

Mikrostruktur- und spannungsunabhängige Materialcharakterisierung in der Reaktorsicherheitsforschung

Cyril ZIMMER, Sargon YOUSSEF, Yashashwini Nikhitha RALLABANDI,
Klaus SZIELASKO, Christian EICHHEIMER², Majid FARAJIAN², Michael LUKE²

¹ Fraunhofer IZFP, Saarbrücken

² Fraunhofer IWM, Freiburg

Kontakt E-Mail: cyril.zimmer@izfp.fraunhofer.de

Kurzfassung

Auch unter den mit dem deutschen Ausstieg aus der Kernenergie verbundenen Rahmenbedingungen gelten für den Betrieb von Kernkraftwerken weiterhin höchste Sicherheitsanforderungen. Im Rahmen eines Förderprogramms des BMWi zur Reaktorsicherheitsforschung soll ein signifikanter Beitrag zum sicheren Betrieb von Reaktorsicherheitsanlagen in der Restlaufzeit und ggf. darüber hinaus geleistet werden. Das zerstörungsfreie 3MA-Prüfsystem hat diesbezüglich bereits einen erheblichen Beitrag zum Verständnis unterschiedlicher Alterungsmechanismen von Komponentenwerkstoffen und deren Charakterisierung geleistet. Die Grundlage dieses Prüfverfahrens beruht auf der Tatsache, dass Mikrostruktur und Last- bzw. Eigenspannungen sowohl das mechanische als auch das magnetische Werkstoffverhalten bestimmen. Die Korrelation von Kenngrößen des magnetischen und mechanischen Werkstoffverhaltens erlaubt die mikromagnetische Vorhersage mechanischer Eigenschaften sowie des Spannungszustandes, die entscheidend die Lebensdauer beeinflussen können.

Eine Herausforderung insbesondere unter Praxisbedingungen besteht in der Überlagerung von Mikrostruktur- und Spannungseinflüssen, welche zu Mehrdeutigkeiten in den mikromagnetischen Kenngrößen führen und in der Folge die Vorhersagequalität deutlich verschlechtern. Die Anwendung in der Praxis setzt jedoch eine wirtschaftliche Lösung zur Reduzierung dieser Störeinflüsse voraus. Im Rahmen dieses Vorhabens wird das 3MA-Prüfverfahren speziell für die in der Reaktorsicherheit relevanten Bedingungen, wie beispielsweise überlagerte Mikrostruktur- und Spannungseinflüsse, weiterentwickelt. Untersuchungen, die sich mit der Erweiterung der Merkmalsextraktion und Methoden des maschinellen Lernens befassen, führen hierbei zu einer genaueren Unterscheidung zwischen mikrostrukturellen und spannungsabhängigen Einflüssen.



DEUTSCHE
GESELLSCHAFT FÜR
ZERSTÖRUNGSFREIE
PRÜFUNG e.V.

Quelle: https://jahrestagung.dgzfp.de/portal/_default/logo/dgzfp.png

Mikrostruktur- und spannungsunabhängige Materialcharakterisierung in der Reaktorsicherheitsforschung

C. Zimmer¹, S. Youssef¹, Y.N. Rallabandi¹, K. Szielasko¹, C. Eichheimer², M.
Farajian², M. Luke²

¹ Fraunhofer-Institut für Zerstörungsfreie Prüfverfahren IZFP, Saarbrücken

² Fraunhofer-Institut für Werkstoffmechanik IWM, Freiburg

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Förderkennzeichen: 1501564



1

© Fraunhofer

Inhalt

- Einleitung
- Mikromagnetische Materialcharakterisierung
- Ablauf und Ergebnisse
- Fazit



2

© Fraunhofer

Einleitung

Überblick

■ Ausgangssituation

- Wechsellasten auf Druckbehälter
 - Plastifizierungen
 - Spannungsvariationen
- Einfluss auf die Lebensdauer



- 3MA-X8 System erlaubt die Charakterisierung ferromagnetischer Werkstoffe im Hinblick auf Mikrostruktur und Lastspannung



Mikromagnetische Materialcharakterisierung

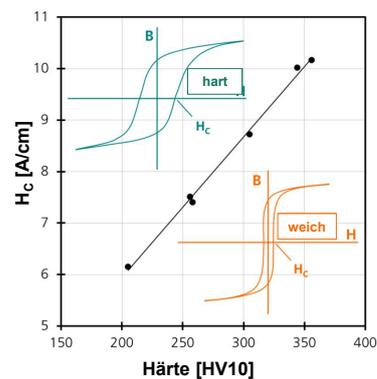
3MA-X8 Grundlagen

■ Magnetische Hysterese:

- Merkmale (z.B. Koerzitivfeldstärke H_c) beschreiben magnetisches Verhalten
- Magnetisches Verhalten korreliert mit mechanischem Verhalten (z.B. Vickershärte)

■ Problem: Spezielle Messanforderung

- statische Veränderung von H , Probengeometrie, siehe DIN1324
- Messungen sind unpraktikabel



Mikromagnetische Materialcharakterisierung

3MA-X8 Grundlagen

- Erzeugung hystereseähnlicher Merkmale aus Kombination von drei Messmethoden:
 - Wirbelstromimpedanzanalyse
 - Überlagerungspermeabilitätsanalyse
 - Oberwellenanalyse
- 21 Merkmale beschreiben das magnetische Verhalten

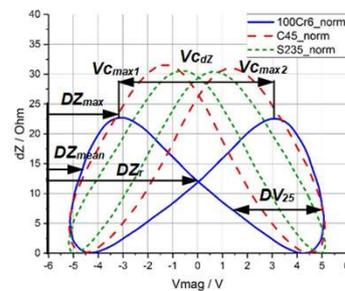
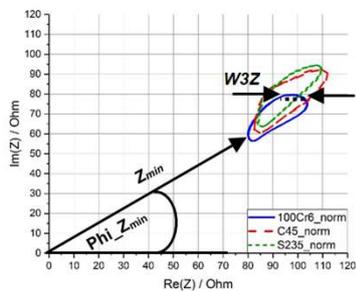


→ Charakterisierung des mechanischen Verhaltens möglich

Mikromagnetische Materialcharakterisierung

Merkmalsextraktion

- Woher kommen die 21 Merkmale?
 - Subjektive Analyse von Kurvenverläufen

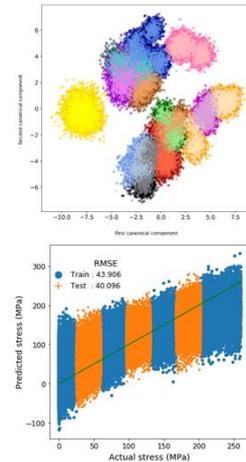


Mikromagnetische Materialcharakterisierung

Problemstellung

- Gefüge - und Spannungseinflüsse werden überlagert abgebildet
- Erschwert die
 - Spannungsunabhängige Gefügecharakterisierung
 - Gefügeunabhängige Spannungscharakterisierung
- Unschärfe bei Gefügeklassifikation und Spannungsregression

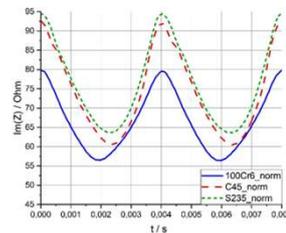
→ Gibt es Optimierungspotenzial?



Mikromagnetische Materialcharakterisierung

Optimierungsansatz

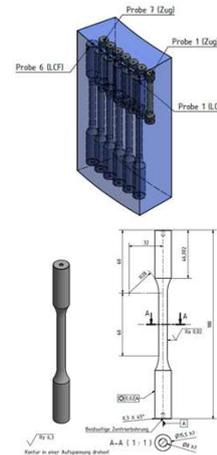
- Erweiterung des Merkmalsraums:
 - 21 subjektive 3MA-X8 Merkmale
 - + Merkmale aus automatisierter Merkmalsextraktion
 - + Rohsignale als Merkmale
- Einsatz maschineller Lernalgorithmen
 - Lineare Diskriminanzanalyse zur überwachten Dimensionsreduktion
 - K-Nächste-Nachbar Klassifikator zur Gefügevorhersage
 - Multivariate lineare Regression zur Spannungsvorhersage



Ablauf und Ergebnisse

Probenherstellung

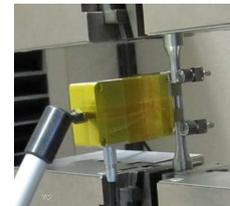
- Werkstoffe:
 - 22NiMoCr3-7
 - 20MnMoNi5-5
- Entwicklung einer geeigneten Probengeometrie zur:
 - Plastifizierung in der Zugmaschine
 - Low-Cycle-Fatigue Versuche
 - In-Situ Messungen in Zugmaschine im elastischen Bereich



Ablauf und Ergebnisse

Versuchsdurchführung

- Gefügeeinflüsse der eingesetzten Werkstoffe:
 - Plastische Verformungen (0.8%, 2%, 4%)
 - Low-Cycle-Fatigue (30%, 45%, 60%)
 - Lastspannungseinflüsse
 - Elastischer Zugversuch im Bereich 0% - 50% der Streckgrenze des jeweiligen Werkstoffs
 - Insitu-Messungen im elastischen Zugversuch
- Klassifikation der Werkstoff- und Gefügevariation
- Regression der Spannungsvariation



Ablauf und Ergebnisse

Spannungsunabhängige Gefügecharakterisierung

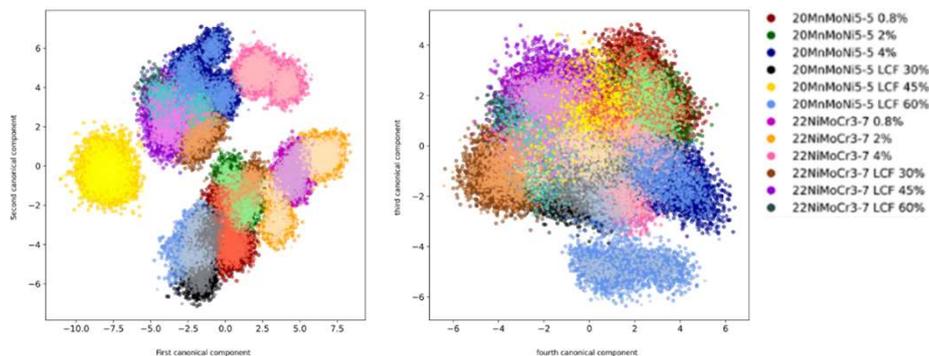
- Merkmalsraumerweiterung führt zu hochdimensionalen Merkmalsräumen
- Je nach Parametrierung über 1000 Merkmale (vorher: 21 Merkmale)
- Dimensionsreduktion

- LDA (Lineare Diskriminanzanalyse)
 - Überwachtes Verfahren
 - Koordinatentransformation
 - Minimierung der Varianz innerhalb einer Gruppe
 - Maximierung der Varianz zwischen Gruppen
- Randomisierte Aufteilung in Trainings- und Testdatensatz

Ablauf und Ergebnisse

Spannungsunabhängige Gefügecharakterisierung

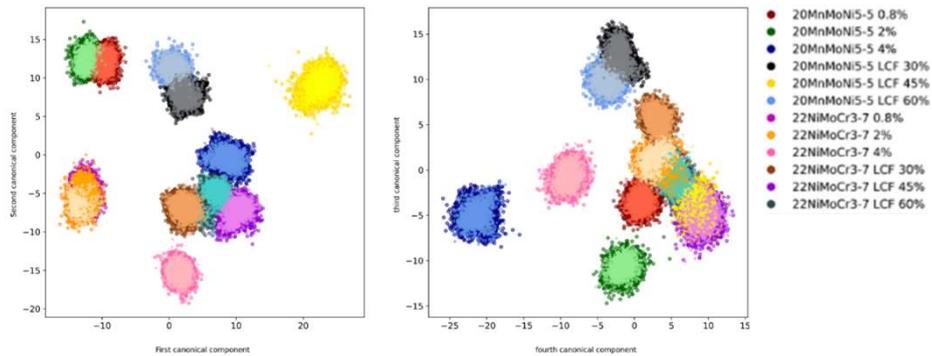
- LDA auf Basis des 21-dimensionalen Merkmalsraums zur Dimensionsreduktion



Ablauf und Ergebnisse

Spannungsunabhängige Gefügecharakterisierung

- LDA auf Basis des erweiterten Merkmalsraums
- Höhere Distanz zwischen den Klassen → Reduktion von Fehlklassifikationen

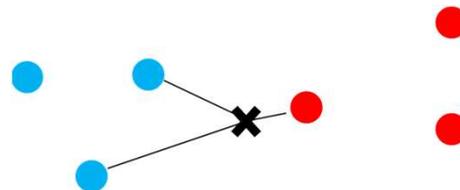


Ablauf und Ergebnisse

Spannungsunabhängige Gefügecharakterisierung

- **Klassifikation**
 - k-Nächste-Nachbar Klassifikation
 - Klassifikation nach Häufigkeit der Nachbarklassen

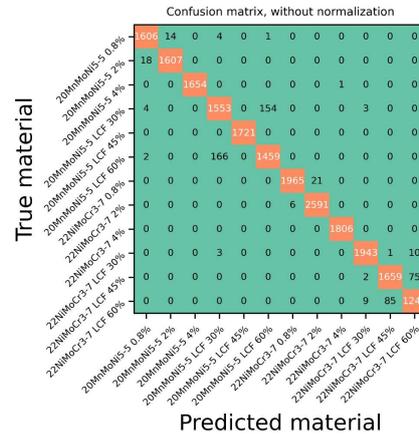
Beispiel:
K = 3
Blau: 2
Rot: 1
→ Blau



Ablauf und Ergebnisse

Spannungsunabhängige Gefügecharakterisierung

- Basis: Ergebnis der LDA
- Klassifikation (21-dimensional)
- Fehlklassifikation < 2,8 %

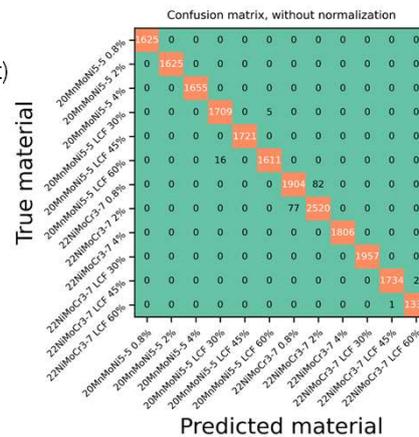


Ablauf und Ergebnisse

Spannungsabhängige Gefügecharakterisierung

- Basis: Ergebnis der LDA
- Verbesserte Klassifikation (erweitert)
- Fehlklassifikation < 0,9 %

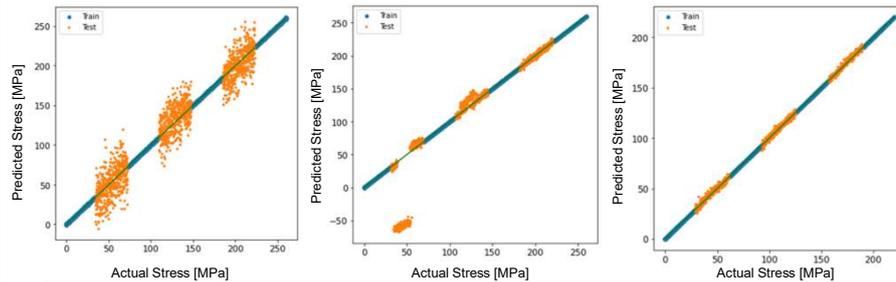
➔ Gefügezustände können durch die gewählten Ansätze unterschieden werden



Ablauf und Ergebnisse

Gefügeunabhängige Spannungsbestimmung

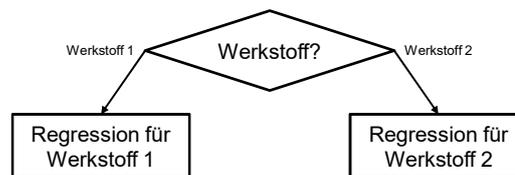
- Insitu-Messung über Zugversuch
 - Lineare Regression auf erweiterten Merkmalsraum
- Bereichsbasiertes Training (Aufteilung Trainings- und Testdaten)
 - Validierung: Generalisiertes Modell? Overfitting?



Ablauf und Ergebnisse

Gefügeunabhängige Spannungsbestimmung

- Hierarchisches Modell

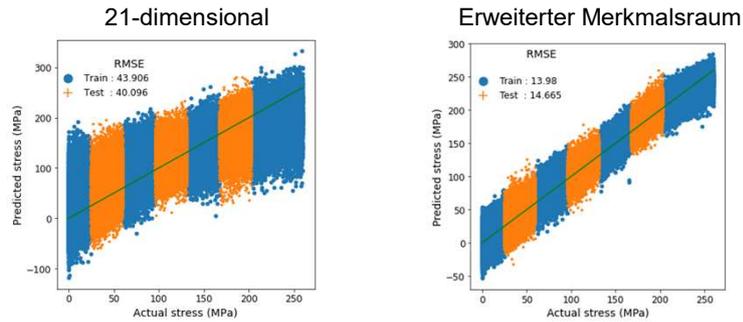


- Variation der Datenbasis
 - Alle Gefügestände (12)
 - Jeweils für LCF und plast. abhängig (je 6)
 - Werkstoffabhängig (je 6)

Ablauf und Ergebnisse

Gefügeunabhängige Spannungsbestimmung

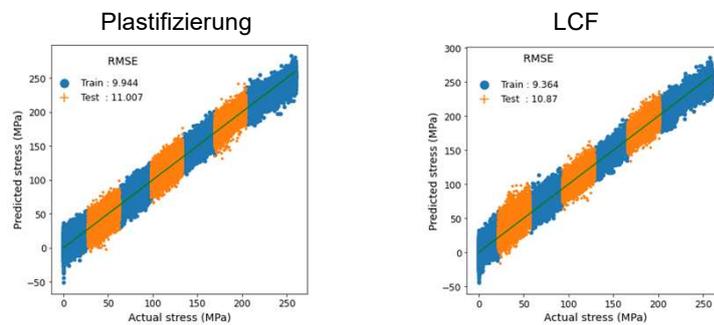
- Lineare Regression überlagerter Gefügestände
- Vergleich der Merkmalsräume



Ablauf und Ergebnisse

Gefügeunabhängige Spannungsbestimmung

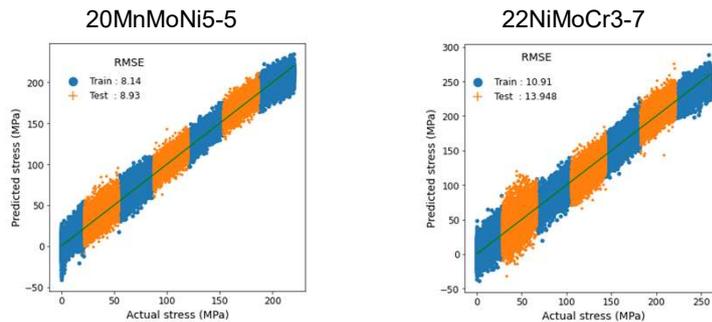
- Lineare Regression für Plastifizierung und LCF



Ablauf und Ergebnisse

Gefügeunabhängige Spannungsbestimmung

- Lineare Regression werkstoffabhängig



Fazit

- Erweiterung des Merkmalsraums verbessert die Vorhersagequalität der maschinellen Lernalgorithmen bei überlagerten Gefüge- und Spannungseinflüssen
 - Hierarchische Modellierung verbessert die Vorhersage signifikant
 - **Wichtig:** Qualität stark abhängig von der Datenbasis und Experimentplanung
- Grundlage für zukünftige Praxisumsetzungen in der Reaktorsicherheit
- Ansatz zur Verbesserung derzeitiger 3MA-X8 Anwendungen