

ASMEC Advanced Surface Mechanics GmbH
ICAMS Interdisciplinary Centre for Advanced Materials Simulation
Ruhr-Universität Bochum
KUPFER.ROT GbR

Vorprojekt

**Eruieren des Potentials zur Verbesserung von Ressourceneffizienz
und zur CO₂-Einsparung durch zukünftige Nutzung der zu
entwickelnden ESKEiN-Messtechnologie**

zum geplanten Hauptprojekt

Ermittlung von Spannungs-Dehnungs-Kurven und Eigenspannungen aus
Eindringexperimenten mittels künstlicher Intelligenz und unter Verwendung
eines zeitabhängigen Materialmodells

ESKEiN

Abschlussbericht über ein Vorprojekt
in Vorbereitung des Entwicklungsprojekts,
gefördert unter dem Az: 35377/01-21/0 von der
Deutschen Bundesstiftung Umwelt

Dr. Thomas Chudoba, Prof. Dr. Alexander Hartmaier, Susan Bremer

März 2021

1) Inhaltsverzeichnis

1)	Inhaltsverzeichnis	2
2)	Verzeichnis von Bildern, Zeichnungen, Grafiken und Tabellen	2
3)	Verzeichnis von Begriffen, Abkürzungen und Definitionen	4
4)	Zusammenfassung	5
5)	Einleitung	7
6)	Hauptteil	8
6.1.	Nachweis der Nachhaltigkeitsrelevanz des geplanten Messverfahrens	8
6.2.	Konkretisierung der industriellen Anforderungen an die neue Messtechnologie	13
6.3.	Festlegung des anzuwendenden Materialmodells.....	19
6.3.1	Untersuchung des Einflusses von Reibung und kinematischer Verfestigung auf die Hysterese aus Entlastung und Belastung.....	19
6.3.2	Mechanische Charakterisierung von drei Stahlproben	22
6.3.3	Untersuchung zur zeitabhängigen Materialverhalten von Stählen mit 30µm Kugelindenter	26
6.3.4	Identifikation von Materialparametern aus dem Eindrucktest mit Hilfe einer inversen Methode	28
6.4.	Auswahl der Methode maschinellen Lernens	32
7)	Fazit.....	37
8)	Literaturverzeichnis	37

2) Verzeichnis von Bildern, Zeichnungen, Grafiken und Tabellen

Abb. 1	Beispiel für einen Messablauf mit wiederholter Be- und Entlastung. Die erste Belastung erfolgte mit konstanter Dehnrates	15
Abb. 2:	Vergleich der Messkurven verschiedener Indenter auf Stahl (links) und Vergleich der Hysteresekurven verschiedener Materialien (rechts)	15
Abb. 3:	Eindrücke in den polierten Stahl mit 60° Kegel (links) und Eindrücke in den polierten Stahl mit 30µm Kugel bei einer Kraft von 4N (rechts). Es entstehen richtungsabhängige Versetzungsmuster	16
Abb. 4:	Eindrücke in den unpolierten 100Cr6 Stahl mit 60° Kegel (links) und Eindrücke in den unpolierten 100Cr6 Stahl mit 30µm Kugel bei einer Kraft von 4N (rechts)	16
Abb. 5:	Oberflächen-Scan mit demselben 30µm Radius Indenter durch 4 in einer Reihe liegende Eindrücke in 100Cr6 Stahl mit Kräften von 4N (rot) und 6N (schwarz). Bei einer Kontakttiefe von 6,45µm bei 4N und 10,3µm bei 6N und mittlere Aufwölbungen von 1,44µm bei 4N und 2,51µm bei 6N ergeben sich Aufwölbungen von 22% und 24%.....	16
Abb. 6:	Links: Eindrücke in Wolfram mit 30µm Kugel bei einer Kraft von 16N. Ein Scan mit derselben Kugel zeigt, dass es kaum Aufwölbung um die Eindrücke gibt. Der Peak rechts kommt von einem Partikel (schwarz); rechts: : Eindrücke in Kupfer mit 30µm Kugel bei einer Kraft von 2N. Die starken Aufwölbungen um den Eindruck sind bereits optisch gut zu erkennen.	17
Abb. 7:	Vergleich der Hysteresekurven von Quarzglas (links), und 100Cr6 (rechts) jeweils gemessen mit Berkovich- und Kegelindenter	17
Abb. 8:	Einfluss des Indenter-Oberflächenwinkels auf das Verhältnis aus Schleifenenergie und elastisch rückgewonnener Energie für verschiedene Materialien.....	18
Abb. 9:	Vickerseindruck in Probe Austenit01 (die Bezeichnung Austenit03 im Bild ist falsch) mit Messlängen (links) und in Martensit (rechts)	19
Abb. 10	Vergleich des Oberflächenprofils von Scans durch zwei nebeneinanderliegende Vickerseindrücke für alle drei Proben	19
Abb. 11:	Vergleich der tiefenabhängigen Eindringhärte(links) und des Eindringmoduls (rechts) aller drei Proben, gemessen bis 10N mit Vickers-Indenter	20

Abb. 12: Vergleich der tiefenabhängigen Eindringhärte aller drei Proben, gemessen bis 0,5N mit Berkovich-Indenter (links) und Vergleich der Härte für beide Kraftbereiche (rechts)	20
Abb. 13: Zeitlicher Verlauf der Kraftsteuerung bei den Strain Rate Jump Test Experimenten (links) und Härteverlauf über der Eindringtiefe für alle drei Proben (rechts). An den Sprüngen der Härtewerte wurde die Dehnrage geändert.	21
Abb. 14: Beispiele für vier verschiedene zeitliche Verläufe der Experimente mit der 30µm Kugel (links). Die erste Zahl in der Legende gibt die Kriechzeit an und die zweite Zahl die Zeit für Ent- und Wiederbelastung (jeweils gleich lang); Rechts: Kriechkurven von Experimenten an Austenit 03 mit verschiedenen Ent-/Belastungszeiten, die als erste Zahl in der Legende angegeben werden. Die zweite Zahl in Klammern ist die Kriechdauer. Zu jedem Experiment gehören zwei Kriechzeiten	22
Abb. 15: Links: Kriechkurven von Experimenten an Martensit mit verschiedenen Ent-/Belastungszeiten, die als erste Zahl in der Legende angegeben werden. Die zweite Zahl in Klammern ist die Kriechdauer. Zu jedem Experiment gehören zwei Kriechzeiten. Rechts: Erste Kriechkurve einer Messung an Martensit mit 60s Kriechzeit, gefittet mit logarithmischer Funktion (grün). Die Übereinstimmung ist so gut, dass die Kurven kaum unterschieden werden können.	23
Abb. 16: Links: Vergleich der Kraft-Eindringtiefe-Kurven von Martensit für die verschiedenen Messzeiten; Rechts: Vergleich der Hysteresekurven von Martensit für verschiedene Zeiten der Ent- und Wiederbelastung. Die Kurven sind um 0,1µm versetzt. Die Kraft am Schnittpunkt sinkt mit Zunahme der Zeit.	23
Abb. 17: Abhängigkeit der Kraft am Schnittpunkt in Prozent der Maximalkraft von der Zeit der Ent-/Belastung für die drei Proben	23
Abb. 18: Abhängigkeit des Energieverhältnisses W_I/W_e von der Zeit der Ent-/Belastung für die drei Proben	24
Abb. 19 3D-Indentierungsmodelle zur Untersuchung des Einflusses der Modellgröße auf die Indentierungssimulation (a) Modell A und (b) Modell B.	24
Abb. 20: Einfluss der Modellgröße auf die Kraft-Weg-Kurve (Force-Displacement) bei Indentierungssimulationen mit einem kleineren FE-Modell (Model A) und einem größeren Modell (Model B).	25
Abb. 21: 2D-achsensymmetrisches Indentierungsmodell und die Netzkonfiguration im Kontaktbereich, (b) Vergleich der Kraft-Weg-Kurve zwischen Simulationen des 2D-achsensymmetrischen Indentierungsmodells und des 3D-Indentierungsmodells.	25
Abb. 22: Vergleich der Kraft-Weg-Kurven der Simulationen des zyklischen Eindringtests mit unterschiedlichen Reibungskoeffizienten, (b) Vergleich der Kraft-Weg-Kurven der Simulationen des zyklischen Indentierungstests mit starrem Indenter und verformbarem Indenter.	26
Abb. 23: Optimierungsschleife zur Identifizierung von Materialparametern durch Anpassung von experimentellen und simulierten Werten der Kraft-Weg-Kurve.	26
Abb. 24: Vergleich zwischen Experimentreferenzen und Simulationsergebnissen mit identifizierten Materialparametern (a) die Kraft-Weg-Kurven (b) die einachsigen Spannungs-Dehnungs-Hysteresekurven.	27
Abb. 25: Schematische Skizzen zur Beschreibung der aus den Simulationen ausgewerteten Eindringcharakteristik, (a) die Kraft-Weg-Kurve und (b) die Oberflächentopographie.	29
Abb. 26: Die Korrelationsbeziehungen, dargestellt als Heatmap, die die Korrelationen zwischen den Materialparametern und den charakteristischen Indentierungsergebnissen anzeigt.	30
Abb. 27: Der Leistungsvergleich der einzelnen ML-Verfahren für die Vorhersage ausgewählter charakteristischer Indentierungsgrößen: (a) Hysteresebreite Hyswidth, (b) niedrigster Punkt der Hysteresekurve Hyslowest, (c) Schnittpunkt xintersect und (d) Kriechlänge clength.	31

3) Verzeichnis von Begriffen, Abkürzungen und Definitionen

Formelzeichen für Materialparameter [SI-Einheit]:

Q [MPa]	maximale isotrope Ver- bzw. Entfestigung (positive bzw. negative Werte)
b []	Parameter für Änderungsrate der Ver- bzw. Entfestigung
C_1, C_2 [GPa]	kinematische Verfestigungsmodul im Chaboche-Modell
g_1 []	Parameter für Veränderungsrate des Verfestigungsmoduls C_1 im Chaboche-Modell
A_0 []	Vorfaktor im Kriechmodell für zeit- und ratenabhängige Plastizität
σ_0 [MPa]	anfängliche Fließspannung des Materials (Parameter im Kriechmodell)
t_0 [s]	charakteristische Zeit für Kriechen (Parameter im Kriechmodell)
n []	Spannungsexponent im Kriechmodell
m []	Zeitexponent im Kriechmodell

Abkürzungen:

2D	zweidimensional
3D	dreidimensional
FE	Finite Elemente
ML	maschinelles Lernen
NN	Neuronale Netze (Algorithmus des maschinellen Lernens)
RF	Random Forest Regression (Algorithmus des maschinellen Lernens)
SVR	Support-Vektor-Regression (Algorithmus des maschinellen Lernens)

4) Zusammenfassung

Das Vorprojekt ESKEiN hatte vier Zielstellungen zum Inhalt, die als Vorarbeiten zu dem geplanten Hauptprojekt zu betrachten sind:

- a) Nachweis der Nachhaltigkeitsrelevanz des geplanten Messverfahrens
- b) Konkretisierung der industriellen Anforderungen an die neue Messtechnologie zur Steigerung der Marktrelevanz
- c) Festlegung des anzuwendenden Materialmodells im künftigen Projekt
- d) Auswahl der Methode maschinellen Lernens

Diese Zielstellungen wurden für das Vorprojekt formuliert, um die geplante Entwicklung des neuen Messverfahrens, dass im Anschluss an das Vorprojekt starten soll, gut vorbereitet im Projektablauf zu straffen und zusätzlich die Umweltrelevanz des Verfahrens aufzuzeigen.

Für die Bearbeitung der Zielstellungen a) und b) wurden Industriekontakte überwiegend aus Unternehmen, aber auch industrienahen Verbänden und Organisationen, angesprochen. Für die Durchführung des Vorprojektes war es ursprünglich geplant mit Hilfe von Vor-Ort-Meetings, -interviews, Workshops und Vor-Ort-Analysen, Daten und Informationen zu Prozessen der Produktentstehung innerhalb der jeweiligen Unternehmen aufzunehmen. Nachfolgend sollte dann der ökologische Nutzen von ESKEiN durch die Erstellung einer CO₂-Bilanz der Produktentstehung und -nutzung als auch durch Erfassung von Ressourceneinsatz und zukünftigen Ressourceneinsparpotentials bewertet werden.

Diese Planung konnte auf Grund der Corona-Pandemie so nicht umgesetzt werden. Daher wurden im Vorprojekt Dokumente und Fragebögen entwickelt und den Firmen über eine erweiterte Kommunikations-Infrastruktur vorgestellt, um auf diese Weise die Datenerfassung speziell über Ansprechpartner in den Unternehmen zu ermöglichen ohne selbst vor Ort sein zu müssen. Die Dokumente dienen dazu, unsere Zielstellung, Ansatz und Vorgehen zur Ermittlung der Nachhaltigkeitsrelevanz von ESKEiN zu kommunizieren und eine Datenbeschaffung durch interne Verantwortliche in den Unternehmen anzuleiten sowie eine Vorlage dafür bereitzustellen.

Anhand der von Industriepartnern zugearbeiteter Daten wurden durch uns erste Teile von CO₂-Bilanzierungen der Produktentstehungsprozesse erarbeitet. Den Prozessen der Unternehmen entsprechend haben wir Daten aus verschiedenen Datenbanken zusammengetragen und in Excel dokumentiert. Anschließend erfolgte eine Analyse und Gespräche mit den Ansprechpartnern, um mögliche Ansätze für die neue ESKEiN-Messtechnologie zu diskutieren. Die Ergebnisse dieser Betrachtungen zeigen mehrere Möglichkeiten zur Ressourceneinsparung in der Entwicklung, der Fertigung oder im Lebenszyklus von Industrieprodukten auf, welche durch Veränderungen in den Entstehungsprozessen auf der Grundlage des Einsatzes von ESKEiN möglich werden.

Letztlich ist es uns durch die deutlichen Einschränkungen auf Grund der Corona-Schutzmaßnahmen nur zu einem Teil und oft auch nur unvollständig gelungen, Daten für die CO₂-Bilanzierung und zur Abschätzung der Nachhaltigkeitsrelevanz von ESKEiN zu beschaffen. Doch auch wenn das Datenvolumen und die betrachteten Themenfelder nur einen kleineren Ausschnitt abbilden können, wird bereits das Potential für den nachhaltigen Einsatz von ESKEiN in Industrieprozessen deutlich erkennbar:

- Es konnten mehrere Industrieprozesse und der Einsatz von Komponenten im Lebenszyklus eruiert und beschrieben werden mit denen durch den zukünftigen Einsatz von ESKEiN wesentliche Mengen an Ressourcen, insbesondere CO₂, eingespart werden können.
- Das Einsparpotential von Ressourcen resultiert dabei nicht nur aus der Einsparung von Energieeintrag in die Fertigungsprozesse, wie dies fokussiert in der Industrie betrachtet wird, sondern wird vor allem durch mehrheitliche Faktoren erreicht, wie verkürzte Prozesszyklen, Auslassen von Prozessketten, reduzierte Transport- und Logistikaufwendungen und Einsparung von Mehrproduktion zur Kompensation von Ausschuss. Mehrere Faktoren erhöhen gemeinsam die Menge an CO₂, die eingespart werden kann. Diese Betrachtungsweise führte oft auch zu einem neuen Blickwinkel der Industriepartner auf ihre Prozesse, da sie das CO₂-Einsparpotential von dieser Seite überhaupt noch nicht betrachtet hatten.
- Das CO₂-Einsparpotential konnte für verschiedene Bauteile konkret ermittelt werden, auch wenn die Datenlage auf Grund der Hemmnisse durch Corona unvollständig ist. Die bisher analysierten Daten zeigen vorerst nur eine Mindestmenge an CO₂-Einsparpotential und könnten zukünftig weiter detailliert werden.
- Aus den Gesprächen mit den Industriekontakten ebenso wie Verbänden und Organisationen konnte eine Anzahl von Industrieprozessen für den Einsatz von ESKEiN identifiziert werden, aus denen sich konkrete Anforderungen an das Messverfahren und die Messtechnik ableiten lassen.

Mit den durchgeführten Datensammlungen konnten wir bereits mehrere Unternehmen aus verschiedenen metallverarbeitenden Bereichen für den ressourcensparenden Einsatz von ESKEiN sensibilisieren. An dieses Ergebnis beabsichtigen wir im Hauptprojekt anzuknüpfen und es, mit dann hoffentlich weniger Einschränkungen, auszubauen.

Die Zielstellungen c) und d) wurden durch die Partner ASMEC GmbH und Ruhr-Uni-Bochum (RUB) bearbeitet. Von ASMEC wurden dafür umfangreiche Messungen mit verschiedenen Indentern und an verschiedenen Metallproben durchgeführt und die Ergebnisse der RUB zur Verfügung gestellt. Dabei gab es folgende Erkenntnisse, die für die Entwicklung des einzusetzenden Materialmodells wichtig werden:

- Sowohl die Reibung zwischen Indenter und Probe als auch die kinematische Verfestigung haben Einfluss auf eine Hysterese in den Messkurven zwischen Entlastung und wiederholter Belastung. Die Hystereseurve enthält wichtige Informationen, die in den zukünftigen Auswertungen zu berücksichtigen sind. Die Reibung muss in den FEM Rechnungen berücksichtigt werden, um eine gute Übereinstimmung mit Messdaten zu erreichen.
- Es wurden drei Stahlproben mechanisch charakterisiert, von denen bereits Spannungs-Dehnungs-Kurven und teilweise Ermüdungsdaten zur Verfügung standen. Es konnte gezeigt werden, dass die Proben in der Oberfläche ausreichend homogen sind und die Qualität der Oberflächenpräparation ausreichend ist.
- Das Kriechverhalten der Stahlproben wurde analysiert und die Ergebnisse für die Entwicklung des zeitabhängigen Modelles zur Verfügung gestellt.
- Die Dehnratenabhängigkeit der Stahlproben wurde untersucht.
- Es wurde der Einfluss der Dauer von Entlastung und Wiederbelastung auf den Flächeninhalt der Hysteresekurven und auf den Schnittpunkt der beiden Kurven untersucht und dabei überraschende Erkenntnisse gewonnen. Die Kraft am Schnittpunkt sinkt mit der Dauer der Ent-/Belastung ab. Dies hat einen Einfluss auf das Modell der kinematischen Verfestigung und ist zu berücksichtigen.

Die Messkurven von ASMEC mit Kugelindenter, insbesondere an einer Martensitprobe wurden bei der RUB nachsimuliert und für die Entwicklung des Materialmodells verwendet. Dabei wurden folgende Ergebnisse erzielt:

- Erstellung eines FE-Modells für Kugeleindrücke auf ebenen Oberflächen und Einschichtsystemen unter Berücksichtigung der Reibung zwischen Werkstoff und Eindruck-Körper
- Die Nutzung eines Materialmodells mit zeit- bzw. ratenabhängiger Verformung in Verbindung mit isotroper und kinematischer Verfestigung erlaubt eine hinreichend präzise Beschreibung experimenteller Last-Eindringkurven in FE-Rechnungen.
- Die Bestimmung der Parameter für das zeit- und ratenabhängige Modell sowie für isotrope und kinematische Verfestigung durch ein inverses Verfahren auf Basis realer Versuchsdaten ist möglich. Haltezeiten und Ent-/Wiederbelastungsphasen sind notwendig, um diese Parameter zu bestimmen.
- Mit den durch die inverse Methode bestimmten Materialparametern konnten Spannungs-Dehnungs-Hysteresen aus Standard-Ermüdungsversuchen für einen martensitischen Stahl erfolgreich vorhergesagt werden.
- Damit konnte ein geeignetes Materialmodell für die weitere Anwendung identifiziert und getestet werden.

Die Ergebnisse zeigen, dass die Ziele des Hauptprojektes gut erreichbar sind.

Außerdem wurden im Vorprojekt an der RUB Untersuchungen zur Eignung der verschiedenen Methoden der künstlichen Intelligenz durchgeführt. Dabei haben sich folgende Erkenntnisse ergeben:

- Das Training von Methoden des maschinellen Lernens (ML) mit Hilfe von Daten aus FE-Rechnungen von Eindruckversuchen mit verschiedenen Materialparametern ist möglich und hinreichend genau, um damit inverse Methoden durchzuführen.
- Es konnten drei verschiedene ML-Methoden (Random-Forest-Regression, Support-Vector-Regression und künstliche neuronale Netze) erfolgreich trainiert werden, um in einem realistischen Bereich von Materialparametern charakteristische Merkmale von instrumentierten Eindruckmessungen wiederzugeben.
- Die besten Genauigkeiten bei der Beschreibung neuer Datensätze, die nicht zum Training verwendet wurden, ergaben sich bei der Support-Vector-Regression-(SVR)-Methode. Die Ergebnisse der künstlichen neuronalen Netze waren auch vielversprechend, jedoch bietet die SVR die zusätzlichen Vorteile, dass sie sehr einfach in einen unabhängigen Computercode zu implementieren ist, sie mit weniger Trainingsdaten auskommt und weniger zum Overfitting neigt, als die neuronalen Netze.

5) Einleitung

Das Vorhaben des Projektes entstand aus Überlegungen der Firma ASMEC zur Entwicklung einer neuen Messtechnologie zur zerstörungsfreien Ermittlung von Spannungs-Dehnungs-Kurven und Eigenspannungen an metallischen Bauteilen mit Hilfe von künstlicher Intelligenz (ursprünglich mit Hilfe Neuronaler Netze, daher der Arbeitstitel ESKEiN) und deren Nutzung im industriellen Bereich. Hintergrund sind die langjährigen Erfahrungen, die ASMEC bei der Entwicklung und Anwendung von Messtechnologien auf Basis von Eindruckverfahren und bei der Lizenzierung eines Verfahrens zur Bestimmung von Spannungs-Dehnungs-Kurven durch das Forschungszentrum Karlsruhe hat. Zudem wurden weltweit verstärkte Aktivitäten zur zerstörungsfreien Ermittlung von Spannungs-Dehnungs-Kurven sowohl bei Instituten als auch bei neu gegründeten Firmen beobachtet so dass eine Beteiligung auf diesem Gebiet dringend erschien.

Der Zugversuch als Methode zur Messung von Spannungs-Dehnungs-Kurven ist ein zerstörendes Messverfahren und erfordert eine spezielle Probenpräparation. Er lässt sich daher nicht auf fertige Bauteile anwenden, die danach weiterverwendet werden sollen. Dagegen gilt der Eindruckversuch, insbesondere bei kleinen Kräften und Eindringtiefen unter 10µm, als quasi zerstörungsfrei. Das zerstörungsfreie Messen mechanischer Oberflächeneigenschaften von Bauteilen bietet daher ein hohes Potential für Ressourceneinsparungen in der Industrie. Die Möglichkeit quasi zerstörungsfrei die mechanischen Oberflächeneigenschaften von Bauteilen zu erfassen und damit auch Bauteile während ihrer Lebenszeit wiederholt zu kontrollieren, findet in der Industrie großes Interesse. Kosteneinsparungen bei der Fertigung, die Reduktion von Ausschuss als auch die Lebensdauererweiterung von Bauteilen sind unter den sich verändernden Markt- und Kundenanforderungen entscheidende Kriterien, um wirtschaftlich und wettbewerbsfähig zu sein.

Zur Stärkung der Wettbewerbsfähigkeit der deutschen Industrie in einer zukünftig klimaneutralen Wirtschaft bemühen sich immer mehr Unternehmen, ihren Blick auf Ressourceneffizienz zu richten und ihre Mitarbeiter entsprechend zu schulen. Daher war es für die kontaktierten Industrieunternehmen oft ein interessantes Argument dass auch eine neue Messtechnik zur Ressourceneffizienz beitragen kann. Der WWF sieht hier, wie auch viele andere, Handlungsbedarf in allen Industriebranchen. (siehe: <https://www.wwf.de/themen-projekte/klima-energie/klimaschutz-und-energiewende-in-deutschland/klimaschutz-in-der-industrie/>).

ESKEiN kann bei der Erzeugung und Bearbeitung metallischer und metallbeschichteter Bauteile einen Beitrag zu mehr Ressourceneffizienz leisten und damit Industrieunternehmen unterstützen, effektive Maßnahmen auf ihrem Weg zu Klimaneutralität und Ressourceneffizienz zu entwickeln. Der Nachweis der Nachhaltigkeitsrelevanz im Projekt ESKEiN soll hierfür Argumente bieten. Ressourcen werden bereits eingespart, wenn weniger Teile vorgefertigt, angeliefert oder dem Recycling zugeführt werden müssen. Durch die Einbindung von Vertretern der metallverarbeitenden Industrie in das Vorprojekt wurde dieses Nachhaltigkeitsverständnis vermittelt und deren leitende Mitarbeiter dafür sensibilisiert. Wegen dessen Bedeutung soll dies nun auch im anschließenden Entwicklungsprojekt ESKEiN fortgesetzt werden.

Auf Grund der spürbaren Auswirkungen des Klimawandels auf Lebens- und Wirtschaftsprozesse, dem Anstieg von Berichten zu Ereignissen mit Bezug zu Veränderungen von Klima und Umweltbedingungen und natürlich seit der Verabschiedung des Klimaschutzplanes 2050 durch die Bundesregierung im Jahr 2016 erfolgt bereits eine Sensibilisierung der Bevölkerung und der Industrie. Dass der Industrie eine entscheidende Rolle bei der Erfüllung des Klimaschutzplanes 2050 zukommt, wird nicht zuletzt durch Zunahme klimaschutzpolitischer Aktivitäten, wie Energieeffizienznetzwerke, auf Nachhaltigkeit orientierte Förderbedingungen (z.B. FONAs), öffentlichkeitswirksame Mediendarstellungen von Umweltthemen oder auch durch die Diskussion um eine mögliche CO₂-Besteuerung, weitreichend deutlich. Unsere Erfahrungen im Vorprojekt, zeigen uns: die Themen „Klimaschutz“, „Klimaneutral“, „Ressourceneffizienz“ sind angekommen. Die Dekarbonisierung der Industrieprozesse ist ein wichtiger Schlüssel zur Erreichung der Ziele aus dem Klimaschutzplan 2050. Dieser sieht eine weitgehende Klimaneutralität bis 2050 vor, für deren Erreichung z.B. der Sektor Industrie bis 2030 die Emissionen im Vergleich zu 1990 halbieren muss.

Um an der Umsetzung der politischen Zielsetzungen mitzuwirken und zudem im globalen Wettbewerb stark zu bleiben, engagiert sich die deutsche Industrie für eine klimaneutrale Wirtschaft. Dafür werden in Netzwerken und Verbänden Möglichkeiten gesucht, die Industrieprozesse ökologischer, ressourceneffizienter zu gestalten. An diesem Punkt setzt unser Projektvorhaben ESKEiN an, zu dem wir aktuell das Vorprojekt abschließen.

Das Entwicklungsvorhaben ESKEiN wird eine Lösung schaffen, mechanische Oberflächeneigenschaften metallischer und metallbeschichteter Bauteile mit wesentlich geringerem Ressourcenverbrauch und geringerem Aufwand als bisherige Messverfahren zu ermitteln. Dies wird durch die nahezu zerstörungsfreie Bestimmung von Spannungs-Dehnungs-Kurven und Eigenspannungen an Oberflächen von Bauteilen erfolgen. Dadurch wird ermöglicht, den mechanischen Zustand metallischer Oberflächen nach der Durchführung verschiedener Fertigungs- und

Bearbeitungsschritte oder nach einer gewissen Lauf- oder Nutzungszeit von industriell gefertigten Bauteilen zu erfassen und daraus bessere Kenntnisse über den Zustand des Bauteils hinsichtlich Qualität, Haltbarkeit und Verschleiß sowie der (noch) möglichen Nutzungsdauer der Bauteile zu gewinnen und entsprechend ressourcenschonende Maßnahmen abzuleiten.

Das Vorhaben ESKEiN zielt auf die Entwicklung einer neuen Messtechnologie und deren Implementierung in einer Software und einem neuen mobilen Messkopf, die möglichst zügig Anwendung im Bereich der verarbeitenden Industrie finden sollen. Unsere Recherchen und Vorgespräche mit Industriepartnern haben bereits mehrere potentielle Anwendungsfelder für ESKEiN über den gesamten Produktentstehungsprozess bis zum Ende des Lebenszyklus von Bauteilen aufgezeigt, in denen die Messtechnologie zukünftig sinnvoll einzusetzen ist. Aus den im Vorprojekt eruierten Prozessketten wurden mehrere Handlungsfelder erkannt, herausgearbeitet und mit Industrieanwendern diskutiert, in denen zukünftig Ressourcen durch Nutzung von ESKEiN eingespart werden können. Dies wird insbesondere anhand von Beispielen für die potentiellen Nutzung von ESKEiN bei der Produktfertigung bei zwei Referenzen deutlich aber auch bereits frühzeitig im Entwurfsprozess von Bauteilen am Beispiel von einer Firma als einem Produzent und Wiederverwerter von Kupfer.

6) Hauptteil

6.1. Nachweis der Nachhaltigkeitsrelevanz des geplanten Messverfahrens

Dem Entwicklungsvorhaben ESKEiN ging das nun abzuschließende Vorprojekt voraus, mit der Zielstellung, Anforderungen und Handlungsfelder für die zukünftige Industrieanwendung der neuen Messtechnik zu konkretisieren und deren Potential für eine nachhaltigere Prozessgestaltung in der Industrie zu erkunden. Die Nutzung der neuen Messtechnik soll eine mögliche Maßnahme sein, Prozesse zu optimieren, die Energieeffizienz im Unternehmen zu steigern und dabei Kosten zu sparen und gleichzeitig CO₂-Emissionen zu reduzieren. Letztendlich ging es darum aufzuzeigen, dass auch eine Messtechnik (und nicht nur eine Produktionstechnik) zu einer erheblichen Reduzierung von Ressourcenverbrauch und zu CO₂-Einsparungen beitragen kann.

Im Vorprojekt verfolgten wir dafür den Ansatz, die erforderlichen Daten für die Herleitung von Ressourceneinsparpotentialen an konkreten Industrieprodukten bzw. -prozessen festzumachen und in Zusammenarbeit mit industriellen Partnern zu ermitteln. Daher bestand die erste Hauptaufgabe darin, geeignete Partner zu finden und mit Ihnen gemeinsam die Daten zu erfassen.

Hierzu wurden mehrere Unternehmen der metallverarbeitenden Industrie, und weitere über Verbände, Organisationen und durch Veröffentlichungen in relevanten Newsletter-Nachrichten oder Pressemitteilungen, kontaktiert. Aus den 28 direkt kontaktierten, und über die Medien der Verbände und Organisationen erreichbaren Unternehmen, konnten immerhin 20 Unternehmen mit Interesse für die neue Messtechnologie ESKEiN und unser Projektvorhaben bezüglich der Erarbeitung einer Analyse für die Erkundung von Ressourceneinsparpotentialen gefunden werden.

In den Gesprächen, die auf Grund der Corona-Pandemie nur eingeschränkt und vorwiegend per Webmeeting und mit Telefonaten möglich wurden, konnten trotz der Einschränkungen Ziele, Anforderungen und Handlungsfelder von Industrieanwendern für das neue Messverfahren ESKEiN zusammengetragen und diskutiert werden. Dabei widerspiegeln die Erkenntnisse aus dem Erfahrungsaustausch, dass Ressourceneinsparpotentialen in der Industrie bisher nahezu ausschließlich über die Energieeinsparung in den Produktionsprozessen gesehen wurden, so zum Beispiel über optimierte Laufleistung von Antrieben/Getrieben, über Temperierungsmaßnahmen oder die Weiternutzung von Abwärme.

Die zu entwickelnde neue Messtechnologie ESKEiN traf bei unseren Ansprechpartnern aus der metallverarbeitenden Industrie auf Grund des zerstörungsfreien Messverfahrens auf hohes Interesse und wegen der Möglichkeit, umfassendere Messdaten (insbesondere Eigenspannungen) aus dem Messprozess zu gewinnen, als dies bisher möglich ist. Gleichzeitig erzeugte unser Ansatz, den Industrieunternehmen mit ESKEiN zukünftig weitere Möglichkeiten für Ressourceneinsparungen und CO₂-Reduzierungen zu ermöglichen, so etwas wie „positive Überraschung und Neugier“ für unser Projektvorhaben.

Die Themen um Klimawandel und Ressourcenverschleiß sind in den Firmen angekommen. Jedoch finden bisher nur im geringen Umfang Überlegungen zu konkreten Umsetzungsmaßnahmen statt, um den zunehmend präsenten Anforderungen für Klimaneutralität und Ressourcenschonung gerecht zu werden. Für uns wurde deutlich, dass der Prozess der Produktentstehung bisher kaum bezüglich seines Einsparpotentials für Ressourcen betrachtet wurde. Beinahe ausschließlich wurden Energieeinsparungen an Maschinen und Anlagen als Ansatzpunkte für

Ressourceneinsparungen gesehen. Hingegen fehlten (zumindest in den Fällen der durch uns angesprochenen Unternehmen) die Prüfung von Chancen zur Materialeinsparung durch vertieftes Messen, zur Aufwandreduzierung, zur Verkürzung von Prozessen oder Lebenszyklusverlängerung. So diente unser Vorprojekt in den Industrieunternehmen vor allem auch dazu, die Möglichkeiten einer nachhaltigen Anwendung von Messtechnik zu erläutern und dies über konkrete CO₂-Bilanzierungen aufzuzeigen.

Immerhin konnten wir (vorerst) 11 Unternehmen für eine mögliche Datenaufnahme für die Auswertung mit einer CO₂-Bilanzierung gewinnen. Auf Grund der Corona-Pandemie und der damit verbundenen Maßnahmen in den Unternehmen, wie Kurzarbeit, Homeoffice, Aussetzen von Meetings, Zugangsverbote für Externe sowie Reiseverbote von Mitarbeitern, konnte die Datenbeschaffung und Zusammenarbeit mit den Unternehmen jedoch nicht wie geplant, und insbesondere nicht in allen 11 zugesagten Unternehmen, durchgeführt werden. Alternativ erfolgte durch uns eine umfassende Ausarbeitung von Dokumenten zur Erläuterung und als Vorlage zur Datenaufnahme für CO₂-Bilanzen sowie der Ausbau unserer Infrastruktur für eine Verbesserung der Kommunikation trotz Corona-Schutzmaßnahmen. Diese Maßnahmen konnten jedoch die Wirkung von Workshops, Vor-Ort-Gesprächen in der Produktion oder moderierte Datenbeschaffung über Abteilungs- und Organisationsgrenzen hinweg, nicht ersetzen. Lediglich aus 4 Unternehmen konnten wir im Vorprojekt letztlich Daten für eine CO₂-Bilanzierung beschaffen. Problematisch ist zudem die Unvollständigkeit der beschaffbaren Daten durch zu gering verfügbare Kapazität für unser Vorhaben in den Firmen sowie die fehlende Erreichbarkeit abteilungs- und standortübergreifender Kompetenzträger für die Datenbeschaffung.

Für die Datenerfassung wurden zwei Fragebögen entworfen (s. Anhang):

- einer für eine vereinfachte Erfassung des CO₂-Einsparpotentials auf Basis eigener Bewertungen
- einer für eine CO₂-Bilanzierung auf Basis der Prozesskette und des Lebenszyklus des Bauteils.

Dabei wurde folgende Argumentationskette verwendet, warum der Einsatz einer Messtechnik zu Ressourcen- und CO₂-Einsparung führen kann:

Üblicherweise werden die Materialparameter höchstens im Entwicklungsprozess ermittelt oder aus Tabellenwerken übernommen und später nicht mehr erfasst. Bei den mechanischen Oberflächeneigenschaften werden oft die Härte und das Elastizitätsmodul ermittelt. Die Härte kann jedoch nicht in Modellrechnungen verwendet werden, sondern nur Fließ- und Streckgrenzen oder komplette Spannungs-Dehnungs-Kurven (SDK). Diese wiederum lassen sich nur mit Zugproben ermitteln sowie nicht an (fertigen) Bauteilen. Eigenspannungen in Oberflächen werden oft gar nicht erfasst da sie schwer zu bestimmen sind. ESKEiN wird ein neues Messverfahren sein, das an fertigen metallischen Bauteilen und ohne Probenentnahme mechanische Oberflächeneigenschaften in Form von Spannungs-Dehnungs-Kurven und Eigenspannungen (ES) ermittelt und z.B. für weitere Berechnungen die entsprechenden Messparameter zur Verfügung stellt.

- Durch die genaue Bestimmung von SDK+ES auch an dünnen oder geformten Bauteilen lassen sich Sicherheitsfaktoren reduzieren. Bauteile können z.B. kleiner oder dünner dimensioniert werden. Dies führt unmittelbar zu einer Materialeinsparung sowie zu geringeren Transport- und Energiekosten.
- Durch die Messung von SDK+ES lassen sich Fehlereinflüsse bei einzelnen Fertigungsschritten erfassen, weil sie die Oberflächen verändern. Fertigungsschritte können somit optimiert werden, was zu Zeit-, Material- und Energieeinsparungen führen kann.
- Durch die Messung von SDK+ES an fertigen Bauteilen, ohne ihre Funktion zu beeinträchtigen, lassen sich genauere gut-schlecht-Bewertungen, z.B. bei Eingangskontrollen durchführen.
- Ausschuss, bzw. Transport von Ausschuss oder Weiterverarbeitung von Ausschuss kann reduziert werden.
- Die erwartete Materialreduktion aus Phase 1 (Entwicklung) führt zu geringerem Fertigungsaufwand, z.B. weniger Materialabtrag oder -auftrag
- Die erwartete Lebensdauer aus Phase 4 (Nutzung, Wartung) führt zu geringerer Stückzahl, z.B. weniger Ersatzteile.
- Durch die Entwicklung kompakterer Bauteile / Produkte wird Verpackungs- und Transportaufwand reduziert.
- Durch die Messung von SDK+ES in Wartungsintervallen lassen sich mechanische Oberflächenveränderungen erfassen und damit zuverlässigere Lebensdauerabschätzungen vornehmen die zu einer Laufzeitverlängerung führen oder zum rechtzeitigen Austausch von Komponenten. Dies kann mit Hilfe von FE-Rechnungen begleitet werden in die die SDK+ES Eingang finden. Das betrifft insbesondere Bauteile die sich gegeneinander bewegen wie Achsen, Wellen, Lager aber auch Rohrleitungen und Behälter. Größere Bauteile, die zugänglich sind,

können vor Ort gemessen werden, kleinere Bauteile müssten ausgebaut werden um sie im Messgerät zu platzieren.

- Durch die Messung von SDK+ES lässt sich ermitteln, ob sich einzelne Bauteile wieder- oder weiterverwenden lassen, weil deren Qualität ausreichend den Anforderungen entspricht.
- Durch die Entwicklung kompakterer und leichter Bauteile (aus Phase 1)) wird bei der Entsorgung Transportkapazität und Energie eingespart.

Bei der vereinfachten Erfassung wurden dann Fragen gestellt zu folgenden Punkten:

Für welche Entstehungs-/Lebenszyklusphase des Bauteils vermuten Sie Einsparpotentiale?

Lebenszyklus	Kreuz	Auszufüllen
Phase 1) Entwicklung		s. Pkt. 6 S. 4
Phase 2) Fertigung		s. Pkt. 2 S. 5
Phase 3) Installation		s. Pkt. 3 S. 6
Phase 4) Nutzung / Wartung		s. Pkt. 4 S. 6
Phase 5) Entsorgung / Rückführung		s. Pkt. 5 S. 7

Für Mengenabschätzungen sollte die durchschnittliche Gesamtmenge eines Jahres verwendet werden.

Material einsparung durch Ausschussreduktion oder Lebensdauererlängerung. Hier sind alle Materialien des Bauteils anzugeben.

	Rohstoffmenge pro Jahr	Einsparung (Schätzung)	Treibstoffverbrauch pro Rohstoffmenge im Jahr	Energieverbrauch bei Bauteilproduktion im Jahr
Material	(Einheit)	%	Liter	kWh

Die Ergebnisse der Befragung werden im Folgenden anhand der Einzelfälle zusammengefasst und erläutert.

Fallbeispiel A: Kupferverarbeitung

Das betrachtete Unternehmen produziert aus Kupferkonzentrat und Recyclingmaterialien hochreines und hochwertiges Kupfer und verarbeitet es weiter zu Vorprodukten. Altkupfer und diverse andere Recyclingmaterialien werden so wieder dem Wirtschaftskreislauf zugeführt. Pro Jahr produziert die Firma mehr als 1 Mio. Tonnen börsenfähiger Kupferkathoden. Sie werden im Konzern zu Gießwalzdraht, Spezialdraht, Stranggussformaten, Walzprodukten, Bändern und Profilen aus Kupfer und Kupferlegierungen weiterverarbeitet.

Das neue Messverfahren soll zur Weiterentwicklung eines Bandes aus einer Kupferlegierung zur Lebensdauererhöhung bei Nutzung in sogenannten Leistungsmodulen dienen. Ziel in dem Entwicklungsprojekt ist es die Lebensdauer der Leistungsmodule um 50% - 100% zu erhöhen. Das Unternehmen aus unserem Fallbeispiel ist hier Lieferant am Anfang einer Lieferkette, die bis hin zum OEM noch zwischen 4 bis 6 weitere Produzenten umfassen kann. Die Entwicklung hat für das Unternehmen eine hohe Bedeutung, da es einen gewichtigen Produktionsbereich einnimmt. Auf Grund der Vorgespräche mit dem Unternehmen hinsichtlich des Entwicklungsvorhabens ESKEiN, wurde bereits 2020 ein ZHN Messgerät von ZwickRoell bestellt, mit dem das neue Messverfahren in Zukunft angewendet werden könnte.

Für diese Entwicklung wurden folgende Kennzahlen zugearbeitet:

- Erwartete Verkaufsmenge der Entwicklung: mittelfristig bis 2024 1000 t Cu/ Jahr
- Übereinsatz ca. 30 %, d.h. bei 1000 t Cu/ Jahr werden 1300 t/ Jahr eingesetzt
- Erwartete Lebensdauererhöhung >50 %
- Spezifischer Energieverbrauch 0,8 MWh/ t Cu (Strom, Öl, Diesel, Gas, Kohle)
- Spezifische CO₂-Emission 0,06 t CO₂/ t Cu

Die CO₂ Emission bei der Verarbeitung dieses Produktes beträgt $0,06 \cdot 1300t = 78$ Tonnen. Bei einer Lebensdauererlängerung um 50% - 100% würden im Mittel 33% - 50% weniger Produkte pro Jahr benötigt. Es könnten damit zwischen 433t und 650t Kupfer pro Jahr eingespart werden. Das entspricht **einem jährlichen CO₂-Einsparpotential von 1.088 t – 1.631 t** unter der Annahme, dass jeweils zur Hälfte Sekundärkupfer und Primärkupfer verarbeitet werden. **Zusätzlich können zwischen 26t und 39t CO₂ pro Jahr bei der Cu-Verarbeitung beim Unternehmen selbst eingespart werden.**

Die insgesamt produzierte Menge an Kupfer betrug bei unserem Fallbeispiel 2019 60.000 t. Es ist zu erwarten, dass das neue Messverfahren bei erfolgreichem Einsatz in der bereits gestarteten Entwicklung auch bei der Entwicklung anderer Produkte eingesetzt wird. Rechnet man bei diesen Produkten im Mittel nur mit einer Lebensdauererlängerung von 10% so ergibt sich eine Kupfereinsparung von 6.000 t pro Jahr, was **hochgerechnet 15.080 t CO₂-Reduzierung pro Jahr entspräche** – und zwar auch hier wieder unter der Annahme, dass anteilig jeweils 50 Prozent Sekundärkupfer und 50 Prozent Primärkupfer verarbeitet werden.

Die Ergebnisse in diesem Fallbeispiel basieren auf Angaben des Unternehmens selbst. Dies betrifft insbesondere die unternehmensspezifische CO₂ Emission pro Tonne Kupfer. Da im Unternehmen offensichtlich Vorkenntnisse und Vorarbeiten für die Erstellung und Auswertung von CO₂-Bilanzen vorhanden sind, was in den Gesprächen und bei der Zusammenarbeit im Vorprojekt deutlich wurde, gehen wir von einer guten Datenbasis für unser Projekt aus.

Fallbeispiel B: Produktentstehung von Turbinenringen

Das im Fallbeispiel B betrachtete Großunternehmen produziert Wälzlager, darunter große Wälzlager für Windkraftturbinen. So werden jährlich etwa 500 Stahlringe eines Typs von Wälzlager für Hersteller von Windkraftanlagen produziert, und zwar in Serien der betrachteten Produktlinie von jeweils ca. 50 Ringen pro Auslieferung für einen Windpark. Zur Validierung der Randschichthärtung müssen pro Serie mindestens zwei dieser Ringe einem zerstörenden Prüfverfahren unterzogen werden. Dies macht sie für den weiteren Einsatz in Windkraftanlagen unbrauchbar, d.h. der komplette Aufwand für die Herstellung der Ringe, der Aufwand an Materialien, Energie, Transport und Hilfsstoffen und letztlich auch die angefallenen CO₂-Emissionen fallen hier umsonst an. Im Fall der Überarbeitung bestimmter Anlagenteile wie beispielsweise der Induktoren von Windkraftanlagen ist dieses Prüfverfahren mit zwei weiteren Ringen dieser Auslieferungsserie zu wiederholen. So fallen hochgerechnet auf die gesamte Produktionsmenge von 500 Stahlringen pro Jahr insgesamt 20 bis 40 Ringe an, die zerstörend geprüft werden müssen.

Die Ringe werden aus einem Stahlbolzen mit einer Masse von 3,4 Tonnen Stahl herausgeschmiedet. Allein bei der Bereitstellung des Materials für den Stahlbolzen werden 5,2 Tonnen CO₂ emittiert, wenn man berücksichtigt, dass für die Herstellung einer Tonne Stahl 1,5 Tonnen CO₂ emittiert werden (Jahresbericht der Stahlindustrie 2007). Beim Schmieden des Bolzens zu einem Stahlring sowie den Arbeitsgängen Härten und Vergüten fallen weitere CO₂-Emissionen in Höhe von insgesamt 1,47 Tonnen an.

Da viele Hersteller von Windkraftanlagen hohe Qualitätsanforderungen hinsichtlich der Verschleißfestigkeit und Härte des Materials haben, hat es sich in der Produktion der Ringe zunehmend durchgesetzt, den Bolzenstahl vor weiteren, hier benannten Verarbeitungsschritten dem Elektro-Schlacke-Umschmelzverfahren (ESU-Verfahren) zu unterziehen. Die höhere Qualität und Langlebigkeit hat ihren „Preis: Auf Grund des ESU-Verfahrens fallen weitere **2.182 Kg CO₂-Emissionen, also 2,2 t** an.

Allein auf die Herstellung **eines Rings** entfallen also **mindestens 6,7 Tonnen CO₂**, bei der **Anwendung des ESU-Verfahrens 8,9 Tonnen**.

Hochgerechnet auf die Ringe, die einem zerstörenden Prüfverfahren unterzogen werden, ergeben sich daraus folgende Werte:

Anzahl geprüfter Ringe pro Jahr	20 Stck.	40 Stck.
CO ₂ -Emission ohne ESU* in t pro Jahresmenge geprüfte Ringe	134	268
CO ₂ -Emission mit ESU* in t pro Jahresmenge geprüfte Ringe	178	356

* ESU – Elektro-Schlacke-Umschmelzverfahren

Dies ist zugleich das von uns ermittelte Mindesteinsparpotenzial an CO₂, welches sich ergeben würde, wenn die zerstörungsfreie ESKEIN-Technologie das bisher zerstörende Prüfverfahren ersetzen kann. Vorausgesetzt, die

Qualitätsanforderungen werden bei den Messungen erfüllt, können die Ringe ohne Zerstörung für ihre Prüfung im Produktentstehungsprozess beibehalten und in den Windkraftanlagen verbaut werden und müssten nicht wie bisher eingeschmolzen werden. Bei der Ermittlung der CO₂-Emissionen, die für einen Ring anfallen, mussten wir uns weitgehend auf die Betrachtung des Herstellungsverfahrens beschränken, da weitere Angaben aufgrund der Coronapandemie nicht ermittelbar waren. Die Kommunikation mit Ansprechpartnern und das Eruiere von Daten durch Inaugenscheinnahme von Prozessen vor Ort wurden hierdurch enorm erschwert bzw. verhindert.

Dies bedeutet, dass weitere Potenziale zur Einsparung von CO₂-Emissionen in anderen Phasen des Produktlebenszyklus, wie z.B. der Wartung und Nutzung oder der Entsorgung und Rückführung von Komponenten der Windkraftturbinen existieren, aber derzeit nicht ermittelt werden können. Dies soll, wenn möglich, in weiteren Projektteilen nachbereitet werden.

Fallbeispiel C: Herstellung Turbinenschaufeln

Im dritten Fallbeispiel konnten wir die Prozesse bei der Entstehung von Turbinenschaufeln betrachten, die beispielsweise im Schiffbau für mehrere Schaufelstufen an Turbinen eingesetzt werden. Nach mehreren Anläufen zur Datenbeschaffung für eine möglichst vollständige CO₂-Bilanzierung, die durch Ausfall der Kommunikationsmöglichkeiten wie Telefon und Mailversand und mangelnde Erreichbarkeit von Ansprechpartnern anderer Abteilungen uneffektiv und schleppend verliefen, konnten mehrere relevante Daten u.a. für Transporte und Logistik, sowie für Rohlingsbeschaffung und weitere Fertigungsprozessschritte in unseren Datenbestand aufgenommen werden. Für unsere Datenaufnahmen im Vorprojekt haben wir den Betrachtungsrahmen ausschließlich auf die Entstehungsprozesse begrenzt, die für das betrachtete Unternehmen relevant sind. Das heißt in dem Fallbeispiel, dass u.a. die Herstellung der Rohlinge sowie die vorherige Erzeugung des Rohmaterials bis zurück zur Gewinnung der Rohstoffe nicht in die CO₂-Bewertung einfließen.

Zudem mussten wir auch in diesem Fallbeispiel mit einem reduziertem Datenbestand (vorerst) auskommen, da keine Informationen bezüglich Mengen oder Volumen abfallerzeugender Prozesse, zum Beispiel bei spanenden Verfahren, sowie bezüglich Werkzeugverschleiß, Rückführungsprozesse oder zu Verwendung von Zusatz- und Hilfsstoffen verfügbar gemacht werden konnten. Weitere CO₂-relevante Daten, z.B. hinsichtlich der Abfallbeseitigung aus den mechanischen Bearbeitungsprozessen oder für die Verwendung von Hilfs- und Betriebsmitteln konnten nicht beschafft werden.

Wenn auch in diesem Fall die Betrachtung der CO₂-Bilanz zum aktuellen Projektstand auf Grund der Einschränkungen durch Corona noch unvollständig ist und damit das herausgearbeitete Ergebnis für Ressourceneinsparpotentiale nur als Mindestmenge dargestellt werden kann, zeigt es dennoch bereits die Möglichkeiten von ESKEiN auf, als eine nachhaltig wirksame Maßnahme in der Produktentstehung eingesetzt zu werden.

Bereits für die eher kleine Stückmenge von 152 Stück Turbinenschaufel einer Schaufelstufe pro Jahr, die im Fallbeispiel C betrachtet werden, konnte, wenn auch mit unvollständigen Daten, eine CO₂-Entstehung von 170 t allein für die Zuführung der Rohlinge und Ausführung der mechanischen Bearbeitung errechnet werden.

Ein Teil der Turbinenschaufeln wird nach der mechanischen Fertigung zur weiteren Bearbeitung an ein externes Unternehmen mit Strahltechnik versandt, um anschließend im Unternehmen weiterverarbeitet. Für den Versand und Durchführung des Kugelbestrahls von 71 Turbinenschaufeln pro Jahr werden zusätzlich mindestens 84 t CO₂ erzeugt.

Daraus ergibt sich bereits für die Entstehung der 152 Stück Turbinenschaufeln einer Schaufelstufe eine CO₂-Emission von 254, t / Co₂ / Jahr, wobei auch dieses Ergebnis auf Grund der unvollständigen Datenlast für die CO₂-Bilanz lediglich eine Mindestmenge darstellt.

Mindestens 2 Varianten für Ressourceneinsparpotentiale wurden anhand dieser CO₂-Bilanz mit den Mitarbeitern des Unternehmens diskutiert und das Mengenpotential errechnet. Variante 1) generiert eine CO₂-Vermeidung von bis zu **84,4 t / Jahr CO₂** in der Produktentstehung, wenn die mechanisch bearbeiteten Bauteile hinsichtlich ihres Bedarfs zur weiteren Bearbeitung mit Kugelstrahltechnik überprüft und ggf. der Prozessschritt eingespart werden kann. Die tatsächlich mögliche CO₂-Einsparung bzw. Reduzierung ist wesentlich höher, denn in der Betrachtung fehlen beispielsweise die Aufwendungen für die Bereitstellung der Kugeln und Kugelstrahltechnik sowie von Hilfsstoffen für die Vor- und Nachbearbeitung des Kugelstrahlens.

Als (vorerst) zweite Variante einer ressourcenschonenderen Prozessgestaltung bietet sich mit der Möglichkeit von ESKEiN der zerstörungsfreien Messung der Turbinenschaufeln. In den Jahresmengen von 152 Stück sind 20 Stück Mehrteile zur Verwendung für zerstörende Messprozesse vorgesehen. Werden lediglich noch 2 Ersatzturbinen-

schaufeln statt 20 Stück als Mehrmenge gefertigt, resultiert daraus mindestens eine CO₂-Einsparung von **30,1 t CO₂ / Jahr** für die Schaufellinie, immerhin 12% der Gesamtemission.

Interessant an diesem Fallbeispiel ist die Erkenntnis für unseren Industriepartner ebenso wie für uns, dass ein bedeutender Teil des Einsparpotentials bereits durch Hinzuziehen der ESKEiN-Messtechnologie zur Auswahl von Turbinenschaufeln im Vorfeld der Kugelbestrahlung zu finden ist. Denn bisher werden mechanisch bearbeitete Turbinenschaufeln ohne Untersuchung pauschal den Kugelstrahlprozessen zugeführt, da das Überprüfen der Notwendigkeit des Kugelbestrahlebens bisher zu aufwendig und teuer ist. Hier könnten Ressourcen für Transport und Rücktransport sowie das Kugelstrahlen selbst eingespart werden, gegebenenfalls im Umfang der gesamten errechneten CO₂-Menge von 84 t. Auch in diesem Beispiel lohnt es sich, weitergehende Daten für eine umfassendere CO₂-Bilanz und für das Erkunden möglicher CO₂-Einsparpotentiale auf Grund von Prozessänderungen in der Entstehung der Turbinenschaufeln aufzunehmen und zu betrachten.

Chancen für verbesserte CO₂-Werte bei der Produktion der Turbinenschaufeln bieten sich bereits bei der Überprüfung von Rohlingen, bevor sie von China nach Deutschland transportiert werden. Zudem wird die Auswahl von Bauteilen zur Kugelstrahlbearbeitung relevante CO₂-Einsparungen ermöglichen, da aktuell nicht nachweisbar ist, inwieweit dieser Prozessschritt für die Erfüllung der Qualität der Turbinenschaufeln überhaupt notwendig ist. Auch erzeugen die ausgesonderten Bauteile Aufwendungen für Logistik und Lagerung, verbrauchen weitere Betriebs- und Hilfsstoffe, erzeugen Verschleiß von Werkzeugen und verursachen Aufwendungen für Rückführung und Abfallbeseitigung. All dies konnte in der CO₂-Bilanzierung noch nicht betrachtet werden. Wir beabsichtigen in dem Hauptprojekt diese Daten nach zu erheben.

Die Erfahrungen aus dem Vorprojekt haben uns dafür aufgezeigt, dass eine solche weitgehend vollständige Datenbeschaffung nur durch unsere Moderation und den Einsatz unserer Kapazitäten vor-Ort und innerhalb der abteilungsübergreifenden Strukturen der Unternehmen möglich ist. In den Unternehmen selbst sind kaum Kompetenzträger und Prozesse für die CO₂-Bilanzierung installiert bzw. Kapazitäten verfügbar. Da es im Interesse der meisten akquirierten Industriekontakte liegt, eine Bewertung ihrer Prozesse hinsichtlich der möglichen Einsparpotentiale durch Einsatz von ESKEiN-Messtechnologie durchzuführen und darauf aufbauend Maßnahmen zur Gestaltung ressourcenschonender Entstehungsprozesse zu entwickeln, beabsichtigen wir die Arbeit auf diesem Gebiet fortzusetzen.

Gesamtbetrachtung

Anhand von nur drei Fallbeispielen konnte bereits eine **Menge von 1.278 t – 15.520 t CO₂ Einsparung pro Jahr durch den potentiellen Einsatz der neuen Messtechnologie** nachgewiesen werden. Bei immerhin 20 Unternehmen konnte ein Interesse an der Messtechnologie gefunden werden. Da die Beispiele nur einen kleinen Teil der deutschen Industrie erfassen, die sich mit ähnlichen Materialproblemen beschäftigen, ist davon auszugehen, dass das Einsparpotential mindestens um den Faktor 100 größer ist. Betrachtet man die Situation weltweit, so wäre der Faktor noch wesentlich größer. **Für Deutschland** kann daher von einem potentiellen CO₂-Einsparpotential durch die neue Messtechnologie von etwa 1.5 Mio. t CO₂ jährlich ausgegangen werden, wenn das neue Messverfahren umfassend eingesetzt wird. Realistisch sind vielleicht 20% davon, also etwa **0.3 Mio. t CO₂ jährlich**.

Dies ist ein Ergebnis das erstmals aufzeigt, wie wichtig bereits die Entwicklung von Messtechnologien für die Einhaltung von Klimazielen und die Entstehung einer nachhaltigen Kreislaufwirtschaft sein kann – ein Beitrag der bisher zumeist noch übersehen wird.

6.2. Konkretisierung der industriellen Anforderungen an die neue Messtechnologie

In einer Vorbetrachtung wurde überlegt, in welchem Technologierumfeld die zu entwickelnde Messtechnik zum Einsatz kommen könnte und wo sie zu einer Einsparung von Ressourcen beitragen kann. Aus dieser Vorbetrachtung wurden Bereiche für die zu kontaktierenden Unternehmen festgelegt. Das Spektrum eruiert Industrieprozesse reichte von zerspanender Metallbearbeitung wie Fräsen, Drehen und Schleifen, der Präzisionsteilefertigung, dem Kugelstrahlen zur Oberflächenverdichtung oder zur gezielten Erzeugung von Oberflächenspannungen bis hin zur Metallumformung, z.B. durch Schmieden und der Metallbeschichtung wie beispielsweise in der Mikroelektronik. Nachfolgend wurden aus dem Umfeld der Projektpartner verschiedene Unternehmen kontaktiert. Mindestens 28 Unternehmen der metallverarbeitenden Industrie sowie 7 Verbände bzw. Organisationen wurden direkt kontaktiert. Weitere wurden über Newsletter oder Pressemitteilungen oder spontan bezüglich eines möglichen Interesses angesprochen.

Mit Beginn der Auswirkungen der Corona-Pandemie reduzierten sich unsere Möglichkeiten für die interaktive Zusammenarbeit mit den Industriepartnern drastisch. Wie bereits beschrieben waren Ansprechpartner seltener oder gar nicht mehr erreichbar und die Datenbeschaffung wurde schwerfällig und oft unzureichend. Trotz Nutzung moderner Kommunikationsmittel wie Webmeetings konnten sie vor-Ort-Analysen, Workshops und Interviews nicht ersetzen.

Im Ergebnis dieses Vorprojektes konnten wir auf der Grundlage von Recherchen im Internet und in Fachmedien eine umfassende Liste relevanter Industrieprozesse zusammenstellen. In den Gesprächen per Webmeeting oder Telefon und durch Austausch von E-Mails konnten wir mit den Industriepartnern die Industrieprozesse hinsichtlich ihrer Relevanz für nachhaltige Prozessverbesserungen diskutieren und so mögliche Einsatzbereiche für ESKEiN mit möglichen Ressourceneinsparpotentialen definieren. Diese wurden in tabellarischer Form (siehe Tabelle 1) zusammengestellt und dienen als erste Anhaltspunkte für die Betrachtung der Nachhaltigkeitsrelevanz.

Besonders häufig wurde der Wunsch zur Ermittlung von Eigenspannungen als wichtige Materialgröße genannt. Hier gibt es scheinbar ein großes Defizit bei deren Bestimmung oder bei den Messmöglichkeiten. Bei der Ermittlung von Spannungs-Dehnungs-Kurven sollte eine Abweichung kleiner 5% zum Zugversuch bei der Zugfestigkeit und kleiner 5-10% bei der Dehngrenze erreicht werden.

Ein großes Interesse bestand auch darin Kennwerte zur Ermüdungsfestigkeit zu bekommen wie sie sonst in einem einachsigen Ermüdungsversuch bestimmt werden. Dies erscheint realistisch, wenn man die FEM-Simulation der einachsigen Spannungs-Dehnungs-Hysterese-Kurven und deren Zusammenhang mit den Ent-Wiederbelastungs-Kurven im Eindruckversuch betrachtet (s.u.).

Der Hauptnutzen des Messverfahrens wird darin gesehen, dass man an realen Teilen testen kann, die sich weiterverwenden lassen. Solange die Teile nicht größer als 10cm im Kubik sind, lassen sich die Messungen an einem Laborgerät durchführen. Bei größeren Teilen ist eine Messung mit einem mobilen Messkopf erforderlich für den dann die nötigen Befestigungsverfahren im Rahmen des Projektes zu entwickeln wären. Ein solcher Messkopf soll im Rahmen des Projektes entwickelt werden.

Die erkannten Parameter müssen nun im weiteren Entwicklungsvorhaben noch besser konkretisiert werden. Dass die Erfüllung der Anforderungsparameter durch die neue Messtechnik realisierbar sein wird, davon ist auf Grund der Erkenntnisse aus dem Vorprojekt sowie aus den Vorerfahrungen der Projektbeteiligten im ESKEiN-Projekt auszugehen.

Tabelle 1: Anwendungsfelder der Messtechnologie und ihr Potential zur Ressourceneinsparung

- Anwendungsfeld	- Bedarfe Industrie (eruiert)	- Stand heute	- Potential ESKEiN	- Reccourceneinsparpotentiale
<ul style="list-style-type: none"> - Schichtauftrag, Beschichtungsverfahren - z.B. Auftragsschweißen mittels Pulverdüse – Additive Fertigung; - z.B. Beschichtungen Mikroelektronik 	<ul style="list-style-type: none"> - Ermittlung der mechanischen Eigenschaften ein- und mehrlagiger Schichten (z.B. 2,0 mm - min. 0,4 mm) - Analyse des Charakteristikums unterschiedlicher Schichtbereiche (in und zwischen Schweißraupen, Randbereiche) - Ermittlung der maximalen Eigenspannungen nach dem Prozess - Charakterisierung und Beschreibung Übergangsbereiche z.B. zwischen einer hochlegierten Verschleißschicht und einem niedriger legierten Grundkörper 	<ul style="list-style-type: none"> - Eigenspannungen <u>am fertigen Bauteil nicht</u> messbar (nur empirisch ermittelbar und über mehrere Messprozesse = hoher Aufwand) 	<ul style="list-style-type: none"> - Ermittlung von Eigenspannung und ableitbarer Kennwerte an fertigen Bauteilen, auch auf dickeren Oberflächen-schichten möglich - Ableiten weiterer auslegungsrelevanter Kennwerte möglich, z.B. zur Berechnung von Sicherheits- und Lebenszyklusfaktoren mit FEM - Prozessverständnis entwickeln 	<ul style="list-style-type: none"> - <u>Optimale BauteilAuslegung bereits in der Entwicklung</u> - optimale <u>Auslegung von Fertigungsprozessen</u> z.B. beim Auftragsschweißen mittels Pulverdüse (<u>optimaler Energieverbrauch, Materialeintrag</u>) oder Beschichtungen in der Mikroelektronik (<u>optimale Bereichszonen und Materialeintrag/Schichtdicken</u>)
<ul style="list-style-type: none"> - Umformtechnik - Z.B. Kaltumformung 	<ul style="list-style-type: none"> - Vertiefende Charakterisierung von umgeformten Zuständen an Blechen - Ermittlung von mechanischen Eigenschaften und den erzeugten Eigenspannungen an Stanzkanten nach Stanz- und Schneidvor-gängen zur optimalen Auslegung von Bauteilen und Fertigungsprozessketten - Veränderte (elektromagnetische) Eigenschaf-en an Stanzkanten > Ausprägung unbekannt 	<ul style="list-style-type: none"> - Eigenspannungen <u>am fertigen Bauteil, insbesondere an Stanzkanten, nicht</u> messbar 	<ul style="list-style-type: none"> - Ermittlung von Eigenspannung und ableitbarer Kennwerte an fertigen Bauteilen, auch an Stanzkanten, umgeformten Blechteilen (Stahl) - Qualitativ exaktere Beschreibung von Zuständen 	<ul style="list-style-type: none"> - <u>Optimierung von Bearbeitungs-konzepten</u> - Lernprozess für optimale Auslegung von Umformprozessen + WZ - Nachfolgend reduzierter Einsatz v. Prozessenergie und Material
<ul style="list-style-type: none"> - Charakterisierung von Verschleißeigenschafte n nach Carbonitrierung von Wälzlagerwerkstoffen 	<ul style="list-style-type: none"> - Verbesserung der allgemeinen Verschleiß-eigenschaften - Verbesserung der Gebrauchsdauer bei Überrollung durch harte Partikel (z.B. Stickstoff- o. kohlenstoffangereichert) - Verbesserung der Gebrauchsdauer in Grenz-reibungsfällen (z.B. Karbid-angereichert) - > optimale Auslegung der Fertigungsprozesse (Materialeintrag, Zyklen, etc.) 	<ul style="list-style-type: none"> - Charakterisierung von Verschleiß-eigenschaften/-zuständen <u>an be-schichteten Fertigbauteilen nicht möglich</u> - unzureichende Kenntnisse zur optimalen Auslegung von Bauteilen und Beschichtungsprozessen entsprechend Verschleiß, Abrieb 	<ul style="list-style-type: none"> - Messung von Eigenspannungen an fertig beschichteten Bauteilen möglich, - ortsaufgelöste Charakterisierung von Randzonen möglich (z.B. carbonitriert) 	<ul style="list-style-type: none"> - <u>optimale Auslegung von Fertigungs-prozessen</u>, u.a. Materialeintrag z.B. Stickstoff, Kohlenstoff, Karbid - <u>optimale Auslegung von Schicht-dicken</u> nach Verschleißfestigkeit und – bedarf > optimaler Energieverbrauch (Zyklen)
<ul style="list-style-type: none"> - Feststellung von Ursachen für Schäden z.B. Lagergut, - Früherkennung entstehender Schäden, z.B. Bauteile in Betrieb mit hohem 	<ul style="list-style-type: none"> - Erkenntnisse gewinnen über metallphysikalische Vorgänge langlebiger Fertigteile (z.B. Lagerware – Zunahme von Lagerausfällen – oft mit hohen Schadensfolgen) - Feststellung von Verschleißzuständen im eingebauten Betriebszustand (z.B. Rohrleitungen Chemieanlagen, Kraftwerke) 	<ul style="list-style-type: none"> - <u>Ermittlung von Verschleißbildern</u> metallischer Fertigteile im Betrieb/Lebenszyklus <u>nicht möglich</u> - <u>Fehlende Erkenntnisse zu Werkstoffveränderungen</u> nach Bauteilfertigstellung (z.B. im Lagerbestand) 	<ul style="list-style-type: none"> - Mobile Datenerfassung zur Zustandserkennung metallischer Bauteile in Betrieb/im eingebauten Zustand möglich - ortsaufgelöste Messung von mechanischen Eigenschaften im Nahfeld eines Schadens im Vergleich zu unbeschädigten 	<ul style="list-style-type: none"> - <u>Optimierung von Lebenszyklen für In-Betrieb-befindlicher Fertigteile</u> - Analyse/Auswertung von Schadens-bildern/Werkstoffveränderungen zur Erkenntnisgewinnung über metall-physikalische Vorgänge in fertigen Bauteilen – Ableiten von

Risikopotential z.B. Umweltschäden			Bereichen des gleichen Bauteils möglich – Auswertungen	<u>Maßnahmen zur Vermeidung von Schadensfällen/Lagerausfällen</u> -
- Anwendungsfeld	- Bedarfe Industrie (eruiert)	- Stand heute	- Potential ESKEIN	- Reccourceneinsparpotentiale
<ul style="list-style-type: none"> - Genauere Beschreibung von Werkstoffzuständen <u>nach Fertigung</u>, - z.B. gehärtete Bauteile - Ermittlung sicherheitsrelevanter Faktoren für FEM o. Gewährleistung - z.B. beschädigte Bauteile 	<ul style="list-style-type: none"> - Feststellung von Festigkeitseigenschaften, charakterisiert durch Kennwerte wie Zugfestigkeit, Fließgrenze und Eigenspannungen > auch an vollharten Werkstoffzuständen, insbesondere mit durch Fertigung aufgeprägter Struktur (z.B. Härtung), - zur optimalen Bauteilauslegung und Prozessgestaltung Fertigung (z.B. Fertigung von Kugeln für Kugellager) - Bedarf für umfangreichere Beschreibung von geschädigten Bauteilen über den standardisierten Soll-Ist-Abgleich hinaus (Fehlererkennung > z.B. Kugeln im Kugellager von Turbinen) 	<ul style="list-style-type: none"> - nur einfache Härteprüfung oder registrierende Härteprüfung (HU) möglich, dabei <u>fehlende Zuordnung zu anderen Kenndaten wie Streckgrenze, Eigenspannung oder Textur</u>, - <u>keine Messung an Originalteilen nach Härtung</u> möglich (z.B. großdimensionale oder Kleinsteile) - Empirische Herleitung von Kennwerten aus Härtemessung nach Probenentnahmen: bei Reihung verschiedener Annahmen entstehen <u>Unsicherheiten</u>, die im Grenzfall zu <u>Über- oder Unterdimensionierung</u> bei zumeist zweier oder mehrerer, nicht direkt messbarer Eigenschaften führen 	<ul style="list-style-type: none"> - Ermittlung von Eigenspannung und ableitbarer Kennwerte an fertigen Original-Bauteilen, auch nach Härteprozess möglich (z.B. Metergroß und Millimeterklein) - verkürzter Messprozess gegenüber bestehenden Messverfahren zur Ermittlung mehrerer Kennwerte (Härte, Zugfestigkeit, Fließgrenze, Eigenspannung) - Fertigungsprozesse /-schritte werden mit weniger Aufwand hinsichtlich dem Erreichen von Solleigenschaften überprüfbar 	<ul style="list-style-type: none"> - genauere Erfassung von Eigenschaftsprofilen von Bauteilen zur <u>Ermittlung sicherheitsrelevanter Faktoren</u> und entsprechend verbesserten Bauteilauslegung - <u>verbesserter Nachweis von (möglichen) Schadursachen</u> zur Ableitung relevanter Maßnahmen (z.B. Kugeln in Kugellagern von Turbinen > Schadbilder im Lebenszyklus: Material-, Fertigungsfehler, technischer Fehler?) - <u>Reduzierung von Kapazitäts- u. Validierungsversuche</u> (z.B. Nachweis sicherheitsrelevanter Kennwerte (Einsatz statt 0,5-1 Tag nun 0,30-120min)
- Additive Fertigung - Auftragsschweißen	<ul style="list-style-type: none"> - Ermittlung mechanischer Eigenschaften ein- und mehrlagiger Schichten (Oberflächen) - Analyse des Charakteristikums unterschiedlicher Schichtbereiche/Übergangsschichten (z.B. Schweißraupen, Randbereiche) - Ermittlung der maximalen Eigenspannungen nach einem Prozess (Veränderungen) 	-	<ul style="list-style-type: none"> - Ermittlung von Eigenspannung und ableitbarer Kennwerte an metallbeschichteten Bauteilen - Ortsaufgelöste Datenbasis für Charakterisierung verschiedener Zonen am Bauteil (Schichtübergang, Randzonen) 	-
- Aufbereitung und Herstellung von Bauteilen und Halbzeugen aus Kupfer	<ul style="list-style-type: none"> - Beurteilung der Oberflächengüte von Bauteilen aus Kupfer - Lebensdauer von Bauteilen, u.a. aus Kupfer muss deutlich verlängert werden 	- Höherer Materialeinsatz für ausreichende Gewährleistung von Lebenszyklen	- Unterstützung des Entwicklungsprozesses (Tests in Prototypenphase)	- <u>Hohes Ressourceneinsparpotenzial durch Erhöhung der Lebenszyklusdauer</u> (z.B. bis zu 50 % CO2)
- Schmieden von Lagerringen für Rotorwellen von Windkraftanlagen	- Die Prüfung der Materialgüte, insbesondere der geringeren Verschleißfestigkeit und damit Haltbarkeit ist für Hersteller von Windkraftanlagen entscheidend, der Aufwand dafür für	- Für Lagerringe mit einer 50er Losgröße werden je Los 2 Lagerringe mehr gefertigt	- Zerstörungsfreie Prüfung der Lagerringe möglich, dadurch keine Mehrfertigung notwendig	- Erhebliche Einspareffekte hinsichtlich der Aufwendungen für Material, Transport, Logistik und Energie, -

	<p>Mehrfertigung für das zerstörende Messen sind enorm ressourcenverschleißend</p> <ul style="list-style-type: none"> - allein für einen Lagerring werden 5 Tonnen Stahl eingesetzt - es folgen Ressourcenaufwendungen für Schmieden, Vergüten und Härten – auch für Mehrfertigung für zerstörendes Bauteilmessen - Allein die Hälfte des Materials geht durch spanende Verfahren verloren bzw. muss erneut wieder eingeschmolzen werden - Manche Bolzen, die zu Ringen geschmiedet werden, müssen über das ESU-Verfahren (Elektroschlacke-Umschmelzverfahren) eingeschmolzen werden 	<ul style="list-style-type: none"> - Diese 2 mehrgefertigten Lagerringe werden einem zerstörenden Prüfverfahren zugeführt, um die Materialgüte des gesamten Los widerzuspiegeln - Fehlermessungen an beiden zerstörten Bauteilen veranlassen die Rückführung vom gesamten Los 	<ul style="list-style-type: none"> - keine Zerstörung von Bauteilen durch Probenentnahmen - Deutlich reduzierte Aufwendungen für Messprozesse - optional: mobile Erfassung von Verschleißzuständen in Echtzeit (z.B. in Betrieb befindlicher Bauteile) 	
- Anwendungsfeld	- Bedarfe Industrie (eruiert)	- Stand heute	- Potential ESKEiN	- Reccourceneinsparpotentiale
<ul style="list-style-type: none"> - Fertigung von Schaufelstufen für Turbinen 	<ul style="list-style-type: none"> - Die Fertigung von Schaufelstufen für Turbinen und das Strahlen erfordert den Einsatz von großen Mengen an Elektroenergie - Außerdem müssen die Teile für bestimmte Fertigungsschritte über z.T. sehr große Entfernungen transportiert werden 	<ul style="list-style-type: none"> - Mehrfertigung von Bauteilen für zerstörende Prüfung von Oberflächeneigenschaften - Fehlende Bedarfsanalyse für Fertigungsschritt Kugelstrahlen, standardmäßige Ausführung - Entwertung von Bauteilen zu Abfall durch Anwendung zerstörender Messverfahren 	<ul style="list-style-type: none"> - zerstörungsfreie Prüfung von Schaufelstufen möglich - Auswahl gefertigter 	<ul style="list-style-type: none"> - Einspareffekte hinsichtlich Material, Energie, Transport, Logistik
<ul style="list-style-type: none"> - Prüfung Bauteilzustand zur Auswahl für weitere Produktion oder Aussonderung - Keine Mehrproduktion 	<ul style="list-style-type: none"> - Zerstörungsfreie Bauteilprüfung 	<ul style="list-style-type: none"> - Mehrteillfertigung - Sichtprüfung - Aufwändige Prüfverfahren 	<ul style="list-style-type: none"> - Zerstörungsfreie Bauteilprüfung 	<ul style="list-style-type: none"> - Materialeinsparungen, angefangen weniger Rohstoffbedarf für Herstellung - Kein Ressourcenverschleiß für Fertigung fehlerbehafteter Güter
<ul style="list-style-type: none"> - Werkzeugbau Kunststoffspritzgusswerkzeuge - „Atmen“ vermeiden 	<ul style="list-style-type: none"> - Prozess kennenlernen für Entstehung „Atmen“ 	<ul style="list-style-type: none"> - Fehlerhafte Produktion von Spritzgussteilen - Früherer Werkzeugverschleiß - Werkzeuge weltweit 	<ul style="list-style-type: none"> - Lernprozess Geometrie Atmen - 	<ul style="list-style-type: none"> - Materialeinsparung Stahl im Werkzeugbau - Prozessoptimierung WZ-Herstellung - Reduzierte Logistik/Transportaufwendungen für Fehler im Spritzguss durch Atmen/ Werkzeugverschleiß
<ul style="list-style-type: none"> - Beschichtung - RISSbildung/ Aussonderung von AUSSchuss 	<ul style="list-style-type: none"> - Haarrisse, kriechende Risse - RiSSbildung in Unterschichten 	<ul style="list-style-type: none"> - 	<ul style="list-style-type: none"> - Oberflächeneigenschaften exakter erkennen (auch in nicht sichtbaren Bereich) 	<ul style="list-style-type: none"> - Vermeidung/Aussonderung von Fehlteilen, dadurch Energieeinsparung in Fertigungsprozessen

- Wälzlagerfertigung	- Fertigung zur Vorbereitung von Aufschrupfen verbesserbar	- Bisher Bohrlochmethode und Erfahrungswissen (nicht messbar, nicht wiederholbar)	- Lernprozess > Fertigung Geometrie für Wälzlager (10 – 40 t) in Vorbereitung des Aufschrupfens genauer vorarbeiten	- Prozessoptimierung, dadurch Einsparung von Energie und Ressourcen, - Lebenszyklusverlängerung > weniger Ressourcenverschleiß
----------------------	---	---	---	--

6.3. Festlegung des anzuwendenden Materialmodells

Als Vorbereitung zur Festlegung des Materialmodells wurden von der ASMEC GmbH eine Vielzahl von Eindruckmessungen an verschiedenen Materialien durchgeführt und die Ergebnisse der RUB zur Verfügung gestellt. Die Messungen wurden mit dem eigenen Nanoindenter vom Typ ZHN durchgeführt und im Folgenden erläutert. Anhand der Messergebnisse und eigener Untersuchungen sowie Vorkenntnisse wurde das Materialmodell durch die RUB ausgewählt.

6.3.1 Untersuchung des Einflusses von Reibung und kinematischer Verfestigung auf die Hysterese aus Entlastung und Belastung

Sowohl Reibung als auch kinematische Verfestigung führen dazu, dass eine Hysterese entsteht, wenn man nach einer Belastung wieder entlastet und ein zweites Mal belastet. Der Flächeninhalt dieser Hysterese ist eine Energie **WI** und kann als Maß für diese Effekte genommen werden. Er lässt sich mit der elastisch rückgewonnenen Energie **We** bei der Entlastung normieren. Bei rein elastischem Kontakt sollte die Hysterese allein durch Reibung entstehen da es keine kinematische Verfestigung gibt. Außerdem sollte die Stärke der Reibung vom Winkel (Oberflächenwinkel) zwischen Indenterwand und Oberfläche abhängen. Daher wurden Messungen der gleichen Materialien mit verschiedenen Indentern durchgeführt:

- Eine Kugel mit 30µm Radius – bei kleinen Eindringtiefen hat sie den kleinsten Oberflächenwinkel aufzuweisen der mit zunehmender Tiefe stark zunimmt
- Ein Berkovich Indenter – er hat einen effektiven Oberflächenwinkel von 19,7°
- Ein Kegelindeenter mit 60° Öffnungswinkel – der Oberflächenwinkel beträgt ebenfalls 60°

Bei der Kugel wurde als einfachste Option ein effektiver Winkel berechnet, der sich aus plastischer Eindringtiefe (Kontakttiefe) und Kontaktradius ergibt. Je tiefer die Kugel eindringt, umso ungenauer wird die Berechnung, da der effektive Winkel zunehmend überschätzt wird. Für einen einfachen Vergleich ist das jedoch zunächst ausreichend.

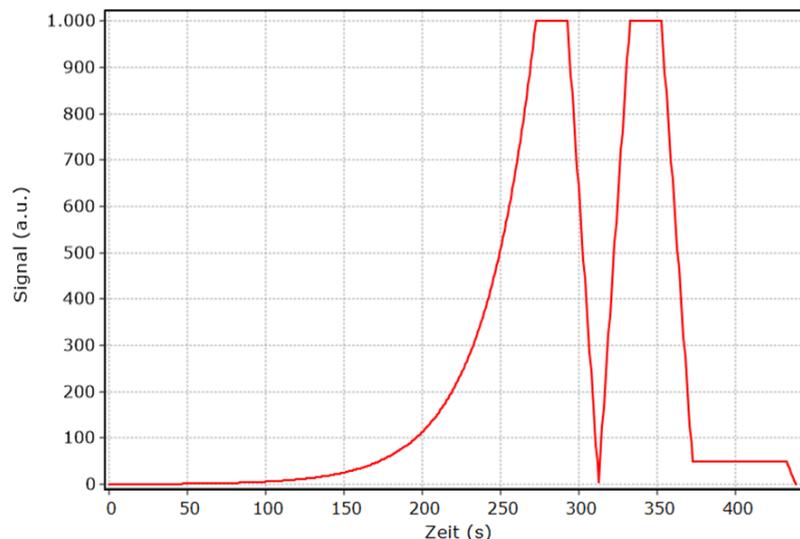


Abb. 1 Beispiel für einen Messablauf mit wiederholter Be- und Entlastung. Die erste Belastung erfolgte mit konstanter Dehnrage

Abb. 1 zeigt ein Beispiel für einen typischen Messablauf und Abb. 2(a) vergleicht die Messkurven verschiedener Indenter auf Stahl. Der wesentlich spitzere Kegelindeenter führt bei gleicher Kraft zu einer viel größeren Eindringtiefe. Abb. 2(b) vergleicht die Hysteresekurven verschiedener Materialien, alle gemessen mit Berkovich Indenter. Man erkennt, dass der Flächeninhalt der Kurven unterschiedlich groß ist.

Der Kugelindeenter mit 30µm Radius wurde verwendet, da dieser Radius gut an den Kraftbereich des 20N Messkopfes angepasst ist, mit dem in diesem Projekt hauptsächlich gearbeitet werden soll. Als optimale Eindringtiefe für die Ermittlung von Spannungs-Dehnungs-Kurven wird, ausgehend von bisherigen Erfahrungen, ein Bereich von 10% - 20% des Kugelradius angesehen. Daher wurden Messungen mit verschiedenen Kräften gemacht, um verschiedene Eindringtiefen und Neigungswinkel zur Oberfläche abzudecken.

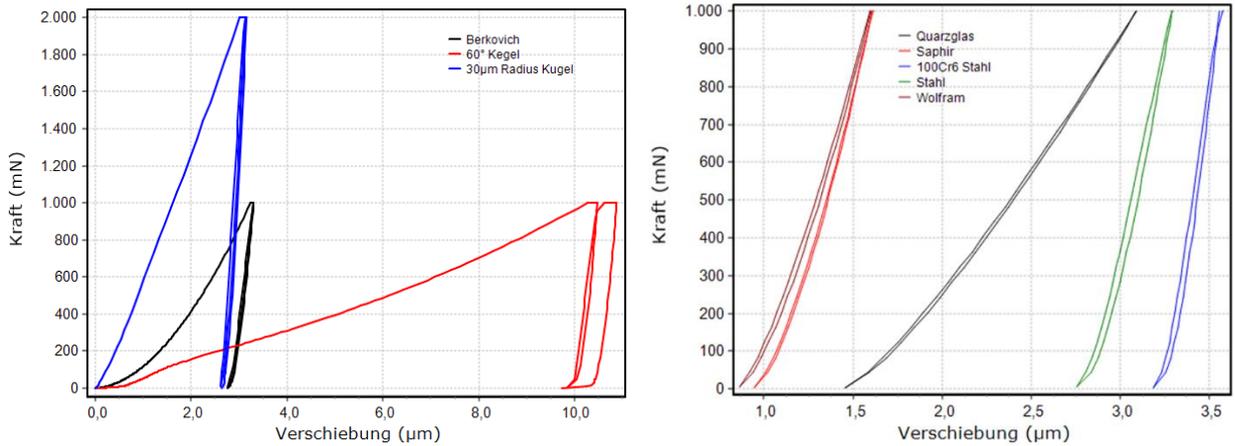


Abb. 2: Vergleich der Messkurven verschiedener Indenter auf Stahl (links) und Vergleich der Hysteresekurven verschiedener Materialien (rechts)

Insgesamt wurden 7 verschiedene Materialien untersucht: Quarzglas, Saphir, 100Cr6 Stahl mit rauher Oberfläche, Kupfer, Zirkon, ein anderer Stahl mit gut polierter Oberfläche und Wolfram. Bei Quarzglas und Saphir kann man annehmen, dass die kinematische Verfestigung annähernd Null ist. Die Hysterese sollte überwiegend durch Reibung entstehen. Im den folgenden Abbildungen werden wird das unterschiedliche Verhalten der Materialien bei den verschiedenen Indenter-Typen dargestellt.

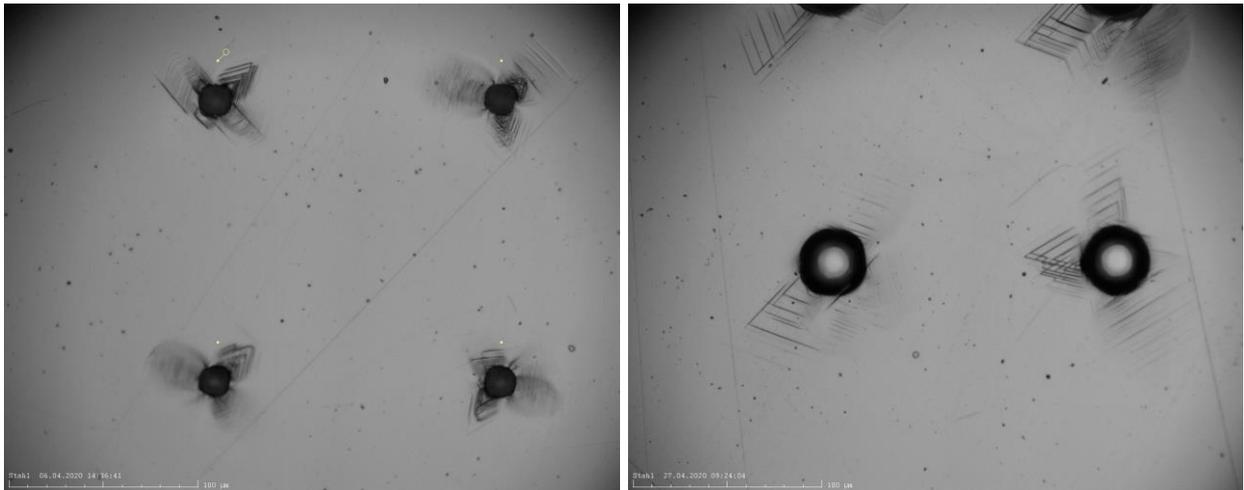


Abb. 3: Eindrücke in den polierten Stahl mit 60° Kegel (links) und Eindrücke in den polierten Stahl mit 30μm Kugel bei einer Kraft von 4N (rechts). Es entstehen richtungsabhängige Versetzungsmuster

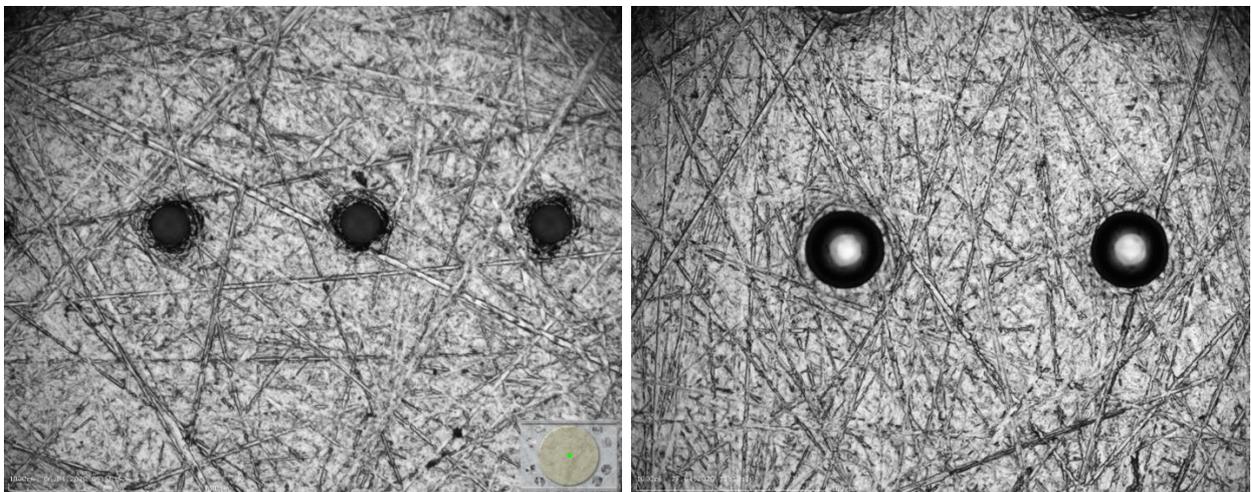


Abb. 4: Eindrücke in den unpolierten 100Cr6 Stahl mit 60° Kegel (links) und Eindrücke in den unpolierten 100Cr6 Stahl mit 30μm Kugel bei einer Kraft von 4N (rechts)

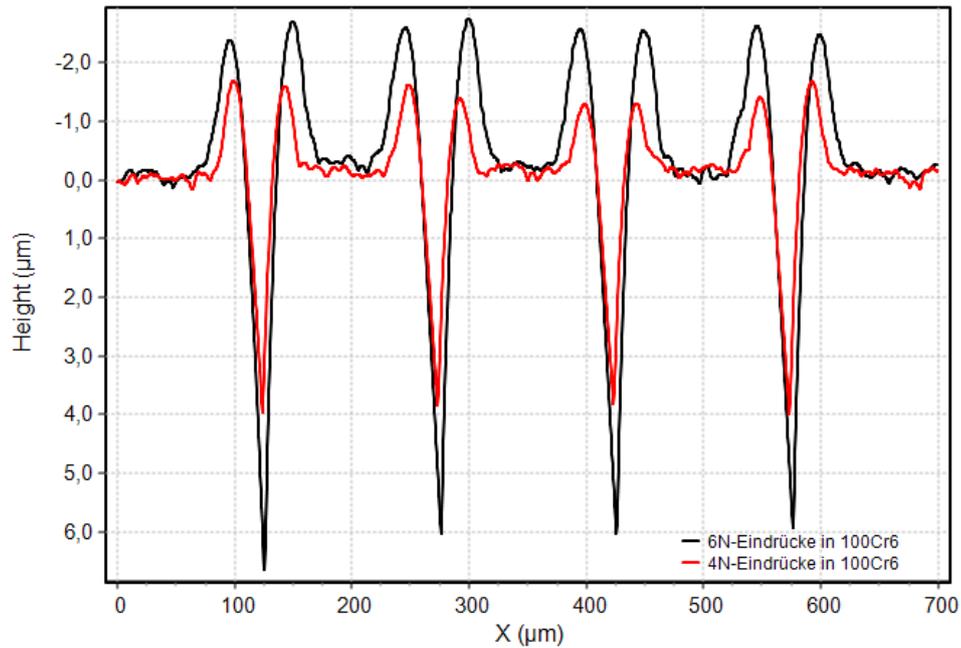


Abb. 5: Oberflächen-Scan mit demselben 30µm Radius Indenter durch 4 in einer Reihe liegende Eindrücke in 100Cr6 Stahl mit Kräften von 4N (rot) und 6N (schwarz). Bei einer Kontakttiefe von 6,45µm bei 4N und 10,3µm bei 6N und mittlere Aufwölbungen von 1,44µm bei 4N und 2,51µm bei 6N ergeben sich Aufwölbungen von 22% und 24%.

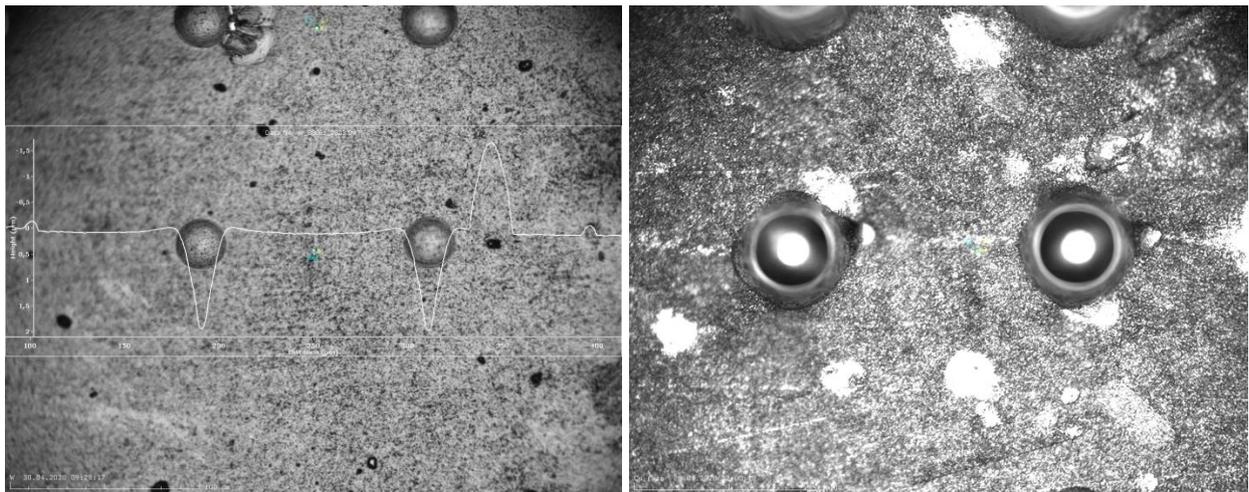


Abb. 6: Links: Eindrücke in Wolfram mit 30µm Kugel bei einer Kraft von 16N. Ein Scan mit derselben Kugel zeigt, dass es kaum Aufwölbung um die Eindrücke gibt. Der Peak rechts kommt von einem Partikel (schwarz); rechts: Eindrücke in Kupfer mit 30µm Kugel bei einer Kraft von 2N. Die starken Aufwölbungen um den Eindruck sind bereits optisch gut zu erkennen.

Beim Vergleich der Hysteresekurven von Berkovich und Kegelindenter, die beide eine selbstähnliche Form mit konstantem Öffnungswinkel haben, wird deutlich, dass der Flächeninhalt der Hysteresekurve mit steigendem Öffnungswinkel bzw. zunehmendem Oberflächenwinkel stark zunimmt. Da die kinematische Verfestigung als Werkstoffeigenschaften bei beiden Indentertypen gleich ist, sollte sich der Unterschied vor allem durch Reibungseffekte ergeben. Hierzu sind jedoch noch weitere Experimente und FEM Rechnungen erforderlich, die im Hauptprojekt erfolgen sollen.

Abb. 8 fasst alle Ergebnisse dieser Untersuchung zusammen. Der effektive Oberflächenwinkel für den Kugelindenter wurde wie oben beschrieben berechnet. Das Verhältnis aus Schleifenenergie W_I und elastisch rückgewonnener Energie W_e wird als Funktion des Oberflächenwinkels dargestellt. Je größer der Winkel (je spitzer der Indenter) umso mehr nimmt das Verhältnis bei allen Materialien zu wobei die Zunahme unterschiedlich stark ist. Die Werte für den Berkovich Indenter fallen etwas heraus und sind durchgängig kleiner als Werte der Kugel für einen analogen effektiven Winkel. Dies deutet auf eine Überschätzung des effektiven Winkels bei der Kugel hin.

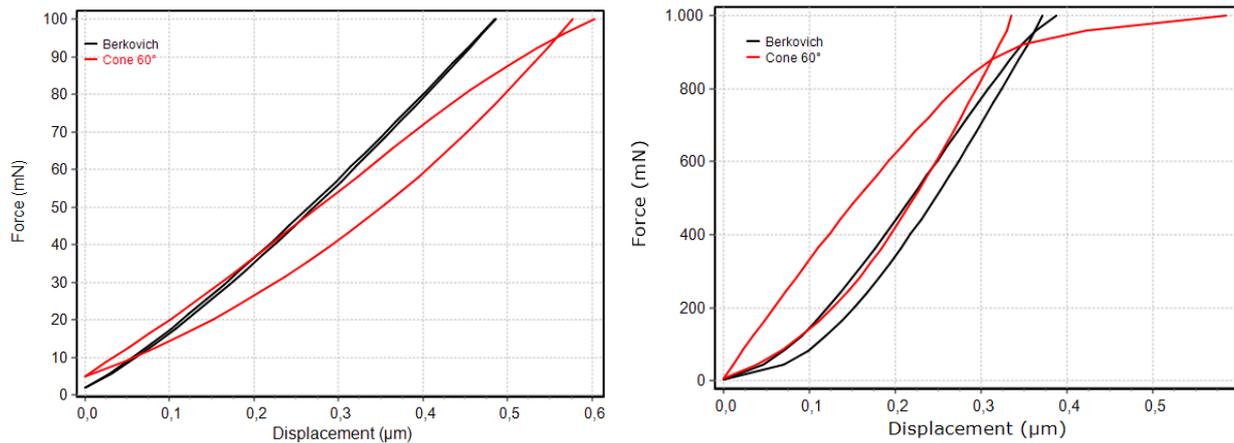


Abb. 7: Vergleich der Hysteresekurven von Quarzglas (links), und 100Cr6 (rechts) jeweils gemessen mit Berkovich- und Kegelindenter

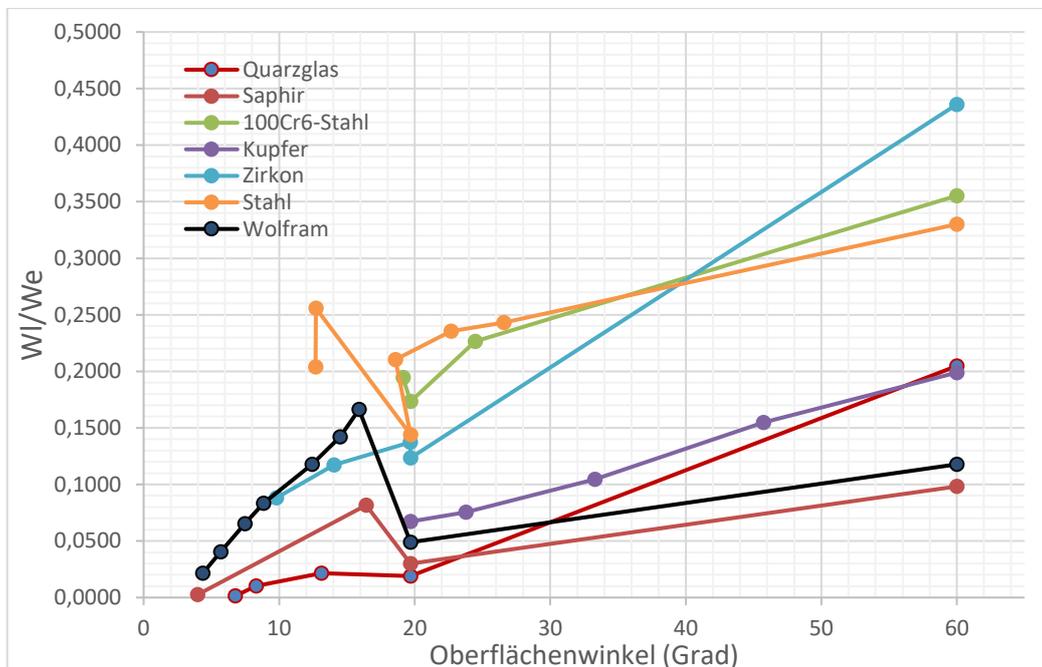


Abb. 8: Einfluss des Indenter-Oberflächenwinkels auf das Verhältnis aus Schleifenenergie und elastisch rückgewonnener Energie für verschiedene Materialien

Der Einfluss der Reibung auf die Kraft-Eindringtiefe Kurven wurde bei der RUB auch mittels FEM-Rechnungen simuliert. Es zeigte sich, dass es notwendig ist, die Reibung in der Simulation zu berücksichtigen, da sich ansonsten unzulängliche Ergebnisse für die kinematische Verfestigung ergeben.

6.3.2 Mechanische Charakterisierung von drei Stahlproben

In einem zweiten Schritt wurden durch die RUB drei Stahlproben zur Verfügung gestellt, von denen bereits Spannungs-Dehnungs-Kurven und in einem Fall auch Ermüdungskurven bei zyklischer sinusförmiger Beanspruchung vorlagen. Dadurch konnten diese Materialien mit bekannten Parametern simuliert werden. Die drei Proben wurden mit

- Austenit 0.1 (0.1% Kohlenstoff)
- Austenit 0.3 (0.3% Kohlenstoff)
- Martensit

bezeichnet, auch wenn die Bezeichnung Austenit nicht ganz korrekt ist. Die Proben lagen als Querschliff eingebettet und poliert vor, so dass eine hohe Oberflächenqualität die Messungen erleichterte.

Bei ASMEC wurden die Proben im Mikro-Bereich umfassend mechanisch charakterisiert. Dazu erfolgten zunächst Messungen mit Vickers-Indenter im Kraftbereich bis 10N da nur mit spitzen Indentern die Härte bestimmt werden kann. Bei Stählen kommt es wie bei vielen anderen Metallen zu einer Aufwölbung um den Eindruck oberhalb der ursprünglichen Oberflächenebene, die als pile-up bezeichnet wird. Dieser pile-up Effekt führt zu einer Unterschätzung der Kontaktfläche zwischen Spitze und Probe, die aus der Eindringtiefe berechnet werden muss, und damit zu einer Überschätzung von Härte und E-Modul. Daher war es zunächst notwendig, die Stärke des pile-up zu bestimmen. Das kann entweder durch einen Scan der Oberfläche nach dem Test durch die Eindruckflächen oder durch einen Vergleich mit der konventionellen Vickershärte erfolgen. Beide Varianten wurden verwendet.

Die Abb. 9 zeigt zwei Vickerseindrücke bei verschiedenen Vergrößerungen für Kräfte von 10N und Abb. 10 den Vergleich des Oberflächenprofils von Scans durch zwei nebeneinanderliegende Vickerseindrücke für alle drei Proben. Die Scanposition lag etwa ein Drittel der halben Diagonallänge oberhalb der Mitte. Dort ist die Aufwölbung höher als direkt an der Ecke des Eindrucks. Bereits an dieser Scan-Grafik sieht man, dass die Aufwölbung bei Probe Austenit 01 am höchsten ist. Der Scan wurde mit der Vickers-Spitze selbst gemacht.

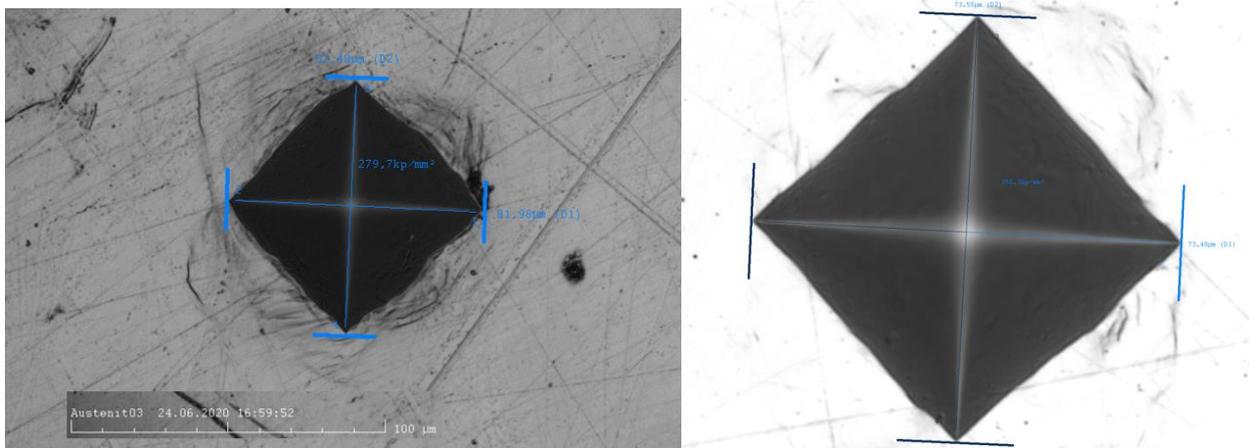


Abb. 9: Vickerseindruck in Probe Austenit01 (die Bezeichnung Austenit03 im Bild ist falsch) mit Messlängen (links) und in Martensit (rechts)

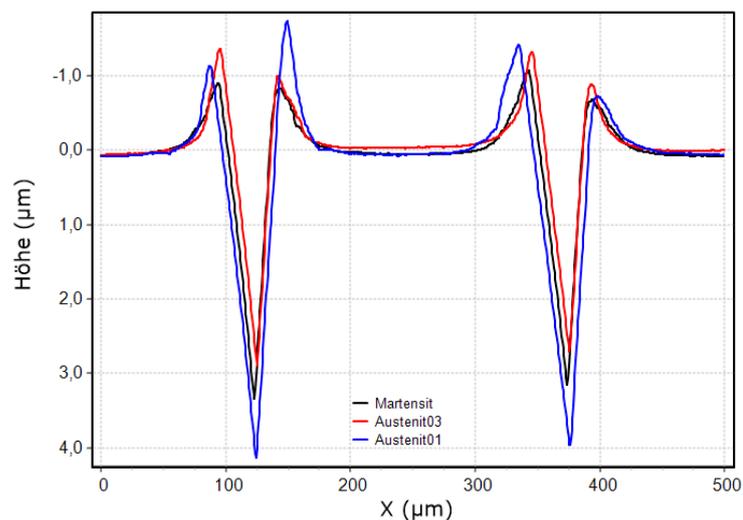


Abb. 10 Vergleich des Oberflächenprofils von Scans durch zwei nebeneinanderliegende Vickerseindrücke für alle drei Proben

Nach der Norm ISO 14577 kann die Eindringhärte in eine Vickershärte umgerechnet werden, die hier mit äquivalenter Vickershärte HVe bezeichnet ist, die dann mit der konventionellen Vickershärte verglichen werden kann. Damit kann ein pile-up Korrekturfaktor berechnet werden mit dem Eindringhärte und Eindringmodul (E-Modul) korrigiert werden können. Der pile-up Korrekturfaktor ist das Verhältnis aus tatsächlicher Kontaktfläche und der Fläche, die aus der gemessenen Eindringtiefe bestimmt wird. Dass eine solche Korrektur sinnvoll ist, erkennt man auch daran, dass sich anschließend ein E-Modul ergibt, das besser mit dem E-Modul aus anderen Messmethoden wie dem Zugversuch vergleichbar ist. Die Ergebnisse für die drei Proben zeigt folgende Tabelle.

Tabelle 2: Ergebnisse für die mechanischen Parameter von drei Stahlproben

Probe	HV kp/mm ²	pile-up Korrektur	HVe kp/mm ²	HIT GPa	dHIT GPa	EIT GPa	dEIT GPa
Austenit 0,1% C	280,0	1,16	281,0	2,99	0,04	206,8	4,1
Austenit 0,3% C	402,0	1,14	401,7	4,28	0,05	222,6	3,9
Martensit	353,8	1,13	354,0	3,78	0,03	211,8	3,1

HV – konventionelle Vickershärte

HVe – äquivalente Vickershärte nach pile-up Korrektur

HIT – Eindringhärte nach pile-up Korrektur

dHIT – statistischer Fehler der Eindringhärte

HIT – Eindringmodul nach pile-up Korrektur

dEIT – statistischer Fehler des Eindringmoduls

Zusätzlich zu den Vickershärtemessungen mit einem zeitlichen Verlauf nach Norm wurden auch tiefenabhängige Messungen von Härte und E-Modul durchgeführt, um zu prüfen, wie homogen die Proben an der Oberfläche sind. Dafür wurde die QCSM-Applikation von ASMEC verwendet, die quasi-kontinuierliche Steifigkeitsmessung. Beim QCSM Modul wird während des Eindringvorgangs die Normalkraft bei bestimmten Schritten für eine Periode von rund 1,4 s konstant gehalten und in dieser Zeit mit einer sinusförmigen Schwingung von 40Hz überlagert. Aus der Amplitude und der Phasenverschiebung der Schwingungen können anschließend Härte und Elastizitätsmodul tiefenabhängig an ein und demselben Probenort ermittelt werden. Eine genauere Erläuterung des Messverfahrens ist unter www.asmec.de zu finden.

Die Maximalkraft bei den Messungen auf allen drei Proben betrug 10N. Pro Probe wurden 10 Messungen durchgeführt und die einzelnen Kurven gemittelt. Durch die Mittelung kann ein statistischer Fehler angegeben werden, der durch die Fehlerbalken in den Abbildungen repräsentiert wird. In der obigen Tabelle wird der Fehler für die Maximalkraft angegeben für die die Härte ermittelt wurde.

Abb. 11 zeigt die Ergebnisse für Härte und E-Modul. Ab etwa 2µm sind die Werte tiefenunabhängig. Es kann von homogenem Probenmaterial ausgegangen werden. Im Bereich bis 2µm sinken Härte und E-Modul etwas ab. Das kann an der Dachkante oder Spitzenverrundung des Vickers-Indenters liegen (der Indenter ist nicht ideal spitz), am Schleif- und Polierprozess bei der Präparation aber auch an der Güte der Kalibrierung der Flächenfunktion der Spitze bei kleinen Eindringtiefen. Um das zu prüfen wurden zusätzlich Messungen mit einem spitzeren Berkovich-Indenter und bei kleineren Kräften gemacht. Die Ergebnisse zeigt Abb. 12(a). Statt eines Härteabfalls zur Oberfläche ist hier ein Härteanstieg zu erkennen. Dies ist auch eher zu erwarten, denn bei Schleif- und Polierprozessen kommt es meist zu einer Kornverfeinerung und zu einer Verfestigung an der Oberfläche. Abb. 12(b) vergleicht der Härtewerte von beiden Indentern. Am Ende der Berkovich-Messwerte stimmen die Kurven hervorragend überein. Dies ist nicht unbedingt zu erwarten denn hier werden Ergebnisse von zwei verschiedenen Indentern, zwei verschiedenen Messköpfen (2N und 20N Messkopf) und zwei verschiedenen Kalibrierungen verglichen. Außerdem ist der zeitliche Verlauf der Messungen unterschiedlich und die Dehnratenabhängigkeit der Materialien spielt eine Rolle.

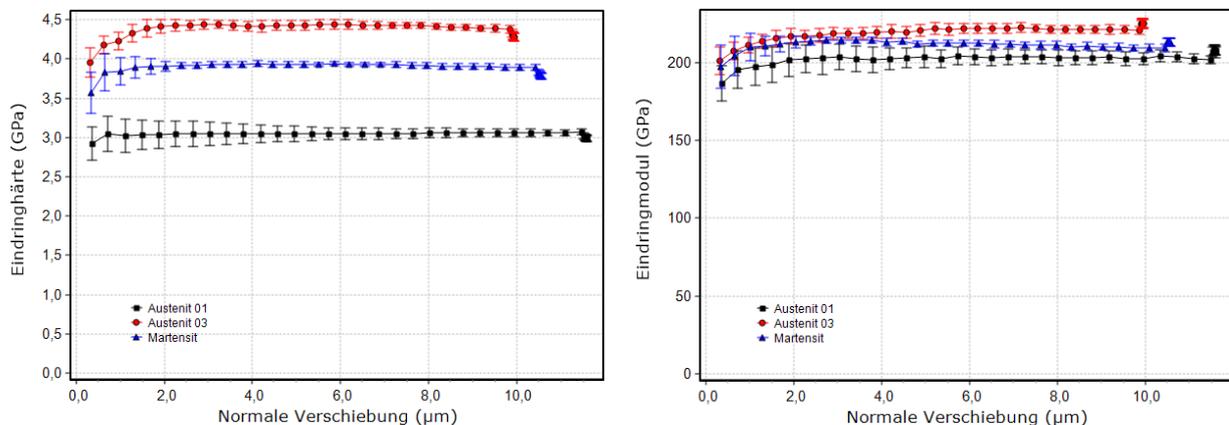


Abb. 11: Vergleich der tiefenabhängigen Eindringhärte(links) und des Eindringmoduls (rechts) aller drei Proben, gemessen bis 10N mit Vickers-Indenter

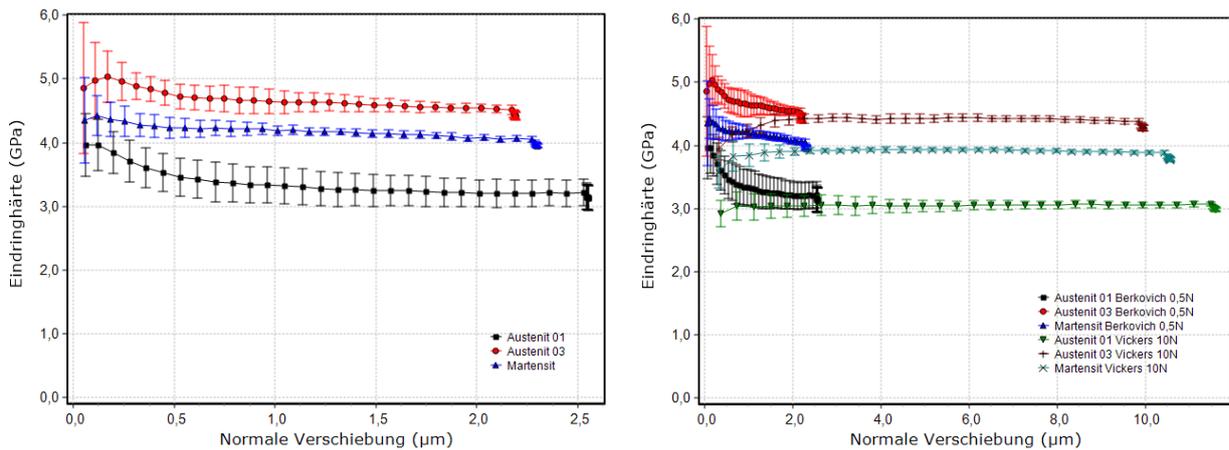


Abb. 12: Vergleich der tiefenabhängigen Eindringhärte aller drei Proben, gemessen bis 0,5N mit Berkovich-Indenter (links) und Vergleich der Härte für beide Kraftbereiche (rechts)

Die E-Modulergebnisse der drei Proben unterscheiden sich etwas. Der Unterschied ist jedoch gering und es ist nicht sicher, dass er tatsächlich vom Material selbst kommt. Die Proben waren in eine weiche Masse eingebettet. Je nach Qualität und Tiefe der Einbettung kann das die Steifigkeit des Systems aus Probe und Einbettmasse beeinflussen, insbesondere bei Kräften über 500mN. Das ist bereits aus früheren Untersuchungen an anderen Proben bekannt. Ein sicherer Nachweis eines E-Modul Unterschieds wäre nur ohne Einbettung zu führen. Darauf wurde jedoch verzichtet, da eine Ungenauigkeit beim E-Modul für die Gesamtergebnisse nicht entscheidend ist.

Um diese Dehnratenabhängigkeit der Materialien zu untersuchen, wurden sogenannte Strain Rate Jump Tests vorgenommen. Diese Messmethode wurde von Verena Maier und Karsten Durst 2011 entwickelt (Maier, et al. 2011) und setzt dynamische Messungen (continuous oder quasi continuous stiffness measurement) voraus. Die Belastung erfolgt dehnraten gesteuert, wobei die Dehnrate abschnittsweise wechselt. In unseren Messungen wurden vier Abschnitte mit Dehnraten von 0,1; 0,01; 0,05 und 0,005 s⁻¹ verwendet. Es ergibt sich dann ein Messablauf wie in Abb. 13 dargestellt. Während der Belastung oszilliert die Spitze mit einer kleinen Amplitude von wenigen nm so dass wieder tiefenabhängig die Härte bestimmt werden kann. An den Stellen, an denen die Dehnrate wechselt, gibt es bei Dehnratenabhängigkeit einen Sprung in der Härtekurve. Der SRS (Strain Rate Sensitivity) Exponent m wird dann berechnet nach der Formel:
$$m = \frac{\Delta(\ln(H))}{\Delta(\ln(\dot{\epsilon}))}$$

Der Exponent streut zwischen den einzelnen Dehnraten sprüngen recht stark und ist insgesamt für alle Proben recht klein. Da auch beim E-Modul Sprünge zwischen den einzelnen Dehnraten-Abschnitten beobachtet wurden, ist zu vermuten, dass die Einbettung der Proben mit ihren viskoelastischen Eigenschaften einen gewissen Einfluss hat. Die Ergebnisse sind in der folgenden Tabelle angegeben und stehen damit für Modellrechnungen zur Verfügung.

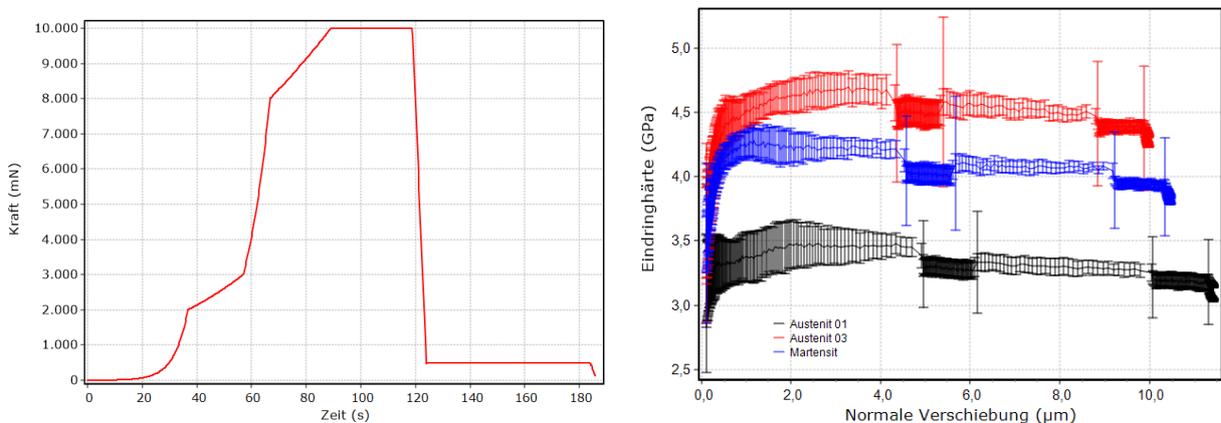


Abb. 13: Zeitlicher Verlauf der Kraftsteuerung bei den Strain Rate Jump Test Experimenten (links) und Härteverlauf über der Eindringtiefe für alle drei Proben (rechts). An den Sprüngen der Härtewerte wurde die Dehnrate geändert.

Tabelle 3: Ergebnisse der Strain Rate Jump Tests für drei Stahlproben

Probe	Härte H	Dehnrates eps	ln (H)	ln(eps)	SRS m
Austenit 0.1% C	3,460	0,1	1,2413	-2,3026	
	3,290	0,01	1,1909	-4,6052	0,0219
	3,340	0,05	1,2060	-2,9957	0,0094
	3,200	0,005	1,1632	-5,2983	0,0186
Mittelwert					0,0166
Austenit 0.3% C	4,680	0,1	1,5433	-2,3026	
	4,510	0,01	1,5063	-4,6052	0,0161
	4,570	0,05	1,5195	-2,9957	0,0082
	4,400	0,005	1,4816	-5,2983	0,0165
Mittelwert					0,0136
Martensit	4,220	0,1	1,4398	-2,3026	
	4,030	0,01	1,3938	-4,6052	0,0200
	4,090	0,05	1,4085	-2,9957	0,0092
	3,950	0,005	1,3737	-5,2983	0,0151
Mittelwert					0,0148

6.3.3 Untersuchung zur zeitabhängigen Materialverhalten von Stählen mit 30µm Kugellindenter

Einen besonderen Schwerpunkt bildeten, wie bereits erläutert, Messungen mit einem Kugellindenter von 30µm Radius, da dieser optimal an den Kraftbereich des Gerätes und die Anforderungen des Projektes angepasst ist. Da in dem geplanten Projekt erstmals ein zeitabhängiges Materialmodell verwendet werden soll, in dem auch das Kriechen des Materials bei Maximallast berücksichtigt werden kann, war es erforderlich speziell hierfür Versuche durchzuführen. Dabei wurde festgestellt, dass das zeitabhängige Materialverhalten Einfluss auf den Schnittpunkt zwischen Entlastungskurve und Wiederbelastungskurve hat. Dieser Schnittpunkt ist jedoch ein wichtiges Kriterium zur Bewertung der kinematischen Verfestigung, wie bereits vorher bei der RUB festgestellt wurde (Sajjad, et al. 2020).

Es wurden daher Experimente mit verschiedenem zeitlichem Verlauf durchgeführt. Dabei wurde zum einen die Kriechzeit variiert, bei der die Maximalkraft konstant gehalten wird und zum anderen die Zeit für Entlastung und Wiederbelastung. Es wurden wiederum zwischen 7 und 10 Einzelmessungen pro Probe und Parametersatz durchgeführt und die Kurven gemittelt. Nur die gemittelten Kurven wurden weiter ausgewertet. Beispiele für vier verschiedene zeitliche Verläufe zeigt Abb. 14. Es wurden jedoch auch weitere Experimente mit noch längeren Zeiten für Entlastung/Wiederbelastung von 120s und 200s durchgeführt. Abb. 15 vergleicht die Kriechkurven von Austenit 03 und Martensit von verschiedenen Experimenten als Tiefenänderung nach Erreichen der Maximalkraft über der Zeit. Von jedem Experiment existieren zwei Kriechkurven, eine vor der ersten Entlastung und eine vor der zweiten Entlastung. Wie zu erwarten stimmen die Kurven der ersten Kriechzeit innerhalb des Fehlerbereichs überein, unabhängig von der Kriechdauer. Dagegen ist die Tiefenänderung beim zweiten Kriechen umso geringer, je langsamer die Ent- und Wiederbelastung erfolgten. Dies ist bei der künftigen Modellierung von Kraft-Eindringtiefe-Kurven zu beachten.

Die Kriechkurven lassen sich mit einer einfachen logarithmischen Funktion $dh = A * \ln(B * t + 1)$ fitten mit dh als Tiefenänderung und t als Zeit. Die Funktion kommt mit nur zwei Fitparametern A und B aus und trotzdem ist die Fitqualität bei allen gemessenen Kriechkurven exzellent. Abb. 27 zeigt ein Beispiel für die längste Kriechdauer von 60s der Martensit-Probe. Die Übereinstimmung ist so gut, dass die Kurven kaum unterschieden werden können. Die Fitparameter sind $A = 0.02923$ und $B = 3.6191$. Eine detaillierte Auswertung des Kriechverhaltens steht noch aus.

Der Vergleich der gemittelten Messkurven von Martensit in Abb. 28 zeigt, dass die maximale Eindringtiefe und die Kurvenform kaum von dem zeitlichen Verlauf der Messung abhängig ist. Die Kurven stimmen recht gut überein. Hier wurden Ent- Belastungszeiten zwischen 10s und 200s verglichen. Bei den längsten Messungen kamen dadurch Gesamt-Messzeiten pro Eindruck von 552s zusammen. Die Ergebnisse zeigen, dass der Schnittpunkt zwischen Entlastungskurve und Wiederbelastungskurve mit zunehmender Zeit immer weiter absinkt. Eine Sättigung wurde auch bei 200s (400s für Ent- und Belastung zusammen) noch nicht erreicht. Dagegen hängt der Schnittpunkt kaum von der Kriechzeit vor der ersten Entlastung ab.

Eine interessante Beobachtung war außerdem, dass bei gleichem zeitlichen Verlauf Schwingungen der Spitze bei Nutzung des QCSM Moduls zu einem Anstieg der Kraft am Schnittpunkt führen. Dies müsste noch detaillierter untersucht werden.

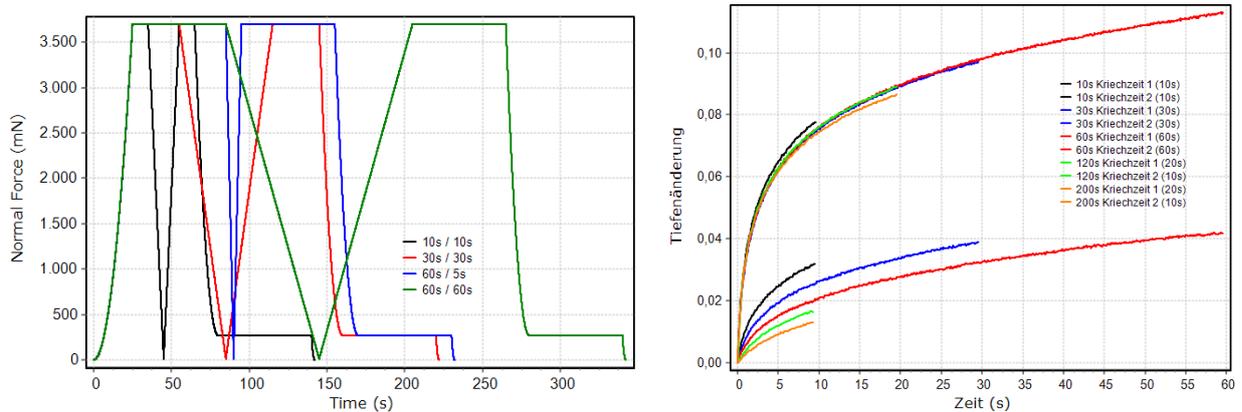


Abb. 14: Beispiele für vier verschiedene zeitliche Verläufe der Experimente mit der 30 μ m Kugel (links). Die erste Zahl in der Legende gibt die Kriechzeit an und die zweite Zahl die Zeit für Ent- und Wiederbelastung (jeweils gleich lang); Rechts: Kriechkurven von Experimenten an Austenit O3 mit verschiedenen Ent-/Belastungszeiten, die als erste Zahl in der Legende angegeben werden. Die zweite Zahl in Klammern ist die Kriechdauer. Zu jedem Experiment gehören zwei Kriechzeiten

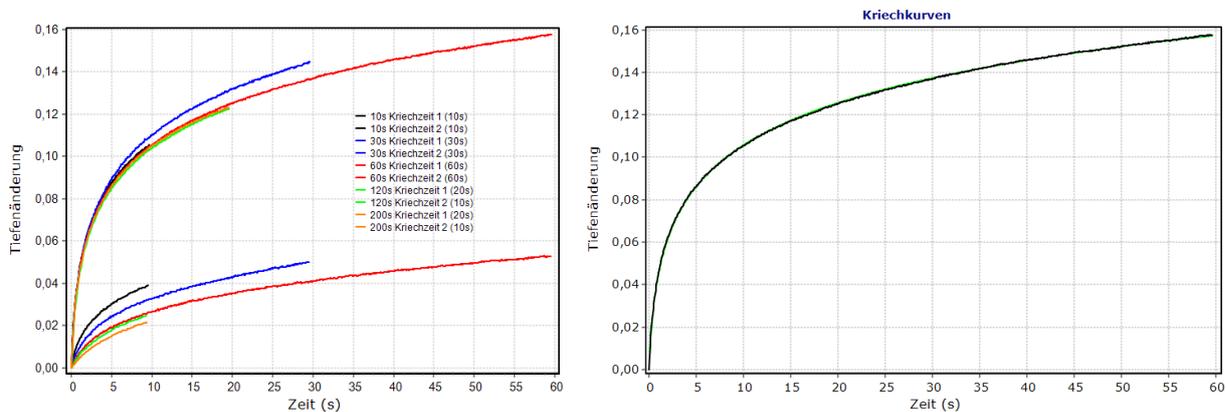


Abb. 15: Links: Kriechkurven von Experimenten an Martensit mit verschiedenen Ent-/Belastungszeiten, die als erste Zahl in der Legende angegeben werden. Die zweite Zahl in Klammern ist die Kriechdauer. Zu jedem Experiment gehören zwei Kriechzeiten. Rechts: Erste Kriechkurve einer Messung an Martensit mit 60s Kriechzeit, gefittet mit logarithmischer Funktion (grün). Die Übereinstimmung ist so gut, dass die Kurven kaum unterschieden werden können.

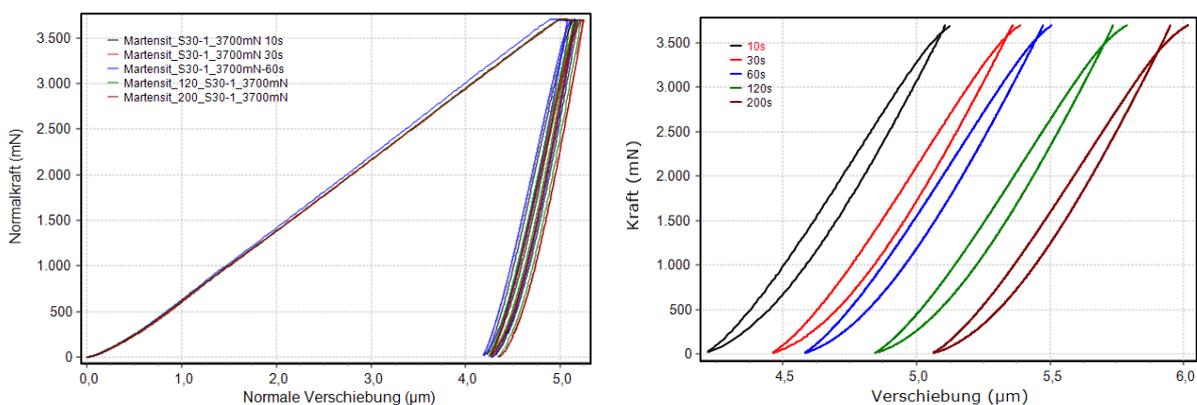


Abb. 16: Links: Vergleich der Kraft-Eindringtiefe-Kurven von Martensit für die verschiedenen Messzeiten; Rechts: Vergleich der Hysteresekurven von Martensit für verschiedene Zeiten der Ent- und Wiederbelastung. Die Kurven sind um 0,1 μ m versetzt. Die Kraft am Schnittpunkt sinkt mit Zunahme der Zeit.

In Abb. 16 sind nur die Hysteresekurven von Martensit leicht versetzt dargestellt. Dabei wird das Absinken der Schnittpunktkraft mit der Zeit für die Schleife sehr deutlich. Die Ergebnisse aller Messungen dieser Untersuchung des Zeitverhaltens der Stahlproben sind in Abb. 17 und Abb. 18 zusammengefasst. Die Schnittpunktkraft nimmt für

alle Proben nahezu linear mit der Zeit von 99% bis auf 90% der Maximalkraft ab. Der Schnittpunkt ist hier in Prozent der Maximalkraft dargestellt. Dagegen nimmt das Energieverhältnis Wl/We nur sehr geringfügig ab.

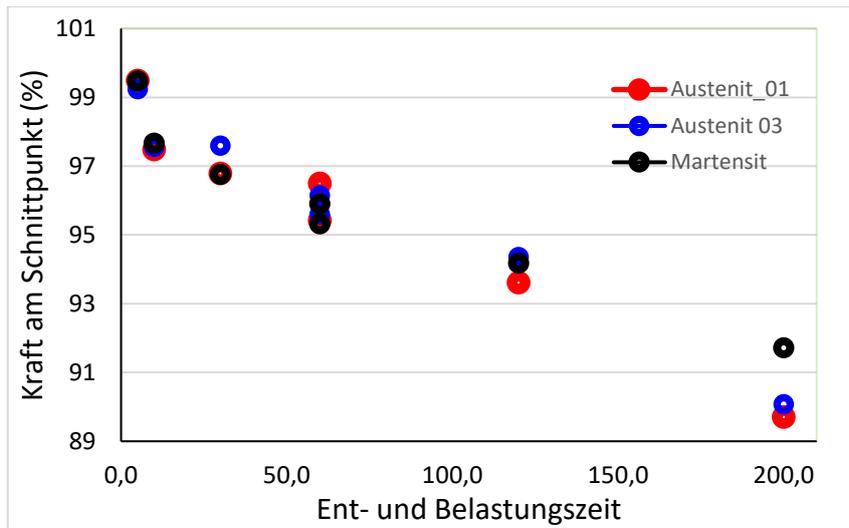


Abb. 17: Abhängigkeit der Kraft am Schnittpunkt in Prozent der Maximalkraft von der Zeit der Ent-/Belastung für die drei Proben

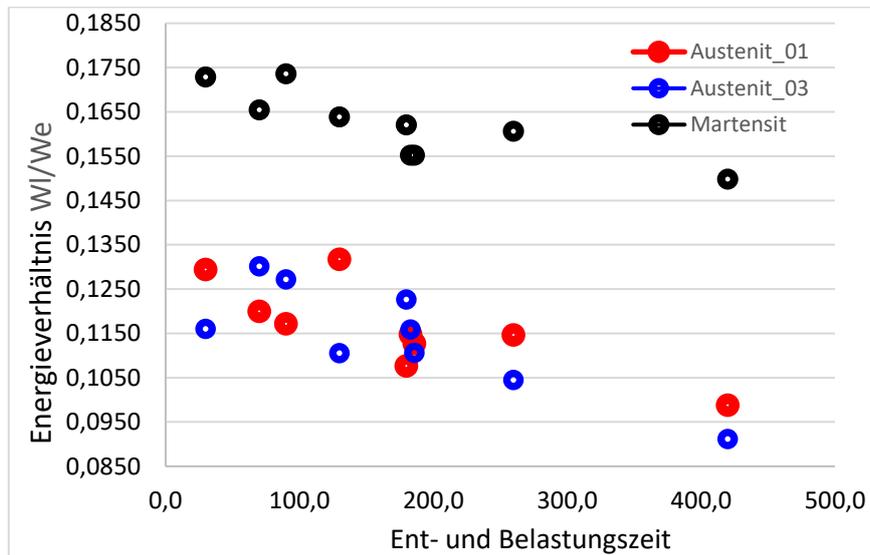


Abb. 18: Abhängigkeit des Energieverhältnisses Wl/We von der Zeit der Ent-/Belastung für die drei Proben

6.3.4 Identifikation von Materialparametern aus dem Eindrucktest mit Hilfe einer inversen Methode

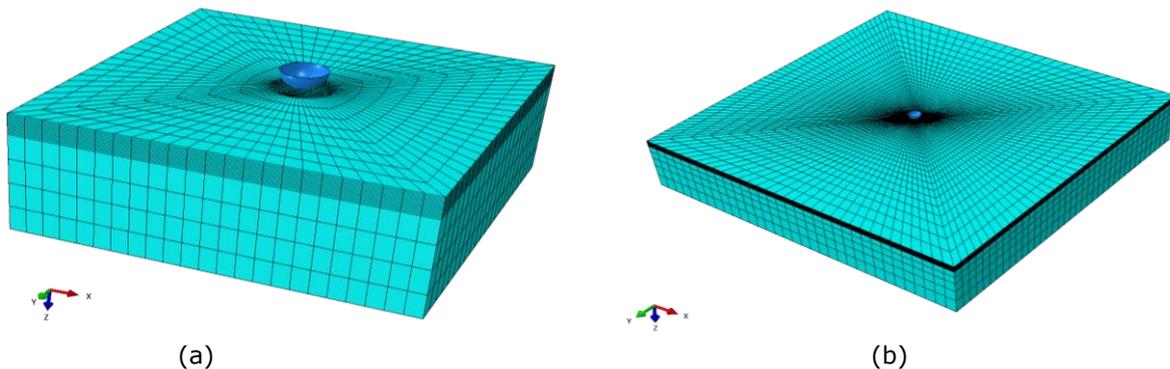


Abb. 19 3D-Indentierungsmodelle zur Untersuchung des Einflusses der Modellgröße auf die Indentierungssimulation (a) Modell A und (b) Modell B.

Das Ziel dieses Arbeitspakets war die Erstellung eines geeigneten Finite-Elemente-(FE)-Modells sowie die Auswahl eines geeigneten Materialmodells, mit denen das Kriechverhalten und die kinematische Verfestigung von Materialien während eines zyklischen Indentierungstests mit einem kugelförmigen Indenter beschrieben werden kann. Weil sich die Modellgröße auf die Berechnungszeit auswirkt, wurde zunächst deren Einfluss auf die Ergebnisse der Indentierungssimulation untersucht. Der Radius des kugelförmigen Indenters, der zunächst als starrer Körper modelliert wurde, betrug wie in dem zu beschreibenden Experiment $30\ \mu\text{m}$. In diesem Zusammenhang wurden zwei 3D-Indentierungsmodelle mit unterschiedlichen Größen erstellt (Modell A: $500 \times 500 \times 200\ \mu\text{m}^3$ und Modell B: $1650 \times 1650 \times 350\ \mu\text{m}^3$). Bei der Vernetzung beider FE-Modelle wurde die gleiche Elementgröße in der Kontaktzone zwischen Festkörper und Indenter gewählt, um diesen Einfluss auf das Ergebnis der Indentierungssimulation möglichst ausschließen zu können (siehe Abb. 19). Ausgehend von den simulierten Kraft-Weg-Kurven, die in Abb. 20 dargestellt sind, ergaben beide Simulationen nahezu identische Ergebnisse, und das kleinere Modell A wurde aufgrund der höheren numerischen Effizienz für weitere Untersuchungen verwendet.

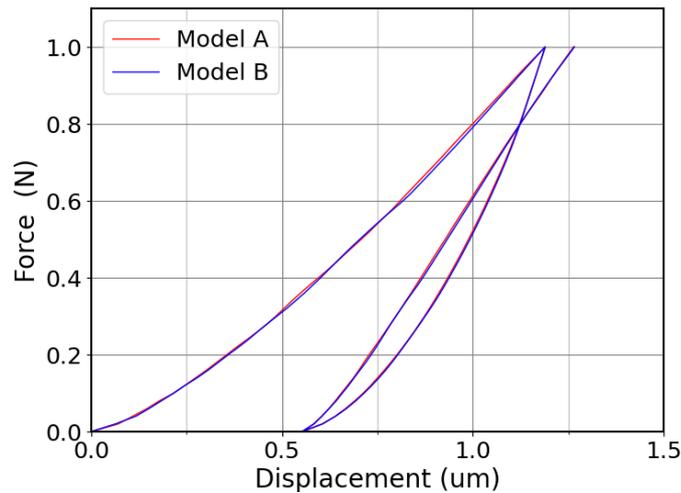


Abb. 20: Einfluss der Modellgröße auf die Kraft-Weg-Kurve (Force-Displacement) bei Indentierungssimulationen mit einem kleineren FE-Modell (Modell A) und einem größeren Modell (Modell B).

Um die Möglichkeit zu untersuchen, die Berechnungszeit zu reduzieren, wurde ein achsensymmetrisches 2D-Indentierungsmodell mit der Größe $8.000 \times 3.500\ \mu\text{m}^2$ simuliert und mit dem 3D-Indentierungsmodell verglichen. Um die starken Verformungsgradienten im Kontaktbereich angemessen zu berücksichtigen, wurde die Elementgröße des Kontaktbereichs im rotationssymmetrischen Modell lokal auf $0,1\ \mu\text{m}$ verfeinert (siehe Abb. 21 (a)). Der Vergleich der Kraft-Weg-Kurve zwischen den Simulationen des achsensymmetrischen 2D-Modells und des 3D-Modells in Abb. 21(b) zeigt, dass beide Kurven sehr gut übereinstimmen. Daher stützten sich weitere Studien auf das achsensymmetrische 2D-Modell, um den numerischen Aufwand für die Identifizierung der Materialparameter zu minimieren.

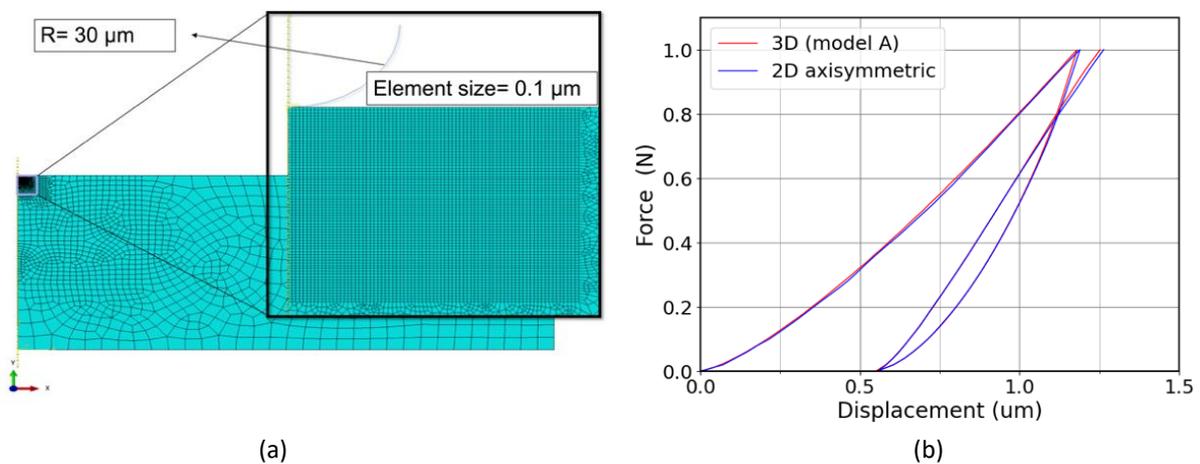


Abb. 21: 2D-achsensymmetrisches Indentierungsmodell und die Netzkonfiguration im Kontaktbereich, (b) Vergleich der Kraft-Weg-Kurve zwischen Simulationen des 2D-achsensymmetrischen Indentierungsmodells und des 3D-Indentierungsmodells.

Das achsensymmetrische 2D-Indentierungsmodell wurde dann verwendet, um den Einfluss des Reibungskoeffizienten auf die Kraft-Weg-Kurve des zyklischen Eindringtests zu untersuchen. In diesem Zusammenhang wurden Indentierungssimulationen mit elf verschiedenen Reibungskoeffizienten (reibungsfrei, 0,1, 0,2, ... 1,0) durchgeführt. Aus dem Vergleich der Kraft-Weg-Kurven in Abb. 22(a) geht hervor, dass der Reibungskoeffizient die Kraft-Weg-Kurve in den Entlastungs- und Wiederbelastungsbereichen beeinflusst. Allerdings besteht nur ein ausgeprägter Unterschied zwischen dem reibungsfreien Fall und den endlichen Reibungskoeffizienten, so dass Werte größer 0,2 in Abb. 22 (a) nicht gezeigt werden. Der Vergleich der Indentierungssimulationen mit den Reibungskoeffizienten von 0,1 und 0,2 zeigt nur minimale Unterschiede in den Kraft-Weg-Kurven. Da sich der Reibungskoeffizient zwischen Diamantspitzen und metallischen Untergründen erfahrungsgemäß im Bereich zwischen 0,1 und 0,3 bewegt wurde mit diesen Simulationen belegt, dass auf eine genauere Bestimmung dieses schwierig zu messenden Wertes verzichtet werden kann, da der Einfluss auf das Indentationsergebnis in diesem Bereich äußerst gering ist. Für die weiteren Simulationen wurde der Wert für den Reibungskoeffizienten auf 0,1 festgelegt.

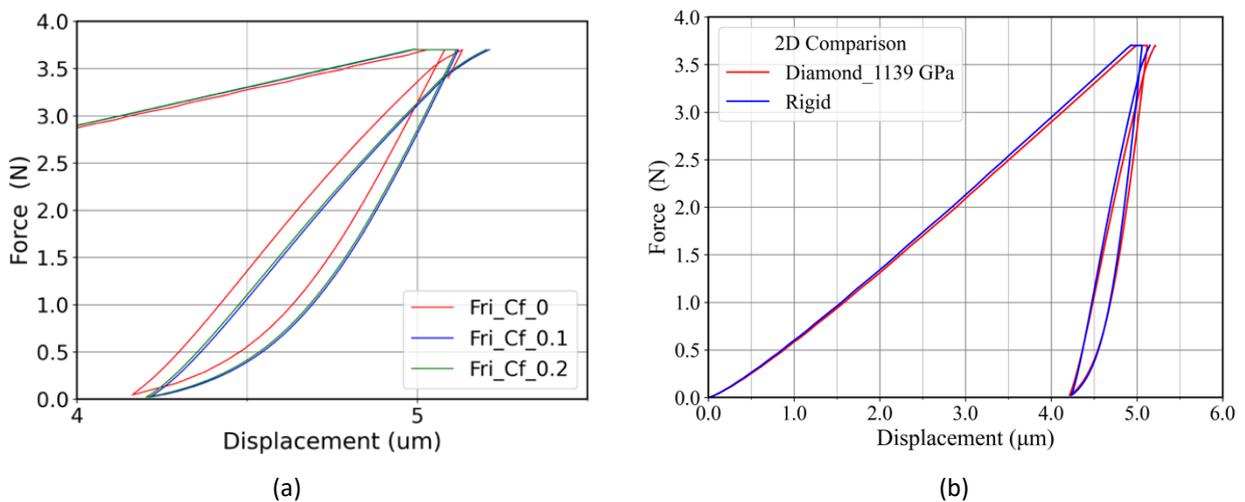


Abb. 22: Vergleich der Kraft-Weg-Kurven der Simulationen des zyklischen Eindringtests mit unterschiedlichen Reibungskoeffizienten, (b) Vergleich der Kraft-Weg-Kurven der Simulationen des zyklischen Indentierungstests mit starrem Indenter und verformbarem Indenter.

Ein Indenter kann während eines tatsächlichen Eindringtests elastisch verformt werden, wenn die Festigkeit der eingedrückten Materialien hoch ist. Um den Eindringvorgang mit einer FE-Simulation nachzubilden, wurde der Einfluss der Indentereigenschaften auf die Indentierungssimulation untersucht. Dabei wurde die Indentierungssimulation, die den Eindringkörper als starren Körper annimmt, mit der Simulation unter Berücksichtigung des verformbaren Diamantindenters verglichen. Das Elastizitätsmodul und die Poissonzahl für Diamant wurden mit 1139 GPa bzw. 0,11 angesetzt. Aus dem Vergleich der Kraft-Weg-Kurven in Abb. 22(b) geht hervor, dass es einen kleinen, aber signifikanten Unterschied zwischen der Indentierungssimulation mit dem starren Indenter und dem verformbaren Indenter gibt, insbesondere die Steigung bei der Entlastung ist bei dem verformbaren Indenter etwas kleiner als bei dem steifen Indenter. Darum wird für die Anwendung des Modells die realistischere Annahme des verformbaren Indenters zugrunde gelegt. Die Rechenzeiten für beide Modellannahmen sind vergleichbar.

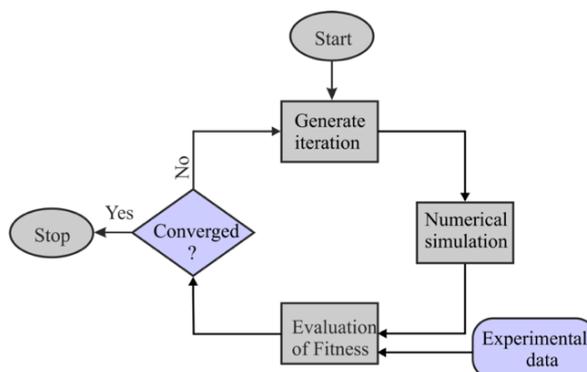


Abb. 23: Optimierungsschleife zur Identifizierung von Materialparametern durch Anpassung von experimentellen und simulierten Werten der Kraft-Weg-Kurve.

Nach der Erstellung eines numerisch effizienten Indentierungsmodells mit einer sehr hohen Güte der numerischen Ergebnisse wurde dieses Modell zur Parametrisierung der Materialparameter mit Hilfe der Methode der inversen Analyse verwendet. Bei der inversen Analyse erfolgt die Bestimmung von Materialparametern in einem iterativen Optimierungsverfahren, wie in Abb. 23 schematisch gezeigt. Zunächst wird mit geschätzten Werten die erste Iteration gestartet und die numerische Simulation der Indentierungsmessung unter den gleichen Bedingungen wie die experimentelle Indentierung durchgeführt, d.h. es wird die gleiche Indentergeometrie verwendet und der gleiche zeitliche Verlauf des Indenterwegs simuliert, um sich den aus der Materialantwort ergebenden Kraft-Weg-Verlauf zu bestimmen. Anschließend wird die Qualität (engl. Fitness) der Übereinstimmung zwischen simulierten und gemessenen Kraft-Weg-Verläufen auf mit dem kommerziellen Optimierungstool LSOPT bewertet. Bei einer schlechten Übereinstimmung werden neue Materialparameter mit einem genetischen Minimierungsalgorithmus Verfahren so bestimmt, dass die Übereinstimmung zwischen Simulationsergebnis und Experiment über einige Iterationen besser wird, bis schließlich ein Konvergenzkriterium erfüllt ist. Bei Erreichen der Konvergenz, ist das inverse Verfahren erfolgreich abgeschlossen und die zuletzt verwendeten Modellgrößen entsprechen den realen Materialparametern. Auf diese Weise können durch die Kombination von Experiment und Simulation die Materialparameter für zeit- und ratenabhängige Plastizität sowie für isotrope und kinematische Verfestigung aus Indentierungsmessungen bestimmt werden. Eine direkte Messung dieser Größen würde einen ungleich höheren experimentellen Aufwand erfordern und könnte nur mit zerstörenden verfahren bewerkstelligt werden, während die Indentierungsmessung quasi-zerstörungsfrei abläuft, da sie nur einen kleinen Eindruck auf der Oberfläche hinterlässt.

Für eine konkrete Durchführung der inversen Methode wurde im Rahmen dieser Vorstudie ein hochfester martensitischer Stahl im vergüteten Zustand ausgewählt. Dieser Stahl ist bereits in anderen Aktivitäten am ICAMS sorgfältig mechanisch charakterisiert worden, so dass die Referenzwerte für die Materialparameter bekannt waren. Als Datenbasis für die inverse Methode dienten Indentierungsmessungen, die bei ASMEC für diese Vorstudie durchgeführt wurden. Um den Zeitaufwand zu reduzieren, wurde die inverse Methode auf die Bestimmung der Materialparameter für die zeit- und ratenabhängige Plastizität sowie die isotrope und kinematische Verfestigung angewandt. Die Streckgrenze, der E-Modul und die Querkontraktionszahl des Werkstoffs wurden als bekannt angenommen, da im Stand der Technik inverse Verfahren basierend auf Indentationsmessungen beschrieben sind, mit denen diese Größen zuverlässig bestimmt werden können, z.B. (Schmaling, et al. 2012).

Zur Beschreibung der isotropen und kinematischen Verfestigung wurde das Chaboche-Materialmodell herangezogen, da es ein konstitutives Werkstoffmodell ist, das recht flexible mathematische Formulierungen sowohl die isotrope wie auch für die kinematische Verfestigung beinhaltet und darum zur Beschreibung zyklischer Belastungen sehr gut geeignet ist. Außerdem ist dieses Modell im Standard-Funktionsumfang der weitverbreiteten kommerziellen Finite-Elemente-Software Abaqus enthalten, so dass die Nutzung dieses Modells für eine breite Anwenderschaft möglich ist. Für das zeitabhängige Verhalten wurde ein Power-Law-Kriechmodell gewählt, das ebenfalls im Abaqus-Standard enthalten ist. Mathematische Details zur Formulierung der beiden Materialmodelle sind weiter unten im Abschnitt zu den Methoden des maschinellen Lernens wiedergegeben, da dort ein direkter Bezug zu einzelnen Größen gegeben ist. Abb. 24(a) vergleicht die experimentelle Kraft-Weg-Kurve und die simulierte Kurve mit den durch die inverse Analyse ermittelten Materialparametern. Die Indentierungssimulation ergab eine befriedigende Übereinstimmung mit dem Experiment, wobei hier bei einer Optimierung des Verfahrens basierend auf den Erfahrungen des Vorprojekts noch Verbesserung möglich erscheinen.

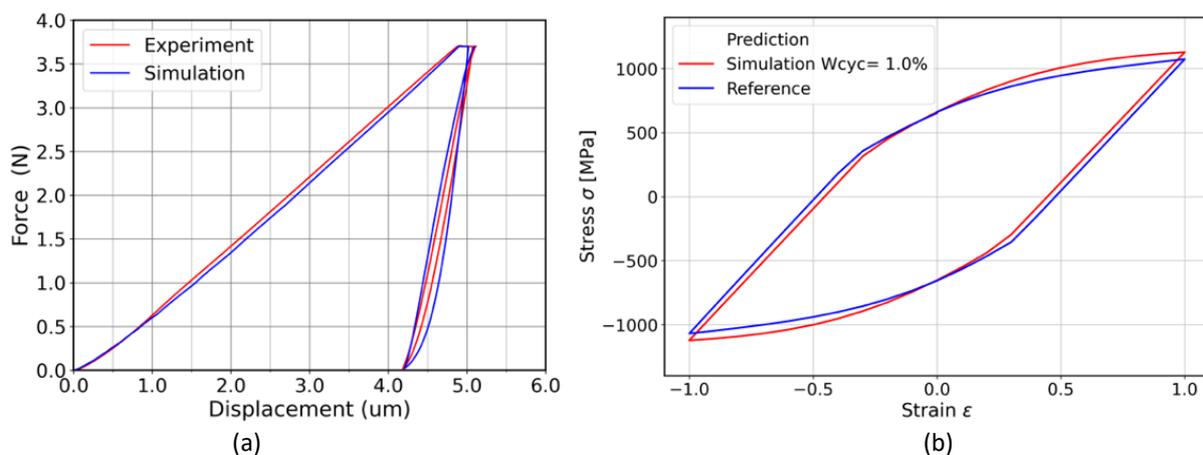


Abb. 24: Vergleich zwischen Experimentreferenzen und Simulationsergebnissen mit identifizierten Materialparametern (a) die Kraft-Weg-Kurven (b) die einachsigen Spannungs-Dehnungs-Hysterese-Kurven.

Die Parameter der zeit- und ratenabhängigen Plastizität konnten ermittelt werden und liegen im Bereich von Literaturdaten liegen. Hier hat sich insbesondere eine starke Korrelation dieser Parameter zum Materialverhalten während der Haltezeit bei Vollast gezeigt, so dass diese Stadien der Versuchsführung von großer Bedeutung für den Erfolg der inversen Analyse sind. Für diese Parameter liegen keine unabhängigen Referenzmessungen vor.

In Bezug auf die Verfestigungsparameter des Chaboche-Modells ergab sich ein direkter Zusammenhang mit dem Kraft-Weg-Verlauf bei der Ent- und Wiederbelastung nach der Haltezeit. Experimentell zeigte sich eine recht starke Abhängigkeit dieser Parameter von der Geschwindigkeit, mit der der Eindruck-Körper verfahren wird. Diese Abhängigkeit kann qualitativ mit dem Modell beschrieben werden und es zeigt sich, dass die aussagekräftigsten Daten bei möglichst niedrigen Geschwindigkeiten gewonnen werden können. Zur Validierung des Verfahrens wurden die ermittelten Materialparameter zur Simulation der zyklischen Spannungs-Dehnungs-Hysterese verwendet, wie sie einem einachsigen Ermüdungsversuch entspricht. Für diese Ermüdungsversuche lagen aus früheren Arbeiten am ICAMS Daten vor. Wie in Abb. 24(b) gezeigt, ergibt sich für diese unabhängige Referenz eine gute Übereinstimmung, mit einem kumulativen relativen Fehler von nur 3 %. Dieses Ergebnis belegt, dass die inverse Analyseverfahren geeignet ist, um Materialparameter aus dem Eindringversuch zu identifizieren.

Im Vorprojekt konnte somit gezeigt werden, dass die inverse Analyse basierend auf experimentellen Daten und FE-Simulationen ein geeignetes Verfahren ist, um die im Projekt ESKEiN beschriebenen Forschungsarbeiten durchzuführen. Zusammenfassend wurden in diesem Arbeitspaket des Vorprojekts folgende Arbeitsergebnisse und Schlussfolgerungen erreicht:

1. Erstellung eines FE-Modells für Kugeleindrücke auf ebenen Oberflächen unter Berücksichtigung der Reibung zwischen Werkstoff und Eindruck-Körper
2. Die Nutzung eines Materialmodells mit zeit- bzw. ratenabhängiger Verformung in Verbindung mit isotroper und kinematischer Verfestigung erlaubt eine hinreichend präzise Beschreibung experimenteller Kraft-Weg-Kurven in FE-Rechnungen.
3. Die Bestimmung der Parameter für das zeit- und ratenabhängige Modell sowie für isotrope und kinematische Verfestigung durch ein inverses Verfahren auf Basis realer Versuchsdaten ist möglich. Haltezeiten und Ent-/Wiederbelastungsphasen sind notwendig, um diese Parameter zu bestimmen.
4. Mit den durch die inverse Methode bestimmten Materialparametern konnten Spannungs-Dehnungs-Hysteresen aus Standard-Ermüdungsversuchen für einen martensitischen Stahl erfolgreich vorhergesagt werden.
5. Damit konnte ein geeignetes Materialmodell für die weitere Anwendung identifiziert und getestet werden.

6.4. Auswahl der Methode maschinellen Lernens

In diesem Arbeitspaket des Vorprojekts wurde die Eignung von Verfahren des maschinellen Lernens (ML) untersucht, um das Indentierungsverhalten von Werkstoffen mit gegebenen Materialparametern vorherzusagen. Trainiert wurden die ML-Verfahren mit Daten, die aus Ergebnissen von FE-Simulationen der Indentierung gewonnen wurden, so dass der Zusammenhang zwischen Materialparametern und Indentierungsergebnissen bei den Trainingsdaten bekannt war. Das Ziel dieses Arbeitspakets war es, geeignete ML-Verfahren für das ESKEiN-Projekt auszuwählen. Zunächst wurden Serien von Indentierungssimulationen mit verschiedenen Sätzen von Materialparametern durchgeführt, um genügend Trainingsdaten zu erzeugen. In diesem Zusammenhang wurde das achsensymmetrische 2D-Eindringungsmodell aus dem vorherigen Arbeitspaket mit dem Chaboche-Verfestigungsmodell und dem Power-Law-Kriechmodell verwendet. Zum besseren Verständnis der verwendeten Materialmodelle werden deren mathematische Beschreibungen hier angegeben. Die Fließfunktion lautet

$$f = \sqrt{\frac{3}{2}(\sigma' - \kappa):(\sigma' - \kappa)} - R - \sigma_0, \quad (1)$$

wobei ein negativer Wert von f angibt, dass elastisches Materialverhalten vorliegt. Plastische Verformung setzt bei einem Wert von $f = 0$ ein, und die plastische Dehnung kann aus dem Gradienten der Fließfunktion bestimmt werden. Die Größen σ' , κ , und σ_0 sind die deviatorische Spannung, die Rückspannung und die anfängliche Fließspannung. Für die isotrope Verfestigung R gilt die Beziehung

$$R = Q(1 - e^{-b\varepsilon_{eq}}). \quad (2)$$

Dabei ist Q die maximale isotrope Verfestigung oder – für negative Werte – Entfestigung, die der Werkstoff erreichen kann, und b bestimmt die Rate, mit der der Maximalwert erreicht wird. Die kinematische Verfestigung durch die Rückspannung κ ist gegeben als

$$\kappa = \sum_i^2 \kappa_i \quad \text{mit} \quad d\kappa_i = \frac{2}{3} C_i d\varepsilon_p - g_i \kappa_i d\varepsilon_{eq}, \quad (3)$$

wobei C_i die kinematischen Verfestigungsmodulare darstellen, während g_i die Abnahmerate des zugehörigen Moduls in Bezug auf das plastische Dehnungskrement $d\varepsilon_p$ beschreiben. Das Power-Law-Kriechmodell wird durch

$$\dot{\varepsilon}^{cr} = A_0 \left(\frac{\sigma}{\sigma_0} \right)^n \left(\frac{t}{t_0} \right)^m \quad (4)$$

beschrieben, wobei σ die von-Mises-Spannung ist und t ist die Zeit. σ_0 ist die anfängliche Fließspannung und t_0 ist eine zu bestimmende charakteristische Zeit für die Verformung. Diese Parameter wurden mit den festen Werten $\sigma_0 = 750$ MPa und $t_0 = 100$ s angenommen. A_0 , n , und m sind weitere Materialparameter, die die Zeit- und Ratenabhängigkeit der plastischen Verformung definieren und die wie alle Materialparameter im Rahmen dieser Studie systematisch in einem sinnvollen Bereich variiert wurden, wie in Tabelle 4 zusammengefasst. Aus diesem Parameterbereich wurden 1000 Parametersätze zufällig generiert. Mit den so definierten Materialparametersätzen wurden entsprechende Indentierungssimulationen mit dem FE-Modell durchgeführt und die sich ergebenden Kraft-Weg-Kurven und Oberflächentopografien ausgewertet.

Tabelle 4: Übersicht über den Bereich der variierten Materialparameter.

Parameter	Q (MPa)	b	C_1 (GPa)	g_1
Wert	-350 ... -175	0.5 ... 25	125 ... 225	350 ... 550
Parameter	C_2 (GPa)	A_0	n	m
Wert	3.0 ... 5.5	10 ⁻⁷ ... 10 ⁻⁵	1.75 ... 3.00	-0.95 ... -0.5

Aus den Simulationen wurden charakteristische Größen für das Indentierungsverhalten ermittelt, wie in Abb. 25 schematisch dargestellt. Aus einer Kraft-Weg-Kurve (siehe Abb. 25(a)), wurden 6 charakteristische Größen definiert, nämlich Kraft-Weg-(FD)-Steigung, Kriechlänge (clength), tiefster Punkt der Hysterese (Hyslowest), Hysteresebreite (Hyswidth), Schnittpunkt (xintersect) und maximale Eindringtiefe (xmax). Die F-D-Steigung ist die durchschnittliche Steigung, die aus der anfänglichen Belastung berechnet wird; clength ist die Eindringtiefe, die während der Haltezeit bei der maximalen Kraft erreicht wird; Hyslowest ist die Eindringtiefe, die sich nach der Entlastung des Eindringkörpers ergibt; Hyswidth ist die maximale Breite der Hystereseschleife, die bei Ent- und Wiederbelastung des Eindringkörpers auftritt; xintersect ist der Punkt, an dem sich die Ent- und Wiederbelastungskurve schneiden. Die maximale Eindringtiefe xmax entspricht der tiefsten Position des Eindruck-Körpers nach der Wiederbelastung. Aus der Oberflächentopographie (siehe Abb. 25(b)) wurden 4 weitere charakteristische Größen definiert, nämlich verbleibende Eindringtiefe, Aufwurfhöhe, Aufwurfort (xpile-up) und Aufwurfbreite. Die Aufwurfhöhe ist die maximale Höhe der Materialaufwurfs (engl. pile-up), während xpileup die x-Koordinate des Maximums ist. Die Aufwurfbreite ist definiert als die Breite bei 40% der maximalen Höhe.

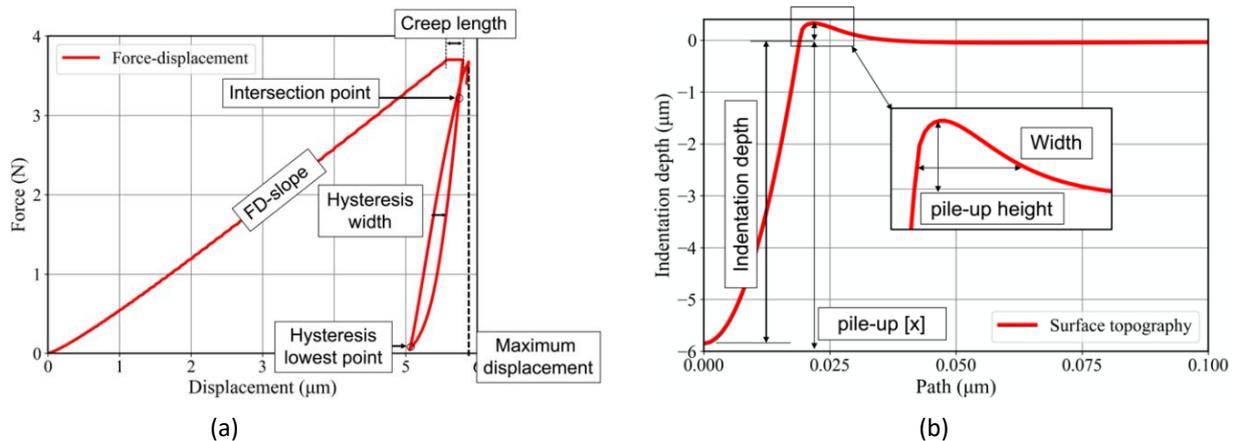


Abb. 25: Schematische Skizzen zur Beschreibung der aus den Simulationen ausgewerteten Eindringcharakteristik, (a) die Kraft-Weg-Kurve und (b) die Oberflächentopographie.

Die Idee hinter der Definition dieser charakteristischen Indentierungsgrößen ist, dass diese Größen die gesamte Information über das Indentierungsergebnis enthalten, die auch in Aufwurfgeometrie und Kraft-Weg-Kurve enthalten sind. Diese Größen lassen sich gleichermaßen leicht im Experiment und in der Simulation bestimmen und erlauben dadurch einen direkten quantitativen Vergleich der Ergebnisse.

Der Hintergrund ist, dass ML-Verfahren nur einzelne Größen als Ergebnis liefern, aber keine vollständigen Kraft-Weg-Kurven oder Aufwurftopologien und dass über die Definition dieser charakteristischen Größen die vollständige Beschreibung der Indentierungsergebnisse mit ML-Verfahren möglich ist. Außerdem besteht die Erwartung, dass ein inverses Verfahren zur Bestimmung der Materialparameter auf Basis dieser charakteristischen Größen möglich ist. Darum ist ein Ziel dieses Arbeitspakets ML-Verfahren so zu trainieren, dass sie diese charakteristischen Größen aus den Materialparametern vorhersagen können.

Diese Vorhersage ist dann numerisch sehr viel effizienter als die Durchführung von FE-Simulationen der Indentierung, so dass die trainierten FE-Verfahren als numerisch effiziente Ersatzmodelle für die inverse Analyse zur Bestimmung der Materialparameter dienen können. Die Rechenzeitersparnis ist dabei ganz erheblich, da die Dauer für eine FE-Simulation im Bereich von Stunden liegt, während die Auswertung eines trainierten ML-Verfahrens innerhalb von Millisekunden erfolgt. Der Aufwand für die Durchführung der inversen Analyse sinkt dadurch von ca. 1-2 Tagen auf Sekunden.

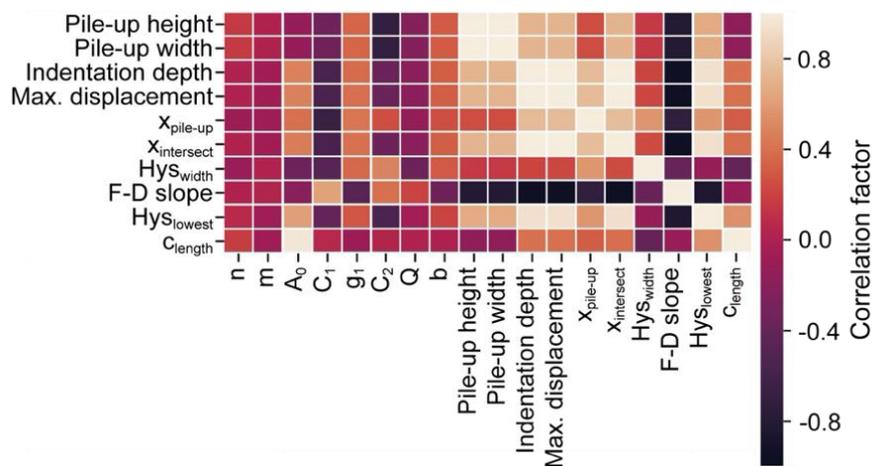


Abb. 26: Die Korrelationsbeziehungen, dargestellt als Heatmap, die die Korrelationen zwischen den Materialparametern und den charakteristischen Indentierungsergebnissen anzeigt.

Um ein besseres Verständnis dafür zu bekommen, wie sich die Materialparameter auf die Simulation der Indentierung auswirken, wurde die Korrelation zwischen den Materialparametern und den charakteristischen Indentierungsergebnissen in Form der in Abb. 26 dargestellten Heatmap analysiert. Der Wert des Korrelationsfaktors ist durch einen Farbcode wiedergegeben, wobei Weiß den Korrelationsfaktor von 1 (starke positive Korrelation) und Schwarz den Korrelationsfaktor von -1 (starke negative Korrelation) beschreibt; Rot steht für den Korrelationsfaktor von 0 (keine Korrelation).

Durch die Analyse der Heatmap in Abb. 26 lassen sich mehrere Korrelationen zwischen Materialparametern und Indentierungsgrößen erkennen. Zum Beispiel erhöht ein größerer Wert des Vorfaktors der zeitabhängigen Verformung A_0 die Kriechlänge (clength), die verbleibende Eindringtiefe, die maximale Eindringtiefe, die Position des Aufwurfs ($x_{pile-up}$), den Schnittpunkt ($x_{intersect}$) und den niedrigsten Punkt der Hysterese (Hys_{lowest}). Ein höherer Wert des Verfestigungsparameters g_1 vergrößert die Aufwurfhöhe, die Eindringtiefe, die maximale Eindringtiefe und die Hysteresebreite (Hys_{width}). Außerdem vergrößern sich dadurch $x_{pile-up}$ und $x_{intersect}$. Der Verfestigungsmodul C_1 korreliert positiv mit der F-D-Steigung und negativ mit der verbleibenden und der maximalen Eindringtiefe sowie mit $x_{pile-up}$ und $x_{intersect}$. Der zweite Verfestigungsmodul C_2 hat einen negativen Einfluss auf die Aufwurfhöhe, die -breite und den tiefsten Punkt der Hysterese (Hys_{lowest}). Die aus der Heatmap-Analyse gewonnenen Erkenntnisse unterstützten die Identifizierung von möglichst stark mit dem Indentierungsergebnis korrelierenden Materialparametern, die dann als Eingangsgrößen (engl. features) für die ML-Verfahren dienen. Nur wenn die wichtigsten Eingangsgrößen bekannt sind, können die ML-Verfahren erfolgreich trainiert werden, das Indentierungsergebnis zuverlässig vorherzusagen. Materialparameter, die das Ergebnis nicht oder nur schwach beeinflussen werden nicht als Eingangsgrößen herangezogen.

Als aussichtsreiche ML-Verfahren wurden die Support-Vektor-Regression (SVR) und die neuronalen Netze (NN) identifiziert. Als Referenzmethode diente die Random-Forest-(RF)-Regression, die ein sehr robustes ML-Verfahren darstellt, das nur wenig von den Metaparametern für das Training abhängt und darum einen Mindeststandard für die Qualität anderer ML-Verfahren darstellt. Die aus den FE-Simulationen der Indentierungsergebnisse für 1000 Materialdatensätze erhaltenen Daten werden in Trainings- (75%) und Testdatensätze (25%) aufgeteilt. Zur Identifizierung von Hyperparametern, die das Training der ML-Verfahren kontrollieren, wurde die Grid-Suche angewendet, die alle Kombinationen von Hyperparametern in einem Suchraum berücksichtigt. Auf Basis dieser Daten wurden für alle charakteristischen Indentierungsgrößen ML-Modelle trainiert, deren Güte im Folgenden bewertet wird.

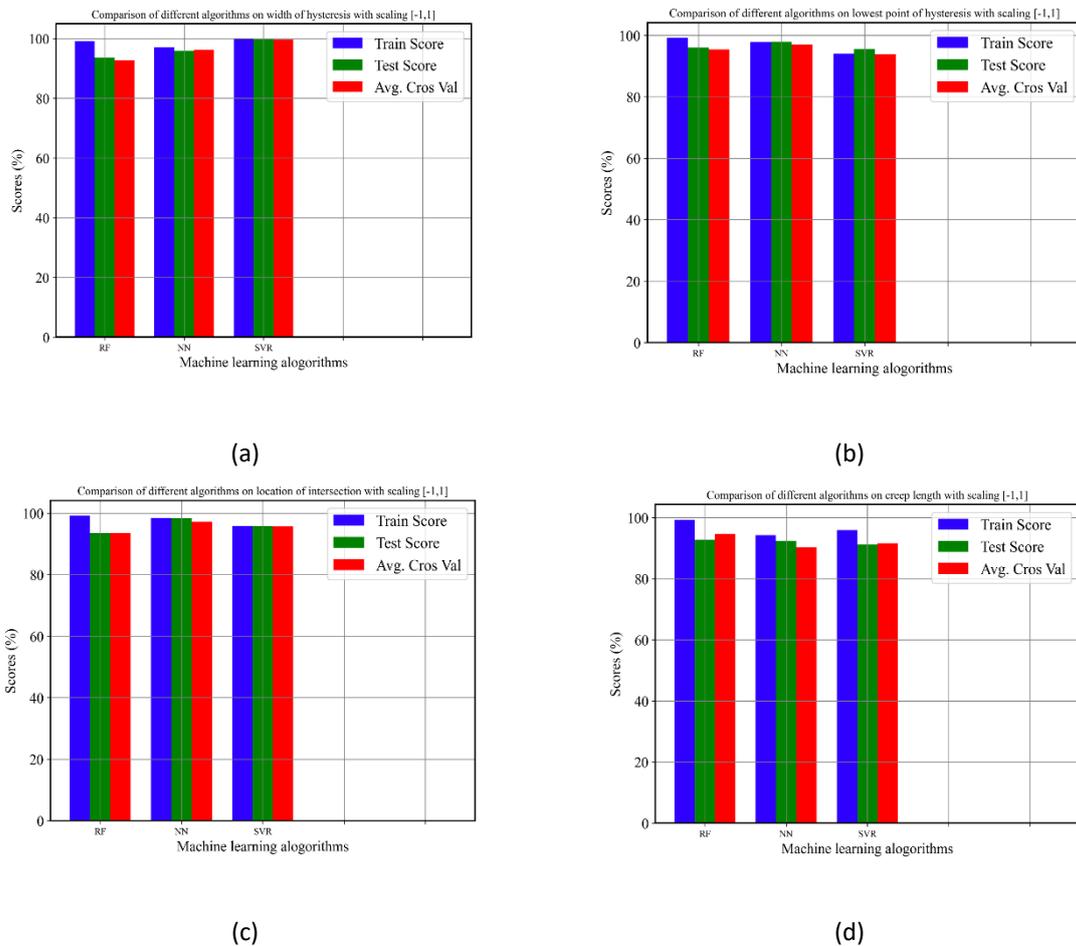


Abb. 27: Der Leistungsvergleich der einzelnen ML-Verfahren für die Vorhersage ausgewählter charakteristischer Indentierungsgrößen: (a) Hysteresebreite Hyswidth, (b) niedrigster Punkt der Hysteresese Hyslowest, (c) Schnittpunkt xintersect und (d) Kriechlänge clength.

Alle trainierten ML-Modelle waren in der Lage, alle charakteristischen Größen mit einer Genauigkeit von über 90% vorherzusagen. In diesem Bericht liegt das Hauptaugenmerk auf den Größen, die das kinematische Verhalten und das zeitabhängige Verhalten widerspiegeln, nämlich die Hysteresebreite Hyswidth, den niedrigsten Punkt der Hysteresese Hyslowest, den Schnittpunkt xintersect und die Kriechlänge clength. Der Leistungsvergleich der einzelnen ML-Modelle für die Vorhersage dieser ausgewählten Größen ist in Abb. 27 dargestellt, in der die Trainings-, Test- und durchschnittlichen Kreuzvalidierungsergebnisse jedes trainierten ML-Modells wiedergegeben sind. Es ist erkennbar, dass die Qualität der Ergebnisse der verschiedenen Verfahren vergleichbar ist und sowohl das NN-Verfahren wie auch das SVR-Verfahren gleich gut oder sogar besser sind wie die RF-Referenzmethode.

Ein weiterer kritischer Test der Qualität der ML-Modelle ist deren Anwendung auf gänzlich unbekannte Materialdatensätze, die weder als Trainings- noch als Testdaten verwendet wurden. Die Indentierungsergebnisse für diese unbekanntes Materialparameter wurden separat mit der FE-Simulation bestimmt. Tabelle 5 fasst die von den trainierten ML-Modellen vorhergesagten Indentierungsergebnisse zusammen und vergleicht die relativen Fehler in den Vorhersagen, die über die Beziehung:

$$\text{Rel. Fehler} = | 1 - \text{ML-Ergebnis} / \text{FE-Ergebnis} |$$

definiert sind. Aus Tabelle 5 geht hervor, dass sowohl NN als auch SVR für diese unbekanntenen Daten besser abschneiden als das trainierte RF-Modell. Außerdem ist ersichtlich, dass der maximale Fehler der SVR-Methode unter 10% bleibt, während die anderen ML-Verfahren teilweise deutlich höhere Fehler produzieren, was eine Konsequenz aus der sog. Überanpassung (engl. overfitting) ist. In der Gesamtsicht ergibt sich, dass die SVR-Methode die robusteste Methode ist, die im Mittel vergleichbare bis geringere Abweichungen zeigt und deren maximale Abweichung sogar deutlich geringer ist als die der anderen Verfahren. Aus der Literatur ist außerdem bekannt, dass diese Methode mit weniger Trainingsdaten auskommt als das NN-Verfahren. Ein weiterer Vorteil der SVR-Methode ist, dass sie sich sehr leicht in einen eigenständigen Computercode übertragen lässt, da die Auswertung des trainierten Modells lediglich einer Summe über eine Gauss-artige Kernfunktion für alle Support-Vektoren entspricht, die das Ergebnis des Trainingsprozesses sind. Somit ergibt sich aus dieser Vorstudie die SVR-Methode als das am besten geeignete ML-Verfahren für die Vorhersage der Indentationsergebnisse aus Materialparametern.

Tabelle 5: Vergleich zwischen den durch FE-Simulationen berechneten Indentierungsergebnissen und den Ergebnissen der trainierten ML-Modelle. Die relativen Fehler sind in den grau hinterlegten Zeilen angegeben.

	Hyswidth (µm)	Hyslowest (µm)	xintersect (µm)	clength (µm)
FE-Ergebnis	0.360	4.407	5.411	0.052
Ergebnis NN	0.353	4.686	5.572	0.062
Rel. Fehler NN	2.06%	6.32%	2.97%	18.14%
Ergebnis SVR	0.330	4.610	5.461	0.054
Rel. Fehler SVR	8.37%	4.60%	0.91%	2.84%
Ergebnis RF	0.332	4.454	5.230	0.044
Rel. Fehler RF	7.82%	1.07%	3.35%	14.26%

Zusammenfassend haben sich im Vorprojekt folgende Erkenntnisse ergeben:

1. Das Training von Methoden des maschinellen Lernens (ML) mit Hilfe von Daten aus FE-Rechnungen von Eindruckversuchen mit verschiedenen Materialparametern ist möglich und hinreichend genau, um damit inverse Methoden durchzuführen.
2. Es konnten drei verschiedene ML-Methoden (Random-Forest-Regression, Support-Vector-Regression und künstliche neuronale Netze) erfolgreich trainiert werden, um in einem realistischen Bereich von Materialparametern charakteristische Merkmale von instrumentierten Eindruckmessungen wiederzugeben.
3. Die besten Genauigkeiten bei der Beschreibung neuer Datensätze, die nicht zum Training verwendet wurden, ergaben sich bei der Support-Vector-Regression (SVR). Die Ergebnisse der künstlichen neuronalen Netze waren auch vielversprechend, jedoch bietet die SVR die zusätzlichen Vorteile, dass sie sehr einfach in einen unabhängigen Computercode zu implementieren ist, sie mit weniger Trainingsdaten auskommt und weniger zum Overfitting neigt als die neuronalen Netze.

7) Fazit

In diesem Vorprojekt ging es darum, das ressourcensparende Potential einer neu zu entwickelnden Messtechnologie aufzuzeigen und insbesondere mögliche CO₂-Einsparungen durch sie zu quantifizieren. Außerdem sollten bereits einige wissenschaftliche Vorarbeiten erfolgen, wie eine Vorauswahl des Materialmodells für die mechanischen Modellierungen und die Auswahl der Methode künstlicher Intelligenz, die später trainiert werden soll.

Es konnten trotz der Einschränkungen durch die Corona-Pandemie mehrere Industrieprozesse aus unterschiedlichen Bereichen der verarbeitenden Industrie gefunden werden, in denen die neu zu entwickelnde Messtechnologie einen hohen Nutzwert für die Unternehmen bietet und zusätzlich zur CO₂-Einsparung beiträgt. Durch sie würde es beispielsweise möglich, Fertigungsprozesse zu optimieren, die Qualität besser nachzuweisen, zusätzliche Kenntnisse über Bauteileigenschaften nach den einzelnen Fertigungsstufen bereitstellen, Fehler am Bauteil besser aufzuzeigen oder den wahren Verschleißzustand festzustellen. Sie kann damit einen wesentlichen Beitrag für mehr Nachhaltigkeit in den Produktentstehungsprozessen bis hin zum Ende des Lebenszyklus von Bauteilen leisten. Durch sie wird zukünftig weniger Materialeinsatz für die Produktion benötigt, werden Transport- und Logistikaufwendungen eingespart, Fertigungszyklen verkürzt, die Mehrfertigung von Bauteilen kann teilweise entfallen, fehlerhafte Produktion wird frühzeitig gesteuert, Bauteile verbleiben länger in Betrieb und werden zukünftig zur Herstellung von Messproben nicht mehr zerstört. In einem breiten Spektrum von Industrieprozessen der metallverarbeitenden Industrie finden wir relevante Anwendungsbereiche für ESKEiN, um die Industrieunternehmen dabei zu unterstützen, ihren Markt- und Kundenanforderungen effektiver gerecht zu werden und dabei einen wesentlichen Beitrag für Ressourceneinsparung, CO₂-Reduktion und Klimaschutz zu leisten.

Dass dies praktisch umsetzbar sein wird, haben wir auszugsweise im Vorprojekt bewiesen. Aus nur drei Industrieprozessen haben wir bereits ein jährliches CO₂-Einsparpotential zwischen 1.278 t – 15.520 t CO₂ durch den Einsatz der neuen Messtechnologie aufzeigen können. Auf Deutschland hochgerechnet ergibt das ein CO₂-Einsparpotential von etwa 0,3 Mio. t konservativ gerechnet und 1.5 Mio. t CO₂ im optimalen Fall. Dabei haben wir bei weiteren 11 Unternehmen das Interesse geweckt bei sich das CO₂-Einsparpotential durch ESKEiN auch in ihrem Unternehmen zu erkunden. Dies konnte wegen der Corona-Einschränkungen noch nicht erfolgen. Unsere Argumentation, dass auch eine Messtechnologie in den Produktentstehungsprozessen zu wesentlichen Ressourceneinsparungen führen kann, stieß nicht nur auf Interesse bei den Industrieunternehmen, sondern überraschte schon beinahe und machte sie neugierig. Hier konnten wir einige Ansprechpartner aus großen wie kleinen Unternehmen der metallverarbeitenden Industrie für die Themen rund um Ressourceneffizienz und Klimaneutralität sensibilisieren. 20 von 28 kontaktierten Unternehmen haben ihr grundsätzliches Interesse am Einsatz der neuen Messtechnologie geäußert.

Das Materialmodell für das Entwicklungsvorhaben und die Methode maschinellen Lernens für das künftige Projekt konnten erfolgreich ausgewählt werden. Durch den Kontakt mit der Industrie konnten auch die Anforderungen an die Messtechnik klarer definiert werden. Für alle Zielstellungen des Entwicklungsvorhabens ESKEiN konnten wir im Vorprojekt nachweisen, dass unsere Projektstruktur und Projektplanung umsetzbar, die Ziele erreichbar und die Entwicklung der Messtechnologie für die Nutzung in Industrieprozessen realisierbar sind.

8) Literaturverzeichnis

- Maier, V., K. Durst, J. Mueller, B. Backes, H. W. Höppel, und M. Göken. „Nanoindentation strain-rate jump tests for determining the local strain-rate sensitivity in nanocrystalline Ni and ultrafine-grained Al.“ *J. Mater. Res.*, 14.6.2011: 1421-1430.
- Sajjad, H.M., H. ul Hassan, M. Kuntz, B.J. Schaefer, P. Sonnweber-Ribic, A. Hartmaier. "Inverse method to determine fatigue properties of materials by combining cyclic indentation and numerical simulation." *Materials* 13.2020: 3126.
- Schmaling, B., A. Hartmaier. "Determination of plastic material properties by analysis of residual imprint geometry of indentation." *Journal of Materials Research* 27.16.2012: 2167.