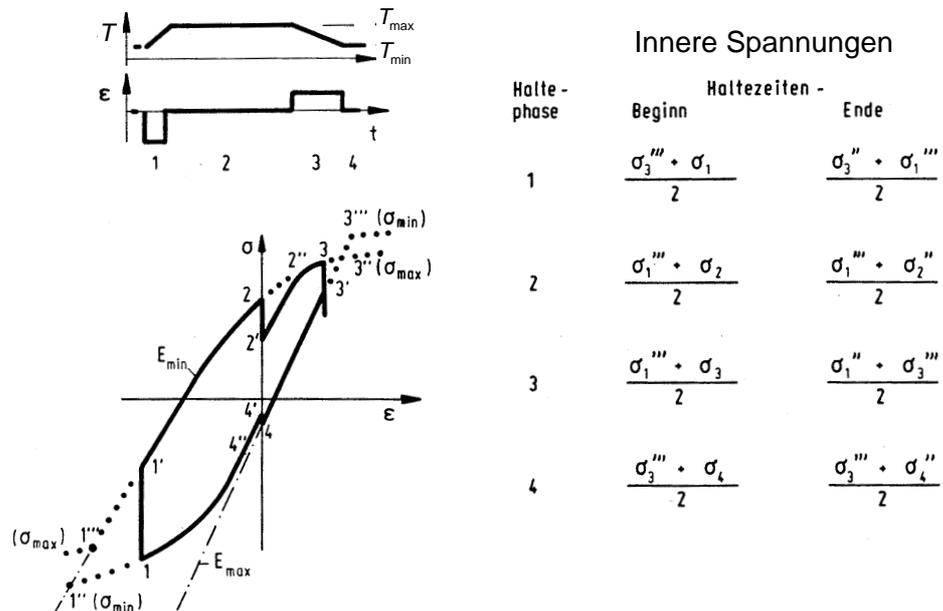


Bild 12. Konstruktion einer Hysteresisschleife unter Berücksichtigung von inneren Spannungen, nach [2].

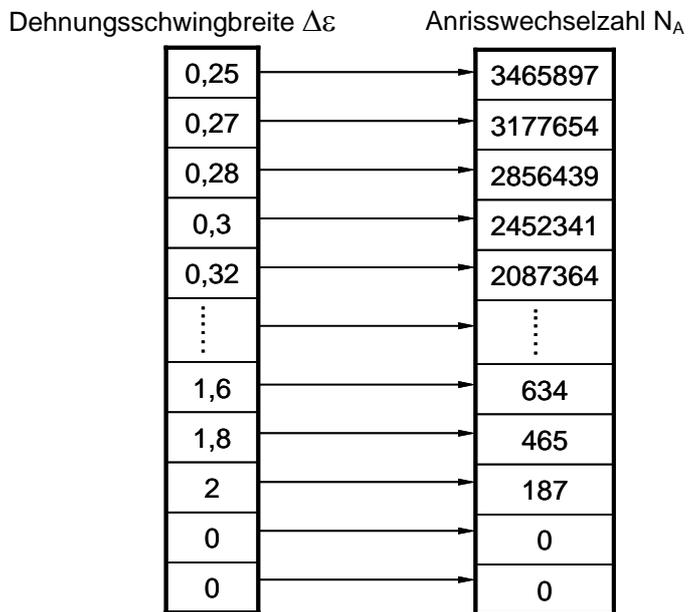


Bild 13. Zwei gekoppelte Arrays als Datenstruktur für Kennwerte.

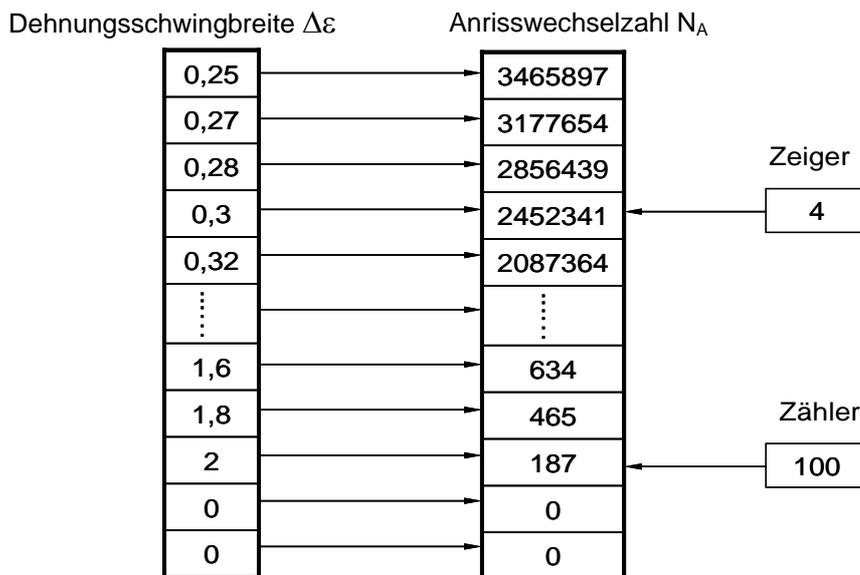


Bild 14. Erweiterung der Datenstruktur für Kennwerte um Zeiger und Zähler.

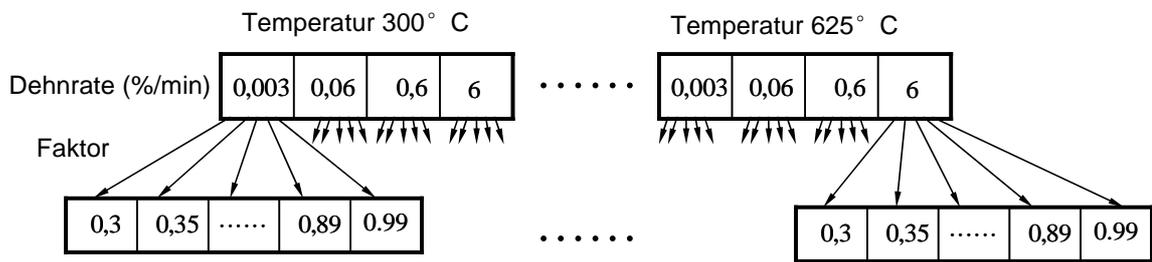


Bild 15. Separate Datenstrukturen für Faktoren unter jeder Standardtemperatur.

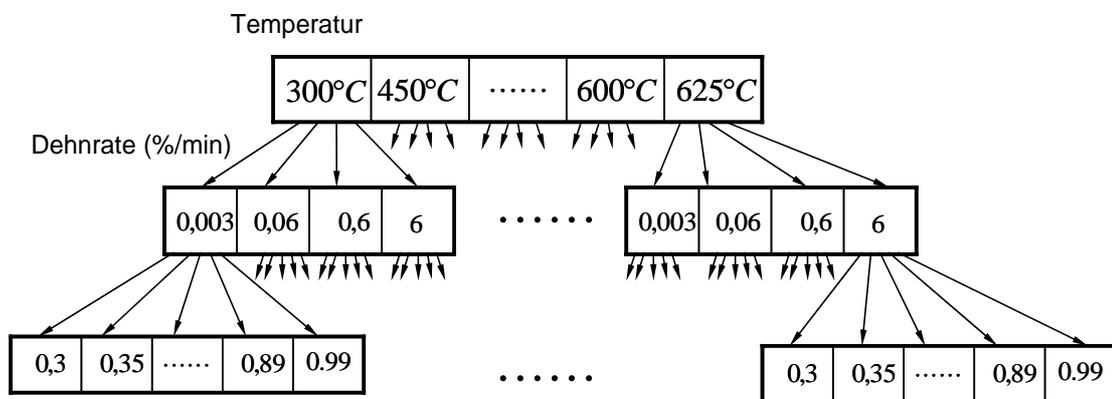


Bild 16. Eine gemeinsame Datenstruktur für Faktoren unter allen Standardtemperaturen.

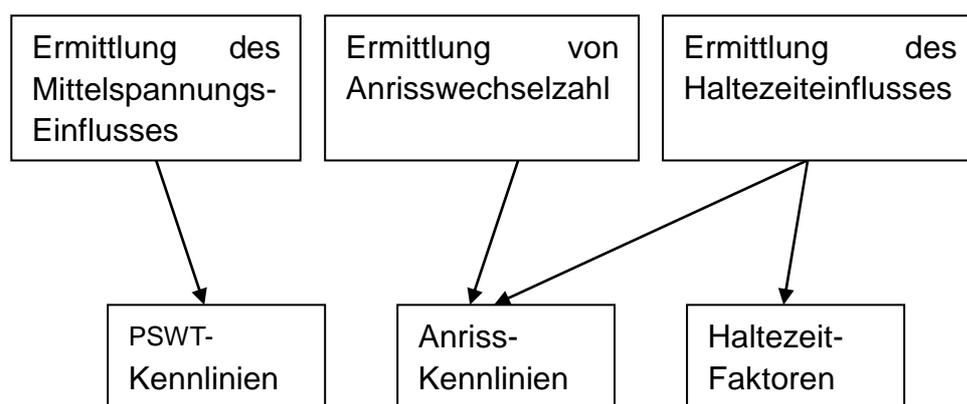


Bild 17. Programmstruktur mit „Common Blocks“.

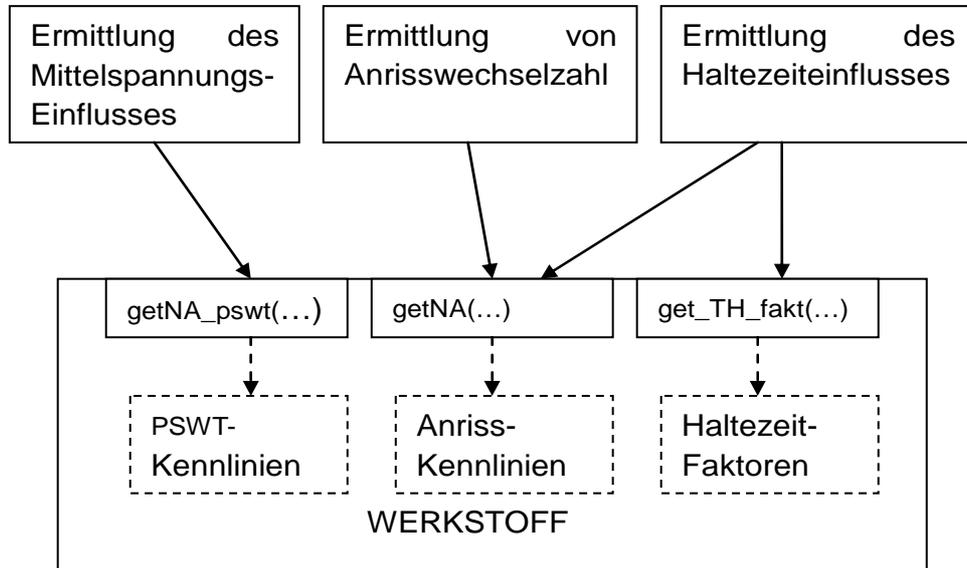


Bild 18. Programmstruktur mit „Information Hiding“.

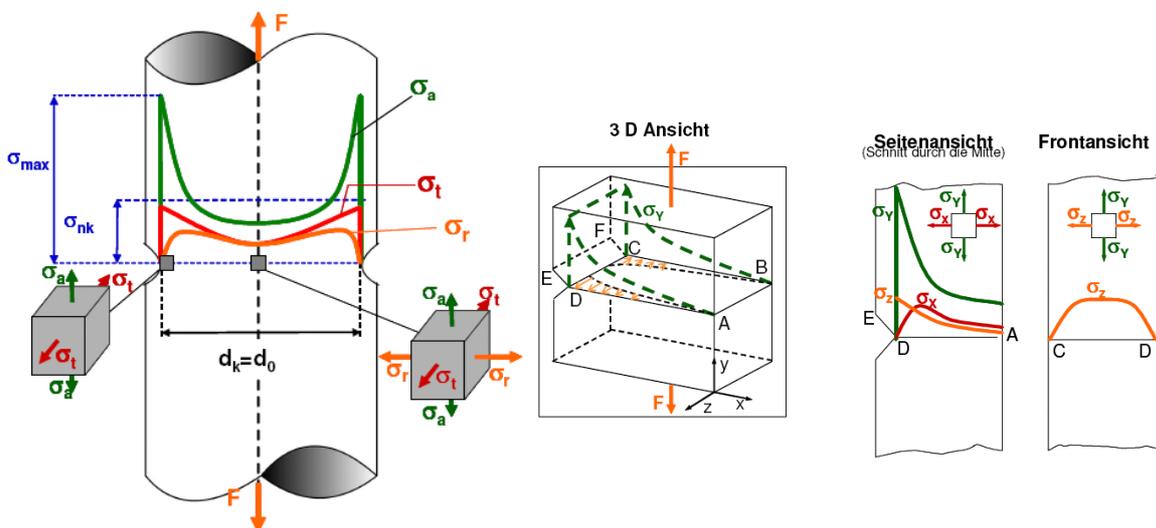


Bild 19. Verlauf einzelner Spannungskomponenten über dem Querschnitt eines Rundstabes [25].

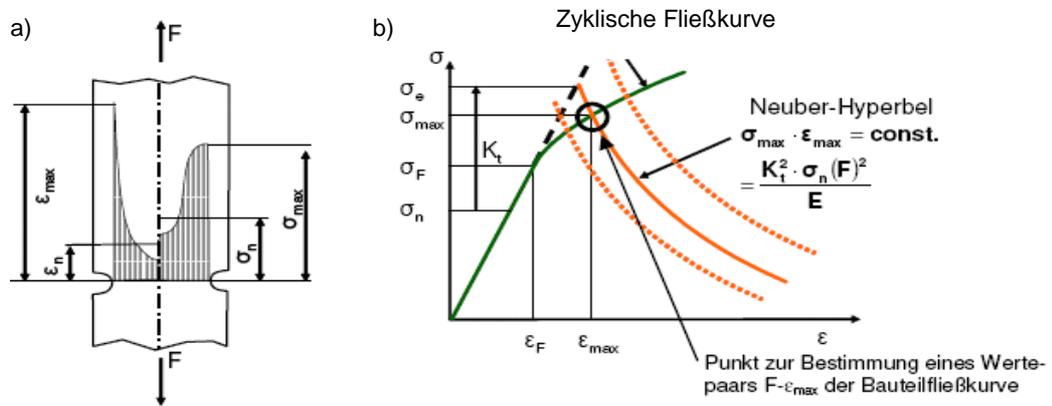


Bild 20. Maximalzugspannung σ_{\max} (a) und Maximalzugdehnung ϵ_{\max} im Kerbgrund, (b) Ermittlung der Maximalzugspannung und Maximalzugdehnung nach Neuber-Hyperbel im Kerbgrund [25].

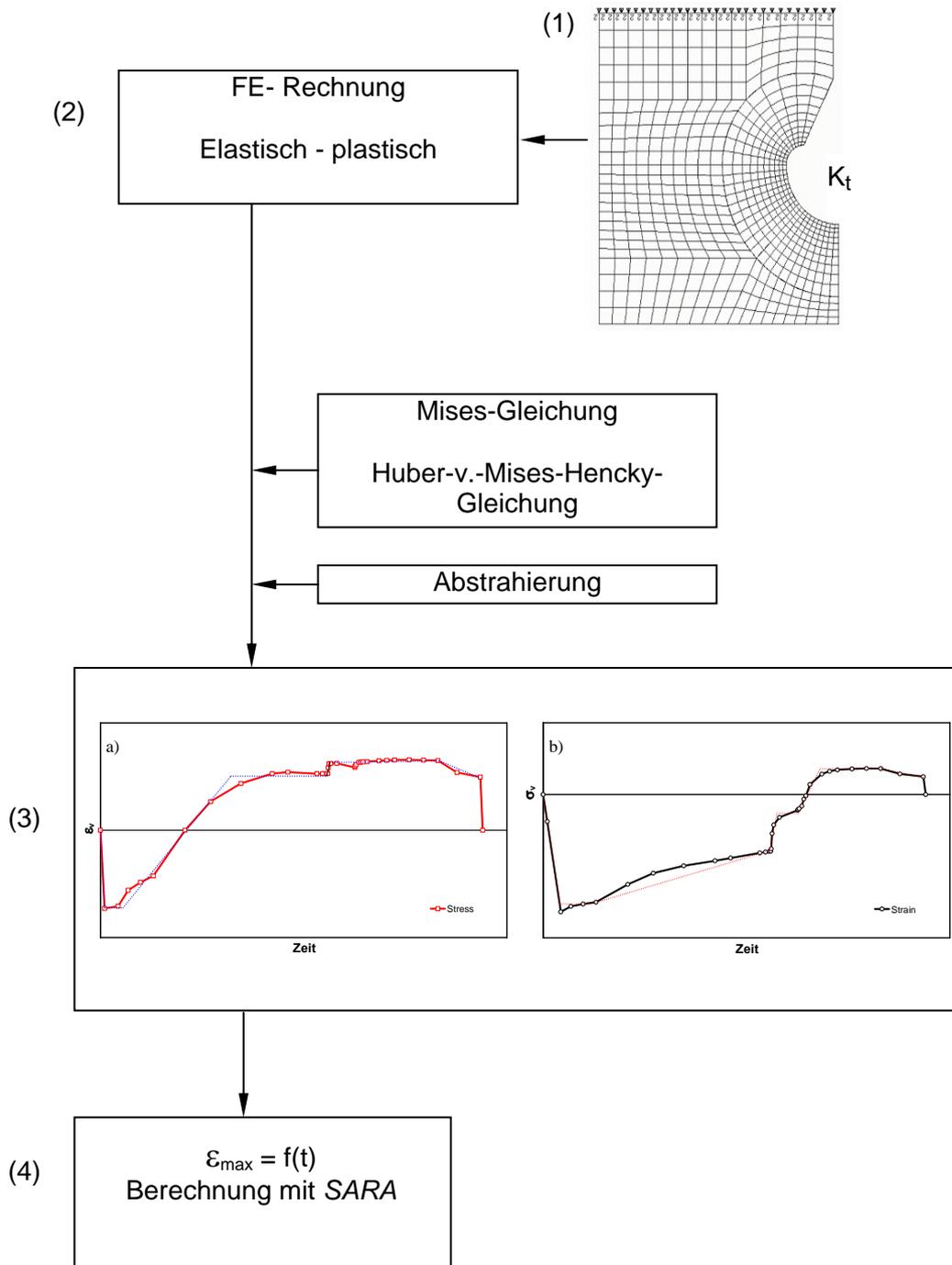


Bild 21. Berechnung der mehrachsigen Beanspruchungsfälle mit Abstrahierung der Ergebnisse von FE-Rechnungen.

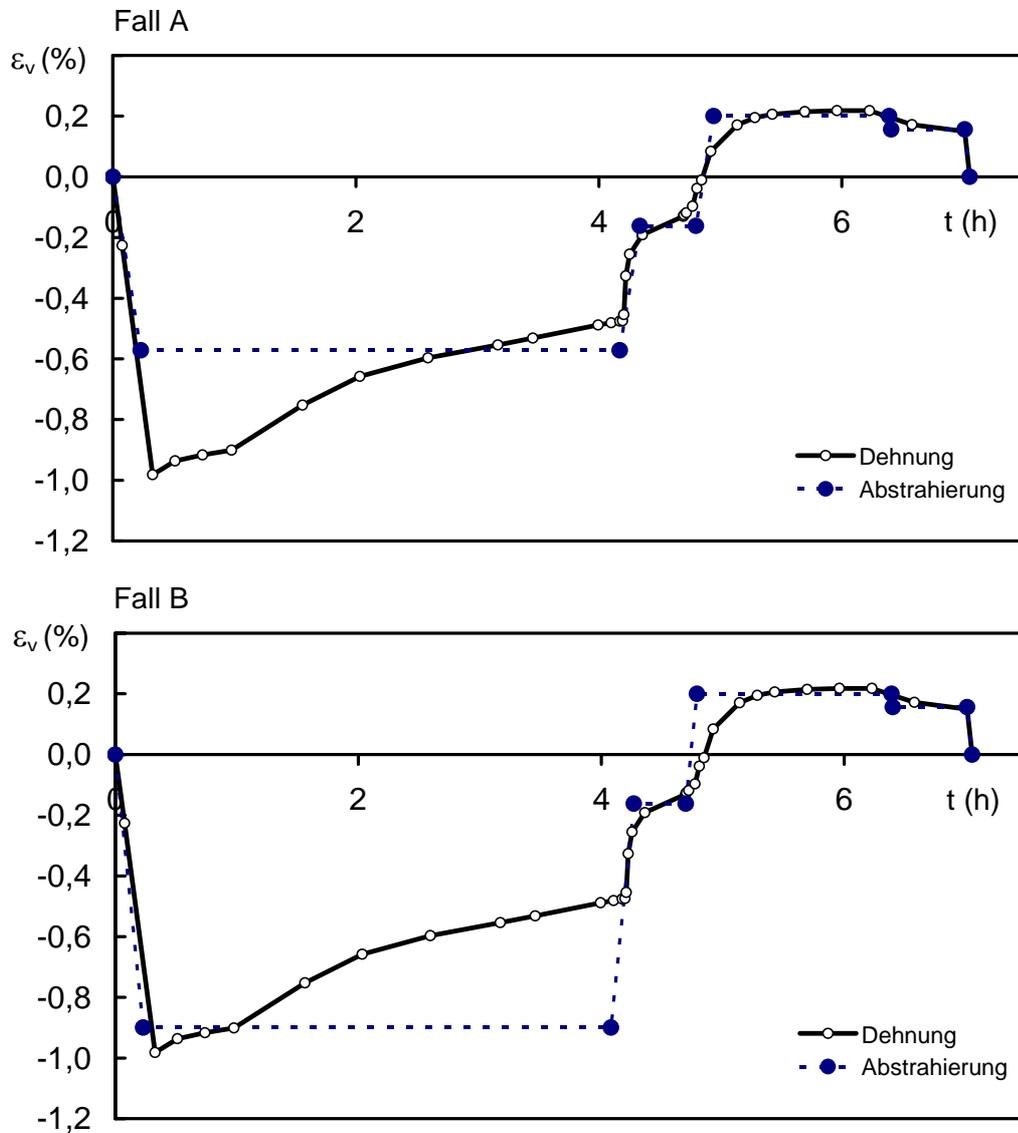


Bild 22. Beispiele für die Abstraktion eines aus einer Finit-Element-Rechnung kommenden betriebsnahen An- und Abfahrzyklus durch einen betriebsähnlichen Zyklus (Vergleichsdehnung = $f(\text{Zeit})$).

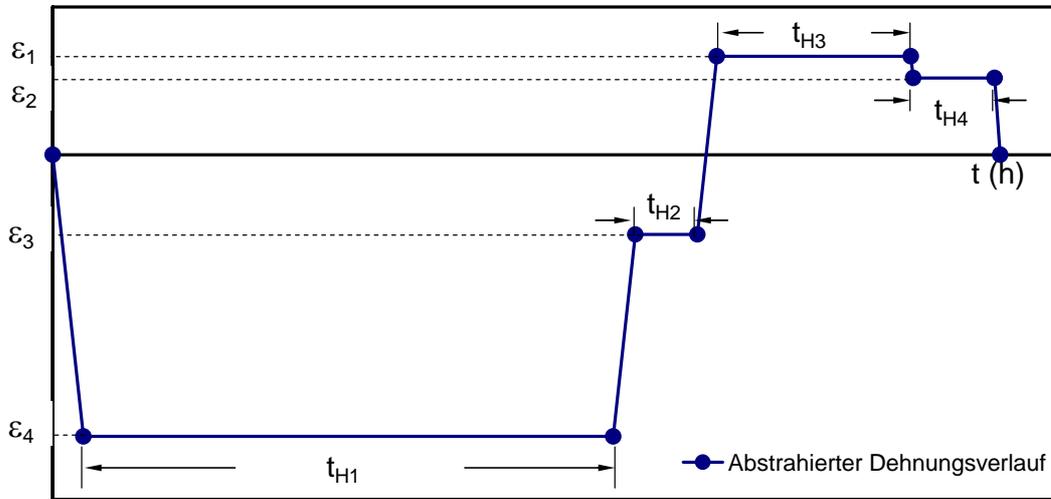


Bild 23. Mithilfe eines Abstrahierungsvorgangs ermittelter Verlauf der Dehnung ϵ_v über der Zeit, entsprechend Fall A in Bild 22.

Zeit (h)	Spannung (MPa)	Zeit (h)	Haltezeit (h)	Dehnung (%)	Dehnungsausschlag (%)
0,00	0,00	0,00		0,00	
0,22	-237,00	0,23	3,94	-0,57	-0,57
1,34	-237,00	4,17		-0,57	
1,73	188,00	4,34	0,46	-0,16	-0,16
3,84	188,00	4,80		-0,16	
4,01	373,00	4,94	1,44	0,20	0,20
6,44	373,00	6,39		0,20	
6,49	315,00	6,41	0,61	0,16	0,16
6,84	315,00	7,01		0,16	
7,05	0,00	7,05		0,00	

Spannungsgeschwindigkeit (MPa/min) 17,95
 Rampendehngeschwindigkeit (%/min) 0,04

Bild 24. Durch einen Abstraktionsvorgang ermittelter Verlauf der Vergleichsspannung über der Zeit.

ϵ_1	ϵ_2	ϵ_3	ϵ_4	t_{H1}	t_{H2}	t_{H3}	t_{H4}	$d\epsilon_r/dt$	T_{min}	T_{max}
-0,57	-0,16	0,20	0,16	3,94	0,46	1,44	0,61	6	625	625
-0,57	-0,16	0,20	0,16	3,94	0,46	1,44	0,61	6	625	625
...
-0,57	-0,16	0,20	0,16	3,94	0,46	1,44	0,61	6	625	625

Bild 25. Eingabedatei (Zyklusdatei) für SARA, Daten aus Bild 24.

```

Berechnung vom                :                28.07.2007
Uhrzeit                       :                18:21:14
Konfigurationsdateiname       :                uA1600
Werkstoff Nr.                 :                4
Werkstoff Name                :                X12CrMoWVNbN10-1-1, 1A
Temperatur (Grad C)          :                600
LKrit                          :                0.700
Schadigungsberechnungsverfahren:        VERFEINERTES VERFAHREN
Zykluszahlverfahren          :                RANGEMEAN VERFAHREN
Zyklusdateiname              :                falla.dat

Der Anriss erfolgte in der    3 ten Folgenseite,
                             3 te Zyklusfolge,
                             3 ter Teilzyklus
*****
Dauer bis Anriss in h (Mittelwert) :                1724
Anrisswechselzahl (Mittelwert)    :                243

relative Zeitstandlebensdauer    :                0.013
relative Dehnwechsellebensdauer  :                0.689
relative Kriechermuedungslebensdauer:                0.702
*****

Streubanduntergrenze          :                90%-Vertrauensgrenze
Dauer bis Anriss in h         :                1428
Anrisswechselzahl             :                204

```

Bild 26. Ergebnis der SARA-Rechnung mit den Zyklusdaten aus Bild 24 und Bild 25.

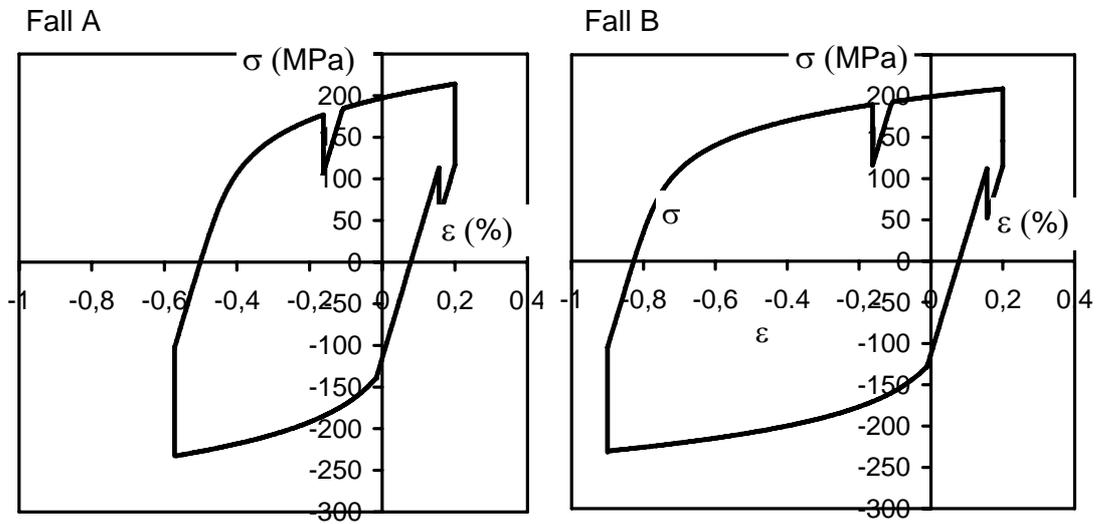


Bild 27. Vergleich der mit SARA ermittelten Spannungs-Dehnungs-Hysteresisschleife 10%-Cr Stahl, T=600°C, Fall A und B gemäß Bild 22 bis Bild 26.

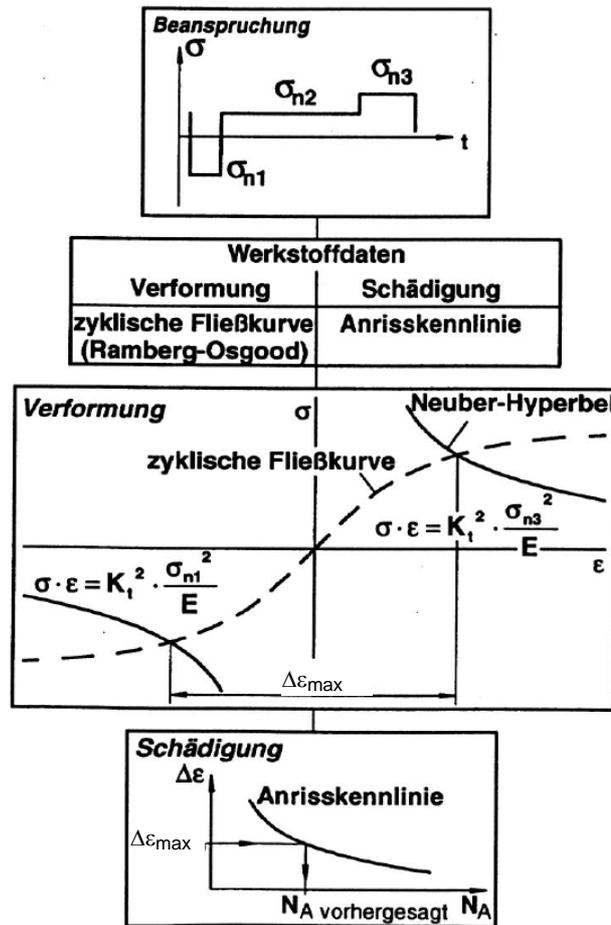


Bild 28. Flussdiagramm des Konzepts nach der Neuber-Hyperbel-Hypothese .

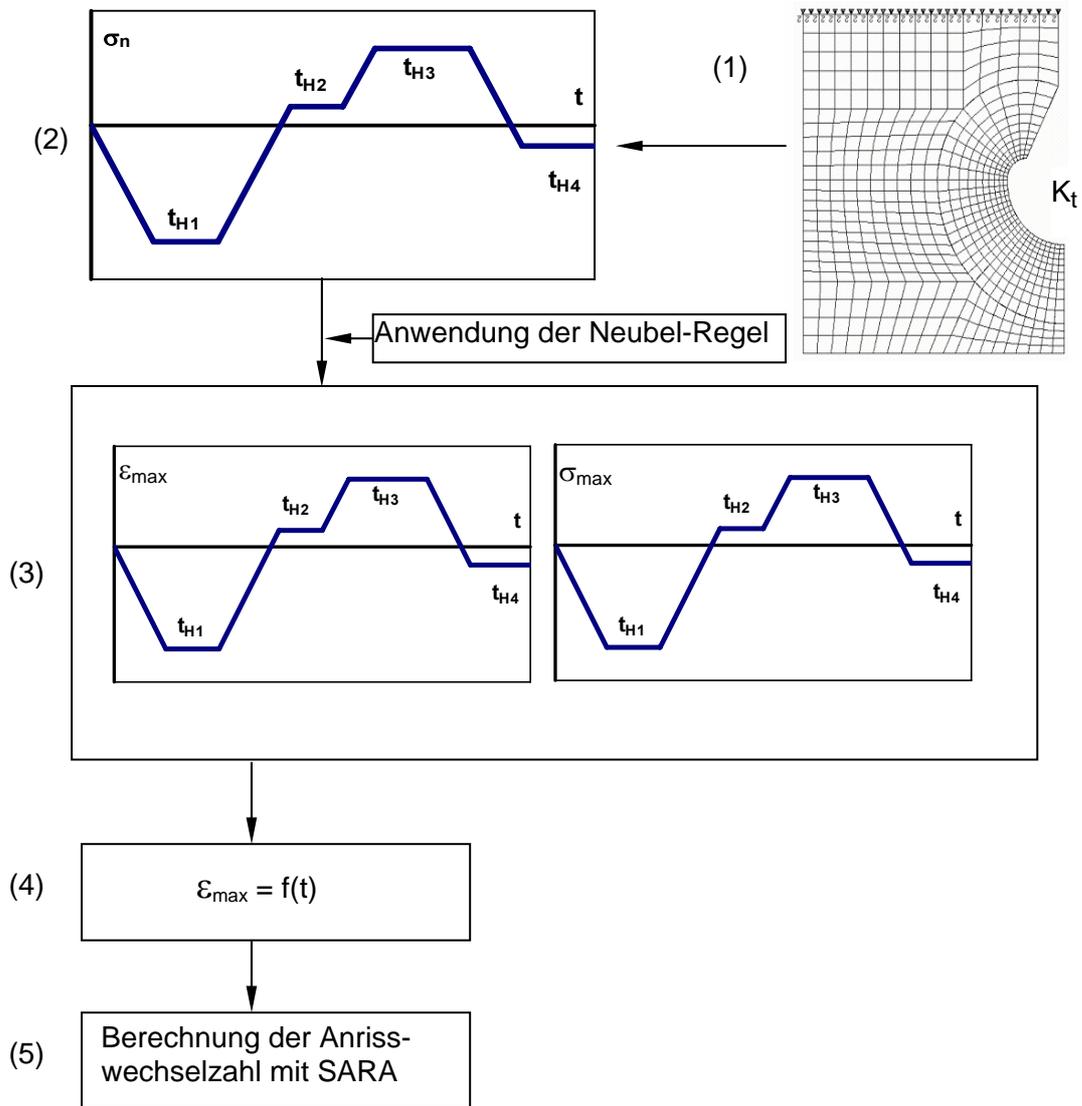


Bild 29. Berechnung der mehrachsigen Beanspruchungsfälle mit Neuber-Hyperbel.

```

SUBROUTINE Zykma(mein_Zyklen,mein_werkstoff,Kt)
  use Bauteile
  USE Zyklus
  implicit none
  TYPE (Bauteil):: mein_werkstoff
  TYPE (Zyklen):: mein_Zyklen

  INTEGER N, K
  DOUBLE PRECISION DUMMY
  DOUBLE PRECISION NZNA
  DOUBLE PRECISION Kt
  DOUBLE PRECISION A,S,EMOD

  NZNA=0.5

  DO N=1,mein_Zyklen%AZYKF
    DO K=1,mein_Zyklen%AEZYK(N)
      CALL GE-
TAS(mein_werkstoff,NZNA,mein_Zyklen%TANF(N,K),
  *      mein_Zyklen%DR(N,K),A,S)
      CALL GETE-
MOD(mein_werkstoff,mein_Zyklen%TANF(N,K),
  *      mein_Zyklen%DR(N,K),EMOD)

      CALL GETEPS-
max(A,S,EMOD,Kt,mein_Zyklen%EPS1(N,K)*100,DUMMY)
      mein_Zyklen%EPS1(N,K)=DUMMY
      CALL GETEPS-
max(A,S,EMOD,Kt,mein_Zyklen%EPS2(N,K)*100,DUMMY)
      mein_Zyklen%EPS2(N,K)=DUMMY
      CALL GETEPS-
max(A,S,EMOD,Kt,mein_Zyklen%EPS3(N,K)*100,DUMMY)
      mein_Zyklen%EPS3(N,K)=DUMMY
      CALL GETEPS-
max(A,S,EMOD,Kt,mein_Zyklen%EPS4(N,K)*100,DUMMY)
      mein_Zyklen%EPS4(N,K)=DUMMY

    END DO
  END DO
END SUBROUTINE

```

Bild 30. Unterprogramm für die Umwandlung von Nennspannungen in maximalen Dehnungen mithilfe Neuber- Hyperbel.

```
SUBROUTINE GETEPSmax(A,S,EMOD,Kt,SIG_N,EPS_max)
implicit none
INTEGER I
DOUBLE PRECISION A,S,EMOD,Kt,SIG_N,EPS_max
DOUBLE PRECISION SIG_max, SIG_O, SIG_U
DOUBLE PRECISION E1,E2

IF (SIG_N .LT. 0)THEN
SIG_U = 0.0d0 -SIG_N
ELSE
SIG_U = SIG_N
END IF
SIG_O = 5*SIG_U

DO I=1, 100
  SIG_max=(SIG_O+SIG_U)/2

  E1=SIG_max/EMOD+(SIG_max/A)**(1/S)
  E2=Kt**2*SIG_N**2/EMOD/SIG_max
  IF(DABS(E1/E2-1).LT.0.05)THEN
    GOTO 100
  ELSE IF(E1 .GT. E2)THEN
    SIG_O= SIG_max
  ELSE
    SIG_U= SIG_max

  END IF

END DO
100 EPS_max=(E1+E2)/2
IF (SIG_N .LT. 0)THEN
EPS_max = 0.0d0 - EPS_max
END IF

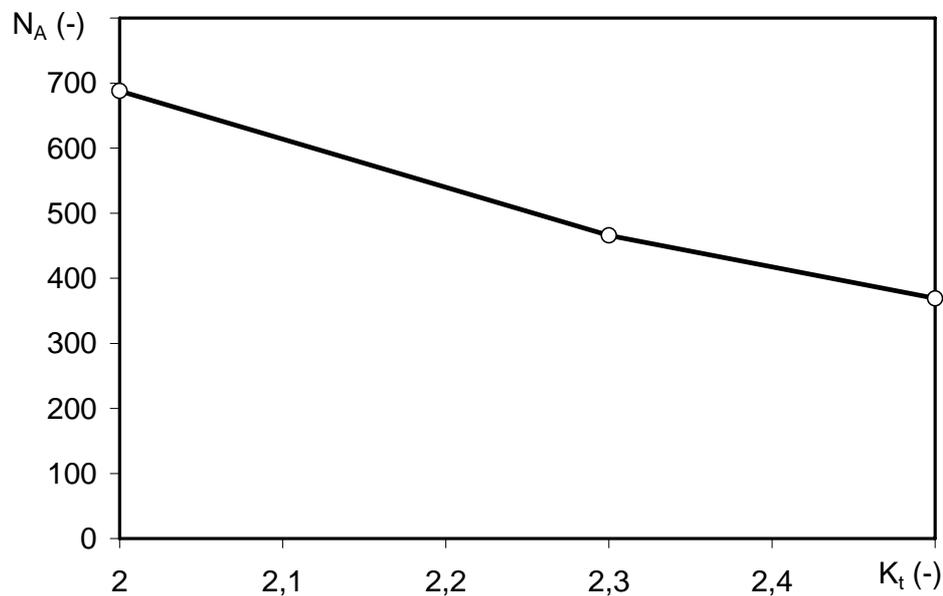
RETURN
END SUBROUTINE
```

Bild 30. Fortsetzung.

σ_1	σ_2	σ_3	σ_4	t_{H1}	t_{H2}	t_{H3}	t_{H4}	$d\varepsilon_r/dt$	T_{min}	T_{max}
-200	10	150	10	0,5	7,5	0,75	0,5	6	625	625
-210	0	180	0	0,5	7,5	0,75	0,5	6	625	625
...
-190	0	160	0	0,5	7,5	0,75	0,5	6	625	625

Bild 31. Erzeugen einer Zyklusdatei mit σ_n .

$K_t (-)$	$\Delta\sigma_n(\text{MPa})$	$\Delta\varepsilon_{max}(\%)$	$N_A (-)$
2	350	0,63	688
2,3	350	0,80	466
2,5	350	0,91	369

Bild 32. Berechnung der Anrisswechselzahl für 3 unterschiedliche Kerbfälle ($K_t=2$; $K_t=2,3$ und $K_t=2,5$), Aufteilung der Haltezeiten wie in Bild 22, Dehnrates 6%/min.

11 Bilder

```
Berechnung vom          :          19.07.2007
Uhrzeit                 :          10:55:01
Werkstoff Nr.          :          4
Werkstoff Name         :          X12CrMoWVNbN10-1-1, 1A
LKTRIT                 :          0.700
Schadigungsberechnungsverfahren:  VERFEINERTES VERFAHREN
Zykluszahlverfahren    :          RANGEMEAN VERFAHREN
Zyklusdateiname       :          h1bp8.dat

Der Anriss erfolgte in der 5 ten Folgenserie,
                        3 te Zyklusfolge,
                        16 ter Teilzyklus
*****
Dauer bis Anriss in h   :          5566
Anrisswechselzahl     :          466

relative Zeitstandlebensdauer :  0.336
relative Dehnwechsellebensdauer :  0.365
relative Kriechermuedungslebensdauer:  0.701
*****

Streubanduntergrenze   :          90%-Vertrauensgrenze
Dauer bis Anriss in h   :          4301
Anrisswechselzahl     :          391
```

Name der Ausgabedatei: aus-m-2.3.da Seite 1

Bild 33. Ausgabedatei von SARA für eine Testrechnung mit der mehrachsigen Beanspruchung nach dem in Abschnitt 7.2 geschilderten Verfahren.

Lebensdaueranteile fuer Kriechen und Ermueden
in 10 % - Schritten der Anrisswechselzahl fuer Streubandmitte

N/NA	F.S.	Z.F.	T.Z.	rel.Kriech-	rel.Zeit-		rel.Dehn-	
					stand- ermuedungs- lebens- dauer	wechsel- lebens- dauer	lebens- dauer	
0.1	1	2	22		K	0.062	0.057	0.119
					W	0.000	0.000	0.000
					H	0.000	0.000	0.000
0.2	1	4	18		K	0.102	0.102	0.204
					W	0.000	0.000	0.000
					H	0.000	0.000	0.000
0.3	2	2	15		K	0.138	0.144	0.282
					W	0.000	0.000	0.000
					H	0.000	0.000	0.000
0.4	2	4	11		K	0.169	0.182	0.351
					W	0.000	0.000	0.000
					H	0.000	0.000	0.000
0.5	3	2	8		K	0.202	0.218	0.420
					W	0.000	0.000	0.000
					H	0.000	0.000	0.000
0.6	3	4	5		K	0.231	0.251	0.482
					W	0.000	0.000	0.000
					H	0.000	0.000	0.000
0.7	4	2	1		K	0.262	0.282	0.544
					W	0.000	0.000	0.000
					H	0.000	0.000	0.000
0.8	4	3	23		K	0.286	0.312	0.598
					W	0.000	0.000	0.000
					H	0.000	0.000	0.000
0.9	5	1	19		K	0.312	0.339	0.651
					W	0.000	0.000	0.000
					H	0.000	0.000	0.000
1.0	5	3	16		K	0.336	0.365	0.701
					W	0.000	0.000	0.000
					H	0.000	0.000	0.000

Legende :

F.S. Folgenserie
Z.F. Zyklusfolge
T.Z. Teilzyklus

Kaltstart (K) (%) : 0.600 - 2.000

Warmstart (W) (%) : 0.401 - 0.599

Heissstart (H) (%) : 0.250 - 0.400

Name der Ausgabedatei:

aus-m-2.3.da

Seite 2

Bild 33. Fortsetzung.

Lebensdaueranteile fuer Kriechen und Ermueden
in 10 % - Schritten der Anrisswechselzahl fuer
Streubanduntergrenze

N/NA	F.S.	Z.F.	T.Z.	rel.Kriech-	rel.Zeit-	rel.Dehn-	
					stand-	wechsel-	
					ermuedungs-	lebens-	lebens-
					lebens-	dauer	dauer
					dauer		dauer
0.1	1	2	14	K	0.055	0.049	0.104
				W	0.000	0.000	0.000
				H	0.000	0.000	0.000
0.2	1	4	3	K	0.089	0.088	0.177
				W	0.000	0.000	0.000
				H	0.000	0.000	0.000
0.3	2	1	17	K	0.119	0.124	0.243
				W	0.000	0.000	0.000
				H	0.000	0.000	0.000
0.4	2	3	6	K	0.149	0.157	0.306
				W	0.000	0.000	0.000
				H	0.000	0.000	0.000
0.5	2	4	21	K	0.176	0.189	0.365
				W	0.000	0.000	0.000
				H	0.000	0.000	0.000
0.6	3	2	10	K	0.204	0.219	0.423
				W	0.000	0.000	0.000
				H	0.000	0.000	0.000
0.7	3	3	24	K	0.227	0.247	0.474
				W	0.000	0.000	0.000
				H	0.000	0.000	0.000
0.8	4	1	13	K	0.254	0.274	0.528
				W	0.000	0.000	0.000
				H	0.000	0.000	0.000
0.9	4	3	2	K	0.275	0.299	0.574
				W	0.000	0.000	0.000
				H	0.000	0.000	0.000
1.0	4	4	16	K	0.295	0.323	0.618
				W	0.000	0.000	0.000
				H	0.000	0.000	0.000

Legende :

F.S. Folgenserie
Z.F. Zyklusfolge
T.Z. Teilzyklus

Kaltstart (K) (%): 0.600 - 2.000
Warmstart (W) (%): 0.401 - 0.599
Heissstart (H) (%): 0.250 - 0.400

Name der Ausgabedatei:

aus-m-2.3.da

Seite 4

11 Bilder

Phasenbezogene Lebensdaueranteile fuer Kriechen
in 10 % - Schritten der Anrisswechselzahl fuer
Streubanduntergrenze

N/NA	F.S.	Z.F.	T.Z.		Phase 1	Phase 2	Phase 3	Phase 4
0.1	1	2	14	K	0.00004	0.05153	0.00004	0.00308
				W	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
				H	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
0.2	1	4	3	K	0.00004	0.08397	0.00004	0.00503
				W	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
				H	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
0.3	2	1	17	K	0.00004	0.11285	0.00004	0.00667
				W	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
				H	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
0.4	2	3	6	K	0.00004	0.14085	0.00004	0.00818
				W	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
				H	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
0.5	2	4	21	K	0.00004	0.16670	0.00004	0.00961
				W	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
				H	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
0.6	3	2	10	K	0.00004	0.19281	0.00004	0.01088
				W	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
				H	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
0.7	3	3	24	K	0.00004	0.21536	0.00004	0.01198
				W	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
				H	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
0.8	4	1	13	K	0.00004	0.24071	0.00004	0.01292
				W	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
				H	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
0.9	4	3	2	K	0.00004	0.26120	0.00004	0.01392
				W	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
				H	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
1.0	4	4	16	K	0.00004	0.28023	0.00004	0.01482
				W	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
				H	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000

Legende : F.S. Folgenseerie
Z.F. Zyklusfolge
T.Z. Teilzyklus

Kaltstart (K) (%): 0.600 - 2.000
Warmstart (W) (%): 0.401 - 0.599
Heissstart (H) (%): 0.250 - 0.400

Name der Ausgabedatei: aus-m-2.3.da Seite 5

Bild 33. Fortsetzung.

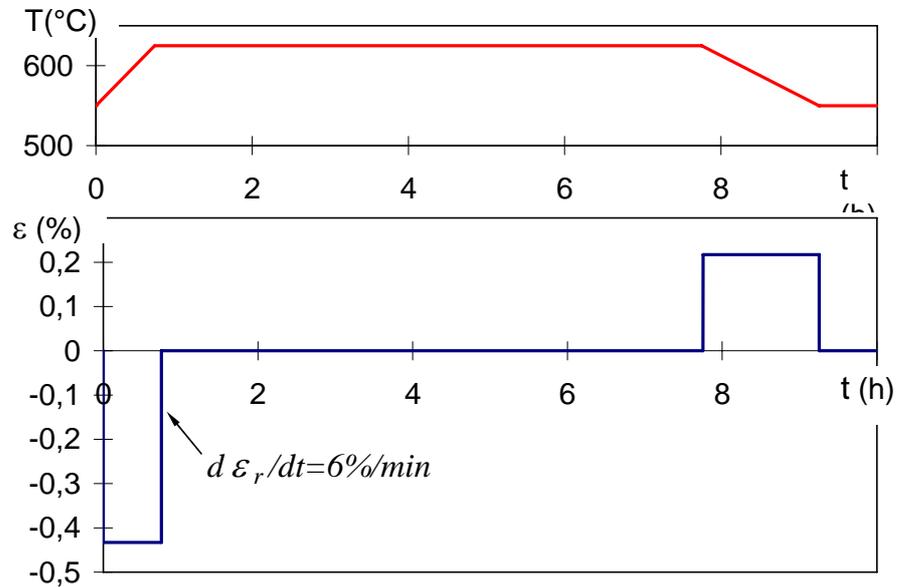


Bild 34. Typischer betriebsähnlicher Zyklus mit Dehnungsschwingbreite 0,65% und Zyklusdauer 10h.

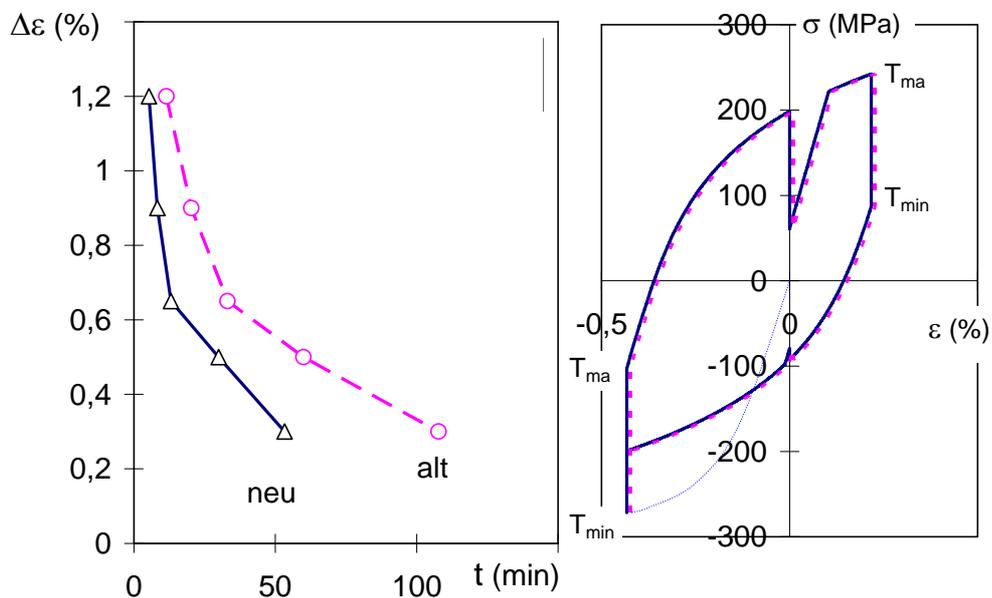


Bild 35. Darstellung der Rechenzeiten über der Dehnungsschwingbreite mit der bisherigen und der neuen Version von SARA und Vergleich der beiden Hysteresisschleifen bei $N=N_A/2$.

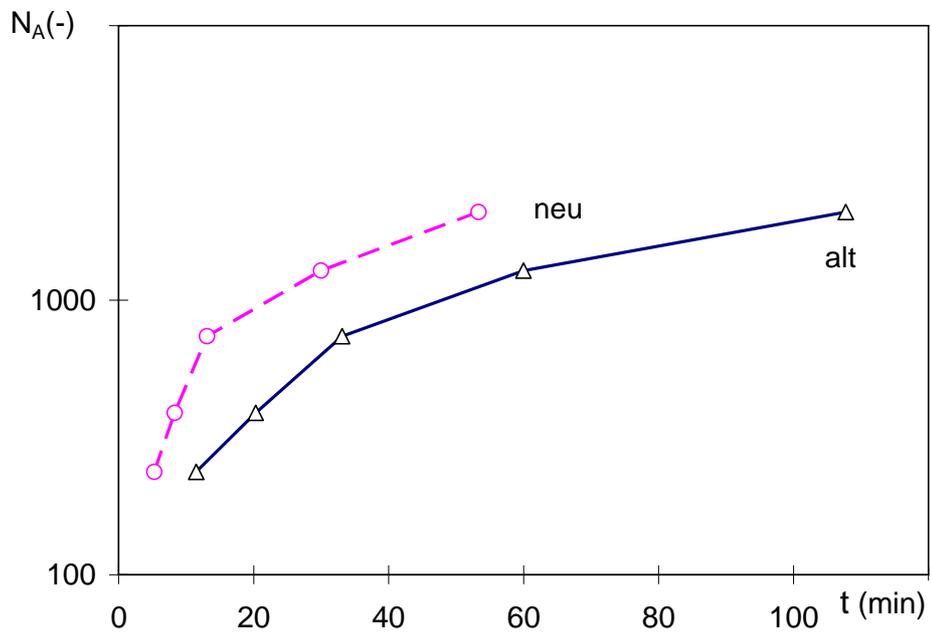


Bild 36. Darstellung der Rechenzeiten über Anrisswechselzahl mit der alten und der neuen Version von SARA.