

3D Gefüge-Analyse von ausgewählten Hochtemperaturwerkstoffen

Ute Jäntsch ⁽¹⁾, Michael Klimenkov ⁽¹⁾, Anton Möslang ⁽¹⁾, Felix Reinauer ⁽²⁾, Jens Reiser ⁽¹⁾, Michael Rieth ⁽¹⁾

(1) Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Institut für Angewandte Materialien – Angewandte Werkstoffphysik (IAM-AWP), Hermann-von-Helmholtz-Platz 1, 76344 Eggenstein-Leopoldshafen, Deutschland

(2) AMETEK GmbH, EDAX Business Unit, Rudolf-Diesel-Straße 16, 64331 Weiterstadt / Germany

ute.jaentsch@kit.edu

michael.klimenkov@kit.edu

michael.rieth@kit.edu

jens.reiser@kit.edu

anton.moeslang@kit.edu

felix.reinauer@ametek.com

Schlagworte

Elektronenmikroskopische Untersuchungen
3D-Untersuchungen
EDX
EBSD
Workstation (FIB/REM) Crossbeam AURIGA 40
Strukturwerkstoffe/Hochtemperaturwerkstoffe
Chrom Stahl
Wolframfolie
Komposite-Material

Kurzfassung

Forschungs- und Entwicklungsarbeiten an Werkstoffen für den Einsatz in Hochtemperatur- und strahlungsexponierten Bereichen beinhalten umfangreiche mechanische und metallographische Untersuchungen sowie die Analytik mittels elektronenmikroskopischer Untersuchungen am REM (Rasterelektronenmikroskop) und TEM (Transmissionselektronenmikroskop). Seit einigen Jahren bekommt das bildgebende 3D-Analyseverfahren insbesondere in Kombination von EDX und EBSD immer mehr Bedeutung als eine zusätzliche, ergänzende und vor allem eindeutige Messmethode zur Beurteilung der Material- bzw. Phasenzusammensetzung im Gefüge. Unserem Institut steht seit 2014 eine Workstation (FIB/REM) der Firma ZEISS, Crossbeam AURIGA 40 mit 3D-Analytik zur Verfügung.

Im Artikel werden u.a. einzigartige Ergebnisse von Untersuchungen an den Struktur- und Hochtemperaturwerkstoffen 12Cr0.36Ta Stahl [3], nanokristalline Wolframfolie und intermetallische NiAl-Cr-Legierung/Komposite unter Einsatz der o.g. 3D-Technik vorgestellt.

* ute.jaentsch@kit.edu

1 Einleitung

3D Untersuchungen an kristallinen Strukturen als Ergänzung der verschiedenen Analyseverfahren wie der metallographischen Untersuchung sowie der elektronenmikroskopischen Untersuchungen am REM (Rasterelektronenmikroskopie) und TEM (Transmissionselektronenmikroskopie) zur Beurteilung von Hochleistungswerkstoffen für z.B. Fusionsreaktoren [1] wurden bereits seit dem Jahr 2008 immer wieder erfolgreich zum Einsatz gebracht.

Inzwischen findet u.a. die 3D EBSD Untersuchungsmethode immer mehr Bedeutung in der Forschung, insbesondere zur möglichst vollständigen kristallographischen Charakterisierung aller Grenzflächenarten. Eingeschlossen sind dabei die Charakterisierung der Morphologie und die kristallographische Indizierung der Grenzflächen. [2]

Während der DGM-Tagung 2011 in Karlsruhe wurden Ergebnisse vorgestellt und veröffentlicht, die mittels 3D Untersuchungen (mit Unterstützung des KIT/INT) unter Einsatz der „Slice & View“-Technik (Thermo Fisher Scientific, FEI) in Kombination mit dem Auswerteprogramm „Amira“ entstanden waren. Anhand der 3D Visualisierung konnten die ermittelten Festigkeitsunterschiede zweier Werkstoffe derselben chemischen Zusammensetzung eindeutig geklärt werden: In den untersuchten zweiphasigen Wolfram-Lanthanoxid-Werkstoffen hatte sich die Oxidphase je nach Herstellungsverfahren verschieden ausgebildet (siehe Abb. 1a und 1b). Das hatte Abweichungen der Kerbschlagarbeit von ca. 10 % zur Folge. [3]

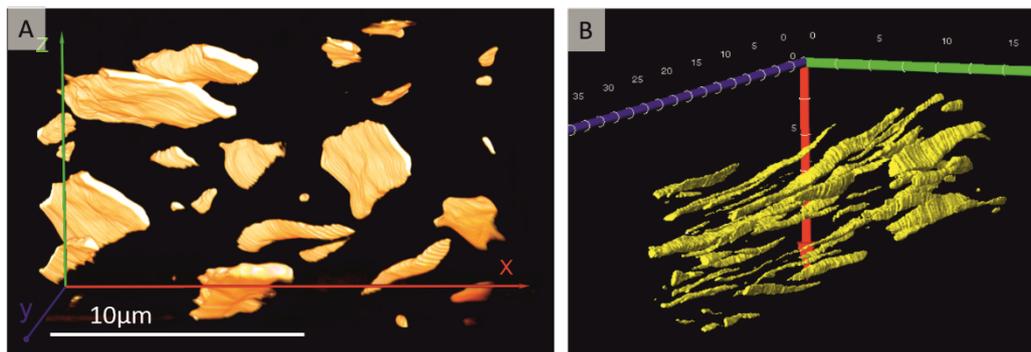


Abb. 1a und 1b:

A / 3D-Darstellung von Lanthanoxid-Flakes in der Wolfram-Matrix, gewalzt (Probe 3, s. [3])

B / 3D-Darstellung von Lanthanoxid-Fibres mit einer Länge bis zu 20µm in der Wolfram-Matrix, gehämmert (Probe 2, s. [3]).

Insbesondere die Auswertung des Probematerials Wolfram mit 1% Lanthan-Oxid Fibres nach Einsatz der „Slice & View“-Technik zeigte die Grenzen der 3D Visualisierung mit dem Programm Amira®. Nur ein kleiner Bereich des Zuschnittes von $60 \times 35 \times 50 \mu\text{m}^3$ (550 Slices) war nach manueller Zuordnung als korrekte Darstellung der Phasen realisierbar, siehe Abb. 2 und 3.

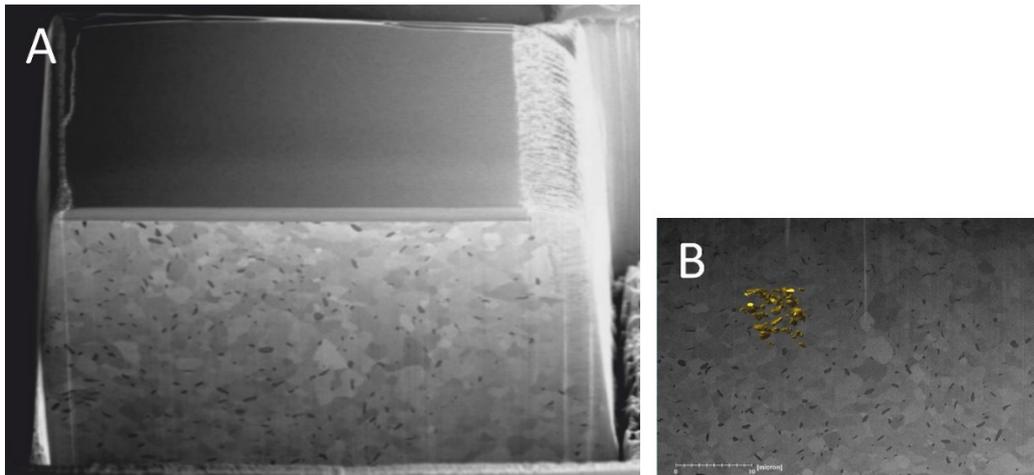


Abb. 2 und 3:

A / Probe 2 – Schnittbereich $60 \times 35 \times 50 \mu\text{m}^3$ (550 Slices)

B / Probe 2 – Bereich der manuellen Phasenzuordnung

2 Weiterentwicklung 3D Analyse-Technik

Basierend auf den Erfahrungen während der 3D-Untersuchung der Wolfram-Legierungen wurde bei der Anschaffung der Workstation auch auf eine integrierte 3D Technik mit gleichzeitigem Einsatz von EDX und EBSD geachtet.

Die Workstation (FIB/SEM) AURIGA 40 der Firma ZEISS wurde mit einem System der Firma EDAX/AMETEK komplettiert, das ein 3D Wizard-Programm zur Durchführung der Untersuchung/Messung ausgewählter Probenbereiche und die erforderlichen Auswerteprogramme enthält. Während des Ablaufs des sog. Wizard-Programms werden bei jedem Slice / bei jeder zu analysierenden Oberfläche 3 verschiedene Arbeitspositionen mit hoher Genauigkeit angefahren, siehe Abb. 4.

Diese weiterentwickelte Technik ermöglichte bereits mit einem wesentlich geringeren Arbeitsaufwand und einer geringeren Fehlertoleranz die Analyse und räumliche Darstellung von verschiedenen Strukturmaterialien zu deren kristallographischen Aufbau und Phasenzusammensetzungen an ausgewählten Bereichen in einer Größenordnung von mehreren Mikrometern.

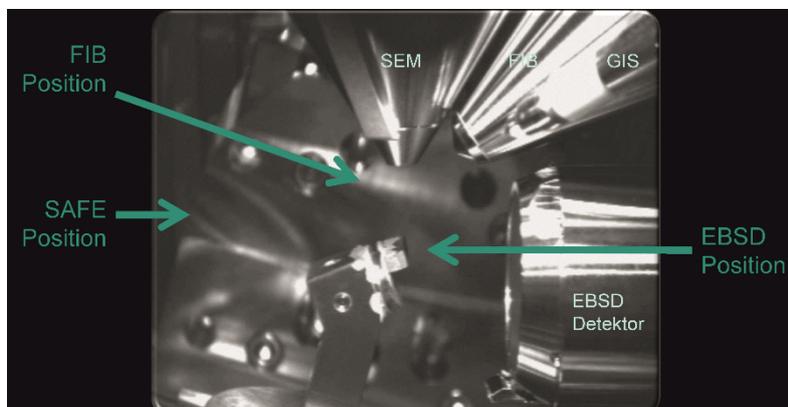


Abb. 4: Positionen der Arbeitsschritte während des 3D Analyse-Prozedur

3 3D Untersuchungen von Strukturmaterialien

3.1 Stahl 12Cr 0.36Ta - nach Kriechtest bei 650°C/130MPa

Das Ergebnis einer 3D-Analyse an einem 12%-Chrom-Stahl nach Kriechtest ist in Abb. 5 als IPF-Map (IPF – Inverse Pol Figur) dargestellt. Hierbei werden farbliche Zuordnungen gemäß der kristallographischen Orientierung der Körner im Gefüge dargestellt, siehe Farblegende zur dargestellten Kornorientierung im Gefüge.

Der dargestellte 3D-Block hat eine Dimensionierung von $30 \times 30 \times 3.75 \mu\text{m}^3$, umfasst 15 Schnitte mit einer Schnitttiefe von 250nm^3 und somit eine Voxel-Größe von $80 \times 80 \times 250 \text{nm}^3$ (1 Voxel = Gitterpunkt in einem dreidimensionalen Computergrafik- Gitter).

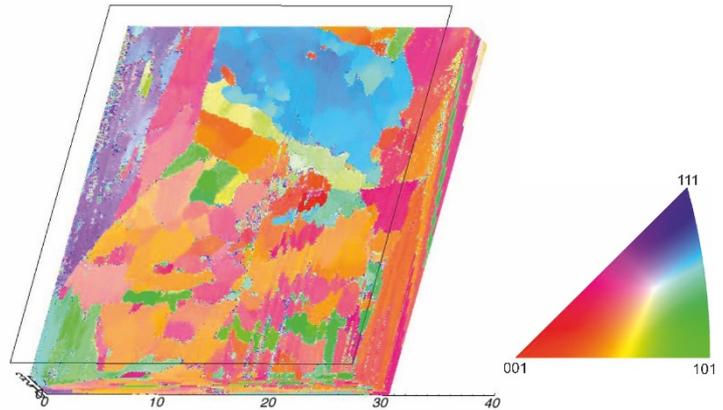


Abb. 5: Ergebnis eines ersten 3D IPF-Blocks, Stahl 12Cr 0.36Ta mit Farblegende

Die Darstellung des 3D Blocks als IQ (Image Quality) hebt die Bereiche nicht identifizierter Voxel durch Präparationsartefakte und Fehlstellen im Kristallgefüge hervor, siehe Abb. 6. Diese Ergebnisse wurden hinsichtlich der Fehlstellenentwicklung (Entstehung von Hohlräumen in einem Stahl-Gefüge) betrachtet [4]. Die Gesetzmäßigkeiten für die Entstehung bzw. weitere Entwicklung von Hohlräumen in einem Gefüge eines Strukturmaterials wurden dargelegt und am Beispiel der erhaltenen 3D Untersuchungsergebnisse am Material - Stahl 12Cr 0.36Ta untermauert, siehe Abb. 7.

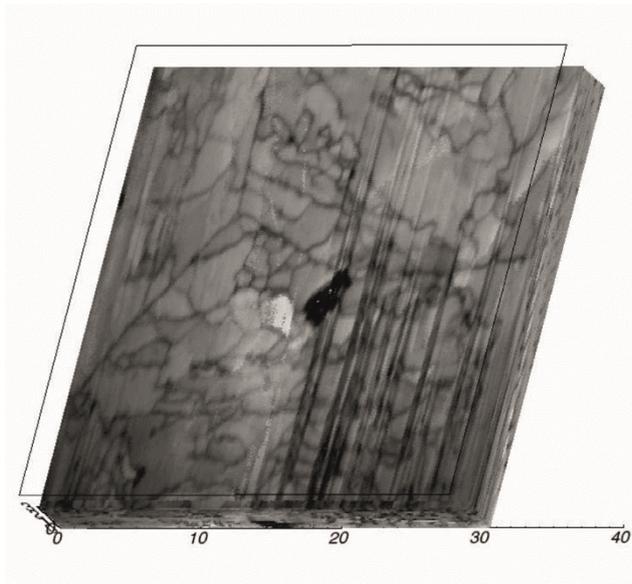


Abb. 6: Ergebnis eines ersten 3D IQ-Blocks, Stahl 12Cr 0.36Ta

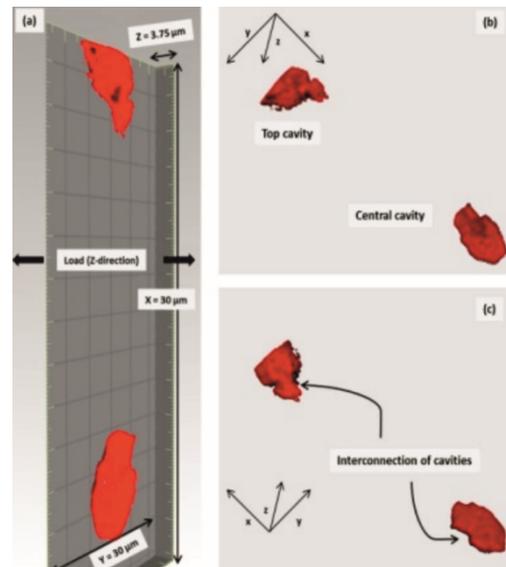


Abb. 7: Darstellung der Hohlräume, deren Entstehung bzw. Entwicklung im Gefüge des Materials Stahl 12Cr 0.36Ta

Es wurde zusammenfassend Folgendes festgestellt: Für Hohlrumbildungen, die z.B. während eines Kriechversuchs auftreten, sind im erhöhten Maße die Bereiche anfällig, die an 3 oder 4 Stellen in Kontakt mit Großwinkelkorngrenzen und Kleinwinkelkorngrenzen (Tripelpunkte) stehen. Bei einer mäßigen Belastung besitzen diese Hohlräume eine tellerförmige Gestalt. Das Wachstum der Hohlräume wird insbesondere in Richtung der Körner mit einer höheren Orientierungsdifferenz begünstigt.

Eine spätere Gefügeuntersuchung am selben Strukturmaterial gibt Aufschluss über die Verteilung von Ausscheidungen in dem ferritisch-martensitischen Gefüge, siehe Abb. 8 a und b. Die 3D Rekonstruktion zeigt sehr anschaulich die Konzentration der Ausscheidungen, wie z.B. $M_{23}C_6$, vor allem entlang der Korngrenzen im Gefüge.

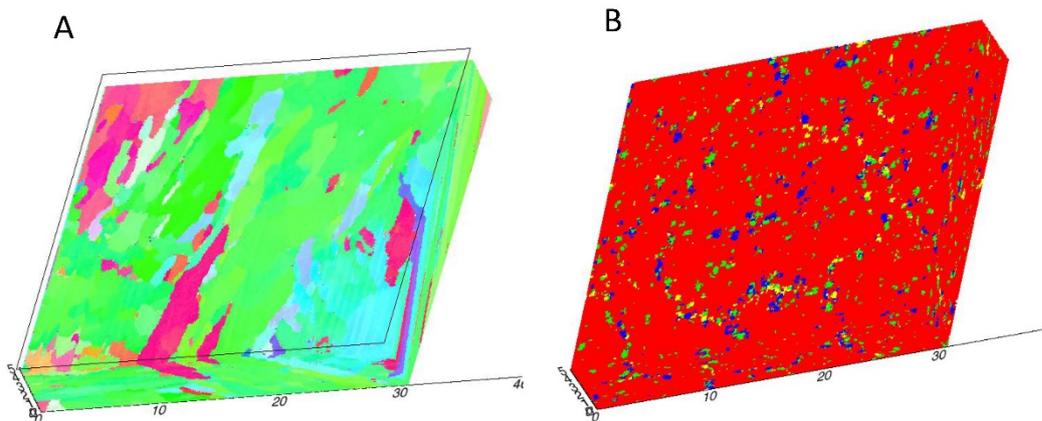


Abb. 8a und b:

A / 3D EBSD IPF Darstellung des Material-Gefüges Stahl 12Cr 0.36Ta – neuer Zuschnitt

B / 3D Rekonstruktion mit veranschaulichter Konzentration der Ausscheidungen vor allem entlang der Korngrenzen

Der analysierte 3D Block hat eine Dimensionierung von $30 \times 30 \times 5 \mu\text{m}^3$. Er ist das Ergebnis von insgesamt 58 Schnitten (Slices) mit einer Voxel-Größe von $100 \times 100 \times 100 \text{nm}^3$. Die Dauer für die Ermittlung des Datensatzes, bestehend aus EDX und EBSD Informationen, betrug 29 Stunden. Garantiert wird von gerätetechnischer Seite eine störungsfreie Messung bis zu 12 Stunden.

3.2 Refraktärmetall Wolframfolie – 100µm dickes, stark kaltgewalztes Wolframblech

Zur Identifikation von Verformungsmechanismen stark kaltgewalzter krz Metalle werden neben TEM und 2D EBSD Untersuchungen auch die 3D EBSD Technik eingesetzt. Diese sollen helfen die postulierten Wolfram befindet sich aktuell auf dem Weg „Vom Lampendraht zum Strukturwerkstoff“ [5,6]. Wolfram hat eine kubisch raumzentrierte (krz) Gitterstruktur und besitzt den höchsten Schmelzpunkt aller reinen Metalle von 3422°C [7]. Ein entscheidender Nachteil von Wolfram ist dessen geringe Zähigkeit bei Raumtemperatur bzw. dessen hohe Spröd-duktil-Übergangstemperatur. Diese liegt bei gesinterem Wolfram bei ca. 600°C. Durch starkes Kaltwalzen bei sehr niedrigen homologen Temperaturen lässt sich Wolfram duktilisieren [8]. Die Mechanismen der gleichzeitigen Steigerung von Festigkeit und Duktilität sind noch nicht in vollem Umfang verstanden.

??????Arbeitsypothesen zu verifizieren bzw. zu falsifizieren [Jens03]. ??????????

Das zu untersuchende Material wurde für die eigentliche 3D Untersuchung gemäß Abb. 9 und 10 vorbereitet. Gut erkennbar sind in Abb. 10 die eingetragenen Kreuze für die während der Messung durchzuführende automatische Driftkorrektur zur Positionierung des FIB-Zuschnitt und der SEM-Analytik. Außerdem wurde die Oberfläche des zu untersuchenden Bereichs mit einer Platin-Schicht gesichert, um den Curtaining-Effekt möglichst zu vermeiden oder wenigstens zu reduzieren. Letztendlich hatte der untersuchte und ausgewertete Bereich eine Dimensionierung von 10x12x2µm³.

In Abb. 11 ist die mittels EBSD analysierte Fläche eingetragen. Die Position der 10x11µm² großen Fläche wurde in der Aufnahme mit einem grünen Rechteck hervorgehoben. Die Messung mit insgesamt 50 Schnitten bei einer Voxel-Größe von 50x50x50nm³ benötigte 7,5 Stunden.

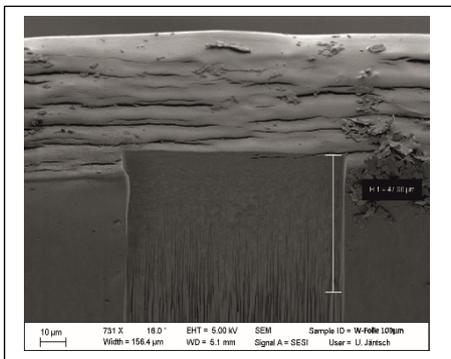


Abb. 9: Anschnitt Strukturmaterial Wolframfolie 100µm, gewalzt

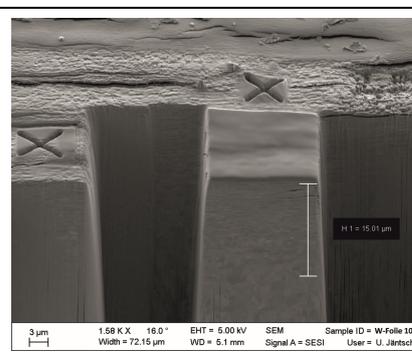


Abb. 10: Vorschnitt 3D-Block Wolframfolien 100µm, gewalzt

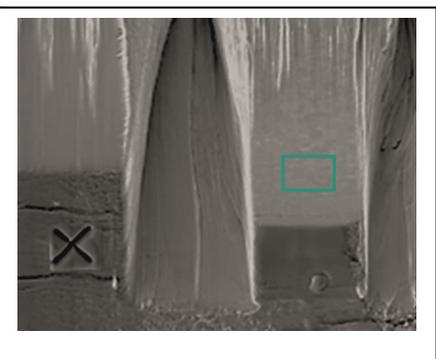


Abb. 11: SEM-Aufnahme mit gekennzeichnete, durch EBSD analysierter Fläche

Während der gesamten Messung wurden nach jeweils einem 50nm tiefen Abtrag von der Oberfläche die einzelnen EBSD Maps erzeugt, Beispiel für ein Map in Abb. 12.

Nach der Berechnung des 3D Blocks (Abb. 13) mittels OIM Analysis von EDAX/AMETEK waren auch hier die bereits aus 2D Untersuchungen bekannten langgezogenen Kornstrukturen sichtbar geworden.

Die differenzierte Darstellung einzelner Körner macht die Darstellungsmethode so wertvoll. Sie zeigt deutlich die durch das Walzen langgezogene Struktur der einzelnen Körner im Gefüge. Aus dieser Struktur resultieren stark verbesserte Eigenschaften des Wolframs. Eine erhöhte Zugversuchsduktilität bei Raumtemperatur sowie eine um 600 K auf -65°C reduzierte Spröd-Duktil-Übergangstemperatur [9,10].

Beispiele für Körner im untersuchten kaltgewalzten Wolframgefüge sind mit der Darstellung von deren Position im Gefüge den Abbildungen 14 und 15 zu entnehmen.

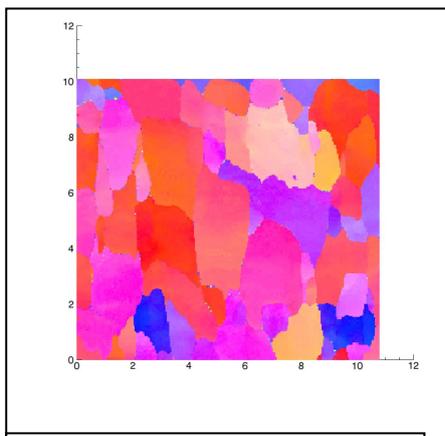


Abb. 12: Beispiel für EBSD IPF Map – Analyse der gescannten Fläche

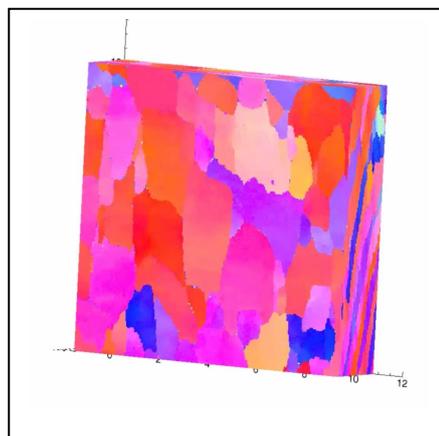


Abb. 13: aus den Einzelmeps berechneter 3D Block

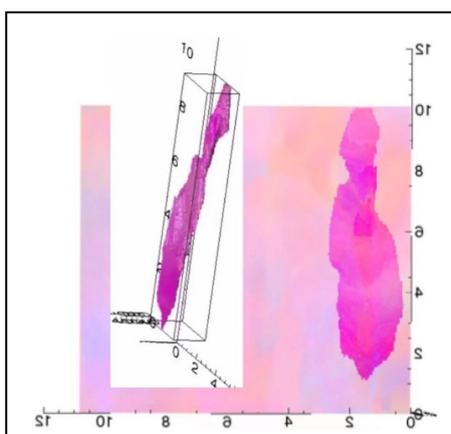


Abb. 14: Beispiel 1 für ein einzelnes langgestrecktes Korn im Wolframgefüge

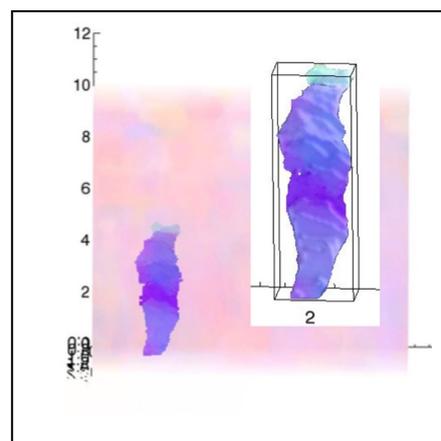


Abb. 15: Beispiel 2 für ein einzelnes langgestrecktes Korn im Wolframgefüge

3.3 Komposite-Material NiAl-Cr

Bei dem Komposit-Material NiAl-Cr handelt es sich um eine intermetallische Aluminium-Nickel-Phase, welche mit Chrom-Stängel durchsetzt ist.

Superlegierungen auf Nickelbasis besitzen eine hervorragende Kombination mechanischer Eigenschaften und Umweltbeständigkeit bei erhöhten Temperaturen. Sie haben bisher ihre Anwendung unter anspruchsvollen Umgebungsbedingungen in Windkraftmaschinen, Stromerzeugungsgasturbinen, Kernkraftwerken und Chemiewerken gefunden. [11]

Wie bereits in der TEM-Aufnahme, Abb. 16 zu erkennen ist, sind beide Phasen eindeutig voneinander getrennt. Auch Aufnahmen mit Elektronenstrahl und Ionenstrahl im Crossbeam-Mikroskop bilden beide Phasen dank des Channeling-Effektes klar getrennt voneinander ab.

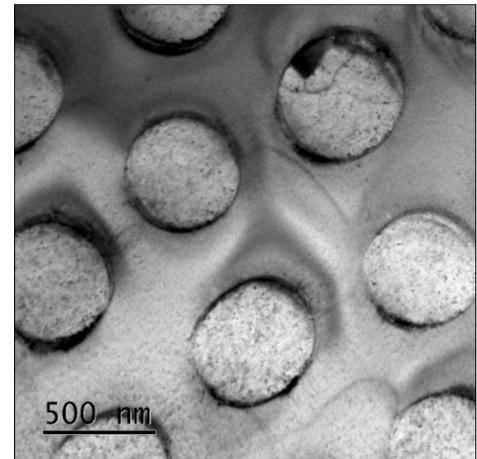


Abb. 16: TEM-Aufnahme NiAl-Cr, Antje Krüger, KIT

Allerdings besitzen beide Phasen eine fast identische epitaktische Kristallorientierung mit Gitterkonstanten von $a_{Cr} = 0,2861\text{nm}$ bzw. $a_{NiAl} = 0,2881\text{nm}$. Eine Unterscheidung voneinander allein durch die Ermittlung der Kristallorientierung mittels EBSD der beiden Phasen ist somit nicht möglich.

Um mit den ermittelten Messergebnissen die 3D-Auswertung per OIM Analysis durchführen zu können, sind während der 3D Messung gleichzeitig EBSD- und EDX-Daten ermittelt worden (siehe Abb. 17a, eingetragener Scan-Bereich).

Die in der Abb. 17b dargestellte EBSD IPF-Aufnahme verdeutlicht die bereits oben angesprochene Problematik der äquivalenten Kristallstrukturen beider Phasen. Somit ist unter Einsatz von EBSD keine deutliche Trennung beider Phasen bei diesem Komposite-Material zu erzielen.

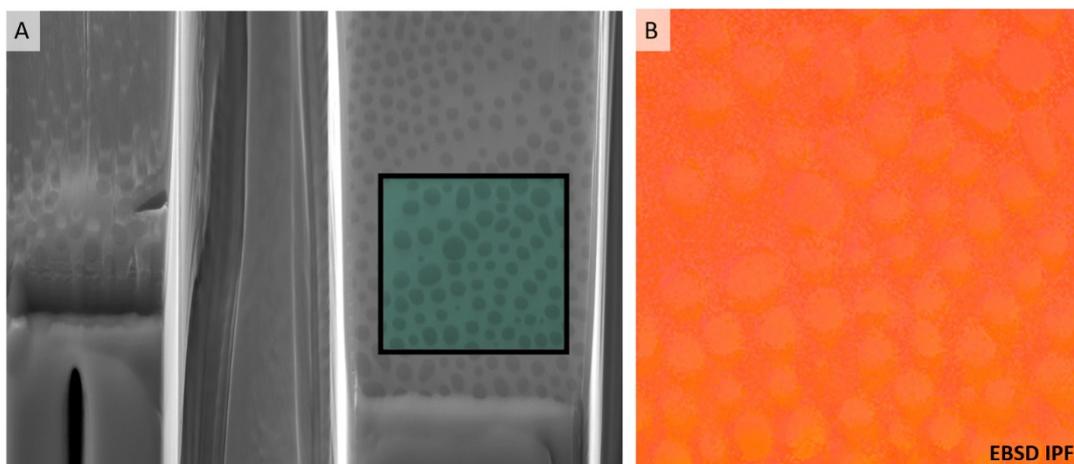


Abb. 17:

A / SEM-Aufnahme NiAl-Cr, analysierter Scan-Bereich als Rechteck gekennzeichnet
B / EBSD IPF-Aufnahme NiAl-Cr des analysierten Messbereichs

Der Chi Scan Prozess kommt zum Einsatz, wenn es nicht möglich oder auch schwierig ist, die einzelnen Phasen wegen einer gleichen Kristallsymmetrie nur anhand der gemessenen EBSD Pattern zu detektieren. Für den Fall, dass die erhaltenen Pattern oder Hough Peaks zu geringe Unterschiede für eine eindeutige Trennung aufweisen oder evtl. die abgebildeten Bänder in den Pattern z.T. zu schwach sind, werden diese EBSD-Daten mit den simultan aufgenommenen EDX Counts offline „rescanned“.

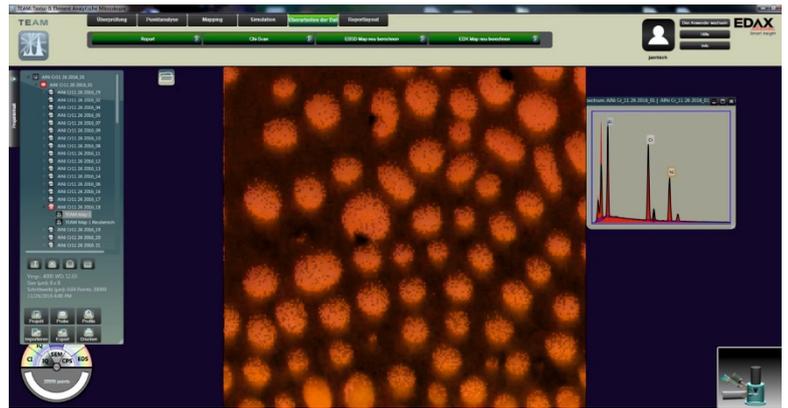


Abb. 18: EBSD IPF-Aufnahme NiAl-Cr des analysierten Messbereiches

Allgemein gilt, dass sobald die Chemie bzw. die Differenzen in der chemischen Zusammensetzung beim Kalkulationsprozess (Chi Scan Prozess) zum Einsatz kommt, das Phasen-Detektieren schneller abgearbeitet und die Phasenzuordnung um einiges genauer wird. [12]

Bei dem Komposit-Material NiAl-Cr wird eine Unterscheidung beider Phasen dadurch erst möglich. Die Trennung beider Phasen – NiAl und Cr - durch Nachberechnung der erhaltenen Datensätze pro Slice per „Chi Scan Prozess“ ist in den Abb. 18 bis 19 veranschaulicht.

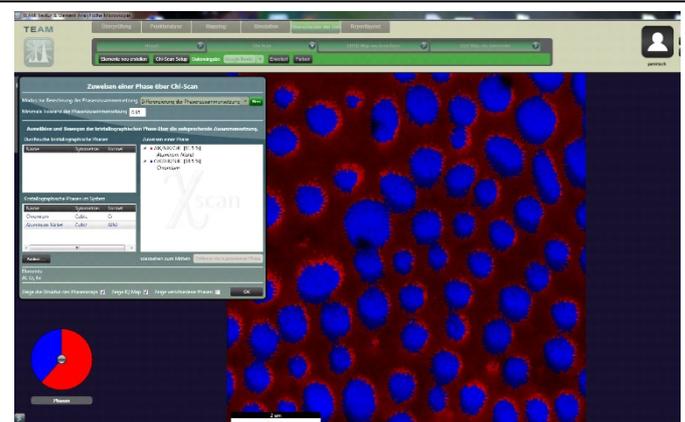


Abb. 19: Phasenzuordnung von NiAl und Cr des analysierten Messbereiches während des Chi Scan Prozesses

Insbesondere in Abb. 20 ist die eindeutige Trennung der intermetallischen Aluminium-Nickel-Phase von den blau markierten Chrom-Fasern eines ausgewählten analysierten Map klar erkennbar. Gleichzeitig wird außerdem erneut deutlich, dass sich zwischen beiden Phasen offensichtlich keine Übergangsphase ausgebildet hat. Alle anderen Maps wiesen gleiche Ergebnisse auf. Durch die ermittelte Phasenverteilung konnten die Erkenntnisse aus den vorgenommenen TEM-Aufnahmen untermauert werden. Die im Chi Scan Prozess fertig überarbeiteten Maps stehen für die 3D Rekonstruktion des analysierten Messbereiches zur Verfügung.

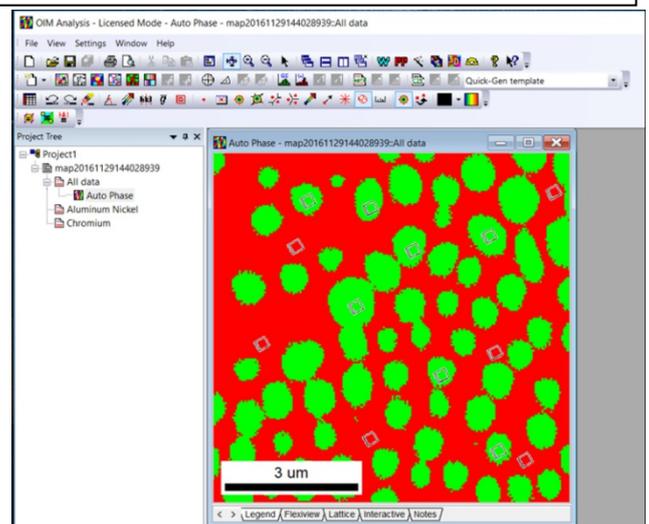


Abb. 20: abgeschlossene Phasenzuordnung im Vorfeld der 3D Rekonstruktion

An diesem Komposit-Material wurden mehrfach 3D Messungen durchgeführt. Zu Beginn erfolgte die Messung bei einer Voxel-Größe von $40 \times 40 \times 40 \text{ nm}^3$ über eine Fläche von $8 \times 8 \mu\text{m}^2$ (Messung 1) und später für eine verbesserte Auflösung bei einer Voxel-Größe $30 \times 30 \times 30 \text{ nm}^3$ über eine Fläche von $4 \times 4 \mu\text{m}^2$ (Messung 2). Außerdem wurde das Material auch in zwei verschiedenen Richtungen (zueinander um 90° versetzt) angeschnitten.

Um bei beiden Messungen 3D Blocks mit einer Tiefe von ca. $3 \mu\text{m}$ rekonstruieren zu können, wurden für Messung 1 - 70 Slices/Maps (siehe Abb. 21) und für Messung 2 - 120 Slices/Maps (siehe Abb. 22) durchgeführt.

Für beide Messungen bzw. Analysen war jeweils eine Messzeit ca. 18 Stunden notwendig.

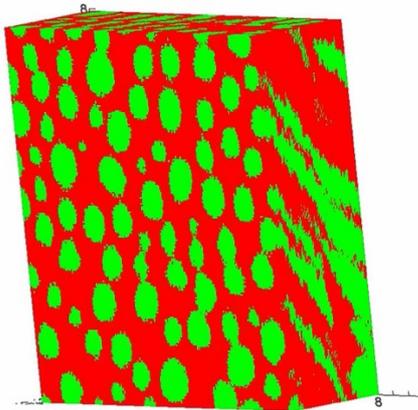


Abb. 21: 3D Block Rekonstruktion
Messung 1, Dimensionierung: $8 \times 8 \times 3 \mu\text{m}^3$

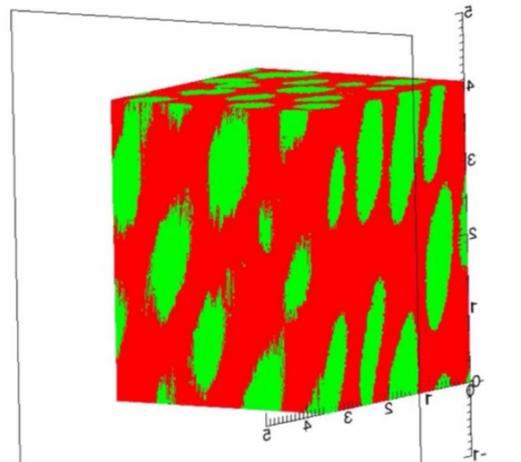


Abb. 22: 3D Block Rekonstruktion
Messung 2, Dimensionierung: $4 \times 4 \times 3 \mu\text{m}^3$

Nachfolgend werden insbesondere der 3D Block als Ergebnis der Messung 2 ($4 \times 4 \times 3 \mu\text{m}^3$) diskutiert:

Die Ansichten 1 und 2 in den Abbildungen 23 bzw. 24 zeigen die Intermetallische Phase NiAl (Matrix) des Komposit-Materials. Die Darstellung in Abb. 24 belegt sehr deutlich, dass die Chrom-Partikel im gewählten Ausschnitt noch nicht mit ihrer tatsächlichen Länge abgebildet werden konnten.

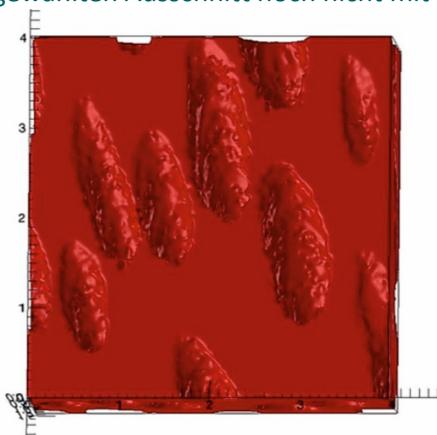


Abb. 23: Matrix-Ansicht 1 – 3D
Block Rekonstruktion Messung 2,
Dimensionierung: $4 \times 4 \times 3 \mu\text{m}^3$

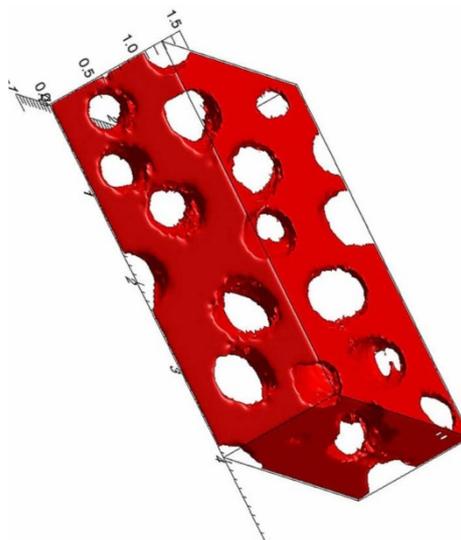


Abb. 26: Matrix-
Ansicht 2 – 3D
Block
Rekonstruktion
Messung 2,
Dimensionierung:
 $4 \times 4 \times 3 \mu\text{m}^3$

Ergänzend dazu wurde aus dem berechneten bzw. rekonstruierten 3D Block die Phase des refraktären Metalls Chrom (Partikel) separat dargestellt (Partikel-Ansicht 1 - Abb. 25 und Partikel-Ansicht 2 - Abb. 26). Es ist festzustellen, dass diese Partikel oder Nadeln eine gleichförmige, langgestreckte Struktur aufweisen. Im untersuchten Volumen von $4 \times 4 \times 3 \mu\text{m}^3$ besitzen alle Partikel nachweislich eine Länge von mindestens $4 \mu\text{m}$, siehe Partikel-Ansicht 3 - Abb. 27.

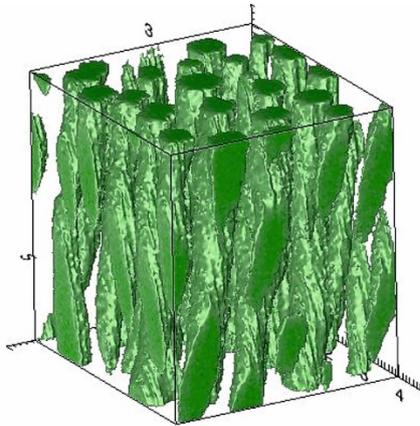


Abb. 25: Partikel-Ansicht 1 –
3D Block Rekonstruktion
Messung 2, Dimensionierung:
 $4 \times 4 \times 3 \mu\text{m}^3$

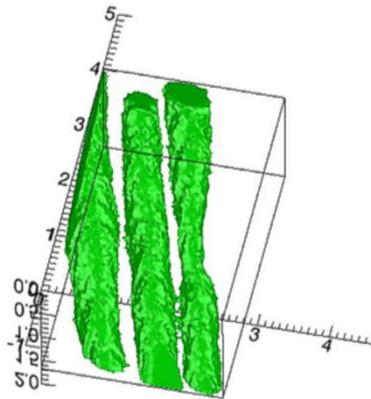


Abb. 26: Partikel-Ansicht 2 –
Teilansicht Rekonstruktion
Messung 2, Dimensionierung:
 $4 \times 4 \times 3 \mu\text{m}^3$

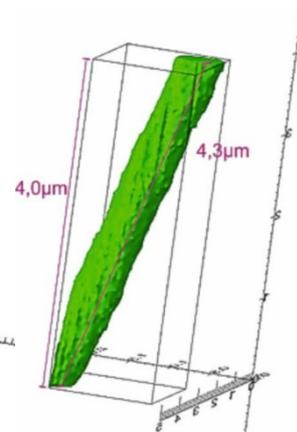


Abb. 27: Partikel-Ansicht 3 –
einzelnes Partikel
Rekonstruktion Messung 2,
Dimensionierung: $4 \times 4 \times 3 \mu\text{m}^3$

Dieses Ergebnis zur tatsächlichen Länge der Chrom-Partikel lässt Schlüsse auf das Festigkeitsverhalten bzw. auf die zu erreichenden Betriebstemperaturen des Composite-Materials zu, dass seinen Einsatz u.a. künftig bei der Fertigung z.B. in der Flugzeugindustrie finden könnte.

????????

4 Zusammenfassung

Das TEAM EDAX/AMETEK System 3D Wizard hat in unserem Institut den Stellenwert als Ergänzung der Untersuchungen im Mikro- und Nanobereich an Strukturwerkstoffen bzw. Hochtemperaturwerkstoffen gewonnen. Für die Weiterentwicklung dieser Werkstoffe ist es von großer Bedeutung, die tatsächlich Struktur vorhandener Partikel im Gefüge hinsichtlich ihrer Form und Verteilung in der Matrix beschreiben zu können.

Die Hauptergebnisse der vorgestellten 3D-Untersuchungen können wie folgt dargestellt werden:

- Stahl 12Cr 0.36Ta - nach Kriechtest bei 650°C/130MPa

Hohlräume im Gefüge wurden beobachtet und deren Position und Größe im Gefüge / in Korrelation mit der umgebenden Kornstruktur diskutiert....

- Wolframfolie 100µm, heizgewalzt

Die Ergebnisse der vorhergehenden Untersuchungen durch komplexe Festigkeitsuntersuchungen, 2D Mikroskopie und Analytik (EBSD) und Transmissionselektronen-mikroskopie konnten auch hier mit der 3D Visualisierung untermauert werden. Danach besitzen die durch den Walzprozess langgestreckten Körner eine Dicke von bis zu 0,5µm. Ihre Struktur ist ursächlich für die hohe Duktilität der Wolframfolie.

- Komposit-Material NiAl-Cr

Die Länge der Chrom-Partikel/Nadeln, welche das Komposite-Material verstärken, ist größer als 4µm und somit um mindestens 25% höher als bei diesem Probematerial anfangs angenommen.

Die 3D Mikrostrukturanalyse ist eine wertvolle Ergänzung der Standarduntersuchungen und somit ein wertvolles Werkzeug für die Forschungs- und Entwicklungsarbeit gerade an Hochtemperatur- und Strukturwerkstoffen.

Literatur

- [1] Jäntsch, U.; Klimenkov, M.; Lindau, R.; Rieth, M.: *Prakt. Met. Sonderband 41* (2009), 133-138
- [2] A. Khorashadizadeh, D. Raabe, S. Zaefferer, G. S. Rohrer, A. D. Rollett, M. Winning, Five-Parameter Grain Boundary Analysis by 3D EBSD of an Ultra Fine Grained CuZr Alloy Processed by Equal Channel Angular Pressing, *ADVANCED ENGINEERING MATERIALS* 2011, 13, No. 4.
- [3] Jäntsch, U.; Klimenkov, M.; Rieth, M.; Scherer, T.: *Prakt. Met. Sonderband 43* (2011), 71-76
- [4] Yadav, S.D. et al.: Elsevier® *Journal, Materials Letters* Volume 207 (15 November 2017), 76-79
- [5] J. Reiser, L. Garrison, H. Greuner, J. Hoffmann, T. Weingärtner, U. Jäntsch, M. Klimenkov, P. Franke, S. Bonk, C. Bonnekoh, S. Sickinger, S. Baumgärtner, D. Bolich, M. Hoffmann, R. Ziegler, J. Konrad, J. Hohe, A. Hoffmann, T. Mrotzek, M. Seiss, M. Rieth, A. Möslang, Ductilisation of tungsten (W): Tungsten laminated composites, *Int. J. Refract. Met. Hard Mater.* 69 (2017) 66–109.
- [6] J. Reiser et al. METAL PIPE; USE OF A METAL PIPE AS A STRUCTURAL COMPONENT; METHOD FOR PRODUCING A METAL PIPE; METALLIC STRUCTURAL COMPONENT; DIVERTOR, DE Patent No. EP2766908 (2014).
- [7] W. Martienssen, H. Warlimont, *Springer Handbook of Condensed Matter and Materials Data*, Springer, Berlin, Heidelberg, 2005.
- [8] J. Reiser, J. Hoffmann, U. Jäntsch, M. Klimenkov, S. Bonk, C. Bonnekoh, M. Rieth, A. Hoffmann, T. Mrotzek, Ductilisation of tungsten (W): On the shift of the brittle-to-ductile transition (BDT) to lower temperatures through cold rolling, *Int. J. Refract. Met. Hard Mater.* 54 (2016) 351–369.
- [9] S. Bonk, J. Hoffmann, A. Hoffmann, J. Reiser, Cold rolled tungsten (W) plates and foils: Evolution of the tensile properties and their indication towards deformation mechanisms, *Int. J. Refract. Met. Hard Mater.* 70 (2018) 124–133.
- [10] C. Bonnekoh, A. Hoffmann, J. Reiser, The brittle-to-ductile transition in cold rolled tungsten: On the decrease of the brittle-to-ductile transition by 600 K to – 65 °C, *Int. J. Refract. Met. Hard Mater.* 71 (2018) 181–189.
- [11] Suzuki, A.; Heilmaier, M.; Sallot, P.; (...); Licavoli, J.; Muralidharan, G.: *Materials for High Temperature Applications: Next Generation Superalloys and Beyond*, *Metallurgical and Materials Transactions A*, 49A (March 2018)
- [12] Nowell, M. M.; Wright, S. I.: Phase differentiation via combined EBSD and XEDS. *Journal of Microscopy* 213 (2004), 296-305.)

Autorenvorstellung

Federführende Korrespondenzautorin: Ute Jäntsch

Für den praktischen Teil verantwortliche Person: Ute Jäntsch

Kurzbiographie

Geboren 190 in Dessau. Eingeschult im Jahre 1967 und erfolgreicher Abschluss der schulischen Ausbildung mit Abitur an der Erweiterten Oberschule „Philanthropinum“ in Dessau im Jahre 1979.

Studium der Fachrichtung Verfahrenstechnik/Silikattechnik an der Bergakademie Freiberg von 1979 bis 1984. Erfolgreicher Abschluss des Studiums als Diplom-Ingenieur im Jahre 1984.

Berufliche Weiterentwicklung als Ingenieur für Forschung und Entwicklung am Institut für Zement und in der Zementkombinatsleitung in Dessau von 1984 bis 1989.

Wechsel zum Gasgeräte Dessau mit dem Tätigkeitsfeld der technologischen Betreuung, einschließlich der Einführung der Pulverbeschichtung als neue Technologie in der Email-Weißwarenherstellung von 1990 bis 1994.

Beginn der Tätigkeit als Technische Angestellte im Forschungszentrum Karlsruhe, Institut für Materialforschung im Jahre 2002.

Seit 2012 als Wissenschaftliche Mitarbeiterin nun im Karlsruher Institut für Technologie, Institut für Angewandte Materialforschung tätig.