

Lehrstuhl für Umformtechnik

Department Product Engineering,

Montanuniversität Leoben



DIPLOMARBEIT

VERFAHREN ZUR MESSUNG VON
EIGENSPANNUNGEN IN EISENBAHNSCHIENEN

Mario Stefenelli

Studienrichtung Werkstoffwissenschaften

März 2011

Eidesstattliche Erklärung

Ich erkläre an Eides statt, dass ich diese Arbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel nicht benutzt und mich auch sonst keiner unerlaubten Hilfsmittel bedient habe.

Leoben, März 2011

Mario Stefenelli

Danksagung

Ich möchte einigen Personen, die am Zustandekommen dieser Diplomarbeit direkt oder indirekt beteiligt waren, meinen Dank aussprechen:

Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. mont. Bruno Buchmayr für die Möglichkeit diese Arbeit am Lehrstuhl für Umformtechnik verfassen zu dürfen und dem Geschäftsführer des MCL Ao.Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. mont. Reinhold Ebner für das in mich gesetzte Vertrauen und die Betrauung mit dieser Arbeit.

Mein besonderer Dank gilt Dipl.-Ing. Dr. mont. Thomas Hatzenbichler für die hervorragende Betreuung und die Projektleitung, Dr. Jozef Keckes für seine Unterstützung und Expertise im Bereich der Eigenspannungsmessung mit Strahlung und Dipl.-Ing. Robert Kaiser für die Umsetzung der Simulationen. Darüber hinaus hatten alle drei immer ein offenes Ohr für Fragen und Zeit für die Diskussion von Ergebnissen. Ihre vielen Anregungen, Kritiken und Änderungsvorschläge waren eine große Unterstützung beim Verfassen dieser Arbeit.

Den Mitarbeitern der voestalpine Schienen GmbH und der voestalpine Stahl Donawitz GmbH & Co KG danke ich für die Bereitstellung der Proben und für das Durchführen der Referenzmessungen. Bei den Firmen SSC Prototypen-Anlagenbau GmbH und Carl Zeiss Industrielle Messtechnik Austria GmbH möchte ich mich dafür bedanken, dass sie die Messungen zur Konturmethode ermöglicht haben.

Ich danke meinen Eltern und Großeltern, die mir dieses Studium ermöglicht haben und mir in dieser Zeit immer zur Seite standen. Meiner Freundin danke ich, dass sie mir in der Abschlussphase meines Studiums ein beständiger und liebevoller Partner war. Zu guter Letzt gilt mein Dank allen meinen Freunden für die schöne Studienzeit, die wir gemeinsam verbracht haben.

Kurzfassung

Zur Verbesserung der Eigenschaften von Eisenbahnschienen ist es notwendig, den Spannungszustand im Inneren der Schienen zu beeinflussen und zu bestimmen. Dazu ist ein geeignetes Messverfahren von Nöten, denn mit der in der Industrie üblichen DMS-Messung ist dies nur schwer möglich.

In der vorliegenden Arbeit wird ein Überblick über die modernen Verfahren zur Spannungsmessung gegeben und diese hinsichtlich ihrer Umsetzbarkeit, Genauigkeit, Kosten und Aufwand bewertet. Maßgebliches Kriterium ist die Möglichkeit zur Messung von Längseigenstress in Schienen. Als die drei aussichtsreichsten Verfahren für die praktische Anwendung wurden die Messung mit Neutronen, die Konturmethode und die transverse/oblique slicing (T/O-S) Methode ausgewählt.

Im experimentellen Teil wurden exemplarische Versuche an gerichteten und ungerichteten Schienen durchgeführt. Bei der Anwendung der T/O-S Methode zeigte sich, dass nicht jeder Spannungszustand rekonstruiert werden kann und somit die Anwendung in diesem Fall nicht möglich ist. Die Messung mit Neutronen ist aufwändig, eignet sich jedoch am besten zur Ermittlung von Referenzwerten im Inneren der Schiene. Mit der Konturmethode können die Längseigenstress sehr schnell und einfach über den gesamten Querschnitt bestimmt werden. Die beiden letzteren Methoden zeigen eine gute Übereinstimmung untereinander und in den Randbereichen mit den Ergebnissen der DMS-Messungen.

Abstract

In order to optimize properties and performance of railroad rails it is necessary to control the residual stress states inside the rail. Therefore a capable method for residual stress characterization is required. As an application of strain gauges, which is the industrial standard, does not provide this option.

This thesis provides an overview of modern experimental methods of residual stress characterization in rails and evaluates the feasibility, accuracy, laboriousness and costs for the use of the individual techniques. The core criterion is the ability to determine the longitudinal residual stresses. The transverse/oblique slicing (T/O-S) technique, the neutron diffraction characterization and the contour method are identified as three approaches with the greatest potential to substitute the strain gauge technique.

Within the experimental part, test measurements on straightened and unstraightened rails were performed. The application of the T/O-S technique indicated that the approach has some limitations and thus cannot be used to reconstruct the original three dimensional residual stress fields in this case. The measurements with neutrons were time consuming but best suited to obtain benchmarks for the residual stresses inside the rail. The contour method provided an easy way to map the longitudinal stresses across the entire cross section. Both contour and neutron techniques show similar trends and are in good accordance with the strain gauge measurements.

Inhaltsverzeichnis

Eidesstattliche Erklärung	I
Danksagung	II
Kurzfassung	III
Abstract	IV
Inhaltsverzeichnis	V
Abkürzungsverzeichnis	VII
Symbolverzeichnis	VIII
1 Einleitung	1
2 Verfahren zur Messung von Eigenspannungen	3
2.1 Zerstörende Verfahren	3
2.1.1 Zerlegeverfahren	3
2.1.2 Sägeschnitt	5
2.1.3 Bohrloch- und Ringkernmethode	5
2.1.4 Interferometrie	7
2.1.5 Die Konturmethode	9
2.2 Zerstörungsfreie Verfahren	11
2.2.1 Strahlungsmethoden	11
2.2.2 Magnetische Verfahren	20
2.3 T/O-S Methode	23
3 Bewertung und Auswahl	27
3.1 Bewertung der Verfahren	27
3.2 Bewertungsmatrix	31
3.3 Gewählte Verfahren	32

4	Experimentelle Beurteilung der ausgewählten Verfahren	33
4.1	Referenzwerte	33
4.2	Intakte Schiene	34
4.3	Neutronenbeugung	35
4.3.1	Anforderungen	35
4.3.2	Messungen	36
4.3.3	Probleme	37
4.3.4	Ergebnisse	37
4.4	Konturmethode	40
4.4.1	Schneiden der Schiene	40
4.4.2	Vermessen der Schnittfläche	40
4.4.3	Rückführen der Verschiebungen	42
4.4.4	Ergebnisse	42
4.5	T/O-S Methode	45
4.5.1	Ansatz	45
4.5.2	Versuch am einfachen Modell	45
4.5.3	Ergebnisse	45
5	Diskussion der Ergebnisse	49
6	Zusammenfassung	52
7	Ausblick	54
	Abbildungsverzeichnis	55
	Tabellenverzeichnis	57
	Literaturverzeichnis	58

Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Erläuterung
3MA	Micromagnetic Multiparameter Microstructure and Stress Analysis
BER II	Berliner Experimentier-Reaktor II
DMS	Dehnmessstreifen
FEM	Methode der finiten Elemente
HZB	Helmholtz-Zentrum Berlin für Materialien und Energie
IZFP	Fraunhofer-Institut für zerstörungsfreie Prüfverfahren
KMM	Koordinatenmessmaschine
KS	Koordinatensystem
LUT	Lehrstuhl für Umformtechnik an der Montanuniversität Leoben
MAPS	Magnetic Anisotropy and Permeability System
OS	schräge Scheibe (oblique slice)
T/O-S	transverse/oblique slicing
TS	transversale Scheibe
VASCH	voestalpine Schiene GmbH
Y/M	Yasojima und Machii

Symbolverzeichnis

Variablen

φ	Azimutwinkel
Θ	Beugungswinkel
$d(hkl)$	Netzebenenabstand
$d_0(hkl)$	Netzebenenabstand des unverspannten Gitters
E	E-Modul
ε	Dehnung
$\varepsilon(hkl)$	Dehnung des Gitters
ψ	Kippwinkel
$Err(\varepsilon)$	Messfehler
t	Messzeit
$\bar{Q}(hkl)$	Streuvektor
ν	Querkontraktionszahl
σ	Spannung
$\underline{\sigma}$	Spannungstensor
λ	Wellenlänge

Einheiten

Å	Ångström
keV	Kiloelektronenvolt
MPa	Megapascal
m	Meter
µm	Mikrometer
mm	Millimeter
cm	Zentimeter

1 Einleitung

Eigenstressen I. Art haben einen wesentlichen Einfluss auf die Lebensdauer von Eisenbahnschienen und sind damit ein wichtiges Qualitätskriterium. Dies wird dadurch unterstrichen, dass die maximal zulässigen Eigenstressen in der Norm [1] festgelegt sind. Im Zuge des Projektes „Eigenstressenoptimiertes Richten von Eisenbahnschienen“, das in Zusammenarbeit mit der voestalpine Schienen GmbH (VASCH) und der voestalpine Stahl GmbH durchgeführt wird, soll ein Methode der finiten Elemente (FEM)-Modell zur Vorhersage der Krümmung und der Eigenstressen von Eisenbahnschienen entwickelt werden. Dieses Projekt verlangt nach einem Verfahren, mit dem auch der Eigenstressenzustand im Inneren der Schiene zuverlässig bestimmt werden kann. Mit dem Verfahren soll einerseits der Ausgangszustand (Eigenstressen der ungerichteten Schiene) ermittelt werden. Andererseits sollen die Ergebnisse der Simulation durch Messungen an der gerichteten Schiene verifiziert werden.

Stand der Technik in der industriellen Praxis ist die Bestimmung der Eigenstressen durch mechanisches Zerlegen, wobei die Dehnungsmessung durch Dehnmessstreifen (DMS) erfolgt. Diese Methode ist jedoch sehr arbeitsintensiv und zeitaufwändig. Dazu kommt noch ein in seiner Größe unbekannter Fehler, der durch das Schneiden entsteht. Dem gegenüber stehen eine Vielzahl von weiteren Verfahren, die in den letzten Jahren ständig weiterentwickelt wurden.

Im ersten Teil dieser Arbeit wird ein Überblick über die modernen Verfahren zur Bestimmung von Eigenstressen I. Art gegeben. Dabei wurde besonderes Augenmerk auf die zerstörungsfreien Methoden gelegt. Die recherchierten Verfahren wurden auf Basis der Fachliteratur dahingehend bewertet, ob sie für die Messung von Eigenstressen in Eisenbahnschienen geeignet sind, und ob sie in der Lage sind, die aktuell angewandten Zerlegeverfahren zu ersetzen oder zu ergänzen. Von dieser Bewertung ausgehend wurden die drei für die Aufgabe aussichtsreichsten Verfahren ausgewählt.

Im zweiten Teil der Arbeit wurden die identifizierten Verfahren dazu verwendet, Messungen an Schienen des Profils 60E1 aus der Produktion der VASCH durchzuführen. Ziel dieser Versuche ist es, die technische Umsetzbarkeit der gewählten Verfahren zu überprüfen und die Qualität der Ergebnisse zu beurteilen. Als Vergleichsmaßstab dienen Messungen der VASCH mit DMS nach der aktuell verwendeten Methode. Zusätzlich sollen die für das Projekt notwendigen Daten ermittelt werden. Dazu wurde versucht, ein möglichst

genaues und detailliertes Bild des Eigenspannungszustandes der Schiene zu erstellen, das idealerweise alle drei Raumrichtungen erfasst. Vorrangig dabei ist jedoch die Messung der Eigenspannungen in Längsrichtung.

2 Verfahren zur Messung von Eigenspannungen

In der Fachliteratur finden sich eine Vielzahl von Verfahren zur Messung von Eigenspannungen. Ein guter allgemeiner Überblick über die Standardverfahren ist in [2] zu finden. Die hier vorgestellten Verfahren wurden bereits durchwegs zur Messung von Eigenspannungen in Schienen verwendet.

2.1 Zerstörende Verfahren

Gemeinsames Merkmal aller zerstörender Verfahren ist, dass man die Eigenspannungen an einer freien Fläche relaxieren lässt und die daraus resultierende Veränderung (z. B. Dehnungen, Verschiebungen, Risse) der Probe gemessen wird. Je nach Verfahren erfolgt die Messung bereits während oder nach dem Relaxieren der Spannungen. Aus den gemessenen Veränderungen, z. B. Dehnungen oder Verschiebungen, können in weiterer Folge Eigenspannungen berechnet werden [2].

2.1.1 Zerlegeverfahren

Zerlegeverfahren sind die bekanntesten und am meisten verbreitetsten Verfahren zur Eigenspannungsmessung in Eisenbahnschienen. Grundlegender Ansatz jedes Zerlegeverfahrens ist, dass eine mit DMS bestückte Probe aus der Schiene geschnitten wird. Die Eigenspannungen werden an den Schnittflächen freigesetzt. Aus den resultierenden Dehnungen werden die Eigenspannungen berechnet. Die Wahl der Schnitte obliegt dabei dem Experimentator, es haben sich jedoch Standardverfahren etabliert. Im Anwendungsbereich Schiene sind dies z. B. das Battelle 3D Verfahren oder das Sägeschnittverfahren.

2.1.1.1 Battelle 3D Verfahren

Das Battelle 3D Verfahren [3] ist das umfangreichste Zerlegeverfahren und ermöglicht die Bestimmung des vollständigen triaxialen Spannungstensors. Es vereint zwei grundlegende Methoden. Die von Meier [4] zur Bestimmung der longitudinalen Eigenspannungen,

sowie jene von Yasojima und Machii (Y/M) [5] zur Bestimmung der Eigenspannungen in einer Scheibe. Somit ist es ein gutes, repräsentatives Beispiel für alle Zerlegeverfahren. In Abb. 2.1 sind, die bei dem Battelle 3D Verfahren vorgenommenen, Schnitte gezeigt. Der Y/M Schnitt ist eine transversale Scheibe (TS) mit einer Dicke von ca. 4 mm, die aus der Schiene geschnitten wird. Im Gegensatz zur ursprünglich von Y/M entwickelten Methode werden die Eigenspannungen nicht am Rand der Scheibe gemessen, sondern die Scheibe wird in ca. $4 \times 4 \times 4$ mm große Würfel geschnitten. An jedem dieser Würfel wird an einer der ursprünglichen Schnittflächen ein biaxialer DMS appliziert. Auf diese Weise erhält man die Dehnungen in der Scheibe ($\varepsilon'_{xx}, \varepsilon'_{xy}, \varepsilon'_{yy}$) aus denen man die Eigenspannungen ($\sigma'_{xx}, \sigma'_{xy}, \sigma'_{yy}$) berechnen kann. Da in der Scheibe die longitudinale Spannungskomponente (σ_{zz}) beim Schneiden relaxiert und auch die Spannungen in der Ebene beeinflusst werden, sind zusätzliche Informationen notwendig, um den vollständigen Spannungstensor zu erhalten. Beim Battelle 3D Verfahren werden dazu aus dem Meier Schnitt, korrespondierend zu jedem Würfel aus dem Y/M Schnitt, Stäbe geschnitten. Aus deren Längenänderung erhält man die longitudinale Dehnung ε_{zz} . Nun kann der komplette triaxiale Spannungstensor bestimmt werden [3, 6, 7].

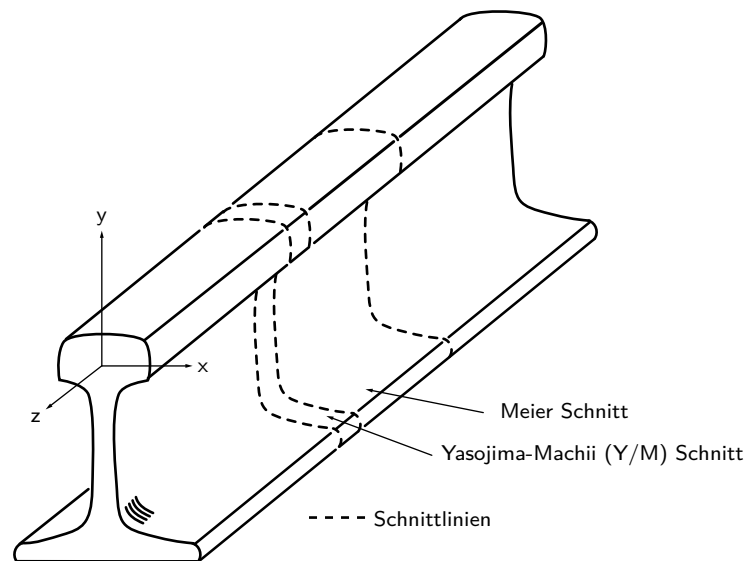


Abbildung 2.1: Battelle 3D Verfahren: Die beim Battelle 3D Verfahren vorgenommenen Schnitte und ihre Bezeichnungen, nach [6].

2.1.2 Sägeschnitt

Ein zweites wichtiges Zerlegeverfahren im Zusammenhang mit Schienen ist jener Versuch, den die Norm [1] zur Bestimmung der longitudinalen Eigenspannung im Fuß der Schiene vorschreibt. Die Methode wird oftmals als Sägeschnittverfahren bezeichnet. Dabei wird aus einer Probe von 1 m Länge in der Mitte eine Scheibe von 2 cm Dicke herausgeschnitten (Abb. 2.2). Der DMS wird vor dem Schneiden in der Fußmitte platziert. Danach wird die Scheibe aus der Schiene geschnitten, wobei die Schiene gekühlt wird. Die Eigenspannung wird aus der verbleibenden Dehnung nach beiden Schnitten berechnet [1].

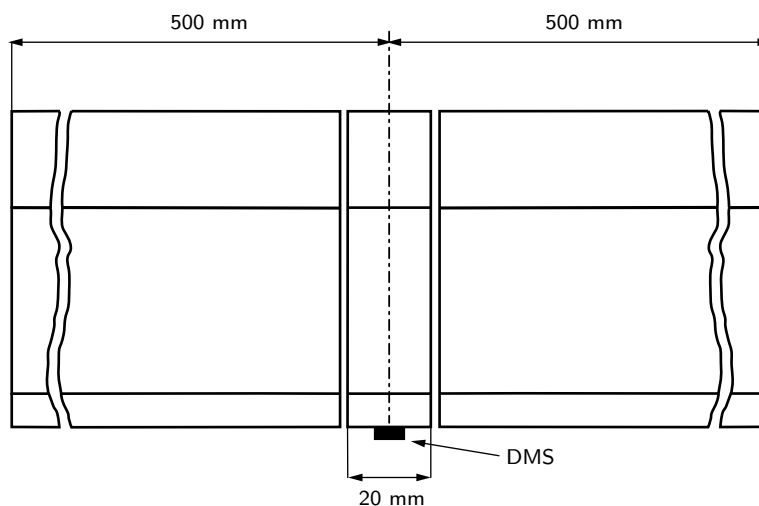


Abbildung 2.2: Sägeschnitt: Lage der Schnitte und Position des DMS beim Sägeschnitt, nach [1].

2.1.3 Bohrloch- und Ringkernmethode

Diese Verfahren ermöglichen die Messung von Eigenspannungen mit nur geringer Zerstörung der Probe. Die Messgröße zur Bestimmung der Eigenspannungen sind bei der Bohrlochmethode die am Rand des Bohrloches auftretenden Dehnungen. Bei der Ringkernmethode wird ein Zylinder aus der Probe geschnitten. Durch das Freisetzen der Eigenspannungen an der Mantelfläche verändert sich der Durchmesser des Zylinders. In beiden Fällen werden die Dehnungen mit speziellen Rosetten-DMS gemessen. Die Platzierung der DMS ist für beide Verfahren in Abb. 2.3 gezeigt. Mit der Bohrlochmethode können auch Tiefenprofile erstellt werden. Dazu wird das Bohrloch schrittweise tiefer gebohrt und

bei jedem Schritt die Dehnungen am Rand gemessen. Zur Auswertung gibt es spezielle mathematische Verfahren wie z. B. die Integralmethode [2].

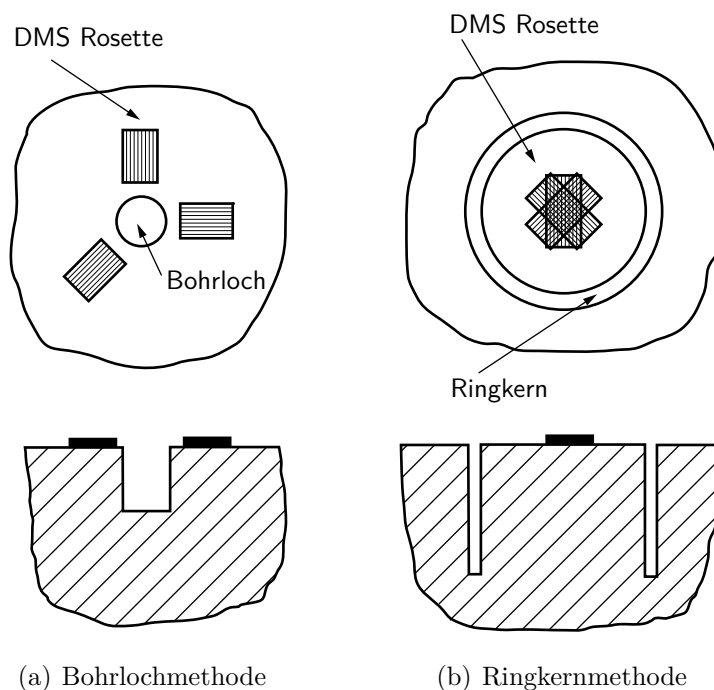


Abbildung 2.3: Bohrloch- und Ringkernmethode: Platzierung der DMS bei der (a) Bohrlochmethode und der (b) Ringkernmethode, nach [2].

Beiden Methoden müssen vor der ersten Messung kalibriert werden. Alle Auswerteverfahren verlangen nämlich nach sogenannten Kalibrierungskonstanten, welche die Einflüsse des Messaufbaus, der Handhabung, des Materialverhaltens, des Bohrllochdurchmessers und der DMS-Geometrie berücksichtigen. Diese müssen für jeden Werkstoff, Bohrllochdurchmesser und DMS-Typ separat ermittelt werden. Die Bestimmung erfolgt zumeist experimentell, es gibt aber auch Ansätze zur theoretischen Bestimmung mit Hilfe von FEM [2].

Anwendung bei Eisenbahnschienen

Stefanescu et al. [8] kombinierten bei ihren Messungen die Bohrloch- mit der Ringkernmethode und bestimmten auf diese Weise die Eigenspannungen entlang der Mittelachse über die gesamte Höhe der Schiene. Dabei wurde im ersten Schritt ein Loch entlang des Messpfades gebohrt und dabei mit Hilfe der Integralmethode ein Tiefenprofil erstellt. Im

zweiten Schritt kam die Ringkernmethode zum Einsatz, wobei der Ring durch Funkenerodieren aus der Schiene geschnitten wurde. Im Gegensatz zur normalen Ringkernmethode wurde die Veränderung des Durchmessers nicht mit einem DMS bestimmt, sondern durch Bestimmen des Durchmessers des Loches der Bohrlochmethode vor und nach dem Herausschneiden des Ringkernes. Die Messpunkte entsprachen dabei jenen der Bohrlochmethode. Auf diese Weisen konnten alle Spannungskomponenten der Schiene bestimmt werden. Für die longitudinalen Eigenspannungen gab es eine gute Übereinstimmung mit einer Messung mit Neutronen.

2.1.4 Interferometrie

Die Interferometrie an sich ist zwar kein zerstörendes Messverfahren, aber bei der Eigenspannungsmessung müssen die Spannungen zuvor durch Schneiden freigesetzt werden. Die durch das Relaxieren der Eigenspannungen hervorgerufenen Veränderungen der Schnittflächen können durch optische Interferometrie sichtbar gemacht werden. Zur Bestimmung der Verschiebungen in der Ebene wird die Moiré Interferometrie verwendet. Die Verschiebungen aus der Ebene werden mit Hilfe der Twyman/Green Interferometrie ermittelt.

2.1.4.1 Moiré Interferometrie

Der Strahlengang bei der Moiré Interferometrie ist in Abb. 2.4 dargestellt. Als Lichtquelle dient ein Laser, dessen Licht in zwei kohärente Strahlen S_1 und S_2 aufgespalten wird. Beide beleuchten das Gitter an der Probe. Zusätzlich führt die Interferenz der beiden Strahlen zu einem virtuellen Gitter mit halbem Gitterabstand, welches als Referenz dient. Durch die Überlagerung der beiden Gitter kommt es zum Moiré-Effekt. Wenn sich das Gitter auf der Probe durch Freisetzen der Eigenspannungen verformt, können die Verschiebungen aus dem entstandenen Linienmuster bestimmt werden [9].

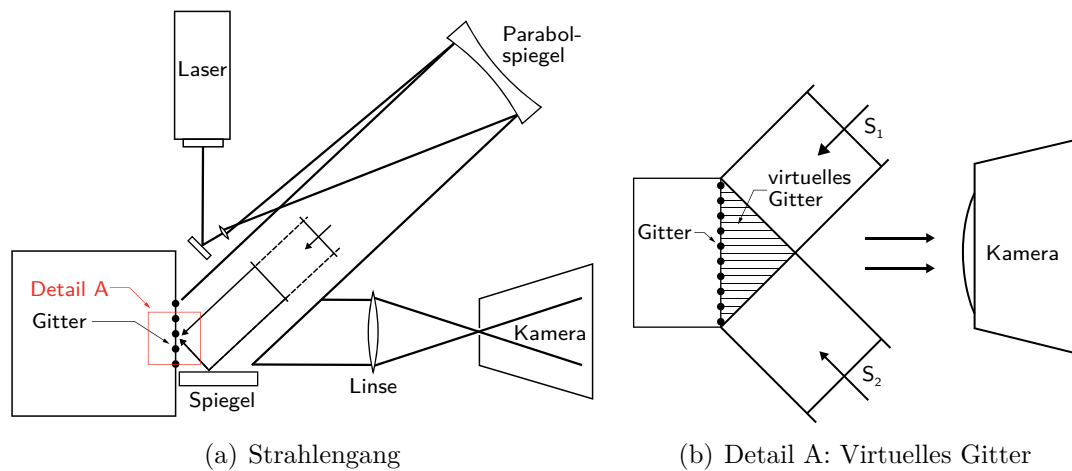


Abbildung 2.4: Funktionsweise eines Moiré Interferometers: Zwei kohärente Strahlen (S_1 und S_2) werden am Gitter der Probe gebeugt. Gleichzeitig führt die Interferenz der zwei Strahlen zu einem virtuellen Gitter (Detail A). Die Interferenz der beiden Gitter führt zum Moiré-Effekt [9].

2.1.4.2 Twyman/Green Interferometrie

In Abb. 2.5 ist der Strahlengang bei einem Twyman/Green Interferometer dargestellt. Als Lichtquelle dient ein Laser. Der Strahl wird durch den halbdurchlässigen Spiegel aufgespalten. Ein Teil geht zur Probe, der andere zum Spiegel. Am Ausgang des Interferometers rekombinieren beide Teile. Ist die Probe eben, entsteht kein Phasenunterschied. Wenn die Probe jedoch verformt wurde, dann entsteht aufgrund des Phasenunterschiedes ein Interferenzmuster. Die Verschiebung kann aus der Wellenlänge des Lichtes und der Ordnung der Interferenzlinien bestimmt werden [10].

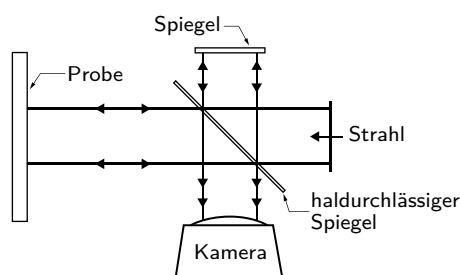


Abbildung 2.5: Funktionsweise eines Twyman/Green Interferometers: Der Strahl wird am halbdurchlässigen Spiegel aufgeteilt. Durch die unterschiedliche Weglänge der beiden Teile entsteht am Ausgang ein Interferenzmuster [9].

2.1.4.3 Anwendung bei Eisenbahnschienen

Erste Überlegungen über Einsatzmöglichkeiten von Moiré Interferometrie zur Eigenspannungsmessung bei Eisenbahnschienen wurden von Cundiff und Rice [7] angestellt. Da sie keine praktikable Möglichkeit fanden, ein Gitter, das eine Wärmebehandlung zum Freisetzen der Eigenspannungen überstehen würde, auf die Schiene aufzubringen, kamen sie zu folgendem Alternativvorschlag: Die Eigenspannungen sollten an Schnitten freigesetzt werden, die in die Oberfläche mit dem Gitter eingebracht werden.

Czarnek et al. [11] verfolgten denselben Ansatz und konnten auf diese Weise Verschiebungen an einer 2 cm dicken TS bestimmen. Sie platzierten ihre Schnitte alle 6 mm in horizontale und vertikale Richtung. Die Schnittbreite betrug 2 mm und die Tiefe 6 mm. Somit entstanden 4×4 mm Elemente, an denen die Verschiebungen ermittelt werden konnten. Daraus abgeleitete Spannungen wurden jedoch nicht veröffentlicht.

Wang und Chiang [12] verwendeten ebenfalls diese Methode, kamen jedoch zu dem Schluss, dass diese Vorgehensweise sehr aufwendig und gleichzeitig fehlerbehaftet sei. Eine Verbesserung würde erst ein sich in Entwicklung befindliches Gitter bringen, das eine Wärmebehandlung zum Freisetzen der Eigenspannungen übersteht.

Wang et al. [10] brachten das neu entwickelte Gitter zum Einsatz. Als Probe diente eine $\frac{1}{4}$ Zoll dicke TS, die in der Stegmitte geteilt wurde. Nach dem Aufbringen des Gitters erfolgte eine mehrstündige Glühbehandlung bei ca. 600°C , um die Eigenspannungen frei zu setzen. Die Dehnungen in der Ebene wurde mittels Moiré Interferometrie bestimmt. Zur Bestimmung der longitudinalen Dehnungen wurden die Twyman/Green Interferometrie verwendet. Auf diese Weise konnte der vollständige Eigenspannungszustand der Schiene rekonstruiert werden.

2.1.5 Die Konturmethode

Die Konturmethode ist ein, von Seiten der Messtechnik betrachtet, relativ einfaches Verfahren zur Bestimmung der Eigenspannungen. Bei dieser Methode werden die Eigenspannungen in einem Bauteil über die Deformation der Schnittfläche bestimmt. Die Methode wurde von M.B. Prime in [13, 14] beschrieben.

Die Vorgangsweise zur Messung ist in Abb. 2.6 dargestellt. Dabei wird die Probe mit dem anfänglichen Eigenspannungszustand $\sigma_x(y)$ (A) in zwei Hälften geschnitten, sodass die Eigenspannungen relaxieren können (B). Dadurch entstehen Verschiebungen an der Schnittfläche, die mit einer Koordinatenmessmaschine (KMM) oder Interferometrie erfasst

werden können. Die Eigenspannungen werden berechnet, indem man die Schnittfläche in einer FEM-Simulation auf den ebenen Zustand zurück führt (C) [13, 14].

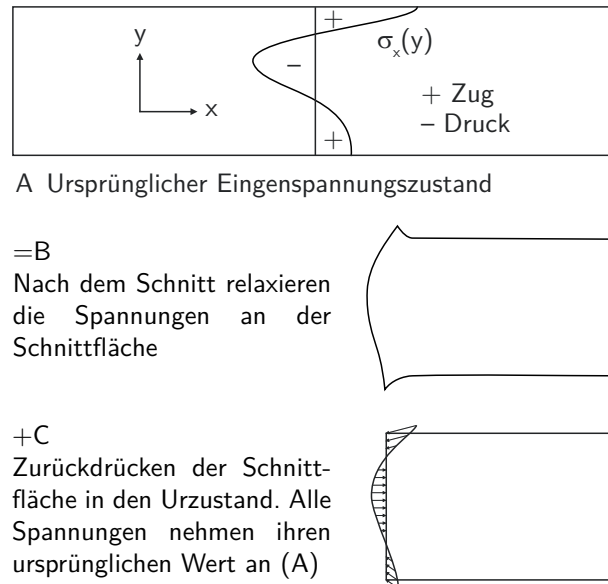


Abbildung 2.6: Prinzip der Konturmethode [13].

Grundlegende Annahmen dieser Methode nach [13] sind:

- a) Elastisches Materialverhalten beim Relaxieren.
- b) Kein Einfluss auf die Eigenspannungen durch das Schneiden.
- c) Ein ideal gerader Schnitt.

Als Schnittmethode verwendete M.B. Prime Drahterodieren, da hierbei die notwendige Güte der Schnittfläche gewährleistet werden kann und der Eigenspannungszustand am wenigsten beeinflusst wird [13, 14].

Die Methode wurde durch Messungen an Biegestäben verifiziert [13, 14]. Messungen an Schienen, in deren Rahmen die Konturmethode mit anderen Messverfahren verglichen wird, sind jedoch keine bekannt. In [15] wurde die Konturmethode ergänzend eingesetzt, um die longitudinale Spannungskomponente zu bestimmen, siehe dazu Abb. 2.13.

2.2 Zerstörungsfreie Verfahren

Zerstörungsfreie Verfahren ermöglichen die Bestimmung von Eigenspannungen, ohne dass diese zuvor freigesetzt werden müssen. Es werden je nach Verfahren eine oder mehrere eigenspannungsabhängige Eigenschaften der Probe gemessen. Aus der Änderung dieser Eigenschaften werden die Eigenspannungen berechnet. Es ist daher immer eine spannungsfreie Referenzprobe von Nöten. Auch wenn die Messung zerstörungsfrei abläuft, kann es notwendig sein, große Proben, wie z. B. Schienen zu teilen, da die Analysetiefe begrenzt ist. In diesem Fall muss beachtet werden, dass sich der ursprüngliche Eigenspannungszustand durch das Teilen verändern kann und deshalb die ermittelten Eigenspannungen von jenen in der ungeteilten Probe abweichen können.

2.2.1 Strahlungsmethoden

Der bei der Eigenspannungsmessung mit Strahlung untersuchte Parameter ist der Netzebenenabstand $d(hkl)$ im Kristallgitter des Probenmaterials. Aus dessen Änderung im Vergleich zur unverspannten Probe wird die Dehnung des Gitters $\varepsilon(hkl)$ im Messpunkt bestimmt. Aus der Dehnung werden über das Hook'sche Gesetz die Eigenspannungen berechnet.

2.2.1.1 Strahlungsarten

Zur Messung von Eigenspannungen werden unterschiedliche Arten von Strahlung angewandt: Röntgen-, Synchrotron- und die Neutronenstrahlung.

Röntgenstrahlung

Als Strahlenquelle dient eine Röntgenröhre, wobei die Wellenlänge durch die Wahl des Anodenmaterials festgelegt wird. Die maximal erreichbare Eindringtiefe der Strahlung hängt von der Wellenlänge und dem Einfallswinkel der Strahlung ab. Im Fall von Stahl liegt diese üblicherweise im Bereich von einigen μm [16]. Will man in tieferen Bereichen messen, so muss das Material, z. B. durch Elektropolieren [17, 18], schichtweise abgetragen werden. Das zerstörungsfreie Messen von Eigenspannungen innerhalb einer Schiene ist hierbei nicht möglich. Um Eigenspannungen im Inneren der Schiene messen zu können, muss diese somit in Scheiben geschnitten werden, was mit einem Verlust von Informationen über die

Eigenstressen verbunden ist [15, 19]. Der komplette triaxiale Eigenstressenzustand kann nur mit Hilfe von Rekonstruktionsmethoden ermittelt werden. Eine solche Möglichkeit wird in Abschnitt 2.3 beschrieben. Die erzielbare Genauigkeit der Messungen wird in der Literatur mit ca. ± 20 MPa [2] bis ± 30 MPa [20] angegeben.

Synchrotronstrahlung

Synchrotronstrahlung ist eine energiereiche, breitbandige elektromagnetische Strahlung, die entsteht, wenn auf annähernd Lichtgeschwindigkeit beschleunigte Teilchen durch ein Magnetfeld auf eine gekrümmte Bahn gelenkt werden [21]. Wegen der hohen Energie (80-300 keV) und der geringen Divergenz sind kurze Messzeiten und eine hohe räumliche Auflösung möglich. Die hohe Energie ermöglicht zwar grundsätzlich Eindringtiefen im cm-Bereich, die geringe Wellenlänge führt jedoch zu einem kleinen Beugungswinkel. Aus diesem Grund ist die Synchrotronstrahlung zur Spannungsbestimmung im Inneren großer Bauteile nur bedingt geeignet [16].

Neutronenstrahlung

Neutronenstrahlung bietet im Vergleich zur Röntgenstrahlung eine um den Faktor 1000 größere Eindringtiefe. Die große Wellenlänge von ca. 1 Å führt zu einem 2Θ -Winkel (siehe dazu Abb. 2.8) im Bereich von 90° . Deshalb eignet sich Neutronenstrahlung besonders zur Spannungsbestimmung im Inneren großer Bauteile [22]. Exakte Werte für Eindringtiefen in Stahl werden in der Literatur nicht angegeben, da die Zusammensetzung des Werkstoffes, der Messaufbau, die Messzeit, und die gewünschte Genauigkeit hierbei eine entscheidende Rolle spielen. Es können jedoch Eindringtiefen im Bereich von 5-10 cm erwartet werden [2, 16].

Maximale Eindringtiefe und Genauigkeit

Aufgrund der Größe von Schienen spielen die maximale Eindringtiefe der Strahlung und in diesem Zusammenhang auch die erreichbare Messgenauigkeit eine entscheidende Rolle, ob eine Messung ohne Teilen der Schiene möglich ist. Die bei Strahlungsexperimenten für die Messung wesentliche Größe ist die am Detektor gemessene Intensität. Wird das Signal zu schwach sinkt, die Genauigkeit und die Messung wird schließlich unmöglich. Ein in der Literatur [16, 23–25] häufig angewandtes Kriterium für die Wirtschaftlichkeit einer Messung ist: Die Bestimmung der Dehnung mit einer Genauigkeit von $Err(\varepsilon) = 10^{-4}$

innerhalb einer Stunde. Bei einer Spannung von 100 MPa entspricht dies einem Messfehler von ± 25 MPa. Der qualitative Zusammenhang zwischen Genauigkeit und Messzeit t ist durch Glg. 2.1 gegeben [23–25].

$$t \propto \frac{1}{Err(\varepsilon)^2} \quad (2.1)$$

Die bei diesem Kriterium erreichbare Eindringtiefe in die Probe ist von einer Vielzahl strahlenquellen-, messaufbau- und probenspezifischer Faktoren abhängig. Wichtige Einflussgrößen sind unter anderem: Messvolumen, Wellenlänge, Energie, Beugungswinkel, Hintergrundrauschen des Signals, Dämpfung der Strahlung durch den Werkstoff, Messung in Transmission oder Reflexion. Wobei viele dieser Faktoren in wechselseitiger Abhängigkeit stehen. Die Frage, ob die Messung im Inneren einer großen Probe möglich ist, kann daher ggf. nur durch Testmessungen beantwortet werden. Zur Orientierung ist in Abb. 2.7 die, zum Erreichen einer Genauigkeit von $Err(\varepsilon) = 10^{-4}$ notwendige Messzeit in Abhängigkeit von der Eindringtiefe dargestellt. Es zeigt sich, dass mit steigender Eindringtiefe ein exponentieller Anstieg der Messzeit zu erwarten ist [23, 24]. In diesem Fall wurden die Daten an einer Nickel-Probe mit einem Messvolumen von $1 \times 1 \times 4$ mm ermittelt. Für Stahl sind höhere Eindringtiefen zu erwarten, die durch eine Vergrößerung des Messvolumens noch gesteigert werden können. Der grundlegende Zusammenhang bleibt jedoch erhalten [23].

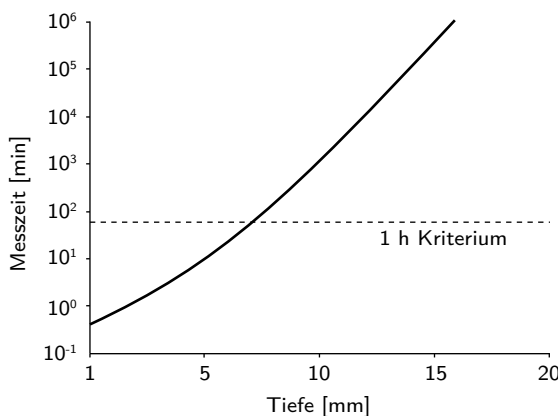


Abbildung 2.7: Messzeit bei der Neutronenstreuung: Die notwendige Messzeit um eine Genauigkeit von $Err(\varepsilon) = 10^{-4}$ zu erreichen in Abhängigkeit von der Eindringtiefe. Die Daten wurden an einer Nickel-Probe mit einem Messvolumen von $1 \times 1 \times 4$ mm ermittelt. Für Stahl sind höhere Eindringtiefen zu erwarten, die durch eine Vergrößerung des Messvolumens noch gesteigert werden können. Der grundlegende Zusammenhang bleibt jedoch erhalten [23].

2.2.1.2 Auswerteverfahren

Die $\sin^2 \psi$ -Methode

Die winkeldispersive Spannungsmessung mit Röntgenstrahlung basiert auf Beugung der Röntgenstrahlen am Kristallgitter. Aus der Lage des Interferenzmaximums erhält man den Beugungswinkel Θ . Nun kann bei bekannter Wellenlänge λ über die Bragg-Beziehung (Glg. 2.2, Abb. 2.8) der Abstand der Netzebenen $d(hkl)$ in Richtung des Streuvektors $\bar{Q}(hkl)$ bestimmt werden [21].

$$2d(hkl) \sin \Theta = n \cdot \lambda \quad (2.2)$$

Ist zusätzlich noch der Netzebenenabstand des unverspannten Gitters $d_0(hkl)$ bekannt, kann die Dehnung des Gitters $\varepsilon(hkl)$ in Richtung des Streuvektors $\bar{Q}(hkl)$ nach Glg. 2.3 bestimmt werden [21, 22].

$$\varepsilon(hkl) = \frac{d(hkl) - d_0(hkl)}{d_0(hkl)} \quad (2.3)$$

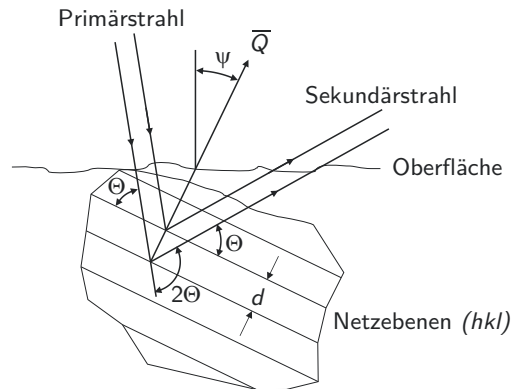


Abbildung 2.8: Beugung des Röntgenstrahls an den Netzebenen: Der Röntgenstrahl wird beim Durchgang durch den Kristall an den Netzebenen (hkl) gebeugt, nach [22].

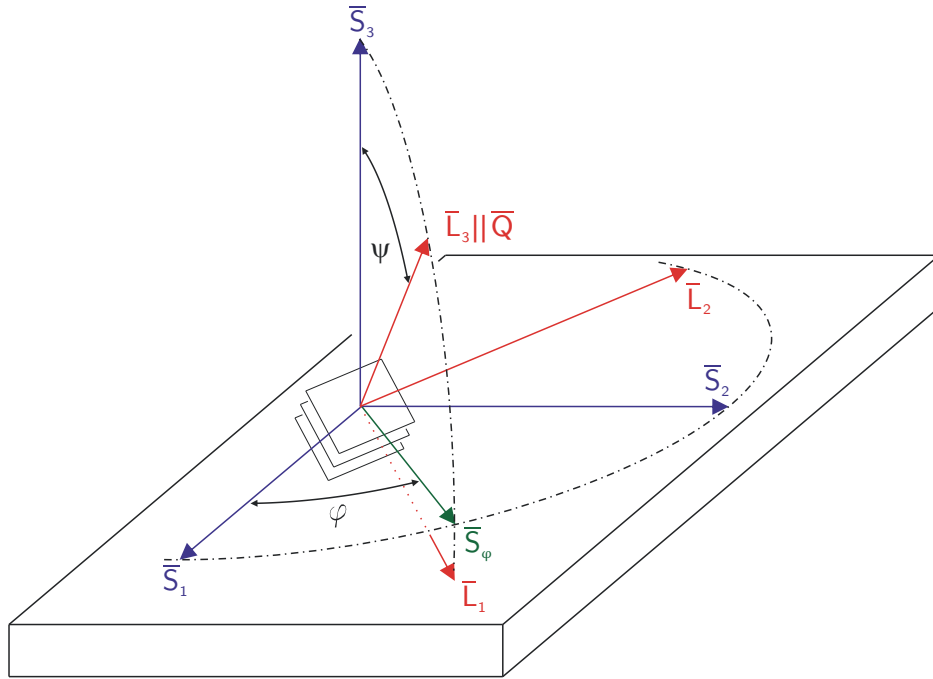


Abbildung 2.9: Koordinatensysteme bei der Röntgenbeugung: Lage des Labor-KS (L_i) und des Werkstück-KS (S_i), nach [21].

Wenn der makroskopische E-Modul E und die Querkontraktion ν verwendet werden können, dann kann für den biaxialen Spannungszustand die Spannung σ_φ in Richtung S_φ (siehe Abb. 2.9) für verschiedene Azimutwinkel φ und Kippwinkel ψ nach Glg. 2.4 berechnet werden [22].

$$\frac{d(hkl) - d_0(hkl)}{d_0(hkl)} = \frac{1 + \nu}{E} \sigma_\varphi \sin^2 \psi - \frac{\nu}{E} (\sigma_{11} + \sigma_{22}) \quad (2.4)$$

Glg. 2.4 sagt einen linearen Zusammenhang zwischen $d(hkl)$ und $\sin^2 \psi$ voraus. Daher wird dieses Auswerteverfahren auch als $\sin^2 \psi$ -Methode bezeichnet. Die Spannung in S_φ Richtung kann direkt aus der Steigung der Geraden bestimmt werden. Die Gerade wird durch die Methode der kleinsten Quadrate aus den gemessenen Datenpunkten bestimmt. Sollte $d_0(hkl)$ nicht bekannt sein, kann stattdessen $d(hkl)_{\varphi, \psi=0}$ herangezogen werden, wobei dadurch der Fehler der errechneten Spannung nicht größer als 0,1% wird [21].

Es werden auch Abweichungen vom linearen $\sin^2 \psi$ -Zusammenhang beobachtet. Man unterscheidet daher die in Abb. 2.10 gezeigten vier grundlegenden Typen von Verteilungen [22]:

- a) Lineare Verteilung.
- b) ψ -Splitting durch Scherspannungen.
- c) Oszillationen infolge von Textur oder plastischer Verformung.
- d) Gekrümmter Verlauf durch Spannungsgradienten.

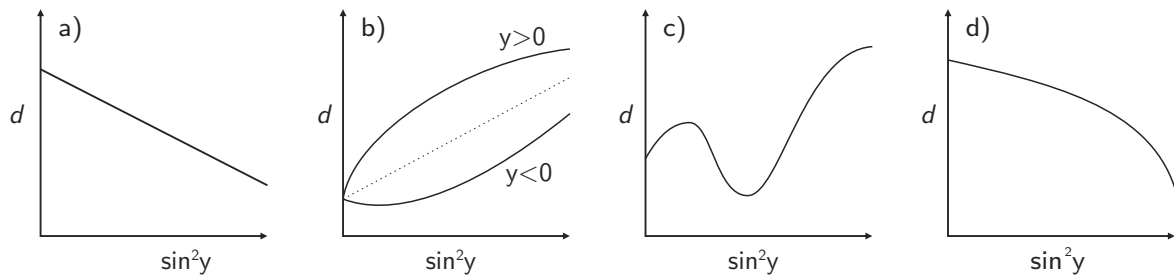


Abbildung 2.10: Typen von $\sin^2 \psi$ -Verteilungen: Die vier Grundformen der $\sin^2 \psi$ -Verteilung, nach [22].

Bestimmung des triaxialen Spannungstensors

Der triaxiale Spannungstensor kann nach Glg. 2.5 über das verallgemeinerte Hook'sche Gesetz direkt aus den nach Glg. 2.3 ermittelten Gitterdehnungen bestimmt werden. Dazu muss jedoch der Parameter des unverspannten Gitters $d_0(hkl)$ bekannt sein oder bestimmt werden. Wenn der makroskopische E-Modul E und die Querkontraktion ν verwendet werden können, dann ist der Zusammenhang zwischen den Hauptspannungen σ_i und den Hauptdehnungen $\varepsilon(hkl)_i$ im Werkstück-KS (siehe Abb. 2.9) durch Glg. 2.5 gegeben. Dieses Verfahren wird vor allem bei Messungen mit Neutronen angewandt. Zur vollständigen Bestimmung des Spannungstensors sind mindestens sechs Messungen notwendig, außer es wird bereits in Richtung der Hauptspannungen gemessen. In diesem Fall genügen drei Messungen. Zum Einsatz kommt diese Vorgehensweise vor allem bei der Messung mit Neutronen [22].

$$\sigma_i = \frac{E(1-\nu)}{(1+\nu)(1-2\nu)} \varepsilon_i + \frac{\nu \cdot E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \sum_j \varepsilon_j \quad j=1,2,3 \quad j \neq i \quad (2.5)$$

2.2.1.3 Anwendung bei Eisenbahnschienen

Im folgenden Abschnitt wird ein kurzer Überblick über die in der Literatur dokumentierten Anwendungsbeispiele und Messergebnisse an Eisenbahnschienen gegeben. Die Richtungen der Spannungen werden in Anlehnung an die englischsprachige Literatur gemäß Abb. 2.11 bezeichnet. Der dargestellte Schnitt wird als TS bezeichnet.

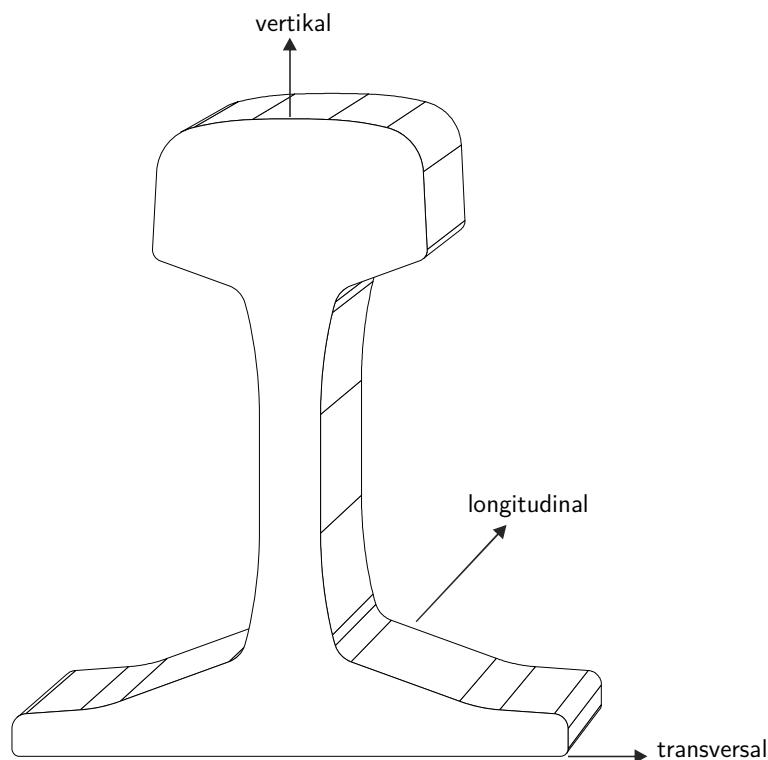


Abbildung 2.11: Bezeichnung der Spannungsrichtungen: Die in Folge verwendeten Bezeichnungen für die Richtungen der Eigenspannungen in Anlehnung an die englischsprachige Literatur.

Röntgenbeugung

Von Kelleher et al. [19] wurden unter anderem Messungen mit Synchrotronstrahlung und mit Röntgenstrahlung verglichen. Als Probe diente eine ca. 5 mm dicke TS einer bereits befahrenen Schiene. Für die Messungen mit Röntgenstrahlen wurde die Scheibe elektroliert, um Spannungen, die durch das Schneiden entstanden sind, zu entfernen. Die Ergebnisse sind in Abb. 2.12 dargestellt. Die Messungen mit Synchrotron- und Röntgenstrahlung zeigen generell eine gute Übereinstimmung, wobei mit Synchrotronstrahlung mehr Details dargestellt werden. Dies ist besonders bei der vertikalen Spannungskomponente zu sehen.

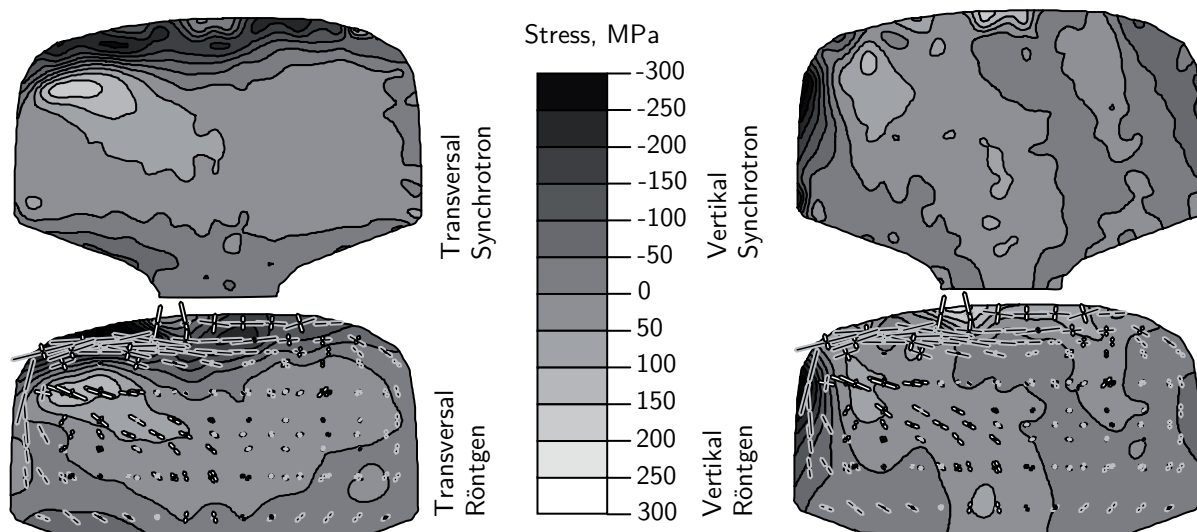


Abbildung 2.12: Vergleich Röntgen- und Synchrotronstrahlung: Eigenspannungen einer befahrenen Schiene gemessen mit Röntgen- und Synchrotronstrahlung. Die Striche zeigen die Lage der Hauptnormalspannungen, nach [19].

Synchrotron

Kelleher et al. [15, 19] führten mehrere vergleichende Studien zu verschiedenen Messmethoden für Eigenspannungen in Eisenbahnschienen durch. In [15] wurde auch an einer neuen, rollengerichteten Schiene gemessen. Als Probe diente eine TS. Zusätzlich wurde die longitudinale Spannungskomponente mit Hilfe der Konturmethode (siehe Abschnitt 2.1.5) bestimmt. Die Ergebnisse sind in Abb. 2.13 dargestellt. Die longitudinale Spannungskomponente zeigt den, aus der Literatur [26] bekannten, C-förmigen Verlauf der Eigenspannungen zwischen Kopf- und Fußmitte. Entlang des Fußes sieht man wiederum einen C-förmigen Verlauf mit Druckspannungen an den Enden und mit Zug in der Mitte. In transversale Richtung gibt es einen kleinen Bereich mit Druckspannungen nahe der Oberfläche unter der Kopfmitte. Der Rest der Schiene weist nur geringe Eigenspannungen auf. In vertikale Richtung treten Zugspannungen im Kern des Kopfes sowie der in Mitte des Stags und des Fußes auf. Die Randbereiche weisen Druckspannungen auf. Die longitudinale Richtung zeigt wesentlich höhere Eigenspannungen mit größeren Gradienten als die beiden anderen Richtungen.

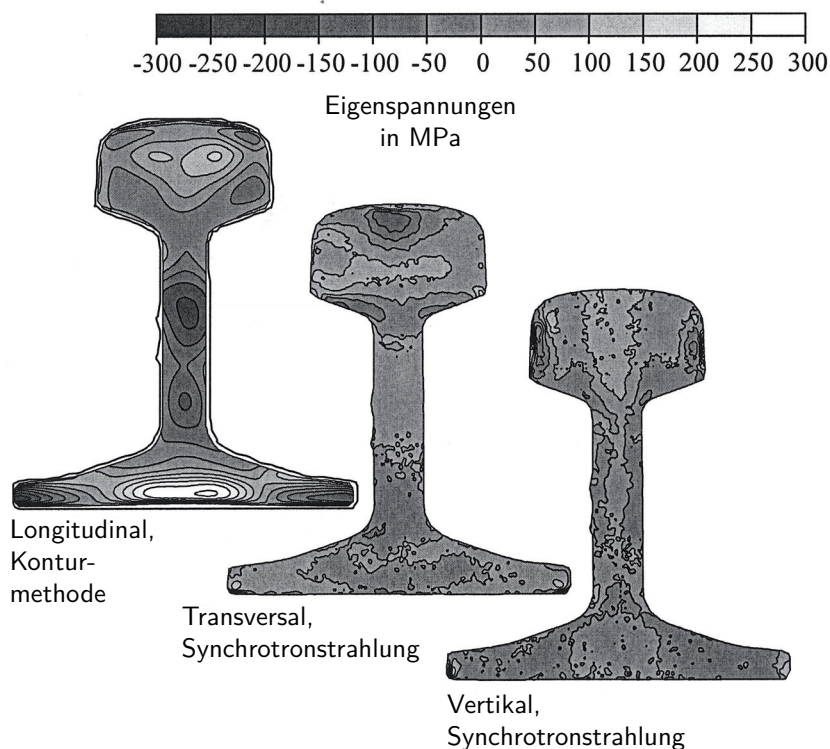


Abbildung 2.13: Eigenspannungen einer neuen, rollengerichteten Schiene: Die Eigenspannungen der TS wurden mit Synchrotronstrahlung gemessen, die Spannungen in longitudinale Richtung wurden mit der Konturmethode bestimmt [15].

Neutronen

Luzin et al. [27] führten bei ihren Untersuchungen auch Messungen an einer intakten Schiene (siehe Abschnitt 4.2) durch. Als Probe wurde ein Stück von 0,53 m Länge verwendet. Dabei kam es zu Pfadlängen von bis zu 75 mm und Messzeiten von bis zu acht Stunden für einzelne Punkte. Die weiteren Messungen wurden an Scheiben durchgeführt. Dabei wurde die T/O-S Methode (siehe Abschnitt 2.3) zur Bestimmung des triaxialen Eigenspannungszustandes verwendet. Über die Eigenspannungen wird berichtet, dass durch reines Luftabkühlen der Schiene keine messbaren Eigenspannungen entstehen. Durch Rollenrichten entsteht eine transversale Spannungszone unter der Lauffläche und ein Bereich vertikaler Zugspannungen im Steg. Durch Kopfhärten wird dieser Zustand nicht wesentlich beeinflusst. Die Autoren sehen den größten Einfluss auf den Eigenspannungszustand im Befahren der Schiene.

Jun et al. [28] führten ebenfalls Untersuchungen an einer 16 mm dicken TS durch. Wegen der Dicke der Scheibe blieben noch Reste der longitudinalen Spannungskomponente erhal-

ten. Zur Rekonstruktion des triaxialen Spannungszustandes verwendeten sie die „inverse eigenstrain analysis“ nach [29].

2.2.2 Magnetische Verfahren

2.2.2.1 Barkhausen-Rauschen

Messgeräte, die auf Basis des Barkhausen-Rauschens arbeiten, können neben anderen Einsatzgebieten auch zur Eigenspannungsmessung herangezogen werden. Das Barkhausen-Rauschen entsteht durch sprunghaftes Wandern der Bloch-Wände, wenn sich die Weiss'schen Bezirke an einem äußeren Magnetfeld ausrichten. Diese sogenannten Barkhausen-Sprünge führen zu einer Änderung des magnetischen Flusses der felderzeugenden Spule, welcher gemessen werden kann [30, 31]. Dieses als Barkhausen-Rauschen bekannte Signal ist unter anderem vom Spannungszustand im Werkstoff abhängig [22, 31]. Messungen sind aufgrund der Dämpfung des Signals im Werkstoff nur nahe der Oberfläche möglich. Der Vorteil des Verfahrens ist, dass die Messungen schnell und kostengünstig sind und vor Ort durchgeführt werden können. Der Nachteil ist, dass Oberflächenbeschaffenheit, Mikrostruktur und besonders die Werkstofftextur großen Einfluss auf die Messergebnisse haben [7]. Abb. 2.14 und Abb. 2.15 zeigen einen Vergleich zwischen Messungen mit dem Barkhausen-Rauschen und der DMS-Methode [7].

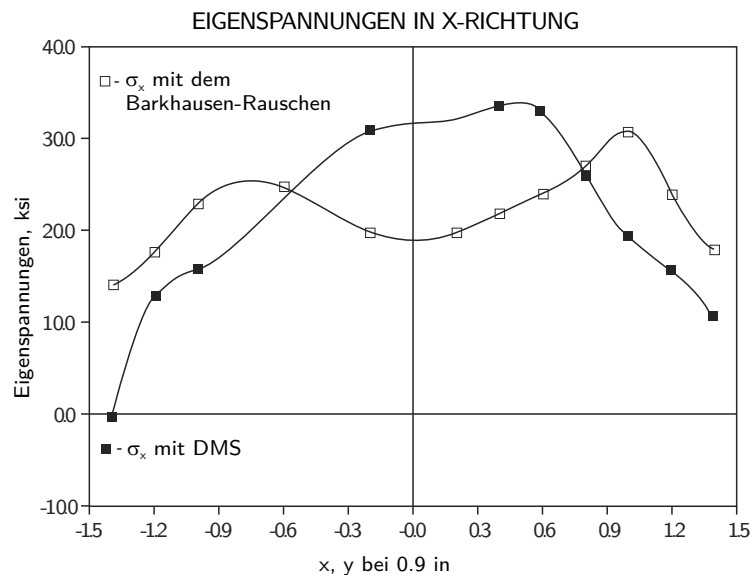


Abbildung 2.14: Vergleich Barkhausen - DMS transversal: Transversale Eigenspannungen einer befahrenen Schiene gemessen mit dem Barkhausen-Rauschen und DMS, nach [7].

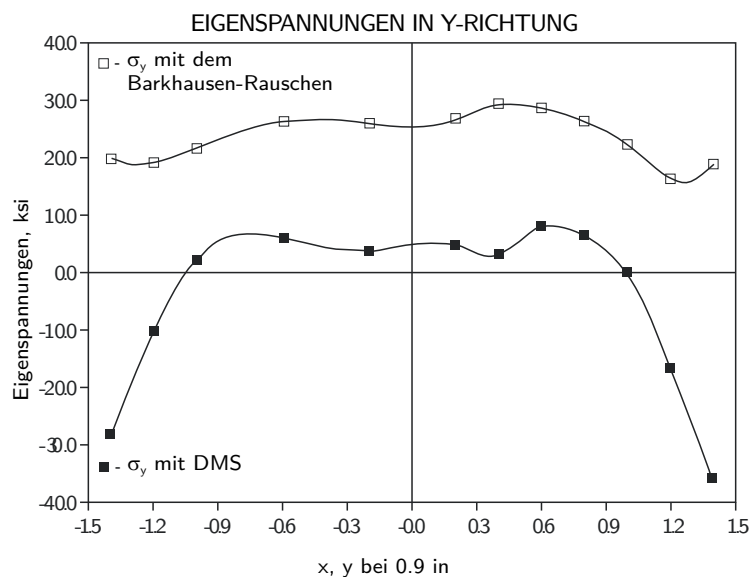


Abbildung 2.15: Vergleich Barkhausen - DMS vertikal: Vertikale Eigenspannungen einer befahrenen Schiene gemessen mit dem Barkhausen-Rauschen und DMS, nach [7]

2.2.2.2 Das 3MA-Verfahren

Das Micromagnetic Multiparameter Microstructure and Stress Analysis (3MA) Verfahren ist eine Entwicklung des Fraunhofer-Institut für zerstörungsfreie Prüfverfahren (IZFP) in Saarbrücken. Es werden bis zu 22 verschiedene elektromagnetische Größen, darunter Barkhausen-Rauschen, Wirbelstrom, Magnetfeld und Permeabilität, gemessen. Daraus können unter anderem auch Eigenspannungen im Bauteil bestimmt werden. Mit einer Analysetiefe von ca. 400 μm sind die Messungen jedoch auf den Randbereich der Probe beschränkt. Zur quantitativen Bestimmung der Eigenspannungen muss das Gerät auf den Werkstoff kalibriert werden.

Bei einem internen Eignungstest der VASCH war die Schwankungsbreite bei der Kalibrierung schon so groß, dass das Gerät zur quantitativen Messung von Eigenspannungen für ungeeignet befunden wurde.

2.2.2.3 Das MAPS Verfahren

Das Magnetic Anisotropy and Permeability System (MAPS) ist ein patentiertes Verfahren [32–35] zur Messung von Eigenspannungen, das von der Firma MAPS Technology Ltd. aus England (www.maps-technology.com) vertrieben wird. Nach Angaben des Herstellers

wurde es unter anderem auch zur Messung von Eigenspannungen in Eisenbahnschienen entwickelt.

Das Verfahren verwendet eine Kombination aus zwei Sensoren, mit denen die magnetische Permeabilität und die magnetische Anisotropie gemessen wird. Aus der Änderung dieser Parameter werden die Eigenspannungen errechnet. Zuvor muss das System jedoch durch eine Reihe von Zugversuchen für den jeweiligen Werkstoff kalibriert werden. Laut Hersteller kann somit ein Einfluss von Mikrostruktur und Oberflächenbeschaffenheit der Probe auf das Ergebnis ausgeschlossen werden. Die Anwendbarkeit und Eignung von MAPS zur Messung von Eigenspannungen in Eisenbahnschienen wurde in mehreren Studien überprüft [15, 19, 36–38].

In [36] wurden Messungen des ebenen Spannungszustandes in einer TS einer befahrenen Schiene mit Synchrotronstrahlung und MAPS durchgeführt. Abb. 2.16 zeigt die gemessenen transversalen und die vertikalen Eigenspannungen. Die Autoren kamen zu dem Ergebnis, dass die mit MAPS gemessenen Spannungen qualitativ mit jenen der anderen Methode vergleichbar sind. Beide Methoden zeigen Schichten von transversalem Druck, dann Zug im Kern des Kopfes und wieder Druck am Übergang zum Steg. Die vertikalen Zugspannungen in der oberen Randschicht des Kopfes und am Übergang zum Steg werden auch von beiden Methoden abgebildet. Quantitativ gab es jedoch Abweichungen. Die mit MAPS gemessenen Werte liegen im Mittel mehr im Bereich der Zugspannungen. Die Autoren führen diese Verschiebung darauf zurück, dass für die MAPS Methode die spannungsfreie Referenzgröße nicht direkt an der Schiene bestimmt werden konnte, während dies bei der Messung mittels Synchrotronstrahlung möglich war.

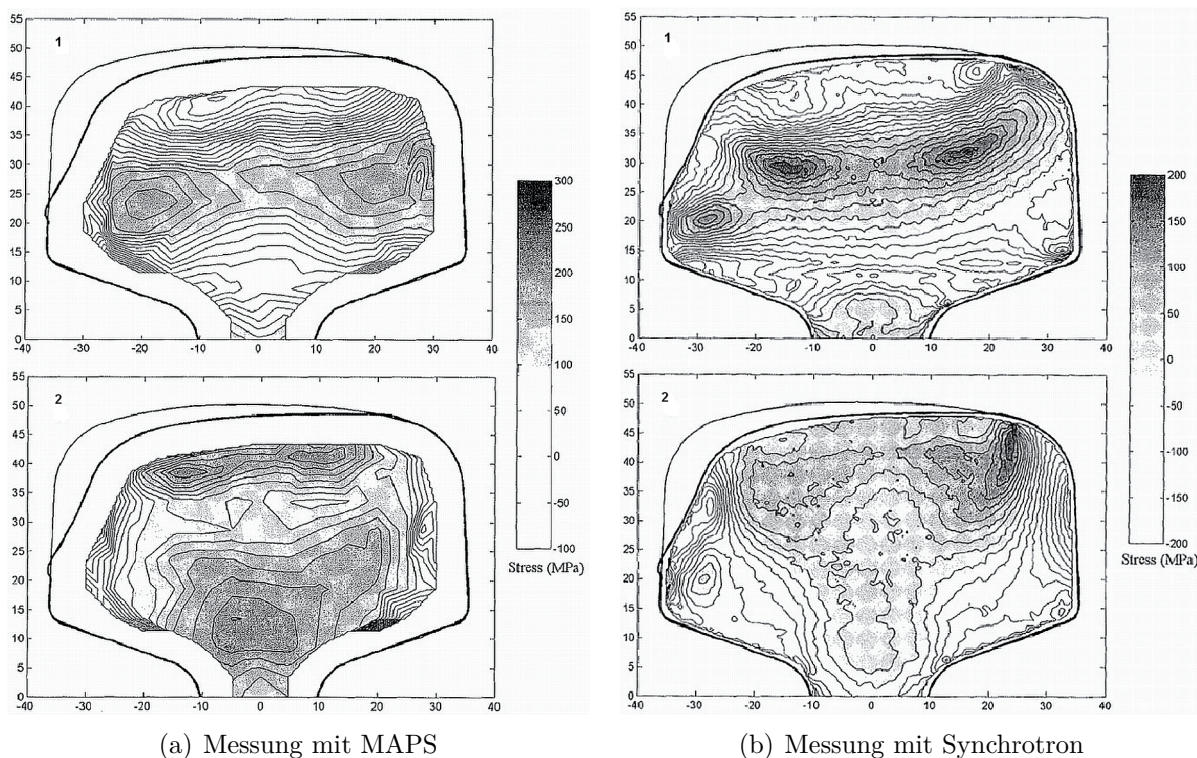


Abbildung 2.16: Vergleich MAPS - Synchrotron: Transversale (1) und vertikale (2) Eigenspannungen einer befahrenen Schiene gemessen mit MAPS und Synchrotronstrahlung [36].

2.3 T/O-S Methode

Die transverse/oblique slicing (T/O-S) Methode ist kein Messverfahren. Es handelt sich hierbei um ein mathematisches Auswerteverfahren, mit dem der ursprüngliche triaxiale Eigenspannungszustand aus zwei, an Scheiben gemessenen, ebenen Spannungszuständen rekonstruiert werden kann. Die Messung der Eigenspannungen in den Scheiben erfolgt mittels Strahlungsmethoden oder Interferometrie [6, 39].

Das Verfahren wurde von J. Magiera in [6] erstmalig beschrieben. Dabei wurden eine TS und eine schräge Scheibe (oblique slice) (OS) aus der Schiene geschnitten. Abb. 2.17 zeigt die Schnitte mit den dazugehörigen KS. An beiden Scheiben wird der ebene Spannungszustand ($\underline{\sigma}^{TS}$ und $\underline{\sigma}^{OS}$) gemessen, wobei hier kein bestimmtes Messverfahren verlangt wird. Möglich sind beispielsweise Strahlungsmethoden (siehe 2.2.1) oder Interferometrie (siehe 2.1.4). Aus den gemessenen Spannungen wird nach dem in Tabelle 2.1 gezeigten Schema der triaxiale Spannungszustand rekonstruiert. Ziel ist es, einen Spannungsten-

sor $\underline{\sigma}$ zu finden, der, wenn man die damit beaufschlagten Scheiben relaxieren lässt, zum selben Ergebnis führt wie die Messungen.

Es werden dabei nach [6] folgende grundlegende Annahmen getroffen:

- a) Die Eigenspannungen sind von der z -Achse unabhängig und es tritt keine Scherung in z -Richtung auf, d. h. $\sigma_{xz} = \sigma_{yz} = 0$
- b) Das Material ist homogen, elastisch-ideal plastisch und isotrop.
- c) Elastisches Materialverhalten beim Relaxieren.
- d) Die Spannungen in der Ebene σ_{xx}, σ_{yy} werden durch Hinzufügen oder Entfernen eines Spannungsfeldes σ_{zz} nicht maßgeblich beeinflusst, d. h. eine Änderung wird nur durch Querkontraktion hervorgerufen.

Die Methode wurde in [39] zur Bestimmung von Eigenspannungen in Schienen herangezogen, wobei der ebene Spannungszustand mit Hilfe von Neutronen gemessen wurde. Dabei konnten die Eigenspannungen mit guter Konvergenz zu den Messergebnissen rekonstruiert werden. Luzin et al. [27] verglichen ihre Messungen an der intakten Schiene mit der T/O-S Methode und sahen die Tauglichkeit des Verfahrens bestätigt.

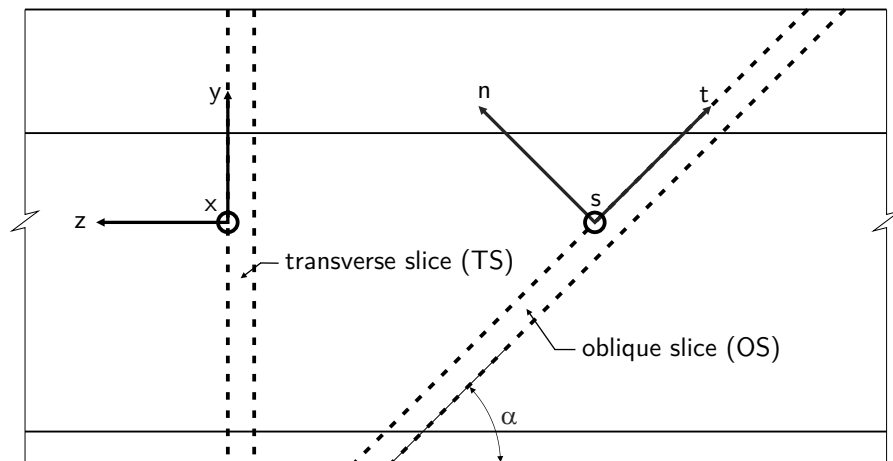


Abbildung 2.17: Schnitte bei der T/O-S Methode: Die in [6, 39] verwendeten Schnitte mit den dazugehörigen Koordinatensystemen.

Tabelle 2.1: Schema zur Auswertung der T/O-S Methode: Die während einer Iteration durchlaufenen Schritte, nach [6].

Schritt	Beschreibung
$\underline{\sigma}_{OS}(\alpha) \rightarrow \underline{\sigma}^k(0)$	Transformation der in der OS gemessenen Spannungen in das KS(0) liefert die longitudinale Spannungskomponente σ_{zz} der TS.
Mit FEM: $\Delta\underline{\sigma}^k(0)$	Mit FEM: Spannungsfreie TS mit berechnetem σ_{zz} beaufschlagen und relaxieren lassen. Die Differenz zwischen Ausgangszustand und den Spannungen nach dem Relaxieren ergibt den Korrektortensor $\Delta\underline{\sigma}^k(0)$.
$\underline{\sigma}^{k+1}(0) = \underline{\sigma}^{TS} - \Delta\underline{\sigma}^k(0)$	Korrigieren der Messwerte der TS.
$\underline{\sigma}^{k+1}(0) \rightarrow \underline{\sigma}^{k+1}(\alpha)$	Transformation in das KS(α) liefert den Spannungstensor der OS.
Mit FEM: $\Delta\underline{\sigma}^{k+1}(\alpha)$	Mit FEM: Spannungsfreie OS mit longitudinalen Komponenten $(\sigma_{nn}^{k+1}, \sigma_{ns}^{k+1}, \sigma_{nt}^{k+1})$ beaufschlagen und relaxieren lassen. Die Differenz zwischen Ausgangszustand und den Spannungen nach dem Relaxieren ergibt den Korrektortensor $\Delta\underline{\sigma}^{k+1}(\alpha)$.
$\underline{\sigma}^{k+2}(\alpha) = \underline{\sigma}^{OS} - \Delta\underline{\sigma}^{k+1}(\alpha)$	Korrigieren der Messwerte der OS.
Konvergenz?	Ist erreicht, wenn die Änderung der errechneten Spannungen durch einen weiteren Iterationsschritt unterhalb eines festzulegenden Wertes bleibt.

Das in Glg. 2.6 beschriebene Gleichungssystem zeigt die Transformation vom $KS(\alpha)(stn)$ der OS in das $KS(0)(xyz)$ der TS. Für die Rücktransformation gelten die Beziehungen analog.

$$\begin{aligned}
 \sigma_{xx} &= \sigma_{ss} \\
 \sigma_{xy} &= \frac{\sqrt{2}}{2}\sigma_{st} + \frac{\sqrt{2}}{2}\sigma_{sn} \\
 \sigma_{yy} &= \frac{1}{2}\sigma_{tt} + \frac{1}{2}\sigma_{nn} + \sigma_{nt} \\
 \sigma_{zz} &= \frac{1}{2}\sigma_{tt} + \frac{1}{2}\sigma_{nn} - \sigma_{nt} \\
 \sigma_{zx} &= -\frac{\sqrt{2}}{2}\sigma_{st} + \frac{\sqrt{2}}{2}\sigma_{sn} \\
 \sigma_{zy} &= -\frac{1}{2}\sigma_{tt} + \frac{1}{2}\sigma_{nn}
 \end{aligned} \tag{2.6}$$

Um σ_{zz} bestimmen zu können, muss Grundannahme a) erfüllt sein. Dann kann das Gleichungssystem wie in [12] gelöst werden und man erhält Glg. 2.7.

$$\sigma_{zz} = 2\sigma_{tt} - 2\sigma_{yy} \tag{2.7}$$

3 Bewertung und Auswahl der Verfahren für weitere experimentelle Untersuchungen

Im folgenden Abschnitt werden die recherchierten Verfahren auf Basis der Fachliteratur bewertet. Die Zerlegeverfahren (lt. Abschnitt 2.1.1) werden nicht berücksichtigt, da für diese ein Ersatz gesucht wird. Ausgehend von dieser Bewertung werden anschließend drei Verfahren ausgewählt mit denen weitere Versuche durchgeführt werden. Für die Auswahl wurden folgende Kriterien herangezogen: Möglichkeit zur Messung der longitudinalen Eigenspannungen, Genauigkeit, Einfachheit der Messungen, Einfachheit der Auswertung, technischer Aufwand zur Durchführung, Geschwindigkeit des Verfahrens, Verfügbarkeit und Kosten. Die Ergebnisse sind in Tabelle 3.1 zusammengefasst.

3.1 Bewertung der Verfahren

Messung der longitudinalen Eigenspannungen

Das wichtigste Auswahlkriterium war die Möglichkeit zur Bestimmung der longitudinalen Eigenspannungen, da sie ein wesentlicher Qualitätsfaktor des Produktes Schiene sind. Der Eigenspannungszustand wird vorwiegend durch den Richtprozess beeinflusst [40, 41]. Daher sind vor allem die longitudinalen Eigenspannungen ein wesentlicher Parameter zur Verifikation des Richtmodelles. Die longitudinalen Eigenspannungen können zwar prinzipiell mit allen Verfahren bestimmt werden, bei Röntgen- und Synchrotronstrahlung, sowie bei den magnetischen Verfahren müsste die Schiene allerdings in geeignete Scheiben geschnitten werden. Dabei besteht jedoch die Gefahr, dass Teile der Information über den ursprünglichen Zustand verloren gehen, bzw. der Eigenspannungszustand durch das Schneiden verändert wird. Diese Verfahren können daher nur in Verbindung mit einem geeigneten Auswerteverfahren wie, z. B. der T/O-S Methode eingesetzt werden. Die Bohrlochmethode ermöglicht es zwar, die longitudinalen Eigenspannungen zu bestimmen, man kann jedoch pro Versuch nur entlang einer Linie messen. Dabei erfordert die Methode einen beträchtlichen Arbeitsaufwand sowohl für die Messung, als auch für die Kalibrierung. Eine viel versprechende Methode zur Bestimmung der longitudinalen

Eigenstressungen ist die Konturmethode. Zwar muss auch hier geschnitten werden, es genügt in diesem Fall jedoch ein Schnitt, wodurch die möglichen Einflüsse begrenzt werden. Großer Vorteil ist hier, dass man mit einer Messung den Eigenstresszustand über den gesamten Schienenquerschnitt bestimmen kann. Alternativ zur KMM wäre bei der Konturmethode auch eine Messung mit Interferometrie denkbar. Die einzige Möglichkeit die longitudinalen Eigenstressungen an einer intakten Schiene zu bestimmen, ist die Messung mit Neutronen.

Genauigkeit

Je nach Messverfahren gibt es unterschiedliche Einflussfaktoren auf die Ergebnisse. Im Allgemeinen wird jedoch mit sinkender Zahl der variablen Parameter eine höhere Genauigkeit zu erwarten sein. Am Ungünstigsten sind hier Barkhausen-Rauschen, das 3MA-Verfahren und die Bohrlochmethode da diese Messsysteme zusätzlich zu einem möglichen Messfehler und Einflüssen der Probenpräparation noch manuell kalibriert werden müssen. Die Bohrlochmethode reagiert zudem noch sehr sensibel auf die Exzentrizität des Bohrlochs in Bezug zu den Rosetten-DMS. Bei den magnetischen Verfahren ist der Einfluss der Mikrostruktur sehr groß. Im Falle des MAPS-Systems scheint der Hersteller dieses Problem jedoch bewältigt zu haben. Die Konturmethode reduziert die Zahl der notwendigen Schnitte auf einen und die Messung durch die KMM läuft automatisch ab. Mögliche Fehlerquellen sind daher das Schneiden und das Auswerteverfahren mit FEM. Dies gilt analog bei der Messung mit Interferometrie: Bei der Messung selbst ist nur ein geringer Fehler zu erwarten. Entscheidend ist, wie die Spannungen freigesetzt werden. Bei der Messung mit Röntgen- oder Synchrotronstrahlung kann das Messergebnis durch die Herstellung der Scheiben verfälscht werden. Die Gefahr besteht besonders bei der Röntgenstrahlung, da hier nahe der Oberfläche gemessen wird. Bei Messungen mit Synchrotronstrahlung sind kaum Einflüsse durch das Schneiden zu erwarten, da größere Eindringtiefen möglich sind. Die Genauigkeit der Messung mit Neutronenstrahlung ist, wie in Abschnitt 2.2.1.1 beschrieben, von der Messzeit und der Probengröße abhängig. Gerade im Inneren der Schiene sind jedoch mit Neutronenstrahlung die besten Ergebnisse zu erwarten, da Einflüsse durch ein Teilen der Schiene wegfallen. Die Genauigkeit der T/O-S Methode ist von der Methode abhängig, mit der die Scheiben gemessen wurden.

Einfachheit der Messungen

Eine möglichst einfache Durchführung der Messungen ist besonders dann relevant, wenn das Verfahren in der Industrie eingesetzt werden soll. In dieser Kategorie zeichnen sich vor allem die magnetischen Verfahren aus. Wegen ihrer tragbaren Messgeräte können sie sogar direkt in der Produktion eingesetzt werden. Bei der Konturmethode können die Messungen automatisiert durchgeführt werden. Die Bohrlochmethode, besonders die von Stefanescu et al. [8] (siehe Abschnitt 2.1.3) beschriebene Vorgangsweise, verlangt große Präzision beim Bohren des Loches und der Applikation der DMS. Die Messung mit Röntgenstrahlen kann mit Geräten zur Anwendung im Prüflabor sehr einfach durchgeführt werden. Bei der Messung mit Synchrotron- und Neutronenstrahlen hingegen muss der Messaufbau speziell an den jeweiligen Versuch angepasst werden. Diese Messungen können nur mehr von wissenschaftlichem Personal durchgeführt werden. Zur Messung mit Interferometrie sind noch keine Messgeräte außerhalb des Versuchsstadiums bekannt.

Einfachheit der Auswertung

Für die etablierten Messverfahren gibt es bereits Computerprogramme, mit denen die Eigenspannungen direkt aus den Messdaten berechnet werden können. Im Gegensatz dazu muss bei den, sich noch im Entwicklungsstadium befindlichen, Verfahren die Auswertung selbst vorgenommen werden bzw. ein geeignetes Computerprogramm erstellt werden. Dies ist bei der Konturmethode, der T/O-S Methode, der Interferometrie und der Bohrlochmethode nach [8] der Fall. Die Interferometrie nimmt hier zusätzlich eine Sonderstellung ein, da die Messwerte nicht in Form von Zahlen vorliegen, sondern das Interferenzmuster ausgewertet werden muss. Die T/O-S Methode stellt durch den iterativen Ablauf ebenfalls hohe Anforderungen an das Computerprogramm.

Probenpräparation

Für die Synchrotron- und Neutronenstrahlung, die magnetischen Verfahren und die Bohrlochmethode können die Proben durch Schneiden mit einer gekühlten Bandsäge hergestellt werden. Zur Messung mit Röntgenstrahlen muss die Schnittfläche anschließend geätzt werden oder es wird wie bei der Konturmethode mit einer Drahterodiermaschine geschnitten. Eine Ausnahme ist hier die Messung mit Moiré Interferometrie, denn das Aufbringen des Gitters auf eine große Probe, wie Schienen es sind, ist mit großem Zeit- und Arbeitsaufwand verbunden.

Geschwindigkeit des Verfahrens

Es wird hierbei die gesamte Zeitspanne betrachtet, die von der Probenpräparation bis zum Ergebnis benötigt wird. Bei einem Vergleich der einzelnen Verfahren muss beachtet werden, dass oft unterschiedliche Bereiche gemessen werden. So liefert die Konturmethode ein vollständiges Spannungsbild des Schienenquerschnittes, während mit der Bohrlochmethode nur entlang der Bohrung gemessen werden kann. Die Interferometrie liefert ebenfalls ein Spannungsbild des gesamten Schienenquerschnittes und die Geschwindigkeit der Messung ist nicht zu überbieten, da das Bild sofort entsteht. Die Probenpräparation ist jedoch zeitaufwändig. Bei den magnetischen Verfahren und der Messung mit Strahlung hängt die benötigte Zeit im Wesentlichen von der Zahl der gewünschten Messpunkte ab. Die Synchrotronstrahlung erlaubt dabei wegen der höheren Energie kürzere Messzeiten als Röntgenstrahlung. Die Messung mit Neutronen wird als langsamer bewertet, da angenommen wird, dass die Messung an einer intakten Schiene erfolgt, wodurch sich größere Pfadlängen ergeben. Bei gleichen Proben wäre die Messgeschwindigkeit in etwa gleich der Synchrotronstrahlung.

Verfügbarkeit und Kosten

Die größten Kosten verursachen Messungen mit Synchrotron- und Neutronenstrahlung, da dafür an einer Forschungseinrichtung Messzeit gekauft werden muss. Gleichzeitig ist diese nicht immer verfügbar, sondern die Messungen müssen Monate im Voraus geplant werden. Die Messung mit Röntgenstrahlung kann an vielen Prüfanstalten oder Universitäten durchgeführt werden und ist deswegen leicht verfügbar und wesentlich kostengünstiger. Die Messung mit Interferometrie ist zwar kostengünstig durchführbar, die Probenpräparation ist jedoch zeit- und arbeitsaufwändig. Außerdem gibt es keinen Zugang zu Software, mit der die Auswertung der Interferenzmuster möglich ist. Die magnetischen Verfahren ermöglichen kostengünstige Messungen, wenn ein entsprechendes Messgerät angeschafft wird. Im Falle des MAPS Systems ergab eine Anfrage beim Hersteller jedoch, dass keine Testmessungen durchgeführt werden. Da in diesem Fall das Verfahren nicht geprüft werden kann, muss es als nicht verfügbar bewertet werden.

3.2 Bewertungsmatrix

In Tabelle 3.1 wurden die Bewertungen aus Abschnitt 3.1 nach den, für die Auswahl relevanten, Kriterien zusammengefasst. Die Gesamtbewertung erfolgte durch Bildung des geometrischen Mittels der Einzelbewertungen. Dadurch konnte die Bewertung mit 0 als Ausschlusskriterium verwendet werden. Das Messen der longitudinalen Spannungskomponente wurde doppelt gewichtet, da diese für die Qualität des Endproduktes besonders relevant ist und darüber hinaus noch ein Maximalwert in der Norm [1] festgeschrieben ist. Die Bewertung erfolgte nach folgendem Schlüssel:

- 0 Anforderungen nicht erfüllt, Ausschlusskriterium
- 1 schlecht / hoch / schwierig
- 2 mittel
- 3 gut / niedrig / einfach
- x nicht zutreffend

Tabelle 3.1: Bewertungsmatrix: Zusammenfassende Bewertung der vorgestellten Verfahren zur Eigenspannungsmessung.

	Bohrlochmethode	Röntgenstrahlung	Synchrotronstrahlung	Neutronenstrahlung	Barkhausen-Rauschen	3MA	MAPS	Interferometrie	Konturmethode	T/O-S Methode
long. Spannung	3	1	1	3	1	1	1	3	3	3
Genauigkeit	0	2	3	3	0	0	3	2	2	2
Einfachheit der Messungen	1	2	1	1	3	3	3	2	3	x
Einfachheit der Auswertung	2	3	3	3	3	3	3	0	2	1
Probenpräparation	1	2	3	3	3	3	3	1	3	3
Geschwindigkeit der Messungen	2	2	3	1	3	3	3	3	2	x
Verfügbarkeit	2	3	1	1	3	3	0	1	2	2
Preis	2	2	1	1	3	3	3	1	3	3
Gesamtbewertung	0	2	2	2	0	0	0	0	3	2

3.3 Gewählte Verfahren

Basierend auf den Ergebnissen der Verfahrensbewertung wurden die unten angeführten Verfahren ausgewählt. Mit diesen soll in Folge versucht werden, Eigenspannungen an Schienen der VASCH zu messen:

Neutronenbeugung: Der Aufwand zur Messung von Eigenspannungen an einer intakten Schiene ist zwar groß, aber eine einmalige Messung zur Festlegung einer Referenz für alle weiteren Verfahren wäre empfehlenswert, da die Zuverlässigkeit des Verfahrens bereits anerkannt ist. Die Messung mit Neutronenstrahlung ist außerdem das einzige Verfahren, mit dem alle Spannungskomponenten unter denselben Bedingungen gemessen werden und der vollständige triaxiale Spannungstensor mit nur einer Probe direkt ermittelt werden kann.

Konturmethode: Hier hat vor allem die Einfachheit des Konzeptes überzeugt. Sollten die Ergebnisse zufriedenstellend sein, so wäre es die einfachste Möglichkeit, die longitudinalen Eigenspannungen am gesamten Schienenquerschnitt zu bestimmen.

T/O-S Methode: Wenn das Verfahren erfolgreich umgesetzt werden kann, dann wird, die zur Bestimmung des triaxialen Spannungstensors notwendige Messzeit, und der wirtschaftliche Aufwand, im Vergleich zur Messung mit Neutronen, wesentlich geringer.

4 Experimentelle Beurteilung der ausgewählten Verfahren

Die in Abschnitt 3.3 ausgewählten Verfahren wurden in weitere Folge genutzt, um Eigen-
spannungen in Schienen zu messen. Dabei wurde einerseits die Tauglichkeit der Verfahren
überprüft und andererseits wurde versucht, den triaxialen Eigenspannungszustand der
Schiene zu ermitteln.

4.1 Referenzwerte

Die Referenzwerte für die experimentelle Beurteilung der ausgewählten Verfahren wurden
mit dem in der VASCH angewandten Sägeschnittverfahren ermittelt. Grundlage dafür ist
der in der Norm [1] vorgeschriebene Versuch (siehe dazu auch Abschnitt 2.1.2). Zusätzlich
zur Messung an der Fußmitte (FM) wurden, wie in Abb. 4.1 gezeigt, noch weitere DMS
angebracht, um Referenzwerte über den Umfang der Schiene zu erhalten.

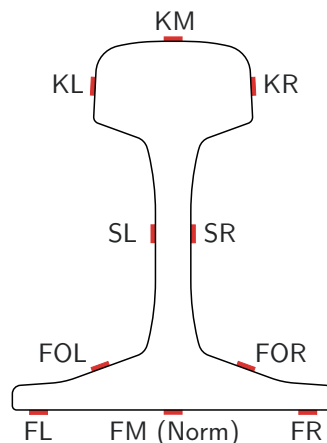


Abbildung 4.1: DMS beim Sägeschnitt: Platzierung und Bezeichnung der DMS bei den Referenzmessungen durch die VASCH.

4.2 Intakte Schiene

Die Bezeichnung „intakte Schiene“ bedeutet im Zusammenhang der mit Eigenspannungsmessung, dass der ursprüngliche Eigenspannungszustand nicht beeinflusst wurde. Dies kann durch eine ausreichend große Probe gewährleistet werden. In der Literatur [27], wurden Proben von ca. 0,5 m Länge als intakte Schiene verwendet. Die Norm [1] hingegen schreibt eine Probe von 1 m Länge vor.

Im Zuge dieser Arbeit wurden die bei den Referenzmessungen anfallenden Teilstücke (siehe Abb. 2.2) als Proben verwendet. Dadurch soll eine möglichst gute Vergleichbarkeit mit den Referenzwerten gewährleistet werden. Um sicher zu stellen, dass die Proben als intakte Schiene gelten, wurde das Teilen der Schiene in einer FEM-Simulation nachgebildet. Die Spannungsverteilung in einem solchen Teilstück ist in Abb. 4.2 gezeigt. Daraus ist klar ersichtlich, dass der ursprüngliche Eigenspannungszustand in der Mitte der Probe erhalten bleibt.

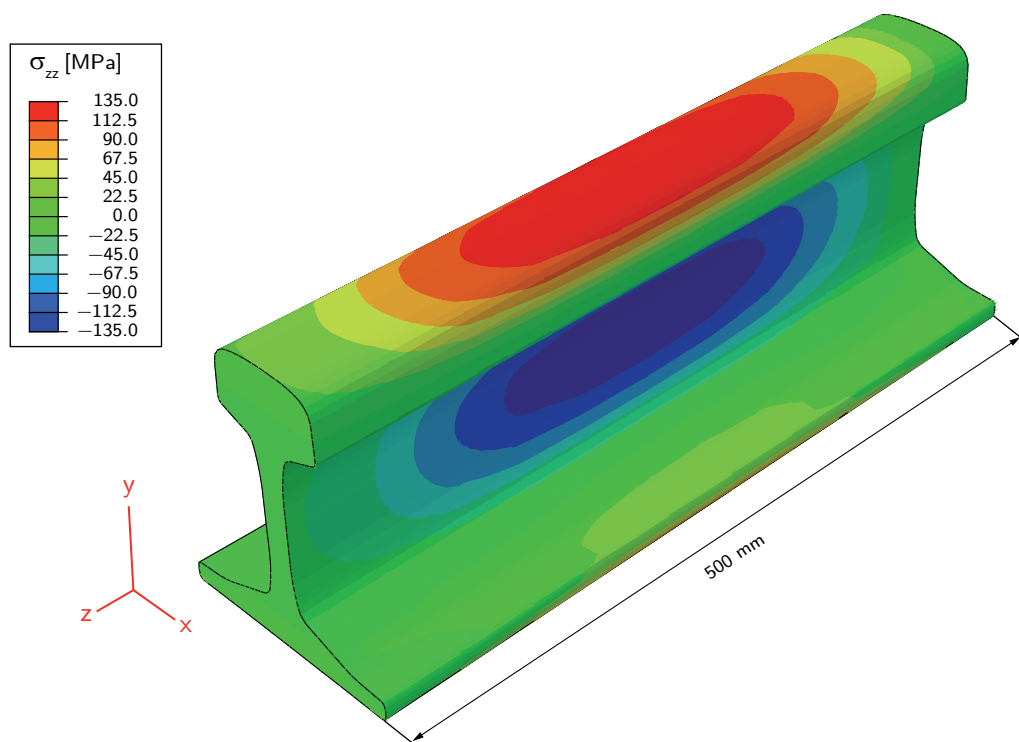


Abbildung 4.2: Intakte Schiene: Die FEM-Simulation zeigt, dass der ursprüngliche Eigenspannungszustand in einer Probe von 0,5 m Länge erhalten bleibt. Die Probe kann daher als „intakte Schiene“ bezeichnet werden.

4.3 Neutronenbeugung

Die Messung mit Neutronen stellt bislang die einzige Möglichkeit dar, die Eigenspannungen einer Eisenbahnschiene wirklich zerstörungsfrei zu messen. Auch wenn Neutronen die höchste Eindringtiefe in Stahl haben, erreicht man bei Schienen wegen der auftretenden Pfadlängen die Grenzen des Verfahrens. So ist die vollständige Bestimmung des triaxialen Spannungstensors über das gesamte Volumen wie in [27] durchgeführt keineswegs gesichert, wenn die zur Verfügung stehende Messzeit aus wirtschaftlichen Gründen begrenzt ist. Um die Umsetzbarkeit zu überprüfen wurden am Berliner Experimentier-Reaktor II (BER II) des Helmholtz-Zentrum Berlin für Materialien und Energie (HZB) experimentelle Untersuchungen im Ausmaß von zwei Tagen durchgeführt.

4.3.1 Anforderungen

Es wurde ein Raster von Messpunkten definiert, das ein Abbild des Eigenspannungszustandes der gesamten Schiene ermöglicht, siehe dazu Abb. 4.3. Um eine höhere Punktedichte zu ermöglichen, wurde der Eigenspannungszustand als symmetrisch angenommen. Die Punkte wurden gleichmäßig über eine Hälfte der Schiene verteilt. Aus diesen Punkten wurde nach Abb. 4.3 eine Mindestanzahl festgelegt, die in der zur Verfügung stehenden Zeit gemessen werden müssen. Sollte es technisch nicht möglich sein, diese Punkte innerhalb der zwei Tage zu messen, so müsste die Messung mit Neutronen unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten als nicht umsetzbar betrachtet werden. Insgesamt wurden 24 Messpunkte festgelegt, acht an der gerichteten und 16 an der ungerichteten Schiene. An der ungerichteten Schiene sollten deshalb mehr Punkte gemessen werden, da diese Werte als Eingangsdaten für die Simulation des Schienenrichtens dienen und es in der Literatur nur wenige Informationen über die Eigenspannungen in ungerichteten Schienen gibt.

Spannungskomponenten messen zu können, muss die Probe so positioniert werden, dass die Dehnung des Gitters in die jeweilige Richtung bestimmt werden kann. Dies erfolgt entweder durch Drehen des Tisches oder durch manuelles Umpositionieren der Probe. Die Bestimmung von $d_0(hkl)$ erfolgte analog zu [27] an kleinen Würfeln, die als spannungsfrei betrachtet werden können.

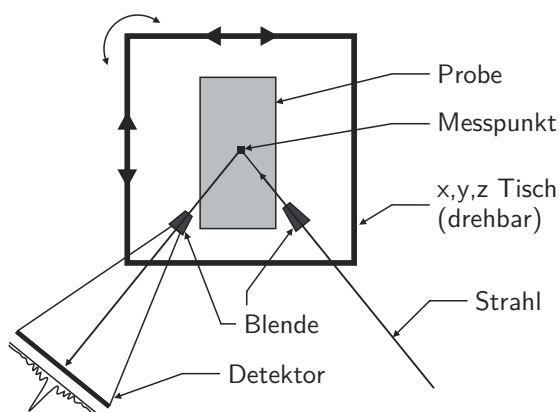


Abbildung 4.4: Messaufbau bei der Neutronenbeugung: Schema des bei den Messungen am BER II verwendeten Messaufbaus

4.3.3 Probleme

Hauptproblem bei den Messungen war, dass der Messaufbau für so große Proben eigentlich ungeeignet war. Dies führte dazu, dass ein freies Bewegen der Probe ohne mit den Blenden zu kollidieren nicht möglich war. Daher musste die Schiene zur Bestimmung jeder Spannungskomponente manuell umpositioniert werden. Punkte im Fuß oder Steg der Schiene konnten deshalb gar nicht gemessen werden, bzw. es konnten nicht alle drei Spannungskomponenten bestimmt werden.

Im Zuge der Experimente zeigte sich, dass eine ca. 5 cm dicke Stahlprobe problemlos durchstrahlt werden kann. Bei größeren Pfadlängen steigt die notwendige Messzeit exponentiell an (vgl. Abb. 2.7), dies kann durch Abstriche bei der Messgenauigkeit teilweise kompensiert werden. Durch Kippen der Schiene kann die Pfadlänge verkürzt werden. Dieses Potential konnte jedoch wegen des Platzproblems nicht vollständig ausgenutzt werden.

4.3.4 Ergebnisse

Wegen der Probleme mit dem Messplatz konnte im Endeffekt nur an fünf Punkten der ungerichteten Schiene Eigenspannungen gemessen werden. Aus den vorliegenden Ergebnissen

ergibt sich jedoch, wie aus Tabelle 4.1 ersichtlich, dass alle gemessenen Eigenspannungen sehr klein sind und in der Größenordnung des Messfehlers liegen. Wie Abb. 4.5 zeigt, decken sich die Ergebnisse auch mit den Messergebnissen der DMS. Es kann daher angenommen werden, dass die Eigenspannungen in der ungerichteten Schiene so klein sind, dass sie auf diese Weise nicht bestimmt werden können. Untermauert wird dieser Schluss dadurch, dass auch Luzin et al. [27] zum selben Ergebnis gekommen sind. Der Messfehler ist dabei im Kopf jedoch bereits sehr groß. In Tabelle 4.1 sind neben den gemessenen Punkten auch die dazugehörigen Pfadlängen und der berechnete Messfehler angegeben. Daraus ist deutlich ersichtlich, dass die Punkte 1 und 6 im Kopf in longitudinale Richtung bereits sehr große Pfadlängen haben und es deshalb zu dem großen Messfehler kommt.

Die Messungen am BER II brachten zwar nicht das gewünschte Ergebnis, da nicht alle festgelegten Messpunkte gemessen werden konnten. Wie nachfolgend dargelegt, kann jedoch nicht objektiv beurteilt werden, ob das in Abschnitt 4.3.1 festgelegte Ausschlusskriterium nur in diesem Fall oder im Allgemeinen zutrifft: An einem größeren Messplatz wäre es möglich gewesen, die Punkte im Fuß in kurzer Zeit zu messen, da die Pfadlängen hier kurz sind. Durch uneingeschränktes Kippen der Schiene wären auch im Kopf kürzere Pfadlängen möglich gewesen. Des Weiteren gibt es Reaktoren mit höherer Leistung, d.h. einem höheren Neutronenfluss. Das würde die Messzeiten verkürzen, bzw. die Genauigkeit der Messungen erhöhen.

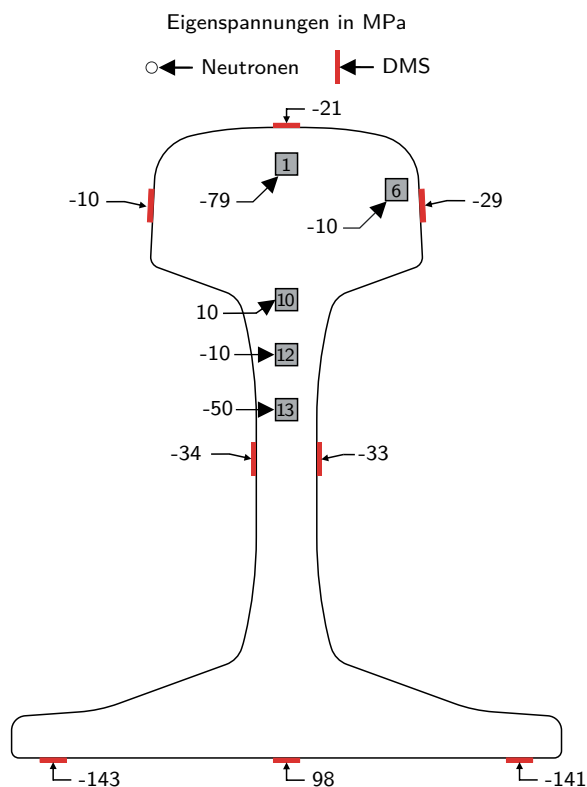


Abbildung 4.5: Ergebnisse der Neutronenbeugung: Die mit Neutronenbeugung gemessenen longitudinalen Eigenspannungen einer ungerichteten Schiene und als Vergleich die Ergebnisse der Messungen mit DMS durch die VASCH.

Tabelle 4.1: Ergebnisse der Neutronenbeugung: Die Eigenspannungen, der errechnete Messfehler und die in der Schiene zurückgelegte Wegstrecke (Pfad) für jene Punkte, bei denen alle drei Spannungskomponenten bestimmt werden konnten.

Eigenspannungen der ungerichteten Schiene						
Messpunkt	transversal		vertikal		longitudinal	
	Spannung MPa	Pfad cm	Spannung MPa	Pfad cm	Spannung MPa	Pfad cm
1	-5 ± 56	5,4	-50 ± 41	1,0	-79 ± 87	9,5
6	-15 ± 28	1,5	35 ± 30	2,9	-10 ± 51	6,2
10	-2 ± 38	3,3	-33 ± 25	3,2	10 ± 29	4,1
12	-8 ± 30	2,6	52 ± 49	2,6	-10 ± 28	3,2
13	-21 ± 20	2,3	-9 ± 19	2,2	-50 ± 20	2,5

4.4 Konturmethode

4.4.1 Schneiden der Schiene

Als Probe wurden ein 0,5 m langes Stück einer gerichteten und einer ungerichteten Schiene verwendet. Das Schneiden der Schienen erfolgte, wie in Abschnitt 2.1.5 beschrieben, durch Drahterodieren. Bei der zur Verfügung stehenden Drahterodiermaschine konnte die Schiene aufgrund der maximalen Schnitthöhe nur liegend geschnitten werden. Dazu wurde eigens eine Vorrichtung konstruiert, um ein Verbiegen der Schiene durch die Eigenspannungen zu verhindern und einen geraden Schnitt sicher zu stellen. Der Drahtdurchmesser und damit die Schnittbreite betrug 0,25 mm, die Vorschubgeschwindigkeit wurde von der Maschine automatisch geregelt, die Gesamtschnittzeit lag bei etwa fünf Stunden. Abb. 4.6 zeigt die auf der Vorrichtung montierte Schiene in der Drahterodiermaschine.



Abbildung 4.6: Schiene beim Drahterodieren: Die auf der Haltevorrichtung befestigte Schiene in der Drahterodiermaschine. 1) Haltevorrichtung, 2) Schiene, 3) Führung für den Draht, 4) Befestigung.

4.4.2 Vermessen der Schnittfläche

Die Schnittfläche wurde mit einer KMM vermessen. Zum Erfassen der Verschiebungen wurde ein Raster von 2×2 mm gewählt. Der Abstand vom Rand der Schiene betrug 1 mm. Der Rand und somit eine mögliche Änderung in Breite oder Länge konnte nicht gemessen werden, da wegen der rauen Oberfläche der Schiene keine ausreichende Messgenauigkeit erreicht werden konnte. Abb. 4.7 zeigt die gemessenen Verschiebungen an der (a) gerichteten und (b) ungerichteten Schiene und die Lage der Schnittfläche im Raum.

Besonders die Lage der Schnittfläche der ungerichteten Schiene legt nahe, dass der Schnitt nicht exakt gerade war. Der in Abb. 4.8 gezeigte Vergleich mit der gegenüberliegenden Schnittfläche bestätigt dies für beide Schienen. Die später gemessenen Flächen (blau) weisen eine unebenere Oberfläche auf. Dies kann auf Korrosion durch die Lagerung zurückgeführt werden und wirkt sich auch in örtlichen Spannungsspitzen im Ergebnis aus, wie in Abb. 4.10(b) zu sehen ist. Nach dem Vermessen kann bereits ein deutlicher Unterschied zwischen einer gerichteten und einer ungerichteten Schiene festgestellt werden.

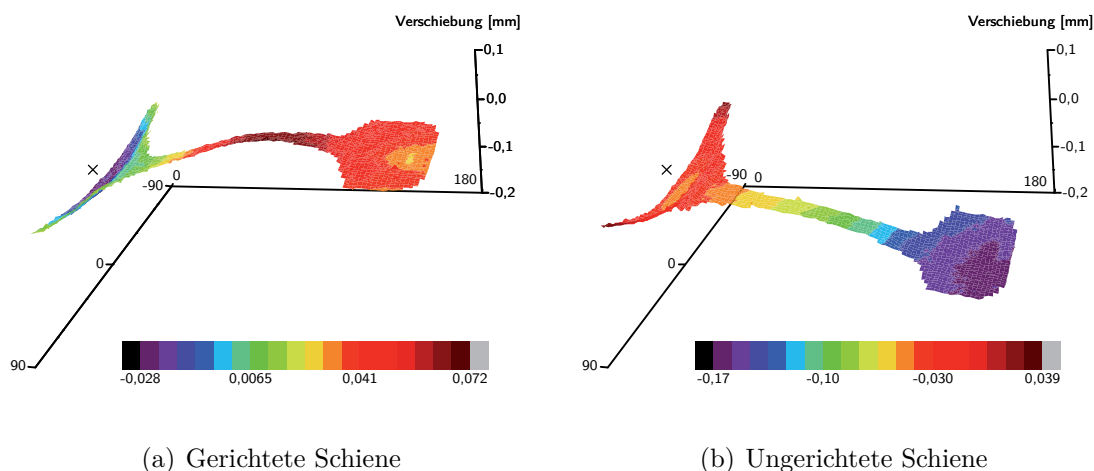


Abbildung 4.7: 3D-Darstellung der Schnittflächen: Die Verschiebung der Schnittflächen und deren Lage im Raum. Der Nullpunkt des KS der KMM ist mit \times markiert.

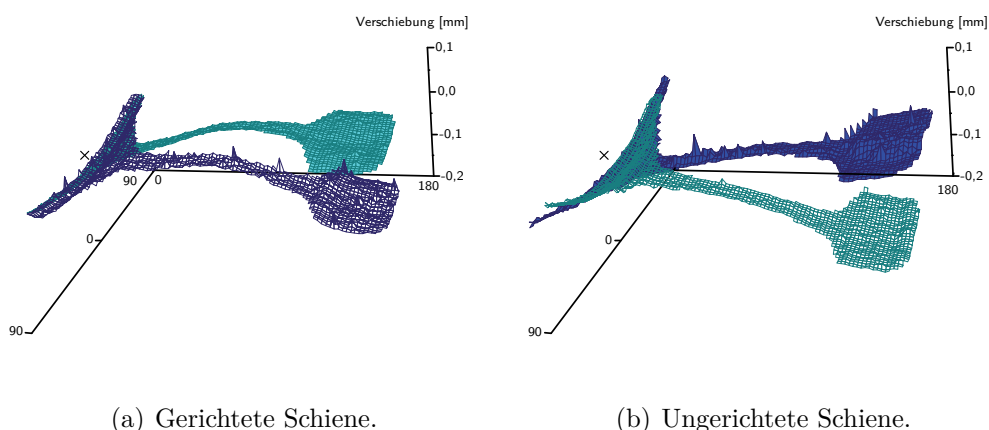


Abbildung 4.8: Vergleich der Schnittflächen - Verschiebungen: Die mit der KMM gemessenen Verschiebungen. Für die erste Fläche (türkis) und die zweite Fläche (blau) Die Schiefe des Schnittes ist für beide Schienen deutlich erkennbar.

4.4.3 Rückführen der Verschiebungen

Das Rückführen der Verschiebungen erfolgte durch eine FEM-Simulation mit dem Softwarepaket ABAQUS/Standard [42] am Lehrstuhl für Umformtechnik an der Montanuniversität Leoben (LUT), gemäß dem in Abb. 2.6 dargestellten Schema. Die Knoten des FEM-Netzes wurden direkt aus den mit der KMM gemessenen Datenpunkten generiert. Der verwendete Elementtyp war C3D8R, sofern vier Knoten verfügbar waren. Bei nur drei verfügbaren Knoten in den Randbereichen kamen C3D6 Elemente zum Einsatz. Die Dicke der ersten Elementreihe betrug 2 mm, danach wird das Netz einer geometrischen Reihe folgend gröber. Die Gesamtlänge des simulierten Schienenstückes betrug, wie auch in Wirklichkeit, 250 mm. Eine 3D-Darstellung des FEM-Modells ist in Abb. 4.11 zu sehen. Das Rückführen auf die gerade Schnittfläche erfolgte durch Verschieben der vordersten Knoten um die negative gemessene Verschiebung. Die anderen beiden Verschiebungsfreiheitsgrade waren dabei gesperrt.

4.4.4 Ergebnisse

Abb. 4.9 zeigt die mit Hilfe der Konturmethode ermittelten longitudinalen Eigenspannungen der a) gerichteten und b) ungerichteten Schiene. Bei der gerichteten Schiene ist der aus der Literatur [20, 26] bekannte, C-förmige Verlauf in vertikaler Richtung deutlich zu erkennen. Die Zugspannungen im Kopf konzentrieren sich allerdings nur auf einen kleinen Bereich in der Mitte, während der Rest des Kopfes nur geringe Spannungen aufweist. Im Fuß gibt es in horizontale Richtung ebenfalls einen C-förmigen Verlauf mit Druckspannungen an den Rändern und Zug in der Mitte.

Die ungerichtete Schiene hat im Kopf und im Steg einen relativ gleichmäßigen Spannungszustand mit geringen Spannungen im Druckbereich. Im Fuß zeigt sich dasselbe Bild wie bei der gerichteten Schiene, wobei der Spannungsgradient jedoch größer ist.

Dass der Schnitt nicht exakt gerade war, hatte wie der Vergleich in Abb. 4.10 zeigt, keinen wesentlichen Einfluss auf das Ergebnis. Für die Eigenspannungen ist nämlich nur der Gradient der Verschiebungen relevant und nicht deren Absolutwert. Beachtenswert ist jedoch, dass, wie in Abb. 4.11 zu sehen ist, die berechneten Spannungen in Längsrichtung einen sehr starken Gradienten aufweisen und bereits wenige Millimeter hinter der Schnittfläche stark abfallen. Grund dafür ist, dass die Eigenspannungen im FEM-Modell durch rein elastisches Verschieben der Knoten an der Schnittfläche berechnet werden. Durch das sensible Verhalten der Messung auf kleinste Verunreinigungen kann es direkt an der Schnittfläche lokal zu sehr hohen errechneten Spannungen kommen. Deshalb werden die

Spannungen etwas hinter der Schnittfläche dargestellt, um diese Ausreißer zu glätten und zu einem realistischem Ergebnis zu kommen.

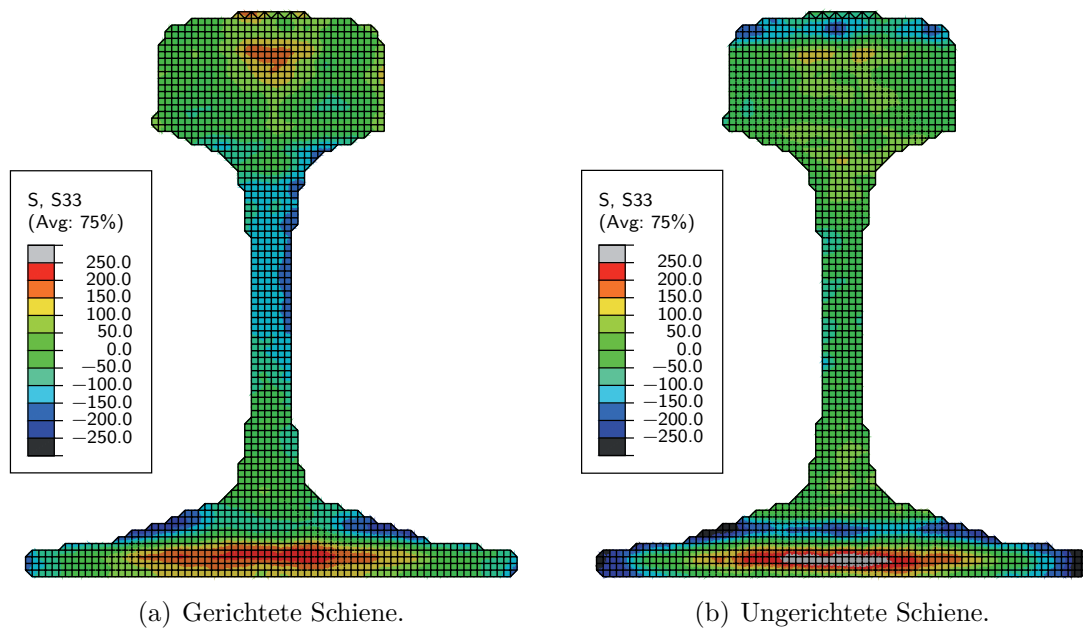


Abbildung 4.9: Mit der Konturmethode ermitteltes Eigenspannungsprofil: Longitudinale Eigenspannungen der a) gerichteten und b) ungerichteten Schiene 3 mm hinter der Schnittfläche

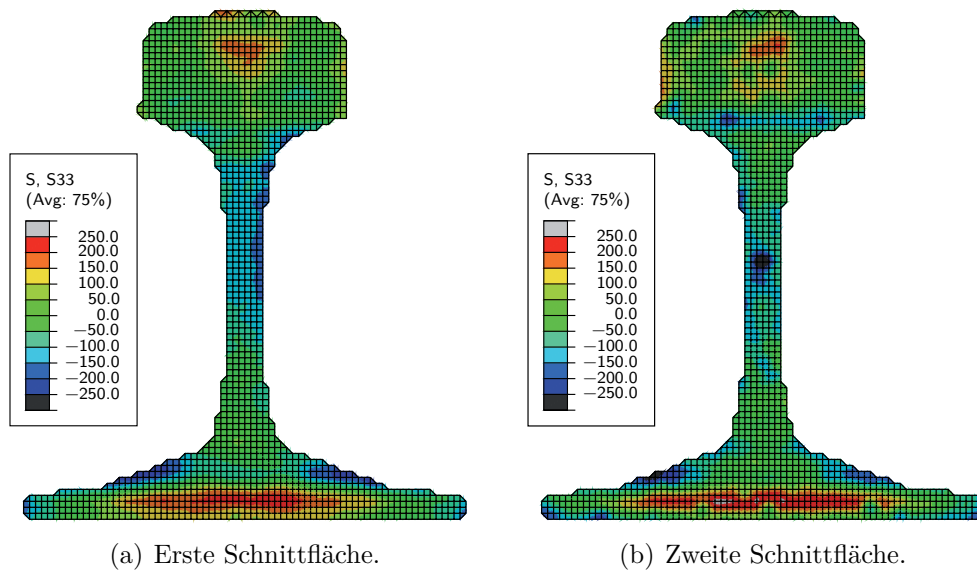


Abbildung 4.10: Vergleich der Schnittflächen - Eigenspannungen: Longitudinale Eigenspannungen der gerichteten Schiene für beide Schnittflächen. Die Schiefelage des Schnittes hat kaum Einfluss auf die Eigenspannungen. Die Verunreinigungen an der zweiten Schnittfläche führen lokal zu sehr hohen Eigenspannungen.

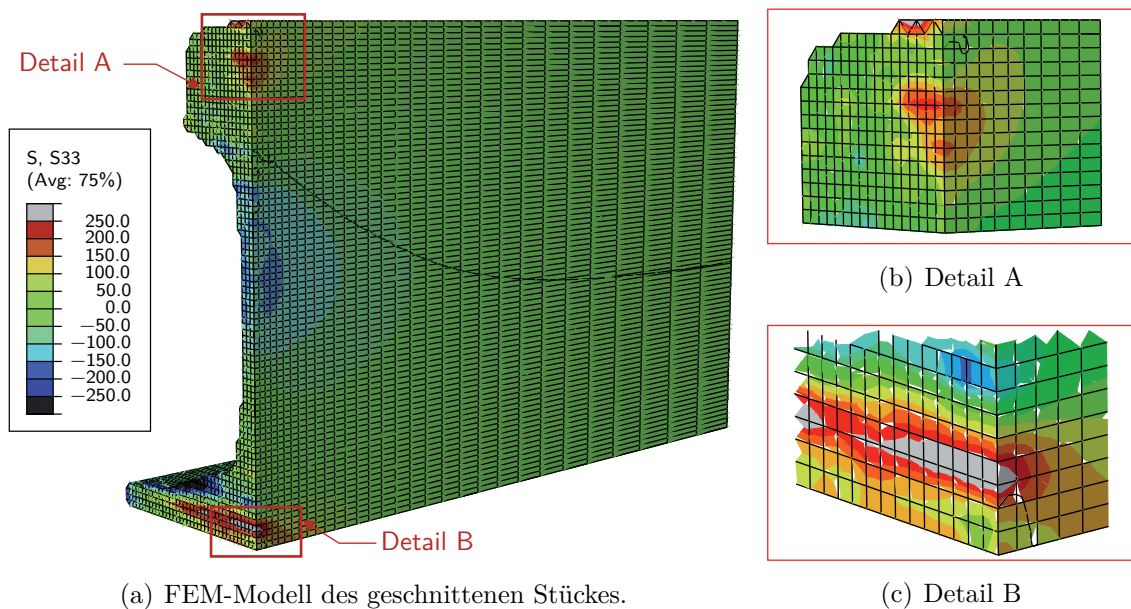


Abbildung 4.11: Längsschnitt durch das FEM-Modell: Die Details A und B zeigen den Spannungsabfall hinter der Schnittfläche. Die Dicke der ersten Elementreihe beträgt ca. 2 mm.

4.5 T/O-S Methode

4.5.1 Ansatz

Am LUT wurde versucht, die in Abschnitt 2.3 beschriebene Methode in ABAQUS/Standard [42] mit einem Python Script umzusetzen. Bevor Berechnungen an Schienen erfolgten, wurde die Umsetzbarkeit der Methode an einem einfachen, überprüfbar Modell getestet. Dazu wurde ein rechteckiger Stab mit einem V-Förmigen Spannungszustand in longitudinale Richtung beaufschlagt.

4.5.2 Versuch am einfachen Modell

Abb. 4.12 zeigt die TS und die OS im Ausgangszustand. Von den 100 MPa der beaufschlagten Spannung σ_{zz} sind 50% in der Spannungskomponente σ_{tt} enthalten. Im ersten Schritt ließ man die Spannungen relaxieren, wie es auch beim Herausschneiden einer Scheibe geschieht. Dadurch entsteht der in Abb. 4.13 dargestellte Zustand. In der TS relaxiert die longitudinale Spannung völlig und es entstehen durch Querkontraktion Spannungen in der Ebene. In der OS relaxiert die Normalkomponente σ_{nn} völlig und die Komponenten in der Ebene (σ_{ss}, σ_{tt}) werden kleiner. Am oberen und unteren Rand beider Scheiben jedoch wird die für die Rekonstruktion von σ_{zz} maßgebliche Spannung σ_{tt} nahezu Null. Nach dem Schneiden erfolgt der in Tab 2.1 beschriebene iterative Vorgang. Das Ergebnis nach sechs Iterationsschritten ist in Abb 4.14 gezeigt. Im mittleren Bereich konnte der ursprüngliche Spannungszustand vollständig rekonstruiert werden. In den Randbereichen jedoch war, wegen der Relaxation von σ_{tt} , die Rekonstruktion nicht möglich.

Wenn man die OS unter Vernachlässigung der Querkontraktion ($\nu = 0$) relaxieren lässt, dann stellt sich der in Abb. 4.15 gezeigte Zustand ein. Der Vergleich mit Abb 4.14(b) zeigt, dass die Methode in der Lage ist, die Spannungsänderungen aufgrund der Querkontraktion vollständig zu rückzurechnen.

4.5.3 Ergebnisse

Trotz der schon beim Modellversuch auftretenden Probleme wurde die Methode an einer Schiene getestet. Der Einfluss des Schneidens auf die Eigenspannungen der Schiene ist in Abb. 4.16 gezeigt. Die für die Rekonstruktion wichtige Spannungskomponente σ_{tt} relaxiert

im Steg und im Fuß nahezu vollständig. Zusätzlich kam es zu einer Spannungsumlagerung im Kopf, womit Grundannahme d) der T/O-S-Methode (vgl. Abschnitt 2.3) verletzt wurde. Aus diesen Gründen konnte der ursprüngliche Eigenspannungszustand der Schiene mit der T/O-S Methode nicht rekonstruiert werden.

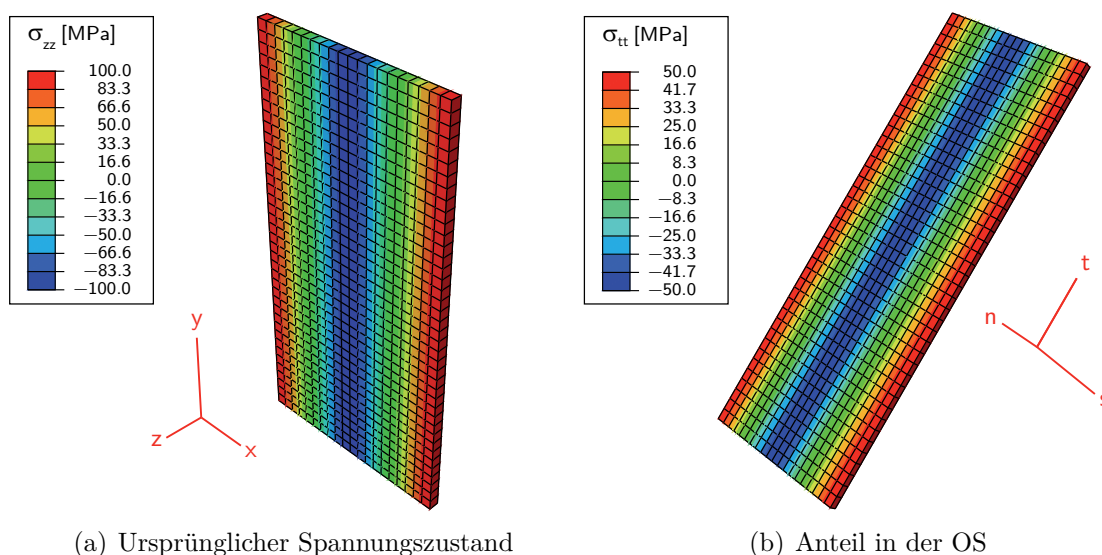


Abbildung 4.12: Modellversuch T/O-S - Ausgangszustand: Der Körper wurde mit einem V-Förmigen Spannungsprofil in z -Richtung beaufschlagt. In b) ist der in der OS vorhandene Anteil von σ_{zz} gezeigt.

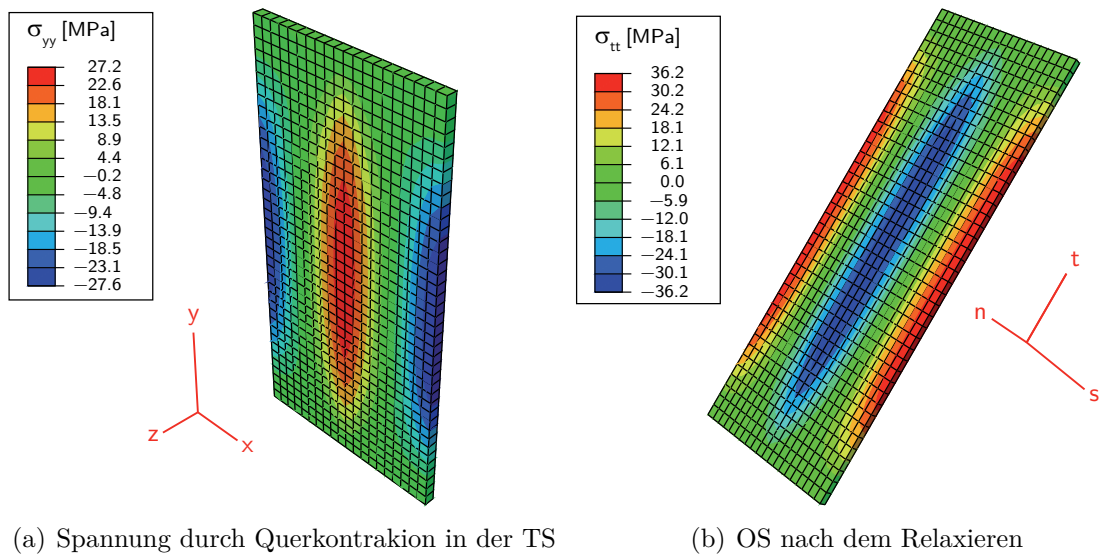


Abbildung 4.13: Modellversuch T/O-S - Nach dem Schneiden: In der TS relaxiert σ_{zz} beim Schneiden vollständig und durch die Querkontraktion entstehen Spannungen in der Ebene. In der OS relaxiert σ_{tt} am oberen und unteren Rand vollständig.

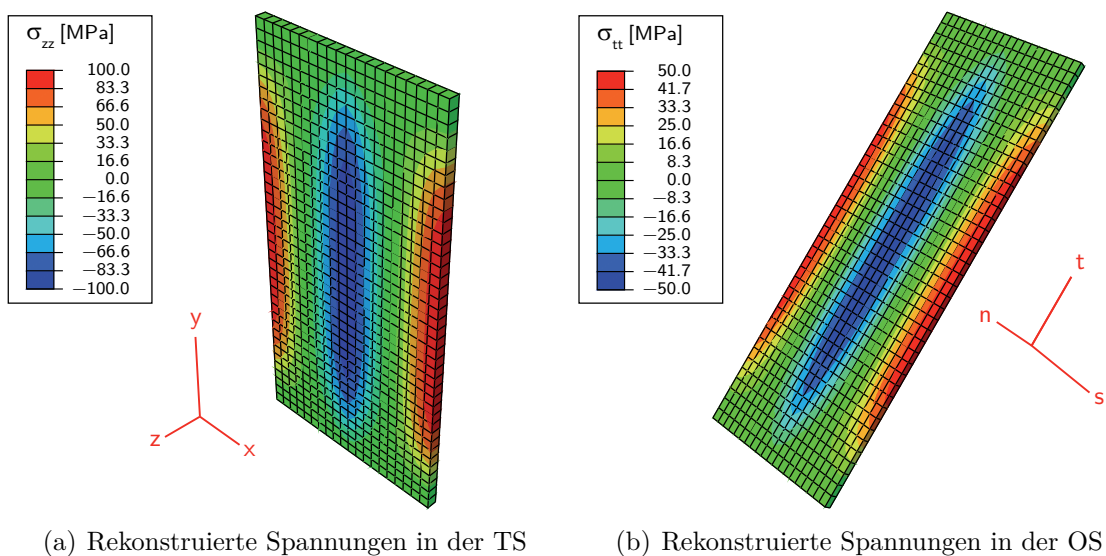


Abbildung 4.14: Modellversuch T/O-S - Nach sechs Iterationen: Das Konvergenzkriterium ist erreicht. Der ursprüngliche Spannungszustand konnte im Mittelteil beider Scheiben rekonstruiert werden. Am oberen und unteren Rand war dies durch das Relaxieren von σ_{tt} in diesem Bereich nicht möglich.

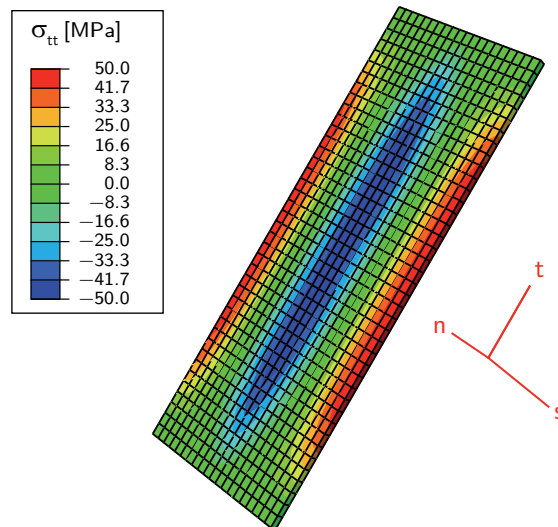
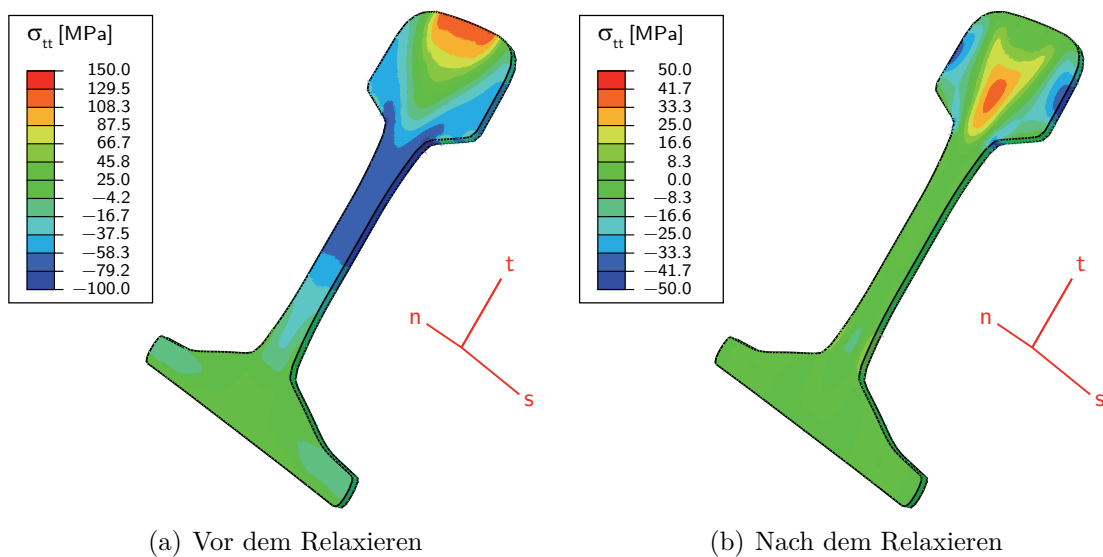


Abbildung 4.15: Modellversuch T/O-S - Ohne Querkontraktion: Lässt man die OS unter Vernachlässigung der Querkontraktion ($\nu=0$) relaxieren, erhält man dasselbe Ergebnis wie mit der T/O-S Methode.



(a) Vor dem Relaxieren

(b) Nach dem Relaxieren

Abbildung 4.16: Verhalten der Schiene: Beim Schneiden relaxiert σ_{tt} im Steg und im Fuß vollständig. Im Kopf findet eine Spannungsumlagerung zur Mitte hin statt. Der ursprüngliche Spannungszustand kann deswegen nicht mehr rekonstruiert werden. Anm.: Zur besseren Darstellbarkeit wurden die Skalen unterschiedlich gewählt.

5 Diskussion der Ergebnisse

Eine Gegenüberstellung der einzelnen Methoden, sowie ein Vergleich zu den mit DMS als Referenz gemessenen Eigenspannungswerten zeigt, wie in Abb. 5.1 zu sehen ist, ein durchaus einheitliches Bild. Qualitativ zeigt sich eine gute Übereinstimmung, wobei es für den Spannungsverlauf im Inneren der Schienen keine Referenzwerte gibt.

Für die ungerichtete Schiene bestätigen die Ergebnisse der Neutronenstreuung jedoch die Konturmethode im Kopf. Im Fuß ergibt sich, wie in Abb. 5.1(d) zu sehen, ein extremer Zug-Druck Wechsel, der sehr hohe Spannungen zur Folge hat. Eine mögliche Ursache ist, dass beim Schneiden der Werkstoff in diesem Bereich plastifiziert. Ein Hinweis darauf sind auch die extrem hohen Spannungen an den Fußflanken und -enden (Bereiche A und B in Abb. 5.1(a) und Abb. 5.1(b)). Diese liegen zum Teil bereits über der Fließgrenze des Werkstoffes. Dies ist zwar nicht realistisch, ist aber durch das rein elastische Werkstoffmodell der FEM-Simulation zur Spannungsbestimmung aus den Verschiebungen der an der Schnittfläche begründet.

Im Falle der gerichteten Schiene kann der Verlauf im Inneren nicht durch Messungen mit Neutronen belegt werden, da keine Vergleichswerte zur Verfügung stehen. Das Ergebnis stimmt jedoch qualitativ mit den Messungen von Kelleher et. al [15] (vgl. Abb. 2.13) überein.

Vergleicht man nun die absoluten Zahlen, so ist zu beachten, dass mit der Konturmethode, wie in Abschnitt 4.4.2 ausgeführt, nicht bis ganz an den Rand gemessen werden konnte. Somit liegen beim Vergleich mit DMS die Werte nicht an derselben Stelle der Schiene. Des Weiteren führen bei der Konturmethode bereits kleinste Verunreinigungen zu sehr hohen, berechneten Spannungen (siehe dazu Abb. 4.10). So kann beispielsweise die Abweichung im Kopf der gerichteten Schiene auf die in Abb. 4.11(b) zu sehende Spannungsspitze am oberen Rand zurückgeführt werden. Zuletzt lässt die Wahl der Tiefe für die Ergebnisdarstellung, wie in Abschnitt 4.3.4 beschrieben, einigen Spielraum bei den quantitativen Ergebnissen der Konturmethode. Allerdings sind die DMS beim Sägeschnitt ebenfalls hinter der Schnittfläche platziert, was bei Vergleichen ebenfalls zu berücksichtigen ist.

Auch wenn es noch Diskrepanzen zwischen den Ergebnissen gibt, so ist es mit der Konturmethode möglich, die für das Projekt „Eigenspannungsoptimiertes Richten von Eisenbahnschienen“ notwendigen Eingangsdaten zu ermitteln und den simulierten Eigenspan-

nungszustand zu verifizieren. Unabdingbare Voraussetzung ist jedoch, dass die Methode anhand von Messungen mit Neutronen ausreichend validiert werden kann.

Im Falle der T/O-S-Methode konnte, wie in Abschnitt 4.5.3 beschrieben, gezeigt werden, dass der Einfluss der Querkontraktion, die durch das Relaxieren der longitudinalen Spannungskomponente hervorgerufen wird, rückgängig gemacht werden kann. Da jedoch wegen der Relaxation am Rand Teile der Information über die longitudinale Spannungskomponente vollständig verloren gehen, ist es nicht möglich, den triaxialen Spannungszustand vollständig zu rekonstruieren.

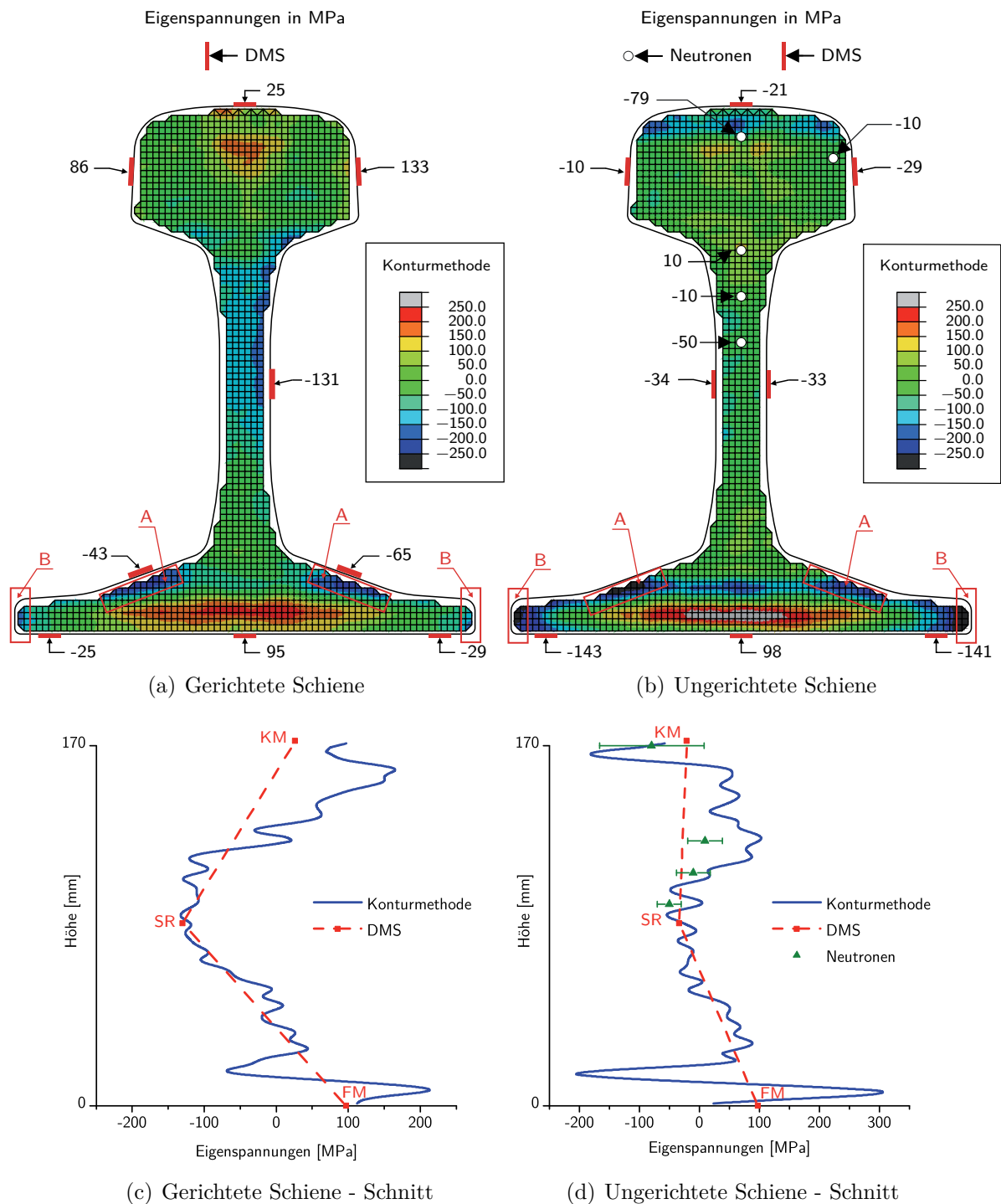


Abbildung 5.1: Vergleich der Ergebnisse: Longitudinale Eigenspannungen der (a) gerichteten und (b) ungerichteten Schiene, bestimmt mit der Konturmethode und im Falle der ungerichteten Schiene mit Neutronen. Als Vergleich die Ergebnisse der Messung mit DMS durch die VASCH. In (c) und (d) sind die dazugehörigen Schnitte entlang der Symmetrieachse gezeigt. Die Bereiche A und B zeigen unrealistisch hohe Eigenspannungen

6 Zusammenfassung

Im Zuge dieser Arbeit sollte basierend auf einer Literaturstudie eine Methode ausgewählt werden, mit der es möglich ist, die Eigenspannungen im gesamten Volumen einer Eisenbahnschiene zu bestimmen, ohne dazu aufwändige Zerlegeschritte anwenden zu müssen. Motivation war, für das Projekt „Eigenspannungsoptimiertes Richten von Eisenbahnschienen“ die Eingangsdaten für die Simulation zu bestimmen und anschließend das Ergebnis verifizieren zu können. Dazu wurden im ersten Teil die aus der Fachliteratur recherchierten Methoden zur Eigenspannungsmessung beschrieben und anschließend hinsichtlich Tauglichkeit, Umsetzbarkeit, Genauigkeit, Kosten und Aufwand bewertet. Aus diesen Methoden wurden die Messung mit Neutronenstrahlen, die Konturmethode und die T/O-S Methode für praktische Versuche ausgewählt. Als Referenzwerte zur Bewertung der Ergebnisse dienten durch die VASCH (siehe Abschnitt 4.1) durchgeführte Messungen mit DMS. Die Messung mit Neutronenstrahlen (siehe Abschnitte 2.2.1.1 und 2.2.1.3) ermöglicht als einziges Verfahren das völlig zerstörungsfreie Messen von Eigenspannungen im Inneren von Schienen. Deshalb ist es das geeignetste Verfahren, um eine Vergleichsbasis für die beiden anderen Methoden zu schaffen. Nachteil der Messung mit Neutronenstrahlung ist, dass die Messungen zwar technisch machbar, jedoch sehr zeitaufwändig und kostenintensiv sind. Aus diesem Grund wurden am BER II Vorversuche durchgeführt (siehe Abschnitt 4.3), um den notwendigen Aufwand für umfassendere Messungen abschätzen zu können. Die gesteckten Ziele konnten nicht erreicht werden, aber es konnten an fünf Stellen der ungerichteten Schiene Eigenspannungen bestimmt werden.

Die Konturmethode (siehe Abschnitt 2.1.5) war das messtechnisch gesehen einfachste Verfahren von allen. Die Eigenspannungen werden, aus den an der freien Fläche eines Schnittes entstandenen Verschiebungen bestimmt. Die Verschiebungen werden mit einer Koordinatenmessmaschine gemessen und anschließend daraus mit einem FEM-Modell die Eigenspannungen berechnet. Das Verfahren zeigte bereits nach einem exemplarischen Versuch überraschend gute Übereinstimmung mit den Referenzwerten (siehe Abb. 5.1) und der Literatur [15, 20, 26].

Die T/O-S Methode (siehe Abschnitt 2.3) erschien als sehr aussichtsreiches Verfahren, den vollständigen triaxialen Spannungszustand ermitteln zu können, ohne dabei jedes mal mit Neutronen an der intakten Schiene messen zu müssen. Grundidee des Verfahrens ist, dass in einer zweiten, schräg geschnittenen Scheibe Teile der longitudinalen Spannungskom-

ponente erhalten bleiben, während diese in einer geraden Scheibe vollständig relaxiert. Zusätzlich wird die beim Schneiden durch Querkontraktion entstehende Spannungsänderung in den Scheiben kompensiert. Die Umsetzung erfolgt durch ein iteratives Näherungsverfahren in einem FEM-Modell. Anhand eines einfachen Modellversuches konnte gezeigt werden, dass das Verfahren zwar korrekt arbeitet, die Rekonstruktion aber nicht in allen Bereichen möglich ist. Durch Relaxation gehen in Randbereichen die notwendigen Informationen verloren. Es zeigte sich, dass dieser Effekt in der Schiene sehr stark auftritt (siehe Abb. 4.16) und die T/O-S Methode deshalb auf Schienen nicht angewandt werden kann.

Als offener Punkt verbleibt das möglichst umfangreiche Bestimmen der Eigenspannungen mit Neutronen, sodass fundierte Referenzwerte für die Eigenspannungen im Inneren der Schiene ermittelt werden. Diese können benutzt werden, um die Konturmethode zu qualifizieren.

7 Ausblick

Es konnte anhand eines exemplarischen Versuches gezeigt werden, dass es möglich ist, die longitudinalen Eigenspannungen der Schiene mit der Konturmethode zu bestimmen. Im Zuge dieses Versuchs haben sich Fragestellungen ergeben, die noch beantwortet werden müssen, bevor ein Einsatz dieser Methode für gesicherte Messungen möglich ist.

Grundvoraussetzung dafür ist, dass die Eigenspannungen zumindest einer gerichteten und einer ungerichteten Schiene mit Neutronen bestimmt werden, um eine fundierte Referenz zu schaffen. Besonderes Augenmerk sollte dabei auf die Zonen in der Fußmitte und im Kern des Kopfes gelegt werden, welche mit der Konturmethode extreme Spannungen zeigen.

Dann muss überprüft werden, in wie weit die Lage der Schiene beim Schneiden einen Einfluss auf das Ergebnis hat und wie mit den Schnittflächen umgegangen werden muss, um Einflüsse durch Verunreinigungen oder Korrosion, nach dem Schneiden zu vermeiden. Möglicherweise ist es günstig, die Schnittflächen vor der Messung zu reinigen. Ein Einfluss auf das Messergebnis wäre in diesem Falle zu prüfen. Auch ist nicht geklärt, ob das Festspannen der Schiene beim Schneiden einen Einfluss auf den Schnitt und die Verschiebungen hat.

Der nächste Punkt betrifft den Messaufbau an der KMM: hier gilt es zu prüfen, ob ein feineres Raster und ein geringerer Abstand zum Rand eine Verbesserung der Ergebnisse zur Folge haben. Des Weiteren soll untersucht werden, ob es durch geeignete Probenpräparation doch möglich ist, das Profil und damit mögliche Verschiebungen in der Schnittebene zu erfassen. Sollte dies möglich sein, muss beurteilt werden, ob es dadurch einen signifikanten Einfluss auf das Ergebnis der Konturmethode gibt. Als Ersatz wäre auch ein Modellversuch an einer anderen Probe denkbar.

Im abschließenden Schritt können die Daten der Messung mit Neutronen dazu verwendet werden, den geeigneten Abstand von der Schnittfläche zur Ausgabe der Ergebnisse festzulegen.

Eine zusätzliche Möglichkeit zur Steigerung der Genauigkeit besteht darin, dass der Durchschnitt der Verschiebungen beider Schnittflächen zur Berechnung der Eigenspannungen verwendet wird. Voraussetzung dafür ist jedoch, dass beide Messraster genau deckungsgleich sind.

Abbildungsverzeichnis

2.1	Battelle 3D Verfahren.	4
2.2	Sägeschnitt.	5
2.3	Bohrloch- und Ringkernmethode.	6
2.4	Funktionsweise eines Moiré Interferometers.	8
2.5	Funktionsweise eines Twyman/Green Interferometers.	8
2.6	Prinzip der Konturmethode.	10
2.7	Messzeit bei der Neutronenstreuung.	13
2.8	Beugung des Röntgenstrahls an den Netzebenen.	14
2.9	Koordinatensysteme bei der Röntgenbeugung.	15
2.10	Typen von $\sin^2 \psi$ -Verteilungen.	16
2.11	Bezeichnung der Spannungsrichtungen.	17
2.12	Vergleich Röntgen- und Synchrotronstrahlung.	18
2.13	Eigenspannungen einer neuen, rollengerichteten Schiene.	19
2.14	Vergleich Barkhausen - DMS transversal.	20
2.15	Vergleich Barkhausen - DMS vertikal.	21
2.16	Vergleich MAPS - Synchrotron.	23
2.17	Schnitte bei der T/O-S Methode.	24
4.1	DMS beim Sägeschnitt.	33
4.2	Intakte Schiene.	34
4.3	Messpunkte für die Neutronenbeugung.	36
4.4	Messaufbau bei der Neutronenbeugung.	37
4.5	Ergebnisse der Neutronenbeugung.	39
4.6	Schiene beim Drahterodieren.	40

4.7	3D Darstellung der Schnittflächen.	41
4.8	Vergleich der Schnittflächen - Verschiebungen.	41
4.9	Mit der Konturmethode ermitteltes Eigenspannungsprofil.	43
4.10	Vergleich der Schnittflächen - Eigenspannungen.	44
4.11	Längsschnitt durch das FEM-Modell.	44
4.12	Modellversuch T/O-S - Ausgangszustand.	46
4.13	Modellversuch T/O-S - Nach dem Schneiden.	47
4.14	Modellversuch T/O-S - Nach sechs Iterationen.	47
4.15	Modellversuch T/O-S - Ohne Querkontraktion.	48
4.16	Verhalten der Schiene.	48
5.1	Vergleich der Ergebnisse.	51

Tabellenverzeichnis

2.1	Schema zur Auswertung der T/O-S Methode.	25
3.1	Bewertungsmatrix.	31
4.1	Ergebnisse der Neutronenbeugung.	39

Literaturverzeichnis

- [1] NORM DIN EN 13674-1, 2008: *Bahnanwendungen – Oberbau - Schienen – Teil 1: Vignolschienen ab 46 kg/m; Deutsche Fassung EN 13674-1:2003+A1:2007*.
- [2] J. Lu (Hrsg.): *Handbook of measurement of residual stresses*, The Fairmont Press, Inc., 1996, ISBN 0-881-73229-X.
- [3] J. J. Groom: *Determination of residual stresses in rails*, Final report to the US DOT DOT/FRA/ORD-83/05, Battelle Columbus Laboratories, Columbus, OH, 1983.
- [4] H. Meier: “Eigenspannungen in Eisenbahnschienen”, *Zeitschrift des Vereines deutscher Ingenieure* **81**(12):362–363, 1937.
- [5] Y. Yasojima und K. Machii: “Residual stresses in the rail”, *Permanent Way* **8** 1965.
- [6] J. Magiera, J. Orkisz und W. Karmowski: “Reconstruction of residual stresses in railroad rails from measurements made on vertical and oblique slices”, *Wear* **191**(1-2):78 – 89, 1996, ISSN 00431648.
- [7] C. Cundiff und R. Rice: “Comparative evaluation of several alternative methods for measuring rail residual stress”, in: *Residual Stresses in Rails: Effects on Rail Integrity and Railroad Economics* (O. Orringer, J. Orkisz und Z. Swiderski, Hrsg.), Bd. I — Field Experience and Test Results, S. 121 – 142, Kluwer, 1992.
- [8] D. Stefanescu, P. Browne, C. Truman und D. Smith: “Residual Stress Measurement within a European UIC60 Rail Using Integrated Drilling Techniques”, *Materials Science Forum* **440 - 441**:85 – 92, 2003, ISSN 02555476. 5th International Conference on Modern Practice in Stress and Vibration Analysis; Conference Code: 61973.
- [9] D. Post und B. Han: *Springer Handbook Of Experimental Solid Mechanics*, Kap. 22 Moiré Interferometrie, Springer, 2008, ISBN 9-780-38726883-5.
- [10] B. Wang, F. Chiang und S. Wu: “Whole-field residual stress measurement in rail using Moire Interferometry and Twyman/Green Interferometry via thermal annealing”, *Experimental Mechanics* **39**(1):71 – 76, 1999, ISSN 00144851.

- [11] R. Czamek, J. Lee und S. Lin: “Moiré interferometry and its potential for application to residual stress measurements in rails”, in: *Residual Stresses in Rails: Effects on Rail Integrity and Railroad Economics* (O. Orringer, J. Orkisz und Z. Swiderski, Hrsg.), Bd. I — Field Experience and Test Results, S. 153 – 167, Kluwer, 1992.
- [12] Y. Y. Wang und F. P. Chiang: “Experimental study of three-dimensional residual stresses in rails by moiré interferometry and dissecting methods”, *Optics and Lasers in Engineering* **27**(1):89 – 100, 1997, ISSN 0143-8166.
- [13] M. Prime: “Cross-sectional mapping of residual stresses by measuring the surface contour after a cut”, *Journal of Engineering Materials and Technology, Transactions of the ASME* **123**(2):162 – 168, 2001, ISSN 00944289.
- [14] M. Prime: “The contour method: Simple 2-D mapping of residual stresses”, *American Society of Mechanical Engineers, Pressure Vessels and Piping Division (Publication) PVP* **415**:121 – 127, 2000, ISSN 0277027X.
- [15] J. Kelleher, M. B. Prime, P. M. Mummery, P. J. Webster, J. Shackleton und P. J. Withers: “The measurement of residual stress in railway rails by diffraction and other methods”, *Journal of Neutron Research* **11**(4):187 – 193, 2003.
- [16] P. Withers, M. Turski, L. Edwards, P. Bouchard und D. Buttle: “Recent advances in residual stress measurement”, *International Journal of Pressure Vessels and Piping* **85**(3):118 – 127, 2008, ISSN 03080161.
- [17] T. Sasaki, S. Takahashi, K. Iwafuchi, Y. Satoh, Y. Kanematsu, M. Chiba und S. Takago: “Residual stress in railway rails by IP/cos alpha method”, in: *ECRS 7: Proceedings of the 7th European Conference On Residual Stresses* (W. Reimers und s. Quander, Hrsg.), S. 381 – 386, Trans Tech Publications Inc, 2006, ISBN 0-878-49414-6.
- [18] J. C. Middleton: “Residual Stress Measurement at Corus, Swinden Technology Centre”, *Strain* **37**(1):5 – 8, 2001.
- [19] J. Kelleher, D. Buttle, P. Mummery und P. Withers: “Residual stress mapping in railway rails”, *Materials Science Forum* **490-491**:165 – 170, 2005, ISSN 02555476. 7th International Conference on Residual Stresses (ICRS-7); Conference Code: 70365.
- [20] L. Drewett: “Measurement of residual stress in rails”, *Strain* **37**(1):9 – 13, 2001, ISSN 00392103.
- [21] I. C. Noyan und J. B. Cohen: *Measurement by Diffraction and Interpretation*, Springer, 1987, ISBN 3-540-96378-2.

- [22] V. Hauk: *Structural and Residual Stress Analysis by Nondesdestructive Methods*, Elsevier, 1997, ISBN 0-444-82476-6.
- [23] M. T. Hutchings, P. J. Withers, T. M. Holden und T. Lorentzen: *Introduction to the characterization of residual by neutron diffraction*, CRC Press / Taylor & Francis, Boca Raton, Fla. [u.a.], 2005, ISBN 0-415-31000-8.
- [24] P. J. Withers: “Depth capabilities of neutron and synchrotron diffraction strain measurement instruments. I. the maximum feasible path length”, *Journal of Applied Crystallography* **37**(4):596 – 606, 2004, ISSN 00218898.
- [25] P. Withers: “Depth capabilities of neutron and synchrotron diffraction strain measurement instruments. II. Practical implications”, *Journal of Applied Crystallography* **37**(4):607 – 612, 2004, ISSN 00218898.
- [26] V. Hauk und H. Kockelmann: “Eigenspannungszustand der Lauffläche einer Eisenbahnschiene”, *HTM - Härtereitechnische Mitteilungen* **49**:340 – 352, 1994.
- [27] V. Luzin, T. Gnaupel-Herold, J. Gordon und H. Prask: “Neutron residual stress measurements on rail sections for different production conditions”, in: *Proceedings of IMECE 2004* Bd. 28, S. 117–122, ASME, Anaheim, CA, 2004, ISSN 10788883.
- [28] T.-S. Jun, F. Hofmann, J. Belnoue, X. Song, M. Hofmann und A. Korsunsky: “Triaxial residual strains in a railway rail measured by neutron diffraction”, *Journal of Strain Analysis for Engineering Design* **44**(7):563 – 568, 2009, ISSN 03093247.
- [29] A. M. Korsunsky, G. M. Regino und D. Nowell: “Variational eigenstrain analysis of residual stresses in a welded plate”, *International Journal of Solids and Structures* **44**(13):4574 – 4591, 2007, ISSN 00207683.
- [30] D. Meschede (Hrsg.): *Gerthsen Physik*, Springer, 23. Aufl., 2006, ISBN 9-783-54029973-8.
- [31] D. M. Stewart, K. J. Stevens und A. B. Kaiser: “Magnetic Barkhausen noise analysis of stress in steel”, *Current Applied Physics* **4**(2-4):308 – 311, 2004, ISSN 15671739. First International Conference on Advanced Materials and Nanotechnology (AMN-1).
- [32] D. J. Buttle: *Measurement with a magnetic field*, 2007, Patent Nr.: US 7,215,117 B2.
- [33] D. J. Buttle: *Measurement of the variation of a material property with depth in a ferromagnetic material*, 2005, Patent Nr.: US 6,850,055 B2.

- [34] D. J. Buttle: *Measurement of stress in a ferromagnetic material*, 2005, Patent Nr.: US 6,854,336 B2.
- [35] C. B. Scruby, D. J. Buttle, F. A. Ravenscroft, S. Courtenay, C. G. de Michelis, M. Gori und G. Antonelli: *Determining stress in ferromagnetic materials from measurements of magnetic anisotropy and magnetic permeability*, 1998, Patent Nr.: 5,828,211.
- [36] D. J. Buttle, N. Collett, P. J. Webster, D. J. Hughes und G. Mills: “A Comparison Of Maps And Synchrotron X-ray Methods: Stresses Measured In Railway Rail Sections”, in: *ECRS 6: Proceedings of the 6th European Conference On Residual Stresses* (A. Dias, J. Pina, A. Batista und E. Diogo, Hrsg.), S. 881 – 886, Trans Tech Publications Inc, 2002, ISBN 0-878-49900-8.
- [37] D. J. Buttle, W. Dalzell und P. J. Thayer: “Nondestructive residual stress measurement in rail heads and rolling contact fatigue”, *Insight: Non-Destructive Testing and Condition Monitoring* **44**(6):364 – 368, 2002, ISSN 13542575.
- [38] D. J. Buttle, W. Dalzell und P. J. Thayer: “Nondestructive rapid residual stress measurements in rail heads with MAPS”, 2001.
- [39] J. Magiera: “Enhanced 3D analysis of residual stress in rails by physically based fit to neutron diffraction data”, *Wear* **253**(1-2):228 – 240, 2002, ISSN 00431648.
- [40] G. Schleinzer und F. D. Fischer: “Residual stress formation during the roller straightening of railway rails”, *International Journal of Mechanical Sciences* **43**(10):2281 – 2295, 2001, ISSN 0020-7403.
- [41] G. Finstermann, F. Fischer, G. Shan und G. Schleinzer: “Residual stresses in rails due to roll straightening”, *Steel Research* **69 No.7**:272 – 278, 1998.
- [42] Dassault Systèmes: *Abaqus Online Documentation, Version 6.10*, 2010.