



RESSORTFORSCHUNGSBERICHTE ZUR  
SICHERHEIT DER NUKLEAREN ENTSORGUNG

# Zentrale Untersuchung und Auswertung von Herstellungsfehlern und Betriebsschäden im Hinblick auf druck- führende Anlagenteile von Kernkraftwerken – Los 2

Arbeitspaket 3 – Aufarbeitung und Bewertung von Dehnkriterien für  
strukturmechanische Nachweise bei druckführenden Komponenten

Vorhaben 4713R01352

**AUFTRAGNEHMER:IN**  
Materialprüfungsanstalt Universität Stuttgart, Stuttgart

Florian Fehring



# **Zentrale Untersuchung und Auswertung von Herstellungsfehlern und Betriebsschäden im Hinblick auf druckführende Anlagenteile von Kernkraftwerken – Los 2**

## **Arbeitspaket 3 – Aufarbeitung und Bewertung von Dehnkriterien für strukturmechanische Nachweise bei druckführenden Komponenten**

Dieser Band enthält einen Ergebnisbericht eines vom Bundesamt für die Sicherheit der nuklearen Entsorgung im Rahmen der Ressortforschung des BMU (ReFoPlan) in Auftrag gegebenen Untersuchungsvorhabens. Verantwortlich für den Inhalt sind allein die Autor:innen. Das BASE übernimmt keine Gewähr für die Richtigkeit, die Genauigkeit und Vollständigkeit der Angaben sowie die Beachtung privater Rechte Dritter. Der Auftraggeber behält sich alle Rechte vor. Insbesondere darf dieser Bericht nur mit seiner Zustimmung ganz oder teilweise vervielfältigt werden.

*Der Bericht gibt die Auffassung und Meinung der Auftragnehmer:innen wieder und muss nicht mit der des BASE übereinstimmen.*

**BASE-RESFOR-020/21**

Bitte beziehen Sie sich beim Zitieren dieses Dokumentes immer auf folgende URN:  
urn:nbn:de:0221-2021110329491

Berlin, November 2021

### **Impressum**

**Bundesamt  
für die Sicherheit  
der nuklearen Entsorgung  
(BASE)**

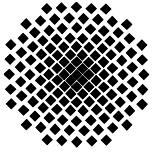
RESSORTFORSCHUNGSBERICHTE ZUR  
SICHERHEIT DER NUKLEAREN ENTSORGUNG

**Auftragnehmer:in**  
Materialprüfungsanstalt Universität Stuttgart, Stuttgart

Florian Fehringer

030 184321-0  
www.base.bund.de

Erscheinungsdatum: November 2021



**BMUB-Vorhaben 3613R01352**

**Zentrale Untersuchung und Auswertung von  
Herstellungsfehlern und Betriebsschäden im Hinblick auf  
druckführende Anlagenteile von Kernkraftwerken – Los 2**

**Arbeitspaket 3 (AP3)**

**Aufarbeitung und Bewertung von Dehnkriterien für  
strukturmechanische Nachweise bei druckführenden  
Komponenten**

**Zwischenbericht AP3.3**

**MPA-Auftrags-Nr. 845 3000 003**

gefördert durch



Bundesministerium  
für Umwelt, Naturschutz,  
Bau und Reaktorsicherheit

**Februar 2016**

**Materialprüfungsanstalt (MPA) Universität Stuttgart**

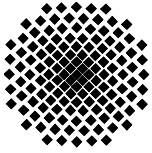
#### Anmerkungen:

Dieser Bericht ist von der Materialprüfungsanstalt (MPA) Universität Stuttgart im Auftrag des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB) im Rahmen des Vorhabens 3613R01351 erstellt worden.

Die Auftraggeberin behält sich alle Rechte vor. Insbesondere darf dieser Bericht nur mit Zustimmung der Auftraggeberin zitiert, ganz oder teilweise vervielfältigt bzw. Dritten zugänglich gemacht werden.

Dieser Bericht gibt die Meinung und Auffassung der Auftragnehmerin wieder und muss nicht mit der Meinung der Auftraggeberin übereinstimmen.

Die MPA Universität Stuttgart und die Autoren übernehmen keine Haftung für Schäden, die aufgrund von weiterführenden oder fehlerhaften Anwendungen der in diesem Bericht dargestellten Ergebnisse entstehen.



## **BMUB-Vorhaben 3613R01352**

### **Zentrale Untersuchung und Auswertung von Herstellungsfehlern und Betriebsschäden im Hinblick auf druckführende Anlagenteile von Kernkraftwerken – Los 2**

#### **Arbeitspaket 3 (AP3)**

Aufarbeitung und Bewertung von Dehnkriterien für strukturmechanische Nachweise bei druckführenden Komponenten

#### **Zwischenbericht AP3.3**

Verifikation der Anwendbarkeit des Konzepts zur Dehnungsabsicherung anhand einer bauteilähnlichen Probe

MPA-Auftrags-Nr. 845 1000 003

Verfasser: Florian Fehringer, M.Sc.

Projektleiter: Dipl.-Ing. Xaver Schuler

gefördert durch



Bundesministerium  
für Umwelt, Naturschutz,  
Bau und Reaktorsicherheit

Stuttgart, Februar 2016



**Inhalt**

	Seite
Abkürzungen .....	6
Formelzeichen .....	7
Zusammenfassung .....	9
1 Einleitende Bemerkungen .....	10
2 Problemstellung und Zielsetzung .....	10
3 Vorgehensweise .....	11
4 Experimentelle Untersuchung mit bauteilähnlicher Probe .....	12
4.1 Probengeometrie .....	12
4.2 Versuchsdurchführung und Versuchsergebnisse .....	12
5 Numerische Untersuchung der Kerbzugprobe .....	16
6 Anwendung der Bruchdehnungskurve auf die Kerbzugprobe .....	19
Literatur und Unterlagen .....	22

**Abkürzungen**

AP	Arbeitspaket
BMUB	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit
DMS	Dehnungsmessstreifen
DWR	Druckwasserreaktor
FKM	Forschungskuratorium Maschinenbau
MPA	Materialprüfungsanstalt Universität Stuttgart
PWSCC	Primary Water Stress Corrosion Cracking



**Formelzeichen**

$\alpha_k$	Formzahl	-
A	Bruchdehnung	-
d	Kerbgrunddurchmesser	mm
D	Durchmesser	mm
A	Bruchdehnung	-
d	Kerbgrunddurchmesser	mm
D	Durchmesser	mm
$\varepsilon_{v,pl}$	akkumulierte plastische Vergleichsdehnung	-
f	aktuelles Hohlraumvolumen	-
$f_0$	Anfangs-Hohlraumvolumen	-
$f_c$	kritisches Hohlraumvolumen	-
h	Spannungsmehrachsigkeit	-
l	Länge	mm
$L_0$	Ausgangsmesslänge Extensiometer	mm
r	Kerbradius	mm
s	Wandstärke	mm



## Zusammenfassung

In dem vorliegenden Zwischenbericht sind die Ergebnisse des Arbeitspakets (AP) 3.3 dokumentiert. Dieses Arbeitspaket beinhaltet die Demonstration der Anwendbarkeit des Konzepts zur Dehnungsabsicherung aus Arbeitspaket 3.1 auf eine bauteilähnliche Probe. In Arbeitspaket 3.2 wurde das Konzept bereits auf einen Rohrabzweig unter in-plane Biegung anhand einer numerischen Simulation angewendet.

Als Geometrie für eine bauteilähnliche Probe wurde eine Kerbzugprobe mit V-Kerbe und einer Formzahl von  $\alpha_k = 2,49$  gewählt. Die Geometrie der Probe wurde dabei so gewählt, dass die Spannungsmehrachsigkeit am Rissinitiierungsort den Werten des in AP3.2 betrachteten Rohrabzweigs an der höchstbeanspruchten Stelle entspricht. Der Versuch wurde mit einer konstanten Verfahrgeschwindigkeit des Querhaupts von 0,5 mm/min durchgeführt. Die maximale Zugkraft lag bei 620 kN, die integral über der Kerbe gemessene Bruchdehnung bei 15,3 %. Anhand dreier an der Probenschulter in Längsrichtung angebrachter um den Umfang gleichmäßig verteilter Dehnungsmessstreifen konnte festgestellt werden, dass während des Versuchs keine relevante zusätzliche Biegebelastung auftrat.

Die schädigungsmechanische Berechnung der Kerbzugprobe erfolgte unter Verwendung des Rousselier-Modells. Unter Verwendung der in AP 3.2 verwendeten Rousselier-Parameter berechnet zwar das Modell ebenfalls einen Anriss der Probe an der Außenoberfläche, jedoch erfolgt der Anriss in der Simulation bei viel höheren Verschiebungen als im Experiment. Dementsprechend deutlich weicht der Kraft-Weg-Verlauf der Simulation von den experimentell ermittelten Ergebnissen ab. Dies belegt die bereits in AP3.2 beschriebene eingeschränkte Anwendbarkeit des Rousselier-Modells für geringe Mehrachsigkeiten. Auch aus anderen Forschungsvorhaben ist bekannt, dass der Verlauf der Grenzdehnungskurve unter Verwendung des Rousselier-Modells nicht in den Bereich kleiner Mehrachsigkeiten extrapoliert werden darf. Da aber sowohl der Rohrabzweig als auch die Kerbzugprobe im Bereich kleiner Spannungsmehrachsigkeiten liegen, wurde zu deren Bewertung zusätzlich die Grenzkurve nach der FKM-Richtlinie (s. AP3.1) herangezogen. Diese ergibt sowohl für die Kerbzugprobe als auch für den Rohrabzweig eine konservative Abschätzung der ertragbaren plastischen Vergleichsdehnung.

Um die numerisch bestimmte Bruchdehnungskurve auch auf den Bereich kleiner Spannungsmehrachsigkeiten zu erweitern bedarf es noch zusätzlicher experimenteller und numerischer Untersuchungen, wie sie in dem derzeit laufenden BMWi Forschungsvorhaben [7] vorgesehen sind.

## 1 Einleitende Bemerkungen

Im Rahmen von BMUB-Vorhaben 3613R01352 „Zentrale Untersuchung und Auswertung von Herstellungsfehlern und Betriebsschäden im Hinblick auf druckführende Anlagenteile von Kernkraftwerken – Los 2: Literaturrecherche zur primärwasserinduzierten Spannungsrissskorrosion, zu Auswirkungen von Erdbebenlasten und zur Absicherung der Integrität von druckführenden Komponenten über Dehnkriterien“ wurden von der Materialprüfungsanstalt Universität Stuttgart (MPA) folgende Arbeiten durchgeführt:

- AP1: Aufarbeitung des aktuellen nationalen und internationalen Kenntnisstandes bezüglich PWSCC (Literaturlauswertung, Erfahrungsaustausch mit anderen Forschungsstellen, Teilnahme an fachspezifischen Konferenzen) und eine zusammenfassende Bewertung im Hinblick auf die deutschen Kernkraftwerke mit Druckwasserreaktoren (DWR).
- AP2: Aufarbeitung des aktuellen nationalen und internationalen Kenntnisstandes bezüglich der Auswirkung von Erdbebenlasten (Aufreten von Mehrfacherdbeben) auf die Werkstoffschädigung und das Versagensverhalten von Rohrleitungskomponenten (Literaturlauswertung, Erfahrungsaustausch mit anderen Forschungsstellen, Teilnahme an fachspezifischen Konferenzen) und zusammenfassende Bewertung.
- AP3: Aufarbeitung des aktuellen nationalen und internationalen Kenntnisstandes im Hinblick auf das Konzept der Dehnungsabsicherung (Literaturlauswertung, Erfahrungsaustausch mit anderen Forschungsstellen, Teilnahme an fachspezifischen Konferenzen) und numerische Anwendung sowie experimentelle Verifikation anhand einer bauteilähnlichen Probe.

In diesem Zwischenbericht sind die Arbeiten und Ergebnisse des Arbeitspaketes 3.3 dokumentiert. Dieses Arbeitspaket beinhaltet die experimentelle Verifikation des Konzeptes zur Dehnungsabsicherung anhand einer bauteilähnlichen Probe.

## 2 Problemstellung und Zielsetzung

Der statische Festigkeitsnachweis für Komponenten in Kraftwerksanlagen erfolgt gemäß den geltenden Regelwerken fast ausschließlich über spannungsbasierte Kriterien und Berechnungen unter Berücksichtigung von linear-elastischem Werkstoffverhalten. Das bedeutet, dass die im Bauteil auftretenden integralen und lokalen Spannungen die zum Versagen des Bauteils führenden Grenzwerte nicht erreichen oder gar übersteigen dürfen. Dabei werden durch die Begrenzung auf zulässige Spannungswerte implizit auch die Verformungen und Dehnungen auf zulässige Werte begrenzt. Insbesondere die in der Kerntechnik verwendeten ferritischen

und austenitischen Stähle verfügen über ein hohes Verformungsvermögen, so dass sich anstelle der indirekten spannungsbasierten Nachweisführung die direkte Nachweisführung durch Begrenzung der Dehnungen auf zulässige Werte anbietet.

Für zulässige Dehnungen sind derzeit im kerntechnischen Regelwerk keine Grenzwerte zur Dehnungsabsicherung enthalten. Insbesondere für postulierte Lastfälle mit geringer Eintrittswahrscheinlichkeit (Störfälle) sowie auslegungsüberschreitende Belastungen werden dabei die Verformungsreserven zäher metallischer Werkstoffe nicht oder nur ungenügend ausgenutzt.

Beim Konzept der Dehnungsabsicherung sind für den Nachweis des mechanischen Verhaltens eines Bauteils die auftretenden oder spezifizierten Beanspruchungen auf zulässige Dehnungswerte zu begrenzen und nicht, wie derzeit im technischen Regelwerk üblich, auf zulässige Spannungen. Das Konzept der Dehnungsabsicherung beruht auf der Ermittlung zulässiger Dehnungswerte. Zum Nachweis ausreichender Sicherheitsabstände in den unterschiedlichen Sicherheitsebenen bzw. Beanspruchungsstufen ist die Kenntnis der Grenzdehnung für die zu betrachtenden Bauteile erforderlich. Diese Grenzdehnung ist eine Funktion des Werkstoffs, der Mehrachsigkeit des Spannungszustandes, der Bauteilgröße und der Umgebungsbedingungen.

Im Rahmen dieser Untersuchungen ist durch eine Literaturrecherche der aktuelle Kenntnisstande zum oben beschriebenen Themenkomplex darzustellen und darauf basierend ein Grenzdehnungskonzept zu definieren (AP3.1) und dessen Anwendbarkeit auf reale Bauteilgeometrien und -größen durch numerische Analysen zu demonstrieren (AP3.2). Das Konzept ist durch experimentelle Untersuchungen unter Verwendung von bauteilähnlichen Proben zu verifizieren (AP3.3).

### **3 Vorgehensweise**

Im Rahmen dieses Arbeitspaketes (AP3.3) wird das vorgeschlagene Konzept zur Dehnungsabsicherung anhand experimenteller Untersuchungen an einer Probe mit bauteilähnlicher Geometrie überprüft und bewertet. Die verwendete Probe wird dabei so bemessen, dass sie vergleichbare Spannungszustände aufweist, wie sie z. B. in den ferritischen Rohrleitungsabzweigen des Primärkreises von Kernkraftwerken vorliegen. Das Versuchsmaterial wird von der MPA Universität Stuttgart beigestellt.

## 4 Experimentelle Untersuchung einer bauteilähnlichen Probe

### 4.1 Probengeometrie

Als Versuchswerkstoff wurde, wie bereits für den Rohrabzweig unter in-plane Biegung [1], der ferritische Kraftwerksstahl 20MnMoNi5-5 verwendet. Als Probengeometrie wurde eine gekerbte Rundzugprobe mit V-förmiger Kerbe ( $45^\circ$  Flankenwinkel) und einem Radius im Kerbgrund von  $r = 1,5$  mm gewählt (Probenbezeichnung GKF101). Der Probendurchmesser im Kerbgrund beträgt dabei  $d = 30$  mm, an der Probenschulter  $D = 38$  mm. Die gesamte Länge der Probe beträgt  $l = 350$  mm (siehe Bild 4.1).

Die Probe wurde einem Rohr mit einem Außendurchmesser von  $D = 800$  mm und einer Wandstärke von  $s = 47$  mm entnommen. Das Rohr entstammt dem Forschungsvorhaben „Rißwachstum und Bruchverhalten von rohrförmigen Komponenten mit Umfangsfehlern bei Innendruckbelastung und überlagertem wechselnden äußeren Biegemoment“ [2].

Die Geometrie der Probe wurde so gewählt, dass sich der Anriss an der Oberfläche der Probe im Kerbgrund bildet. Die Formzahl beträgt  $\alpha_k = 2,49$ .

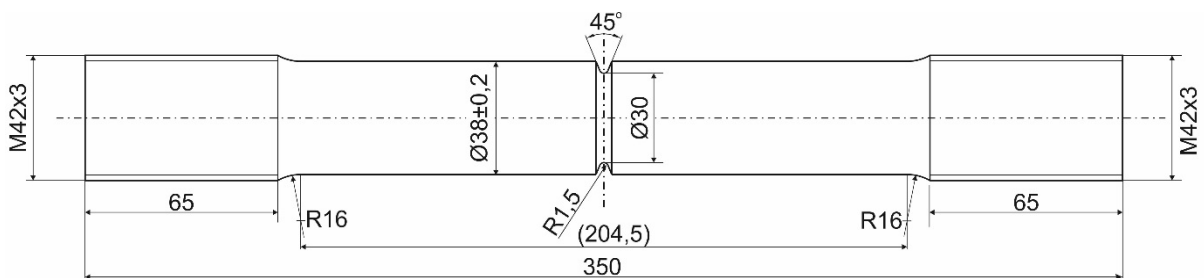
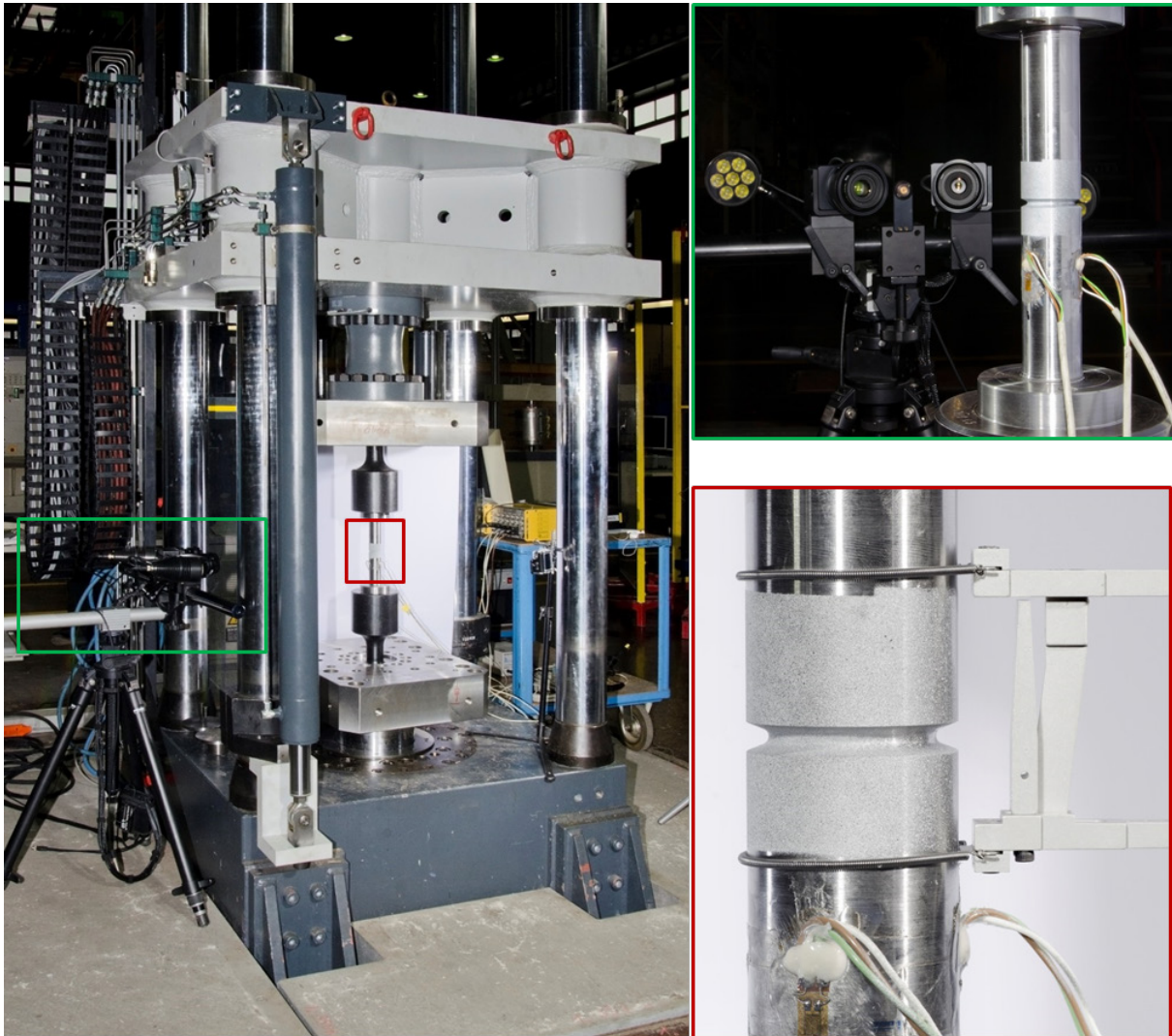


Bild 4.1: Geometrie der Kerbzugprobe aus 20MnMoNi5-5

### 4.2 Versuchsdurchführung und Versuchsergebnisse

Der Versuch wurde quasistatisch mit einer konstanten Verfahrensgeschwindigkeit des Querschnitts von  $0,5$  mm/min durchgeführt. Neben der Kraft und dem Maschinenweg wurde die integrale Dehnung über dem Kerbbereich mit Hilfe eines Extensometers der Messlänge  $L_0 = 50$  mm gemessen. Um ein mögliches Biegemoment auf die Probe zu bestimmen, wurden an der Schulter der Probe drei Dehnungsmessstreifen in Längsrichtung um  $120^\circ$  verteilt um den Probenumfang angebracht. Um zusätzlich die Kerbaufweitung der Probe während des Versuchs zu ermitteln, wurde das optische Dehnungsmesssystem ARAMIS eingesetzt. Eine zusätzliche Ermittlung der Dehnungsverteilung im Kerbgrund mittels ARAMIS ist aufgrund der geringen Kerböffnung nicht möglich. Bild 4.2 zeigt eine Übersicht des gesamten Messaufbaus zusammen mit Detailansichten der instrumentierten Probe sowie des ARAMIS-Systems.



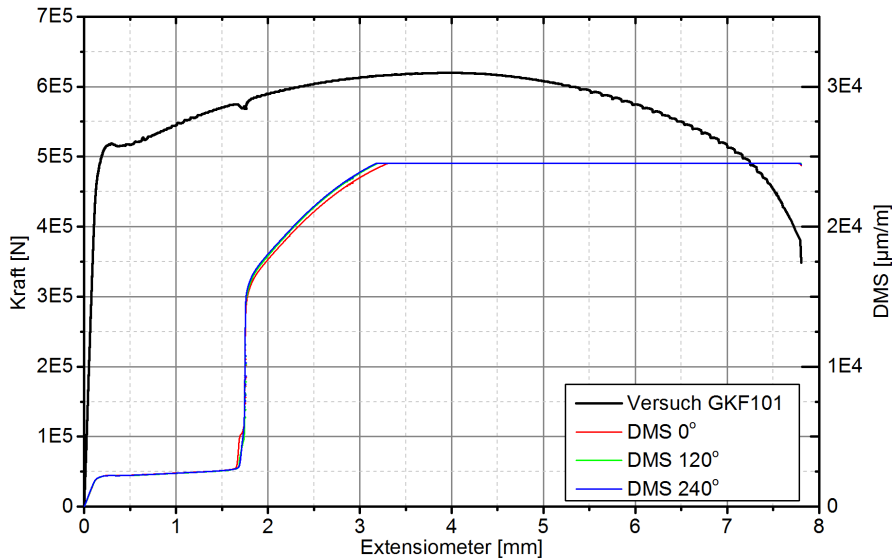
**Bild 4.2:** Prüfmaschine mit Messaufbau und Detailansicht der instrumentierten Probe

In [Bild 4.3](#) ist der Kraftverlauf über dem Extensiomterweg dargestellt. Die maximale Zugkraft liegt bei 620 kN, die über das Extensiomter bestimmte integrale Bruchdehnung der Kerbzugprobe liegt bei 15,3 %. Zusätzlich sind die Messwerte der drei Dehnungsmessstreifen mit eingetragen. Ab einer Verlängerung des Extensiomters um 3,2 mm hatten diese ihren maximalen Messbereich von 2,45 % überschritten. Zu erkennen ist, dass es ab einem Extensiomterweg von 1,7 mm auch zu plastischen Dehnungen in der Probenschulter kommt.

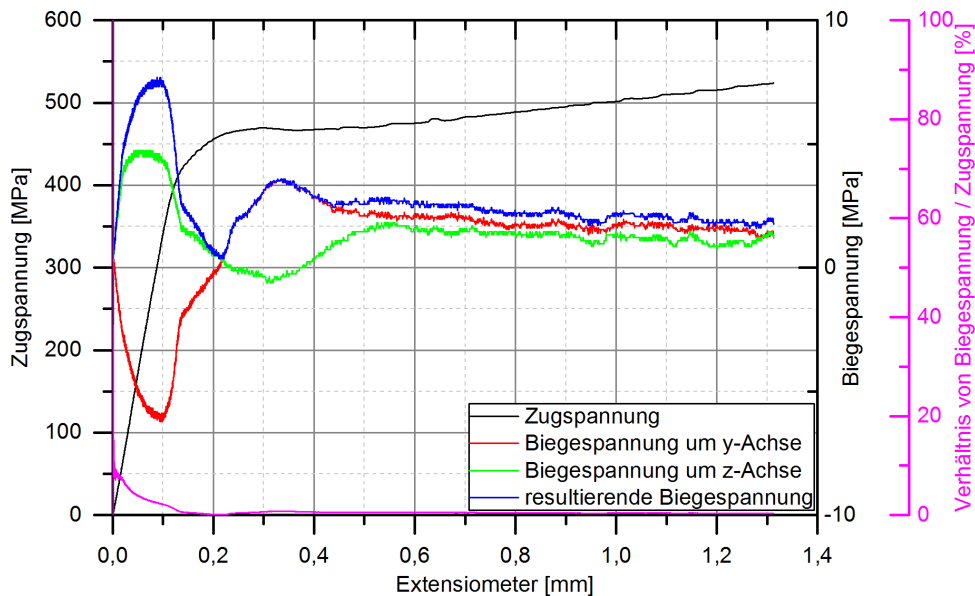
Aus den Messwerten der Dehnungsmessstreifen wurde das resultierende Biegemoment auf die Probe berechnet. Der Verlauf der entsprechenden Biegespannung während des Versuchs sowie deren Anteil verglichen zur Zugspannung kann [Bild 4.4](#) entnommen werden. Dabei ergibt sich eine maximale Biegespannung von unter 10 MPa, durch das Plastifizieren des Kerbbereichs sinkt diese sogar auf unter 2 MPa bzw. einen Anteil von 0,4 % im Vergleich zur Zugspannung. Somit muss bei der Nachrechnung des Versuchs keine überlagerte Biegebeanspruchung mit berücksichtigt werden.

Während des Versuchs konnte beobachtet werden, dass sich der Anriss um den gesamten Umfang verteilt an der Oberfläche ausbildet und anschließend ins Werkstoffinnere ausbreitet. **Bild 4.5** zeigt dazu den Verlauf der Kraft über der Kerbaufweitung zusammen mit Bildern der Probe zu verschiedenen Versuchszeitpunkten.

In **Bild 4.6** ist die Probe am Versuchsende zusammen mit den Aufnahmen der Bruchfläche dargestellt.

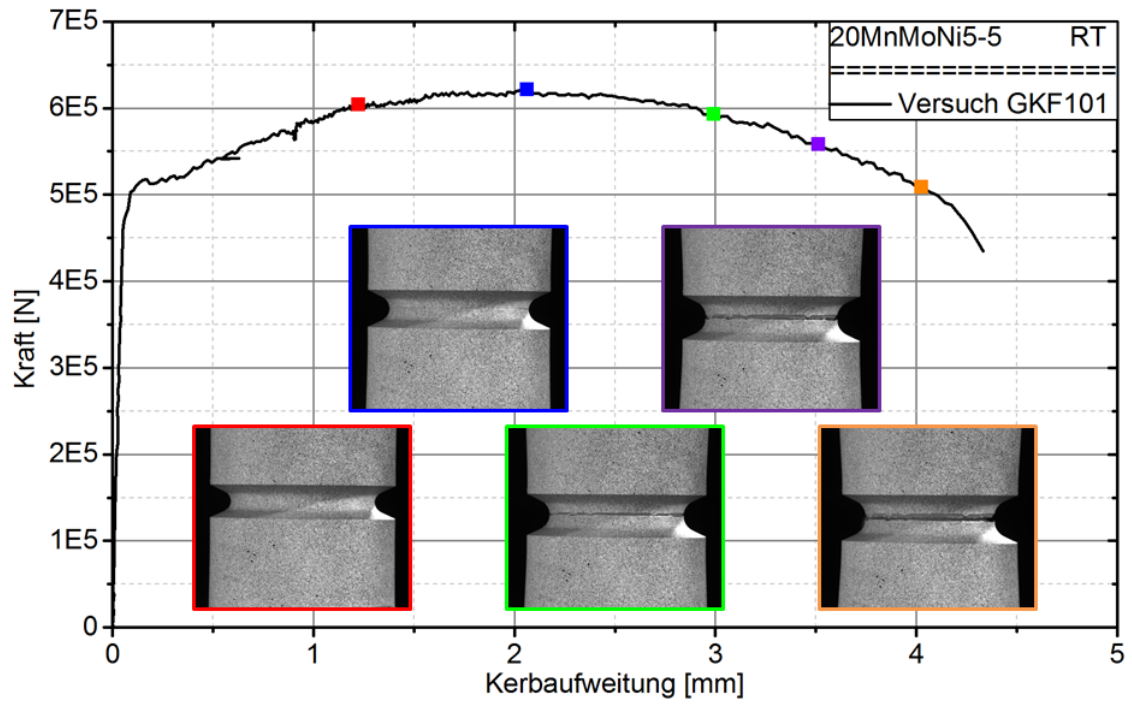


**Bild 4.3:** Kraft-Verlängerungsdiagramm der Kerbzugprobe



**Bild 4.4:** Verlauf der Biegespannung während des Versuchs sowie Verhältnis von Biegespannung zu Zugspannung





**Bild 4.5:** Kraftverlauf über der Kerbaufweitung zusammen mit Bildern des Kerbbereichs zu verschiedenen Versuchszeitpunkten



**Bild 4.6:** Probe am Versuchsende sowie Großaufnahmen der Bruchflächen

## 5 Numerische Untersuchung der Kerbzugprobe

Um den Anrisspunkt numerisch zu bestimmen, wurde die Probe mit Hilfe des Rousselier-Modells berechnet. Alle Berechnungen wurden mit Hilfe des Finite-Element-Programms ADINA durchgeführt. Die Kerbzugprobe wurde als zweidimensionales achsensymmetrisches Modell erstellt.

Für die erste Nachrechnung des Versuchs wurden die Rousselier-Parameter entsprechend der Ableitung der Bruchdehnungskurve verwendet [1]. Das Ergebnis zeigt Bild 5.1, der Anrisspunkt in der Simulation ist mit einem Stern gekennzeichnet. Zwar berechnet das Modell ebenfalls einen Anriss der Probe an der Außenoberfläche, jedoch erfolgt der Anriss in der Simulation bei viel höheren Verschiebungen als im Experiment. Dementsprechend deutlich weicht der Kraft-Weg-Verlauf der Simulation von den experimentell ermittelten Ergebnissen ab.

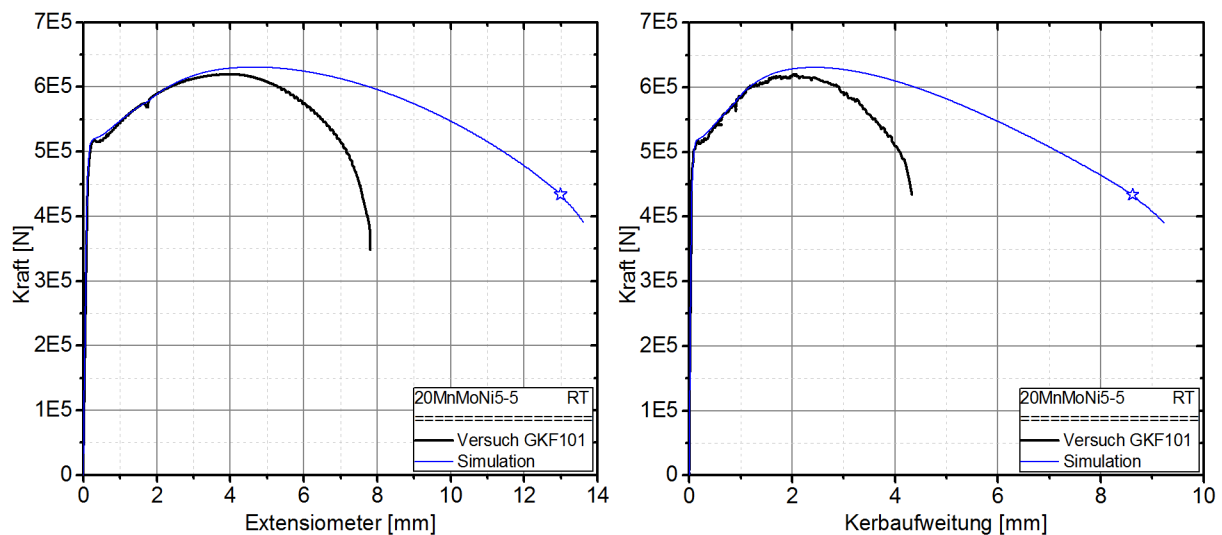
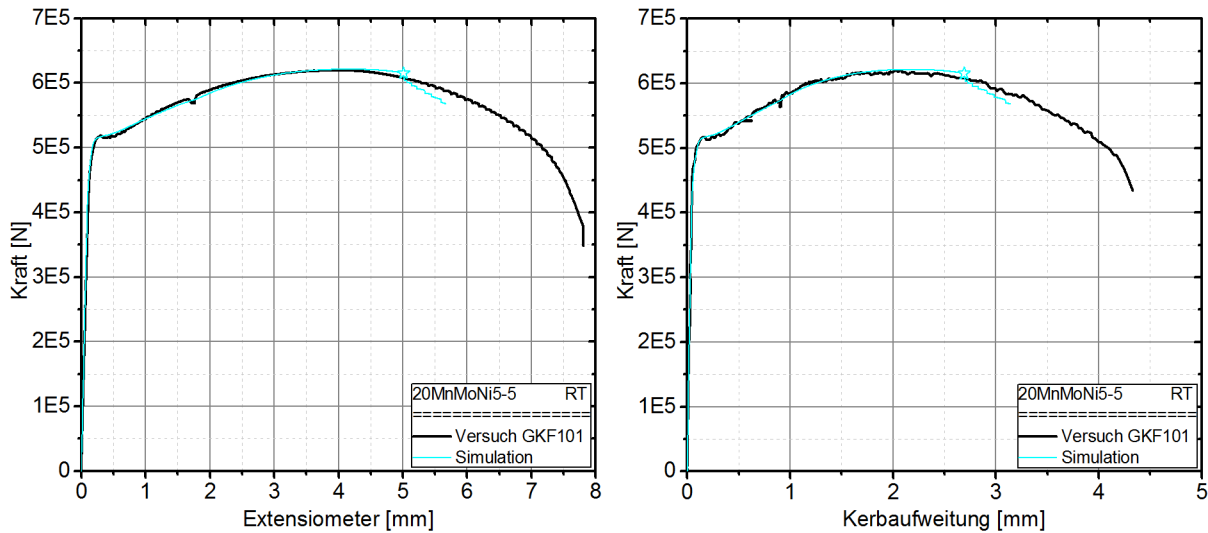


Bild 5.1: Simulationsergebnisse der Kerbzugprobe mit den Rousselier-Parametern der Bruchdehnungskurve

Damit der numerisch bestimmte Anrisszeitpunkt besser mit den Versuchsergebnissen übereinstimmt, wurde der Parameter zur Beschreibung des Anfangs-Hohlraumvolumens  $f_0$  auf einen außergewöhnlich hohen Wert von 0,15 % angepasst. Nur so konnte bis zum Anriss der Probe eine gute Übereinstimmung bezüglich des Kraft-Weg-Verlaufs zwischen Versuch und Simulation erreicht werden, Bild 5.2. Nach dem Anriss der Probe weichen die numerischen Ergebnisse allerdings weiterhin von den experimentellen Werten ab. Dies belegt die bereits in AP3.2 beschriebene eingeschränkte Anwendbarkeit des Rousselier-Modells für geringe Mehrachsigkeiten.

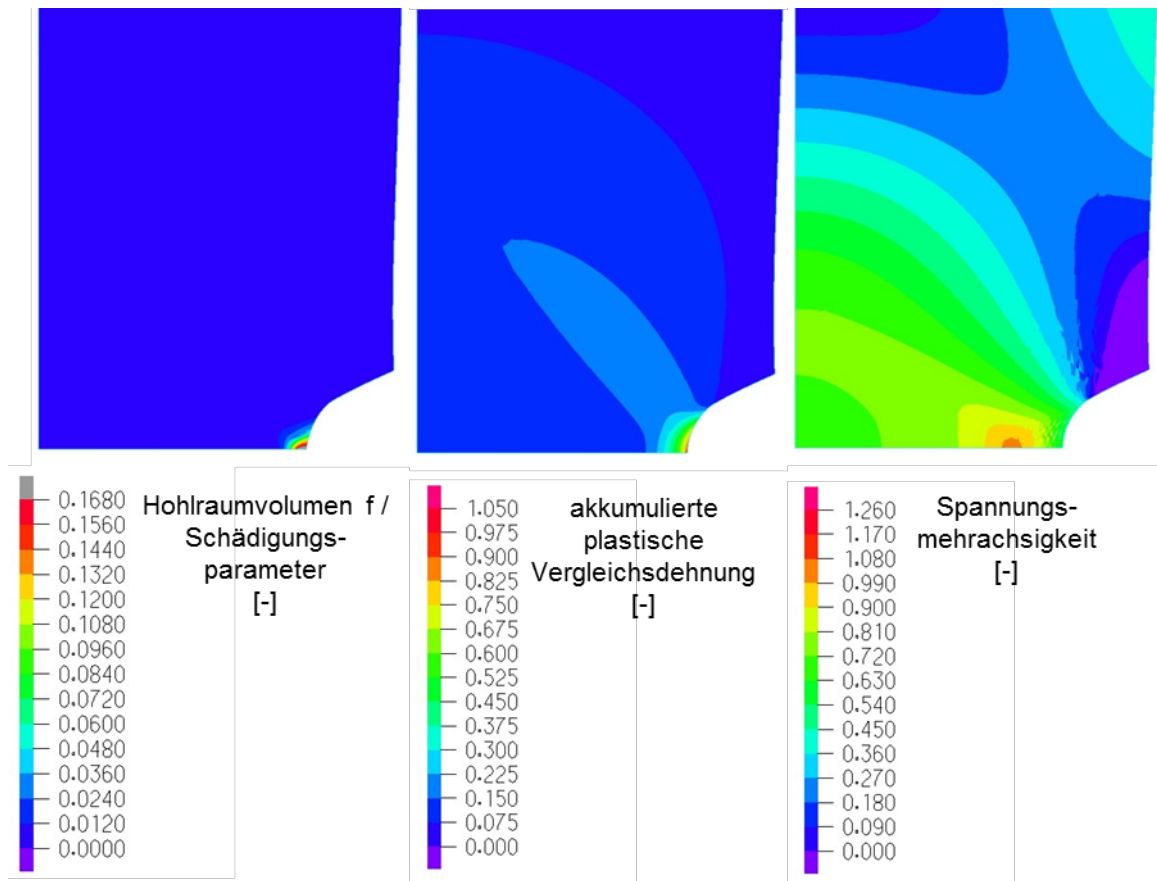


**Bild 5.2:** Simulationsergebnisse der Kerbzugprobe mit angepassten Rousselier-Parametern

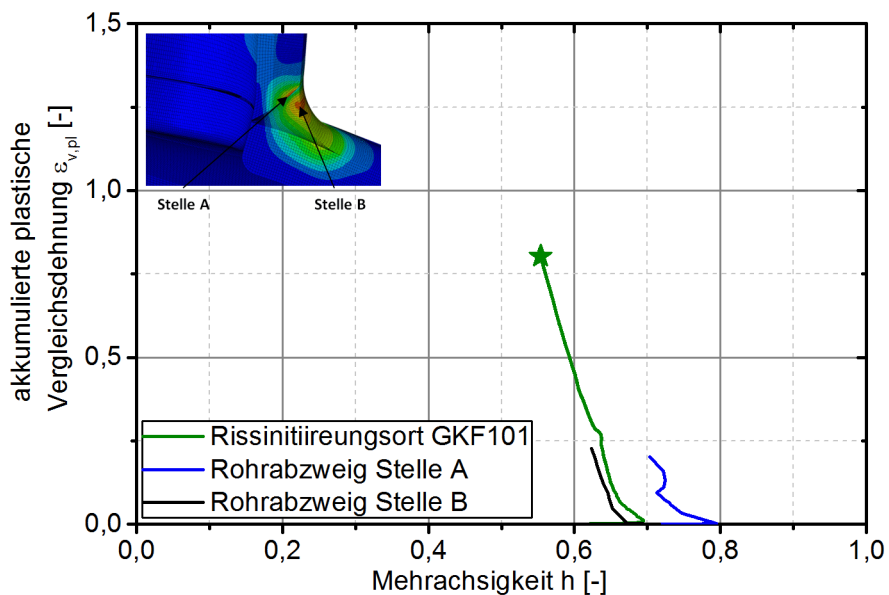
Für die Anwendung der Bruchdehnungskurve auf die Kerbzugprobe werden die Spannungsmehrschichtigkeit und die akkumulierte plastische Vergleichsdehnung zum Rissinitiierungszeitpunkt am Rissinitiierungsort benötigt. Diese werden der elastisch-plastischen Berechnung entnommen. Bild 5.3 zeigt als Ergebnis der schädigungsmechanischen Berechnung die Verteilung des Hohlraumvolumens (Schädigungsparameter) zum Rissinitiierungszeitpunkt. Das kritische Hohlraumvolumen, ab welchem es zur Hohlraumkoaleszenz und somit zur Rissinitiierung kommt, liegt für die oben genannte Werkstoffanpassung bei  $f_c = 0,16$ . Des Weiteren dargestellt ist die Verteilung der plastischen Vergleichsdehnung sowie der Spannungsmehrschichtigkeit bei Anrissbildung anhand der elastisch-plastischen Berechnung.

Bei Anrissbildung liegt die Spannungsmehrschichtigkeit im Kerbgrund bei einem Wert von  $h = 0,554$ , die akkumulierte plastische Vergleichsdehnung beträgt  $\epsilon_{v,pl} = 0,803$ .

Die Geometrie der Kerbzugprobe ist so gewählt, dass für den Rissinitiierungsort der Verlauf der plastischen Vergleichsdehnung über der Spannungsmehrschichtigkeit (Lastpfad) vergleichbar ist mit den Lastpfaden des Rohrabzweigs (siehe Bild 5.4).



**Bild 5.3:** Verteilung des Hohlraumvolumens, der akkumulierten plastischen Vergleichsdehnung und der Spannungsmehrachsigkeit zum Rissinitiationszeitpunkt über dem Kerbbereich



**Bild 5.4:** Lastpfad der Kerbzugprobe GKF101 im Vergleich zu den Lastpfaden des Rohrabzweigs

## 6 Anwendung der Bruchdehnungskurve auf die Kerbzugprobe

In [1] wurde bereits unter Verwendung des Rousselier-Modells eine Bruchdehnungskurve numerisch für den Werkstoff 20MnMoNi5-5 abgeleitet. Der Gültigkeitsbereich der Grenzkurve beschränkt sich dabei auf den Bereich hoher Spannungsmehrachsigkeiten. Dort kann mit einer abnehmenden Mehrachsigkeit eine höhere plastische Vergleichsspannung ertragen werden. Dieser Verlauf darf jedoch nicht in den Bereich mittlerer bis kleiner Spannungsmehrachsigkeiten fortgesetzt werden. Verschiedene Untersuchungen [3]-[5] zeigen, dass im Bereich niedriger Spannungsmehrachsigkeiten die ertragbare plastische Vergleichsdehnung mit abnehmender Mehrachsigkeit ebenfalls sinkt. Bild 6.1 zeigt dazu exemplarisch den Verlauf der ertragbaren plastischen Vergleichsdehnung nach [3] über den gesamten Bereich der Spannungsmehrachsigkeit für die Aluminiumlegierung 2024-T351.

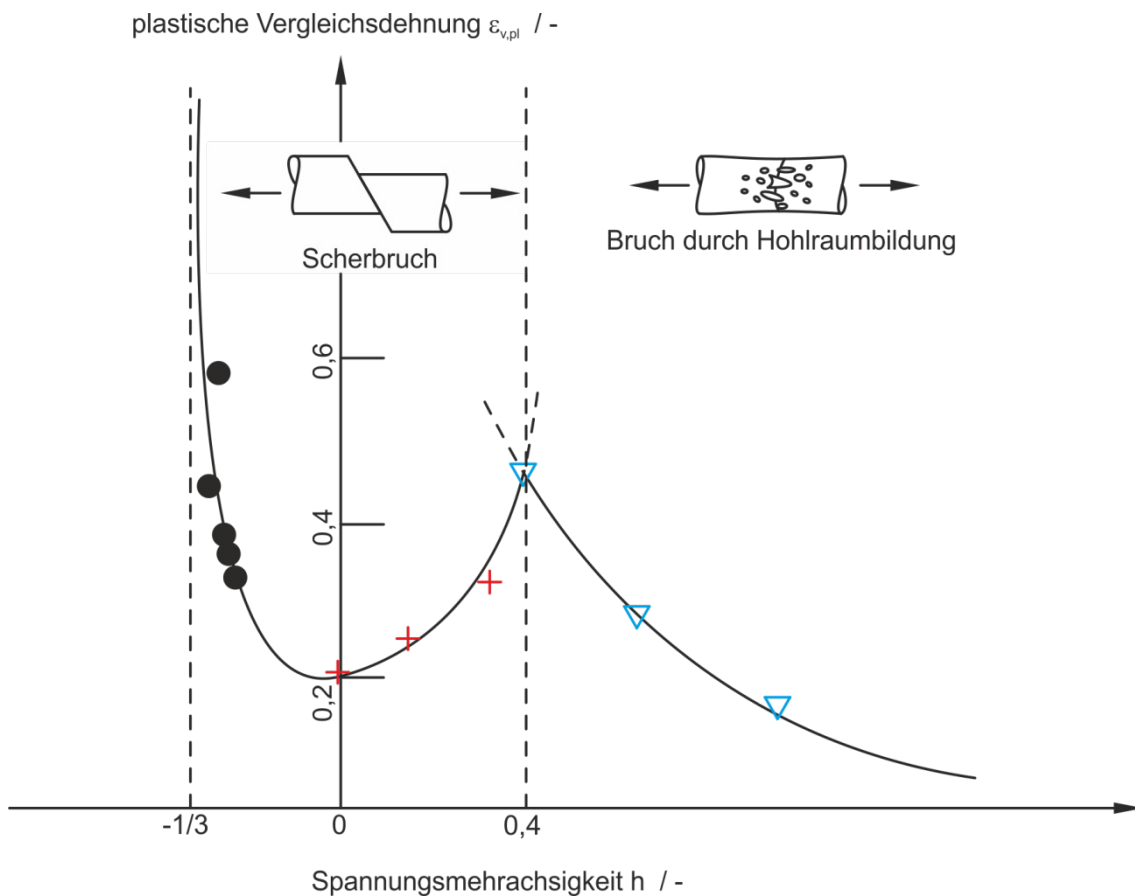
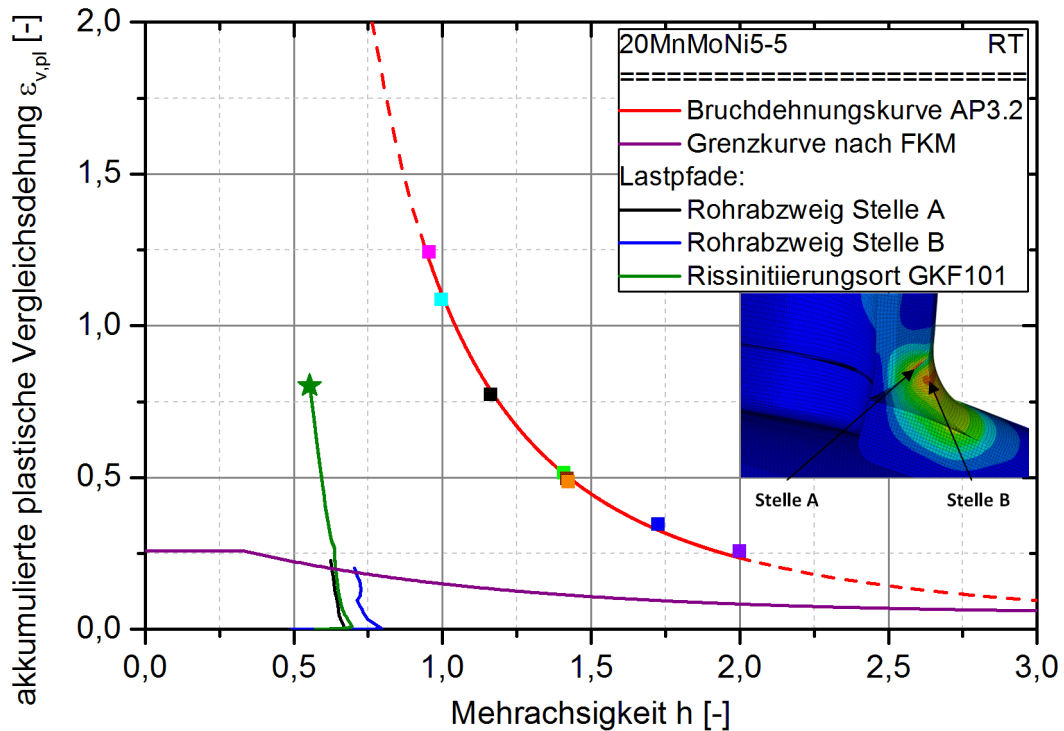


Bild 6.1: Bruchdehnungskurve in Abhängigkeit der Spannungsmehrachsigkeit für den gesamten Mehrachsigkeitsbereich (Aluminiumlegierung 2024-T351) [3]

Da sowohl der Rohrabzweig als auch die untersuchte Kerbzugprobe nicht im Bereich der hohen Spannungsmehrachsigkeiten liegen, wird zu deren Bewertung zusätzlich die Grenzdehnungskurve nach der FKM-Richtlinie [6] heran gezogen. Diese begrenzt im Bereich kleiner Spannungsmehrachsigkeiten die ertragbare Dehnung durch die Bruchdehnung A.

**Bild 6.2** zeigt die in Arbeitspaket 3.2 ermittelte Bruchdehnungskurve zusammen mit der Grenzkurve nach FKM für den Werkstoff 20MnMoNi5-5. Zusätzlich sind die Lastpfade des Rohrabzweigs, sowie der Lastpfad für den Rissinitiationsort der Kerbzugprobe eingetragen. Der Anrisszeitpunkt der Kerbzugprobe ist durch einen Stern gekennzeichnet.



**Bild 6.2:** Bruchdehnungskurve und Grenzkurve nach FKM zusammen mit den Lastpfaden des Rohrabzweigs sowie dem Lastpfad des Rissinitiationsortes der Kerbzugprobe

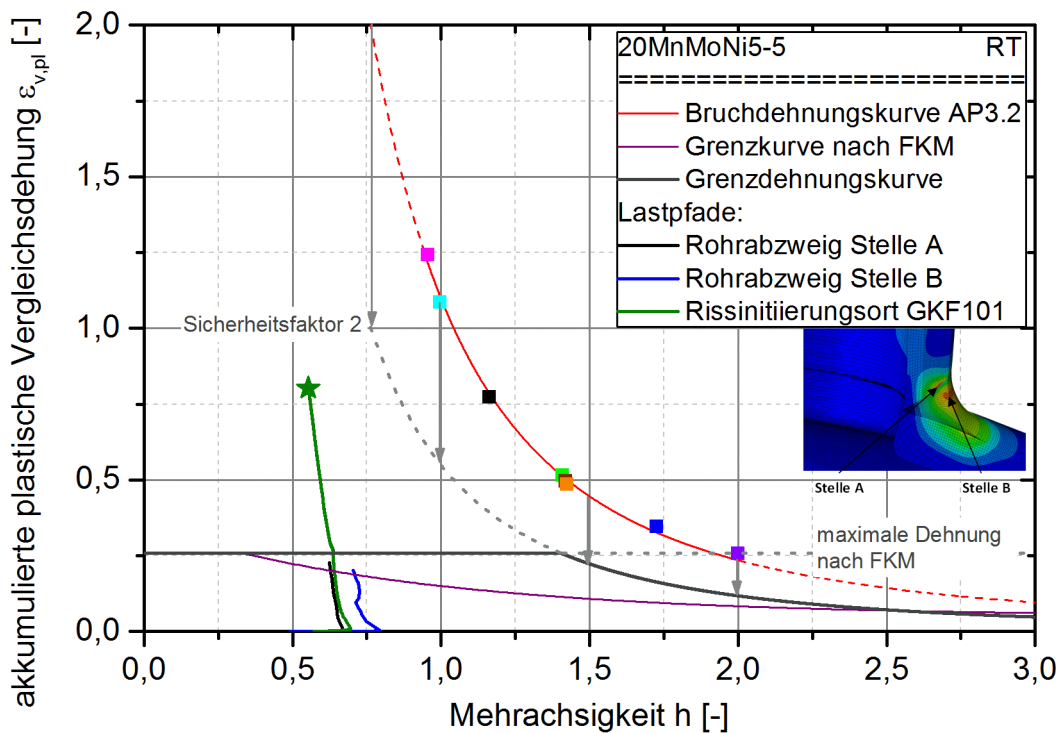
Die akkumulierte plastische Vergleichsdehnung der Kerbzugprobe zum Rissinitiationszeitpunkt liegt um mehr als den Faktor 3 über der zulässigen Dehnung nach FKM. Auch für den Rohrabzweig, welcher nach dem Versuch keinen durch die Beanspruchung hervorgerufenen Riss aufwies, liegen die Dehnungswerte der am höchsten beanspruchten Stellen oberhalb der Grenzkurve nach FKM. Ausgehend von diesen Ergebnissen stellt die FKM eine konservative Abschätzung des plastischen Verformungsverhaltens dar. Das Ergebnis der Kerbzugprobe zeigt, dass dabei jedoch ein großer Anteil des plastischen Verformungspotentials nicht ausgenutzt wird.

Bild 6.2 zeigt außerdem, dass für den Bereich hoher Spannungsmehrachsigkeiten die numerisch abgeleitete Bruchdehnungskurve oberhalb der Grenzkurve nach FKM liegt. Sie lässt somit einen höheren Anteil plastischer Verformungen zu. Wie Bild 6.1 zeigt, besitzt die numerisch bestimmte Bruchdehnungskurve jedoch für den Mehrachsigkeitsbereich des Rohrabzweigs

und der Kerbzugprobe keine Gültigkeit. Dies wird durch den Kerbzugversuch zusätzlich bestätigt, dessen ertragbare plastische Vergleichsdehnung unterhalb der Bruchdehnungskurve liegen würde.

In laufenden Untersuchungen [7] werden deshalb Versuche und Simulationen im Bereich kleiner Spannungsmehrachsigkeiten durchgeführt. Dadurch soll die numerisch ermittelte Bruchdehnungskurve in den Bereich kleiner Mehrachsigkeitswerte erweitert werden können.

Ausgehend von der Bruchdehnungskurve aus AP 3.2 und der Grenzkurve nach FKM ist in Bild 6.3 eine Möglichkeit zur Erstellung einer Grenzdehnungskurve gegeben. Da die Bruchdehnungskurve noch keine Einflussfaktoren wie Bauteilgröße und Belastungsgeschichte berücksichtigt wird die zulässige Dehnung um einen dementsprechenden Sicherheitsfaktor reduziert (hier beispielhaft Sicherheitsfaktor 2). Für den Bereich der kleinen Spannungsmehrachsigkeiten, in welcher die Bruchdehnungskurve keine Gültigkeit besitzt, wird die zulässige Dehnung durch die maximale Dehnung nach der FKM-Richtlinie begrenzt (Bruchdehnung A). Daraus ergibt sich dementsprechend der in Bild 6.3 dargestellte Verlauf einer Grenzdehnungskurve.



**Bild 6.3:** Mögliche Ableitung einer Grenzdehnungskurve ausgehend von der Bruchdehnungskurve nach AP 3.2 und der Grenzkurve nach FKM

Ausgehend von dieser Grenzdehnungskurve liegen die höchstbeanspruchten Stellen des Rohrabzweigs noch unterhalb der Kurve, also im sicheren Bereich. Der Anrisspunkt der Kerbzugprobe liegt oberhalb der Grenzdehnungskurve, so dass diese Grenzdehnungskurve für die Kerbzugprobe eine konservative Abschätzung darstellt.

## Literatur und Unterlagen

- [1] X. Schuler, F. Fehringer: Zentrale Untersuchung und Auswertung von Herstellungsfehlern und Betriebsschäden im Hinblick auf druckführende Anlagenteile von Kernkraftwerken – Los 2, Arbeitspaket 3: Aufarbeitung und Bewertung von Dehnkriterien für strukturmechanische Nachweise bei druckführenden Komponenten. Zwischenbericht: Demonstration der Anwendbarkeit des Konzepts zur Dehnungsabsicherung auf reale Bauteilgeometrien, MPA Universität Stuttgart, 2015
- [2] K. Kußmaul et al.: Rißwachstum und Bruchverhalten von rohrförmigen Komponenten mit Umfangsfehlern bei Innendruckbelastung und überlagertem wechselnden äußeren Biegemoment, BMFT Forschungsvorhaben Nr. 1500752 – 1993
- [3] Y. Bao, T. Wierzbicki: On fracture locus in the equivalent strain and stress triaxiality space, *International Journal of Mechanical Sciences* 46, pp. 81–98, 2004
- [4] T. Wierzbicki, Y. Bao, Y.-W. Lee, Y. Bai: Calibration and evaluation of seven fracture models, *International Journal of Mechanical Sciences* 47, pp. 719–743, 2005
- [5] Y. Lou, H. Huh, S. Lim, k. Pack: New ductile fracture criterion for prediction of fracture forming limit diagrams of sheet metals, *International Journal of Solids and Structures* 49, pp. 3605–3615, 2012
- [6] FKM-Richtlinie: Rechnerisches Festigkeitsnachweis Für Maschinenbauteile, 6. Ausgabe, 2012
- [7] BMWi-Vorhaben Nr. 1501474: Quantifizierung der Grenztragfähigkeit mechanischer Komponenten bei multiplen Störfallbelastungen auf der Grundlage eines schädigungsmechanisch basierten Grenzdehnungskonzepts, derzeit an der MPA laufend.





