

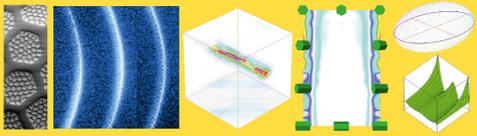


Andy Eschke (Autor)

**Bestimmung lokaler Textur- und Spannungsverteilungen an submikro-/nanokristallinen mehrphasigen Gradientenmaterialien mittels zweidimensionaler Röntgenmikrobeugung sowie an-hand analytischer und numerischer Modellierungsansätze**

Bestimmung lokaler Textur- und Spannungsverteilungen an submikro-/nanokristallinen mehrphasigen Gradientenmaterialien mittels zweidimensionaler Röntgenmikrobeugung sowie anhand analytischer und numerischer Modellierungsansätze

Andy Eschke



Cuvillier Verlag Göttingen  
Internationaler wissenschaftlicher Fachverlag

<https://cuvillier.de/de/shop/publications/6927>

Copyright:

Cuvillier Verlag, Inhaberin Annette Jentsch-Cuvillier, Nonnenstieg 8, 37075 Göttingen, Germany

Telefon: +49 (0)551 54724-0, E-Mail: [info@cuvillier.de](mailto:info@cuvillier.de), Website: <https://cuvillier.de>



# Inhaltsverzeichnis

|  |          |
|--|----------|
| Erklärung  | v        |
| Danksagung   | vii      |
| Kurzfassung  | ix       |
| Inhaltsverzeichnis   | xi       |
| Abbildungsverzeichnis  | xvii     |
| Tabellenverzeichnis  | xxi      |
| Abkürzungsverzeichnis  | xxiii    |
| <b>1 Einführung</b>  | <b>1</b> |
| 1.1 Motivation und Problemstellung . . . . .   | 1        |
| 1.2 Rahmen, Inhalt und Ziel der Arbeit . . . . .   | 3        |
| <b>2 Grundlagen</b>  | <b>5</b> |
| 2.1 Kornfeinung durch starke plastische Verformung . . . . .   | 5        |
| 2.1.1 Methoden der starken plastischen Verformung . . . . .  | 5        |
| 2.1.2 Accumulative roll bonding (ARB) . . . . .  | 6        |
| 2.1.3 Accumulative swaging and bundling (ASB) . . . . .  | 6        |
| 2.2 Mechanische (Eigen-)Spannungen . . . . .   | 7        |
| 2.2.1 Definition von Spannung, Spannungstensor . . . . .   | 8        |
| 2.2.2 Spannungen in verschiedenen Referenzsystemen . . . . .   | 10       |
| 2.2.3 Hauptspannungen im Hauptspannungssystem . . . . .  | 10       |
| 2.3 Eigenspannungsanalyse mittels RÖNTGENbeugung . . . . .   | 11       |
| 2.3.1 Grundlegende Gleichungen der RÖNTGENografischen Spannungs-<br>analyse: RÖNTGENphysikalische und elastizitätstheoretische Grund-<br>lagen . . . . . | 11       |





|          |   |           |
|----------|---|-----------|
| 2.3.2    | Konventionelle RÖNTGENografische Spannungsanalyse: Zur $\sin^2 \psi$ -Methode . . . . .   | 14        |
| 2.3.3    | Zweidimensionale RÖNTGENografische Spannungsanalyse . . . . .   | 16        |
| 2.3.4    | Anmerkung zur Auswertung des allgemeinen Spannungszustandes . . . . .   | 19        |
| 2.4      | Kristallografische Textur . . . . .   | 20        |
| 2.4.1    | Definition der Orientierung und der Textur . . . . .  | 20        |
| 2.4.2    | Definition der Orientierungsverteilungsfunktion . . . . .   | 21        |
| 2.5      | Texturanalyse mittels RÖNTGENbeugung . . . . .  | 24        |
| 2.5.1    | Polfiguranalyse . . . . .   | 24        |
| 2.5.2    | Berechnung der Orientierungsverteilungsfunktion . . . . .   | 25        |
| 2.5.3    | Zweidimensionale RÖNTGENografische Texturanalyse . . . . .  | 26        |
| <b>3</b> | <b>Experimentelles</b> . . . . .  | <b>27</b> |
| 3.1      | Material . . . . .  | 27        |
| 3.1.1    | Ti/Al Verbundmaterial . . . . .   | 27        |
| 3.1.1.1  | ASB Prozess des Ti/Al Verbundmaterials . . . . .  | 27        |
| 3.1.1.2  | ARB Prozess des Ti/Al Verbundmaterials . . . . .  | 29        |
| 3.1.2    | Weitere untersuchte Materialien . . . . .   | 30        |
| 3.1.2.1  | ASB Ti/Ti, Al, Ti/Mg . . . . .  | 30        |
| 3.1.2.2  | ED Ni-Fe . . . . .  | 30        |
| 3.1.2.3  | HPT Pd-Au . . . . .   | 30        |
| 3.2      | Probenpräparation, Messstrategie und verwendete PKS . . . . .   | 31        |
| 3.2.1    | Ti/Al Verbundmaterial . . . . .   | 31        |
| 3.2.2    | Ni-Fe . . . . .   | 31        |
| 3.2.2.1  | Probenpräparation für Rasterelektronenmikroskopie . . . . .   | 31        |
| 3.2.2.2  | Probenpräparation für (in situ) Spannungsanalyse . . . . .  | 32        |
| 3.2.3    | Pd-Au . . . . .   | 33        |
| 3.3      | Experimentelle Methoden . . . . .   | 33        |
| 3.3.1    | Neutronenbeugung . . . . .  | 34        |
| 3.3.2    | Synchrotronbeugung . . . . .  | 35        |
| 3.3.3    | Zum zweidimensionalen RÖNTGENmikrodiffraktometer Messsystem (XR $\mu$ D <sup>2</sup> ) für die lokale zweidimensionale RÖNTGENografische Textur- und Spannungsanalyse . . . . . | 36        |
| 3.3.3.1  | Ausstattungs-elemente . . . . .   | 36        |





---

|             |   |           |
|-------------|---|-----------|
| 3.3.3.2     | Anwendungen, Besonderheiten und spezielle Merkmale . . .                        | 37        |
| 3.3.4       | Zweidimensionale Texturanalyse . . . . .  | 40        |
| 3.3.4.1     | Globale Texturanalyse mittels Neutronen-/Synchrotron-<br>beugung . . . . .      | 40        |
| 3.3.4.2     | Lokale Texturanalyse mittels XR $\mu$ D <sup>2</sup> . . . . .                  | 41        |
| 3.3.5       | Zweidimensionale Spannungsanalyse . . . . .                                     | 41        |
| 3.3.5.1     | Lokale Spannungsanalyse mittels XR $\mu$ D <sup>2</sup> . . . . .               | 41        |
| 3.3.5.2     | Lokale in situ Spannungsanalyse mittels XR $\mu$ D <sup>2</sup> . . . . .       | 42        |
| 3.3.6       | Mikrostruktur mittels Rasterelektronenmikroskopie . . . . .                     | 43        |
| 3.4         | Mess- und Auswerteautomatisierung . . . . .                                     | 43        |
| <b>4</b>    | <b>Ergebnisse und Diskussion</b>  | <b>45</b> |
| 4.1         | Mikrostruktur des Ti/Al Verbundmaterials . . . . .                              | 45        |
| 4.1.1       | Mikrostruktur des Ausgangsmaterials des Ti/Al Verbunds . . . . .                | 45        |
| 4.1.2       | Mikrostruktur der ASB prozessierten Zustände Ti/Al 0-2 . . . . .                | 46        |
| 4.2         | Textur des Ti/Al Verbundmaterials . . . . .                                     | 47        |
| 4.2.1       | Globaltextur des Ausgangsmaterials des Ti/Al Verbunds . . . . .                 | 47        |
| 4.2.2       | Lokaltextur der ASB prozessierten Zustände Ti/Al 0-2 . . . . .                  | 49        |
| 4.2.2.1     | Texturtyp . . . . .   | 49        |
| 4.2.2.2     | Texturgradienten . . . . .  | 52        |
| 4.2.2.2.1   | Al Texturgradient . . . . .   | 53        |
| 4.2.2.2.1.1 | Al Fasertextur . . . . .  | 53        |
| 4.2.2.2.1.2 | Al Referenzsystem . . . . .   | 55        |
| 4.2.2.2.1.3 | Übrige Al Texturkomponenten . . . . .   | 56        |
| 4.2.2.2.2   | Ti Texturgradient . . . . .   | 59        |
| 4.2.2.2.2.1 | Ti Fasertextur . . . . .  | 59        |
| 4.2.2.2.2.2 | Ti Referenzsystem . . . . .   | 60        |
| 4.2.2.2.2.3 | Übrige Ti Texturkomponenten . . . . .   | 62        |
| 4.3         | Mechanische Eigenspannungen des Ti/Al Verbundmaterials . . . . .                | 64        |
| 4.3.1       | Präliminarien . . . . .   | 64        |
| 4.3.1.1     | Vergleichsmessungen mittels cXRD und XR $\mu$ D <sup>2</sup> Methoden . . . . . | 64        |
| 4.3.1.2     | Lokale in situ Spannungsanalyse mittels XR $\mu$ D <sup>2</sup> . . . . .       | 67        |
| 4.3.1.2.1   | Lokale Phasenanalyse des Ni-Fe . . . . .  | 67        |
| 4.3.1.2.2   | Lokale Texturanalyse des Ni-Fe . . . . .  | 68        |





|             |  |     |
|-------------|--|-----|
| 4.3.1.2.3   | Externe Lastbedingungen der lokalen in situ Spannungsanalyse mittels XR $\mu$ D <sup>2</sup> . . . . . | 69  |
| 4.3.1.2.4   | Ergebnisse der lokalen in situ Spannungsanalyse mittels XR $\mu$ D <sup>2</sup> . . . . .              | 71  |
| 4.3.1.2.4.1 | Lastbedingungen parallel zur Achse $\mathcal{S}_2$ . . . . .   | 71  |
| 4.3.1.2.4.2 | Lastbedingungen parallel zur Achse $\mathcal{S}_1$ . . . . .   | 72  |
| 4.3.1.2.5   | Spannungs-Dehnungs-Diagramm des Ni-Fe . . . . .  | 73  |
| 4.3.2       | Lokale Spannungsanalyse an Ti/Al 0-2 mittels XR $\mu$ D <sup>2</sup> . . . . .                         | 75  |
| 4.3.2.1     | Spannungsanalyse an Reflexen hoher $2\theta$ Werte – zur Rückwärtsbeugung . . . . .                    | 75  |
| 4.3.2.2     | Wahl der Peaklagen sowie Strategien zur Einzel- bzw. multiplen Peakauswertung . . . . .                | 76  |
| 4.3.2.3     | Lokale Spannungsgradienten in Ti/Al 0-2 . . . . .  | 77  |
| 4.3.2.3.1   | Transformation in das der Symmetrie angepasste Koordinatensystem . . . . .                             | 77  |
| 4.3.2.3.2   | Totalphasenspannungen in Al und Ti . . . . .   | 78  |
| 4.3.2.3.3   | Assessment der Ergebnisqualität . . . . .  | 80  |
| 4.3.2.3.4   | Abschätzung der $\sigma^M$ und Korrelation mechanischer Eigenschaften . . . . .                        | 82  |
| 4.3.2.3.5   | Scherspannungskomponenten . . . . .  | 84  |
| 4.4         | Simulationsergebnisse . . . . .  | 85  |
| 4.4.1       | Approximation der E-Modul Verbundwerte von ASB Ti/Al 0-2 mittels lokaler Textur . . . . .              | 85  |
| 4.4.1.1     | Modellbeschreibung . . . . .   | 85  |
| 4.4.1.2     | Interpretation . . . . .   | 87  |
| 4.4.2       | Textursimulation für Ti/Al 0 . . . . .   | 88  |
| 4.4.2.1     | VPSC Formalismus . . . . .   | 88  |
| 4.4.2.2     | Modellspezifikationen . . . . .  | 89  |
| 4.4.2.3     | Al Simulationstextur . . . . .   | 91  |
| 4.4.2.4     | Ti Simulationstextur . . . . .   | 95  |
| 4.4.3       | Analytischer Ansatz zur Spannungsmodellierung für Ti/Al 0 . . . . .                                    | 105 |
| 4.4.3.1     | Theoretischer Hintergrund und Motivation . . . . .   | 105 |
| 4.4.3.2     | Erweitertes Materialgesetz . . . . .   | 106 |
| 4.4.3.3     | Transformation in Zylinderkoordinaten . . . . .  | 107 |





|                             |   |            |
|-----------------------------|---|------------|
| 4.4.3.3.1                   | Kinematische Gleichungen für den Verzerrungstensor in Zylinderkoordinaten . . . . . | 107        |
| 4.4.3.3.2                   | Gleichgewichtsbedingungen für den Spannungstensor in Zylinderkoordinaten . . . . .  | 109        |
| 4.4.3.4                     | Modellbeschreibung . . . . .  | 109        |
| 4.4.3.5                     | Symmetrieansätze für den Verschiebungsvektor in Zylinderkoordinaten . . . . .       | 110        |
| 4.4.3.5.1                   | Übersicht zu einer Auswahl von Symmetrieansätzen . . . . .                          | 110        |
| 4.4.3.5.2                   | Zum Lösungsschema . . . . .   | 110        |
| 4.4.3.6                     | Analytische Lösungen ausgewählter Ansätze . . . . .                                 | 112        |
| 4.4.3.6.1                   | Lösung für 2K . . . . .   | 112        |
| 4.4.3.6.1.1                 | Allgemeine Lösung $\vec{u}$ für 2K . . . . .  | 112        |
| 4.4.3.6.1.2                 | Allgemeine Lösung $\sigma(\vec{u})$ für 2K . . . . .                                | 113        |
| 4.4.3.6.1.3                 | Spezielle Lösung $\sigma(\vec{u})$ für 2K . . . . .                                 | 114        |
| 4.4.3.6.1.4                 | Numerisches Beispiel für die spezielle Lösung $\sigma(\vec{u})$ für 2K . . . . .    | 115        |
| 4.4.3.6.2                   | Allgemeine Rotationssymmetrie: Zur allgemeinen Lösung $\vec{u}$ für 9K . . . . .    | 116        |
| 4.4.3.6.3                   | Lösung $u_z(r, z)$ für 6K . . . . .   | 117        |
| 4.4.3.6.3.1                 | Analytische Methode . . . . .   | 117        |
| 4.4.3.6.3.2                 | Visualisierung der Ergebnisse . . . . .   | 118        |
| 4.4.3.6.3.3                 | Linearisierung der Lösung, Teil A . . . . .   | 123        |
| 4.4.3.6.3.4                 | Linearisierung der Lösung, Teil B . . . . .   | 125        |
| 4.4.3.7                     | Zusammenfassung der Spannungssimulationsergebnisse . .                              | 126        |
| <b>5</b>                    | <b>Zusammenfassung und Ausblick</b>   | <b>127</b> |
| 5.1                         | Ergebnisse der Texturanalyse . . . . .  | 127        |
| 5.2                         | Ergebnisse der Spannungsanalyse . . . . .   | 128        |
| 5.3                         | Offene Fragestellungen . . . . .  | 130        |
| 5.4                         | Abschließende Bemerkungen . . . . .   | 131        |
| <b>Literaturverzeichnis</b> |   | <b>133</b> |
|                             | Liste eigener wissenschaftlicher Beiträge/Publicationen . . . . .                   | 153        |
| <b>Index</b>                |   | <b>157</b> |

