

Ein neues Verfahren zur Ermittlung des Eigenspannungszustandes am Beispiel
der Scheibe mit Kreisloch mit Hilfe der Elektronischen Speckle-Pattern-
Interferometrie und der Finite-Elemente-Methode

Von der Fakultät Energietechnik der Universität Stuttgart zur Erlangung der Würde
eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.) genehmigte Abhandlung

vorgelegt von

Dipl.-Ing. Ulrich Birkel, geboren in Stuttgart

Hauptberichter: Prof. Dr.-Ing. Dr. Techn. E.H. Karl Kußmaul

Mitberichter: Prof. Dr. H.J. Tiziani

Tag der mündlichen Prüfung: 10.5.2001

2001

Staatliche Materialprüfungsanstalt (MPA) Universität Stuttgart

Vorwort

Herrn Professor Dr.-Ing. Dr. techn. E.h. K. Kussmaul gilt mein besonderer Dank für die wertvolle Unterstützung und Betreuung der Arbeit.

Für die wertvollen Anregungen danke ich Herrn Prof. Dr.-Ing. H. Dietmann sowie Herrn Dr. Kockelmann.

Herrn Prof. Dr. H.J. Tiziani danke ich für das Interesse an meiner Arbeit und für die Übernahme des Mitberichtes.

Die vorliegende Arbeit entstand im Laboratorium für Lasermeßtechnik an der Fachhochschule für Technik Esslingen. Herrn Dipl.-Ing. (FH) T. Vogt sei für seine Unterstützung bei der Vorbereitung und Durchführung der Versuche gedankt. Weiterhin gilt mein Dank den Herren Professoren Faiß und Groth, die bereit waren das Finite-Elemente-Programm TP2000 für die vorliegende Arbeit zu erweitern.

Und natürlich meiner geliebten Frau Veronica sowie meiner Familie sei für Ihre Geduld und Unterstützung gedankt.

Stuttgart im Juni 2001

Ulrich Birkel

INHALTSVERZEICHNIS

1. EINLEITUNG	9
1.1. Ausgangssituation	9
1.2. Zielsetzung	10
1.3. Vorgehensweise	10
2. KENNTNISSTAND BEI DER ERMITTLUNG VON EIGENSPANNUNGEN	12
2.1. Überblick	12
2.2. Definition und Einteilung	12
2.3. Entstehung und Auswirkung	12
2.4. Berechnungsmethoden	13
2.5. Experimentelle Eigenspannungsermittlung	15
2.6. Anforderungen an ein neues Verfahren zur Eigenspannungsermittlung	19
3. EIN NEUES VERFAHREN ZUR BESTIMMUNG VON EIGENSPANNUNGEN	20
3.1. Überblick	20
3.2. Ein neuer Ansatz zur Eigenspannungsermittlung	20
3.3. Anwendung auf die Scheibe mit Kreisloch	23
3.4. Erforderliche Schritte zur Spannungsermittlung	29
3.5. Erforderliche Schritte zur Eigenspannungsermittlung	31
3.6. Bewertung des vorgestellten Ansatzes zur Eigenspannungsermittlung	31
4. GRUNDLAGEN FÜR DIE REALISIERUNG	33
4.1. Überblick	33
4.2. Die Elektronische Speckle-Pattern-Interferometrie	33
4.3. Finite-Elemente-Methode	35
5. REALISIERUNG	43
5.1. Überblick	43
5.2. Aufbau des Elektronischen Speckle-Pattern-Interferometers (ESPI)	43

5.3. Belastungsvorrichtung und Zugprobe	47
5.4. Pre- und Postprozessoren, FE-Programm sowie realisierte Schnittstellen	48
5.5. Exemplarische Beschreibung der Spannungsermittlung	52
6. VERSUCHSERGEBNISSE	59
6.1. Überblick	59
6.2. Einführung in die Ergebnisdarstellung	59
6.3. Darstellung und Diskussion der Versuchsergebnisse	65
7. ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK	96
8. LITERATUR	98

Formelzeichen und Abkürzungen

a	mm	Lochradius
A	%	Bruchdehnung
c_{ij}		Koeffizienten der Steifigkeitsmatrix
d	mm	Lochdurchmesser
d_{ges}	nm	gesamte Änderung der optischen Weglänge
d_s	μm	Speckledurchmesser
d_z	μm	Specklelänge
d_x, d_y, d_z	rad	Verdrehungen im kartesischen System
D	mm	Durchmesser der beleuchteten Fläche
D'	mm	Durchmesser der Aperturblendenöffnung
E	MPa	Elastizitätsmodul
F		Blendenzahl
F	N oder MPa	Last oder Fließfunktion gem. [1.8]
F_F	N	Last bei Fließbeginn
F_{el}	N	Last im elastischen Bereich
F_{pl}	N	Last im plastischen Bereich
F_x, F_y, F_z	N	Kräfte im kartesischen System
I	W/m^2	Intensität
Δl	mm	Verlängerung
l	mm	Abstand vom Lochrand
L	m	Abstand zwischen beleuchteter Fläche und Raumpunkt
L'	mm	Abstand zwischen Linse und Abbildungsebene
m		Modulationsterm bzw. Kontrast
M_x, M_y, M_z	Nm	Momente im kartesischen System
r	mm	radiale Polarkoordinate
R_e	MPa	Streckgrenze
R_m	MPa	Zugfestigkeit
$U(x,y,z,t)$		Monochromatische Welle ($U(x,y,z) e^{j\omega t}$)
$\hat{U}(x,y,z)$		komplexe Hüllkurve ($\hat{U}(x,y,z) e^{jf(x,y,z)}$)
\hat{U}		Amplitude
U_i		Beleuchtungsstrahl i
U'_i		Abgebildeter Beleuchtungsstrahl i
$U_{O,R}$		Objekt-, Referenzstrahl
$\hat{U}_{O,R}$		Amplitude von Objekt-, Referenzstrahl
V		Vergrößerung
v_x, v_y, v_z	mm	Verschiebungen
x, y, z	mm	kartesische Koordinaten
$\Delta x, \Delta y, \Delta z$	nm	Verformung, die zur registrierten Phasenverschiebung $\Delta\varphi$ führt
x_i, y_i		Phasenbild im Lastzustand i (Empfindlichkeit des Interferometers in x,y -Richtung)
x_{ij}, y_{ij}		Differenzphasenbild: Differenz der Phasenbilder aus Lastschritt i und j (Empfindlichkeit des Interferometers in x,y -Richtung)

Griechische Buchstaben

α	rad	Winkel zwischen Beleuchtungsrandstrahlen U_1 und U_n
α_k		Formzahl
β	rad	Winkel zwischen Verformungs- und Empfindlichkeitsrichtung
γ	rad	Winkel zwischen Beleuchtungs- und Empfindlichkeitsrichtung
γ	rad	Schiebewinkel
ε		Dehnung
ε_{bl}		bleibende Dehnung
ε_{el}		elastische Dehnung
ε_e		Eigendehnung
ε_F		Dehnung bei Fließbeginn
ε_{pl}		plastische Dehnung
ε_R		Gesamtdehnung am Rand
$\hat{\varepsilon}$		Dehnung bei Höchstlast
$\overset{\circ}{\varepsilon}$		fiktiv-elastische Dehnung
$\Phi_{O,R}$	rad	Phase von Objekt-, Referenzstrahl
Φ	rad	Phase einer Welle
$\Delta\varphi$	rad	Phasenverschiebung durch Verformung
κ		Verfestigungsparameter
λ	nm	Wellenlänge
μ		Querkontraktionszahl
θ	rad	Winkel zw. Beleuchtungs- und Beobachtungsrichtung oder Polarkoordinate
Θ	rad	Interferenzphase
σ, σ_o	MPa	Spannung
σ_e	MPa	Eigenspannung
σ_{eR}	MPa	Spannungsspitze am Lochrand
$\overset{\circ}{\sigma}$	MPa	fiktiv-elastische Spannung
σ_m	MPa	Mittelspannung
σ_{max}	MPa	Maximalspannung
σ_{min}	MPa	Minimalspannung
σ_n	MPa	Nennspannung
σ_r	MPa	Spannung in radialer Richtung
σ_R	MPa	Höchstspannung am Innenrand der Kerbe
σ_v	MPa	Vergleichsspannung
$\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$	MPa	Spannungen im kartesischen System
σ_θ	MPa	Tangentialspannung (Polarkoordinaten)
σ_{dF}	Mpa	Druckfließgrenze
τ_F	MPa	Fließschubspannung
τ_{max}	MPa	maximale Schubspannung
τ_θ	MPa	Schubspannungen in Polarkoordinaten

$\tau_{xy}, \tau_{yz}, \tau_{xz}$	MPa	Schubspannungen im kartesischen System
ψ_i	rad	Phasenverschiebung beim Phasen-Shift-Verfahren (Schritt i)

Vektoren und Matrizen

\underline{d}	Verschiebungsvektor
\underline{F}	Vektor aller Kräfte und Momente
\underline{k}	Elementesteifigkeitsmatrix
\underline{K}	Steifigkeitsmatrix des Gesamtmodells
$\underline{n}_L, \underline{n}_B, \underline{n}_E$	Einheitsvektor in Beleuchtungs-, Beobachtungs-, Empfindlichkeitsrichtung
\underline{v}	Vektor aller Knotenverschiebungen und -verdrehungen

Abkürzungen

ASTM	American Society for Testing of Materials
CCD	Charge Coupled Devices
ESPI	Elektronisches Speckle-Pattern-Interferometer
FE	Finite-Elemente
FEM	Finite-Elemente-Methode
PC	Personal Computer
TIFF	Tag Image File Format

1. EINLEITUNG

1.1. Ausgangssituation

Damit die Sicherheit eines Bauteils beurteilt werden kann, muß die Beanspruchung an seiner höchstbeanspruchten Stelle bekannt sein, ebenso der entsprechende Werkstoffkennwert. Da an der höchstbeanspruchten Stelle in der Regel ein mehrachsiger Spannungszustand herrscht, wird die maßgebende Beanspruchung je nach zu erwartendem Versagen mit Hilfe einer Festigkeitshypothese als Vergleichsspannung bestimmt und mit dem im Zugversuch bei einachsigem Spannungszustand ermittelten Kennwert verglichen /1.1/.

An vielen Bauteilen treten, bedingt durch die Fertigungsverfahren, gewollt oder ungewollt Eigenspannungen auf, deren Kenntnis für Analysen von Sprödbruchverhalten, Schwingfestigkeit und Korrosionsverhalten von besonderer Bedeutung ist. Voraussetzung für die Entstehung von Eigenspannungen ist eine ungleichmäßige Dehnungsverteilung und eine Belastung, die zu einer örtlichen Plastifizierung geführt hat /1.2/. Trotz einer großen Anzahl an Veröffentlichungen zu diesem Thema ist der Kenntnisstand nicht immer hinreichend. Vielfach werden Eigenspannungen als eine Quelle der Unsicherheit, d.h. als eine unbekante, meist unvermeidbare Vorbeanspruchung betrachtet /1.3/. Um diesem Mangel zu begegnen, gibt es eine Vielzahl von experimentellen, jedoch meist zerstörenden Verfahren zur Eigenspannungsermittlung, z.B. durch Werkstoffabtrag /1.3/, /1.4/. Eine bedeutende zerstörungsfreie, experimentelle Methode zur Eigenspannungsermittlung ist die Röntgendiffraktometrie /1.5, 1.6, 1.7, 1.8/.

Numerische Verfahren, wie etwa die **Finite-Elemente-Methode** (FEM), bieten ebenfalls Lösungen zur Eigenspannungsermittlung an /1.9, 1.10/. Da jedoch diese Berechnungen auf einem Modell mit idealisierten Werkstoffeigenschaften und Belastungsarten beruhen /1.11/, können Fließvorgänge und damit die Entstehung von Eigenspannungen ebenfalls nur modellhaft ermittelt werden. Es ist daher wünschenswert Verfahren zu finden, mit deren Hilfe der Spannungszustand auf der Strukturoberfläche möglichst vollständig und hinreichend genau bestimmt werden kann.

Um reale Fließvorgänge erfassen zu können, bietet die Lasermeßtechnik die Möglichkeit zur Messung von Verformungsfeldern z.B. mit Hilfe der Speckleinterferometrie /1.12, 1.13, 1.14/ sowie zur Messung von Dehnungsfeldern mit Hilfe der Shearografie /1.15/. Allerdings kann aufgrund dieser Meßergebnisse das zur Festigkeitsbeurteilung

relevante Spannungsfeld nur bei elastischer, nicht aber bei elastisch-plastischer Beanspruchung direkt angegeben werden. Dennoch sind diese Ganzfeldmeßtechniken zur Untersuchung von Fließvorgängen und Eigenspannungen höchst interessant, vor allem weil sie im Gegensatz zu Simulationen reale Vorgänge beschreiben. Außerdem ermöglicht die Lasermeßtechnik, die Formänderungen sowie die Bauteilgeometrie berührungslos, d.h. rückwirkungsfrei und flächendeckend mit sehr hoher Auflösung zu erfassen.

1.2. Zielsetzung

Durch eine Verbindung der Elektronischen Speckle-Pattern-Interferometrie (ESPI) mit einer für diesen Zweck erweiterten Finite-Elemente-Methode soll ein Ansatz entwickelt werden, der die Vorteile beider Verfahren nutzbar macht und zu einem neuen Verfahren der berührungslosen, flächenhaften Eigenspannungsermittlung vereint.

Dieser Ansatz macht optische Meßverfahren allgemein zur Beschreibung von Spannungsfeldern bei elastisch-plastischen Belastungsvorgängen anwendbar. Er bietet somit die Möglichkeit, ebene Eigenspannungszustände auf einer Bauteiloberfläche nach überelastischer Beanspruchung zu messen. Durch die flächenhafte Aufnahmetechnik wird stets auch der Ort höchster äußerer Beanspruchung gefunden, ohne daß er vor der Messung bekannt gewesen sein muß. Dies ist besonders im Falle komplexer Bauteilgeometrien mit unbekanntem Randbedingungen von Bedeutung.

Basierend auf der ESPI-Verformungsmessung werden durch Anwendung von Fließkriterien im FE-Programm die Fließanteile ermittelt. Mit deren Kenntnis können die Ausbreitung von Fließgebieten sowie Dehnungs-, Spannungs- und Eigenspannungszustände erfaßt und mit Hilfe der graphischen Darstellungsmöglichkeiten der FE-Postprozessoren dargestellt werden.

Dadurch soll ein neuer Weg zur zerstörungsfreien Ermittlung von Eigenspannungszuständen aufgezeigt und am Beispiel einer Scheibe mit Kreisloch überprüft werden. Besondere Beachtung findet dabei die Ein- oder Zweiachsigkeit des jeweiligen Eigenspannungszustandes.

1.3. Vorgehensweise

Kapitel 2 gibt einen Überblick über die Definition, Entstehung und Auswirkung von Eigenspannungen. Es werden übliche Berechnungsmethoden sowie experimentelle Verfahren zur Ermittlung von Eigenspannungen vorgestellt. An den Grenzen bestehender

Verfahren und an den Vor- und Nachteilen, die optische Meßverfahren und die FE-Methode bieten, lassen sich Anforderungen an ein neues Verfahren zur Eigenspannungsermittlung erkennen.

Ausgehend von diesen neuen Anforderungen wird in Kapitel 3 der neue Ansatz zur Eigenspannungsermittlung erläutert und die grundlegenden Schritte, die zur Spannungs- und Eigenspannungsermittlung erforderlich sind, vorgestellt und bewertet.

Die Grundlagen für die Realisierung werden in Kapitel 4 beschrieben. Hierbei wird kurz auf die ESPI-Methode, die FE-Rechnung sowie auf das im FE-Programm zur Anwendung kommende Fließkriterium nach von Mises /3.4/ hingewiesen. Zur Veranschaulichung der Berechnung überelastischer Zustände im FE-Programm wird in Kapitel 6 eine Methode zur Konstruktion des Eigendehnungszustandes aus gemessenen Dehnungen eingesetzt. Die Grundlagen hierzu werden in Kapitel 4 erläutert.

Ausgehend von den erläuterten Anforderungen und Grundlagen wird in Kapitel 5 die Realisierung des Verfahrens zur Eigenspannungsermittlung am Beispiel einer dünnen Scheibe mit Kreisloch unter Zug vorgestellt. Hierfür wird zunächst der ESPI-Aufbau erläutert, bevor auf die Anforderungen an die Belastungsvorrichtung und an die Zugprobe eingegangen wird. Die Pre- und Postprozessoren, das FE-Programm sowie die realisierten Schnittstellenprogramme werden nachfolgend beschrieben. Anschließend wird die Durchführung des Verfahrens zur Spannungsermittlung beispielhaft erläutert.

In Kapitel 6 werden die Versuchsergebnisse aus dem neuen, berührungslosen Ganzfeldmeßverfahren dargestellt und mit Ergebnissen aus der FE-Simulation verglichen. Zunächst wird die untersuchte Scheibe mit Kreisloch und die gewählte Form der Ergebnisdarstellung erläutert. Es werden dann die Versuchsergebnisse in einem ausgewählten Flächenausschnitt an der Zugprobe bei elastischer und überelastischer Beanspruchung sowie der ermittelte Eigenspannungszustand gezeigt, überprüft und interpretiert.

In Kapitel 7 wird das Verfahren zusammengefaßt und erläutert, wie es weiter verbessert und der Anwendungsbereich durch andere Verbundanwendungen erweitert werden kann.

2. KENNTNISSTAND BEI DER ERMITTLUNG VON EIGENSPANNUNGEN

2.1. Überblick

Dieses Kapitel gibt einen Überblick über die Definition, Entstehung und Auswirkung von Eigenspannungen. Die Verfahren zur Berechnung und zur experimentellen Eigenspannungsermittlung werden vorgestellt.

Die Methode der näherungsweise Berechnung wird zunächst am einachsigen beanspruchten, einfachen Beispiel des Biegebalkens erläutert. Anschließend wird der Ansatz mit Hilfe der Finite-Elemente-Methode gezeigt. Die experimentellen Verfahren sind untergliedert in teilzerstörende und zerstörungsfreie Methoden. Berührungslose, optische Meßverfahren bieten bislang keine Lösung zur Eigenspannungsermittlung.

An den Grenzen der bestehenden Verfahren und an den Vor- und Nachteilen, die optische Meßverfahren und die FE-Methode bieten, lassen sich Möglichkeiten zur Realisierung eines neuen Verfahrens zur Eigenspannungsermittlung erkennen.

2.2. Definition und Einteilung

Unter Eigenspannungen σ_e versteht man Spannungen, die in einem von außen unbelasteten Bauteil vorhanden sind. Sie entstehen nach einer ungleichmäßigen elastisch-plastischen Verformung, ausgehend von der höchstbeanspruchten Stelle /2.1/.

Die Eigenspannungen werden in Eigenspannungen erster, zweiter und dritter Art eingeteilt, je nach ihrer Verteilung im Makro- und Mikrobereich eines Bauteilquerschnitts:

1. Art: Wirksam über größere Querschnittsbereiche, über eine Vielzahl von Körnern
2. Art: Wirksam innerhalb von Kornbereichen, d.h. von Korn zu Korn
3. Art: Wirksam innerhalb des Kristallgitters eines einzelnen Kornes

Für die Festigkeitsberechnung sind im allgemeinen nur die Eigenspannungen erster Art von Bedeutung.

2.3. Entstehung und Auswirkung

Treten in Bauteilen elastisch-plastische Verformungen auf, etwa durch ungleichmäßige Abkühlung, z.B. beim Gießen oder Schweißen, oder durch mechanische überelastische Beanspruchung bei ungleichmäßiger Spannungsverteilung, entstehen Eigenspannungen. Entsprechend ihrer Entstehung unterscheidet man Schrumpfspannungen und Rest-

spannungen. Auf Eigenspannungen infolge Umwandlung des Werkstoffgefüges soll hier nicht eingegangen werden.

Schrumpfspannungen: Bei ungleichmäßiger Abkühlung von Bauteilen folgen die wärmeren Zonen des Werkstoffs der Schrumpfung der kälteren Umgebung nur unter irreversiblen, plastischen Verformungen. Diese bleibenden Formänderungen bewirken nach dem Erkalten eine Verspannung, die zu Schrumpfspannungen führt.

Restspannungen entstehen nach überelastischer Beanspruchung mit ungleichmäßiger Spannungsverteilung. Die bleibenden Verformungen an den höchstbeanspruchten Stellen verhindern, daß die aufgebrachte Verformung mit der äußeren Last vollständig verschwindet. Da die elastischen Dehungsanteile nicht auf den Wert Null zurückgehen, bleiben Eigenspannungen entsprechender Größe zurück.

Weist ein Bauteil Eigenspannungen auf, so überlagern sich diese einem durch äußere Belastung hervorgerufenen Spannungszustand. Je nach Vorzeichen und Verteilung der Eigenspannungen können sie sich günstig oder ungünstig auf das Festigkeitsverhalten eines Bauteils auswirken.

Ist der Eigenspannungszustand nicht bekannt, so führt dieser zu einer Unsicherheit bei der Festigkeitsberechnung. Daher ist man im allgemeinen bestrebt, die unkontrollierte Entstehung von Eigenspannungen zu vermeiden oder abzubauen.

Eine gezielte Erzeugung von Eigenspannungen, die an der höchstbeanspruchten Stelle den Belastungsspannungen entgegengerichtet sind, kann eingesetzt werden, um die Belastbarkeit eines Bauteils zu erhöhen /2.1/.

2.4. Berechnungsmethoden

Nachfolgend werden die Berechnungsmethoden zur Eigenspannungsermittlung vorgestellt. Hierbei gibt es die näherungsweise analytische Berechnung sowie die numerische FE-Simulation.

2.4.1. Näherungsberechnung von Eigenspannungen

Schrumpfspannungen, etwa in Schweißkonstruktionen lassen sich rechnerisch nur durch sehr aufwendige FE-Verfahren bestimmen. Eine analytische Berechnung ist, auch bei bekanntem Temperaturfeld, praktisch nicht möglich.

Restspannungen dagegen sind auf einfachem Wege näherungsweise bestimmbar, wenn die elastische Spannungsverteilung und die Größe der überelastischen Verformung bekannt sind.

Der Verlauf der Eigenspannung σ_e ergibt sich dann durch Überlagerung der wirklichen elastisch-plastischen Spannungsverteilung σ beim Belasten und der fiktiven Spannungsverteilung $\overset{\circ}{\sigma}$ /1.2/. Die Eigenspannungen ergeben sich also nach der Beziehung:

$$\sigma_e = \sigma - \overset{\circ}{\sigma} \quad (2.1)$$

In Bild 2.1 wird diese Berechnungsmethode am Beispiel eines Biegebalkens aus einem Werkstoff mit ausgeprägter Streckgrenze dargestellt (elastisch / ideal plastisches Werkstoffverhalten).

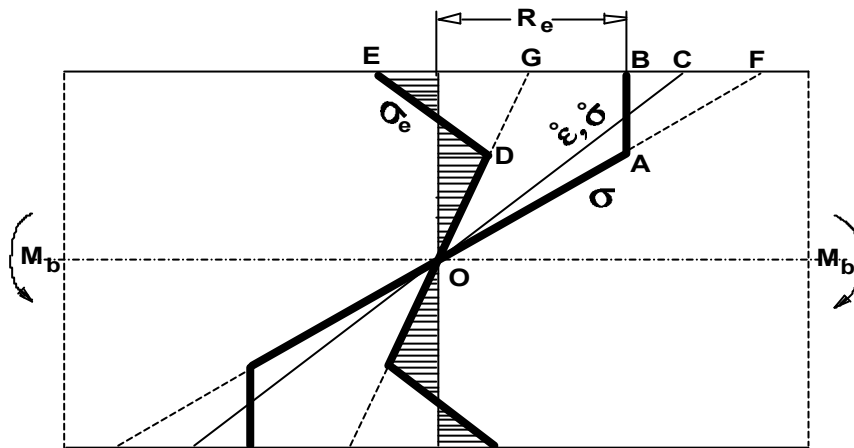


Bild 2.1: Näherungsweise Eigenspannungsermittlung am Beispiel des Biegebalkens

Bei Belastung stellt sich die wirkliche Spannungsverteilung σ (OAB) ein. Im Bereich OA ist die Spannung elastisch, im Fließgebiet AB ist sie auf den Wert der Streckgrenze R_e begrenzt. Die Entlastung wird erreicht, durch Überlagerung eines gleich großen Gegenmoments, wobei die zugehörige Spannungsverteilung $\overset{\circ}{\sigma}$ (OC) zwischen Streckgrenze R_e und Druckfließgrenze $\sigma_{dF} = -R_e$ rein elastisch bleibt. Daraus ergibt sich die Eigenspannungsverteilung σ_e (ODE) gem. Gl. (2.1).

In entsprechender Weise lassen sich die bleibenden Dehnungen ε_{bl} bestimmen als

$$\varepsilon_{bl} = \varepsilon - \overset{\circ}{\varepsilon} \quad (2.2)$$

Dabei stellt ε den wirklichen Dehnungsverlauf und $\overset{\circ}{\varepsilon}$ den Verlauf der fiktiv-elastischen Dehnung dar.

Bei dieser Berechnung von Restspannungen und bleibenden Dehnungen geht man davon aus, daß bei elastisch-plastischer Verformung die gleiche Dehnungsverteilung auftritt wie bei elastischer Beanspruchung. Dies trifft näherungsweise bei kleinen plastischen Verformungen zu /2.1/.

2.4.2. Berechnung von Eigenspannungen mit Hilfe der FEM

Bei der FEM wird ein Rechenmodell erstellt, das die zu untersuchende Struktur in seinen Eigenschaften durch das Verhalten einzelner finiter Elemente wiedergibt. Für ein finites Element werden vereinfachende Annahmen bezüglich des elastischen Verhaltens zugrundegelegt. Elastisch-plastisches Materialverhalten kann durch Iteration mit Hilfe entsprechender Fließkriterien simuliert werden /1.9/.

Die Eigenspannungsermittlung mit Hilfe der FEM beruht auf dem Ansatz der Überlagerung zweier Lastschritte, dem elastisch-plastischen Belastungsschritt und der rein elastischen Entlastung. Hierbei werden die plastischen Fließanteile bei Höchstlast berechnet und entsprechende elastische Rückverformung überlagert. Hieraus ergibt sich der Eigenspannungszustand.

Zielsetzung dieser Arbeit ist es, die Vorzüge der FE-Methode zu nutzen, daher wird nachfolgend auf die für die vorliegende Arbeit bedeutsamen Vor- und Nachteile eingegangen.

Vorteile der FEM sind

- Die Ergebnisdarstellung entspricht jener Form, die für eine Festigkeitsbeurteilung erwartet wird.
- Elastisch-plastisches Materialverhalten und somit auch die Entstehung von Eigenspannungszuständen lassen sich unter Anwendung von Fließkriterien simulieren.

Nachteile der FEM sind

- Die Ergebnisse beruhen auf einem Modell. Lasteinleitung, Einspannbedingungen sowie Werkstoffverhalten sind idealisiert.
- Die Randbedingungen sind oft nur schwer zu erfassen und anzugeben.

2.5. Experimentelle Eigenspannungsermittlung

Die experimentellen Verfahren zur Eigenspannungsermittlung lassen sich in teilzerstörende und zerstörungsfreie Verfahren einteilen. Sie sollen nachfolgend beschrieben werden. Des weiteren werden berührungslose, optische Meßverfahren angesprochen, die bislang noch keinen Lösungsansatz zur Eigenspannungsermittlung bieten.

2.5.1. Teilzerstörende Verfahren zur Eigenspannungsermittlung

Eigenspannungen können aus der Messung der elastischen Reaktionsverformung ermittelt werden. Durch einen Werkstoffabtrag wird das innere Gleichgewicht der Kräfte und Momente gestört. Hierbei werden die Verformungen in der Regel mit Dehnungsmeßstreifen ermittelt. Zur Werkstoffabtragung existiert eine Vielzahl an Verfahren, wobei hier nur die häufig verwendete Bohrlochmethode /1.3, 1.4/ erwähnt werden soll. Durch Bohrungen entstehen freie Oberflächen, was zur Auslösung von Eigenspannungen und zu Verformungen führt. Mit einer Dehnungsmeßstreifen-Rosette können die Dehnungen in drei Richtungen ermittelt und die Haupteigenspannungen basierend auf einer Kalibrierungsfunktion berechnet werden. Die Kalibrierung wird hierbei auf rechnerischem oder experimentellem Weg vorgenommen. Durch die Verfeinerung des Verfahrens in der Bohr-, Meß- und Auswertetechnik, kann man heute die Tiefenverteilung der Eigenspannungen in Bauteilen bestimmen /1.3/. Hierdurch hat die Bohrlochmethode entscheidend an Bedeutung gewonnen. Durch ASTM /2.2/ ist die Vorgehensweise zur Ermittlung von Eigenspannungen mittels der Bohrlochmethode standardisiert.

Bei diesem Verfahren können Eigenspannungen nur lokal gemessen werden. Die örtliche Auflösung entspricht etwa der des Bohrungsdurchmessers. Zur gezielten Auslösung der Eigenspannungen und zur korrekten Applikation der Dehnungsmeßstreifen sind entsprechende Kenntnisse über den Eigenspannungszustand erforderlich. Der Werkstoff muß homogen und isotrop sein.

2.5.2. Zerstörungsfreie Verfahren zur Eigenspannungsermittlung

Als die heute am häufigsten eingesetzte Meßmethode zur zerstörungsfreien Ermittlung von Eigenspannungen soll hier die röntgenographische Spannungsanalyse erwähnt werden (Röntgendiffraktometrie). Sie beruht auf der Interferenz von monochromatischer Röntgenstrahlung bei der Beugung an Gitterebenen am Metallgitter. Aus Interferenzstreifen kann auf die Netzebenenabstände des Gitters geschlossen werden, welche sich durch die Eigenspannungen verändern. Aufgrund der geringen Eindringtiefe der Röntgenstrahlung erhält man jedoch lediglich Informationen über den oberflächennahen Eigenspannungszustand. Bei metallischen Werkstoffen kann durch elektrolytisches Polieren die Tiefenverteilung ermittelt werden.

Neben der Röntgenographie gibt es weitere zerstörungsfreie Verfahren zur Eigenspannungsermittlung, wie z.B. die Neutronenbeugung oder das Ultraschallverfahren /1.5, 1.6, 2.3, 2.4/.

2.5.3. Optische Meßtechnik

2.5.3.1. Überblick

Die Entwicklung des Lasers als kohärente Lichtquelle und die Methoden der automatischen, computergesteuerten Interferogrammauswertung haben wesentlich dazu beigetragen, daß die optische Meßtechnik ein wichtiges, vielseitiges Präzisionswerkzeug geworden ist, das wesentliche Vorteile gegenüber anderen Meßverfahren bietet /1.13/.

Interferometrische Meßverfahren, wie z.B. die holographische Interferometrie und die Speckleinterferometrie, eignen sich zur flächenhaften, berührungslosen und somit zur rückwirkungsfreien Verformungs- und Schwingungsmessung an optisch rauhen Oberflächen /1.12/. Durch die flächenhafte Ermittlung der Meßgröße, kann der für die Festigkeitsuntersuchung wichtige Ort maximaler Beanspruchung leicht gefunden werden.

Im Vergleich zu nichtoptischen Meßverfahren ist die Auflösung der Verformungsmessung sehr hoch, da bei diesen interferometrischen Verfahren die Einheit der Meßgröße im Bereich der Lichtwellenlänge liegt [4.2]. Die Ortsauflösung hängt von der Geometrie des Aufbaus und der Ortsauflösung des Detektors ab.

Die holographischen Meßverfahren bieten zwar eine sehr hohe Auflösung, erfordern aber Filmentwicklung und physikalische Rekonstruktion. Dies ist zeitaufwendig und macht eine Automatisierung und industrielle Anwendung schwierig. Die Elektronische Speckle-Pattern-Interferometrie (ESPI) hingegen ist ein optisch-elektronisches Verfahren, bei dem das optische Signal in ein elektronisches umgewandelt und weiterverarbeitet wird. Der heutige Entwicklungsstand der Hardware (CCD-Kamera, Bildspeicher und Rechner), der Software (Filter, Berechnungs- bzw. grafische Darstellungsprogramme), der digitalen Bildverarbeitung sowie der Auswertelgorithmen, erlauben eine vollautomatische, quantitative Auswertung der Streifensysteme bei Verformungs- und Schwingungsmessungen /2.5/.

Aufgrund der erwähnten Vorteile werden diese Meßverfahren heute in den Bereichen der Bauteiloptimierung und Qualitätssicherung zunehmend eingesetzt.

Zur *Bauteiloptimierung* können mit dieser Meßtechnik Verformungen oder Dehnungen von Bauteilen bei mechanischer und thermischer Belastung gemessen und zur Unter-

suchung der Formsteifigkeit, des Schwingungsverhaltens, der Festigkeit oder Schallabstrahlung genutzt werden /2.5, 2.6, 2.7, 2.8/.

Im Rahmen der Qualitätssicherung werden zunehmend optische Meßverfahren zur *zerstörungsfreien Prüfung* eingesetzt /2.9, 2.10/.

Zur *Dehnungs- und Spannungsanalyse* können holographische Meßtechniken, Speckle-Interferometrie oder Shearographie angewandt werden. Während holografische und ESPI-Verfahren Verformungen erfassen, so ermöglicht die Shearografie als ein laseroptisches Verfahren eine direkte Dehnungsmessung /1.15/.

Neuartige Einsatzgebiete bei der Dehnungs- und Spannungsanalyse sind z.B. die Anwendung der Shearographie zur Dehnungsmessung bei extremer thermischer Beanspruchung /2.11/ oder der Einsatz eines 3D-ESPI-Systems, zur experimentellen Bestimmung der örtlichen Beanspruchung an einem Schweißpunkt. Hierbei wird eine dreidimensionale Verformungsmessung durchgeführt. Die Dehnungsberechnung erfolgt dann anhand der mechanischen Grundgleichungen /1.14/. Dazu ist allerdings die Formmessung ebenfalls erforderlich.

2.5.3.2. Anwendung optischer Verfahren auf die Eigenspannungsermittlung

Auch bei überelastischer Beanspruchung können elastisch-plastische Verformungen und Dehnungen mit den erwähnten optischen Meßverfahren erfaßt werden. Allerdings beschränkt sich dabei die Meßauswertung auf die Darstellung dieser Verformungs- oder Dehnungsfelder. Eine für die Festigkeitsbeurteilung relevante Spannungsanalyse zur direkten Auswertung von Fließvorgängen bis hin zur Ermittlung von Eigenspannungszuständen ist mit diesen Methoden jedoch nicht möglich, weil die Fließanteile dieser Verformungen oder Dehnungen nicht gesondert ermittelt werden. Daher werden optische Meßverfahren zur Eigenspannungsermittlung bislang nur in Verbindung mit teilzerstörenden Verfahren wie z.B. mit der Bohrlochmethode angewendet /1.3, 2.12, 2.13/. Hierbei werden die Reaktionsverformungen mit Hilfe der optischen Meßverfahren ermittelt. Eine Beobachtung von Fließvorgängen erfolgt hierbei nicht. Zur zweiachsigen Spannungs- und Eigenspannungsermittlung, im Falle elastisch-plastischer Belastung, sind bei der Meßauswertung zur Ermittlung des Spannungszustands deshalb Berechnungsmethoden heranzuziehen, die bislang noch nicht im Zusammenhang mit optischen Meßverfahren eingesetzt wurden.

2.6. Anforderungen an ein neues Verfahren zur Eigenspannungsermittlung

Aufgrund der erwähnten Grenzen bestehender experimenteller Meßverfahren und der Vor- und Nachteile optischer Meßverfahren sowie der FE-Methode werden nachfolgend die Anforderungen an ein neues Verfahren zur Eigenspannungsermittlung abgeleitet.

- Ziel ist es, optische Meßverfahren mit den erwähnten Vorteilen zur Eigenspannungsermittlung aber auch zur Spannungsermittlung im teilplastischen Bereich nutzbar zu machen.
- Durch die Anwendung eines optischen Ganzfeldmeßverfahrens in Verbindung mit der FE-Methode soll die Erfassung des ebenen Eigenspannungszustands zerstörungsfrei ermöglicht werden.
- Deshalb muß durch eine flächenhafte Beobachtung der auftretenden Verformungsfelder bei Belastungs- und Entlastungsvorgängen das Eigenspannungsfeld schon während der Entstehung und nicht etwa bei einer zerstörenden Auslösung erfaßt und berechnet werden.
- Das neue Verfahren darf die Vorgänge bei der Entstehung von Eigenspannungen nicht stören.
- Die örtliche Auflösung soll möglichst hoch und die zu erfassende Meßgröße möglichst genau sein, um Dehnungsgradienten bzw. Spannungsspitzen erfassen zu können.
- Die für die Festigkeitsberechnung geeignete Form der Ergebnisdarstellung bestehender FE-Postprozessoren sowie in FE-Programmen implementierte Algorithmen zur Dehnungs- und Spannungsberechnung unter Berücksichtigung von Fließkriterien sollen genutzt werden.

An beliebig wählbaren Punkten sollen die Dehnungs-, Spannungs- und Eigenspannungswerte mehrachsig zur Verfügung stehen.

3. EIN NEUES VERFAHREN ZUR BESTIMMUNG VON EIGENSPANNUNGEN

3.1. Überblick

Durch die Verbundanwendung der Finite-Elemente-Methode und der Elektronischen Speckle-Pattern-Interferometrie sollen die technischen Möglichkeiten beider Verfahren genutzt und zu einem neuen Verfahren der flächendeckenden, berührungslosen, quantitativen Eigenspannungsermittlung vereint werden. Basierend auf einer Ganzfeldverformungsmessung mit einem „Elektronischen Speckle-Interferometer“ soll der Dehnungs-, Spannungs- und Eigenspannungszustand ermittelt und mit Hilfe der graphischen Darstellungsmöglichkeiten eines Finite-Elemente-Programms sichtbar gemacht werden.

Ehe die grundlegenden Schritte, die zur Realisierung dieses Verfahrens zur Spannungs- und Eigenspannungsermittlung erforderlich sind, vorgestellt werden, wird zunächst der Ansatz für die Eigenspannungsermittlung erläutert und die sich einstellenden (Eigen)-Spannungsverläufe am gewählten Beispiel der Scheibe mit Kreisloch analysiert. Anschließend folgt eine Bewertung des Verfahrens.

3.2. Ein neuer Ansatz zur Eigenspannungsermittlung

Im Rahmen dieser Arbeit wird insbesondere die Ermittlung von Eigenspannungen bei zweiachsigen Spannungszuständen in den Vordergrund gestellt. Die Versuchsergebnisse werden am Beispiel eines Zugversuchs an einer Scheibe mit Kreisloch verifiziert und in Kapitel 6 dargestellt.

Nachfolgend wird die Methode zunächst jedoch am einfacheren Beispiel des Biegestabs (einachsiger Spannungszustand) erläutert, bevor sie in Kapitel 3.3 auf die Scheibe mit Kreisloch angewandt wird.

Betrachtet wird ein Balken mit Rechteckquerschnitt aus einem Werkstoff mit ausgeprägter Streckgrenze R_e . Aus Bild 3.1, wo die Bauteilfließkurve $M = f(\epsilon_{max})$ zusammen mit der Werkstofffließkurve $\sigma = f(\epsilon)$ dargestellt ist, ergibt sich der Eigenspannungsverlauf σ_e gemäß der dargestellten Konstruktion als Differenz von σ , des wirklichen, elastisch-plastischen und $\overset{\circ}{\sigma}$ des fiktiv-elastischen Spannungsverlaufs zu:

$$\sigma_e = \sigma - \overset{\circ}{\sigma} \quad (3.1)$$

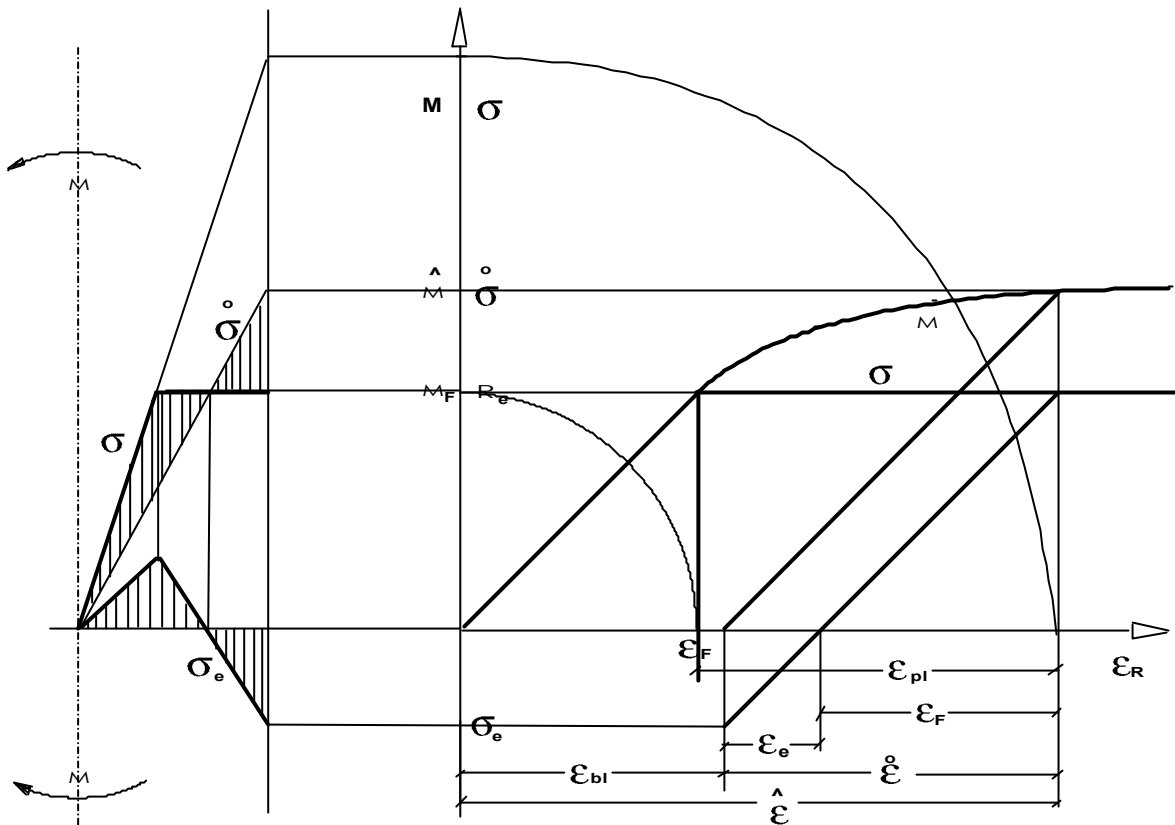


Bild 3.1: Näherungsweise Ermittlung des Eigenspannungsverlaufs σ_e an einem Balken unter Biegung

Die Anwendung von Gl. 3.1 erfordert neben der Fließkurve des Werkstoffs $\sigma = f(\varepsilon)$ die Kenntnis der elastischen Spannungsverteilung $\overset{\circ}{\sigma}$, die nur für einfache Geometrien in analytischer Form zur Verfügung steht. Bei der meist komplexen Struktur technischer Bauteile muß sie numerisch berechnet werden, z.B. mit Hilfe der FEM, was in der Regel ziemlich aufwendig ist.

Daher wurde nach einem anderen Ansatz gesucht bei dem die Eigenspannungsermittlung aus reinen Verformungsmessungen hervorgeht. Diese Verformungsfelder können mit Hilfe der optischen Meßtechnik ermittelt werden. Die Eigenspannungen lassen sich nämlich auch allein über die aus Verformungsfeldern ermittelbaren Dehnungsanteile herleiten. Bei einachsigen Spannungszustand ist

$$\sigma_e = E \cdot \varepsilon_e \quad (3.2)$$

Die Eigendehnung ergibt sich nach Bild 3.1 zu

$$|\varepsilon_e| = \hat{\varepsilon} - \varepsilon_{bl} - \varepsilon_F \quad (3.3)$$

mit

$$\hat{\varepsilon} - \varepsilon_F = \varepsilon_{pl} \quad (3.4)$$

wird, da σ_e negativ ist

$$\varepsilon_e = \varepsilon_{bl} - \varepsilon_{pl} \quad (3.5)$$

und damit

$$\sigma_e = E \cdot (\varepsilon_{bl} - \varepsilon_{pl}) \quad (3.6)$$

Zur Eigenspannungsermittlung muß somit der bleibende und der plastische Dehnungsanteil aus den geeigneten Verformungsmessungen ermittelt werden.

Der neue Ansatz besteht somit aus folgenden Schritten

⇒ Messung des Verformungsfelds unter Höchstlast

⇒ Messung des bleibenden Verformungsfelds nach Entlastung

Aus den gemessenen Verformungen werden jeweils die zugehörigen Dehnungsfelder an Hand der mechanischen Grundgleichungen berechnet. Um auch zweiachsige Spannungszustände berücksichtigen zu können, geschieht dies in den Komponenten in x- und y-Richtung

$$\Rightarrow \text{Dehnungsfeld bei Höchstlast} \quad \hat{\varepsilon}_x(x,y), \hat{\varepsilon}_y(x,y) \quad (3.7)$$

$$\Rightarrow \text{Dehnungsfeld nach Entlastung} \quad \varepsilon_{blx}(x,y), \varepsilon_{bly}(x,y) \quad (3.8)$$

Aus den „gemessenen“ Dehnungsfeld bei Höchstlast lassen sich unter Berücksichtigung des Fließkriteriums nach von Mises und der Werkstofffließkurve die plastischen Dehnungsanteile mit Hilfe der FEM komponentenweise bestimmen:

$$\Rightarrow \text{Plastischer Dehnungsanteil} \quad \varepsilon_{plx}(x,y), \varepsilon_{ply}(x,y) \quad (3.9)$$

Aus den plastischen Dehnungsanteilen und den bleibenden Dehnungsfeldern läßt sich der Eigendehnungszustand ε_e entsprechend Gl.(3.5) ermitteln, mit dessen Hilfe der gesuchte Eigenspannungszustand σ_e berechnet werden kann. Das Eigendehnungsfeld auf der Strukturoberfläche ist dann bei komponentenweiser Betrachtung:

$$\varepsilon_{ex}(x,y) = \varepsilon_{blx}(x,y) - \varepsilon_{plx}(x,y) \quad (3.10)$$

$$\varepsilon_{ey}(x,y) = \varepsilon_{bly}(x,y) - \varepsilon_{ply}(x,y) \quad (3.11)$$

wobei die bleibenden und plastischen Dehnungen aus obigen Messungen hervorgehen. Somit ergibt sich für einen zweiachsigen Spannungszustand der Eigenspannungszustand durch einfache Rechnung zu

$$\begin{aligned}\sigma_{ex}(x, y) &= \frac{E}{1 - \mu^2} \cdot (\varepsilon_{ex} + \mu \varepsilon_{ey}) \\ \sigma_{ey}(x, y) &= \frac{E}{1 - \mu^2} \cdot (\varepsilon_{ey} + \mu \varepsilon_{ex})\end{aligned}\tag{3.12}$$

Die Bestimmung des Eigendehnungsfeldes gem. Gl. (3.10), (3.11) läßt eine besonders anschauliche Interpretation des Vorgangs bei der Entstehung zu, da die Eigendehnungen ε_e für die Veränderung des Dehnungszustandes ε_{pl} hin zum Endzustand ε_{bl} verantwortlich sind.

Nach einer elastisch-plastischen, teilplastischen Verformung hat sich das Dehnungsfeld irreversibel geändert. Da die lokalen Dehnungen aber nach wie vor miteinander kompatibel sein müssen, entstehen deshalb innere Verspannungen. Gäbe es keine solche inneren Zwänge, so würde sich nach Entlastung ein eigenspannungsfreier Dehnungszustand ε_{pl} einstellen.

Sind diese aber vorhanden, so werden, wegen der notwendigen Verträglichkeit der Verformungen, die plastischen Dehnungen ε_{pl} durch die Eigendehnungen ε_e hin zu den bleibenden Dehnungen ε_{bl} verändert. Die Differenz beider Zustände gem. Gl. (3.10), (3.11) beschreibt also gerade den Eigendehnungszustand.

Zur Umsetzung des Verfahrens müssen entsprechende Schnittstellen zum FE-Programm realisiert und das FE-Programm selbst um ein Modul zur Berechnung von Fließanteilen aus Verformungsmessungen erweitert werden. Die plastischen Dehnungsanteile sollen aus gemessenen Verformungen unter Berücksichtigung einer Streckgrenze (idealplastisch oder mit Verfestigung) berechnet werden können. Hierbei muß ein Fließkriterium zugrunde gelegt werden. Des weiteren muß das FE-Programm die Subtraktion von Dehnungszuständen ermöglichen.

3.3. Anwendung auf die Scheibe mit Kreisloch

Da es die Zielsetzung des Verfahrens ist, den Eigenspannungszustand bei zweiachsigem Spannungszustand zu ermitteln, werden die Untersuchungen am Beispiel einer Scheibe mit Kreisloch durchgeführt. Die zu erwartenden Spannungsverläufe und die

Methode zur näherungsweise Eigenspannungsberechnung werden in diesem Abschnitt dargestellt.

3.3.1. Spannungsverlauf an der unendlich ausgedehnten Scheibe mit Kreisloch

Für das Spannungsfeld in einer unendlich ausgedehnten Scheibe mit kreisförmigen Loch vom Radius a unter einachsiger Zugbeanspruchung durch die Spannung σ_0 wurde erstmals von G. Kirsch eine analytische Lösung für die Berechnung der elastischen Spannungsverteilung gem. Bild 3.2 angegeben /3.1/.

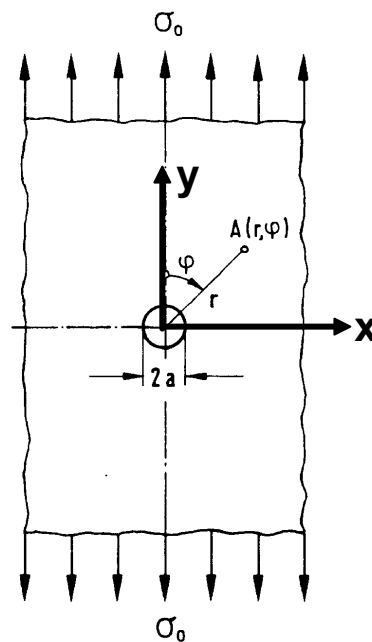


Bild 3.2: Scheibe mit Kreisloch unter gleichförmiger Zugbelastung

Hierbei wird das Spannungsfeld durch die Spannungsfunktion F repräsentiert

$$F = \frac{\sigma_0}{4} \left[r^2 - 2a^2 \ln r - \frac{(r^2 - a^2)^2}{r^2} \cos 2\varphi \right] \quad (3.13)$$

Daraus ergeben sich die Spannungen zu

$$\sigma_r = \frac{1}{r} \frac{\partial F}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 F}{\partial r^2} = \frac{\sigma_0}{2} \left(1 - \frac{a^2}{r^2} + \left(1 + 3 \frac{a^4}{r^4} - 4 \frac{a^2}{r^2} \right) \cos 2\varphi \right) \quad (3.14)$$

$$\sigma_\varphi = \frac{\partial^2 F}{\partial r^2} = \frac{\sigma_0}{2} \left(1 + \frac{a^2}{r^2} - \left(1 + 3 \frac{a^4}{r^4} \right) \cos 2\varphi \right) \quad (3.15)$$

$$\tau_{\varphi r} = \frac{1}{r^2} \frac{\partial F}{\partial \varphi} - \frac{1}{r} \frac{\partial^2 F}{\partial r \partial \varphi} = \frac{\sigma_0}{2} \left(-1 - 2 \frac{a^2}{r^2} + 3 \frac{a^4}{r^4} \right) \sin 2\varphi \quad (3.16)$$

Die höchste Beanspruchung tritt wegen der Kerbwirkung am Bohrungsrand auf. Man

erhält diese Spannungen, die zugleich Hauptspannungen sind, aus Gl. (3.14) und Gl. (3.15) für $\varphi = \pi/2$ als:

$$\sigma_y = \frac{\sigma_0}{2} \left(2 + \frac{a^2}{r^2} + 3 \frac{a^4}{r^4} \right) \equiv \sigma_1 \quad (3.17)$$

$$\sigma_x = \frac{3\sigma_0}{2} \left(\frac{a^2}{r^2} - \frac{a^4}{r^4} \right) \equiv \sigma_2 \quad (3.18)$$

Der Verlauf dieser Hauptspannungen im Kerbquerschnitt ist in Bild 3.3 eingezeichnet. Die Maximalspannung $\sigma_{y\max} = 3 \cdot \sigma_0$ tritt als Längsspannung am Lochrand auf, klingt jedoch mit zunehmender Entfernung rasch auf den Wert σ_0 ab.

Des weiteren ergibt sich die Tangentialspannung am Lochinnenrand für $r = a$ zu:

$$\sigma_r = 0, \quad \tau_{r\varphi} = 0 \quad \text{und} \quad \sigma_\varphi = \sigma_0 \cdot [1 - 2 \cdot \cos(2 \cdot \varphi)] \quad (3.19)$$

Dieser Spannungsverlauf wird in Kapitel 6 zur Ergebniskontrolle betrachtet.

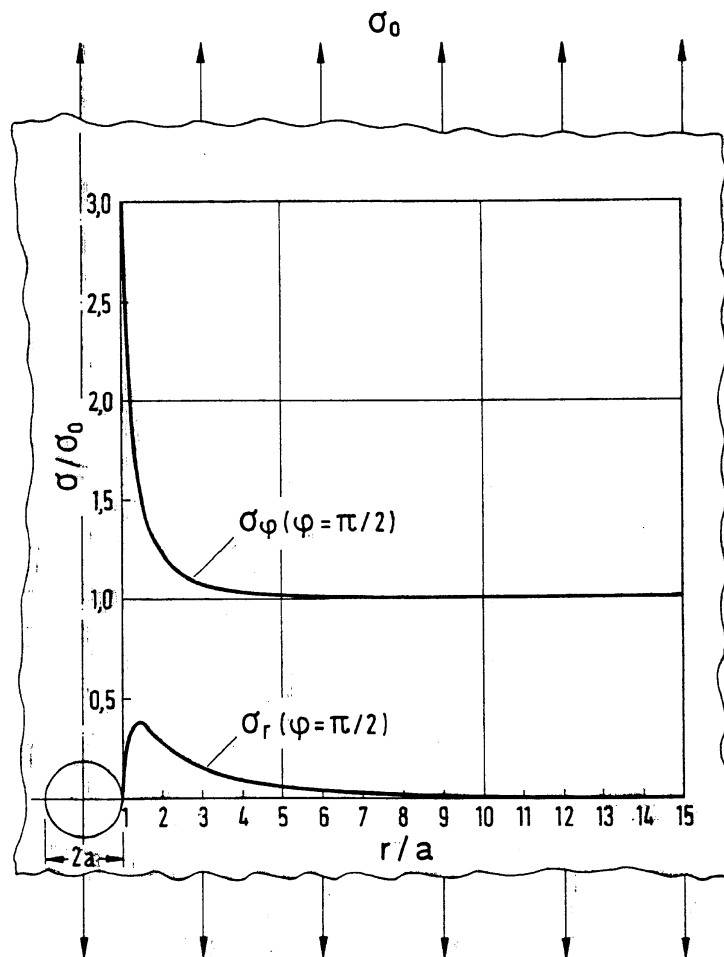


Bild 3.3: Verlauf der Spannungen σ_r und σ_φ für $\varphi = \pi/2$ in einer unendlich ausgedehnten Scheibe unter der Zugspannung σ_0 .

3.3.2. Spannungsverlauf in der Scheibe mit Kreisloch bei endlicher Breite

Der Spannungsverlauf gem. Gl. (3.14) - (3.18) wird für eine Scheibe mit unendlicher Breite B angegeben. Solange $B \gg a$, wird hiermit der Spannungsverlauf mit ausreichender Genauigkeit beschrieben. Bei schmalen Scheiben jedoch muß man von einer anderen Spannungsverteilung ausgehen. Diese kann durch Korrekturglieder angegeben werden, welche die geometrischen Verhältnisse des Kerbquerschnitts berücksichtigen /3.2/,/3.3/. Somit wird die Spannung σ_y in Belastungsrichtung im Lochquerschnitt (entspricht σ_φ für $\varphi = \pi/2$ in Bild 3.3).

$$s_y = \frac{3s_o}{c'} \left(2 + c \frac{a^2}{r^2} + 3c \frac{a^4}{r^4} \right) \equiv s_1 \quad (3.20)$$

mit

$$c' = 2 + 4c \quad \text{und} \quad c = \frac{2(a_k - 1)}{4 - a_k D} \quad (3.21)$$

wobeizur Abkürzung

$$D = \frac{2}{b-1} - \frac{1}{b(b-1)} - \frac{1}{b^3(b-1)} \quad (3.22)$$

mit $b = B/2a$ gesetztist.

Die Korrektur geschieht also durch die Einführung der Formzahl α_k . Auf Grund des Vergleiches mit entsprechenden Versuchsergebnissen wird empfohlen, folgende Beziehungen für die Formzahl zu verwenden:

$$\text{Für } 1 \leq b \leq 3: \quad a_k = 3 - \sqrt{1/b} \quad (3.23)$$

$$\text{Für } b > 3: \quad a_k = \frac{3b-1}{b+0,3} \quad (3.24)$$

Zum späteren Vergleich mit der Messung sind die Abmessungen der im Rahmen dieser Arbeit untersuchten Scheibe:

$B = 35 \text{ mm}$, $a = 5 \text{ mm}$ und somit $\beta = 3,5$ und $\alpha_k = 2,5$.

3.3.3. Eigenspannungsverlauf

In Bild 3.5 sind die Dehnungen und Spannungen in Längsrichtung über dem Querschnitt im Kerbgrund dargestellt. Auf die Wiedergabe der Querspannungen wird verzichtet, da die interessierenden Eigenspannungen, insbesondere die Maximalwerte am Lochrand aus den Längsspannungen entstehen.

Eine überelastische Beanspruchung führt im Kerbgrund des Stabs zur Dehnung $\hat{\varepsilon}$ und zur Spannung σ . Hierbei sind Spannung und Dehnung über die Werkstofffließkurve gekoppelt. Bei Werkstoffen mit ausgeprägter Streckgrenze und idealplastischem Verhalten ist im Kerbgrund und im Bereich der plastischen Verformungen

$$\sigma = R_e \quad (3.25)$$

Bei rein elastischem Werkstoffverhalten hätte dieselbe Zugkraft im Kerbgrund die fiktiv-elastische Spannung

$$\overset{\circ}{\sigma} = \alpha_k \cdot \sigma_n \quad (3.26)$$

hervorgerufen. Nach Entlastung ergibt sich am Rand eine bleibende Dehnung ε_{Rbl} und die Eigenspannung σ_{eR} .

Der Verlauf der zu erwartenden Eigenspannungen über dem Querschnitt im Kerbgrund nach dem Entlasten läßt sich als Differenz aus wirklicher und fiktiv-elastischer Spannung ermitteln.

$$\sigma_e = \sigma - \overset{\circ}{\sigma} \quad (3.27)$$

Der Maximalwert von σ_e tritt am Lochrand auf. Der Verlauf der bleibenden Dehnungen nach Entlastung ergibt sich aus der Differenz des überelastischen Dehnungsverlaufs bei Belastung und des fiktiv-elastischen Dehnungsverlaufs zu:

$$\varepsilon_{bl} = \varepsilon - \overset{\circ}{\varepsilon} \quad (3.28)$$

Die für die Berechnung der Eigenspannungen benötigten Eigendehnungen

$$\varepsilon_e = \varepsilon_{bl} - \varepsilon_{pl} \quad (3.29)$$

sind direkt proportional zu den Eigenspannungen. Im elastisch beanspruchten Bereich fallen sie mit den bleibenden Dehnungen zusammen. Die jeweiligen Maximalwerte ε_{eR} und ε_{blR} treten am Lochrand auf.

In Kapitel 4.3.3 wird in Zusammenhang mit dem Fließkriterium nach von Mises eine weitere Methode zur Bestimmung der bleibenden Dehnungen und Eigendehnungen vorgestellt. Diese soll dann in Kapitel 6 zur Ergebniskontrolle genutzt werden.

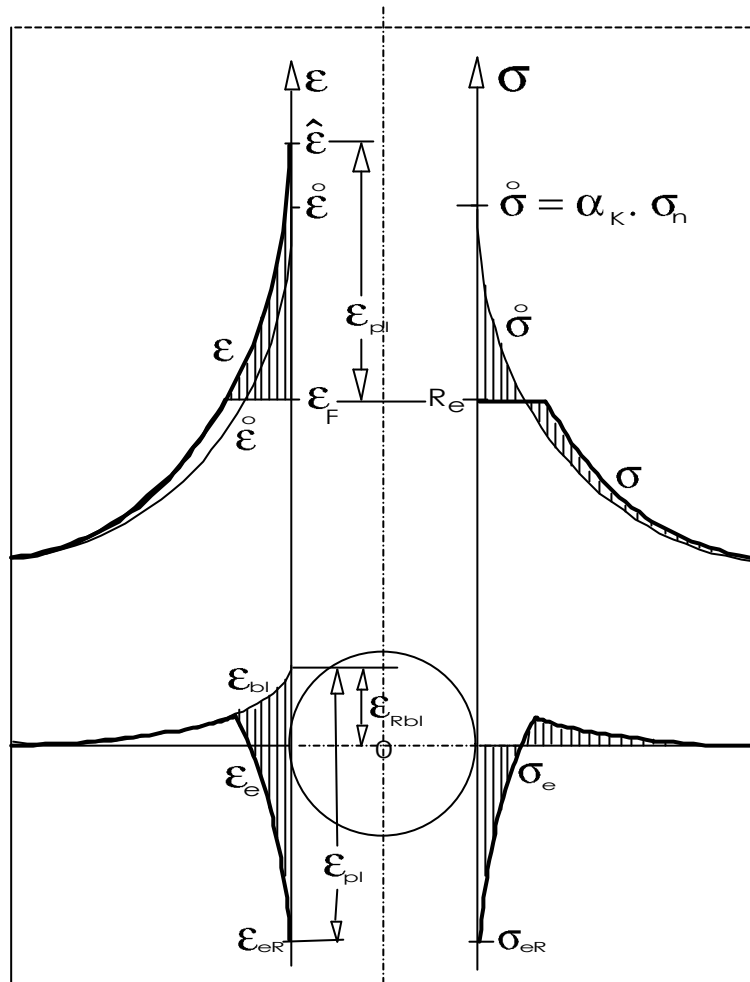


Bild 3.5: Ermittlung des Eigendehnungs- und Eigenspannungsverlaufes an der Scheibe mit Kreisloch (Links: Dehnungen, Rechts: Spannungen).

3.4. Erforderliche Schritte zur Spannungsermittlung

Die Verbundanwendung zur Spannungsermittlung wird durch folgende Schritte realisiert (Siehe Bild 3.5).

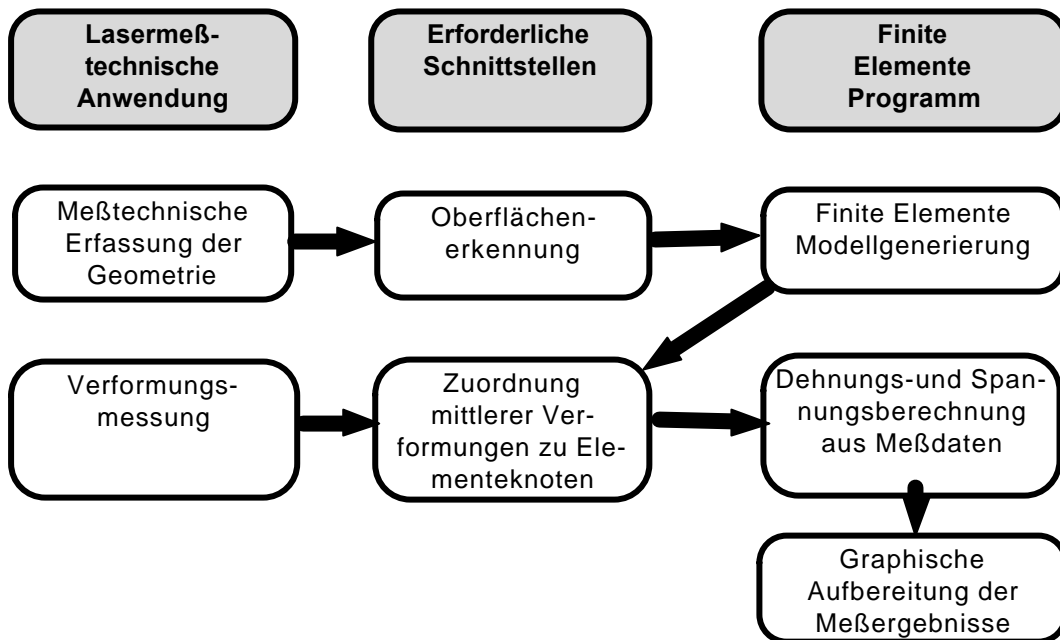


Bild 3.5: Die grundlegenden Schritte der Verbundanwendung zur Spannungsermittlung basierend auf Meßdaten

1. Meßtechnische Erfassung der Geometrie

Je nach Zielsetzung und Beschaffenheit der Bauteiloberfläche muß diese zwei- bzw. dreidimensional erfaßt werden. Bei einer ebenen Oberflächenbeschreibung genügt es, auf den Meßdatensatz der Verformungsmessung zurückzugreifen, da an jeder Koordinate, an der ein Meßwert vorliegt, auch ein Oberflächenpunkt existiert. Für die Erfassung von dreidimensionalen Oberflächen können z.B. bekannte lichtoptische Verfahren wie das Triangulations- oder das Streifenprojektionsverfahren eingesetzt werden. In beiden Fällen wird die Oberfläche elektronisch im Pixelraster einer CCD-Kamera (**C**harge **C**oupled **D**evice) abgespeichert. Die Oberfläche wird somit in Form einer Punktwolke beschrieben.

2. Punktereduktion und Oberflächenerkennung

Die Oberflächenbeschreibung durch eine Punktwolke kann nicht von einem Finite-Elemente-Programm (FE) weiterverarbeitet werden. Die Anzahl der Punkte muß reduziert und die Oberfläche in geeigneter Form beschrieben werden. Im zweidimen-

sionalen Fall genügt es, die Oberflächenkontur durch Linien oder Splines anzugeben. Bei der dreidimensionalen Oberflächenbeschreibung können Oberflächenabschnitte z.B. durch Coon'sche Flächen parametrisiert werden.

3. *Einlesen der Geometrie in das FE-Programm und Modellgenerierung*

Die Bauteiloberfläche kann über verfügbare Schnittstellen in ein FE-Programm eingelesen werden. Basierend auf dieser Oberfläche kann mit einem automatischen Mesher eines Finite-Elemente-Programms ein für die spätere Spannungsberechnung geeignetes Finite-Elemente-Netz erstellt werden.

4. *Verformungsmessung*

Bei der Verformungsmessung mit einem Elektronischen Speckle-Pattern-Interferometer wird vor und nach Belastung ein Specklemuster aufgenommen. Die Korrelation der Muster durch Subtraktion oder Addition ergeben Streifenbilder, die elektronisch weiterverarbeitet werden können. Als Ergebnis erhält man für jedes Pixel die in diesem Bereich aufgetretene mittlere Verformung in Empfindlichkeitsrichtung des Interferometers (vgl. Kapitel 4).

5. *Zuordnung der gemittelten Verformungswerte zu den entsprechenden Elementknoten*

Basierend auf der Verformungsmessung und auf dem generierten FE-Netz kann nun jedem Knotenpunkt ein gemessener Verformungswert zugeordnet werden. Da im allgemeinen die Dichte der Meßwerte höher ist als die der FE-Knotenpunkte, kann über mehrere Verformungswerte in der Umgebung des Knotenpunktes gemittelt werden.

6. *Einlesen der Verformungen und Spannungsberechnung basierend auf Meßdaten*

Über eine entsprechende Schnittstelle zum FE-Programm können die Verformungswerte eingelesen und die Dehnungs- und Spannungsberechnung unter Berücksichtigung vorgegebener Materialkennwerte (Elastizitätsmodul, Querkontraktionszahl, Streckgrenze) und Fließkriterien durchgeführt werden.

7. *Auswertung der Ergebnisse durch Postprozessing*

Das Ergebnis des Rechenlaufs kann mit einem FE-Postprozessor graphisch dargestellt und ausgewertet werden.

Somit ist die Dehnungs- und Spannungsberechnung mit Hilfe eines FE-Programms basierend auf Verformungsmessungen realisiert.

3.5. Erforderliche Schritte zur Eigenspannungsermittlung

Durch Überlagerung geeigneter Dehnungsfelder, wie in Abschnitt 3.2 erläutert, kann nun der Eigenspannungszustand berechnet werden. Hierfür wird gem. Bild 3.6 das Verformungsfeld bei überelastischer Beanspruchung gemessen (ESPI-Messung 1) und über entsprechende Schnittstellen in das FE-Programm eingelesen. Das FE-Programm berechnet hieraus die zugehörigen Dehnungen und unter Berücksichtigung des Fließkriteriums nach von Mises /3.4/ und einer vorgegebenen Streckgrenze oder Fließkurve den plastischen Dehnungsanteil. Nach Entlastung der Probe wird das bleibende Verformungsfeld gemessen (ESPI-Messung 2), in das FE-Programm eingelesen und das bleibende Restdehnungsfeld berechnet. Durch komponentenweise Subtraktion dieser Dehnungsfelder entsprechend Gl. (3.10), (3.11) erhält man das gesuchte Eigendehnungsfeld ε_e , mit dessen Hilfe der gesuchte Eigenspannungszustand berechnet werden kann.

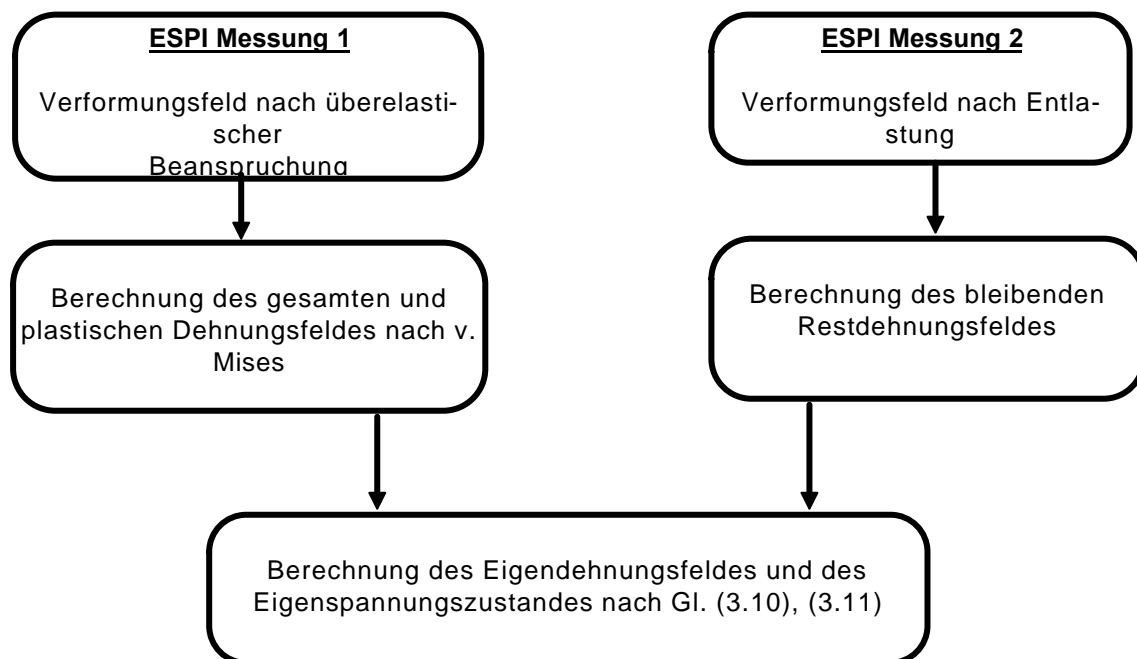


Bild 3.6: Die grundlegenden Schritte zur Eigenspannungsermittlung

3.6. Bewertung des vorgestellten Ansatzes zur Eigenspannungsermittlung

Durch die Kombination der FE-Methode und der Elektronischen Speckle-Pattern-Interferometrie entsteht ein neues Meßverfahren, das neben der Eigenspannungsermittlung auch als berührungsloses Meßverfahren zur Ermittlung der elastischen oder

überelastischen Spannungsverteilung geeignet ist. Nachfolgend wird der vorgestellte Ansatz zusammenfassend bewertet.

Voraussetzungen

- Isotropie des Werkstoffes
- Kenntnis des Elastizitätsmoduls, der Querkontraktionszahl sowie der Streckgrenze bzw. der Fließkurve des Werkstoffes. Somit kann sowohl idealplastisches als auch verfestigendes Fließverhalten berücksichtigt werden.
- „Rauhe“, d.h. nicht reflektierende Oberflächen (Mindestrauhtiefe $> \lambda$ vgl. Kap. 4).
- Ein Modul zur Spannungsberechnung aus Verformungswerten, sowie ein Modul zur Ermittlung der Fließanteile bei überelastischer Beanspruchung.

Leistungsmerkmale

- Messung von Spannungszuständen im Falle überelastischer Beanspruchung
- Zerstörungsfreie Ermittlung von Eigenspannungszuständen durch Beobachtung der Vorgänge bei der Entstehung und Überlagerung von Dehnungszuständen
- Der Ort höchster Beanspruchung wird durch die Ganzfeldmessung entdeckt, dies ist insbesondere bei der Eigenspannungsermittlung an komplexeren Bauteilgeometrien bei unbekanntem Randbedingungen von Bedeutung. Eine vorherige Kenntnis des Ortes höchster Beanspruchung ist nicht erforderlich.
- Berührungslos, das Meßobjekt nicht beeinträchtigend
- Globale, flächendeckende, vollständige Erfassung von zweiachsigen Spannungs- und Eigenspannungszuständen
- Hohe Ortsauflösung im Vergleich zu nichtoptischen Verfahren
- Eignung für beliebige Werkstoffe
- Inhomogenitäten im Werkstoff können entdeckt werden
- Ergebnisdarstellung in standardisierter Form der FE-Postprozessoren
- Implementierte, technisch ausgereifte Algorithmen eines FE-Programms zur überelastischen Dehnungs- und Spannungsberechnung können genutzt werden
- (Eigen-)spannungsermittlung ist nur an optisch zugänglichen Oberflächen möglich

4. GRUNDLAGEN FÜR DIE REALISIERUNG

4.1. Überblick

Die Grundlagen des hier eingesetzten Elektronischen-Speckle-Pattern-Interferometers, das Prinzip der Finite-Elemente-Methode (FEM) bei elastischer und überelastischer Beanspruchung und die für das Verfahren notwendigen speziellen Anforderungen an das FE-Programm werden in diesem Kapitel kurz beschrieben.

4.2. Die Elektronische Speckle-Pattern-Interferometrie

Während in der klassischen Interferometrie und Holographie Speckles als hinderndes Rauschen auftreten, werden sie hingegen in der Speckle-Pattern-Interferometrie als Informationsträger genutzt, da die Phaseninformation des Meßobjektes im Speckle als Intensitätsmodulation enthalten ist. Das abgebildete Specklemuster charakterisiert somit die Objektoberfläche am Beobachtungsort. Ändert sich die Geometrie der Bauteiloberfläche, so ändern sich auch die entsprechenden Speckles in der Abbildungsebene, da sich die optischen Weglängen der an der Interferenz beteiligten Beleuchtungsstrahlen ändern.

Bild 4.1 zeigt den optischen Aufbau des eingesetzten In-plane-Interferometers. Es werden hier Verschiebungen senkrecht zur Beobachtungsrichtung sichtbar gemacht. Das Objekt liegt in der xy -Ebene und wird von zwei ebenen Wellenfronten U_1 und U_2 , jeweils unter dem Winkel θ zur Oberflächennormalen, beleuchtet. Das Specklemuster wird über die Abbildungslinse in die Abbildungsebene I abgebildet. Im Gegensatz zu Interferometern mit anderen Empfindlichkeitsrichtungen (out-of-plane oder 3D) wird hier die Phaseninformation durch Überlagerung von zwei Objektwellen statt durch Überlagerung von Objekt- und Referenzwelle gespeichert.

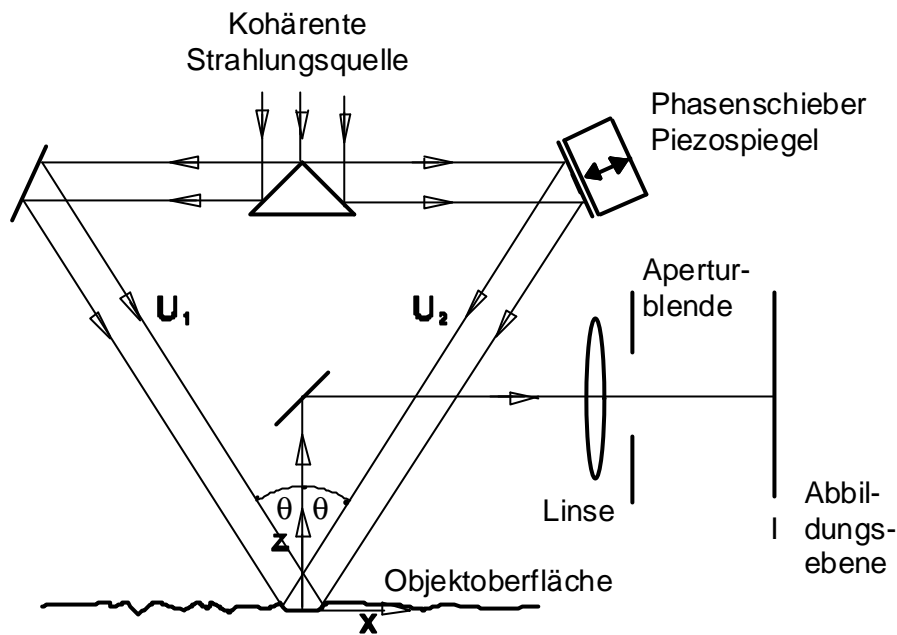


Bild 4.1: Optischer Aufbau des eingesetzten In-plane-Interferometers

Grundsätzlich wird bei der hier zum Einsatz kommenden Verformungsmessung mittels Speckleinterferometrie die Relativphase eines rauhen Objektes gemessen, d.h. ein Zustand a wird mit einem Zustand b des Objektes verglichen. Die Specklemuster beider Zustände werden durch Subtraktion oder Addition korreliert. Sie liefern als Ergebnis ein Streifenmuster, das die Information über die aufgetretenen Verformungen enthält.

Voraussetzung für eine mögliche Korrelation ist, daß die Verformungen hinreichend klein sind, damit die korrelierenden Speckles noch einander überlappen. Hierdurch wird der maximal realisierbare Meßbereich bestimmt. Dieser kann durch den Interferometeraufbau entsprechend gewählt werden. Bei Ganzkörperverschiebungen des Meßobjekts kommt es zu einer Verminderung des Kontrasts der Streifen, wenn diese Verschiebungen größer als etwa der halbe mittlere Durchmesser der Speckles werden [4.3]. Das durch die Korrelation entstandene Streifenbild wird quantitativ ausgewertet.

Zur Auswertung muß die Phase an jedem Meßpunkt ermittelt werden. Es sind zwei verschiedene Methoden möglich: Entweder erfolgt die Phasenberechnung nach der Subtraktion der Specklemuster oder es werden zunächst die Phasenbilder der Zustände a und b berechnet und anschließend subtrahiert. Die erste Methode hat den Vorteil, daß die Streifen in Echtzeit auf dem Monitor beobachtet werden können, jedoch wird die Meßgenauigkeit von der Anzahl der Speckles in einem Streifen begrenzt. Die Meßgenauigkeit bei der zweiten Methode ist nur von der Dekorrelation der Speckles abhängig. Im Rahmen dieser Arbeit wird daher die erste Methode zur Echtzeitbeobach-

tung bei der Aufnahme eingesetzt und die zweite Methode zur rechnergestützten Auswertung.

Die Empfindlichkeitsrichtungen können durch entsprechende Beleuchtungs- und Beobachtungsrichtungen gewählt werden. Somit können in-plane-, out-of-plane- und 3D-Speckleinterferometer realisiert werden /1.12/. Speckleinterferometer können bezüglich des Verformungsgradienten, aber auch bezüglich dessen erster Ableitung empfindlich gemacht werden /1.11/. Die Specklemuster werden zur Weiterverarbeitung fotografisch aufgenommen oder elektronisch mit einer Kamera gespeichert. Im Rahmen der Elektronischen Speckle-Pattern-Interferometrie wird zur Bildaufnahme eine CCD-Kamera eingesetzt und das Signal mit elektronischer Hardware weiterverarbeitet. Die Weiterverarbeitung beinhaltet folgende Schritte

- Digitale Speicherung der Specklemuster vor und nach der Zustandsänderung
- Berechnung der Phasenbilder mit Hilfe des Phasenshiftverfahrens
- Subtraktion
- Digitale Filterung
- Demodulation

Diese Methode kommt im Rahmen dieser Arbeit zur Anwendung. Der optische Aufbau des eingesetzten in-plane-Interferometers sowie die computergestützte Auswertemethode mittels Phasenshiftverfahren ist umfassend in /4.1/ - /4.9/ erläutert.

4.3. Finite-Elemente-Methode

4.3.1. Prinzip

Zur Untersuchung des Verhaltens beliebiger Körper unter Belastungen wie Kräften, Momenten, Temperaturen etc. gibt es im allgemeinen keine direkte Lösung. Schneidet man jedoch einfach berandete Elemente heraus, so gelingt eine einfache Beschreibung des Elementverhaltens und damit des gesamten Modells. Somit wird bei der Finiten Elemente Methode ein reales Bauteil in ein Modell aus endlich vielen Elementen, verbunden durch Eck- und Zwischenknoten angenähert. Dabei werden vereinfachende Annahmen bezüglich ihres elastischen Verhaltens zugrundegelegt.

In der linearen Statik kann das Verhalten des Elementes durch die möglichen Bewegungen der Knoten, die durch Kräfte an diesem Knoten hervorgerufen wurden, ausgedrückt werden. Der lineare Ansatz zwischen den Kräften und Bewegungen am Knoten führt zu 6 Gleichungen:

$$\begin{bmatrix} F_x \\ F_y \\ F_z \\ M_x \\ M_y \\ M_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_{11} & & & & & \\ & \bullet & & & & \\ & & \bullet & & & \\ & & & \bullet & & \\ & & & & & \\ c_{61} & & & & & c_{66} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} v_x \\ v_y \\ v_z \\ d_x \\ d_y \\ d_z \end{bmatrix} \quad (4.20)$$

Die Gleichungsmatrix mit den Koeffizienten c_{11} bis c_{66} beschreibt das elastische Verhalten des Elementes bezogen auf ein Knotenpaar. Man erhält diese unter Zugrundelegung der Elementgeometrie und der Materialeigenschaften. Wird diese Matrix für alle Knoten des Elementes angegeben, so bezeichnet man diese Matrix als die Elementsteifigkeitsmatrix \underline{k} . Das Gleichungssystem für das Gesamtmodell ergibt sich dann durch Aufaddieren aller an einem Strukturknoten anfallenden Koeffizienten aus den Elementsteifigkeitsmatrizen, und es gilt:

$$\underline{F} = \underline{K} \cdot \underline{V} \quad (4.21)$$

mit \underline{F} : Vektor aller Knotenkräfte und Momente

\underline{K} : Symmetrische Steifigkeitsmatrix des Gesamtmodells

\underline{V} : Vektor aller Knotenverschiebungen und Verdrehungen

Unter Berücksichtigung der Randbedingungen erhält man mit der Auflösung des Gleichungssystems nach bekannten Algorithmen der numerischen Mathematik die gesuchten Knotenbewegungen (d.h. Verschiebungen und Verdrehungen), aus denen sich Dehnungen, Spannungen und Kräfte berechnen lassen.

Die FEM kann in vielen Bereichen der Technik eingesetzt werden, wovon nachfolgend nur die hier relevante lineare und die nichtlineare Statik erwähnt werden sollen.

Bei der linearen Statik geht man von Beanspruchungen im linear-elastischen Bereich des Werkstoffgesetzes und von relativ kleinen lokalen Verschiebungen und Verdrehungen aus. Bei der nichtlinearen Statik wird das nichtlineare Problem in lineare Schritte aufgelöst. Damit können sowohl Probleme großer Verformungen und der zugehörigen Spannungen unter Berücksichtigung nichtlinearen Materialverhaltens berechnet werden. Das Materialverhalten wird als Kurve in beliebiger Form definiert, dabei kann auch Fließverhalten und Hysterese bei Entlastung berücksichtigt werden.

4.3.2. Anforderung an das FE-Programm für das neue Verfahren

In dem hier entwickelten Verfahren sind nun alle Verformungsvektoren für jeden Knoten mit Hilfe der optischen Meßtechnik gemessen und somit bereits bekannt. Es sind somit

auch alle Verschiebungen und Verdrehungen bekannt. Sowohl das Aufstellen der Steifigkeitsmatrix, als auch die Lösung des linearen Gleichungssystems entfällt. Basierend auf den vorgegebenen Verformungsvektoren müssen lediglich Dehnungen und Spannungen berechnet werden. Entsprechende Schnittstellen sind bei FE-Programmen bisher nicht verfügbar. Über das FE-Programm müssen die Verformungen eingelesen und so weiterverarbeitet werden, als wären sie berechnete Knotenbewegungen und entstanden durch die Lösung des linearen Gleichungssystems. An dieser Stelle muß das FE-Programm mit seinem üblichen Rechenlauf fortfahren.

Damit ein FE-Programm für das vorgesehene Verfahren eingesetzt werden kann, müssen diese Änderungen am Programm durchgeführt werden. In Bild 4.2 wird der übliche Ablauf bei der FE-Berechnung dem geänderten Ablauf bei dem neuen Verfahren gegenübergestellt. Bei diesem Verfahren entfällt der Aufbau der Elementesteifigkeitsmatrix, der Einbau in die Steifigkeitsmatrix des Gesamtmodells, der Aufbau des Lastvektors und die eigentliche Berechnung der Verformungen und Verdrehungen durch Lösen des linearen Gleichungssystems.

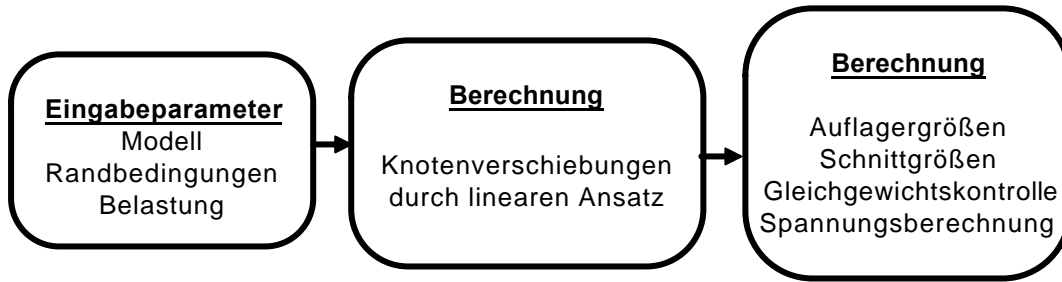
Das erforderliche Modul zur Spannungsberechnung und Ermittlung der Fließanteile aus gemessenen Verformungswerten wird im nachfolgenden Abschnitt erläutert.

Des weiteren muß das FE-Programm die Möglichkeit bieten, berechnete plastische Dehnungen eines Lastschrittes gesondert zu speichern und Dehnungsfelder zu subtrahieren, damit die erforderlichen Schritte zur Eigenspannungsermittlung gem. Gl (3.10) und (3.11) möglich sind.

Aus den gemessenen Verformungen lassen sich anhand der mechanischen Grundgleichungen die Dehnungen berechnen. Der Zusammenhang zwischen Dehnungen und Spannungen wird über die Elastizitätsmatrix vorgegeben. Diese lautet bei dem hier zur Anwendung kommenden ebenen Spannungszustand:

$$\begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{bmatrix} = \frac{E}{1-\mu^2} \cdot \begin{bmatrix} 1 & \mu & 0 \\ \mu & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1-\mu}{2} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{bmatrix} \quad (4.22)$$

Üblicher Ablauf bei der FE-Methode



Modifizierter Ablauf beim neuen Verfahren



Bild 4.2: Üblicher und modifizierter Ablauf der FE- Berechnung

4.3.3. Fließkriterium im FE-Programm

Bei der Festigkeitsberechnung bei mehrachsiger Beanspruchung wird, basierend auf einer Festigkeitshypothese, eine Vergleichsspannung ermittelt. Festigkeitsbedingungen müssen auf die Art des Versagens und somit auf das Werkstoffverhalten (z.B. spröde oder zäh) und auf den zeitlichen Verlauf der Beanspruchung (z.B. ruhend oder schwingend) abgestimmt sein. *Bei zähem Werkstoff* und statischer Belastung ist normalerweise das Versagen durch Fließen zu erwarten. Hier finden die Schubspannungshypothese und - im Rahmen dieser Arbeit - die Gestaltänderungsenergiehypothese (GEH) ihre Anwendung.

Die Gestaltänderungsenergiehypothese geht auf die Fließbedingung nach von Mises zurück /3.4/. Sie lautet in Hauptspannungen ausgedrückt:

$$\frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2} = R_e \quad (4.23)$$

Für den zweiachsigen Fall ($\sigma_3 = 0$) ergibt sich hieraus

$$\sigma_v = \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2 - \sigma_1 \sigma_2} \quad (4.24)$$

Fließen unter zweiachsigen Spannungszuständen tritt somit ein, wenn

$$\sigma_1^2 + \sigma_2^2 - \sigma_1 \sigma_2 = R_e^2 \quad (4.25)$$

ist.

Die GEH geht davon aus, daß der Werkstoff zu fließen beginnt, wenn die unter einem beliebigen Spannungszustand gespeicherte Gestaltsänderungsenergie einen bestimmten werkstoffspezifischen Grenzwert erreicht, und zwar denselben, bei dem unter einachsiger Beanspruchung im Zugversuch das Fließen einsetzt.

Geometrisch läßt sich diese Fließbedingung für den drei- und zweiachsigen Fall gem. Gl. (4.23) und (4.24) wie folgt deuten: Für den dreiachsigen Spannungszustand beschreibt Gl. (4.23) im $(\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3)$ -Koordinatensystem einen Kreiszyylinder gem. Bild 4.3 mit dem Radius $R = \sqrt{2/3} R_e$ dessen Achse mit den Koordinatenachsen gleiche Winkel bildet (hydrostatische Achse $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3$). Alle Spannungszustände, die innerhalb des Zylinders liegen, werden elastisch aufgenommen; alle Spannungszustände, die auf dem Zylindermantel liegen, führen zum Fließen.

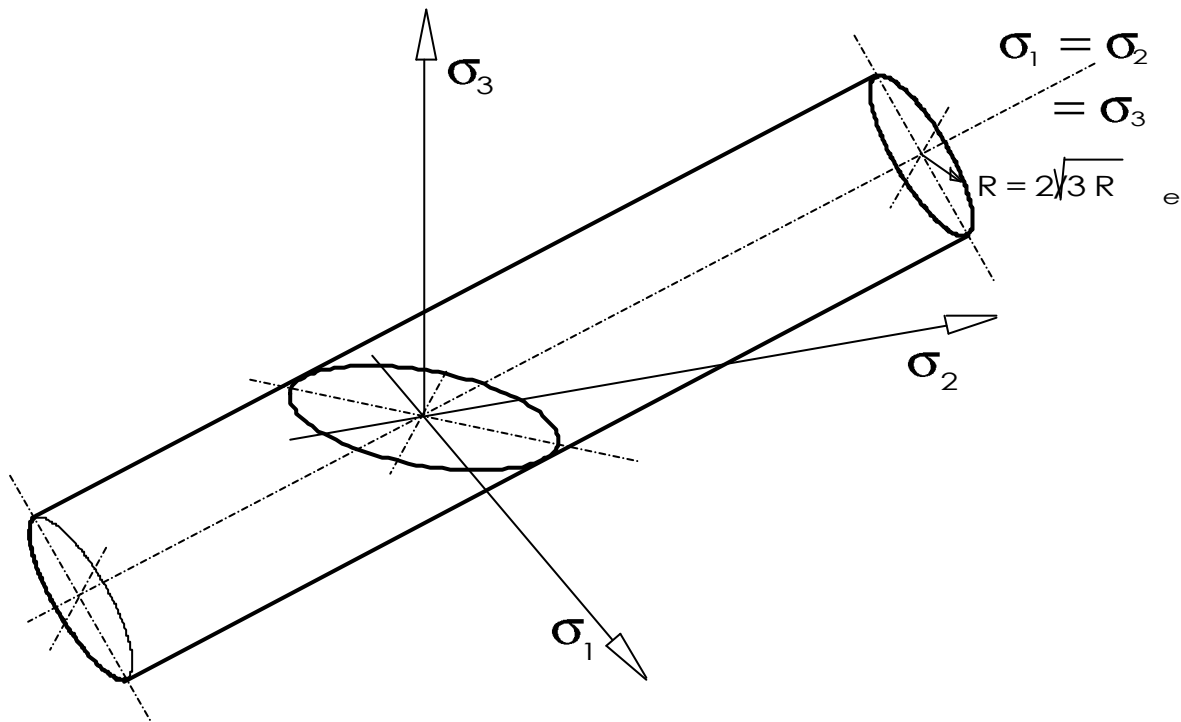


Bild 4.3: Fließgrenzfläche nach GEH im dreiachsigen Fall /4.11/

Im zweiachsigen Fall führt Gl. (4.24) im (σ_1, σ_2) -Diagramm auf eine Ellipse (diese ergibt sich auch als Schnittfigur aus Bild 4.3 in der (σ_1, σ_2) -Ebene) mit den jeweils unter 45° zur σ_1 - und σ_2 -Achse liegenden Halbachsen a und b , die bei Fließbeginn die Werte $a = \sqrt{2} R_e$ und $b = \sqrt{2/3} R_e$ annehmen (Bild 4.4).

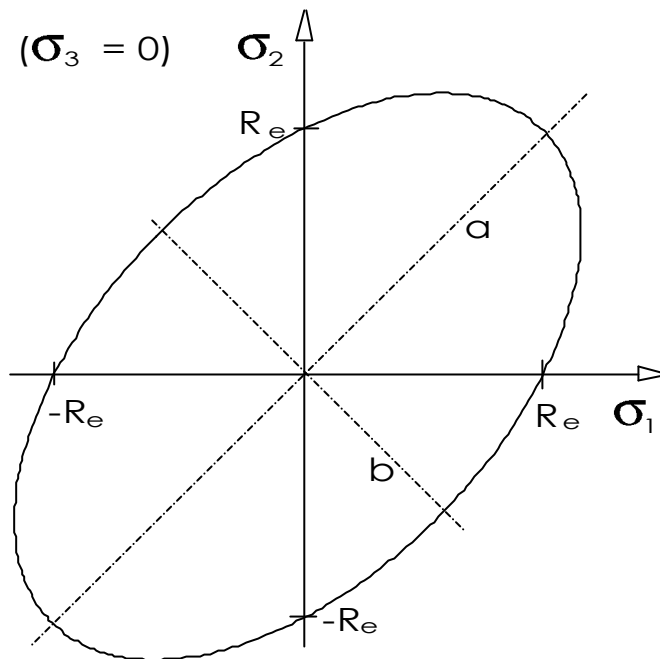


Bild 4.4: Fließgrenzkurve nach GEH im zweiachsigen Fall /4.11/

Spannungszustände außerhalb der Fließgrenzkurve gibt es bei idealplastischem Werkstoffverhalten nicht. Wird bei der Fließbedingung kinematische oder isotrope Verfestigung berücksichtigt, so ändert sich entsprechend Form und Lage der Fließgrenzkurve. Die Fließbedingung für den ebenen Spannungszustand nach Gl (4.24) lässt sich auch in Dehnungen ausdrücken. Analog zur Vergleichsspannung σ_v kann man eine Vergleichsdehnung ε_v definieren.

Für den Fließbeginn gilt dann $\varepsilon_v = \varepsilon_F$ mit $\varepsilon_F = R_e/E$.

Explizit ergibt sich für einen zweiachsigen Spannungszustand die Beziehung

$$\varepsilon_v = \frac{1}{1-\mu} \sqrt{(1-\mu+\mu^2)(\varepsilon_1^2 + \varepsilon_2^2) + (4\mu-1-\mu^2)\varepsilon_1\varepsilon_2} \quad (4.26)$$

oder mit $\mu=0,3$ (für den Fließbeginn) und leicht vereinfacht:

$$\varepsilon_1^2 + \varepsilon_2^2 + 0,125 \cdot \varepsilon_1\varepsilon_2 = \varepsilon_F^2 \quad (4.27)$$

Das ist ebenfalls eine Ellipse mit den Halbachsen unter 45° zur σ_1 - bzw. σ_2 -Achse. Dehnungsanteile die innerhalb dieser „Dehnungsellipse“ liegen sind elastische Dehnungen, Anteile außerhalb dieser Grenzlinie sind überelastische Dehnungen.

Durch diese Darstellung ist es möglich die elastischen, überelastischen und bleibenden Dehnungsanteile anschaulich zu bestimmen.

Des Weiteren kann aus dieser Darstellung abgelesen werden, ob der zugrunde liegende Spannungszustand ein- oder zweiachsig ist. Einachsige Spannungszustände bleiben auf der Geraden $\varepsilon_2 = -\mu\varepsilon_1$. Alle Spannungszustände, deren Dehnungswertepaare nicht auf dieser Geraden liegen, sind zweiachsig.

4.3.4. Methode zur Ermittlung der Eigendehnungen aus Verformungsmessung

In Kapitel 6.4.3 werden die aus den Versuchsergebnissen ermittelten Dehnungszustände in das Diagramm mit der Dehnungsellipse gem Gl. (4.27) eingetragen, um so den Eigendehnungszustand $(\varepsilon_{1e}, \varepsilon_{2e})$ zu erhalten. Dieses Vorgehen bietet eine Möglichkeit zur Ergebniskontrolle. Die konstruierten Eigendehnungswerte können mit den aus den Versuchsergebnissen ermittelten Eigendehnungswerten verglichen werden.

In Bild 4.5 ist diese normierte Fließgrenzkurve in der $(\varepsilon_1, \varepsilon_2)$ -Ebene eingezeichnet. Es sind die Dehnungszustände bei Belastungsversuchen des gelochten Zugstabes an einem diskreten Ort mit einem zweiachsigen Spannungszustand (Element 353 des Modells in Bild 6.25) eingetragen:

- Elastische Laststufen: P_1, P_2, P_3
- Überelastische Laststufe P_4
- Nach Entlastung, Laststufe P_6

Fließen tritt ein, sobald, die Fließgrenzkurve im Punkt P_{F1} erreicht wird, dabei ändert die Querkontraktionszahl ihren Betrag. Dies deutet sich in Bild 4.5 durch die veränderte Steigung der Strecke $P_{F1}P_4$ an. Der elastische Entlastungsvorgang führt zurück zum Dehnungszustand P_6 und die Strecke P_4P_6 ist daher parallel zur Strecke $0P_{F1}$.

Durch den Fließvorgang hat sich das Dehnungsverhältnis $\varepsilon_2/\varepsilon_1$ entsprechend dem Zustand P_4 verändert. Für die Konstruktion des Eigendehnungszustandes P_E ist diese Änderung auf der Fließgrenzkurve zu beachten. Die elastischen Rückverformungen gehen daher von diesem Punkt P_{F2} aus.

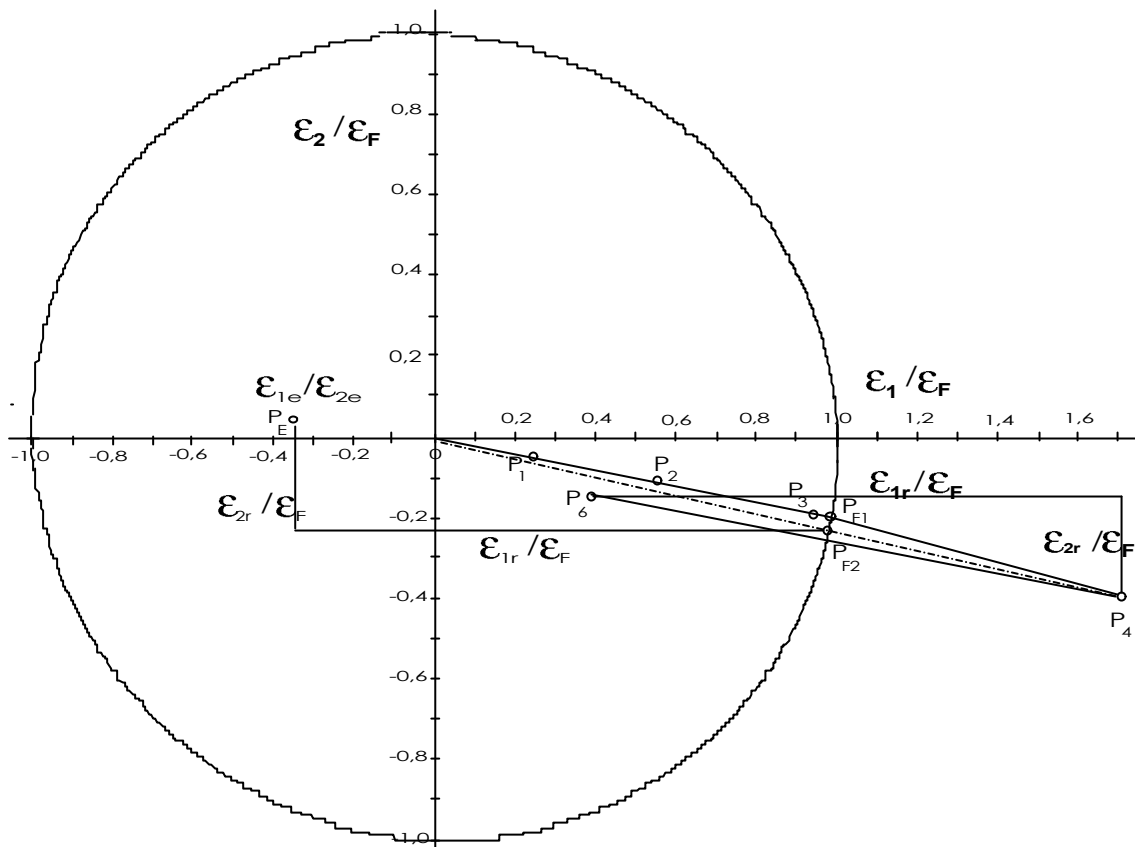


Bild 4.5: Konstruktion des Eigendehnungszustandes in der $(\varepsilon_1, \varepsilon_2)$ -Ebene.

4.3.5. Umsetzung des Fließkriteriums im FE-Programm

Die für die Simulation im FE-Programm bereits implementierten Fließkriterien sind für nichtlineare und somit für eine iterative Berechnung von Dehnungen und Spannungen ausgelegt. Im vorliegenden Anwendungsfall liegen die Gesamtdehnungen bereits vor, sie müssen somit nicht iterativ bestimmt werden. Zur Umsetzung des Fließkriteriums wird daher das FE-Programm um ein Modul zur Berechnung der Fließanteile und Spannungszustände bei überelastischer Beanspruchung aus gemessenen Verformungswerten erweitert /4.12/.

Hierbei wird das Fließkriterium nach von Mises angewendet, die überelastische Dehnunganteile werden nach dem in /1.9/ verwendeten Ansatz ermittelt, der darauf beruht, daß der Vektor des plastischen Dehnungszinkrements orthogonal zur Fließgrenzfläche liegt.

5. REALISIERUNG

5.1. Überblick

Ausgehend von den in den vorherigen Abschnitten dargestellten Anforderungen und Grundlagen wird nun die Realisierung des Verfahrens zur Eigenspannungsermittlung vorgestellt. Hierfür wird zunächst der Aufbau des Elektronischen Speckle-Pattern-Interferometers erläutert, bevor auf Anforderungen an die Belastungsvorrichtung und die Scheibe mit Kreisloch eingegangen wird. Die Pre- und Postprozessoren, das FE-Programm, sowie die realisierten Schnittstellenprogramme werden nachfolgend beschrieben. Anschließend wird das Verfahren zur Spannungsermittlung exemplarisch vorgestellt. Auf die Eigenspannungsermittlung wird im nachfolgenden Kapitel „Versuchsergebnisse“ eingegangen.

5.2. Aufbau des Elektronischen Speckle-Pattern-Interferometers (ESPI)

Der Aufbau für das ESPI besteht aus einer vierarmigen Anordnung, dem optischen Aufbau und dem Bildverarbeitungssystem mit der zugehörigen Software zur Steuerung der Messung und zur rechnergestützten Auswertung. Mit diesem Aufbau können sowohl zweidimensionale als auch dreidimensionale Verformungsmessungen durchgeführt werden.

Für die ebene Verformungsmessung werden für die beiden Verformungsrichtungen je zwei Beleuchtungsrichtungen (längs und quer), also 4 Beleuchtungsarme benötigt. Bild 5.1 zeigt den vierarmigen Aufbau aus Aluminiumprofilen, auf dem die optischen Komponenten wie z.B. Umlenkspiegel und Aufweitungslinsen befestigt sind.

Da die Eigenspannungsermittlung am Beispiel der Scheibe mit Kreisloch durchgeführt wird, ist eine ebene Verformungsmessung ausreichend. Die im Rahmen dieser Arbeit vorgestellten Versuchsergebnisse wurden mit dem vierarmigen in-plane-Interferometer aufgenommen.



Bild 5.1: Frontansicht des vierarmigen Aufbaus

Die wesentlichen Bestandteile des hier eingesetzten optischen Aufbaus sind der Argon-Laser ($P = 3 \text{ W}$, $\lambda = 514 \text{ nm}$), Umlenkspiegel, Galvo-Scanner, Strahlteilerwürfel, Phasenschiebeeinheit mit zwei Piezospiegeln, Aufweitungslinsen und Kugelspiegel /4.13/. **Bild 5.2** gibt einen schematischen Überblick über den gesamten ESPI Aufbau. Der umgelenkte Laserstrahl trifft zunächst den auf einen Galvo-Scanner montierten Spiegel. Somit können nacheinander beide Beleuchtungsstrahlengänge für die Verformungsmessung in Längs- und in Querrichtung der Zugprobe exakt, rechnergesteuert und reproduzierbar geführt werden. Nachfolgend wird der Strahl über einen Strahlteiler in zwei Beleuchtungsstrahlen für eine Empfindlichkeitsrichtung aufgeteilt.

weitungslinsen auf Kugelspiegel zur Beleuchtung des Objekts geleitet. Durch Nuten in den Profilarmen können die Kugelspiegel und Aufweitungslinsen verschoben und die gewünschte Empfindlichkeit je nach Bauteilgröße über die Beleuchtungswinkel eingestellt werden.

Die eingesetzte CCD-Kamera hat eine Auflösung von 756x581 Pixeln und eine Sensorelementgröße von 11x11 μm^2 . Über eine Abbildungslinse und mit einer einstellbaren Blende wird das Objekt aufgenommen. Mit der Blende kann der mittlere Speckledurchmesser eingestellt werden. Der Speckledurchmesser sollte etwa der Sensorelementgröße der CCD-Kamera entsprechen. Dem wurde durch eine entsprechende Dimensionierung Rechnung getragen.

Durch das Bildverarbeitungssystem und die zugehörige Software kann die Aufnahme gesteuert und die rechnergestützte Interferogrammauswertung erfolgen.

Eine wichtige technische Voraussetzung für die rechnerische Verarbeitung von Interferogrammen ist die Digitalisierung von Kamerabildern. Im PC-Bereich wird diese Aufgabe von speziellen Bildverarbeitungs-Einsteckkarten übernommen, die das Videosignal über einen Analog-Digital-Wandler in einem schnellen Bildspeicher schreiben. Der Speicherbereich ist mit 512x512 oder 1024x1024 Pixeln mit 8 Bit oder 16 Bit Farbtiefe (Graustufen) organisiert und bietet meist Platz für 4 bis 16 solcher „Frame Buffer“. Eigene, spezialisierte Mikroprozessoren auf den Bildverarbeitungskarten übernehmen zumindest grundlegende arithmetische und logische Operationen zwischen den Bildspeichern, was wegen der großen Anzahl von Pixeln pro Bild den eigentlichen PC-Prozessor wesentlich entlastet. Programme zur Interferogrammaufnahme und zur Auswertung sollten z.B. über folgende Funktionalitäten verfügen: Ein- und Auslesen von Bildern, dem Phaseschiebealgorithmus mit der Ansteuerung der Piezospiegel, Maskierung, Zeichenfunktionen, Filterung, Demodulation, Skalierung, Ansteuerung des Galvo-Scanners und Echtzeitdarstellung von Differenzen zweier Videobilder /2.8/.

Ein industriell verfügbares Programmsystem mit all diesen Möglichkeiten ist „FRAMES“ (Fringe Analysis and Measuring System /4.6/). Dieses Programmsystem auf einem PC und Bildverarbeitungskarten der Firma Data Translation mit einer Auflösung von 512x512 Pixel bei 8 Bit Farbtiefe wird hier eingesetzt.

Das ESPI sowie die Belastungsvorrichtung sind auf einem schwingungsgedämpften Tisch aufgebaut. Eine Relativbewegung zwischen Kamera und Objekt ist weitgehend ausgeschlossen, da beide durch den starren Aufbau miteinander gekoppelt sind.

5.3. Belastungsvorrichtung und Zugprobe

Bei der Anwendung der Specklemeßtechnik ist der Meßbereich durch Specklegröße, optischen Aufbau und Sensorelementgröße charakterisiert und begrenzt. Um sowohl die Anforderung an die hohe Auflösung im Kerbgrund zu erzielen als auch die übersichtliche Darstellung in der weiteren Umgebung zu erhalten, wurde die Belastungsvorrichtung so konzipiert, daß der zu beobachtende Bereich möglichst im Zentrum bleibt und eine geringe Ganzkörperverschiebung erfährt. Dem wird, wie in Bild 5.3 gezeigt, durch eine symmetrische Verformung Rechnung getragen.

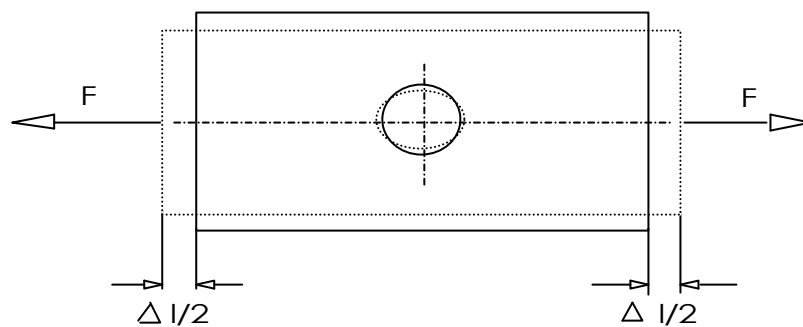


Bild 5.3: Lastaufbringung durch eine symmetrische Verformung

In einem C-förmigen Bügel mit langen rechteckigen Armen werden Zugprobe und Belastungsspindel so eingespannt, daß die Einspannebenen in Zugrichtung möglichst gut geführt bleiben. Bei der Lastaufbringung soll der Weg und nicht die Kraft gesteuert sein, da im Kraft-Verlängerungsdiagramm, gerade bei Fließvorgängen, sonst keine definierten Wege vorgebar sind. Die Wegvorgabe muß für eine Verformung reproduzierbar und fein dosierbar sein. Dies wird durch eine Belastungsspindel mit zwei geringfügig verschiedenen Ganghöhen erreicht. In Bild 5.4 ist die Belastungsvorrichtung mit der Zugprobe dargestellt.

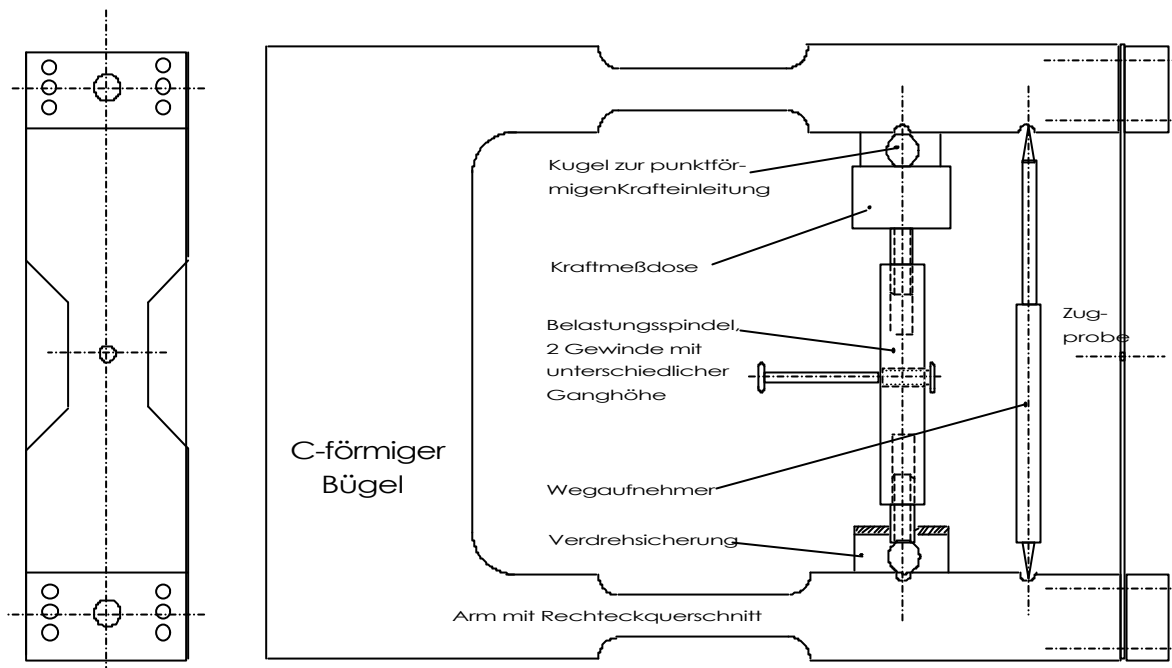


Bild 5.4: Belastungsvorrichtung mit Zugprobe, Belastungsspindel, Kraftmeßdose und Wegaufnehmer

Um ein Kraft-Verlängerungsdiagramm aufnehmen zu können, wird die Spindelkraft und der Weg in der Ebene des Wegaufnehmers gemessen und mit einem Plotter während der Lastaufbringung kontinuierlich aufgezeichnet. Dies hat den Vorteil, daß zum einen Wege gezielt reproduzierbar angefahren werden können und zum anderen der Fließbeginn bei Belastung durch Abweichung von der Hooke'schen Geraden erkannt wird. Wegen der Kürze des Einspannwegs und möglichst guter Führung der Probeneinspannebene ist die Kraftmeßdose nicht in Probenachse sondern versetzt in der Belastungsspindelachse eingebaut. Im Kraft-Verlängerungsdiagramm ist daher die Spindelkraft und nicht die Zugkraft der Probe dargestellt.

Bereits bei der Einspannung der Zugprobe ist darauf zu achten, daß möglichst keine Vor- oder Biegespannungen (out-of-plane Verformungen) auftreten, um die Überlagerung von Biegespannungszuständen möglichst gering zu halten und unnötige Specklewanderwege zu vermeiden, die den Streifenkontrast verschlechtern.

5.4. Pre- und Postprozessoren, FE-Programm sowie realisierte Schnittstellen

Ein FE-Programm besteht im allgemeinen aus drei Modulen:

1. Dem Preprozessor für die Generierung eines FE-Netzes, zur Festlegung der Materialkennwerte und zur Vorgabe von Belastungs- und Randbedingungen.

2. Dem Rechenmodul, dem eigentlichen FE-Programm, das basierend auf dem vorgegebenen Modell und den vorgegebenen Randbedingungen, die erwünschte Berechnung durchführt.
3. Dem Postprozessor, der die Ergebnisse des Rechenlaufs graphisch aufbereitet und in entsprechender Form darstellt.

Wie in Kapitel 3.3 beschrieben, werden folgende Schritte zur Spannungsermittlung realisiert:

1. Geometrische Erfassung der Bauteiloberfläche
2. Punktereduktion und Oberflächenbeschreibung im geeigneten Format
3. Einlesen der Geometrie in das FE-Programm und Generierung eines FE-Netzes
4. Verformungsmessung
5. Zuordnung der gemittelten Verformungswerte zu den entsprechenden Elementeknoten
6. Einlesen der Verformungen und Spannungsberechnung basierend auf Meßdaten
7. Auswertung der Ergebnisse durch Postprozessing

Zur Umsetzung dieses Verfahrens wurden Schnittstellenprogramme zwischen der Auswertesoftware des Bildverarbeitungssystems (FRAMES /4.6/) und dem Preprozessor (SAMCEF /4.14/) sowie dem FE-Programm (TP2000 /4.15/) realisiert. (Programmiersprache: C, Betriebssystem: MS-DOS, Rechner: PC Pentium 66MHz) Zur Ergebnisdarstellung wurde der Postprozessor ELIAS /4.16/ eingesetzt.

5.4.1. Preprozessing

Der Unterschied zur üblichen Modellgenerierung in der FE-Methode liegt bei diesem Verfahren darin, daß die Geometrie des realen Objekts meßtechnisch erfaßt wird. Da die zur Netzgenerierung eingesetzten Mesher kein FE-Netz basierend auf einer Punktwolke generieren, ist es notwendig, die große Anzahl an Punkten aus dem Meßdatensatz zu reduzieren. Hierfür wird die Kontur basierend auf dem Meßdatensatz erfaßt und in standardisierter Form dem Preprozessor übergeben. Das entsprechende Schnittstellenprogramm wurde realisiert. Materialkennwerte wie der Elastizitätsmodul, die Querkontraktionszahl, Materialdicke, Streckgrenze sowie die Festigkeitshypothese können optional vor Beginn des Rechenlaufs vorgegeben werden. Mit Hilfe eines automatischen Meshers wird ein geeignetes FE-Netz generiert.

5.4.2. Rechenlauf

FE-Programme sind nicht für die Verarbeitung von Meßdaten ausgelegt. Somit wird das hier eingesetzte FE-Programm TP2000 um ein Modul „Spannungsberechnung aus Meßdaten“ erweitert und eine entsprechende Schnittstelle spezifiziert. Ein realisiertes Schnittstellenprogramm erfaßt die Knotenkoordinaten des mit dem Preprozessor generierten FE-Modells und die Meßdaten der ESPI-Verformungsmessung in der Knotenumgebung. Der Radius, in dem nach Verformungswerten gesucht und über die gemittelt wird, kann frei gewählt werden. Die den Elementeknoten zugeordneten Verformungswerte werden über die spezifizierte Schnittstelle in das FE-Programm eingelesen und der Rechenlauf wird gestartet. Sowohl elastische als auch überelastische Spannungsberechnungen sind möglich. Um den Eigenspannungszustand berechnen zu können, werden die berechneten Dehnungsfelder, der plastische Dehnungsanteil bei Höchstlast und die bleibenden Dehnungen, subtrahiert. Hierfür wurde das FE-Programm TP2000 entsprechend erweitert. Es bietet die Möglichkeit, Dehnungsfelder verschiedener Lastschritte zu überlagern und plastische Dehnungsanteile gesondert zu speichern.

5.4.3. Postprozessing

Das Ergebnis des Rechenlaufs entspricht der standardisierten Form des FE-Programms TP2000 und kann somit vom Postprozessor ELIAS eingelesen und aufbereitet werden. Bild 5.6 zeigt im Überblick die Verknüpfung der bei dem Verfahren eingesetzten Werkzeuge.

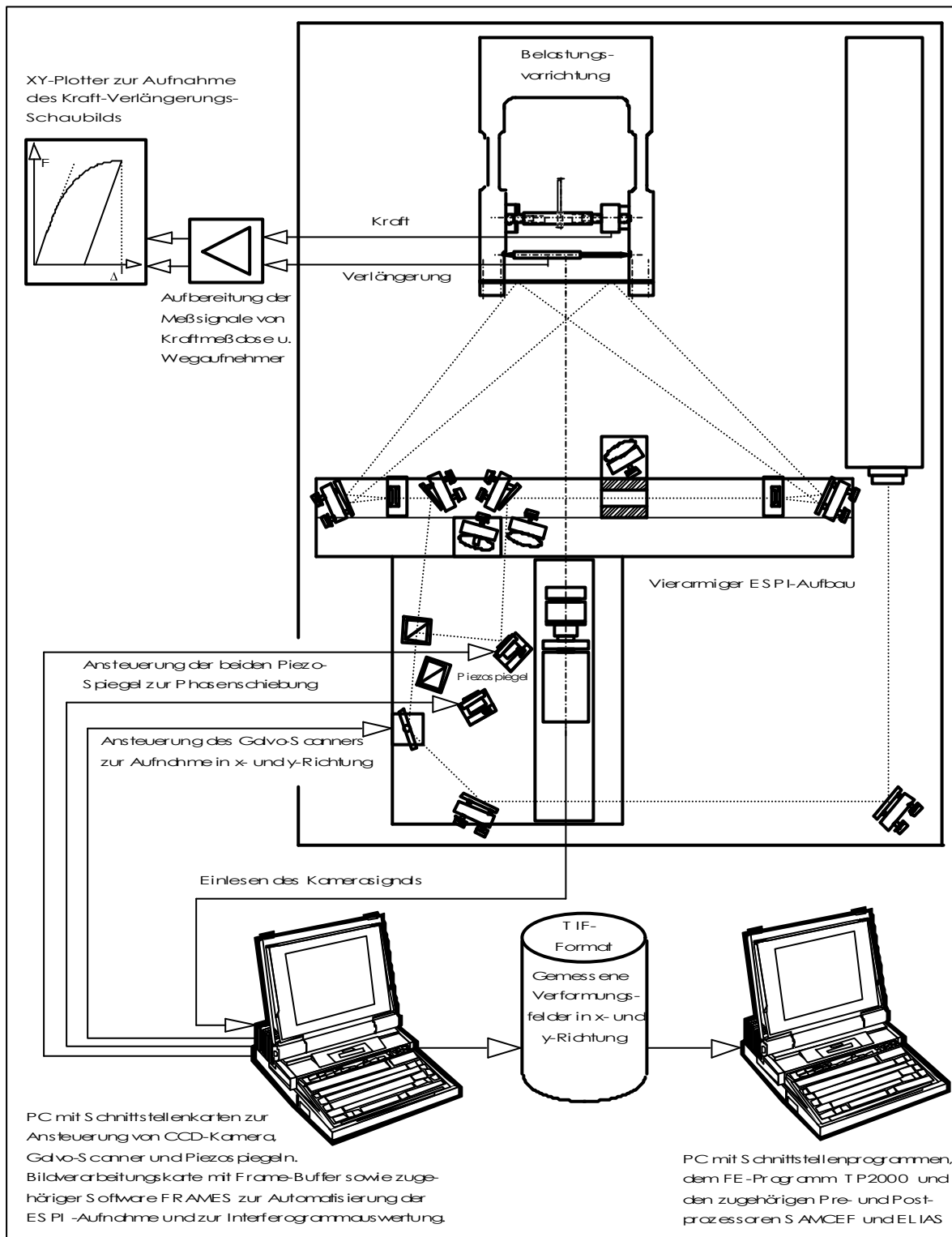


Bild 5.6: Zusammenfassende Darstellung der bei diesem Verfahren eingesetzten Werkzeuge

5.5. Exemplarische Beschreibung der Spannungsermittlung

Beim ESPI gibt es eine Vielzahl von beachtenswerten Einflußgrößen, die die Qualität der Interferogramme beeinflussen. Die wichtigsten sollen nachfolgend erwähnt werden, bevor die Schritte zur Spannungsermittlung vorgestellt werden.

5.5.1. Vorbereitung zur Messung

Die Probe wird möglichst spannungsfrei in die Belastungsvorrichtung eingebaut, um ungewollte Verformungen und somit unnötige Specklewanderwege, die den Streifenkontrast mindern, zu vermeiden. Der optische Aufbau wird justiert, hierbei wird der aufzunehmende Bereich von beiden Beleuchtungsstrahlen einer Empfindlichkeitsrichtung möglichst gleichmäßig ausgeleuchtet.

Die Intensität des Summensignals und die Empfindlichkeit der CCD-Kamera muß so eingestellt werden, daß die Kamera knapp unter der Sättigungsgrenze arbeitet. Wird die Kamera übersteuert, führt dies zu Fehlinformationen. Bei zu geringer Aussteuerung ist nicht der gesamte Grauwertebereich der Kamera (hier 255 Grauwerte) genutzt und der Quantisierungsfehler wird unnötig größer.

Die Specklegröße, einstellbar durch den Blendendurchmesser, sollte etwa in der Größenordnung der CCD-Sensorelementgröße liegen. Die Abbildung des Objektes auf dem Wiedergabemonitor wird scharf gestellt. Um eine konstante Ausgangsleistung des Lasers zu gewährleisten, muß er vor Beginn der Interferogrammaufnahme hinreichend lang betrieben werden.

5.5.2. Verformungsmessung

Aufgrund des endlichen Auflösungsvermögens der Videokamera können nur Specklekorrelationsstreifen mit einem gewissen Mindestabstand von der Kamera aufgelöst werden. Dieser Mindestabstand hängt vom Sensorelementabstand der Kamera und der Specklegröße ab. Ist die Verformung eines Lastschrittes zu groß, führt diese zu einer zu hohen, nicht mehr auflösbaren Streifendichte. Um diesem Problem zu begegnen, kann der Meßbereich durch Messung der Phasenbilder in mehreren Lastschritten vergrößert werden. Die aus den Phasenbildern ermittelten Verformungsfelder werden dann nach der Demodulation aufaddiert. Durch die Speicherung der Phasenbilder hat man auch die Möglichkeit, beliebige Verformungszustände durch Subtraktion von Phasenbildern entsprechender Lastschritte zu erfassen. So wird z.B. die direkte Messung der bleiben-

den Verformung durch Subtraktion des Phasenbildes vor der Belastung und des Phasenbildes nach Entlastung möglich. Bild 5.7 faßt die einzelnen Schritte bei der Verformungsmessung zusammen.

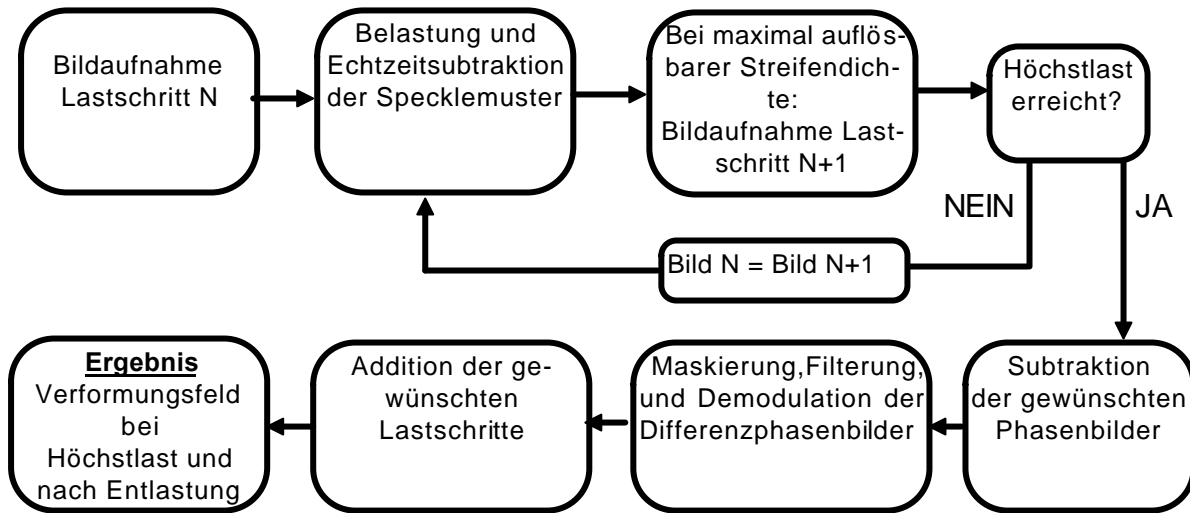


Bild 5.7: Schrittweise Messung der Verformung bei einzelnen Lastschritten

Die Verformungsmessung beginnt mit der Nullbildaufnahme in x- und y-Richtung (unbelasteter Zustand $N=0$). In Bild 5.8 ist das berechnete Phasenbild eines Specklemusters einer Empfindlichkeitsrichtung im unbelasteten Zustand in einem Ausschnitt am Kerbgrund dargestellt. Die Lage des Ausschnitts der Zugprobe ist Bild 6.1 zu entnehmen.

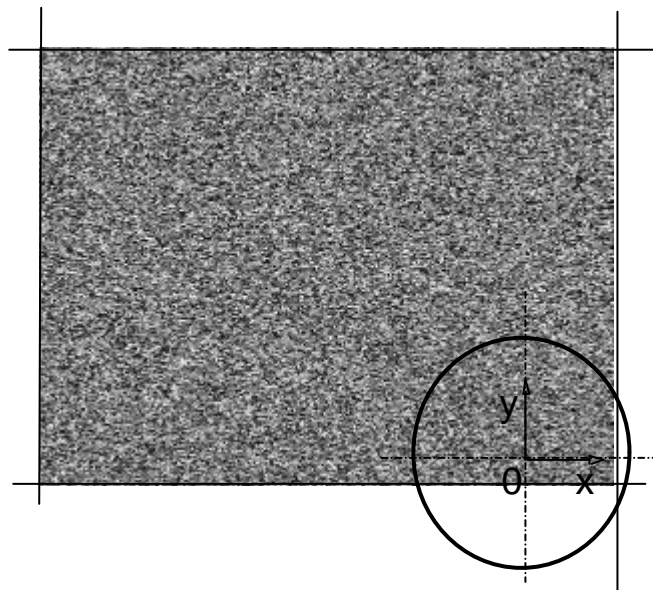


Bild 5.8: Nullbild Aufnahme - Specklemuster

Während der Belastung wird in Echtzeit vom Nullbild das neu entstandene Specklemuster subtrahiert. Die Specklekorrelationsstreifen sind am Wiedergabemonitor in Echtzeit sichtbar. Nachdem die Last aufgebracht wurde, wird das Phasenbild des Specklemusters im verformten Zustand berechnet ($N = 1$).

Bild 5.9 zeigt Streifenbilder, die durch Subtraktion der berechneten Phasenbilder aus den Specklemustern vor und nach einem Belastungsschritt entstanden sind. Die Streifen kennzeichnen Orte konstanter Verformung in Empfindlichkeitsrichtung x bzw. y .

Durch Vorgabe der Empfindlichkeit des Interferometers entsprechend Gl. (4.11), die durch den geometrischen Aufbau festgelegt ist und durch Festlegung eines Nullpunkts der Verformung lassen sich die beiden Differenzphasenbilder demodulieren.

Dabei ist gleichgültig, ob an diesem Ort tatsächlich die Verformung den Betrag Null aufweist, da zur Spannungsberechnung nur der Verformungsgradient relevant ist

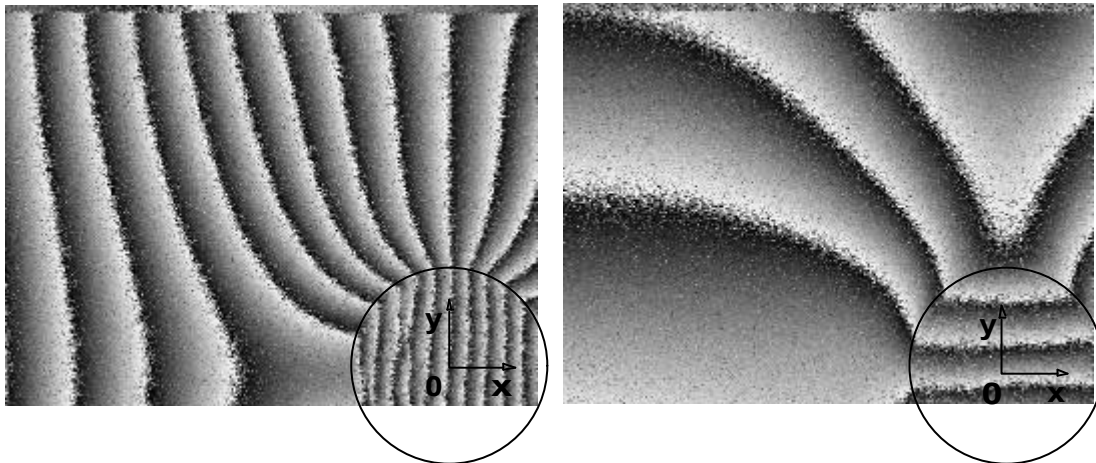


Bild 5.9: Ergebnis der Subtraktion der berechneten Phasenbilder von Specklemustern vor und nach Aufbringung der Last. Linien gleicher Verformung in x - bzw. y -Richtungen werden (links bzw. rechts) sichtbar

Das Ergebnis sind zwei demodulierte Bilder, die für jedes Pixel einen Grauwert mit einer Auflösung von 8 Bit im 512×512 Pixel Raster angeben. Des weiteren erhält man als Ergebnis die Skalierungswerte, die basierend auf der Empfindlichkeit und dem vorgegebenen Nullpunkt berechnet werden und eine Umrechnung der Bilder in dimensionsbehaftete Verformungsfelder ermöglichen. Bild 5.10 zeigt das demodulierte Bild basierend auf dem Interferogramm aus Bild 5.9.

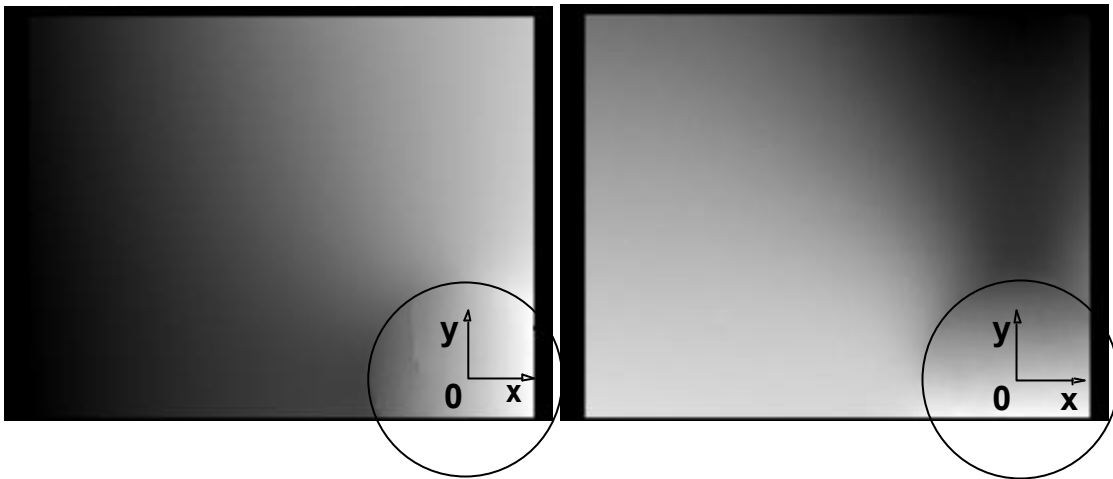


Bild 5.10: Demodulierte Bilder - Verformung in x- und y-Richtung

Vor der Demodulation wird das Differenzphasenbild maskiert und gefiltert. Die Filterung ist erforderlich, da bei dem Demodulationsalgorithmus Sprünge im Differenzphasenbild, bedingt durch Rauschen oder Reflexionen an spiegelnden Punkten, bei der nachfolgenden Spannungsberechnung zu fehlerhaften Spannungsspitzen führen können.

Durch die Maskierung vor der Demodulation kann der auszuwertende Bereich definiert werden. Neben den erwähnten Skalierungswerten für die Verformungswerte der demodulierten Bilder werden die geometrischen Skalierungswerte (mm/Pixel) ermittelt.

Wird die Last z.B. in drei Laststufen aufgebracht und dann die Probe entlastet, so werden die Phasenbilder der Lastzustände 0 (unverformt), 1 (erster Lastschritt), 2 (zweiter Lastschritt), 3 (bei Höchstlast) und 4 (nach Entlastung) gespeichert. Die Verformungsfelder in x- bzw. y-Richtung z.B. des ersten Lastschrittes entstehen aus der Differenz der Phasenbilder aus Lastschritt 1 (x_1 bzw. y_1) und Lastschritt 0 (x_0 bzw. y_0) nach Demodulation der Differenzphasenbilder (x_{10} bzw. y_{10}).

Die demodulierten Differenzphasenbildpaare (x_{10}, y_{10}); (x_{21}, y_{21}); (x_{32}, y_{32}) werden addiert zu (x_{30}, y_{30}) woraus das Verformungsfeld bei Höchstlast entsteht. Das bleibende Verformungsfeld wird direkt aus (x_{40}, y_{40}) berechnet.

5.5.3. Einlesen der Geometrie in das FE-Programm und Generierung eines FE-Netzes

Zur Generierung eines FE-Netzes wird die Geometrie, bzw. hier im 2D-Fall die Kontur unter Berücksichtigung der ermittelten Skalierungswerte in das FE-Programm eingelesen. Hierfür wird durch ein Schnittstellenprogramm, basierend auf den Meßdatensätzen,

die Kontur erfaßt und im geeigneten Format abgespeichert, sodaß die Geometrie in das FE-Programm eingelesen werden kann.

Durch Einsatz eines geeigneten FE-Meshers (z.B. dem Offsetmesher) wird unter Vorgabe der gewünschten Elementgröße das FE-Netz erstellt. Materialkennwerte (Elastizitätsmodul, Querkontraktionszahl) sowie Elementdicke und Bauteilfließkurve, die der Spannungsberechnung zugrunde liegen sollen, werden eingegeben. Bild 5.13 zeigt das generierte FE-Netz der Zugprobe.

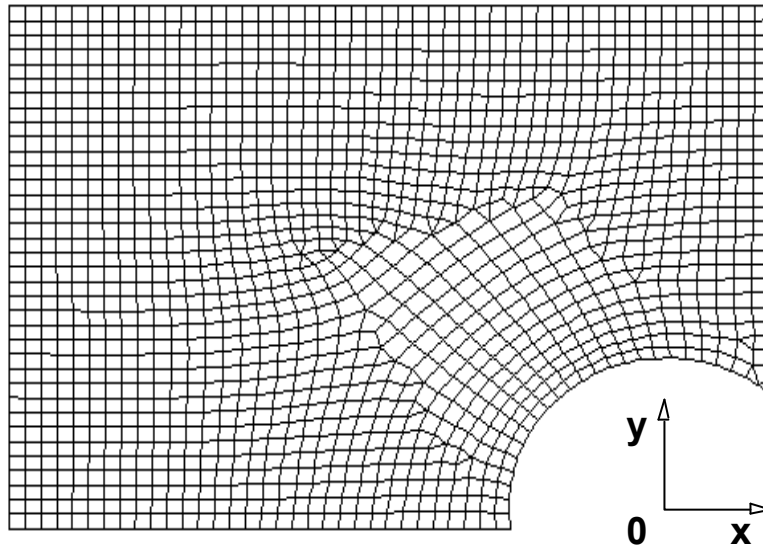


Bild 5.13: Das generierte FE- Netz, basierend auf dem eingelesenen Konturbild

5.5.4. Einlesen der Verformungen und Spannungsberechnung

Basierend auf den FE-Knotenpunkten, dem gemessenen Verformungsfeld und den ermittelten Skalierungswerten kann nun jedem FE-Knotenpunkt ein Verformungsvektor zugeordnet werden. Im allgemeinen entsprechen die Knotenkoordinaten nicht exakt den Koordinaten der verfügbaren Meßwerte. Für die Zuordnung wird somit in der Umgebung einer Knotenkoordinate in einem beliebig wählbaren Radius nach Verformungswerten gesucht. Die Elementgröße sollte daher so gewählt werden, daß die Dichte der Meßwerte deutlich höher ist, als die der Knotenpunkte. Somit kann in der Umgebung eines Knotenpunktes über mehrere Meßwerte gemittelt werden. Die Knotennummern und die zugehörigen gemittelten Verformungswerte werden in geeigneter Form abgespeichert und vom FE-Programm eingelesen.

Mit den eingelesenen Verformungswerten, dem FE-Netz und den eingegebenen Materialdaten erfolgt nun die Spannungsberechnung und gegebenenfalls die Ermittlung von Fließanteilen.

Bild 5.14 und Bild 5.15 zeigen wie die eingelesenen Verformungen vom Postprozessor ELIAS graphisch dargestellt werden. Neben der Falschfarbendarstellung und der Möglichkeit, die verformte und unverformte Struktur abzubilden, ist z.B. auch eine Verformungsanimation möglich. Bild 5.16 zeigt das berechnete Längsspannungsfeld σ_x bei Belastung in x-Richtung.

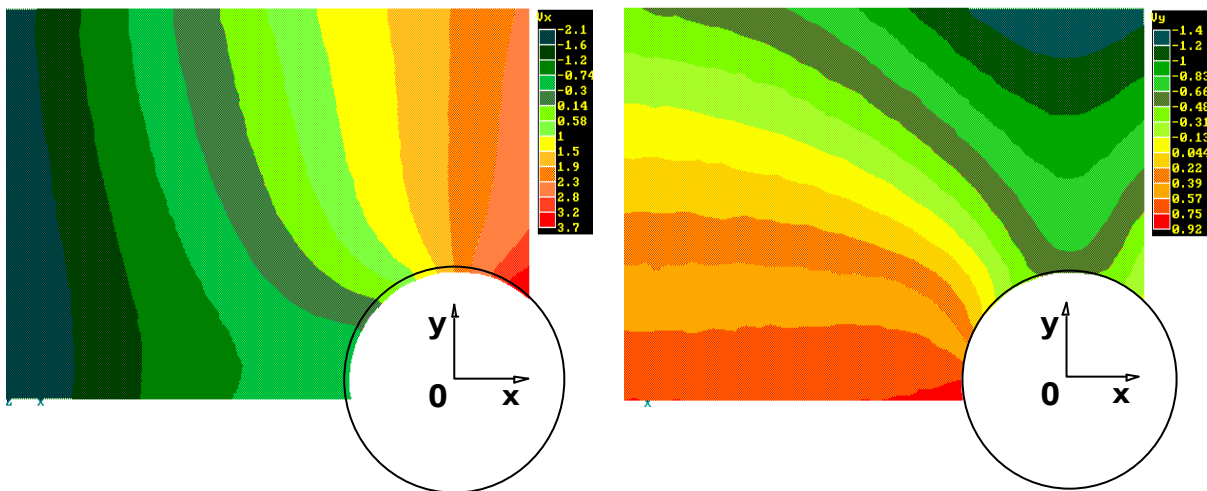


Bild 5.14: Falschfarbendarstellung der eingelesenen Verformungen (links Verformung in x- und rechts in y-Richtung)

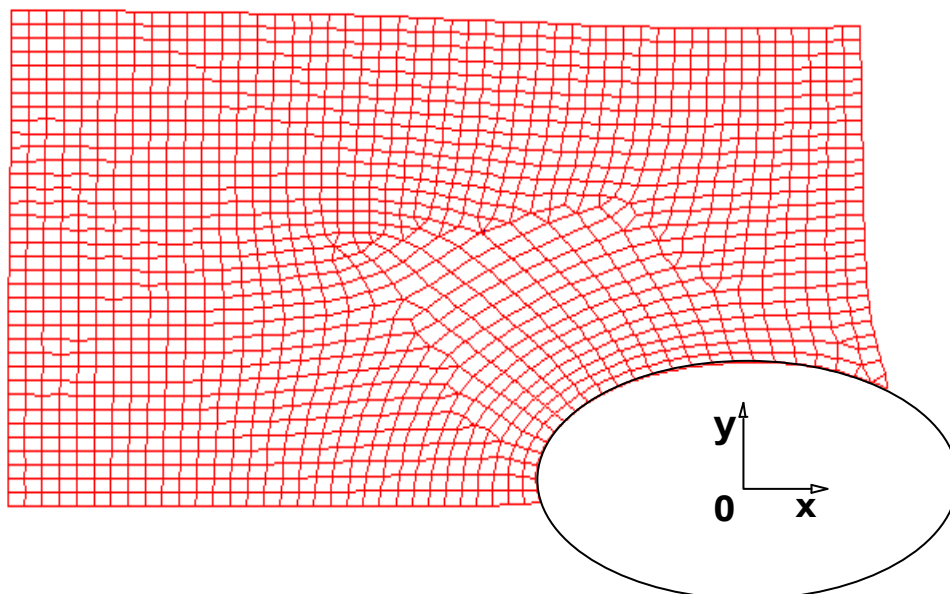


Bild 5.15: Überhöhte Darstellung der Verformung in der verformten Struktur

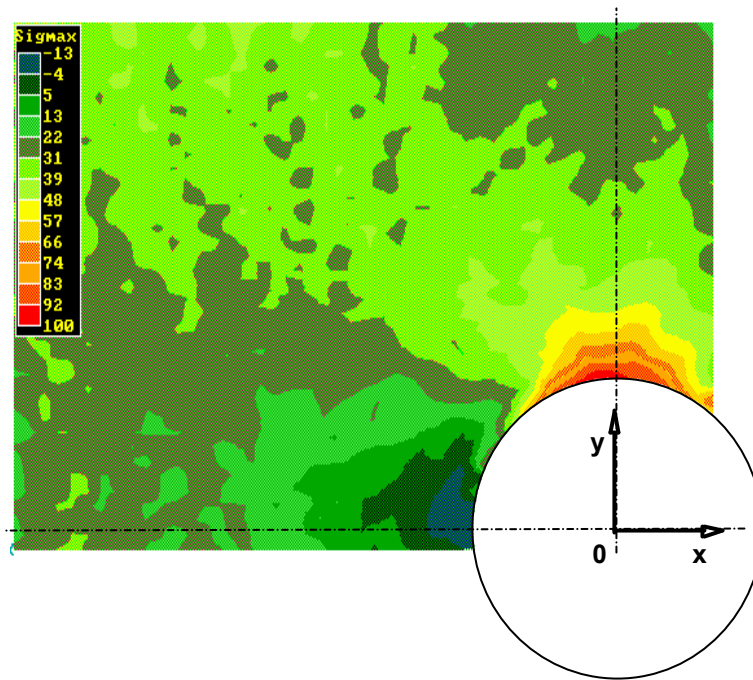


Bild 5.16: Verteilung der Längsspannung σ_x im elastischen Bereich

Das FE-Programm bietet die Möglichkeit, die Ergebnisse in den für die Festigkeitsberechnung relevanten Größen graphisch und numerisch darzustellen. Daß diese vielfältigen Darstellungsmöglichkeiten genutzt werden können, ist einer der wesentlichen Vorteile des entwickelten Verfahrens. Tabelle 5.1 gibt einen Überblick über darstellbare Größen.

Verformungen	Dehnungen	Spannungen
<ul style="list-style-type: none"> - skalierte Falschfarbendarstellung - Verformte Struktur - Bewegungsanimation am Bildschirm 	<ul style="list-style-type: none"> - Dehnungen in x- und y-Richtung: $\epsilon_x, \epsilon_y, \epsilon_{45}$ - Hauptdehnungen: ϵ_1, ϵ_2 	<ul style="list-style-type: none"> - Spannungen in x- und y-Richtung: $\sigma_x, \sigma_y, \tau_{xy}$ - Hauptspannungen: σ_1, σ_2

Tab 5.1: Darstellungsmöglichkeiten der Meßergebnisse im FE-Programm

6. VERSUCHSERGEBNISSE

6.1. Überblick

In den nachfolgenden Abschnitten werden die mit dem vorgestellten Verfahren ermittelten Versuchsergebnisse am Beispiel der Scheibe mit Kreisloch dargestellt. Bei den Zugversuchen an gelochten Stäben entstehen ebene Spannungs- und Eigenspannungszustände. Die zu erwartenden Verläufe sind bekannt und in Kapitel 3.3. dargestellt. Die Meßergebnisse werden in der standardisierten Form des eingesetzten FE-Postprozessors ELIAS dargestellt und können daher ideal mit den Ergebnissen aus der FE-Simulationsrechnung verglichen werden. Des weiteren werden die ermittelten Versuchsergebnisse mit elastizitätstheoretischen Überlegungen geprüft und interpretiert, wobei hierbei der Schwerpunkt auf die zweiachsige Eigenspannungsermittlung gesetzt wird.

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse einer Versuchsreihe gezeigt. Hierbei werden die Spannungszustände bei den einzelnen Lastschritten und der sich einstellende Eigenspannungszustand nach Entlastung abgebildet. In den Lastschritten, bei denen Fließen aufgetreten ist, wird darüberhinaus der gemessene Dehnungszustand dargestellt.

Die Versuchsergebnisse, die mit dem neuen Verfahren ermittelt wurden, werden als ESPI-Meßergebnisse bezeichnet. Zum Vergleich werden die Spannungszustände rechnerisch durch FE-Simulation ermittelt und den Meßergebnissen gegenübergestellt. Die Ergebnisse aus der Simulation werden nachfolgend als Simulationsergebnisse bezeichnet.

6.2. Einführung in die Ergebnisdarstellung

In diesem Abschnitt soll die Zugprobe und die gewählte Form der Ergebnisdarstellung vorgestellt werden.

6.2.1. Beschreibung der Zugprobe

Die Grundform der Probe ist in Bild 6.1 dargestellt. Die Belastung erfolgt in x-Richtung (Längsrichtung). Durch Schraffur gekennzeichnet ist das ESPI-Meßgebiet, sowie der betrachtete Ausschnitt des FE-Modells. Um einen besseren Vergleich zwischen Messung und Simulation zu ermöglichen, wird auch bei der Darstellung der Ergebnisse

jeweils nur der schraffierte Ausschnitt betrachtet, was auch aus Symmetriegründen ausreichend ist.

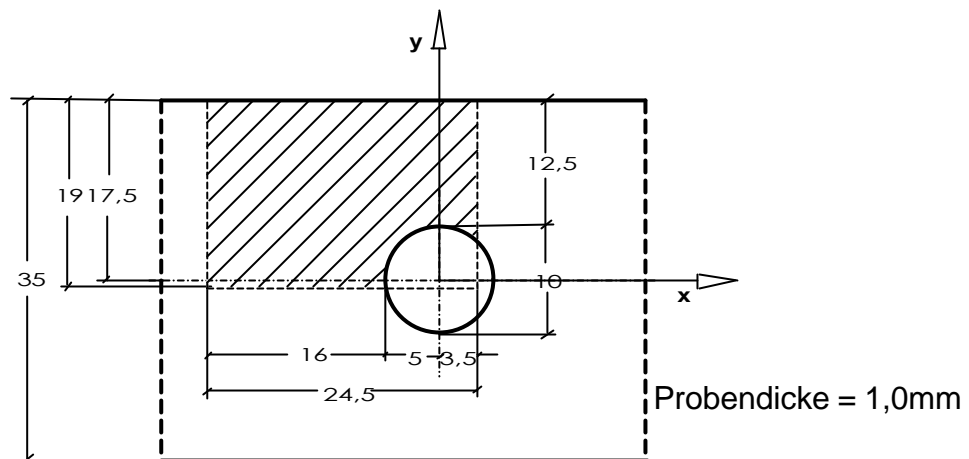


Bild 6.1: Form und Abmessungen der Zugprobe und Lage des untersuchten Ausschnitts

Die Probe besteht aus weichem Baustahl mit ausgeprägter Streckgrenze und den Werkstoffkennwerten:

$$R_e = 273 \text{ [N/mm}^2\text{]}$$

$$R_m = 386 \text{ [N/mm}^2\text{]}$$

$$E = 186\,000 \text{ [N/mm}^2\text{]}$$

$$A = 38 \text{ [%]}$$

Diese wurden im Zugversuch nach DIN 50114 ermittelt. Das aus dem Kraft-Verlängerungsschaubild entstandene Spannungs- Dehnungsdiagramm ist in [Bild 6.2](#) dargestellt.

Die Zugprobe wird in vier Schritten belastet und in zwei Schritten entlastet. Die zugehörige Kraft-Verlängerungs-Kurve ist in [Bild 6.3](#) dargestellt. Last bei Fließbeginn ist $F_F=2830\text{N}$. Die Höchstlast beträgt $F_{\max} = 5375\text{N}$.

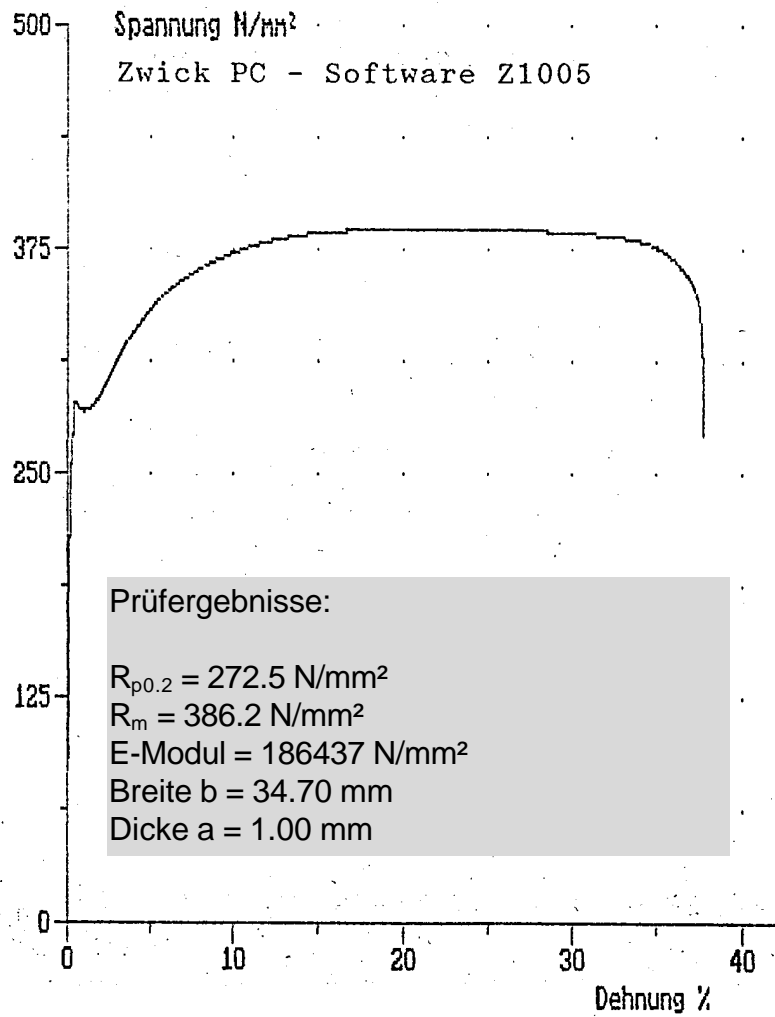


Bild 6.2: Zugversuch zur Ermittlung der Werkstoffkennwerte

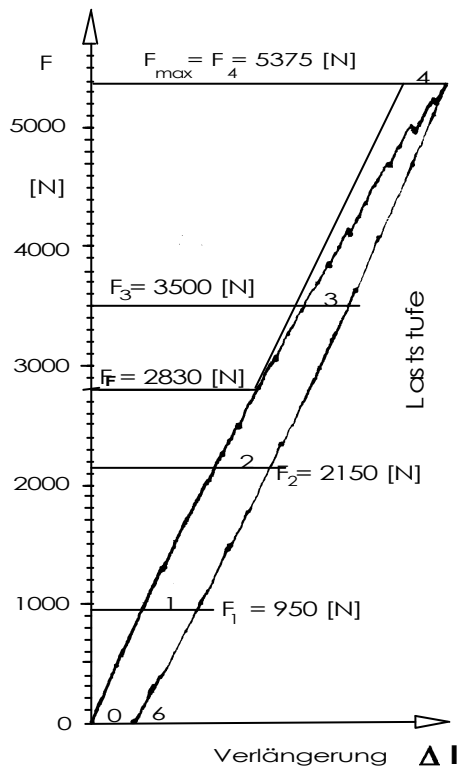


Bild 6.3: Die Kraft-Verlängerungs-Kurve mit den Laststufen 1 bis 6

6.2.2. FE-Modelle für ESPI-Messung und FE-Simulation

Damit die Versuchsergebnisse mit den Simulationsergebnissen verglichen werden können, werden die Messergebnisse ebenfalls auf ein FE-Modell abgebildet. Die daraus ermittelten Dehnungs- und Spannungsfelder entsprechen somit der standardisierten Form der FE-Simulation. Es sind daher zwei Modelle erforderlich

- Modell für die FE-Simulation mit Randbedingungen und Lasteinleitung (Bild 6.4a)
- Modell für die ESPI-Messung zum Einlesen von Verformungsmesswerten an Modellknotenpunkten (Bild 6.4b)

Das Modell für die FE-Simulation unterscheidet sich von jenem für die ESPI Messung, da zur Festlegung der Randbedingungen und Krafterleitungen ein größeres Modell erforderlich ist. Aus Symmetriegründen genügt es, eine Probenhälfte zu betrachten. Als Randbedingung sind daher die unteren Randknoten nur in x-Richtung beweglich. Die Knoten am rechten Modellrand werden in x-Richtung festgehalten. Auf die Knoten am linken Modellrand wird die Last aufgebracht.

In den nachfolgenden Kapiteln werden die Simulationsergebnisse nur in dem in Bild 6.4a durch die vertikalen Linien angedeuteten Ausschnitt dargestellt, da dieser etwa dem Bereich entspricht (siehe Bild 6.4b), in dem die Messergebnisse vorliegen.

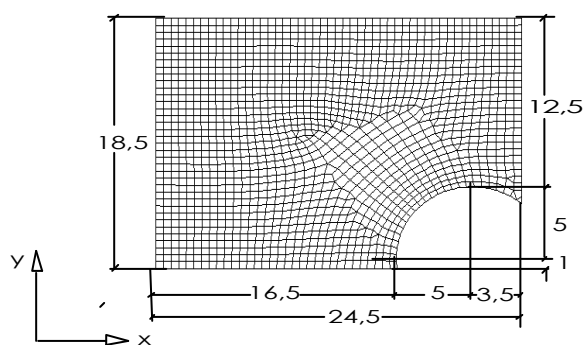
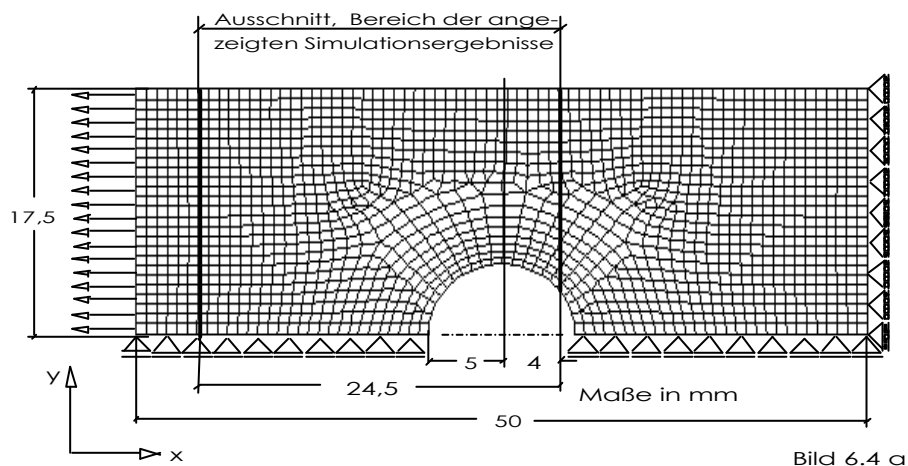


Bild 6.4: Modelle für FE-Simulation (Bild 6.4a) und für ESPI-Messung (Bild 6.4b)

6.2.3. Darstellungsform der Ergebnisse

Die Ergebnisse können pixelweise, im Verlauf oder flächenhaft dargestellt werden. Durch die hier verfügbare flächenhafte, vollständige Darstellungsform ist eine zuverlässige und leicht überprüfbare Interpretation der Ergebnisse möglich, da so Tendenzen oder Ausreißer erkannt werden können.

Eine Falschfarbendarstellung gibt, wie in Bild 6.5 am Beispiel einer ESPI-Messung gezeigt, einen Überblick über die flächenhafte Verteilung der Beträge der Spannungs-komponenten. Sie ist eine bedeutende Erweiterung zur Darstellung von Messergebnissen, gegenüber der gewohnten Darstellungsweise in Schnittebenen. Außerdem kann diese flächenhafte Information zur Darstellung von Spannungsverläufen entlang einer gewünschten Schnittlinie durch Mittelwertbildung in einem Flächenstück mit wählbaren Schrittweiten Δx und Δy verwendet werden. In Bild 6.5 sind die Schnittebenen A-A und B-B in Quer- und Längsrichtung dargestellt. Diese werden in den nachfolgenden Kapiteln zur Ergebnisdarstellung gewählt. Die Schnitt-ebene A-A in Querrichtung ergibt den Verlauf der Hauptspannungen durch den Ort maximaler Beanspruchung. Die Schnitt-ebene B-B in Längsrichtung ist so gewählt, daß sie durch den Ort maximaler Querspannung verläuft.

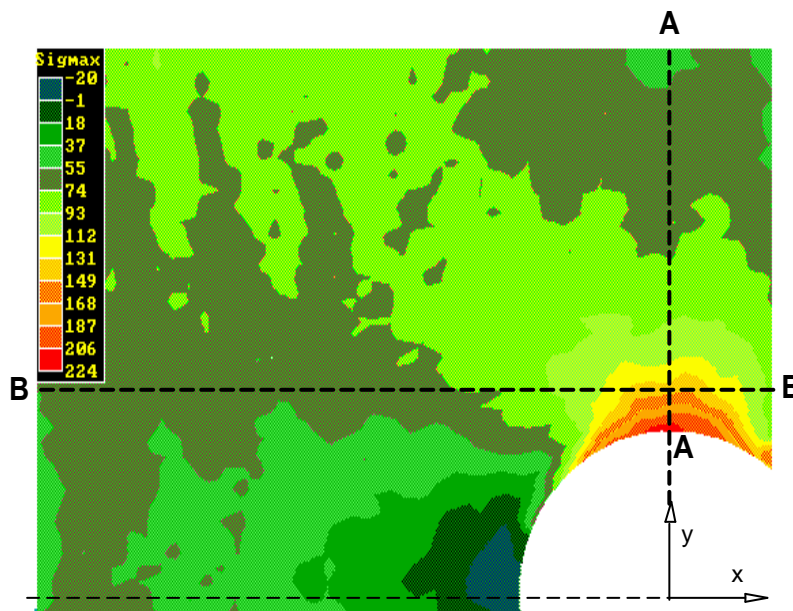


Bild 6.5: Gemessenes Längspannungsfeld σ_x im elastischen Bereich

Für die Eigenspannungsermittlung am Ort der höchsten Beanspruchung ist lediglich der Schnitt entlang der Strecke A-A von Bedeutung. Zur Kontrolle des flächenhaft ermittelten

Eigenspannungszustandes soll allerdings auch der Spannungsverlauf entlang der Geraden B-B herangezogen werden.

Durch die Specklemeßtechnik stehen Verformungsmeßwerte in Auflösung der Specklegröße bzw. der Pixelgröße der CCD-Kamera zur Verfügung. Daher können neben der flächenhaften Darstellung und der Spannungsverläufe auch an beliebig wählbaren Punkten der Bauteiloberfläche die Ergebnisgrößen (siehe Tab. 5.1) angegeben werden. Bei dem vorliegenden Versuchsaufbau stehen für jedes Ergebnisbild 250 000 Meßwerte zur Verfügung. Dadurch können an beliebig wählbaren Elementen die zugehörigen Last-Dehnungs-Kurven angegeben werden. Zur Ergebniskontrolle in Kapitel 6.4.3 sollen daher einachsig (am Probenrand) oder zweiachsig beanspruchte Elemente bei verschiedenen Laststufen ausgewählt und interpretiert werden.

6.2.4. Besondere Effekte am Kerbrand

Bei einer ESPI-Aufnahme am Ort der höchsten Beanspruchung ist die Streifendichte besonders groß und somit optisch schwierig auflösbar. Es entstehen am Kerbrand Unstetigkeiten, die zum einen durch die endliche Auflösung der Kamera und zum anderen bei der Filterung und Demodulation verursacht werden. Diese Unstetigkeiten können bei der Spannungsermittlung zu entsprechend fehlerhaften Spannungsverläufen führen. Der Randbereich ist aber die am höchsten beanspruchte Zone, wo auch die Eigenspannungen am größten sind.

Um diesem Problem zu begegnen, wird das Loch mit einer Silikonmasse ausgefüllt. Dadurch werden Unstetigkeiten am Lochrand vermieden, da die Specklekorrelationsstreifen nicht abrupt enden, sondern ungestört parallel weiterverlaufen. Dies ist in Bild 6.6 in zwei verschiedenen Differenzphasenbildern (links ohne Füllung, rechts mit Füllung im Loch) dargestellt.

Dennoch führen Effekte wie Specklerauschen und Quantisierungsfehler zu Inhomogenitäten und Unstetigkeiten, die sich auf die errechneten Dehnungs- und Spannungswerte, insbesondere sichtbar bei der flächenhaften Darstellung, bemerkbar machen.

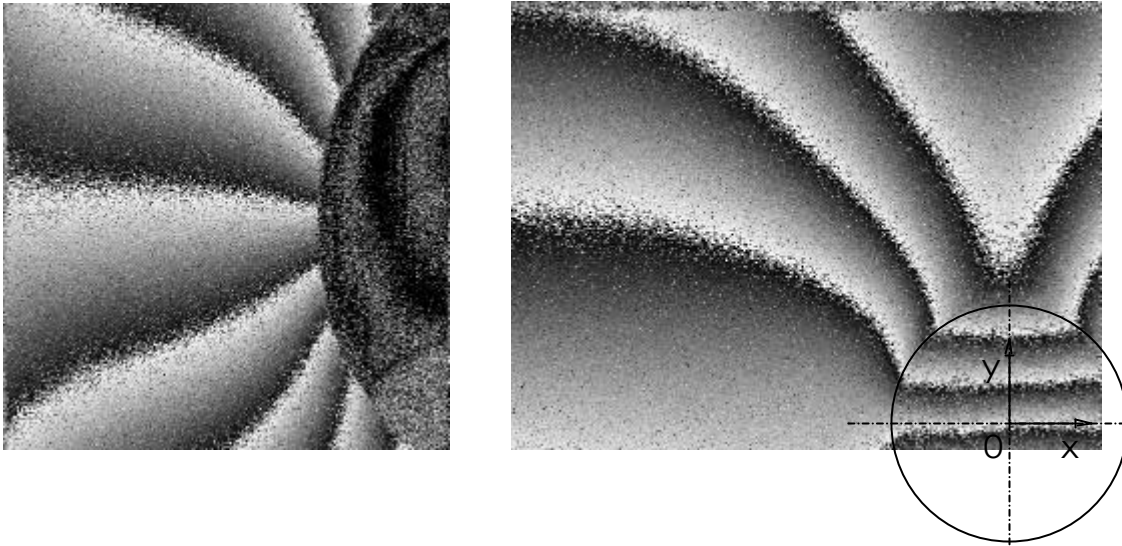


Bild 6.6: Differenzphasenbilder am Lochrand ohne Silikon-Füllung (links) und mit Füllung des Lochbereichs (rechts)

6.3. Darstellung und Diskussion der Versuchsergebnisse

6.3.1. Überblick

In diesem Abschnitt werden die Simulationsergebnisse den ESPI-Meßergebnissen flächenhaft und im Spannungsverlauf in den Schnitten A-A und B-B einander gegenübergestellt. Des weiteren werden die Ergebnisse mit elastizitätstheoretischen Überlegungen überprüft und interpretiert.

6.3.2. Flächenhafte Darstellung und Spannungsverläufe

Die Meß- und Simulationsergebnisse werden in den Bildern 6.8 bis 6.21 flächenhaft und in Form von Spannungsverläufen gegenübergestellt. Bild 6.7 zeigt im Überblick, wie die Messergebnisse ermittelt wurden.

Bei Laststufen mit elastischer oder überelastischer Beanspruchung beruhen die Meßergebnisse auf einer einzigen ESPI Verformungsmessung (Bild 6.9, 6.13 und 6.15). Die Meßergebnisse, die die Eigenspannungsverteilung in Bild 6.20 zeigen, beruhen dagegen auf zwei voneinander unabhängigen Verformungsmessungen bei Höchstlast (ESPI-Messung 1) und nach Entlastung (ESPI-Messung 2).

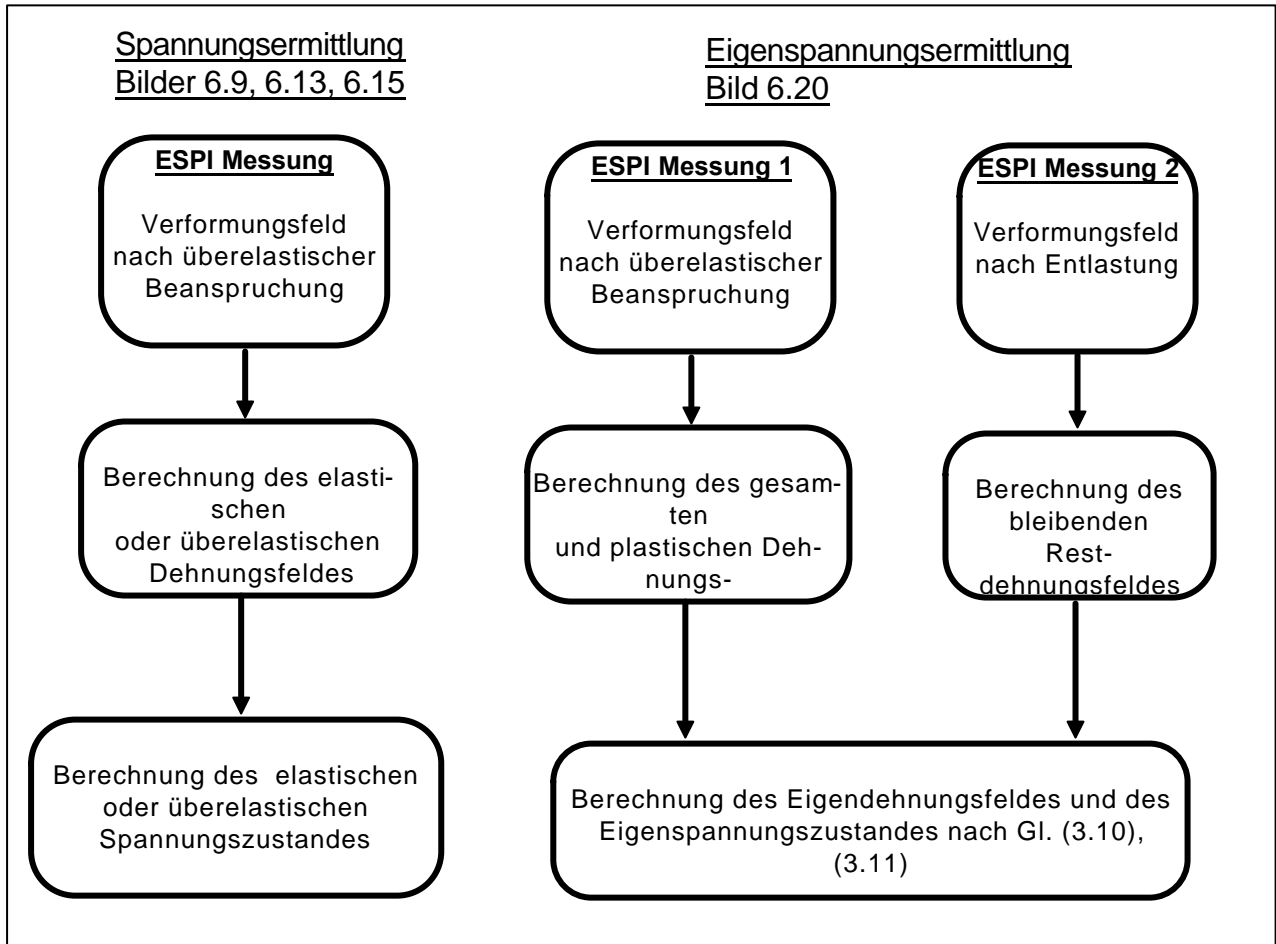


Bild 6.7: Schritte bei der Messung des Spannungs- und Eigenstresszustands

Tabelle 6.1 zeigt im Überblick die dargestellten Ergebnisbilder aus der nachfolgend dargestellten Versuchsreihe.

Bildnr.	Spannungs bzw. Dehnungszustand	beruhend auf	Meßgröße	Bemerkung
6.8	Elastisch (Laststufe 1)	Simulation	$\sigma_x \sigma_y \tau_{xy}$	Flächenhaft
6.9	Elastisch (Laststufe 1)	Messung	$\sigma_x \sigma_y \tau_{xy}$	Flächenhaft
6.10	Elastisch (Laststufe 1)	Messung + Simulation	$\sigma_x \sigma_y$	Spannungsverlauf
6.11	Elastisch (Laststufe 2)	Messung + Simulation	$\sigma_x \sigma_y$	Spannungsverlauf
6.12	Elastisch (Laststufe 2)	Simulation	$\sigma_x \sigma_y \tau_{xy}$	Flächenhaft
6.13	Elastisch (Laststufe 2)	Messung	$\sigma_x \sigma_y \tau_{xy}$	Flächenhaft
6.14	Überelastisch (Stufe 4)	Simulation	$\sigma_x \sigma_y \tau_{xy}$	Flächenhaft
6.15	Überelastisch (Stufe 4)	Messung	$\sigma_x \sigma_y \tau_{xy}$	Flächenhaft
6.16	Überelastisch (Stufe 4)	Messung + Simulation	$\sigma_x \sigma_y$	Spannungsverlauf
6.17	Überel. Dehnungen (Stufe 4)	Messung	$\varepsilon_1 \varepsilon_2$	Flächenhaft
6.18	Überel. Dehnungen (Stufe 4)	Messung	$\varepsilon_1 \varepsilon_2$	Dehnungsverlauf
6.19	Eigenstress (Stufe 6)	Simulation	$\sigma_x \sigma_y \tau_{xy}$	Flächenhaft
6.20	Eigenstress (Stufe 6)	Messung	$\sigma_x \sigma_y \tau_{xy}$	Flächenhaft
6.21	Eigenstress (Stufe 6)	Messung + Simulation	$\sigma_{xe} \sigma_{ye}$	Spannungsverlauf

Tab. 6.1: Überblick über die Ergebnisbilder aus der Versuchsreihe

Nachfolgend werden diese Ergebnisbilder 6.8 bis 6.21 erläutert.

Die Vergleiche der dargestellten Lastzustände zeigen generell eine gute Übereinstimmung zwischen Meß- und Simulationsergebnissen. Dies wird sowohl aus der flächenhaften Darstellung als auch aus den Spannungsverläufen in den Längs- und Querschnitten ersichtlich.

Zu Bild 6.8, 6.9, 6.10:

In Bild 6.8 und Bild 6.9 sind die bei elastischer Beanspruchung auftretenden Spannungsfelder aus Simulation und Messung flächenhaft dargestellt. Bild 6.9 zeigt die in Kapitel 6.3 erwähnte fleckenhafte Struktur der Messergebnisse bedingt durch Quantisierungsfehler und Specklerauschen. Der Ansatz der FE-Simulation hingegen beruht auf den Verträglichkeitsbedingungen zwischen den Elementen, somit liefern deren Simulationsergebnisse vergleichbar homogene, stetige Spannungsfelder.

Beim Vergleich der Spannungsfelder aus Messung und Simulation stimmen die Ausbreitungsgebiete in Form und Betrag überein. Für einen quantitativen Vergleich sind in Bild 6.10 die Spannungsverläufe entlang der Schnittebenen maximaler Längs- bzw. Querspannung dargestellt (Schnitte A-A bzw. B-B gem. Kpitel 6.2.3).

Das Meßverfahren erfaßt eine Maximalspannung am Kerbrand mit 90 N/mm^2 genauso wie die Simulation. Bedingt durch die finite Elementgröße ist der Höchstwert der Spannung nicht exakt erfaßt, ebenso kann der Querspannungsverlauf am Kerbrand weder bei der Messung noch bei der Simulation auf Null abklingen, da die dargestellten Spannungswerte Elementmittelwerte sind und aus den Knotenspannungen abgeleitet werden. Die fleckenhafte Struktur aus Bild 6.9 macht sich im Spannungsverlauf mit einer Abweichung von maximal $\pm 5 \text{ N/mm}^2$ bemerkbar. Diese Schwankungen können durch Filterung oder durch Wahl der Elementgröße weiter geglättet werden. Bei Filterung ist allerdings zu berücksichtigen, daß hierbei auch Information verloren gehen kann.

Im unteren Bereich von Bild 6.10 ist der Spannungsverlauf entlang der Strecke B-B dargestellt und dient dem quantitativen Vergleich der ermittelten Spannungsfelder.

Auch der Vergleich der Schubspannungsfelder zeigt die gute Übereinstimmung von Simulations- und Meßergebnissen. Es fallen sowohl die Übereinstimmung von Lage und Ausbreitung der Gebiete der Extremwerte auf.

Grenzen des Meßverfahrens erkennt man bei der Schubspannungsermittlung am Kerbrand, wo die Maximalwerte im Bereich von weniger als einem halben Millimeter nicht mehr erfaßt werden können.

Zu Bild 6.11, 6.12, 6.13:

Im zweiten Lastschritt beträgt die Maximalspannung am Kerbrand 200 N/mm^2 , die Streckgrenze ist somit noch nicht erreicht. Die Erkenntnisse aus den Bildern entsprechen denjenigen aus den Bildern 6.8 bis 6.10. Sie sollen die Zuverlässigkeit und Reproduzierbarkeit des Meßverfahrens bestätigen.

Zu Bild 6.14, 6.15, 6.16:

Bei der Höchstlast (Laststufe 4) ist die Streckgrenze überschritten, die Maximalspannung am Kerbrand beträgt 280 N/mm^2 , die Spannungsspitze ist also durch Fließen abgebaut und das Fließgebiet dehnt sich bis zu 3 mm tief aus. Diese Größen werden übereinstimmend von Messung und Simulation bestätigt.

Zu Bild 6.17, 6.18:

In Bild 6.17 und 6.18 sind flächenhaft und im Schnitt die Dehnungszustände ε_1 , ε_2 dargestellt. Man erkennt wie bereits aus Bild 6.16, daß sich das Fließgebiet bis zu ca. 3 mm vom Kerbrand entfernt ausgedehnt hat ($\varepsilon_F=0,144\%$).

Der Quotient Quer- zu Längsdehnungen am Lochrand beträgt $0,34$, auch hier macht sich also die Mittelwertbildung bedingt durch die gewählte Schrittweite Δy , als auch der hohe Dehnungsgradient bemerkbar, da im Fließbereich der wahre Wert der Querkontraktionszahl am Lochrand $0,5$ betragen muß.

Zu Bild 6.19, 6.20, 6.21:

Die Höchstwerte der Längseigenstressungen sind gemäß Legende in Bild 6.19 bei der Simulation $\sigma_{x\text{sim}} = -255 \text{ N/mm}^2$ und bei der Messung gem. Bild 6.20 $\sigma_{x\text{mes}} = -234 \text{ N/mm}^2$. Die Höchstwerte der Quereigenstressungen liegen bei der Simulation als auch bei der Messung bei $\sigma_{y\text{sim}} = \sigma_{y\text{mes}} = 29 \text{ N/mm}^2$. Weiter zeigt der Vergleich beider Bilder, daß neben der Übereinstimmung der Maximalwerte auch die Ausbreitungsgebiete übereinstimmen. Es fallen die Eigenstressungen bereits nach $1,5 \text{ mm}$ Abstand vom Kerbrand wieder auf den Betrag Null ab. Der maximal ablesbare Spannungsgradient beträgt etwa 250 N/mm^2 pro mm . Diesen Verlauf zeigen sowohl Simulations- als auch Meßergebnisse. Das hier vorgestellte Meßverfahren erfüllt somit die hohen Anforderungen an die Auflösung. In den anderen Gebieten ist der Eigenstressungszustand span-

nungsfrei und bei den Meßergebnissen zeigt sich das Specklerauschen mit Schwankungen um Null durch entsprechende Farbwechsel in Bild 6.20.

Die Spannungsverläufe entlang den Schnitten A-A und B-B sind in Bild 6.21 dargestellt, wobei in Bild 6.21a und 6.21b der Spannungsverlauf durch unterschiedliche Mittelungslängen (Schrittweite $\Delta y=0,3\text{mm}$ und $0,5\text{mm}$) ermittelt wurde. Man erkennt erwartungsgemäß den Einfluß der Schrittweite: Je größer die Schrittweite umso weniger macht sich die Fleckenstruktur durch Welligkeit im Verlauf bemerkbar, jedoch umso geringer ist auch der maximale Eigenspannungswert am Lochrand. Zur Ermittlung der Maximaleigenspannungswerte sind daher die ungemittelten Ergebnisse in Bild 6.20 heranzuziehen. Im Schnittspannungsverlauf in Bild 6.21a betragen - bei den Simulationsergebnissen - die Werte für $\sigma_{x\text{sim}}$ nur -180 N/mm^2 und in Bild 6.21b -225 N/mm^2 anstatt -255 N/mm^2 wie bei der flächenhaften Darstellung. Bei den Messergebnissen beträgt der Höchstwert im Schnittspannungsverlauf nur $\sigma_{x\text{mes}}$ -200 N/mm^2 anstatt -234 N/mm^2 .

Erst am Quereigenspannungsverlauf im Bereich des Lochrandes werden die Grenzen des Meßverfahrens aber auch der FE-Simulation erkennbar:

Der Verlauf der FE-Simulationsergebnisse $\sigma_{y\text{sim}}$ in Bild 6.21a und b beginnt am Kerbrand mit negativen Werten anstelle mit Null. Die Elementmittelwerte erfüllen auf Grund der finiten Elementgröße somit nicht die Randbedingungen an der freien Oberfläche. Der weitere Verlauf ist dann korrekt, sie fallen kurz weiter ab und nehmen dann im Abstand von etwa $1,5\text{ mm}$ wieder positive Werte an.

Der entsprechende Verlauf bei den Meßergebnissen $\sigma_{y\text{sim}}$ in Bild 6.21 a und b beginnt am Rand mit positiven Beträgen die dann kurz über eine Strecke von $0,5\text{ mm}$ in den negativen Bereich wechseln, um dann den entsprechenden Werten bei der Simulation zu folgen. Hier erkennt man, daß den gemessenen Quereigenspannungen Rauscheffekte ähnlicher Größenordnung überlagert sind und somit können im Bereich des Lochrandes die Quereigenspannungswerte relativ geringen Betrages nicht mehr korrekt aufgelöst werden. Dennoch deutet sich der korrekte Verlauf mit dem Vorzeichenwechsel an der richtigen Stelle an.

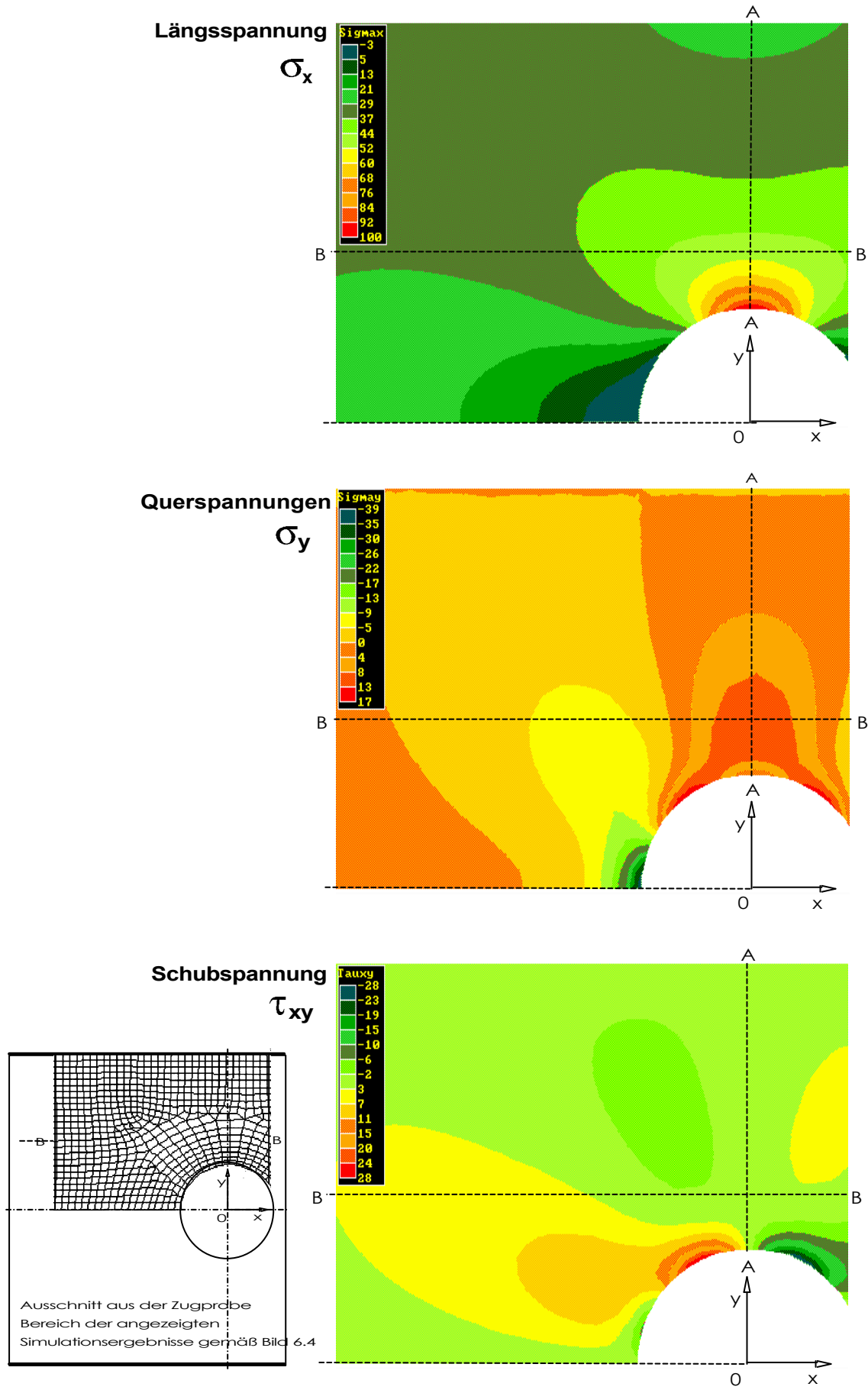


Bild 6.8: Längs-, Quer- und Schubspannung im elastischen Bereich - Ergebnisse der Finite-Element-Rechnung - **Simulation, erste Laststufe**

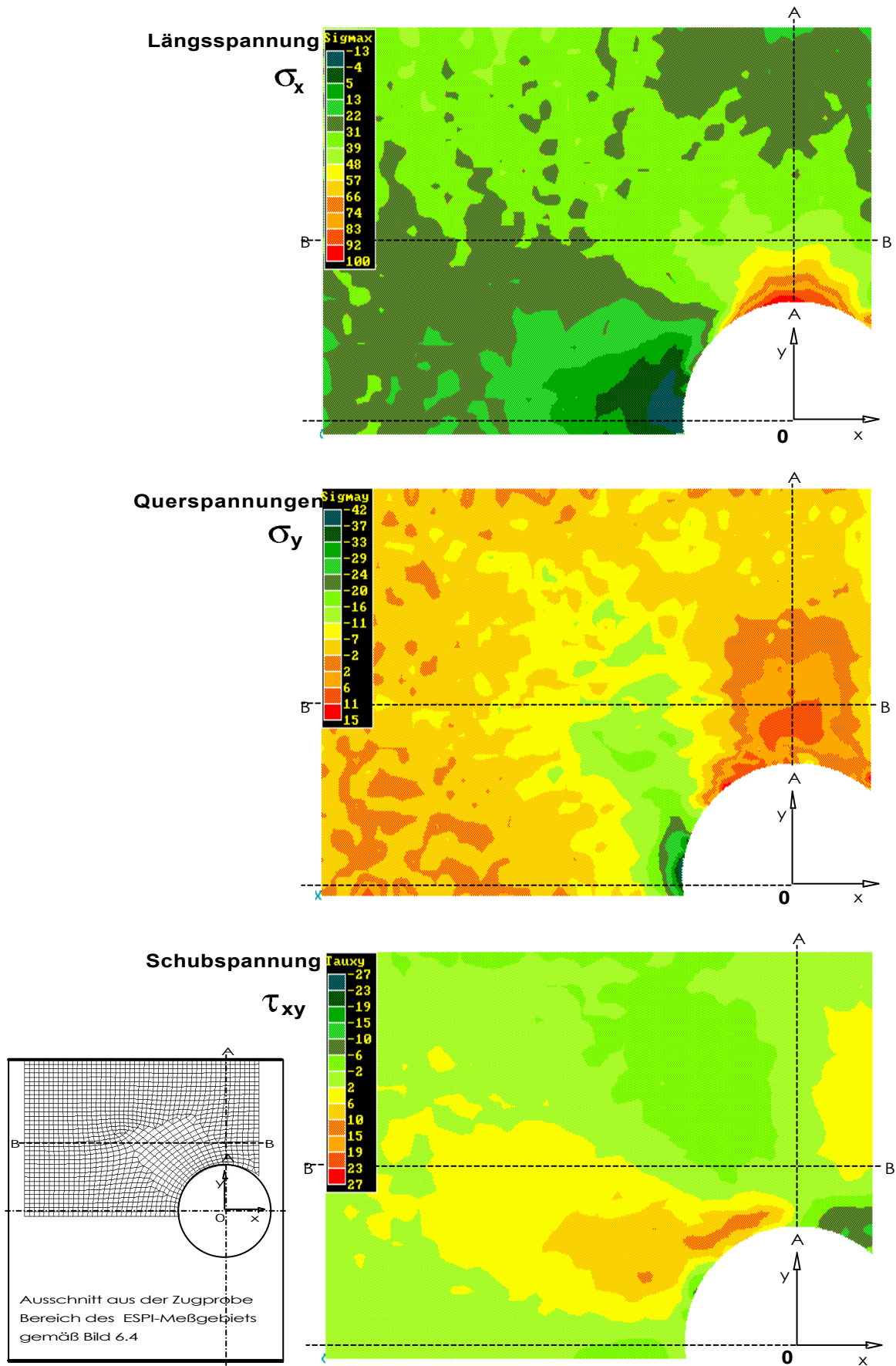
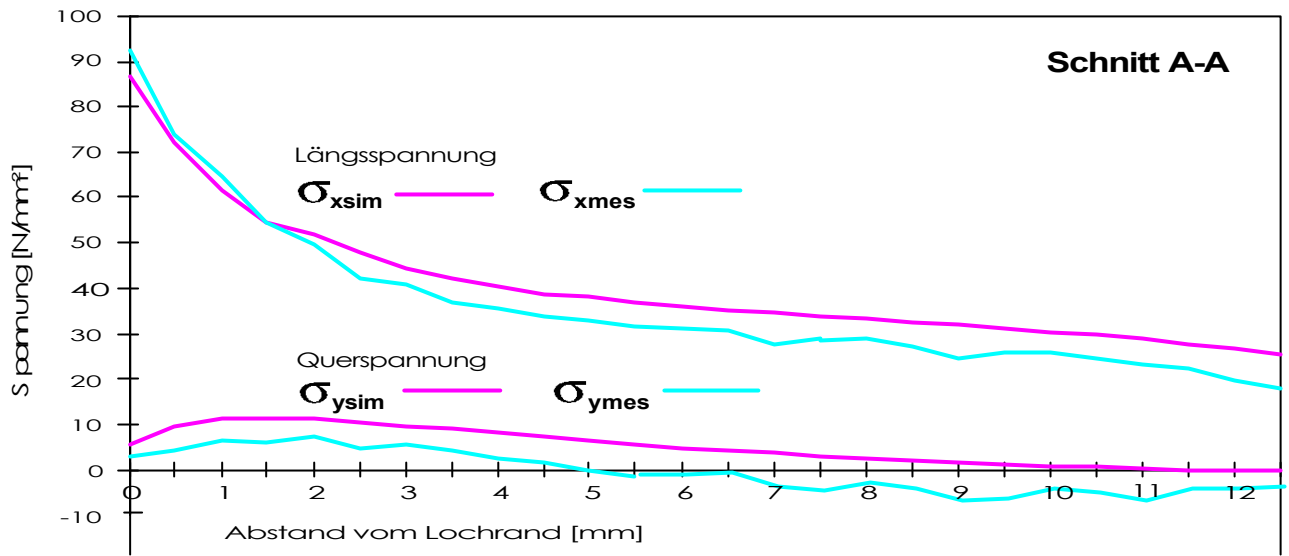
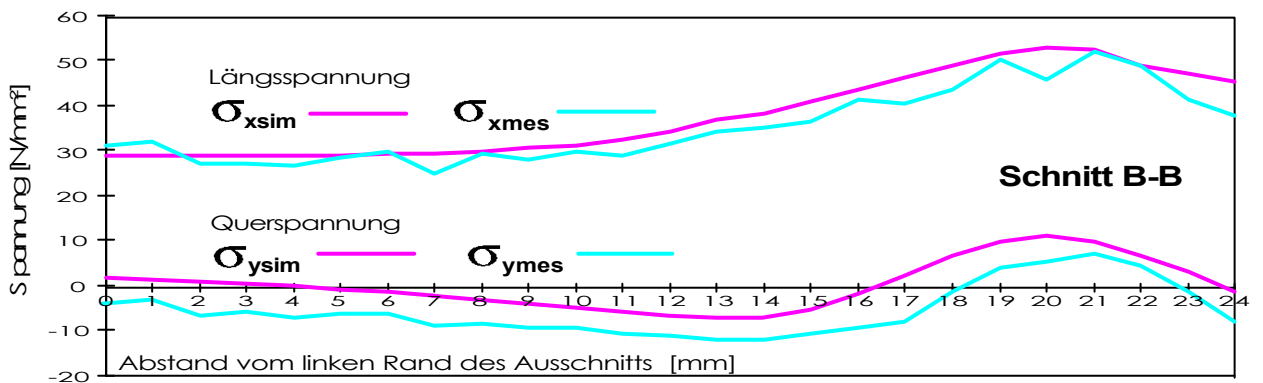


Bild 6.9: Längs-, Quer- und Schubspannung im elastischen Bereich -
Ergebnisse aus der **ESPI-Messung, erste Laststufe**

Spannungsverlauf bei elastischer Beanspruchung, 1. Laststufe
Spannungen im Querschnitt A-A, Vergleich Messung mit Simulation



Spannungsverlauf bei elastischer Beanspruchung, 1. Laststufe
Spannungen im Längsschnitt B-B, Vergleich Messung mit Simulation



Ausschnitte aus den Zugproben gemäß Bild 6.4, Lage der Schnittebenen A-A und B-B

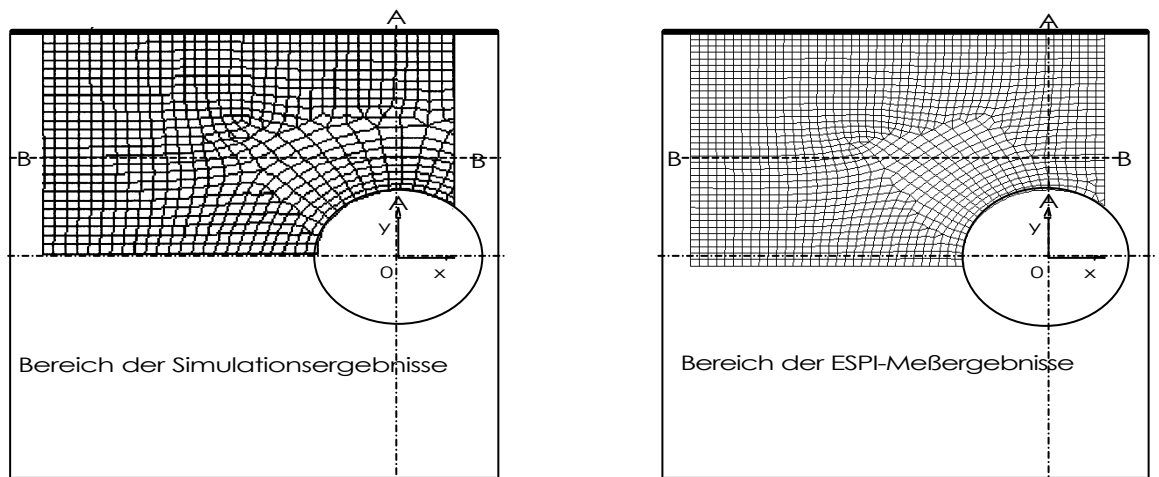
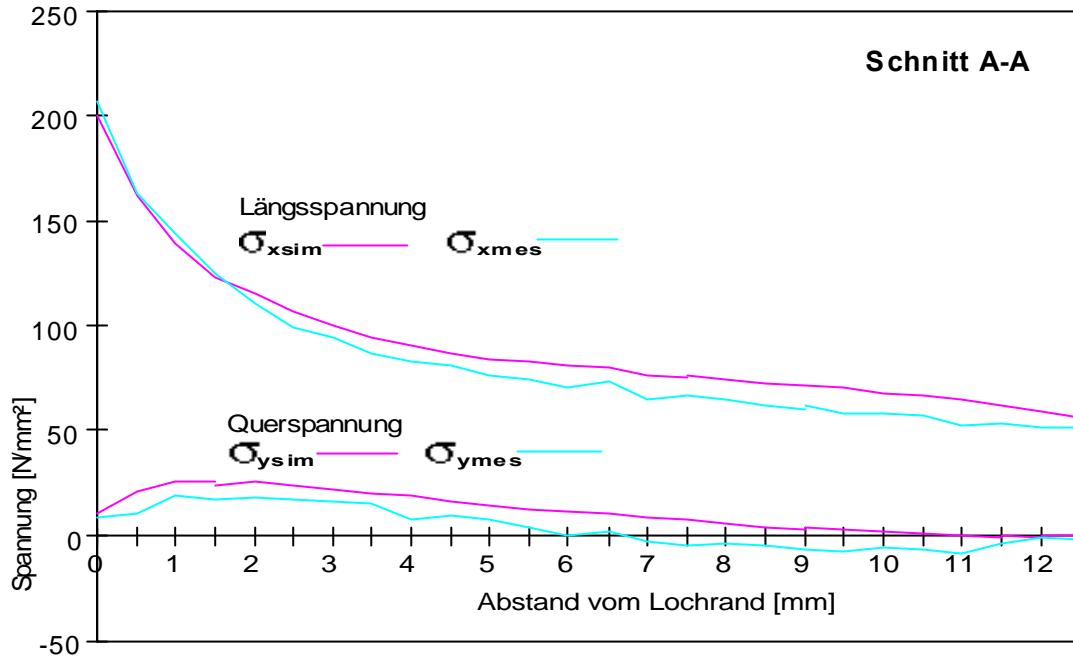
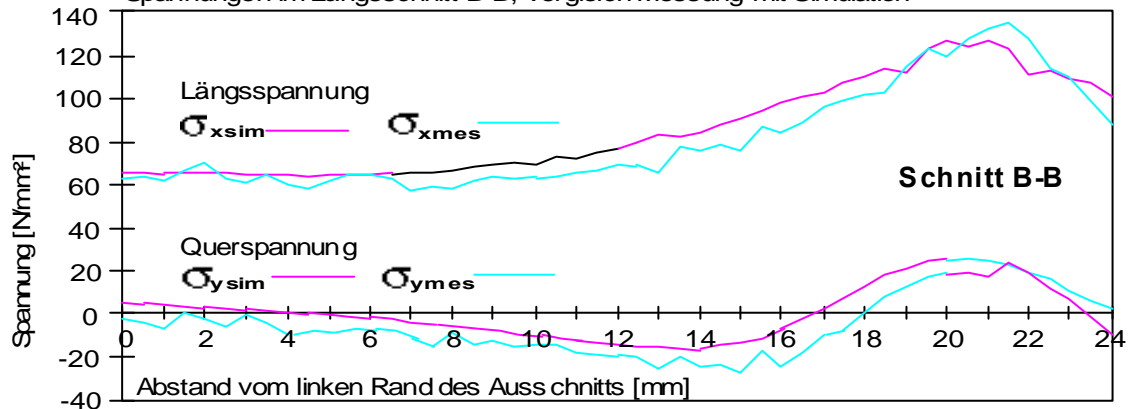


Bild 6.10: Vergleich von Messung mit Simulation, Spannungsverläufe im Querschnitt A-A und Längsschnitt B-B gemäß Bild 6.5, erste Laststufe

Spannungsverlauf bei elastischer Beanspruchung, 2. Laststufe
Spannungen im Querschnitt A-A, Vergleich Messung mit Simulation



Spannungsverlauf bei elastischer Beanspruchung, 2. Laststufe
Spannungen im Längsschnitt B-B, Vergleich Messung mit Simulation



Ausschnitte aus den Zugproben gemäß Bild 6.4, Lage der Schnittebenen A-A und B-B

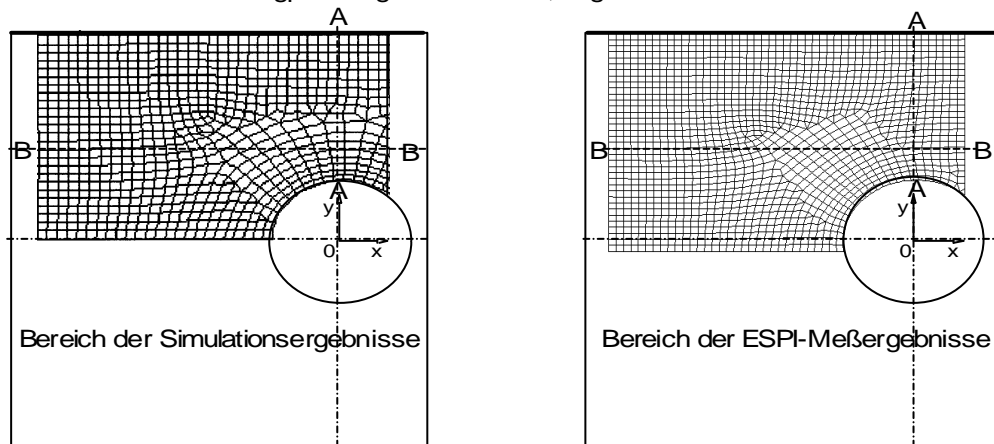


Bild 6.11: Vergleich von Messung mit Simulation, Spannungsverläufe im Querschnitt A-A und Längsschnitt B-B gemäß Bild 6.5, zweite Laststufe

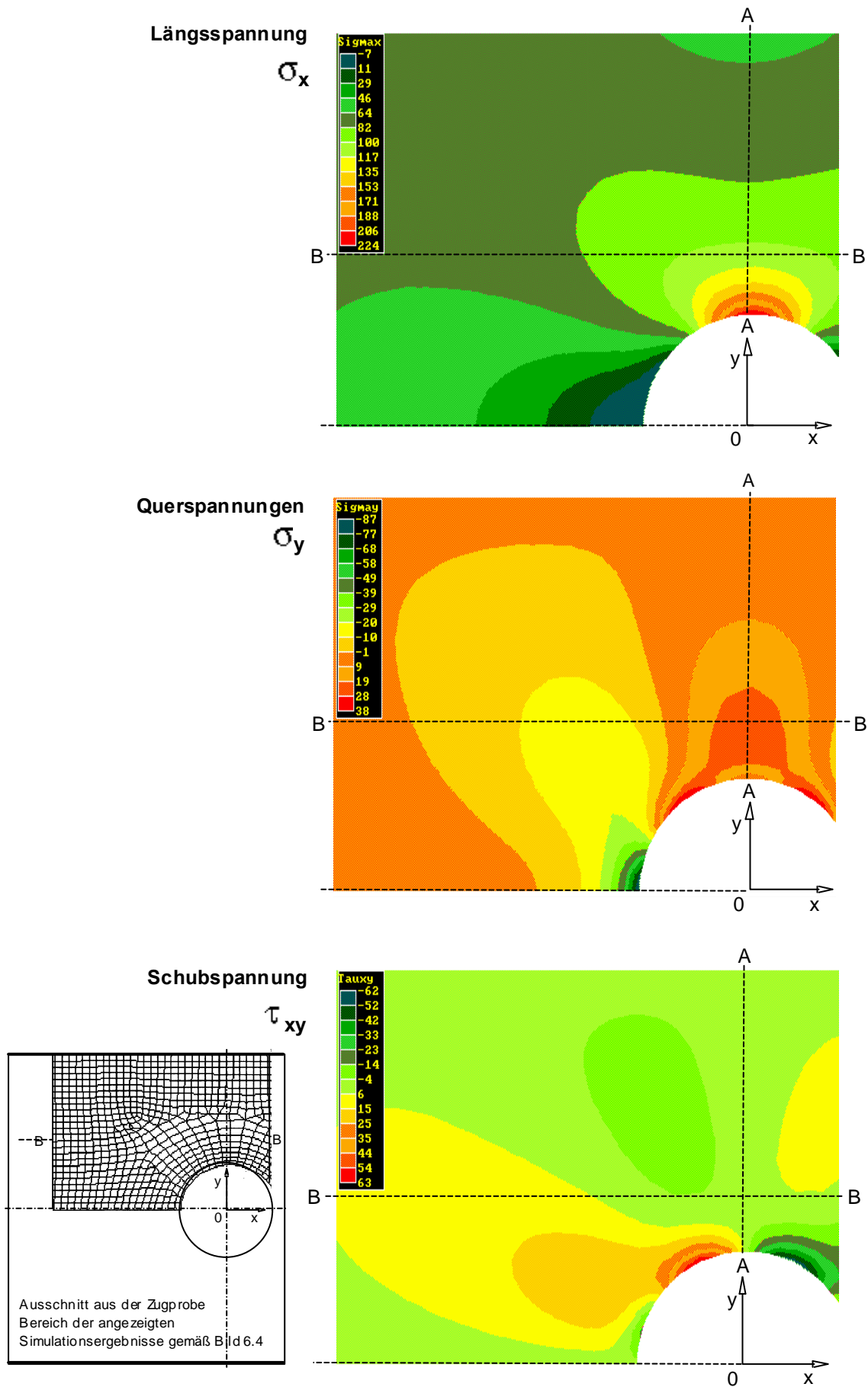


Bild 6.12: Längs-, Quer- und Schubspannung im elastischen Bereich - Ergebnisse der Finite-Element-Rechnung - **Simulation, zweite Laststufe**

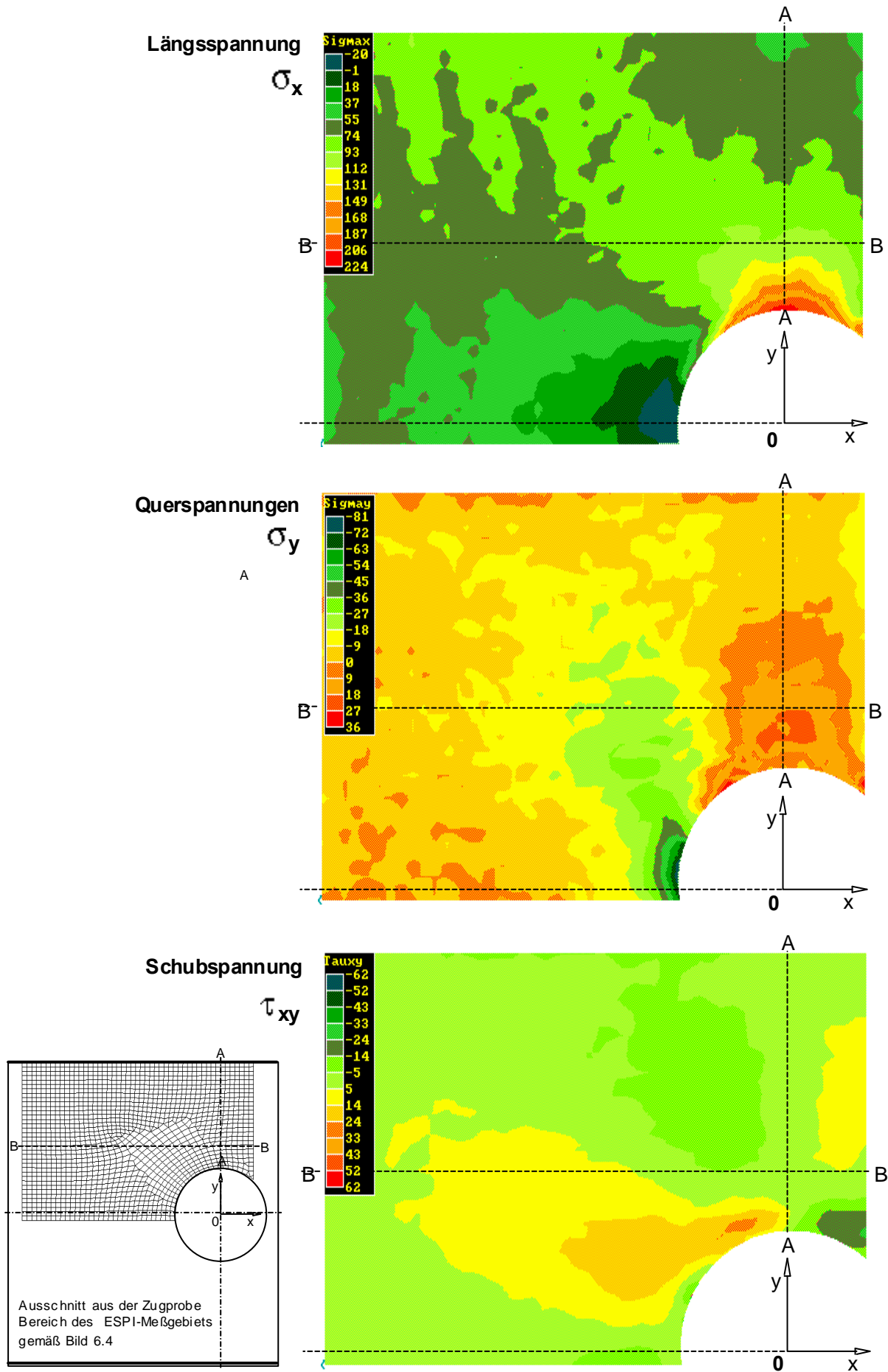


Bild 6.13: Längs-, Quer- und Schubspannung im elastischen Bereich - Ergebnisse aus der **ESPI-Messung** - zweite Laststufe

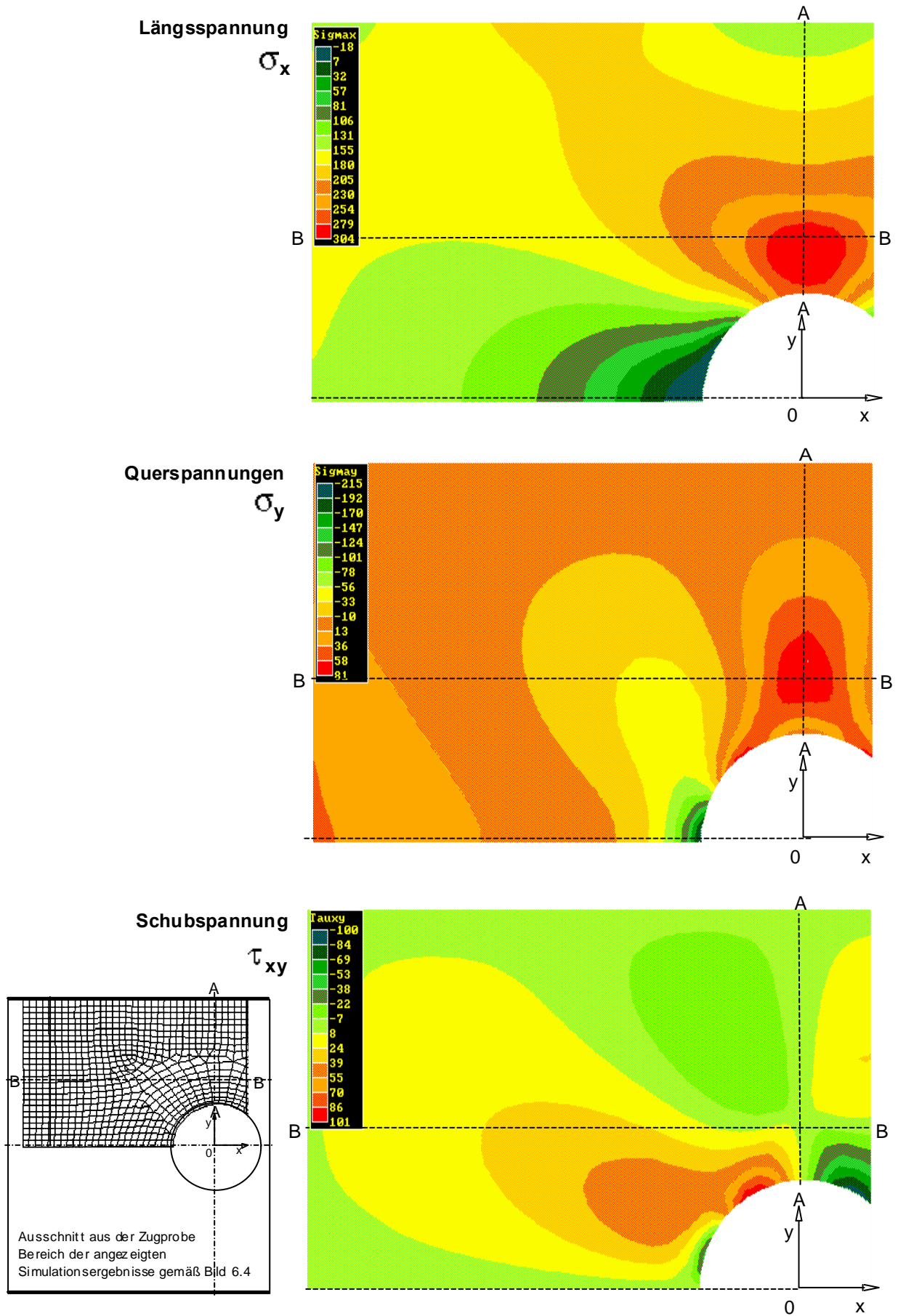


Bild 6.14: Längs-, Quer- und Schubspannung im überelastischen Bereich - Ergebnisse der Finite-Element-Rechnung - **Simulation, vierte Laststufe**

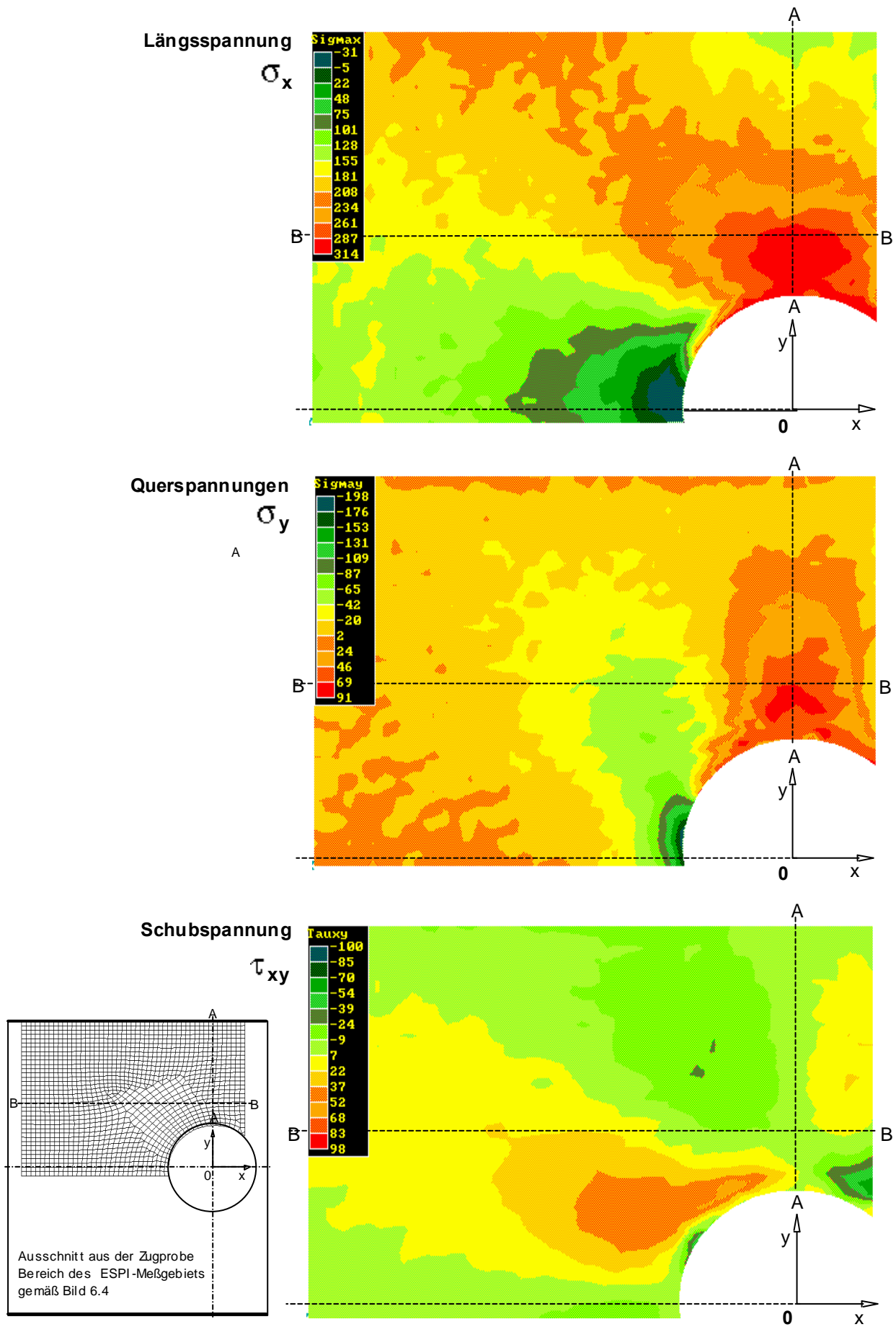
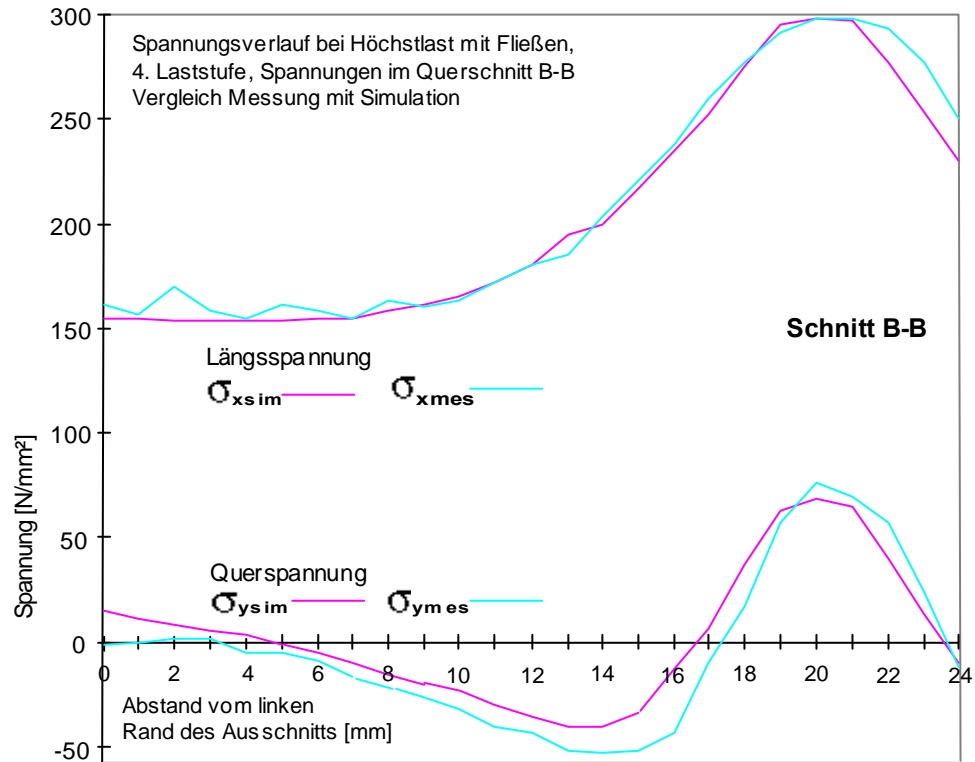
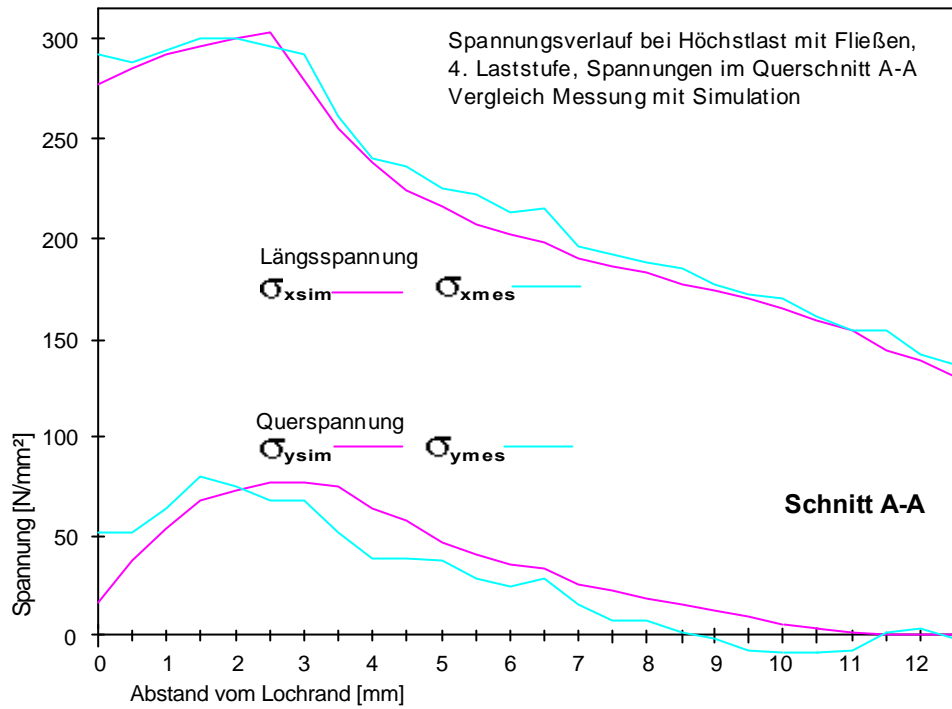
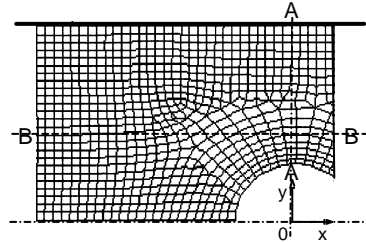


Bild 6.15: Längs-, Quer- und Schubspannung im überelastischen Bereich
- Ergebnisse aus der **ESPI-Messung** - vierte Laststufe



Ausschnitte aus den Zugproben gemäß Bild 6.4 - Lage der Schnittebenen A-A und B-B
Bereich der Simulationsergebnisse



Bereich der ESPI-Meßergebnisse

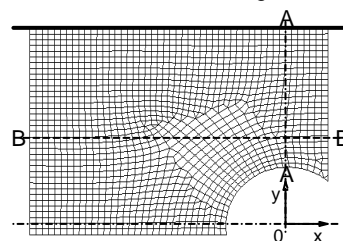


Bild 6.16: Vergleich von Messung mit Simulation der Spannungsverläufe im Querschnitt A-A und Längsschnitt B-B gemäß Bild 6.5 - vierte Laststufe

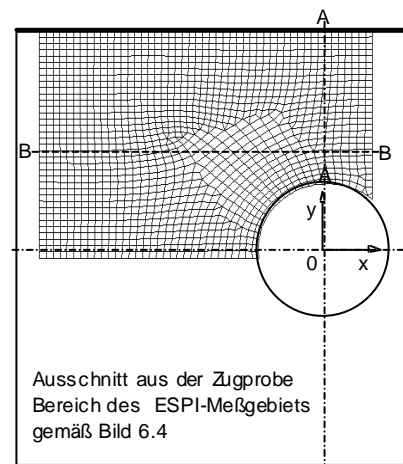
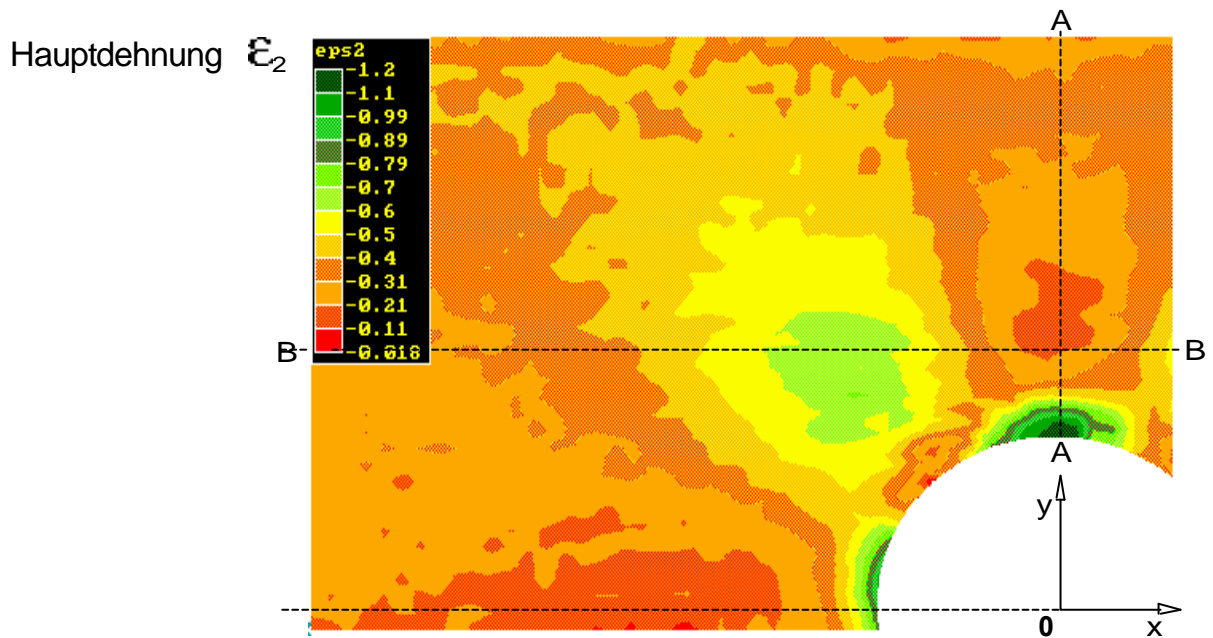
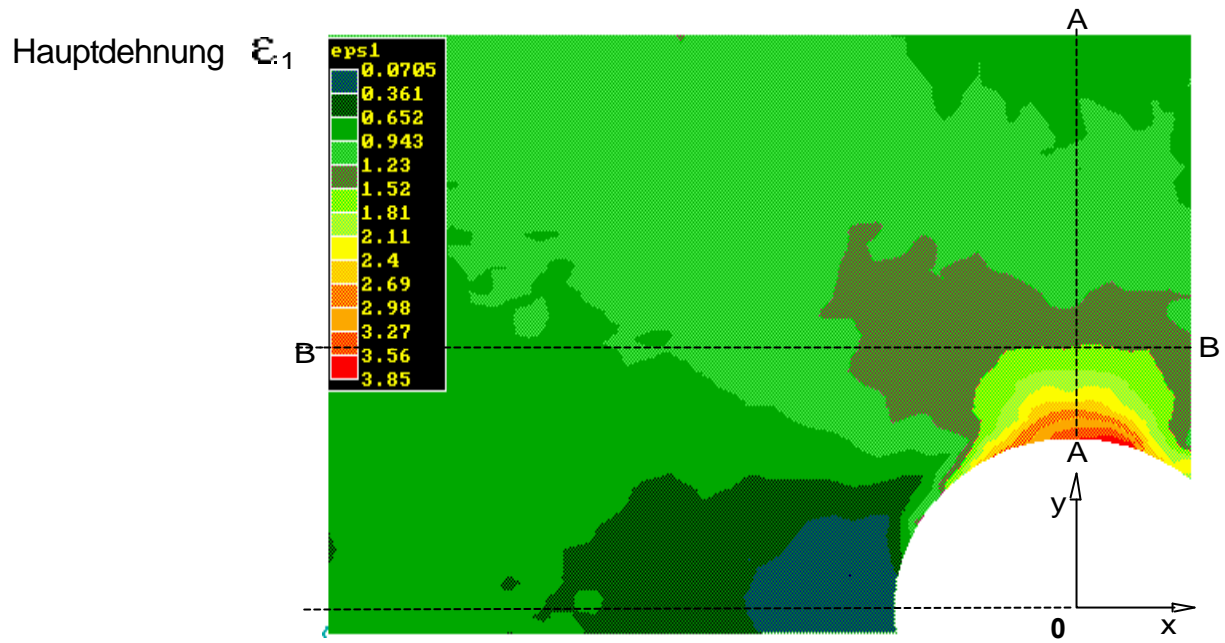


Bild 6.17: Hauptdehnungen im überelastischen Bereich - Ergebnisse aus der ESPI-Messung
- vierte Laststufe

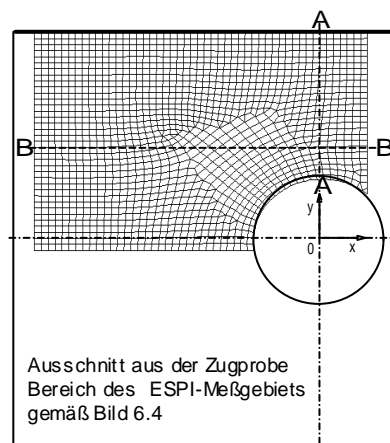
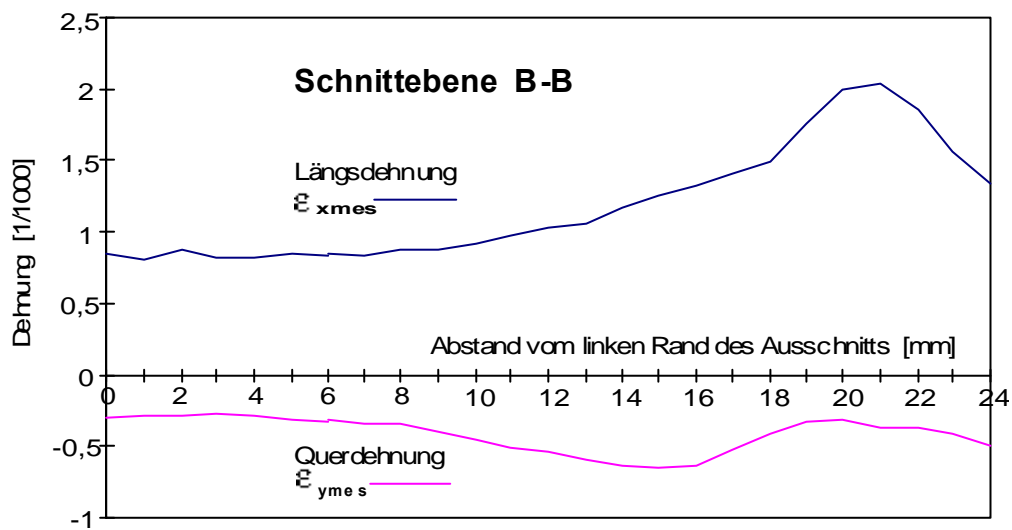
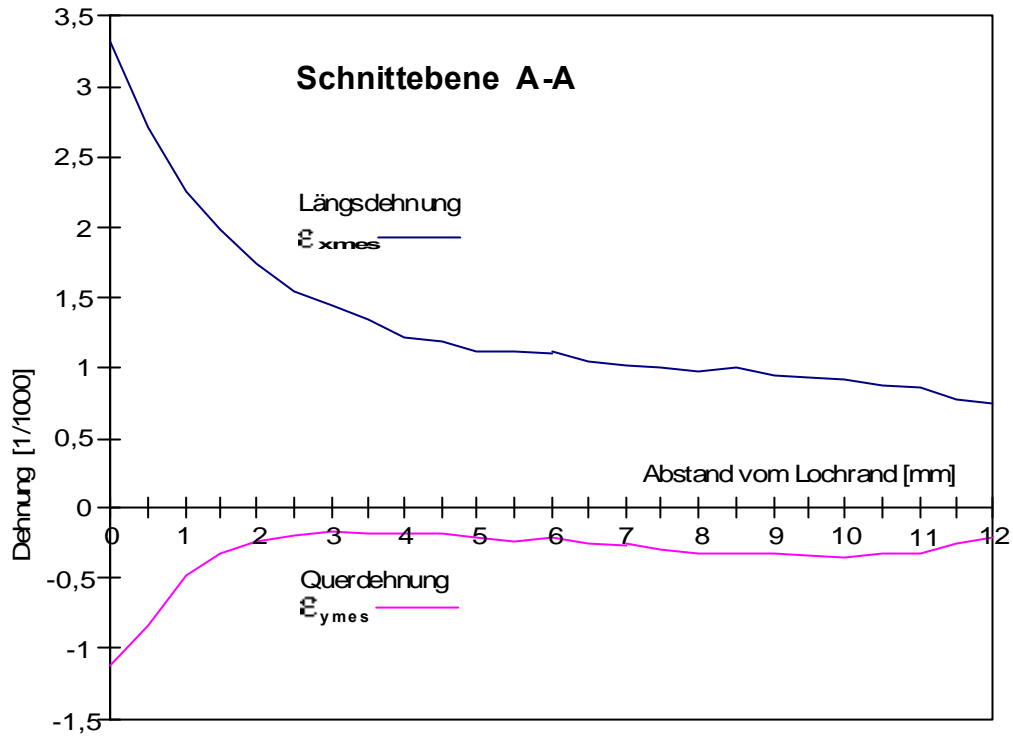


Bild 6.18: Hauptdehnungsverläufe im Querschnitt A-A und Längsschnitt B-B gemäß Bild 6.5 - vierte Laststufe - Ergebnisse aus ESPI-Messung

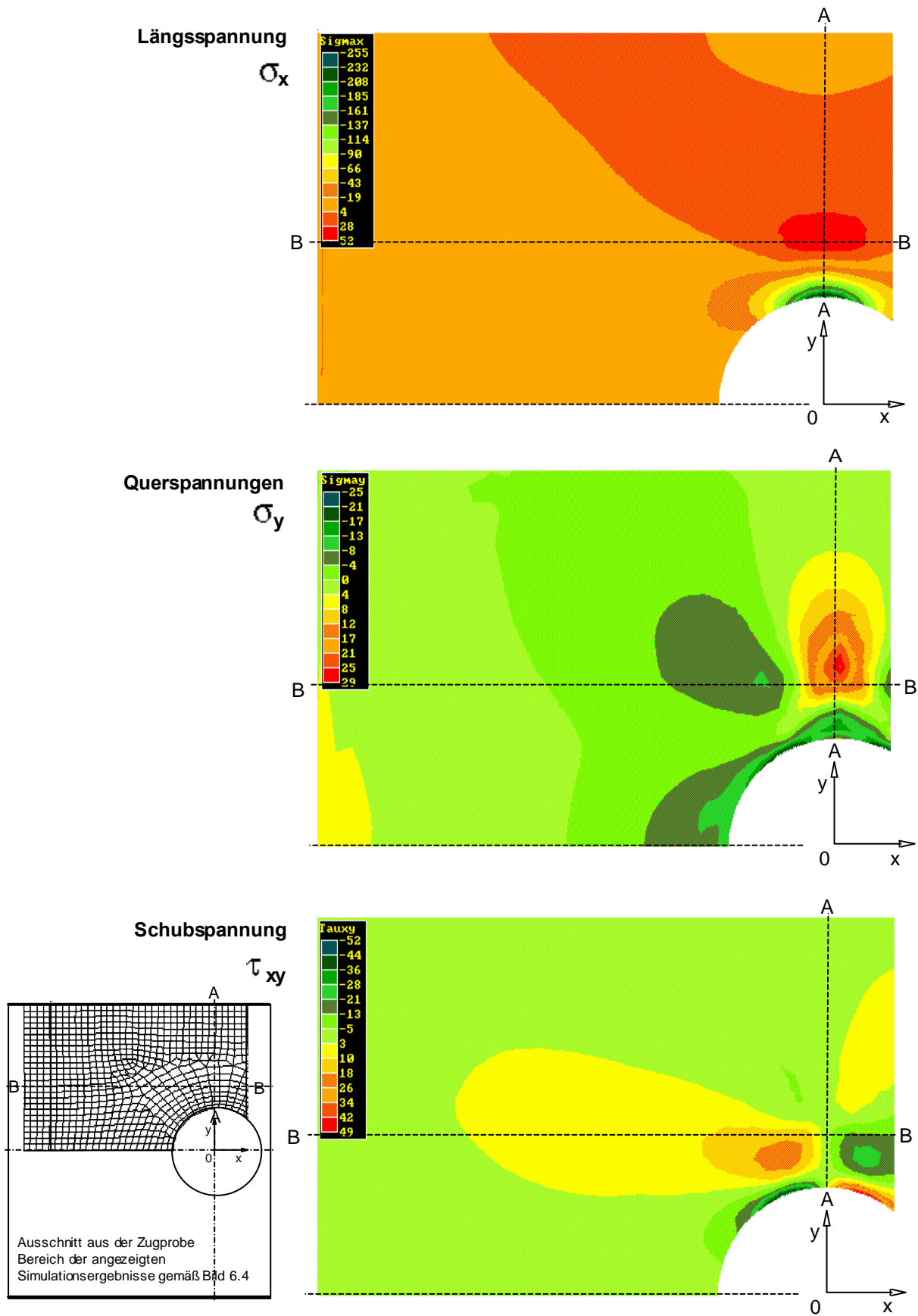


Bild 6.19: Längs-, Quer- und Schubspannung nach Entlastung - Ergebnisse der Finite-Element-Rechnung - **Simulation des Eigenspannungszustandes**

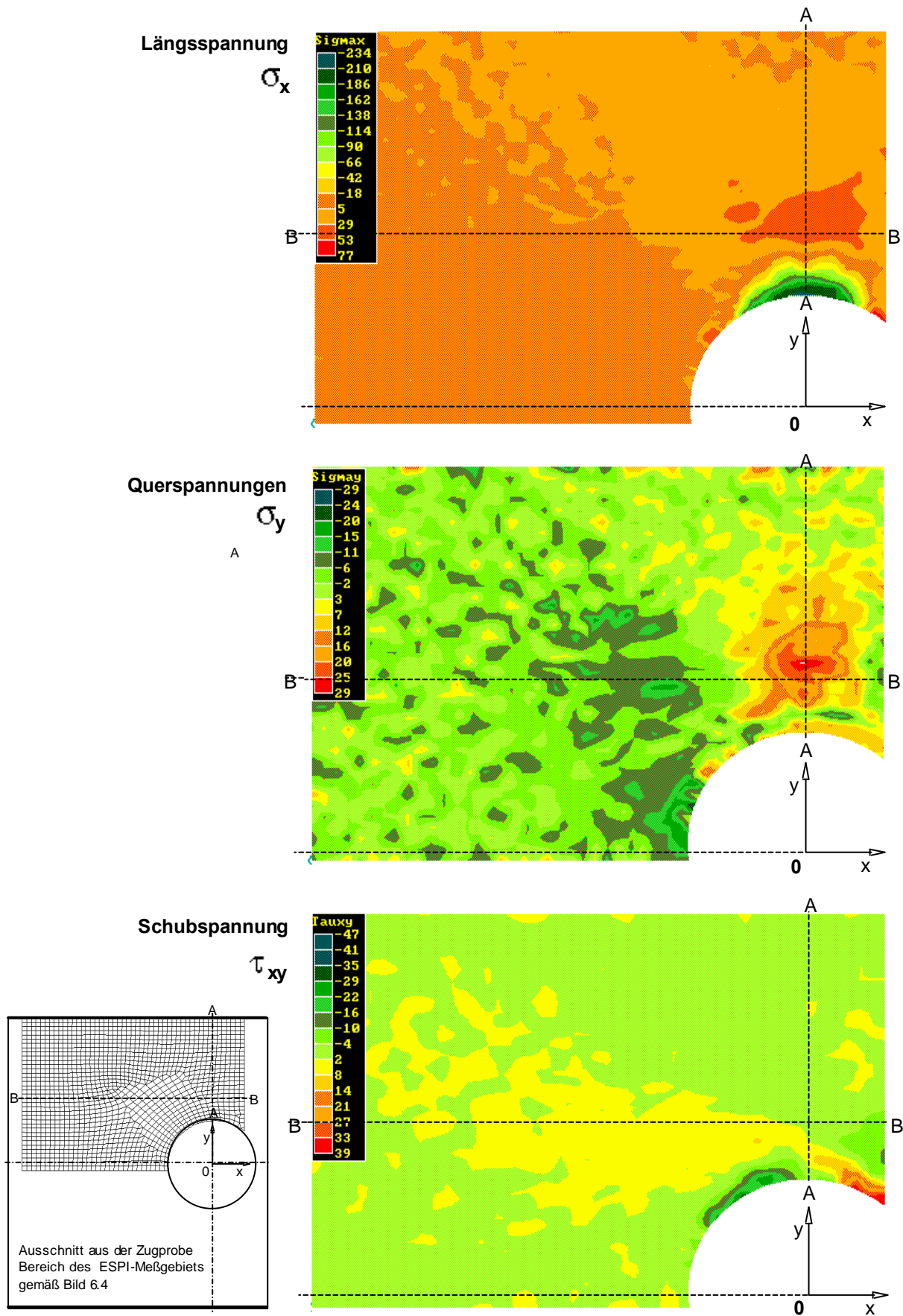


Bild 6.20: Längs-, Quer- und Schubspannung nach Entlastung - Ergebnisse aus der ESPI-Messung des Eigenspannungszustandes

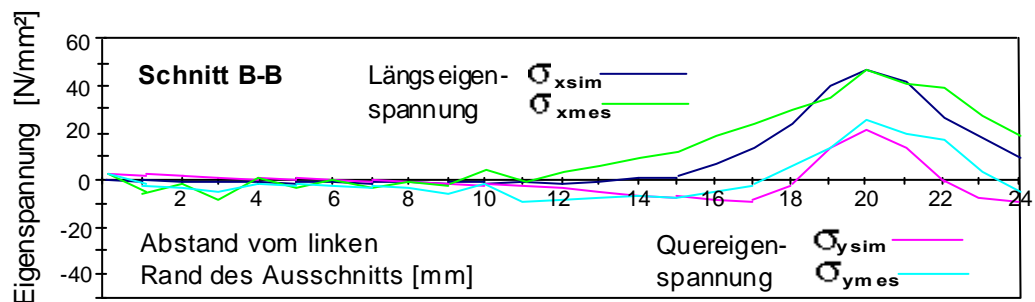
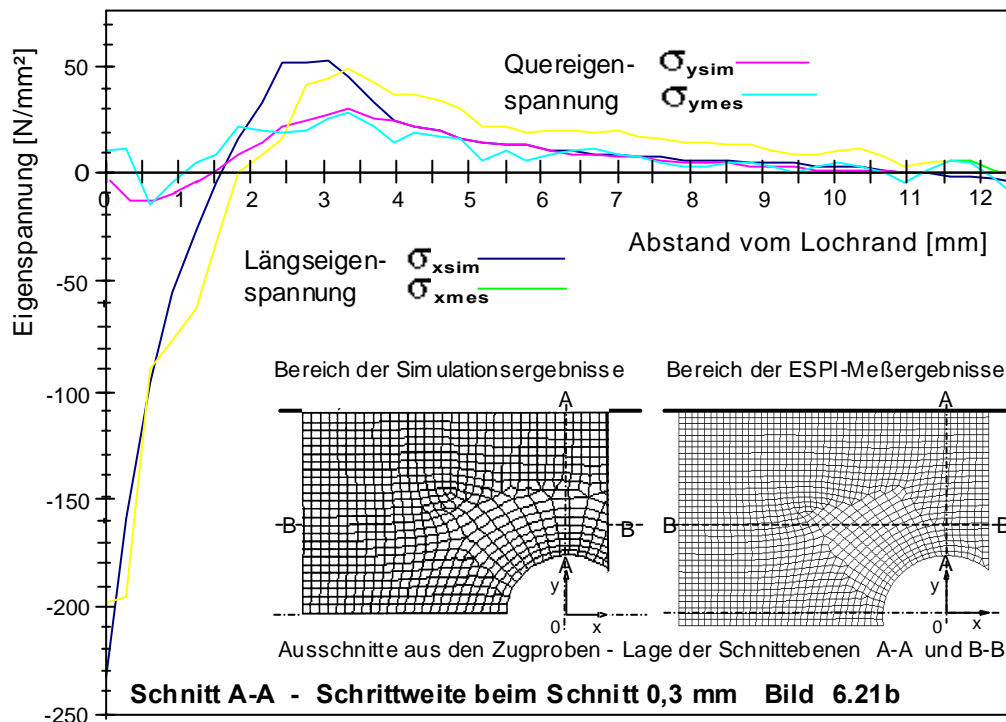
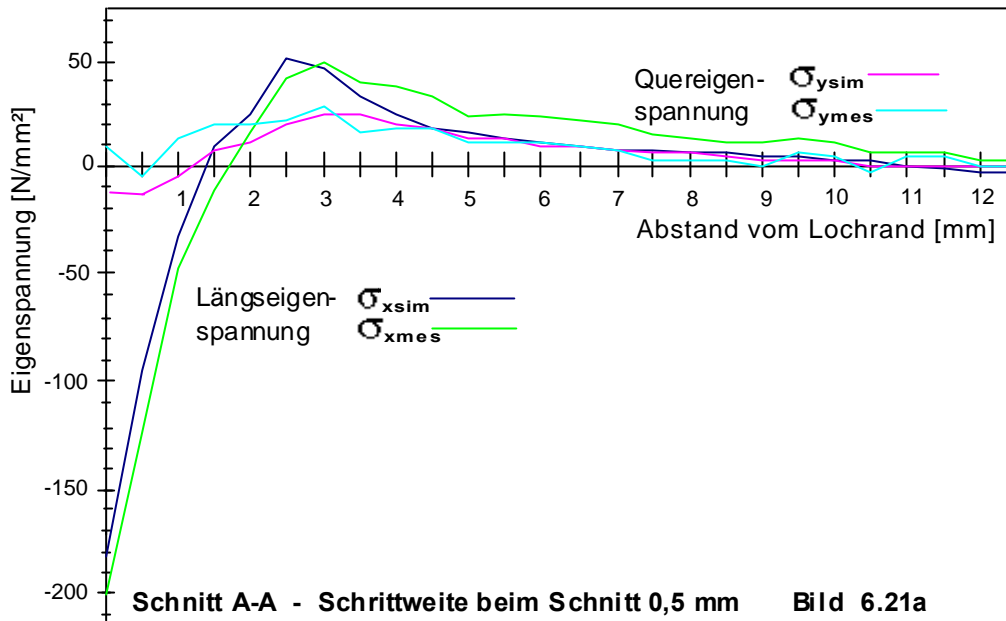


Bild 6.21: Vergleich von Messung mit Simulation der Eigenstressungsverläufe im Querschnitt A-A und Längsschnitt B-B gemäß Bild 6.5 (nach Entlastung)

6.3.3. Ergebniskontrolle und Interpretation

Die Meßergebnisse werden nachfolgend mit Hilfe der Spannungsverläufe und der Last-Dehnungskurven überprüft.

6.3.3.1. Spannungsverläufe im Querschnitt A-A

Bild 6.22 zeigt die gemessenen Spannungsverläufe bei den Laststufen 1, 2, 3 und 4 sowie den ermittelten Eigenspannungsverlauf nach Entlastung.

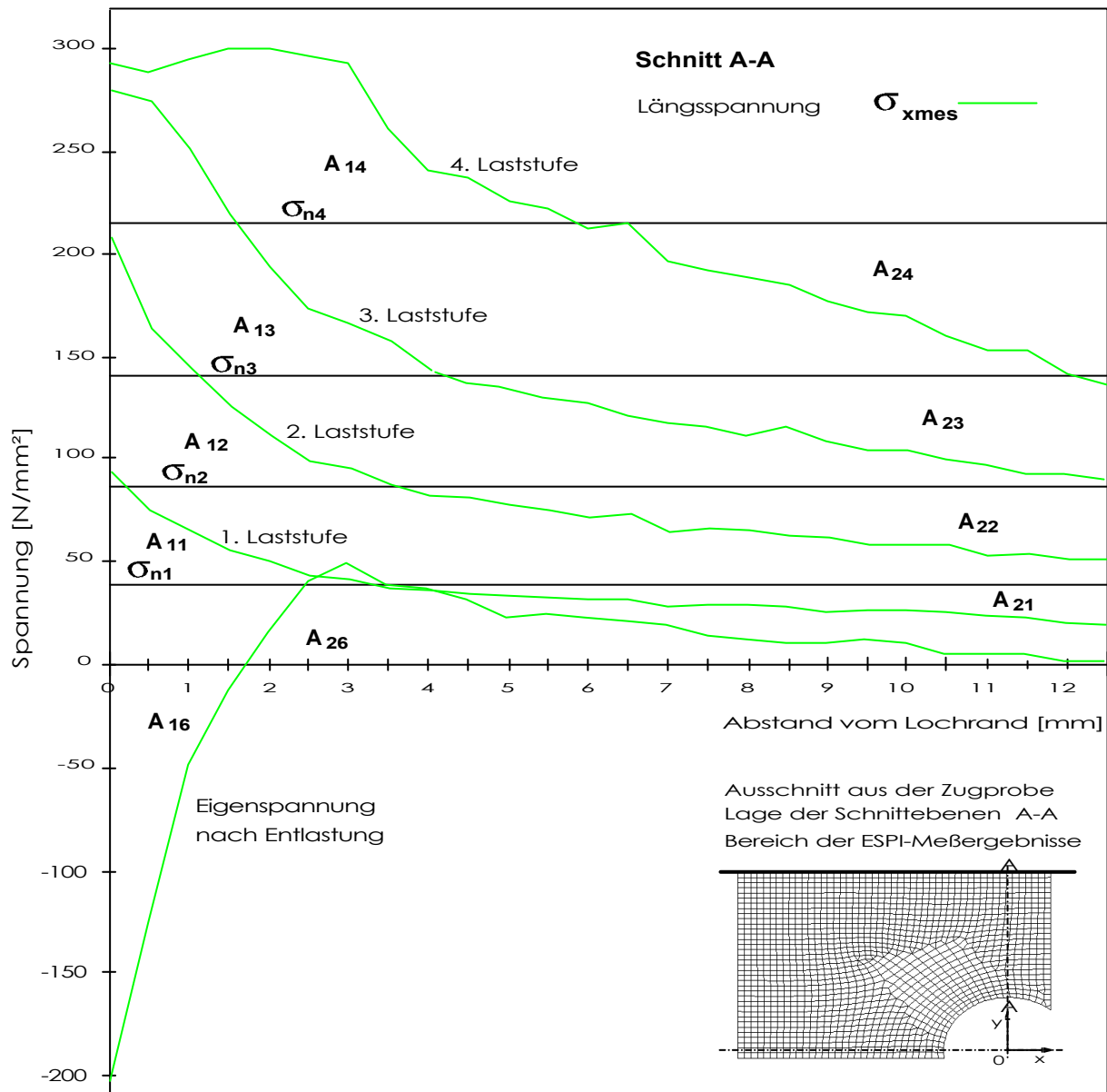


Bild 6.22 Gemessene Spannungsverläufe bei verschiedenen Laststufen und die zugehörigen Nennspannungen im Restquerschnitt.

Die schrittweise Entstehung des Eigenspannungszustandes ist deutlich zu erkennen. Lastschritt eins und zwei ist rein elastisch, Fließen setzt bei der dritten Laststufe ein. Bei

der vierten Laststufe, bei Höchstlast, erfaßt das Fließgebiet etwa ein Viertel des Querschnitts und breitet sich ungefähr bis drei Millimeter weit vom Kerbrand aus. Nach Entlastung stellt sich der Eigenspannungszustan (Laststufe 6) ein.

Tabelle 6.1 zeigt die bei den Laststufen i aufgebrauchten Kräfte und die zugehörigen Nennspannungen ($i=1,2,3,4$ und 6).

Laststufe i	1	2	3	4	6
F_i [N]	950	2150	3500	5375	0
σ_{ni} [N/mm ²]	38	86	140	215	0

Tab 6.1: Laststufen 1 bis 6

Zur Kontrolle sind die entsprechenden Nennspannungen σ_{ni} im Restquerschnitt eingezeichnet. Es gilt $A_{1i} = A_{2i}$ für alle Laststufen i .

Bei der Laststufe eins bzw. zwei sind die gemittelten Maximalspannungen σ_{maxi} am Kerbrand 95 bzw. 210 N/mm². Daraus ergibt sich die Formzahl $\alpha_k = \sigma_{maxi}/\sigma_n \approx 2,5$.

Bild 6.23 zeigt zum Vergleich die ermittelten Spannungsverläufe aus Messung und FE-Simulation. Zur Ergebniskontrolle ist auch der konstruierte fiktiv-elastische Spannungsverlauf $\overset{\circ}{\sigma}$ bei Höchstlast (4. Laststufe) eingezeichnet. Mit Hilfe des ermittelten Eigenspannungszustands nach Entlastung und des Spannungsverlaufs bei Höchstlast kann durch Subtraktion der Verlauf der fiktiv-elastischen Spannung $\overset{\circ}{\sigma}$ ermittelt werden. Es ist:

$$\overset{\circ}{\sigma} = \sigma - \sigma_e \quad (6.1)$$

σ : real wirkende Spannung für eine bestimmte Last

$\overset{\circ}{\sigma}$: fiktiv elastische Spannung für eine bestimmte Last

σ_e : Eigenspannung

Zur Ergebniskontrolle muß nun der Verlauf $\overset{\circ}{\sigma}$ proportional zu einem rein elastischen Verlauf sein (z.B. zur zweiten Laststufe). Es ist etwa

$$\sigma_{id} = 2,4 \cdot \sigma_2 \quad (6.2)$$

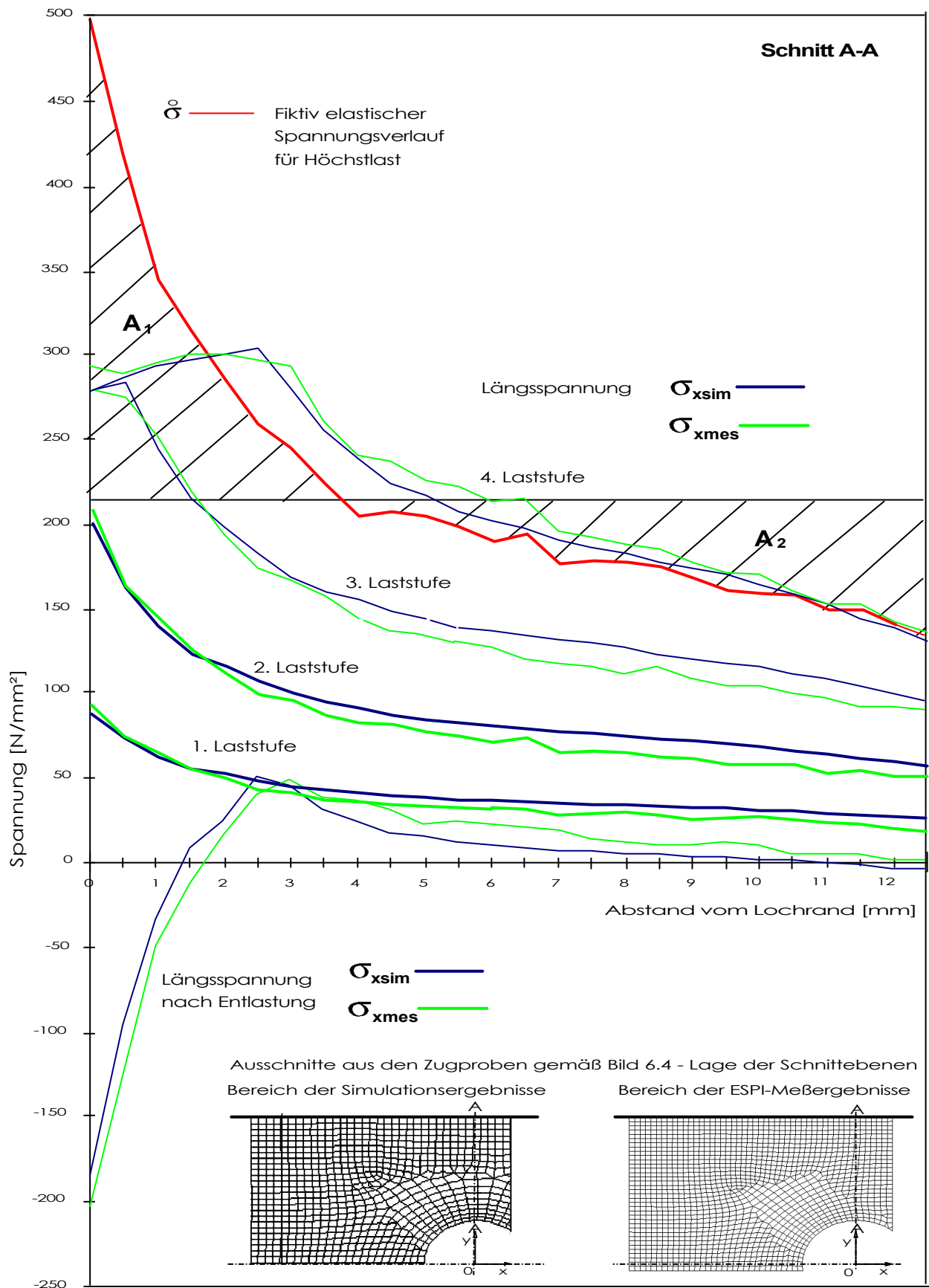


Bild 6.23: Spannungsverläufe bei verschiedenen Laststufen, Vergleich Messung und Simulation. Fiktiv elastischer Spannungsverlauf σ^0 für Höchstlast

6.3.3.2. Tangentialspannungsverlauf

Eine weitere Möglichkeit zur Überprüfung der Qualität der Ergebnisse ist eine Kontrolle der tangential zum Lochrand verlaufenden Spannung σ_φ . Diese ergibt sich aus Gl. (3.19)

in analytischer Form mit $r = a$ zu:

$$\sigma_\varphi = \sigma_0 \cdot (1 - 2\cos 2\varphi) \quad (6.3)$$

In Bild 6.24 ist der theoretische Verlauf nach Gl (6.3) zusammen mit den elementweise ausgelesenen Meßwerten dargestellt. Die Lage der Elemente entsprechend ihrer Elementnummer sind Bild 6.25 zu entnehmen.

Zwischen den beiden Kurven zeigt sich eine gute Übereinstimmung.

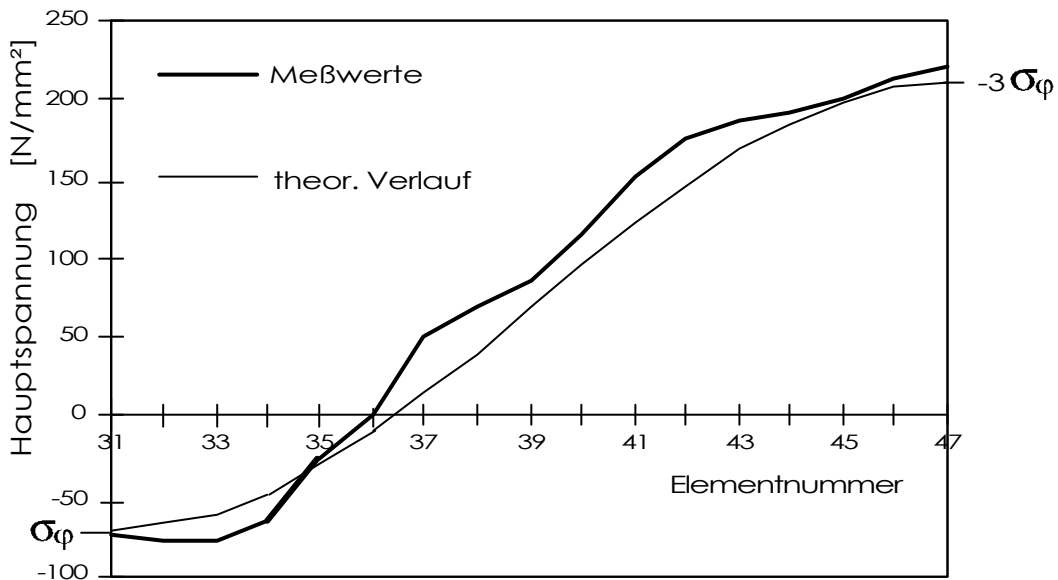


Bild 6.24: Spannungsverläufe σ_φ entlang des Lochrands analytisch berechnet und gemessen

6.3.3.3. Last-Dehnungs-Kurven ausgewählter Elemente

Um die ermittelten flächenhaften Ergebnisse kontrollieren zu können, werden für ausgewählte Punkte die Last-Dehnungs-Kurven aufgezeichnet und auf Plausibilität geprüft.

Nachfolgend werden die Elemente 47, 353, 620, 742 und 162 untersucht. Bild 6.25 zeigt die Lage dieser ausgewählten Elemente.

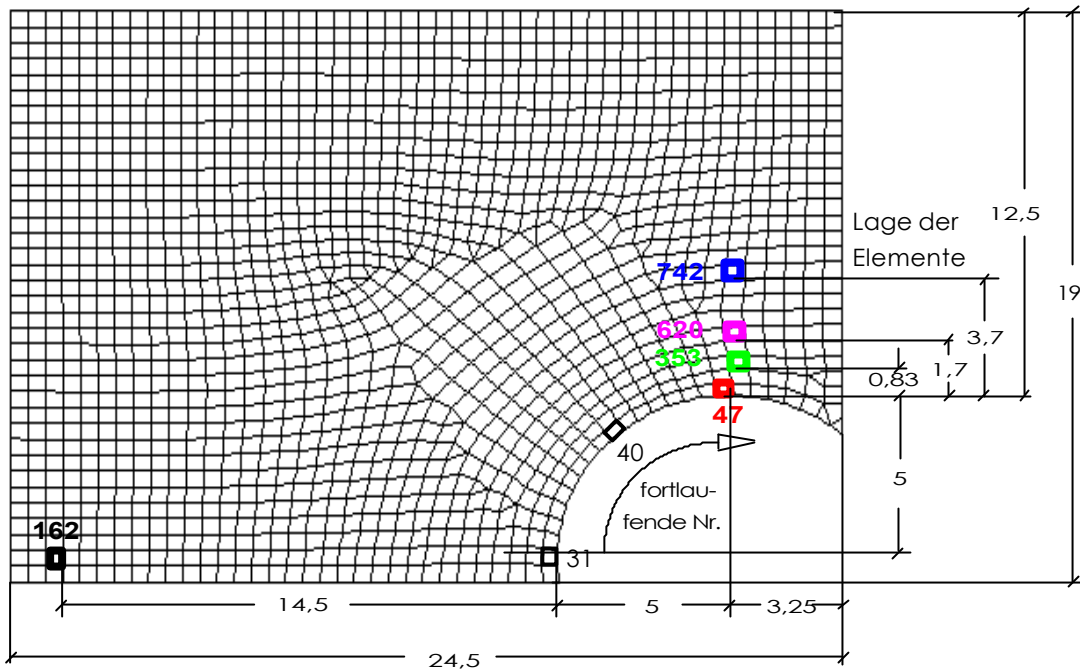


Bild 6.25: Lage der ausgewählten Elemente

Element 47 liegt an der höchstbeanspruchten Stelle am Lochrand: $\sigma_{x_{max}}$

Element 620 liegt am Ort maximaler Querspannung: $\sigma_{y_{max}}$

Durch die Auswahl der Elemente 353, 620 und 742 soll der Verlauf im Querschnitt A-A sichtbar gemacht werden.

Element 162 wurde als Beispiel für den ungestörten Querschnitt gewählt: σ_n

Bild 6.26 zeigt die Last-Dehnungskurven dieser Elemente bei den Laststufen 1, 2 und 4 entsprechend Tab. 6.1.

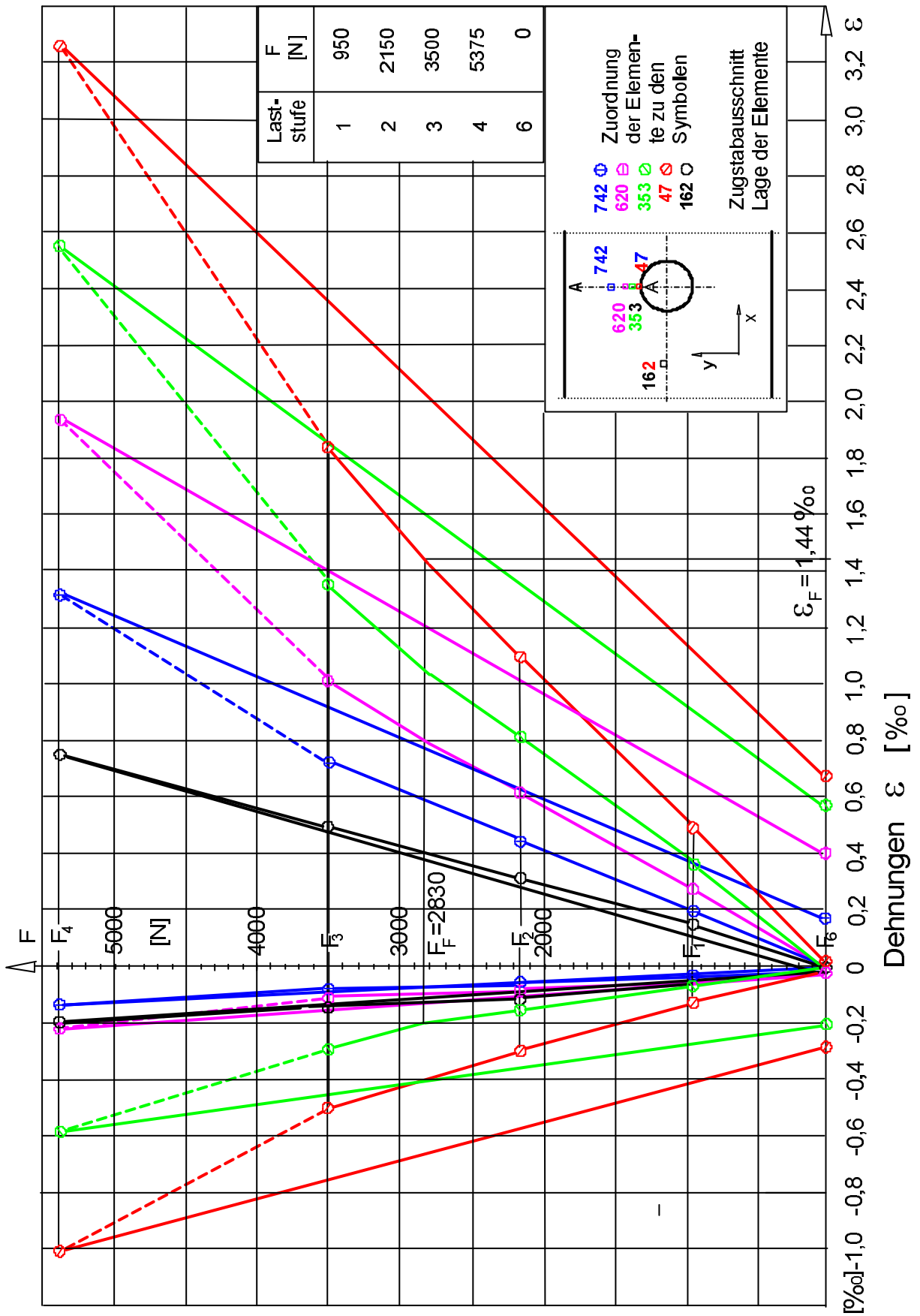


Bild 6.26: Last-Dehnungskurven ausgewählter Elemente, Laststufen 1 - 6

6.3.3.4. Interpretation der Last-Dehnungs-Kurven in Bild 6.26

Elementnr. 162 liegt im ungestörten Querschnitt, der zu erwartende Dehnungsverlauf ist rein elastisch. Der gemessene Verlauf in Bild 6.26 entspricht einem einachsigen Spannungszustand mit $\varepsilon_{\text{quer}}/\varepsilon_{\text{längs}} \approx 0.3$

Elementnr. 47 liegt an der höchstbeanspruchten Stelle am Kerbgrund bei einachsigem Spannungszustand ($\sigma_y=0$). Im elastischen Bereich entspricht der gemessene Verlauf etwa einem einachsigen Zustand ($\varepsilon_{\text{quer}}/\varepsilon_{\text{längs}} = 0.28$). Die Be- und die Entlastungsgeraden sind sowohl bei der Längs- als auch bei der Querdehnung parallel. Die Hooke'sche Gerade wird bei der Fließlast $F_F=2830$ N verlassen, die Dehnung beträgt 0,144% und entspricht dem rechnerischen Betrag $\varepsilon_F = R_e/E$. Der belastete Probenquerschnitt (Schnittebene A-A) beträgt $A=25\text{mm}^2$ somit ergibt sich eine Nennspannung im Restquerschnitt bei Fließbeginn von $\sigma_n = F_F/A = 2830/25 = 113\text{N/mm}^2$. Daraus folgt weiter die Formzahl $\alpha_k = 275/113 = 2,43$. Dies entspricht dem theoretisch ermitteltem Wert gem. Gl. (3.24).

Element 353 bzw. 620 liegt im Bereich bzw. am Rand des Fließgebietes. An den Verhältniszahlen $\varepsilon_{\text{quer}}/\varepsilon_{\text{längs}}$ beider Elemente im elastischen Bereich (Laststufe 1) macht sich der zweiachsige Spannungszustand zunehmend bemerkbar: Für Element 353 liegt das Verhältnis bei 0,2 für Element 620 beträgt es 0,14. Bei dem entfernter liegenden Element 742 beträgt das Verhältnis nur noch 0,13.

Bild 6.26 zeigt die Plausibilität der Meßergebnisse an lediglich fünf beliebig ausgewählten Punkten. Grundsätzlich lassen sich aufgrund der flächenhaften Ergebnisse Last-Dehnungsdiagramme kontinuierlich für jeden beliebigen Ort angeben.

Tab. 6.2 gibt aus den Versuchsergebnissen ausgelesene Spannungs- und Dehnungswerte an, die zur Erstellung von Bild 6.26 erforderlich sind.

Laststufe	Elnr.	$\varepsilon_1/\varepsilon_F$	$\varepsilon_2/\varepsilon_F$	σ_1/R_e	σ_2/R_e	σ_1	σ_2	ε_1	ε_2
10 (lin)	47	0,33	-0,09	0,34	0,01	92,90	2,60	0,49	-0,13
10 (lin)	353	0,25	-0,05	0,26	0,02	70,60	6,50	0,36	-0,08
10(lin)	620	0,18	-0,03	0,19	0,03	53,40	8,10	0,27	-0,04
10(lin)	742	0,13	-0,02	0,14	0,02	38,00	4,50	0,19	-0,04
10(lin)	162	0,10	-0,04	0,10	-0,01	27,80	-2,30	0,15	-0,06
20(lin)	47	0,74	-0,20	0,76	0,02	208,20	5,70	1,09	-0,30
20(lin)	353	0,55	-0,11	0,58	0,06	158,80	16,80	0,81	-0,16
20(lin)	620	0,42	-0,06	0,44	0,08	121,50	20,80	0,61	-0,08
20(lin)	742	0,30	-0,04	0,32	0,06	88,20	15,80	0,44	-0,06
20(lin)	162	0,22	-0,07	0,22	0,00	60,50	-0,50	0,32	-0,10
40(nolin)	47	2,23	-0,70					3,26	-1,02
40(nolin)	353	1,70	-0,40					2,48	-0,58
40(nolin)	620	1,29	-0,15					1,88	-0,22
40(nolin)	742	0,88	-0,10					1,28	-0,14
40(nolin)	162	0,51	-0,14					0,74	-0,20
60(bleib)	47	0,46	-0,19					0,67	-0,28
60(bleib)	353	0,38	-0,14					0,56	-0,21
60(bleib)	620	0,27	-0,02					0,39	-0,03
60(bleib)	742	0,11	0,00					0,16	0,00
60(bleib)	162	-0,01	-0,02					-0,01	-0,02

Tab 6.2: Dehnungs- und Spannungswerte der ausgewählten Elemente

6.3.3.5. Darstellung und Interpretation der Meßergebnisse in der (ε_1 , ε_2)-Ebene

Es werden nachfolgend die aus den Versuchsergebnissen ermittelten Dehnungen in das Diagramm der (ε_1 , ε_2)-Ebene (gem. Bild 4.5) eingetragen, um so den Eigendehnungszustand nach der in 4.3.3 beschriebenen Methode zu konstruieren.

Die konstruierten Eigendehnungswerte können mit den FE-Simulationsergebnissen verglichen werden.

Die Lage der ausgewählten Elemente am Kerbrand zeigt Bild 6.27.

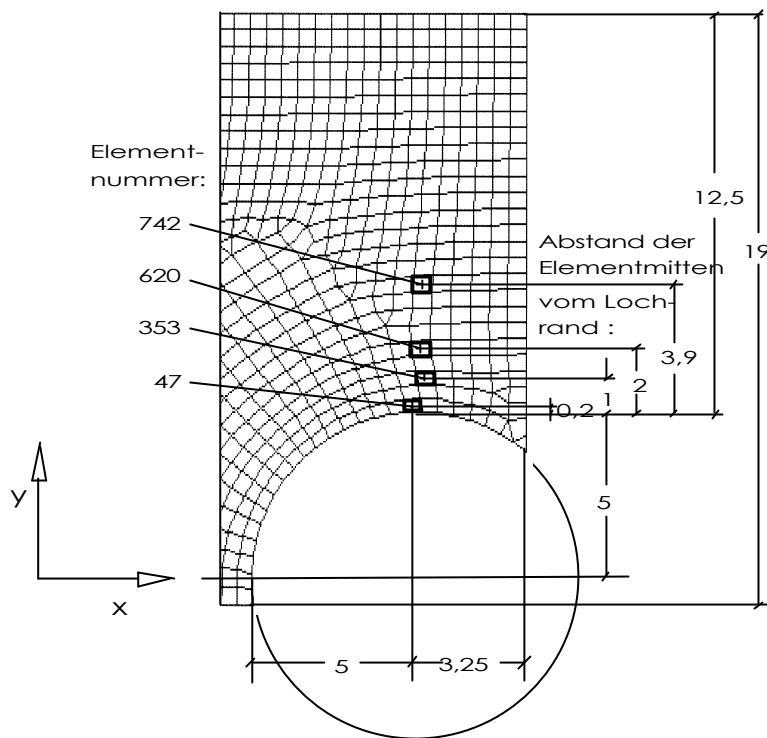


Bild 6.27: Ausschnitt am Lochrand des Elementnetzes für die ESPI-Messung

Die Fließgrenzkurve in **Bild 6.28** stellt in der $(\varepsilon_1, \varepsilon_2)$ -Ebene die Koordinaten des Fließbeginns nach der GEH dar. In dieser Werteebene sind die Dehnungswertepaare aus den Belastungs- und Entlastungsversuchen für die vier Elemente (47, 353, 620 und 742) sowie die durch elastische Rückverformung konstruierten Eigendehnungswerte (K47, K353, K620 und K742) eingetragen.

Ergebnisse am Randelement 47:

Die eingetragenen Dehnungswerte für das Element 47 stellen die Mittelwerte über die gesamte Elementfläche von ca. $0,5 \cdot 0,5 \text{ mm}^2$ dar. Das Element ist deshalb nicht mehr rein einachsig beansprucht. Daher ergibt sich aus den elastischen Lastschritten 1 und 2 ein Dehnungsverhältnis von 0,28. Nach Überschreiten der Fließgrenzkurve nimmt das Dehnungsverhältnis auf 0,33 zu.

Aus elastischer Rückverformung läßt sich der Eigendehnungszustand konstruieren (Kapitel 4.3.3) und kann dann mit den Ergebnissen der FE-Simulation verglichen werden (siehe Bild 6.29).

Weiter sieht man in Bild 6.28, daß bei den nachfolgenden Elementen 353, 620 und 742 die erreichten Dehnungshöchstwerte abnehmen (bei Element 353 und 620 wird erst bei der letzten Laststufe Fließen erreicht). Durch den flacheren Verlauf der elastischen Ge-

raden wird der zunehmende Einfluß der Querspannung erkennbar. Element 742 liegt gerade noch innerhalb des elastischen Bereichs.

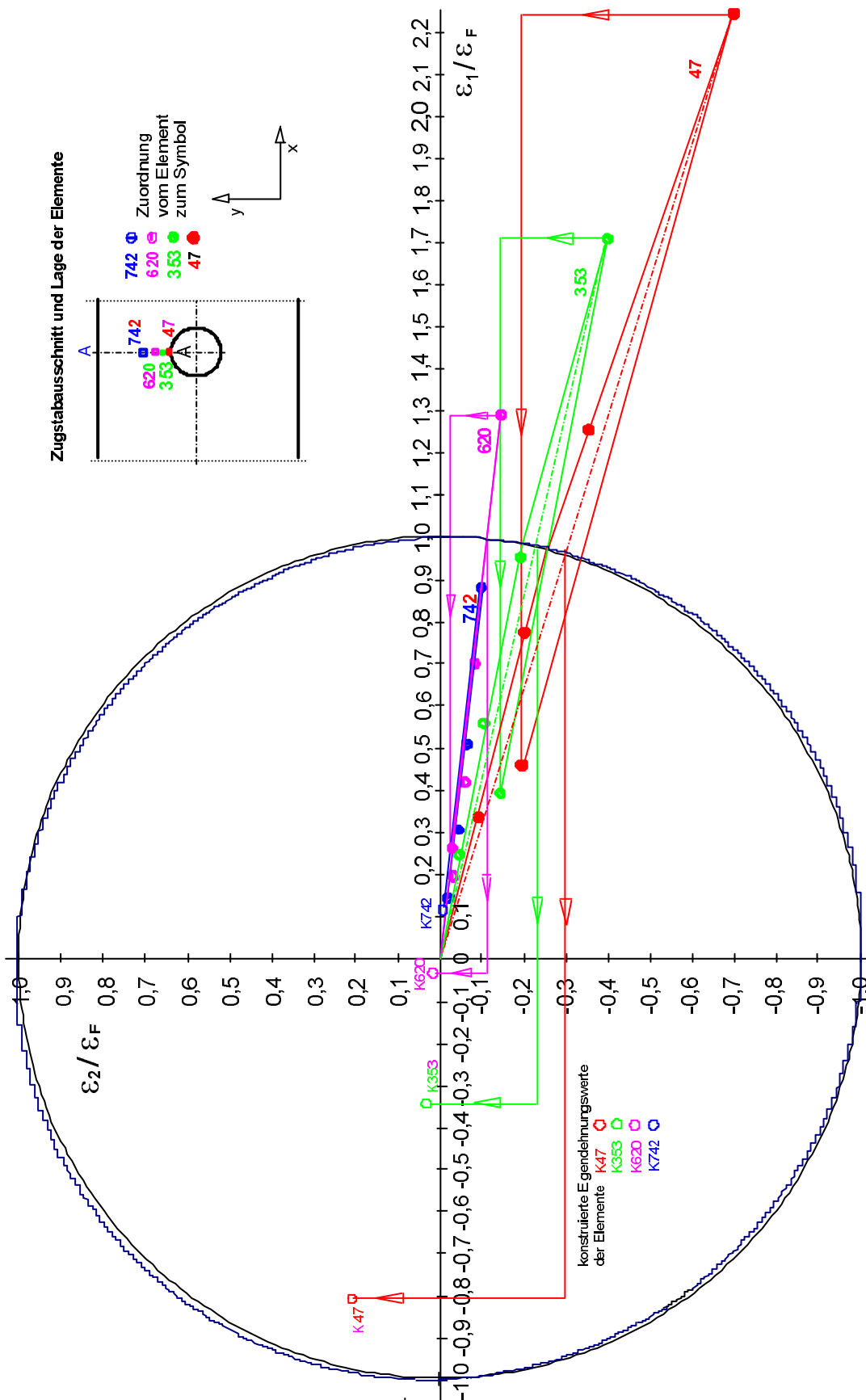


Bild 6.28: Dehnungswerte aus Belastungs- und Entlastungsversuchen sowie konstruierte Eigendehnungswerte

In Bild 6.29 sind die konstruierten Eigendehnungswerte aus Bild 6.28 jenen gegenübergestellt, die mit Hilfe der FE-Simulation ermittelt sind. Der eingetragene, stetige Kurvenverlauf entspricht den simulierten Eigendehnungswertepaaren entlang der Schnittebene A-A, mit zunehmendem Abstand vom Lochrand. Der Ort mit dem Abstand 0 mm vom Rand liegt links auf der Fließgrenzkurve, die ausschnittsweise eingetragen ist.

Es sind die konstruierten Eigendehnungswerte im Schwerpunkt der Elemente K47, K353, K620 und K742 eingetragen. Entsprechend sind im simulierten Verlauf die entsprechenden Orte für die Elemente 47 bzw. 353 mit S47 bzw. S353 markiert, mit den Abständen 0,2 mm bzw. 1,0 mm vom Rand.

Auch der Verlauf der simulierten Eigendehnungen zeigt, daß beim gewählten Zugstab die Eigenspannungswerte schon nach einem Abstand vom Lochrand von etwa 2 mm, dem Ort von Element 620, auf Null abfallen.

Die Ergebnisse in Bild 6.29 zeigen, daß das vorgestellte Verfahren die Anforderung an eine Auflösung im Zehntel-Millimeter-Bereich mit hoher Genauigkeit erfüllt.

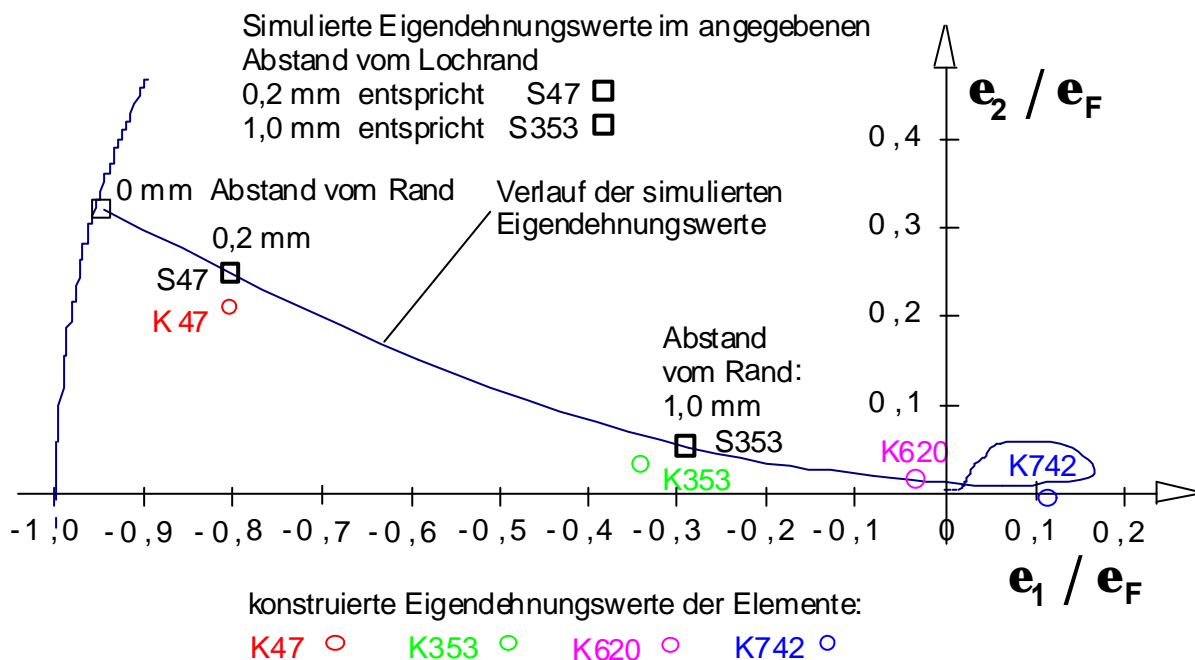


Bild 6.29: Simulierter Eigendehnungsverlauf in der Schnittebene A-A und aus elastischer Rückverformung konstruierte Werte an den Elementen 47, 353, 620 und 742

7. ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Die vorliegende Arbeit zeigt erstmalig, daß durch die Verbindung einer Verformungsmessung mit der Elektronischen-Speckle-Pattern-Interferometrie und der anschließenden Dehnungs- und Spannungsberechnung mit der Finite-Elemente-Methode ein berührungsloses Ganzfeldmeßverfahren vorgestellt werden kann, das insbesondere bei elastisch-plastischer Beanspruchung die quantitative Ermittlung von zweiachsigen Spannungs- und Eigenspannungszuständen auf der Bauteiloberfläche ermöglicht. Hierbei ist die erzielbare Ortsauflösung vom gewählten Meßausschnitt und der CCD Sensorelementgröße abhängig. Eigenspannungswerte können bei der hier gewählten Anordnung bei Abständen vom Lochrand im Bereich von zehntel Millimetern angegeben werden. Diese zeigen dabei immer noch eine sehr gute Übereinstimmung im Vergleich zu FE-Simulationsergebnissen.

Die vorteilhafte Form der Ergebnisdarstellung bestehender FE-Postprozessoren kann hierbei genutzt werden. Die Ergebnisse stehen somit in der Form zur Verfügung, in der sie für die Festigkeitsberechnung erwartet werden.

Der Ermittlung des Eigenspannungszustandes liegen hierbei die Verformungsmessungen bei Höchstlast und nach Entlastung zugrunde. Anders als bei den bekannten, zerstörenden Verfahren werden hier die Vorgänge bei der Entstehung und nicht bei der Auslösung der Eigenspannungen gemessen.

Aus dem gemessenen Verformungsfeld bei Höchstlast wird der plastische Dehnungsanteil mit Hilfe des Fließkriteriums nach von Mises und die bleibenden Dehnungen aus dem gemessenen bleibenden Verformungsfeld nach Entlastung berechnet. Durch Subtraktion dieser Dehnungszustände wird derjenige Eigendehnungszustand ermittelt, mit dem durch lineare Spannungsberechnung der zweiachsige Eigenspannungszustand berechnet wird.

Die Versuchsergebnisse zeigen am bekannten Beispiel der dünnen Scheibe mit Kreisloch elastische und überelastische Spannungs- und Eigenspannungszustände in flächenhafter Verteilung, in Schnitten, an ausgewählten Elementen und Knotenpunkten in einer Darstellungsweise wie bei modellhaften Verfahren (z.B. FE-Methode oder Spannungsoptik /7.1/). Hierbei beruhen die Ergebnisse jedoch auf gemessenen, realen Verformungsvorgängen am Bauteil. Aufgrund der großen Zahl von Meßpunkten ist die Information genauso flächenhaft, anschaulich und somit zuverlässig interpretierbar. Die

Versuchsergebnisse sind quantitativ korrekt und entsprechen den aus der Theorie bekannten Verläufen und den Ergebnissen der FE-Simulation.

Die Darstellung von Meßergebnissen entspricht durch den Einsatz eines FE-Postprozessors der Form, die für die Festigkeitsberechnung erwartet wird und im Bereich der FE-Simulation üblich ist. Im FE-Programm implementierte Algorithmen wie z.B. Fließkriterien können genutzt werden.

Daher ist der Ergebnisvergleich an diesem Beispiel mit der FE-Simulation optimal möglich. Da die Mess- und Simulationsergebnisse so zuverlässig übereinstimmen, kann das vorgestellte Verfahren nun auch zur Spannungs- bzw. Eigenspannungsermittlung an beliebig komplexen Bauteilen mit all ihren unbekanntem Randbedingungen eingesetzt werden.

Die Verformungsmessung ist im Ausschnitt von 18 mm x 24 mm aus einem Abstand von ca. 1,5 m aufgenommen. Der Zeitaufwand von der Messung bis zur Darstellung der Ergebnisse liegt bei etwa einer Stunde. Er kann durch eine weitergehende Automatisierung der einzelnen Schritte (Modellgenerierung, Einlesen der Verformungen etc.) weiter reduziert werden.

Mit dem vierarmigen ESPI-Aufbau ist auch eine dreidimensionale Verformungsmessung möglich. Hierbei werden nur drei Arme für die drei Beleuchtungsrichtungen eingesetzt. Die Dehnungs- und Spannungsberechnung basierend auf den gemessenen Verformungen ist auch mit dem hier eingesetzten FE-Programm TP2000 möglich. Jedoch muß hierfür die dreidimensionale Bauteilform meßtechnisch erfaßt werden. Verfahren zur Formerfassung stehen zur Verfügung /2.5/. Die Oberfläche sollte dann in standardisiertem CAD Format (VDAFS oder IGES /7.2, 7.3/ dem FE-Programm zur Modellgenerierung übergeben werden.

Durch weitere Verbundanwendungen mit Verformungsmeßverfahren wie z.B. Moiré- oder holographische Verfahren können weitere Meßverfahren mit neuen Eigenschaften bezüglich Meßbereich und Genauigkeit entwickelt werden. Grundlage hierfür ist das Modul Dehnungs- und Spannungsberechnung aus Meßdaten, um das das FE-Programm TP2000 erweitert ist.

8. LITERATUR

- /1.1/ Kussmaul, K.:
Festigkeitslehre 1, Vorlesungsmanuskript 18. Auflage 1994
Lehrstuhl für Materialprüfung, Universität Stuttgart
- /1.2/ Wellinger, K., Dietmann, H.:
Festigkeitsberechnung, Alfred Kröner Verlag Stuttgart, 1976
- /1.3/ Schwarz, T; Kockelmann, H:
Die Bohrlochmethode - ein für viele Anwendungsbereiche optimales
Verfahren zur experimentellen Ermittlung von Eigenspannungen
Messtechnische Briefe 29, Heft 2, S. 33-38, 1993
- /1.4/ Kockelmann, H.:
Mechanical Methods of Determining Residual Stresses
In: Residual Stresses, Measurement, Calculation, Evaluation,
V. Hauk, H. Hougardy, E. Macherauch:
DGM Informationsgesellschaft, S. 37-52, 1990
- /1.5/ Tietz, H.-D.:
Grundlagen der Eigenspannungen
Verlag für Grundstoffindustrie Leipzig, 1983
- /1.6/ Hauk, V.; Kockelmann, H.:
Zur Spannungsermittlung mit Röntgenstrahlen an porösen Werkstoffen
Materialprüfung 19, Vol. 4, S. 148-151, 1977
- /1.7/ Dieter G. E.:
Mechanical Metallurgy
McGraw-Hill Int. Book Company, S. 580-581, 1984
- /1.8/ Goldenbogen, S.:
Eine Beitrag zur röntgenographischen Untersuchung des
Eigenspannungszustandes in Oberflächenschichten mit hohen kristallinen
Störungszustand, Dissertation TU Dresden, 1995
- /1.9/ Zienkiewicz, O.C.:
Methode der finiten Elemente, 2. Auflage
Carl Hanser Verlag, 1984
- /1.10/ Guan, J.:
Entwicklung eines 3D-FEM Programm Moduls zur Simulation thermischer
Eigenspannungen im Giessprozeß
Dissertation, TH Aachen, 1994

- /1.11/ Bacher-Höchst, M.:
Moderne Methoden der experimentellen Spannungsanalyse und deren
Anwendung im Verbund mit numerischen Verfahren bei der Bauteiloptimierung
Stuttgart, VDI Berichte Nr. 1021, 1993
- /1.12/ Jones, R.; Wykes, C.:
Holographic and Speckle interferometry, 2nd Edition
Cambridge University Press 1989
- /1.13/ Tiziani, H.-J.:
in D. Bimberg: Meßtechniken mit Lasern, Kapitel 5 und 6
Expert Verlag, 1993
- /1.14/ Ettemeyer A., Wang Z.:
Verformungs- und Dehnungsfeldermittlung am Schweißpunkt mit 3D Speckle-
Meßverfahren, Technisches Messen 98, Oldenbourg Verlag, 1998
- /1.15/ Steinchen, W.:
Shearografie: Ein laseroptisches Verfahren zur zerstörungsfreien Prüfung und
Dehnungsmessung
Technica, Ruppertswil, Band 45 Heft 11, Seite 37 - 42, 1996
- /2.1/ Dietmann, H.:
Einführung in die Elastizitäts- und Festigkeitslehre
Alfred Kröner Verlag Stuttgart, S. 135 ff, 1982
- /2.2/ N.N.:
Standard Test Method for Determining Residual Stresses by the Hole-
Drilling-Strain-Gage Method ASTM E 837 - 92
- /2.3/ Schröder, J.:
Untersuchungen über den Eigenspannungszustand in reibgeschweißten
Rohren von Superlegierungen mit Hilfe der Neutronendiffraktometrie
Dissertation, TU Hamburg-Harburg, 1993
- /2.4/ H.D. Tietz:
Ultraschall-Meßtechnik
VEB Verlag Technik Berlin, 1969
- /2.5/ Zou, Yunlu:
Speckleinterferometrie zur Topografiebestimmung an optisch rauhen Oberflä-
chen, Dissertation ITO, Universität Stuttgart, 1996
- /2.6/ Tiziani, H.-J., Pedrini, G.:
Double Pulse Speckle Interferometry for Vibration Analysis, Application of
Holography, Expert Verlag 1995
- /2.7/ Tiziani H.-J., Pedrini G.:
Digital double pulse-holographic interferometry for vibration analysis,
Shock and Vibration, vol. 2, No. 2, p. 117-125, 2/1996

- /2.8/ Klingele, H.:
Rekonstruktion des Schallfeldes schwingender Objekte unter Verwendung holographischer Meßtechniken
Dissertation TU München, 1995
- /2.9/ H.-J. Tiziani:
Oberflächenvermessung und Defekterkennung
Laser und Optoelektronik 30(2)/1998
- /2.10/ G. Kupfer, M. Schuth, W. Steinchen:
Shearografie für die QS besser als Hologramm-Interferometrie?
QZ Band 40, Carl Hanser Verlag, München 1995
- /2.11/ Steinbichler H. und Engelsberger:
Optisches Dehnungsmeßsystem auf Laserbasis zum Einsatz für Temperaturen über 1500°C, Fachgruppe Holographie und Specklemeßtechnik, 1998
- /2.12/ Zhang, H.; Ke, J.:
Determination of residual stresses using laser speckle shearing interferometry and hole drilling method
Journal of Experimental Mechanics 1, S. 181-188, 1986
- /2.13/ WU, S. Y.; Qin, Y. W.:
Determination of Residual Stresses Using Large Shearing Speckle Interferometry and the Hole Drilling Method
Optics and Lasers in Engineering 23, S. 233-243, 1995
- /2.14/ Ettemeyer-A.:
Berührungslose Spannungsanalyse über die gesamte Oberfläche mittels laseroptischem Dehnungssensor
Österreichische Ingenieur- und Architektenzeitschrift, Band 142, Heft 5, Seiten 401-404, 1997
- /3.1/ Kirsch, G.:
Die Theorie der Elastizität und die Bedürfnisse der Festigkeitslehre
Zeitschrift des Vereins Deutscher Ingenieure, 42, S. 797-807, 1898
- /3.2/ Dietmann, H:
Berechnung der Fließkurven von Bauelementen bei kleinen Verformungen.
Habilitationsschrift. Stuttgart: Universität 1969
- /3.3/ Rühl, K.: Die Tragfähigkeit metallischer Baukörper, Berlin 1952
- /3.4/ Von Mises, R.:
Mechanik der plastischen Formänderung der Kristalle
In: Zeitschrift für angewandte Mathematik und Mechanik,
Heft 8 Band 3, Berlin, 1928
- /4.1/ Lauterborn, W.; Kurz, T.; Wiesenfeldt, M.:
Kohärente Optik
Darmstadt, Springer-Verlag 1993

- /4.2/ Bauer, H.:
Lasertechnik
Vogel Fachbuch, Kamprath-Reihe Würzburg, 1991
- /4.3/ Fercher, A.F.:
Speckleinterferometrie und Specklephotographie
In: Laser in Industrie und Technik
Sindelfingen, Expert Verlag, 1985
- /4.4/ Breuckmann, B.; Thieme, W.:
Computer aided analysis of holographic interferograms using the phase-shift-
method
Applied Optics 24, S. 2145, 1985
- /4.5/ Steinbichler, H.:
Ein Beitrag zur quantitativen Auswertung von holographischen
Interferogrammen
Dissertation TU München, 1973
- /4.6/ N.N.:
Benutzerhandbuch FRAMES-DT
Steinbichler Optotechnik GmbH
- /4.7/ Jüptner, W.; Osten, W.:
Proceedings of the 2nd International Workshop on Automatic Processing of
Fringe Patterns
FRINGE '93, Akademie-Verlag, 1993
- /4.8/ Pfister, B.:
Speckleinterferometrie mit neuen Phasenschiebemethoden,
Dissertation ITO, Universität Stuttgart, 1993
- /4.9/ Creath, K.:
Phase-shifting holographic interferometry, in Holographic Interferometry,
ed. Rastogi P.K., Springer-Verlag, Berlin, 1994, S. 109 - 150
- /4.10/ Groth, P.:
Finite-Elemente in der computerunterstützten Konstruktion
T-Programm GmbH, Reutlingen
- /4.11/ Dietmann, H.:
Methoden der elastisch-plastischen Festigkeitsberechnung,
Vorlesungsmanuskript SS 1995, Lehrstuhl für Materialprüfung,
Werkstoffkunde und Festigkeitslehre, Universität Stuttgart
- /4.12/ Faiss, H.:
Fließ-Untersuchungen ohne und mit verbleibenden Verzerrungen
Persönliche Mitteilung Januar 1996

- /4.13/ Brodt, M.; Knoll, S.:
Entwicklung eines 3-D-Speckleinterferometers zur Bestimmung des
räumlichen Verformungsvektors
Fachhochschule für Technik Esslingen, Diplomarbeit, 1993
- /4.14/ N.N.:
Handbuch SAMCEF Bacon References M2B
Firma Samtech, Belgien 1995
- /4.15/ N.N.:
Finite-Elemente TP2000, Version 1.0
Firma IGF Pfullingen
- /4.16/ N.N.:
FE-Postprozessor ELIAS, Version 3.01
DGN GmbH, 1992
- /7.1/ Wolf, H.:
Spannungsoptik
Springer Verlag 1961
- /7.2/ N.N.:
IGES: Digital Representation for Communication of Productdefinition
- /7.3/ N.N.:
VDAFS: 1.0
Verband des Automobilverbandes e.V. (VDA) Frankfurt, 1983