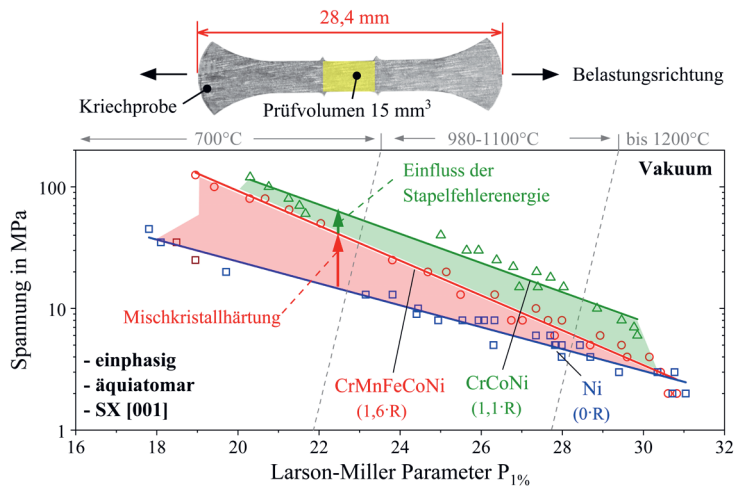


Christian Gadelmeier

## Mechanische Eigenschaften von einkristallinen kubisch-flächenzentrierten Hochentropielegierungen über einen sehr weiten Temperaturbereich



**Mechanische Eigenschaften von einkristallinen  
kubisch-flächenzentrierten  
Hochentropielegierungen über einen  
sehr weiten Temperaturbereich**

Von der Fakultät für Ingenieurwissenschaften

der Universität Bayreuth

zur Erlangung der Würde

**Doktor-Ingenieur (Dr.-Ing.)**

genehmigte Dissertation

von

M. Eng. Christian Waldemar Gadelmeier

aus

Marktredwitz

Erstgutachter: Prof. Dr. Uwe Glatzel

Zweitgutachter: Prof. Dr. Werner Skrotzki

Tag der mündlichen Prüfung: 22.04.2022

Lehrstuhl Metallische Werkstoffe  
Universität Bayreuth  
2022



Berichte aus der Materialwissenschaft

**Christian Gadelmeier**

**Mechanische Eigenschaften von einkristallinen  
kubisch-flächenzentrierten Hochentropielegierungen  
über einen sehr weiten Temperaturbereich**

Shaker Verlag  
Düren 2023

**Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek**

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Zugl.: Bayreuth, Univ., Diss., 2022

Copyright Shaker Verlag 2023

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-9001-7

ISSN 1618-5722

Shaker Verlag GmbH • Am Langen Graben 15a • 52353 Düren

Telefon: 02421 / 99 0 11 - 0 • Telefax: 02421 / 99 0 11 - 9

Internet: [www.shaker.de](http://www.shaker.de) • E-Mail: [info@shaker.de](mailto:info@shaker.de)

# Inhaltsverzeichnis

1	Motivation.....	1
2	Grundlagen.....	3
2.1	Das Konzept von Multikomponenten-Legierungssystemen.....	3
2.1.1	Hochentropielegierungen.....	3
2.1.2	Gesetzmäßigkeiten und thermodynamische Betrachtung.....	4
2.1.3	Unterteilungsmöglichkeiten.....	9
2.1.4	Eigenschaften von Multikomponenten-Legierungen und Einflussfaktoren.....	9
2.2	Hochtemperaturfestigkeit und Härtungsmechanismen von Metallen.....	12
2.3	Verformungsmechanismen von Metallen.....	14
2.3.1	Verhalten unter Zugbelastung.....	15
2.3.2	Kriechverhalten.....	17
3	Material und Methoden.....	20
3.1	Untersuchte Derivate der CrMnFeCoNi-Legierung.....	20
3.2	Herstellungsrouten.....	21
3.2.1	Aufschmelzen im Lichtbogenofen (in Argon).....	21
3.2.2	Induktionsgießen – Einkristallguss (in Vakuum und Argon).....	22
3.2.3	Dynamische Rekristallisation durch Heiß-Extrusion.....	24
3.3	Chemische Analyse der Legierungen.....	25
3.4	Mikrostrukturelle Charakterisierung.....	26
3.4.1	Probenpräparation.....	26
3.4.2	Mikroskopie und energiedispersive Röntgenspektroskopie.....	27
3.4.3	Elektronenrückstreubeugung (EBSD).....	27
3.4.4	Transmissionselektronenmikroskopie (TEM).....	28
3.5	Mechanische und thermophysikalische Charakterisierung.....	30
3.5.1	Ermittlung der Wärmekapazität und Entropiebestimmung.....	30
3.5.2	Härtemessungen.....	30
3.5.3	Kriech- und Zugexperimente.....	31
4	Ergebnisse.....	36
4.1	Einkristallherstellung im Vakuum und in Argonatmosphäre.....	36
4.2	Mikrostrukturanalyse der Ausgangsmaterialien.....	38
4.2.1	Nachweis der einphasigen Mikrostruktur.....	38
4.2.2	Nachweis der Einkristallinität und Kristallorientierung.....	40

4.2.3	Bestimmung der Korngrößen und -verteilung der polykristallinen Materialien	41
4.3	Temperaturabhängige Entropie .....	42
4.4	Mechanischen Kennwerte.....	43
4.4.1	Härtemessungen der Materialien im Ausgangszustand.....	43
4.4.2	Mn-Gehalt und Härte von CrMnFeCoNi unter Prüfbedingungen .....	44
4.4.3	Zugexperimente an Luft .....	48
4.4.4	Kriechexperimente im Vakuum .....	53
4.5	Mikrostrukturanalyse nach den Zug- und Kriechexperimenten .....	61
4.5.1	Mikrostruktur nach der Zugverformung an Luft.....	61
4.5.2	Mikrostruktur nach der Kriechverformung im Vakuum .....	65
5	Diskussion .....	72
5.1	Der Einfluss von Mn auf die Herstellung und Prüfung von CrMnFeCoNi.....	72
5.2	Phasenstabilität und Einfluss der Entropie .....	77
5.3	Diskussion der Zugeigenschaften der Legierungen.....	79
5.3.1	Einfluss der Kristallstruktur und Stapelfehlerenergie (SFE).....	79
5.3.2	Betrachtung der dynamischen Reckalterung (Dehnungssprünge) .....	81
5.3.3	Hall-Petch Effekt und Ermittlung der kritischen Scherpsannung .....	83
5.4	Untersuchung der Kriechbeständigkeit im Vakuum .....	88
5.4.1	Orientierungseinfluss auf die Kriecheigenschaften von einkristallinem Ni.....	88
5.4.2	Einfluss der Korngrenzenbildung auf die Kriechbeständigkeit .....	89
5.4.3	Vergleich der Aktivierungsenergie für das Kriechen.....	89
5.4.4	Mischkristallhärtung (MKH) der einkristallinen CrMnFeCoNi-Legierung.....	90
5.4.5	Auswirkung der Stapelfehlerenergie auf die Kriechbeständigkeit.....	93
5.5	Ausblick für zukünftige einphasige Legierungssysteme .....	96
6	Zusammenfassung.....	97
7	Summary .....	99
8	Anhang .....	101
9	Literatur.....	106
10	Abkürzungsverzeichnis .....	117
11	Liste der eigenen Publikationen .....	122
12	Lebenslauf.....	124
	Danksagung.....	125