

FAT-Schriftenreihe 375

Einfluss verschiedener Scherschneidparameter auf die elektro-magnetischen Eigenschaften von NO-Elektroblech automobiler Traktionsantriebe



Einfluss verschiedener Scherschneidparameter auf die elektro-magnetischen Eigenschaften von NO-Elektroblech automobiler Traktionsantriebe

Forschungsstellen

RWTH Aachen University
Institut für Elektrische Maschinen (IEM)
Alexander Kern, M.Sc. RWTH
Juniorprofessorin Dr.-Ing. Nora Leuning
Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. h. c. mult. Kay Hameyer

Technische Universität München
Lehrstuhl für Umformtechnik und Gießereiwesen (utg)
Lucas Böhm, M.Sc.
Prof. Dr.-Ing. Wolfram Volk

Das Forschungsprojekt wurde mit Mitteln der Forschungsvereinigung Automobiltechnik e.V. (FAT) gefördert.

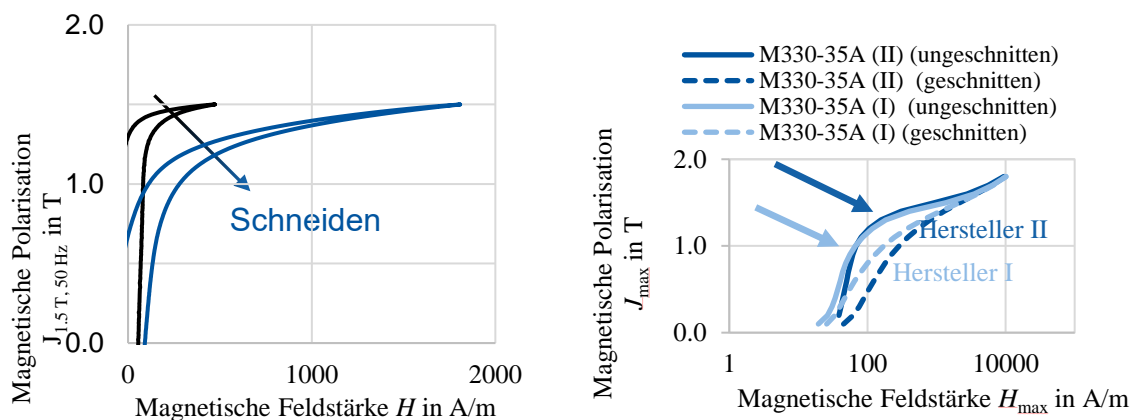
Inhaltsverzeichnis

1	Forschungsthema und Problemstellung	3
2	Forschungsziel und Lösungsweg	5
3	Messverfahren und Probenverarbeitung.....	9
3.1	Magnetische Charakterisierung	9
3.1.1	Bestimmung der magnetisch wirksamen Probendicke.....	9
3.1.2	Messverfahren und Auswertung.....	9
3.2	Chemische Analyse	11
3.3	Metallographie.....	11
3.4	Materialcharakterisierung im Zugversuch.....	11
3.5	Probenherstellung	12
3.6	Messung des Schneidkraft-Weg-Verlaufs	14
3.7	Schnittflächenanalyse	15
3.8	Mikrohärtemessungen	16
4	Auswertung mechanische Charakterisierung	18
4.1	Legierungsbestandteile	18
4.2	Korngrößen.....	19
4.3	Spannungs-Dehnungs-Kurven.....	20
4.4	Schneidkraftkurven und Schneidarbeit.....	24
4.5	Schnittflächengrößen	30
4.6	Aufhärtung der Schnittkanten.....	37
5	Auswertung magnetische Charakterisierung.....	43
5.1	Vergleich der magnetischen Eigenschaften der erodierten Werkstoffproben	44
5.2	Auswertung der magnetischen Schädigung für WS C	45
5.2.1	Veränderung Schneidspalt.....	45
5.2.2	Veränderung Verschleißzustand.....	47
5.2.3	Veränderung Verschleißzustand bei kleinem Schneidspalt	48

5.2.4	Veränderung des Winkels zwischen Schnittlinie und Walzrichtung	50
5.2.5	Veränderung Schneidgeschwindigkeit.....	51
5.2.6	Zusammenfassung.....	52
5.3	Werkstoffvergleich.....	53
5.3.1	Veränderung Schneidspalt	53
5.3.2	Veränderung Verschleißzustand	56
6	Schnittkantenmodell	58
6.1	Modellierung	58
6.2	Auswertung	59
6.3	Diskussion der Modellierung	62
7	Ergebnisverknüpfung mechanischer und magnetischer Werkstoffcharakterisierungen.....	64
7.1	Korrelation Mikrohärtemessung mit magnetischen Eigenschaften	64
7.2	Korrelation Schnittflächencharakterisierung mit magnetischen Eigenschaften	65
7.3	Korrelation der Schneidarbeit mit magnetischen Eigenschaften	66
7.4	Einfluss von Größeneffekten	67
8	Zusammenfassung	69
	Quellenverweise.....	71

1 Forschungsthema und Problemstellung

Der magnetische Kreis in rotierenden elektrischen Maschinen wird wesentlich durch die Werkstoffeigenschaften des verwendeten nicht kornorientierten (NO-) Elektrobands festgelegt. Die wesentlichen Kriterien sind hierbei die frequenzabhängige Magnetisierungskennlinie und die Ummagnetisierungsverluste. Durch die Werkstoffverarbeitung zur Herstellung des Blechpakets der Maschine wird ein mechanischer Spannungszustand in den Werkstoff eingepreßt, der die magnetischen Eigenschaften verschlechtert. Abbildung 1 zeigt schematisch die Verschlechterung des Magnetisierungsverhaltens in Folge eines eingepreßten mechanischen Spannungszustands.

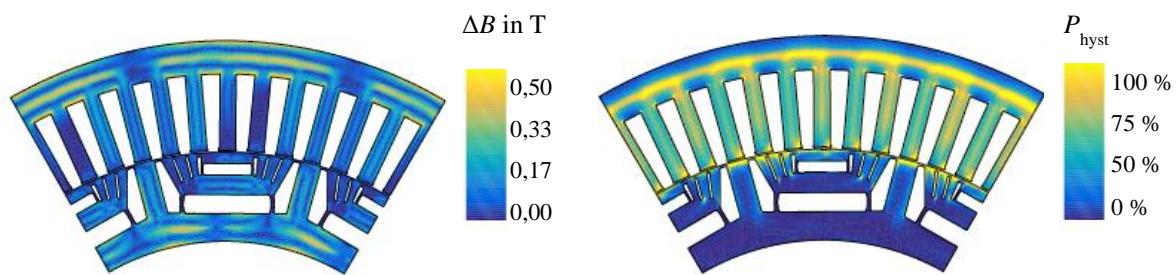


a) Einfluss des Scherschneidens auf das Magnetisierungsverhalten (schematisch).

b) Materialeinfluss auf die magnetische Schädigung durch Scherschneiden.

Abbildung 1: Einfluss von plastischen Deformationen durch Schneiden auf die magnetischen Eigenschaften von NO-Elektroband.

Im Rahmen von Vorarbeiten wurde gezeigt, dass durch eine Vernachlässigung der magnetischen Schädigung die lokale Flussdichte- und Verlustverteilung in elektrischen Maschinen kleiner bis mittlerer Leistung im Zuge von Finite Elemente Simulationen nicht realitätstreu abgebildet werden können [1]. Abbildung 2 zeigt anhand eines Querschnitts eines Traktionsmotors den Einfluss des Scherschneidens auf die lokalen magnetischen Eigenschaften. Insbesondere durch die lokal signifikante Verlusterhöhung verändert sich der erreichbare Wirkungsgrad und im Anwendungsfeld von Traktionsmotoren für elektrische Fahrzeuge die Aussage über erreichbare Reichweiten.



a) Flussdichtedifferenz unter Berücksichtigung magnetischer Schädigung.

b) Lokale Veränderung der Hystereseverluste unter Berücksichtigung magnetischer Schädigung.

Abbildung 2: Einfluss des Scherschneidens auf die lokalen magnetischen Eigenschaften [1].

Im Zuge dieses Projektvorhabens wird die Beeinträchtigung der magnetischen Eigenschaften von nicht kornorientiertem Elektroband durch die mechanische Bearbeitung des Scherschneidens anhand von fünf Werkstoffen systematisch quantifiziert. Die untersuchten Scherschneidparameter sind dabei eine Veränderung des Schneidspalts, des Schneidkantenverschleißes, der Schneidgeschwindigkeit sowie die Schnittlinienrichtung in Bezug zur Walzrichtung.

2 Forschungsziel und Lösungsweg

Wesentliches Ziel des Projektvorhabens ist es, Korrelationen zwischen Werkstoffparametern von NO-Elektroband und der magnetischen Schädigung durch Scherschneiden abzuleiten. Anhand der erzielten Ergebnisse ergibt sich insbesondere ein Optimierungspotential durch Berücksichtigung des Prozesseinflusses während des Auslegungsprozesses des Antriebsstrangs.

Zur Erreichung des Forschungsziels sind sieben Arbeitspakete (AP) vorgesehen. In Abbildung 3 ist der Vernetzungsplan mit den jeweiligen Arbeitspaketen und deren Abfolge schematisch dargestellt.

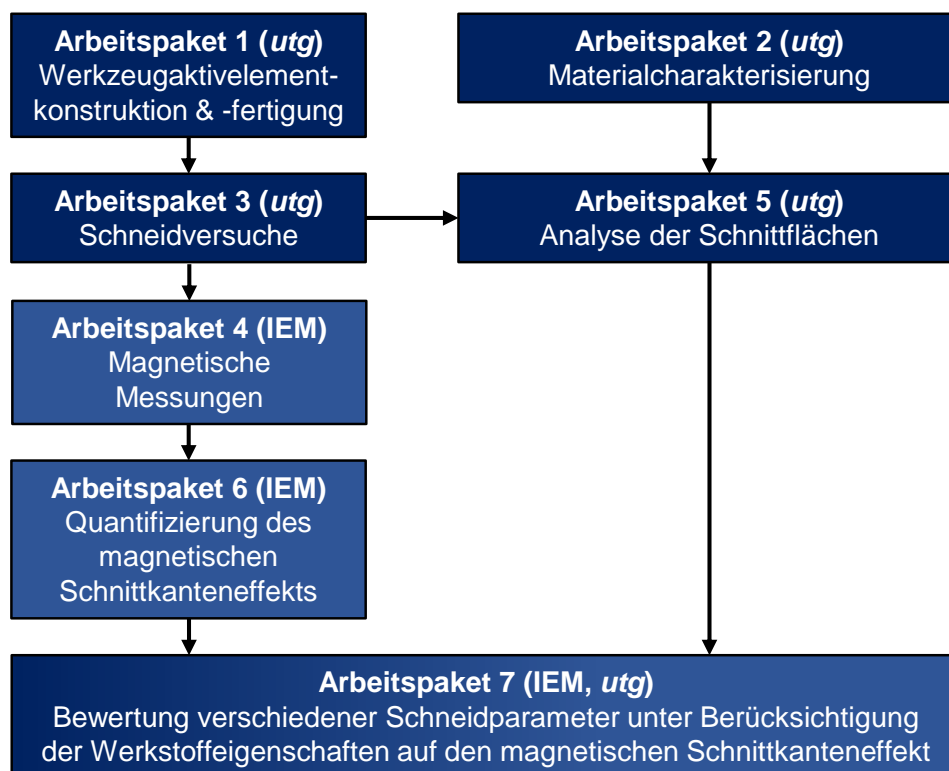


Abbildung 3: Vernetzungsplan.

Zum Erreichen der Projektziele verknüpfen die beiden Institute *utg* und IEM ihre Kompetenzen im Scherschneiden, der Produktionstechnik, der magnetischen und mechanischen Materialcharakterisierung sowie der Simulation und Auslegung elektrischer Maschinen. Grundlage für den Erfolg ist zudem die langjährige und erfolgreiche Zusammenarbeit in der DFG Forschungsgruppe FOR1897 und im DFG Schwerpunktprogramm SPP 2013. Am *utg* erfolgen die Schneidversuche sowie die Charakterisierung mechanischer Kenngrößen. Im Anschluss untersucht das IEM die Auswirkungen des Schneidvorgangs auf die magnetischen Werkstoffeigenschaften. In Abbildung 4 ist der Versuchsplan für das Forschungsvorhaben abgebildet.

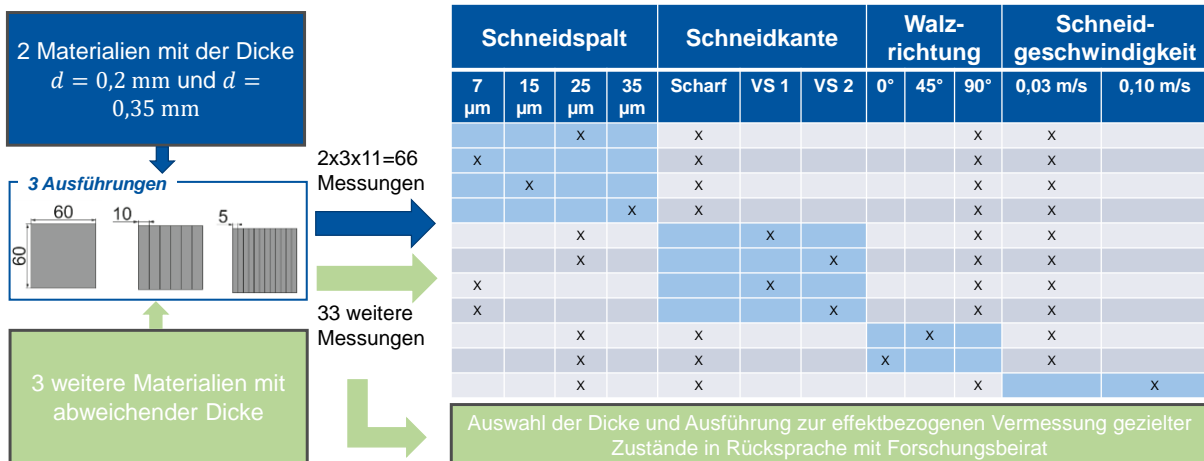


Abbildung 4: Versuchsplan – Variation der Schneidparameter.

Eine Kombination aus den angegebenen Scherschneidparametern in Bezug zur Walzrichtung wird dabei als prozesseitiger Zustand bezeichnet. Der Prozesseinfluss des Scherschneidens auf die magnetischen Werkstoffeigenschaften, die Schneidarbeiten, die Schnittflächenkenngrößen und die Mikrohärtigkeit der Elektrobleche soll grundsätzlich an fünf nicht-kornorientierten Elektroblechsorten in den Blechdicken 0,2 mm bis 0,35 mm untersucht werden. Der Umfang der magnetischen Untersuchungen wird gegenüber den weiteren Untersuchungen aber leicht eingeschränkt. Dabei werden für zwei Elektroblechsorten mit den Dicken 0,2 und 0,35 mm alle Zustände untersucht. Für die übrigen Blechsorten werden hingegen nur effektbezogen die magnetischen Werkstoffeigenschaften vermessen. Die Auswahl der Versuchswerkstoffe erfolgt in Absprache mit dem Forschungsbeirat. Damit werden zunächst für zwei Werkstoffe unter Berücksichtigung von drei verschiedenen Streifenbreiten die im Versuchsplan angegebenen elf Zustände messtechnisch untersucht (66 Messungen). In Absprache mit dem Forschungsbeirat werden fortführend für die übrigen drei Elektroblechsorten und Streifenbreiten gezielt Zustände nach dem Scherschneiden zur effektbezogenen, vergleichenden Vermessung ausgewählt (insgesamt 33 Messungen). Als Prozessparameter werden primär Schneidspalt (SSP) und Verschleißzustand der Aktivelemente und sekundär Walzrichtung der Bleche und die Schneidgeschwindigkeit untersucht.

In AP1 werden für das bereits am *utg* aus vorangegangenen Untersuchungen vorhandene Versuchswerkzeug Aktivelemente für die zu untersuchenden Schneidspalte und Verschleißzustände beschafft. Für die magnetischen Untersuchungen im Single-Sheet-Tester (SST) werden sogenannte Streifenproben verwendet.

In AP2 werden die Werkstoffe mit Zugversuchen nach DIN EN ISO 6892-1 charakterisiert, um Unterschiede im mechanischen Werkstoffverhalten zu quantifizieren. Diese haben beim Scherschneiden Auswirkungen auf die Deformation des Blechwerkstoffs. Außerdem erfolgt eine Analyse der Werkstoffzusammensetzung mittels Funkenspektrometrie, um die Schneidempfindlichkeit der Elektroblechwerkstoffe mit deren Legierungszusammensetzung zu korrelieren.

In AP3 werden die Schneidversuche mit verschiedenen Prozessparametern durchgeführt. Der Schneidspalt wird zwischen 7, 15, 25 und 35 μm variiert, wobei 25 μm und 35 μm typische Konfigurationen industrieller Werkzeuge darstellen. Inwieweit der Verschleiß bei großem (25 μm) und kleinem (7 μm) Schneidspalt einen Einfluss hat, soll in den Versuchen mit unterschiedlichem Schneidkantenverschleiß – scharfkantig (SK), leicht verschlissen (VS1) und stark verschlissen (VS2) – analysiert werden. Aus Vorversuchen ist zudem bekannt, dass das Schneiden bei unterschiedlichen Auftreffgeschwindigkeiten des Stempels auf das Blech Einfluss auf die Ausprägung der Schnittkante und somit die magnetischen Eigenschaften des schergeschnittenen Elektroblechs hat. Folglich soll mit einer industriell typischen Schneidgeschwindigkeit (0,03 m/s) ein Großteil der Versuche durchgeführt werden, jedoch ebenfalls eine dreifache Geschwindigkeit (0,1 m/s) untersucht werden. Beim Scherschneiden werden die Schneidkraftkurven aufgezeichnet, die wiederum Rückschlüsse auf die zum Schneiden notwendige Arbeit zulassen.

In AP4 findet die magnetische Vermessung der Proben am IEM statt. Für die Charakterisierung magnetischer Eigenschaften an Flachproben wird ein SST eingesetzt.

AP5 erfolgt am *utg* nach den Scherschneidversuchen. Es werden die Schnittflächen mittels Laserkonfokal- und Lichtmikroskopie untersucht. Mit Mikrohärtmessungen wird die Kaltverfestigung in der Schereinflusszone quantifiziert. Schnittflächenkenngrößen und Härtmessungen sind Grundlage für die Beschreibung der mechanischen Änderungen der Werkstoffeigenschaften an der Schnittkante. Eine Korrelation dieser Kenngrößen mit den magnetischen Eigenschaften ermöglicht ein besseres Verständnis der Schneidempfindlichkeit der unterschiedlichen Werkstoffe.

In AP6 werden am IEM die magnetischen Messungen hinsichtlich Magnetisierbarkeit und spezifischen Eisenverlusten unter Berücksichtigung der Werkstoffzustände und -ausführungen ausgewertet. Zusätzlich wird anhand von ausgewählten Daten aus den magnetischen Messungen ein lokales Schnittkantenmodell parametrisiert.

In AP7 werden die Ergebnisse des IEM und *utg* zur Bewertung des Einflusses verschiedener Schneidparameter auf die Werkstoffeigenschaften zusammengeführt.

3 Messverfahren und Probenverarbeitung

3.1 Magnetische Charakterisierung

3.1.1 Bestimmung der magnetisch wirksamen Probendicke

Vor der Vermessung muss für jeden Werkstoff die magnetisch wirksame Querschnittsfläche ermittelt werden. In Folge der Beschichtung der Werkstoffe ergibt sich kein skalierbarer Zusammenhang zwischen der Dichte und den magnetischen wirksamen Volumina bzw. Massen. Aus diesem Grund wird im ersten Schritt die Dicke d_1 des Werkstoffs direkt gemessen und anschließend über die Dichtenangabe und die abgewogene Masse erneut die Dicke d_2 berechnet. Anschließend wird die magnetische wirksame Dicke über beide Werte gemittelt. In Tabelle 1 sind dazu die Dickenwerte im Werkstoffvergleich dargestellt. Werkstoff D ist der einzige unbeschichtete Werkstoff.

Werkstoff	Bemessungsdicke	Magnetisch wirksame Dicke
A	200 μm	190 μm
B	270 μm	269 μm
C	350 μm	340 μm
D	270 μm	272 μm
E	250 μm	246 μm

Tabelle 1: Vergleich der Werkstoffdicken für magnetische Charakterisierung.

3.1.2 Messverfahren und Auswertung

Für die Charakterisierung magnetischer Eigenschaften an Flachproben wird ein SST eingesetzt, bei dem ein Rückschlussjoch den magnetischen Fluss über die Probe schließt. Abbildung 5 zeigt die schematische Darstellung eines SSTs mit eingelegter Materialprobe. Eine stromdurchflossene Primärwicklung generiert ein magnetisches Feld, welches durch das Probenmaterial verstärkt wird. Die in einer Sekundärwicklung induzierte elektrische Spannung ist proportional zu der magnetischen Flussdichte in der Probe. Da das Sekundärwicklungssystem die Eigenschaften des gesamten umschlossenen Materials abbildet, ist diese Messung global. Trotzdem können lokale Effekte durch geeignete Versuche mit dem SST quantifiziert werden. Durch die Verwendung verschieden breiter Elektroblechstreifen, anstelle von Vollproben, kann der Schnittkantenanteil innerhalb des Messaufbaus proportional erhöht werden. Auf diese Weise kann die eigentlich lokale Beeinträchtigung des Elektroblechs an der Schnittkante dennoch mit dem SST bewertet werden.

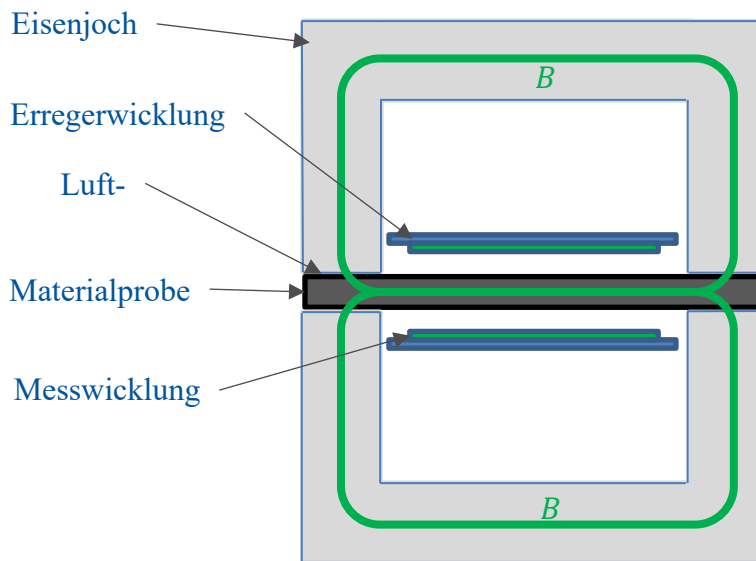


Abbildung 5: Schematische Darstellung des SST.

Zur messtechnischen Charakterisierung der magnetischen Eigenschaften einer Werkstoffprobe werden sowohl die Magnetisierungskennlinie $J(H)$ als auch die Ummagnetisierungsverluste $P(B)$ gemessen. Für die Erfassung des Magnetisierungsverhaltens wird über das Spulensystem des SSTs ein Feldstärkeverlauf H beliebiger Frequenz eingepreßt, sodass sich im Werkstoff eine sinusförmige Polarisation J beliebiger Amplitude ergibt; die Feldstärke H_{\max} , bei der sich die maximale Polarisation J_{\max} einstellt, wird dann aufgezeichnet. Die bei der Magnetisierung des Werkstoffs entstehende Verlustleistung P wird ebenfalls über ein Spulensystem gemessen. Im Anwendungsbezug elektrischer Maschinen ist es vorteilhaft, die Ummagnetisierungsverluste als Funktion der magnetischen Flussdichte B aufzutragen. Abbildung 6 zeigt exemplarisch gemessene Hystereseschleifen in Abhängigkeit der Magnetisierungsfrequenz sowie die zugehörigen Ummagnetisierungsverluste.

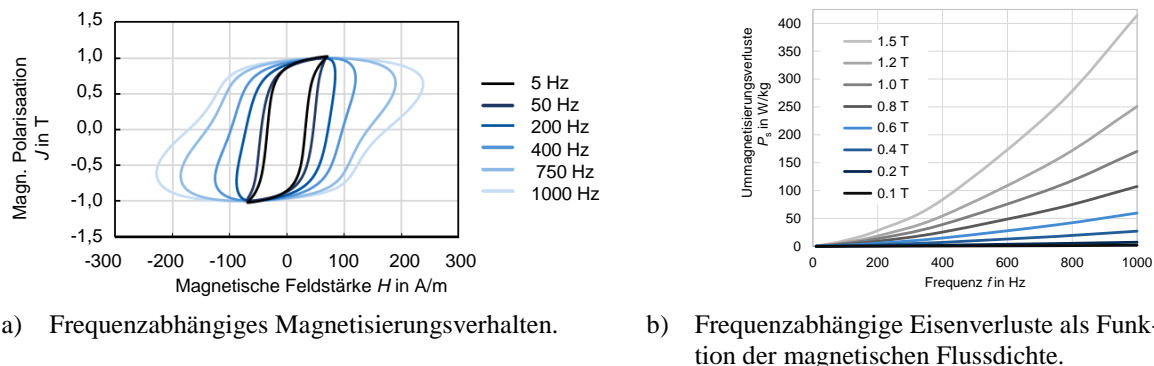


Abbildung 6: Exemplarische Darstellung des Magnetisierungs- und Verlustverhaltens weichmagnetischer Werkstoffe.

3.2 Chemische Analyse

Die Legierungselemente der Elektroblechwerkstoffe werden mit dem Verfahren der Funken-spektrometrie an einem Funkenspektrometer Hitachi Foundry Master bestimmt. Hierfür ist es zunächst erforderlich die isolierende Lackschicht der Elektrobleche mit Korund-Schleifpapier zu entfernen, um zum einen die Ausbildung eines Lichtbogens zu ermöglichen und zum anderen sicherzustellen, dass das Messergebnis nicht durch die Bestandteile des Lacks verfälscht wird. Nach der Kalibrierung des Funkenspektrometers werden drei Messungen je Werkstoff an unterschiedlichen Stellen durchgeführt und die Ergebnisse gemittelt.

3.3 Metallographie

Für die metallographische Untersuchung der Elektroblechwerkstoffe steht ein Mikroskop Carl Zeiss Axioplan zur Verfügung, inklusive der Software AxioVision zur Korngrößenmessung. Die Messung der Korngröße erfolgt in der Blechebene an geschliffenen und geätzten Werkstoffproben gemäß DIN EN ISO 643. Je Werkstoff werden jeweils fünf Aufnahmen mit nicht weniger als 50 Körnern ausgewertet.

3.4 Materialcharakterisierung im Zugversuch

Die Bestimmung der mechanischen Eigenschaften der Werkstoffe erfolgt im uniaxialen Zugversuch gemäß DIN EN ISO 6892-1 an erodierten Zugproben der Form H gemäß DIN50125. Abbildung 7 zeigt die verwendete Probengeometrie mit ihren Abmessungen.

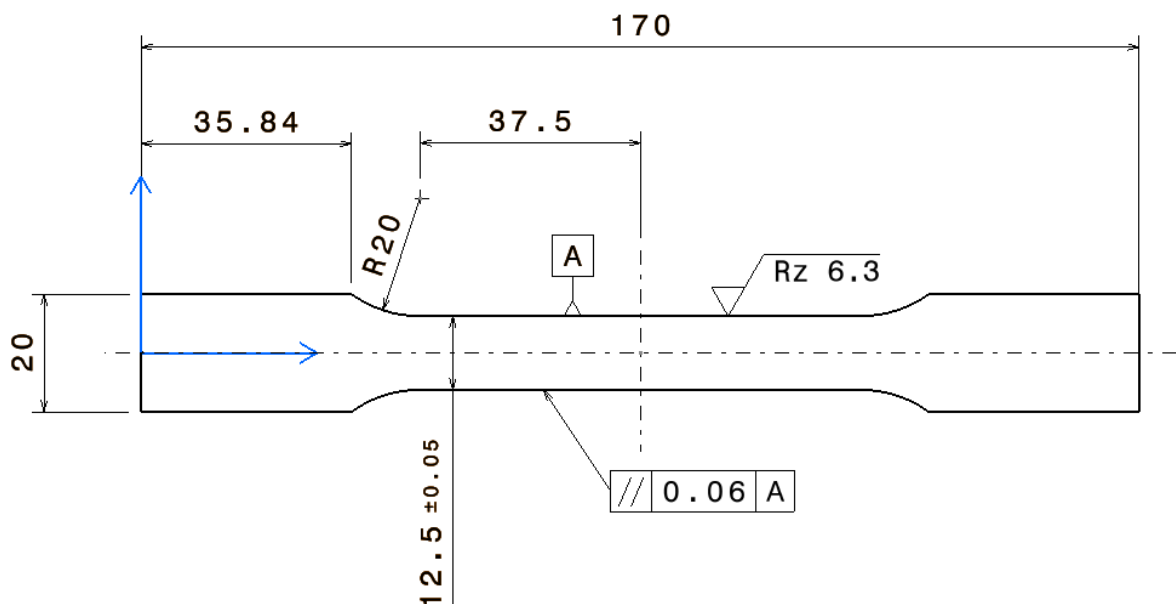


Abbildung 7: Zugprobe der Form H gemäß DIN50125.

Um den Walzrichtungseinfluss auf die mechanischen Eigenschaften zu ermitteln wurden Zugversuche unter 0° , 45° und 90° zur Walzrichtung durchgeführt. Darüber hinaus wurden Zugversuche bei drei verschiedenen Dehnraten, $0,0125 \text{ mm/s}$, $0,125 \text{ mm/s}$ und $1,25 \text{ mm/s}$ durchgeführt um die Dehnratensensitivität der Werkstoffe bestimmen zu können. Die Spannungs-Dehnungs-Diagramme bis zum Spannungsmaximum sowie die mechanischen Kenngrößen Streckgrenze, Zugfestigkeit, E-Modul und Gleichmaßdehnung werden jeweils als Mittelwert aus fünf (bei Dehnraten von $0,125 \text{ mm/s}$ und $1,25 \text{ mm/s}$) bzw. drei (bei einer Dehnrate von $0,0125 \text{ mm/s}$) identischen Zugversuchen berechnet. Die mechanischen Eigenschaften bei einem Zug unter 90° zur Walzrichtung sind im Rahmen dieses Projekts besonders relevant, da dies dem Belastungsfall eines Großteils der Scherschneidexperimente entspricht (Winkel zwischen Schnittlinie und WR 0°).

3.5 Probenherstellung

Für die Herstellung von SST-Proben für magnetische Messungen stehen am *utg* die mechanische Schnellläuferpresse Bruderer BSTA 1600-181 sowie ein hochgenaues und modular aufgebautes Scherschneidwerkzeug zur Verfügung. Die Löcher, die mit diesem Werkzeug hergestellt werden, haben eine Länge von 65 mm und eine Breite von 5 mm . Durch die Verwendung unterschiedlicher Aktivelemente ist das Schneiden mit verschiedenen Schneidspalten und Verschleißzuständen möglich. Tabelle 2 nennt die Kenndaten der ellipsenförmigen Verschleißprofile VS1 und VS2 der Stempel und Matrizen mit verschlissenen Schneidkanten im Vergleich zu den scharfkantigen Aktivelementen (SK). Die kleine Halbachse des Verschleißprofils liegt in der Ebene der Aktivelementstirnfläche, die große Halbachse liegt in der Ebene der Aktivelementmantelfläche.

Schneidkantenzustand	Kleine Halbachse	Große Halbachse
SK	$\sim 0 \text{ }\mu\text{m}$	$\sim 0 \text{ }\mu\text{m}$
VS1	$\sim 40 \text{ }\mu\text{m}$	$\sim 60 \text{ }\mu\text{m}$
VS2	$\sim 70 \text{ }\mu\text{m}$	$\sim 100 \text{ }\mu\text{m}$

Tabelle 2: Verschleißprofile.

Abbildung 8 zeigt die geometrischen Verhältnisse am verschlissenen Aktivelement. Das Werkzeug ist außerdem mit einer Kraftmessdose ausgestattet, die eine inline Schneidkraftmessung am Stempel ermöglicht. Wird die Schneidkraftmessung um eine Messung der Stößelbewegung in z-Richtung ergänzt können parallel zur Probenherstellung die korrespondierenden Schneidkraft-Weg-Kurven aufgezeichnet werden. Abbildung 9 zeigt das verwendete Werkzeug und benennt seine wesentlichen Elemente.

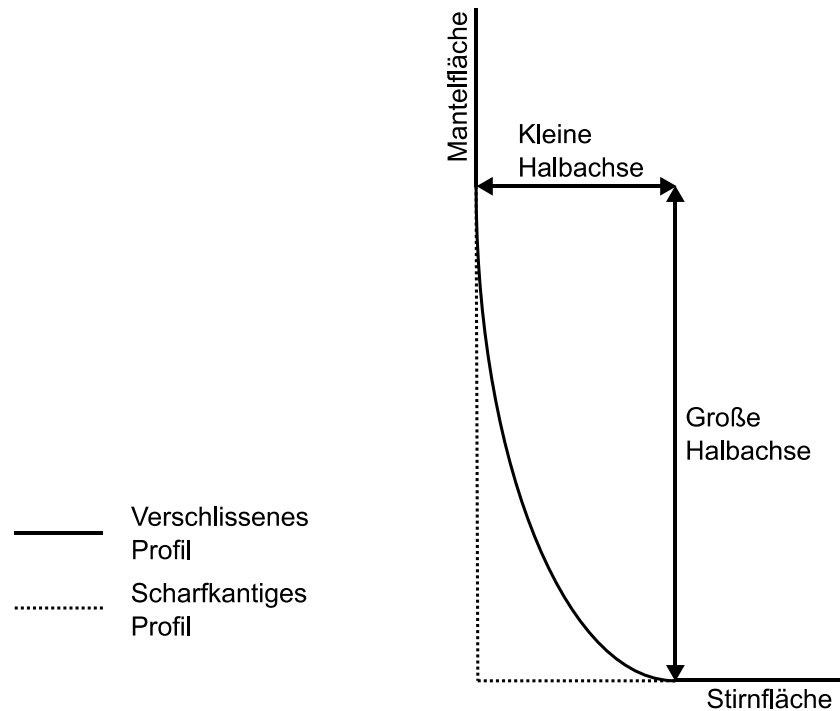


Abbildung 8: Scharfkantiges vs. verschlissenes Aktivelement.

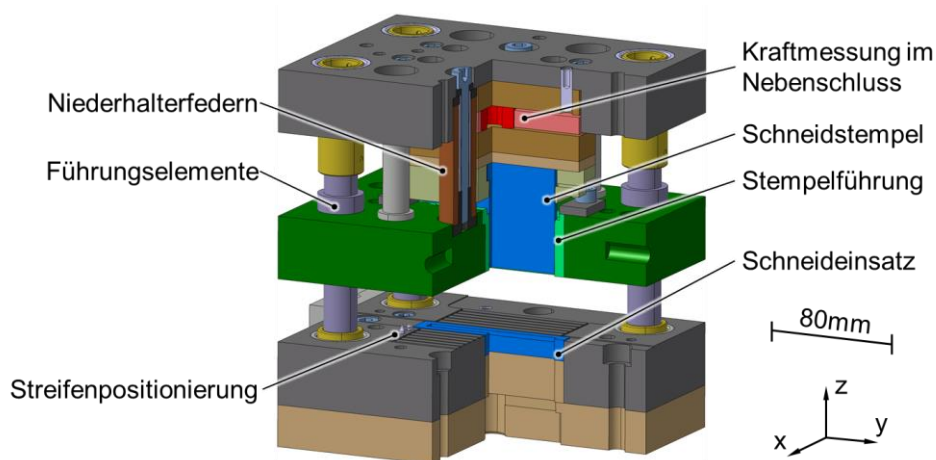


Abbildung 9: Werkzeug für das Scherschneiden von SST-Proben.

Um im Scherschneidwerkzeug verarbeitet werden zu können, muss Elektroblech-Tafelmaterial zunächst auf die Größe von 160x80 mm zugeschnitten und in einem separaten Werkzeug mit Sucherlöchern versehen werden. Diese vorkonfektionierten Platinen können dann im Scherschneidwerkzeug gelocht werden. Dabei entsteht bei jedem Hub ein rechteckiger Ausschnitt von 65x5 mm. Zwischen zwei Hübem muss die Platine jeweils manuell neu positioniert werden bis das vollständig gelochte Stanzgitter vorliegt. Im letzten Schritt werden dann die Sucherlöcher mit der Schlagschere abgetrennt und man erhält die eigentlichen Probenstreifen mit einer Länge von circa 63 mm. Durch die gezielte Positionierung der Platine im Scherschneidwerkzeug können Probenstreifen mit einer Breite von 5 mm beziehungsweise einem Vielfachen von

5 mm hergestellt werden. Diese Probenstreifen werden dann zu annähernd quadratischen Proben zusammengefasst, also beispielsweise 12 Streifen von 5 mm Breite. Anhand dieser Proben kann im Single-Sheet-Test der Einfluss des Scherschneidens auf die magnetischen Eigenschaften in Relation zu ungeschnittenen Vollproben ermittelt werden. Abbildung 10 zeigt die Fertigungsreihenfolge bis zum Erhalt der schergeschnittenen SST-Proben.

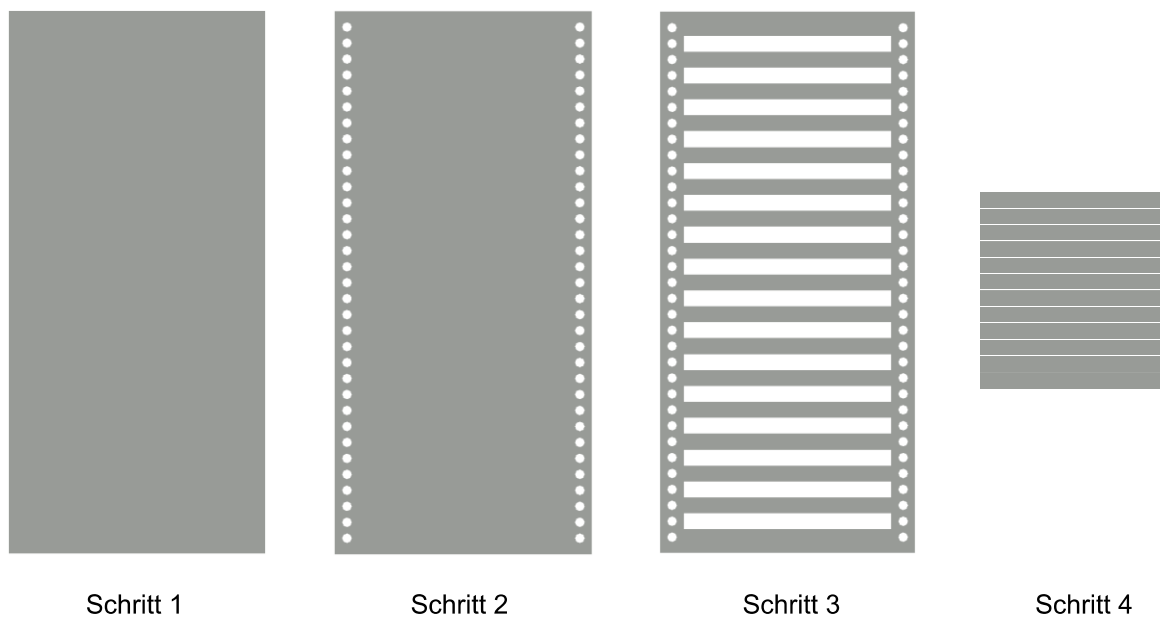


Abbildung 10: Fertigungsreihenfolge für die Herstellung von SST-Proben aus Elektroblechtafeln.

3.6 Messung des Schneidkraft-Weg-Verlaufs

Während der Probenherstellung wird sowohl die Schneidkraft am Stempel als auch die Stößelbewegung mittels Laserabstandssensor bei drei Hüben je Zustand inline gemessen. Aus der Überlagerung der beiden Datenstränge lassen sich die Schneidkraft-Weg-Kurven der Probenherstellung erzeugen, welche an sich schon Rückschlüsse auf den Ablauf des Trennvorgangs zulassen. So kann zum einen direkt das auftretende Schneidkraftmaximum abgelesen werden. Des Weiteren erlaubt der Verlauf der Schneidkraft-Weg-Kurve Rückschlüsse auf das elastische und plastische Verhalten des Werkstoffs während der Umformung. Wird die Schneidkraft über den Stößelweg integriert ergibt sich daraus die für den Trennvorgang benötigte Schneidarbeit. Die Schneidarbeit bis zum Schneidkraftmaximum ist ein Maß für die magnetische Beeinträchtigung des Werkstoffs durch das Scherschneiden [2]. Abbildung 11 zeigt drei Schneidkraft-Weg-Kurven für das Scherschneiden von WS A mit einem Schneidspalt von 25 μm , scharfkantigen Aktivelementen, unter einem Winkel von 0° zur WR und bei einer Schneidgeschwindigkeit von 0,03 m/s. Aus dem Diagramm lässt sich die maximale Schneidkraft von etwa 15 kN ablesen. Die Tatsache, dass der absteigende Teil der Kurve flach ausläuft deutet auf einen allmählichen Übergang zwischen Glattschnitt- und Bruchflächenanteil hin.

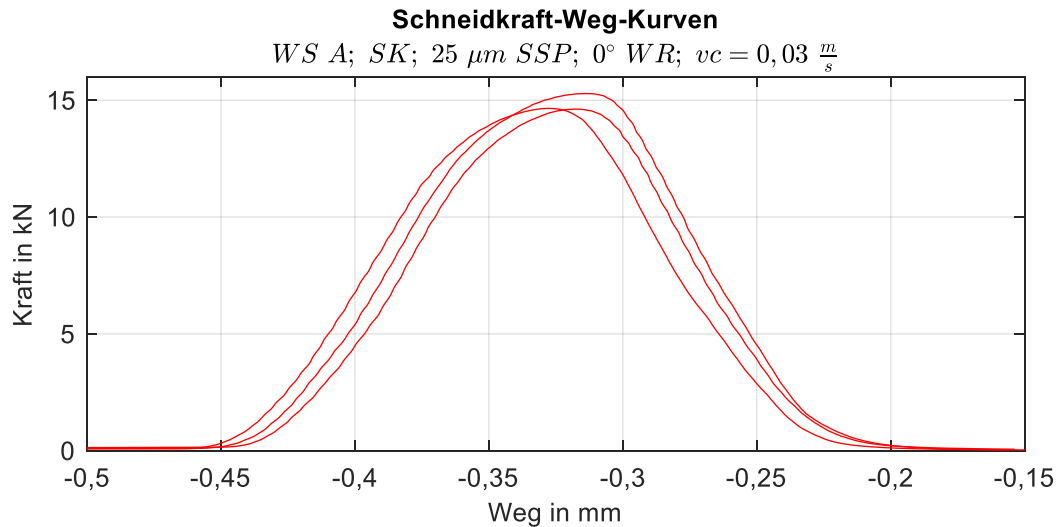


Abbildung 11: Schneidkraft-Weg-Kurven für das Scherschneiden von WS A mit einem Schneidspalt von 25 μm , scharfer Schneidkante, unter einem Winkel von 0° zur WR und mit einer Schneidgeschwindigkeit von 0,03 m/s.

3.7 Schnittflächenanalyse

Die Schnittflächen der verschiedenen hergestellten Elektroblechproben werden mit einem Lichtmikroskop Keyence VHX-2000 und einem Lasermikroskop Keyence VK-X100 vermessen. Die Vermessung der Schnittflächen an Elektroblechen ist aufgrund der großen Korngröße mit hohen Unsicherheiten behaftet, da die Schnittflächenanteile, wie in Abbildung 13 dargestellt, stark schwanken. Für die Beurteilung der Höhe des Kanteneinzugs und des Glattschnitts werden Lichtmikroskopaufnahmen der Schnittflächen angefertigt und an jeweils drei Stellen je Probenkante vermessen, insgesamt also an sechs Messstellen. Die Bruchhöhe wird anschließend für jede Messstelle rechnerisch aus der Differenz von Blechdicke, Kanteneinzug und Glattschnitt berechnet. Für die Messung der Grathöhe kommt ein Lasermikroskop an jeweils einer Messstelle je Probenkante zum Einsatz. Die relevanten Schnittflächenkenngrößen nach VDI 2906 – Blatt 2 werden anschließend aus den gemessenen bzw. errechneten Werten gemittelt. Abbildung 12 zeigt die Schnittflächenkenngrößen nach VDI 2906, Blatt 2.

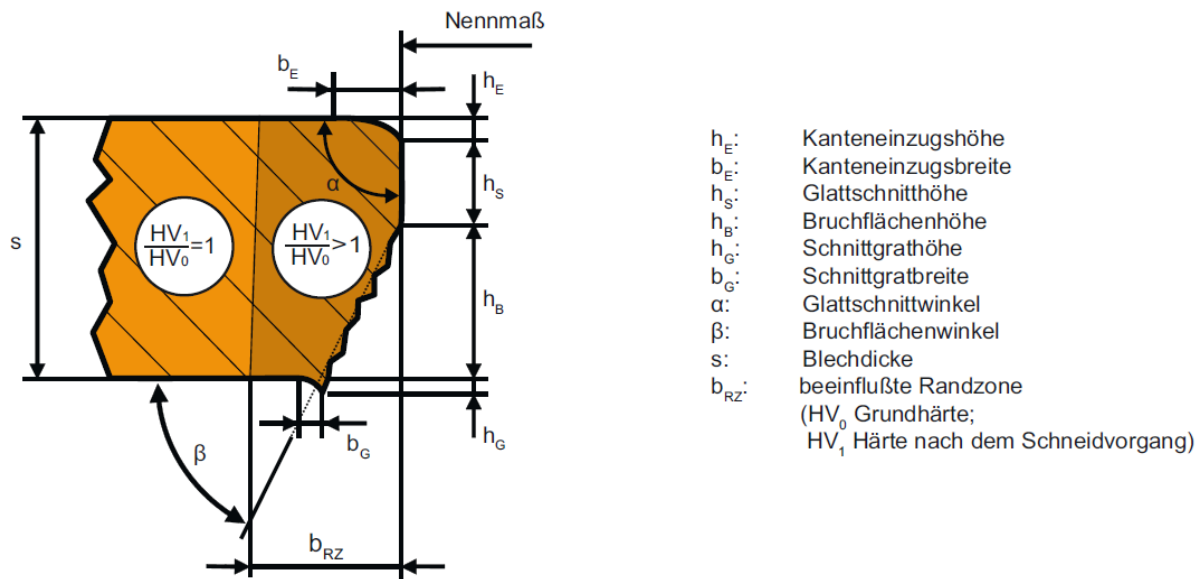


Abbildung 12: Schnittflächenkenngrößen nach VDI 2906, Blatt 2 [3].

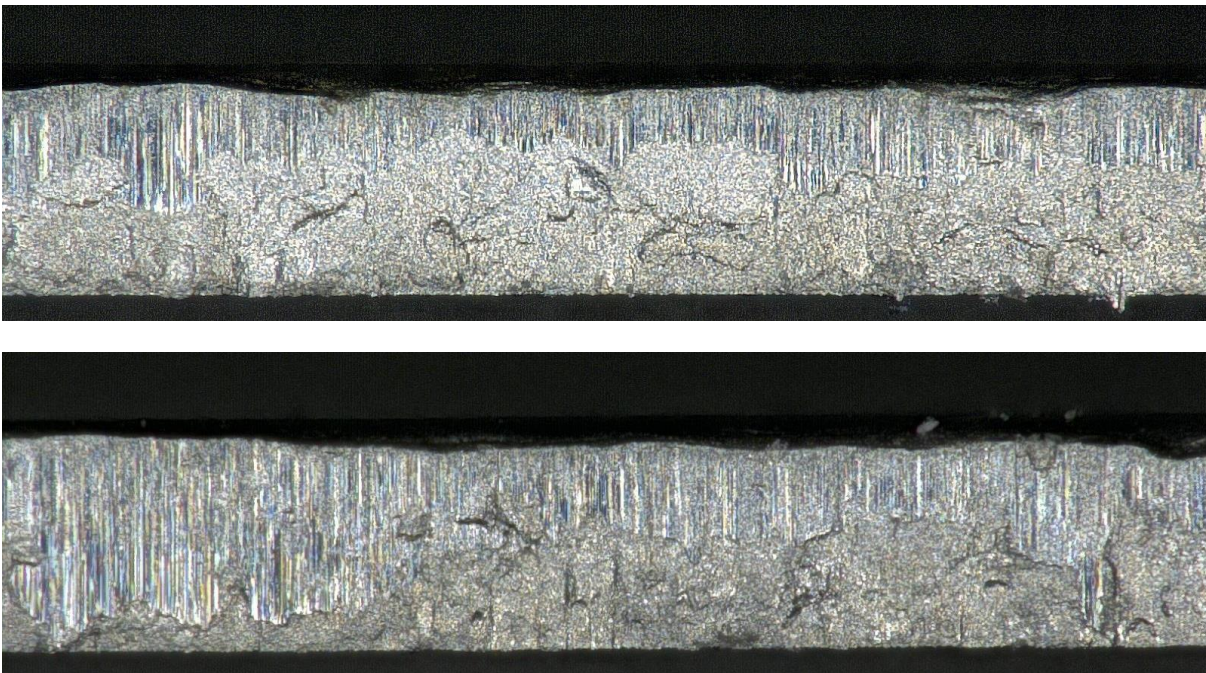


Abbildung 13: Lichtmikroskopische Aufnahmen der Schnittflächen von Werkstoff C. Die Schneidparameter dieser Probe sind 25 μm Schneidspalt, scharfe Schneidkanten, Schnittlinie zur Walzrichtung 0° und Schneidgeschwindigkeit 0,03 m/s.

3.8 Mikrohärtemessungen

Mit Mikrohärtemessungen wird die Kaltverfestigung an den Schnittkanten der Proben nachvollzogen. Hierfür werden die schergeschnittenen Proben quer zur Schnittlinie getrennt und mit der so entstehenden Fläche nach oben zeigend eingebettet. Die Härtemessungen werden auf einem Kleinlastprüfgerät LECO LM100 AT gemäß DIN EN ISO 6507-1 mit einer Last von 25 g durchgeführt. Die gemessenen Härtewerte von Messpunkten gleichen Abstands zur

Schnittkante werden anschließend gemittelt um auf diese Weise die Kaltverfestigung in definierten Abständen zur Schnittkante beurteilen zu können. Abbildung 14 zeigt das verwendete Probentischraster auf einem Querschliff einer eingebetteten Probe von Werkstoff C.

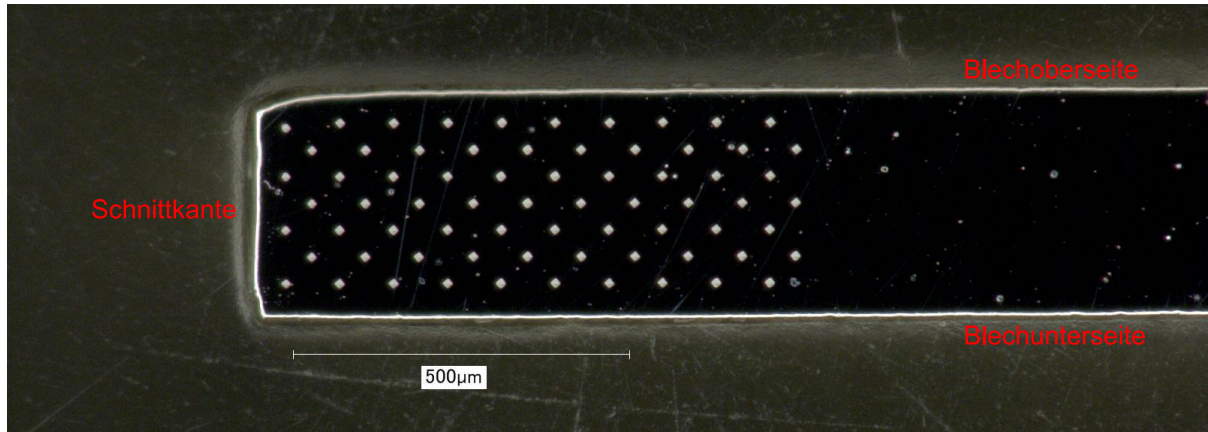


Abbildung 14: Probentischraster auf einem Querschliff einer eingebetteten Probe von Werkstoff C.

4 Auswertung mechanische Charakterisierung

4.1 Legierungsbestandteile

Abbildung 15 veranschaulicht den Gehalt der wesentlichen Legierungselemente Silizium und Aluminium der Werkstoffe A bis E mit ihren Standardabweichungen. Die untersuchten Werkstoffe weisen ähnliche und für Elektroblech typische Legierungsbestandteile auf.

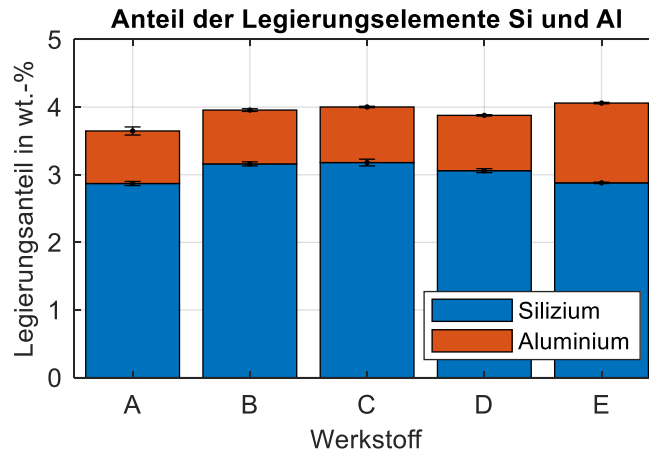


Abbildung 15: Anteile der Legierungselemente Silizium und Aluminium in Gewichtsprozent für Werkstoffe A-E.

Tabelle 3 zeigt eine umfassende Auflistung relevanter Legierungselemente der Werkstoffe A-E unter Angabe der Standardabweichungen der Messungen in Klammern.

Werkstoff	A	B	C	D	E
Si	2.87 (0.03)	3.16 (0.03)	3.18 (0.05)	3.06 (0.03)	2.88 (0.01)
Al	0.777 (0.06)	0.796 (0.02)	0.822 (0.01)	0.818 (0.01)	1.18 (0.01)
Mn	0.193 (0.01)	0.156 (0.00)	0.14 (0.00)	0.263 (0.00)	0.525 (0.00)
S	0.0158 (0.00)	0.0031 (0.00)	0.003 (0.00)	0.0042 (0.00)	0.0034 (0.00)
N	>0.1	0.0188 (0.03)	<0.003	0.0132 (0.01)	0.0202 (0.02)
P	0.0158 (0.00)	0.0123 (0.00)	0.011 (0.00)	0.0079 (0.00)	0.0059 (0.00)
C	<1.5	<1.5	<1.5	<1.5	<1.5
Fe	Rest				

Tabelle 3: Legierungselemente der Werkstoffe A-E mit ihren Standardabweichungen.

4.2 Korngrößen

Abbildung 16 zeigt Gefügeaufnahmen der untersuchten Werkstoffe auf denen deutlich deren Kornstruktur erkennbar ist, sowie die berechneten Mittelwerte der Korngrößen für die Werkstoffe A-E. Die Werkstoffe zeigen deutliche Korngrößenunterschiede zwischen 103 μm bis 177 μm . Auffallend ist, dass die beiden dünnsten Werkstoffe A und E die höchsten Korngrößen besitzen.

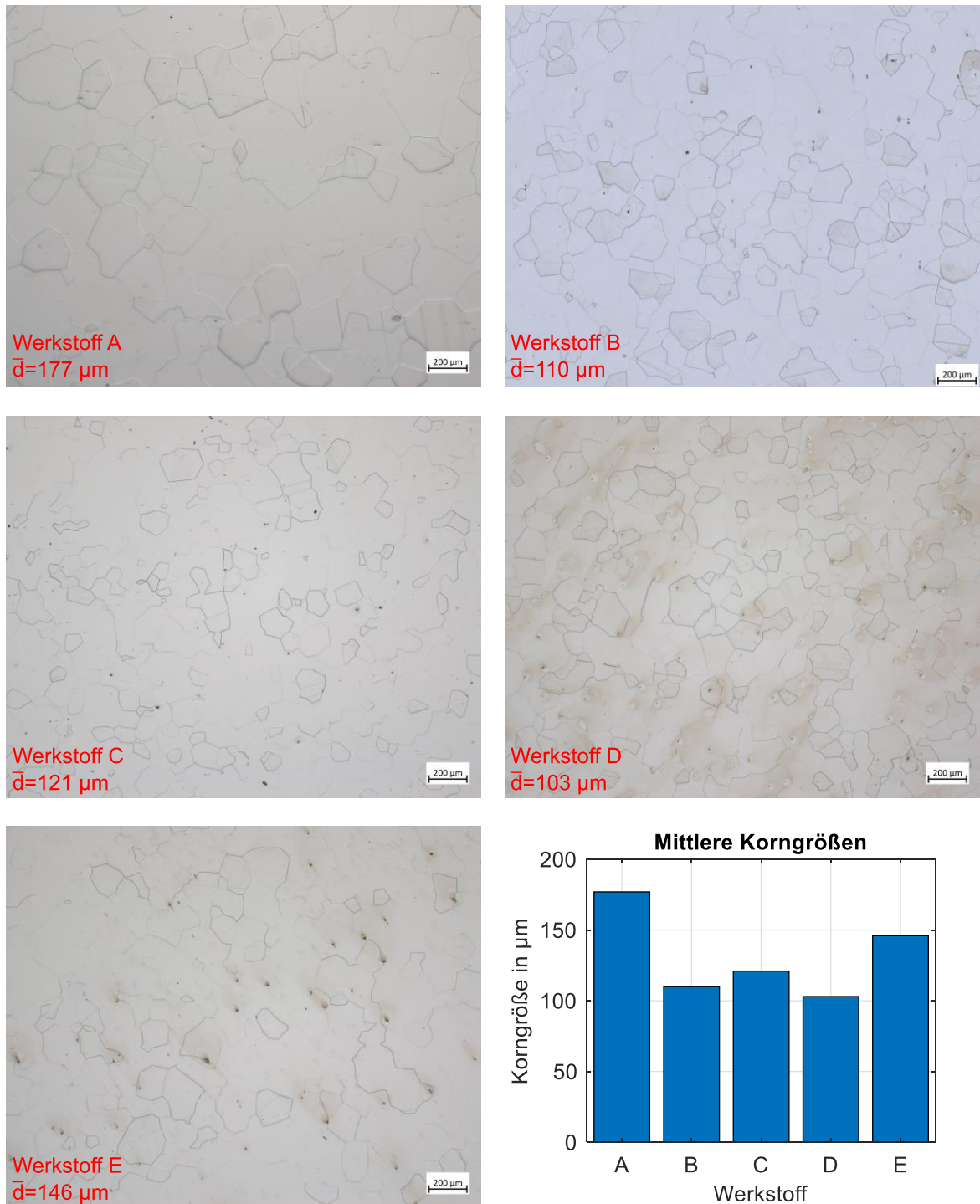


Abbildung 16: Gefügeaufnahmen der Werkstoffe A-E und ihre mittleren Korngrößen.

4.3 Spannungs-Dehnungs-Kurven

Abbildung 17 zeigt die quasistatischen (Dehnrates $0,0125 \text{ mm/s}$) Spannungs-Dehnungs-Kurven der untersuchten Werkstoffe A-E bei einer Zugrichtung von 90° zur Walzrichtung.

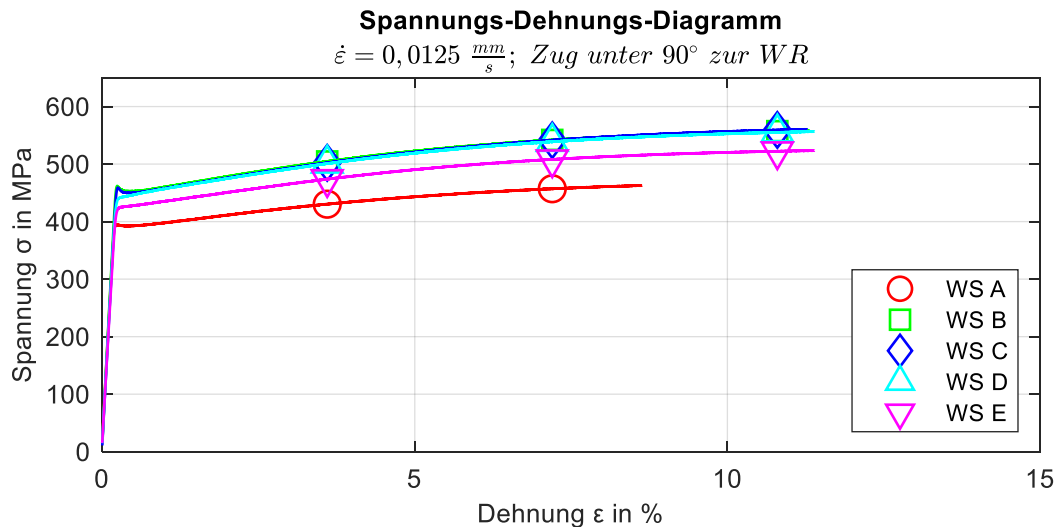


Abbildung 17: Quasistatische Spannungs-Dehnungs-Kurven der Werkstoffe A-E.

Werkstoff A zeigt die geringste Festigkeit der untersuchten Werkstoffe, gefolgt von Werkstoff E. Die Festigkeiten der Werkstoffe B, C und D liegen auf ähnlichem Niveau. Für die verminderte Festigkeit der Werkstoffe A und E können zwei Ursachen identifiziert werden. Zum einen weisen die beiden Werkstoffe A und E die geringsten Gehalte an Silizium auf, welches als Legierungselement die Festigkeit von Stählen erhöht [4]. Zum anderen deutet das besonders große Verhältnis von Korngröße zu Blechdicke bei den Werkstoffen A und E darauf hin, dass hier Größeneffekte zum Tragen kommen. Das sogenannte „surface grain model“ beschreibt den Zusammenhang zwischen dem Verhältnis von Oberflächenkörnern zu innenliegenden Körnern und der Festigkeit einer Probe [5]. Kals et al. haben am Beispiel einer Kupferlegierung nachgewiesen, dass sowohl die Fließspannung zu Beginn der plastischen Deformation einer Probe im Zugversuch als auch die weitere Kaltverfestigung mit zunehmendem Verhältnis von Oberflächenkörnern zu innenliegenden Körnern abnimmt [6]. Das Verhältnis von Oberflächenkörnern zu innenliegenden Körnern wird auch als „Size Factor“ η bezeichnet. Unter der Annahme, dass sowohl die Korngröße als auch die Blechdicke sehr viel kleiner sind als die Länge bzw. Breite der Werkstoffprobe kann η als das Verhältnis von Korngröße zu Blechdicke angenähert werden [7].

In Abbildung 18 ist die Zugfestigkeit R_m über dem Size Factor η für die Werkstoffe A-E aufgetragen, es zeigt sich ein linearer Zusammenhang zwischen Size Factor η und Zugfestigkeit R_m .

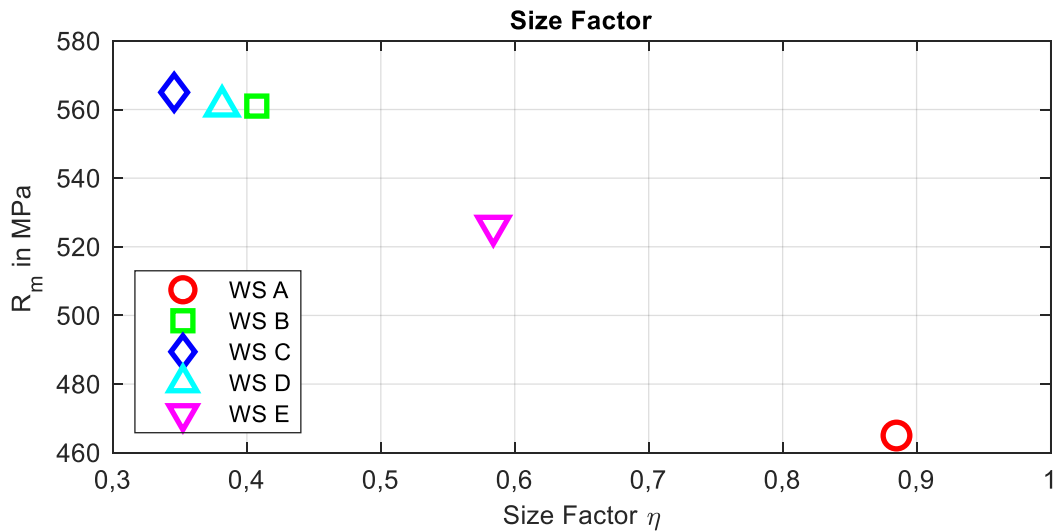


Abbildung 18: Verhältnis von Size Factor η zur Zugfestigkeit für die Werkstoffe A-E.

In Abbildung 19 ist für die Werkstoffe A-E die Abhängigkeit der quasistatischen Spannungs-Dehnungs-Kurven von der Walzrichtung dargestellt. Diese zeigen bei einem Zug unter 0° zur WR geringere Festigkeiten als bei einem Zug unter 45° beziehungsweise 90° zur WR. Auffallend ist, dass die Festigkeit bei Zug unter 45° zur WR nicht das Mittel aus den Festigkeiten bei 0° und 90° zur WR darstellt, sondern für die Werkstoffe B-E in etwa dem Niveau bei Zug unter 90° zur WR entspricht. Bei WS A hingegen liegt die Festigkeit bei einem Zug unter 45° zur WR deutlich näher bei der Festigkeit des Zugs unter 0° zur WR. In Abbildung 20 ist der Einfluss der Dehnrates auf die Spannungs-Dehnungs-Kurven für die verschiedenen Werkstoffe bei Zug unter 90° zur Walzrichtung dargestellt. Für Werkstoffe A-E zeigt sich die für Metalle typische Zunahme der Festigkeit mit der Dehnrates.

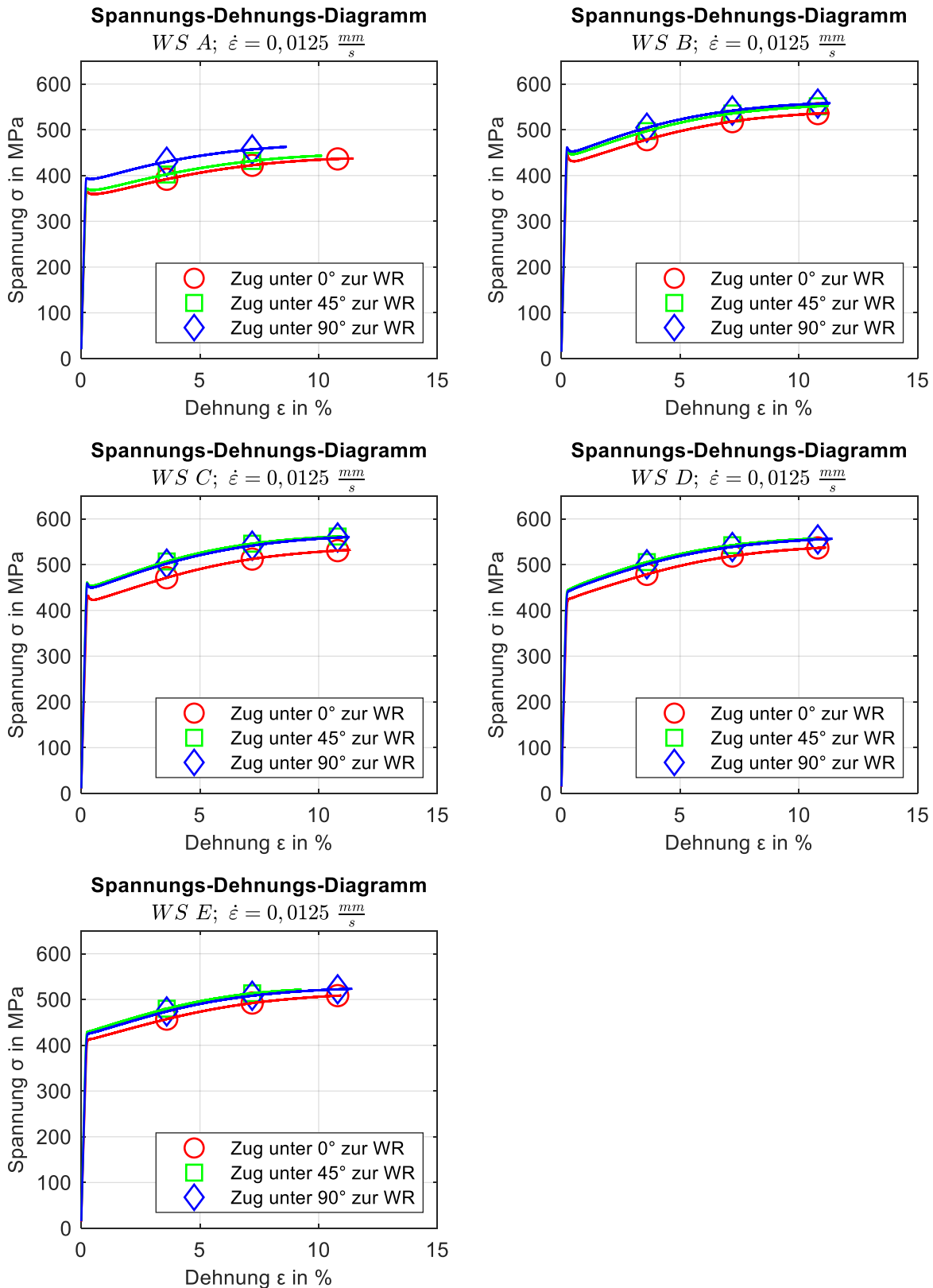


Abbildung 19: Einfluss der Walzrichtung auf die quasistatischen Spannungs-Dehnungs-Kurven der Werkstoffe A-E.

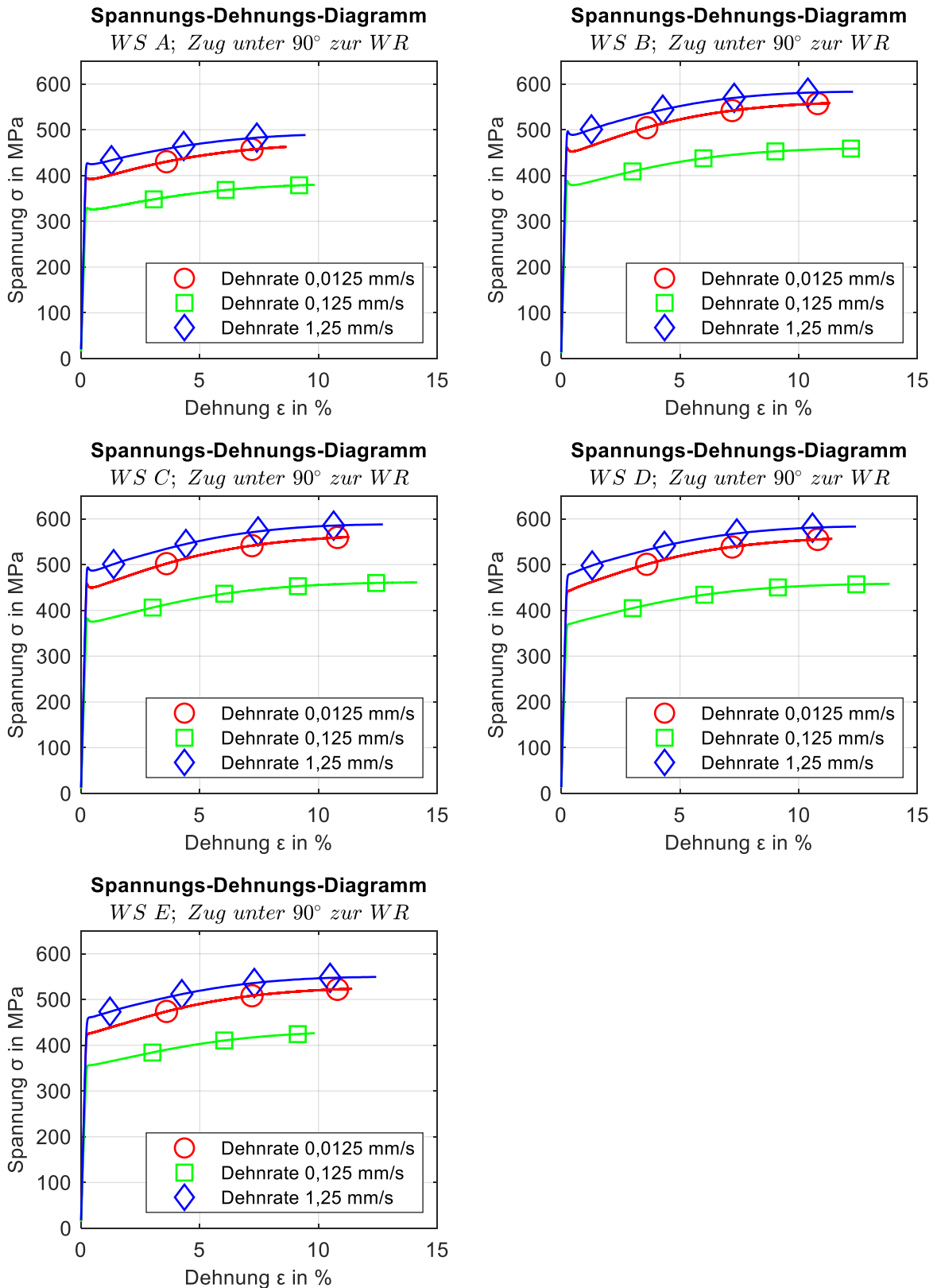


Abbildung 20: Einfluss der Dehnrate auf die Spannungs-Dehnungs-Kurven der Werkstoffe A-E bei Zug unter 90° zur Walzrichtung.

4.4 Schneidkraftkurven und Schneidarbeit

Für die Berechnung der Schneidarbeit werden je Prozessvariation die Schneidarbeiten von drei Hüben gemittelt. In Abbildung 21 sind die Schneidarbeiten für die verschiedenen Werkstoffe in Abhängigkeit der Prozessgröße Schneidspalt dargestellt. Innerhalb dieser Betrachtung sind die Schneidkanten der Werkzeuge stets scharfkantig, ist die Schnittlinie parallel zur Walzrichtung und liegt die Schneidgeschwindigkeit bei 0,03 m/s. Aus den aufgezeichneten Daten lässt sich kein Zusammenhang zwischen der Schneidarbeit und dem Schneidspalt herstellen. Zwar erhöht ein größerer Schneidspalt die Menge an Werkstoff der einer Deformation ausgesetzt ist, andererseits wird der Bruch des Materials früher initiiert, was sich reduzierend auf die Schneidarbeit auswirkt.

In Abbildung 22 sind die Schneidarbeiten der verschiedenen Werkstoffe in Abhängigkeit der Prozessgröße Schneidkantenzustand für einen Schneidspalt von 25 μm dargestellt, während Abbildung 23 ebenfalls die Schneidarbeiten der verschiedenen Werkstoffe in Abhängigkeit der Prozessgröße Schneidkantenzustand, aber für einen Schneidspalt von 7 μm , darstellt. Innerhalb dieser Betrachtung ist die Schnittlinie parallel zur Walzrichtung und liegt die Schneidgeschwindigkeit bei 0,03 m/s. Für alle Werkstoffe zeigt sich bei beiden Schneidspalten eine deutliche Zunahme der Schneidarbeit bei fortschreitendem Werkzeugverschleiß. Generell führen verschlissene Werkzeuge zu einer höheren Werkstoffdeformation im Schneidspalt, was sich in einer erhöhten Schneidarbeit widerspiegelt.

In Abbildung 24 sind die Schneidarbeiten der verschiedenen Werkstoffe in Abhängigkeit der Walzrichtung zur Schnittlinie dargestellt. Innerhalb dieser Betrachtung beträgt der Schneidspalt 25 μm , sind die Schneidkanten der Aktivelemente scharfkantig und liegt die Schneidgeschwindigkeit bei 0,03 m/s. Nachdem die Festigkeit der Werkstoffe im Zugversuch eine leichte Abhängigkeit von der Walzrichtung zeigt, hätte erwartet werden können, dass dies auch auf die Schneidarbeit zutrifft. Aus den aufgezeichneten Daten lässt sich allerdings nicht auf einen Zusammenhang von Schnittlinienorientierung und Schneidarbeit schließen.

In Abbildung 25 sind die Schneidarbeiten der verschiedenen Werkstoffe in Abhängigkeit der Prozessgröße Schneidgeschwindigkeit dargestellt. Innerhalb dieser Betrachtung beträgt der Schneidspalt 25 μm , sind die Schneidkanten der Aktivelemente scharfkantig und beträgt der Winkel zwischen Schnittlinie und Walzrichtung 0° . Sowie auch die Festigkeit der Werkstoffe eine deutliche Zunahme mit der Dehnrage zeigt, nimmt die Schneidarbeit mit höherer Schneidgeschwindigkeit zu.

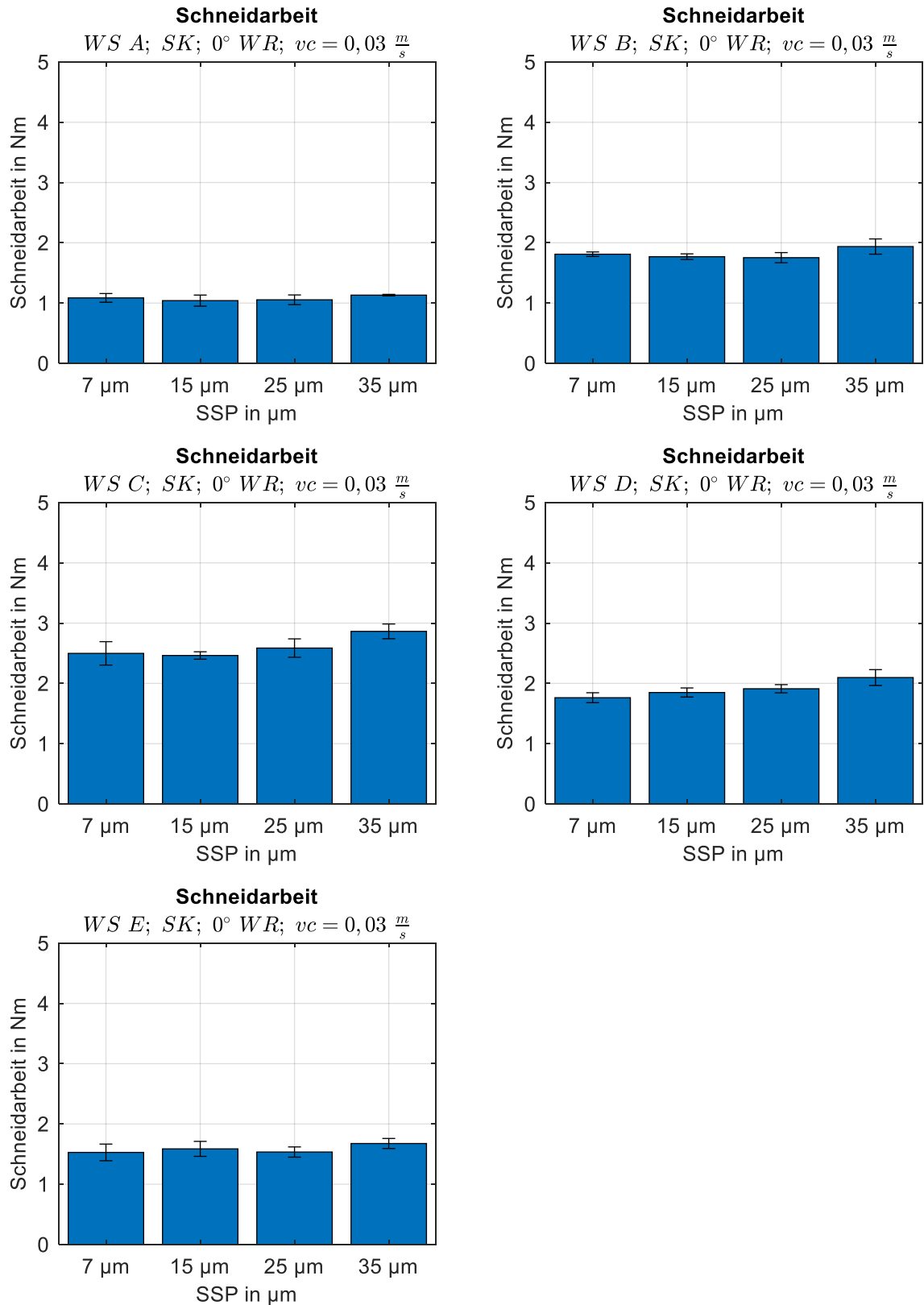


Abbildung 21: Einfluss des Schneidspalts auf die Schneidarbeit beim Scherschneiden.

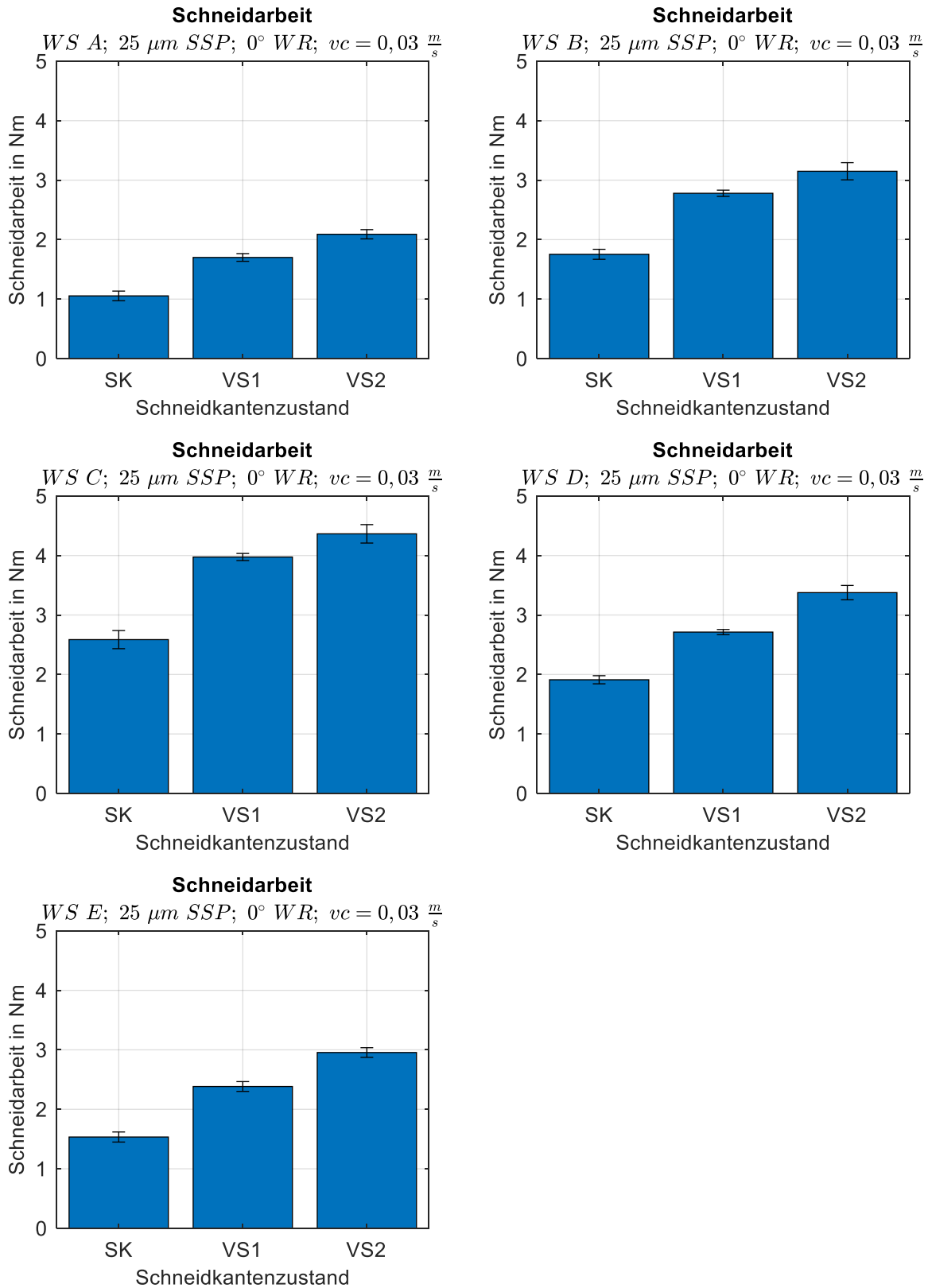


Abbildung 22: Einfluss des Schneidkantenzustands auf die Schneidarbeit beim Scherschneiden.

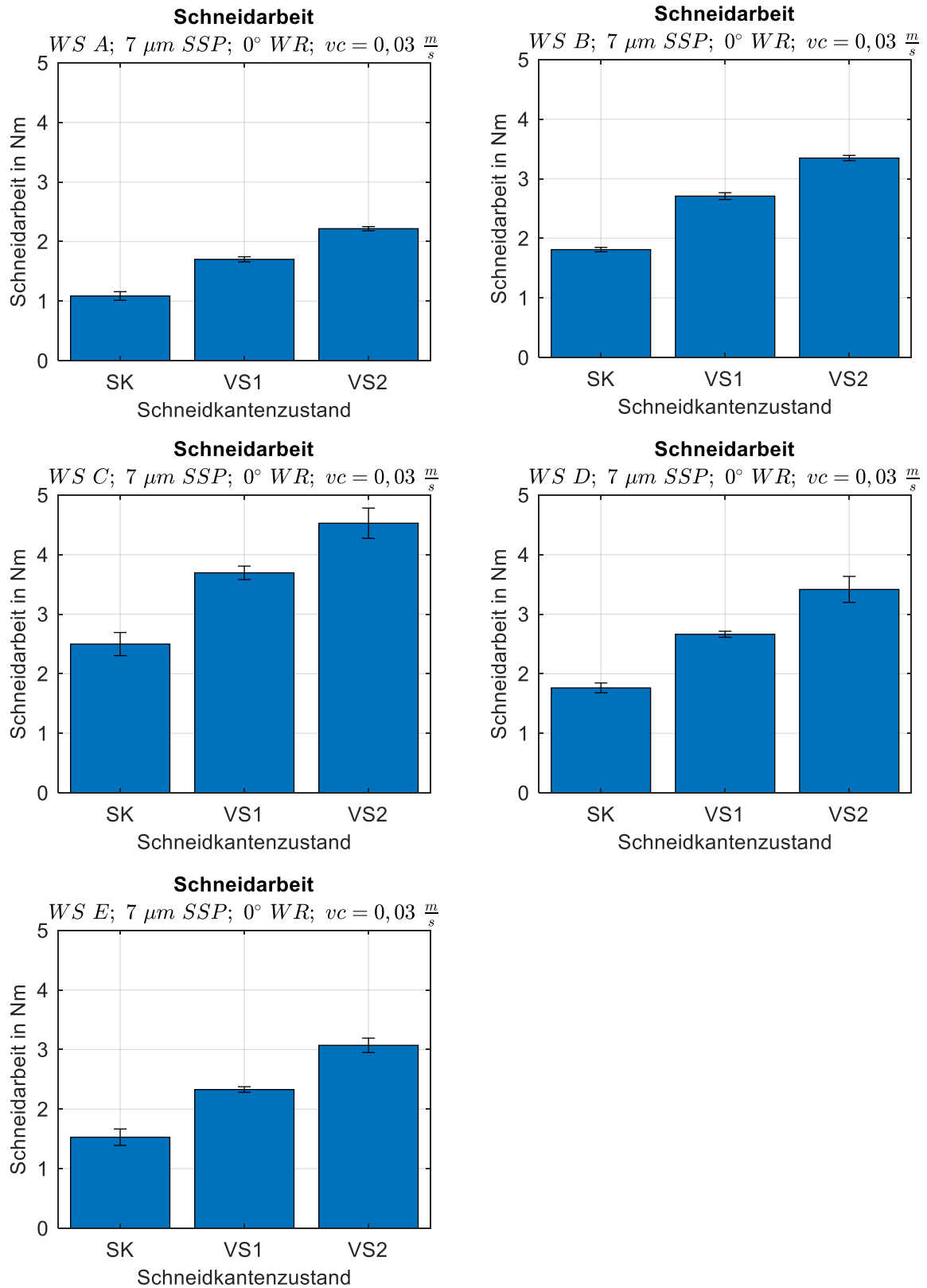


Abbildung 23: Einfluss des Schneidkantenzustands auf die Schneidarbeit beim Scherschneiden mit $7 \mu\text{m}$ Schneidspalt.

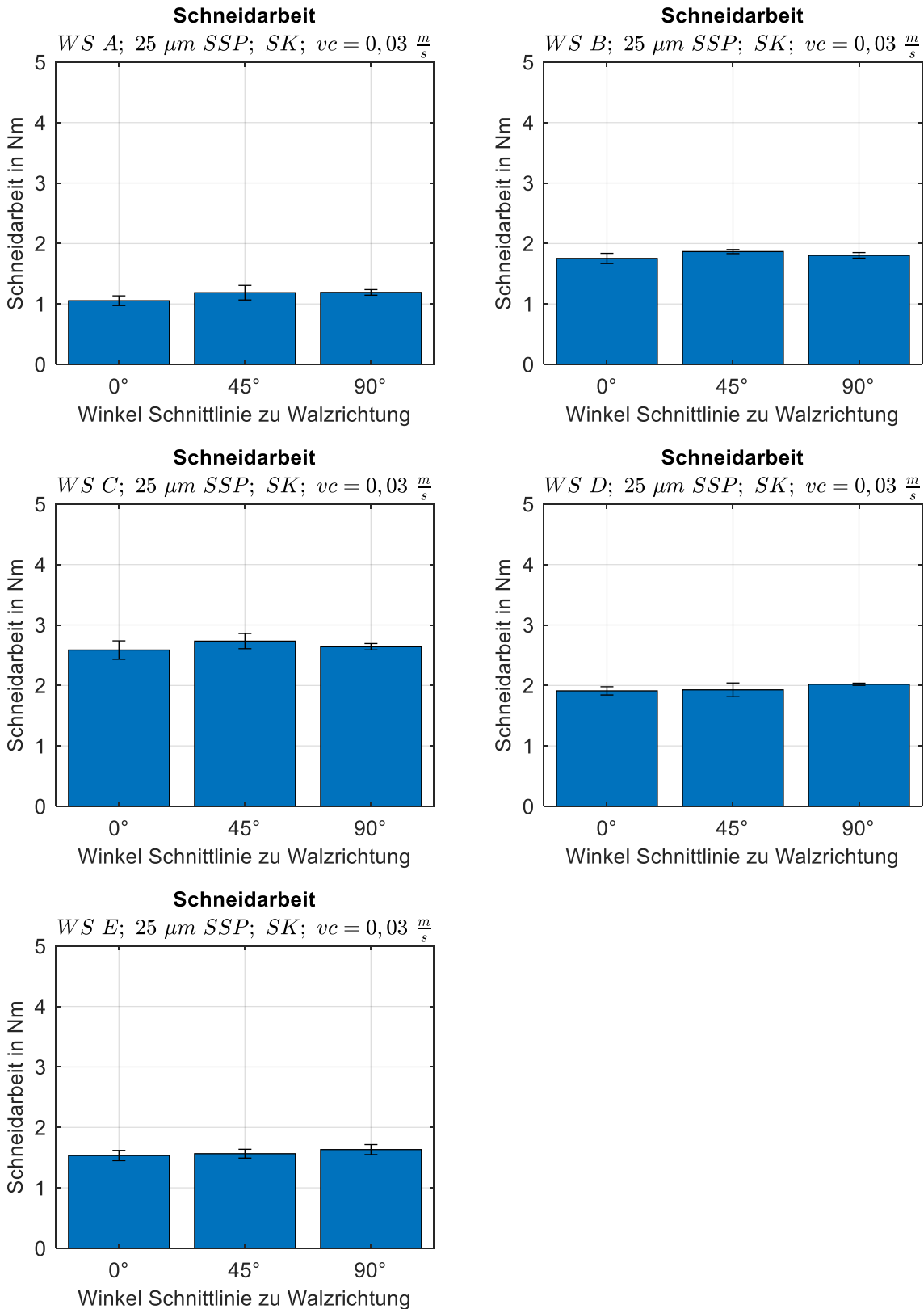


Abbildung 24: Auswirkung des Winkels der Schnittlinie zur Walzrichtung auf die Schneidarbeit beim Scherschneiden.

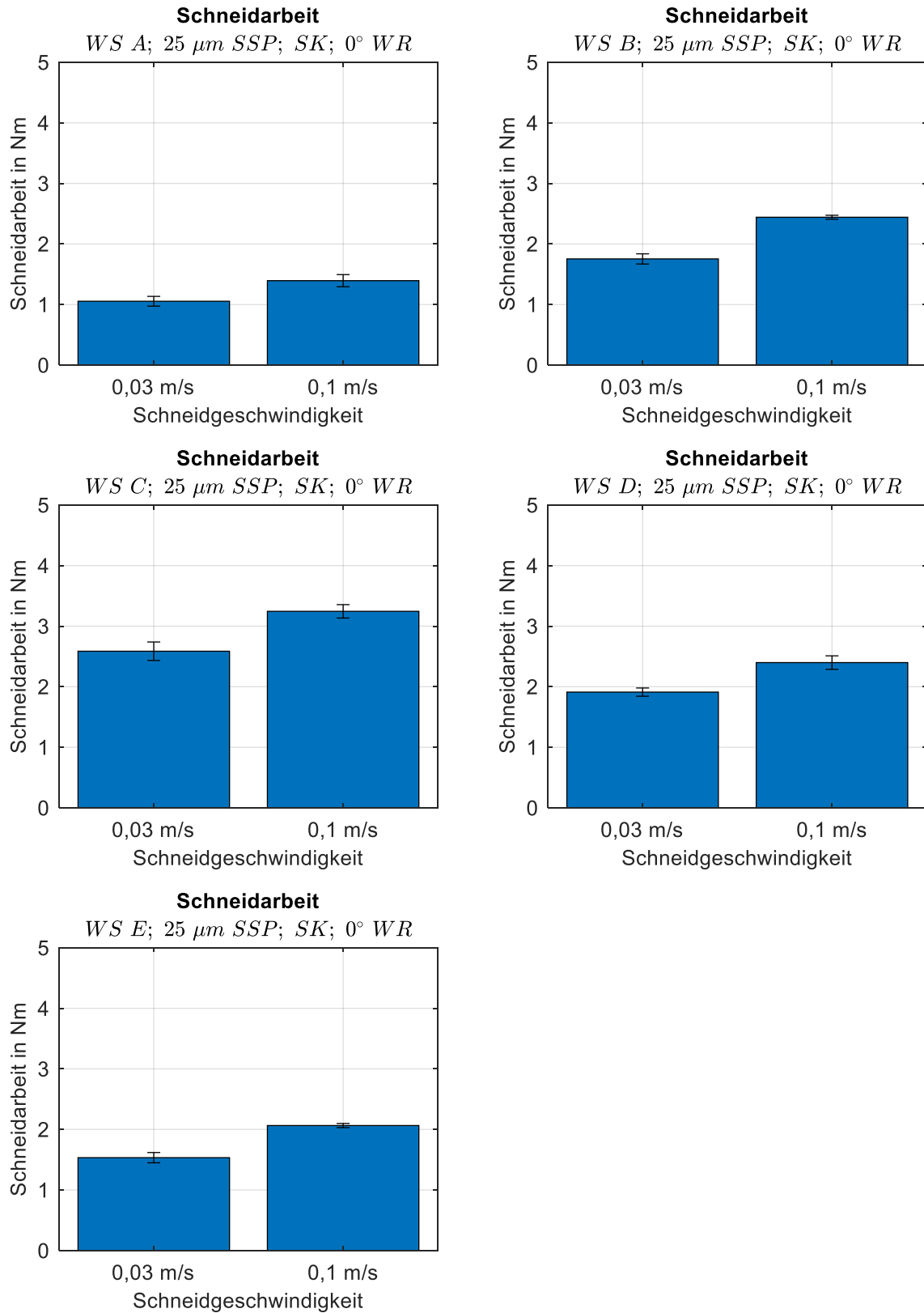


Abbildung 25: Einfluss der Schneidgeschwindigkeit auf die Schneidarbeit beim Scherschneiden.

4.5 Schnittflächengrößen

In diesem Kapitel wird der Einfluss der Prozessgrößen Schneidspalt, Schneidkantenzustand, Orientierung der Schnittlinie zur WR und Schneidgeschwindigkeit auf die Schnittflächen der schergeschnittenen Werkstoffe untersucht. Während der Betrachtung einer Einflussgröße werden die jeweils anderen konstant gehalten (vollfaktorielle Betrachtung).

In Abbildung 26 sind die Schnittflächenkenngrößen der verschiedenen Werkstoffe in Abhängigkeit der Prozessgröße Schneidspalt dargestellt. Innerhalb dieser Betrachtung sind die Schneidkanten der Werkzeuge stets scharfkantig, ist die Schnittlinie parallel zur Walzrichtung und liegt die Schneidgeschwindigkeit bei 0,03 m/s. Der Einfluss des Schneidspalts auf die Schnittflächenkenngrößen der untersuchten Proben ist nicht deutlich. Im direkten Vergleich des größten und kleinsten Schneidspalts lassen sich aber dennoch signifikante Unterschiede erkennen. So führt ein größerer Schneidspalt in der Regel zu einer höheren Kanteneinzugshöhe, geringerem Glattschnittanteil, erhöhtem Bruchanteil und größerer Grathöhe.

In Abbildung 27 sind die Schnittflächenkenngrößen der verschiedenen Werkstoffe in Abhängigkeit der Prozessgröße Werkzeugverschleiß und für einen Schneidspalt von 25 μm dargestellt, während Abbildung 28 ebenfalls die Schnittflächenkenngrößen der verschiedenen Werkstoffe in Abhängigkeit der Prozessgröße Werkzeugverschleiß, aber für einen Schneidspalt von 7 μm , darstellt. Innerhalb dieser Betrachtung ist die Schnittlinie parallel zur Walzrichtung und liegt die Schneidgeschwindigkeit bei 0,03 m/s. Für beide Schneidspalte gilt, dass bei zunehmendem Schneidkantenverschleiß die Kanteneinzugshöhe zu- und die Bruchfläche abnimmt. Der Einfluss des Kantenverschleißes auf den Glattschnittanteil ist bei beiden Schneidspalten weniger deutlich. Vergleicht man jedoch nur den scharfkantigen Zustand mit dem maximal verschlissenen Zustand so steigt die Glattschnitthöhe bei Verwendung verschlissener Aktivelemente mehrheitlich an. Die Grathöhe steigt mit zunehmendem Verschleiß bei beiden Schneidspalten an.

In Abbildung 29 sind die Schnittflächenkenngrößen der verschiedenen Werkstoffe in Abhängigkeit der Walzrichtung zur Schnittlinie dargestellt. Innerhalb dieser Betrachtung beträgt der Schneidspalt 25 μm , sind die Schneidkanten der Aktivelemente scharfkantig und liegt die Schneidgeschwindigkeit bei 0,03 m/s. Da der Einfluss der Walzrichtung auf die Schnittfläche wenig ausgeprägt ist, wird der Fall von 45° zwischen Schnittlinie und Walzrichtung bei der Deutung der Ergebnisse ausgeklammert und wird lediglich die Veränderung der Schnittflächenanteile bei einer Drehung der Walzrichtung von 0° auf 90° betrachtet. Kanteneinzugshöhe, Glattschnittanteil und Grathöhe steigen in der Regel an, während der Bruchflächenanteil abnimmt.

In Abbildung 30 sind die Schnittflächenkenngrößen der verschiedenen Werkstoffe in Abhängigkeit der Schneidgeschwindigkeit dargestellt. Innerhalb dieser Betrachtung beträgt der Schneidspalt $25\ \mu\text{m}$, sind die Schneidkanten der Aktivelemente scharfkantig und beträgt der Winkel zwischen Schnittlinie und Walzrichtung 0° . Bei einer Erhöhung der Schneidgeschwindigkeit von $0,03\ \text{m/s}$ auf $0,1\ \text{m/s}$ nehmen die Kanteneinziehungshöhe und der Glattschnittanteil in der Regel zu und der Bruchflächenanteil ab. Die Grathöhe wird von einer Änderung der Schneidgeschwindigkeit nicht beeinflusst.

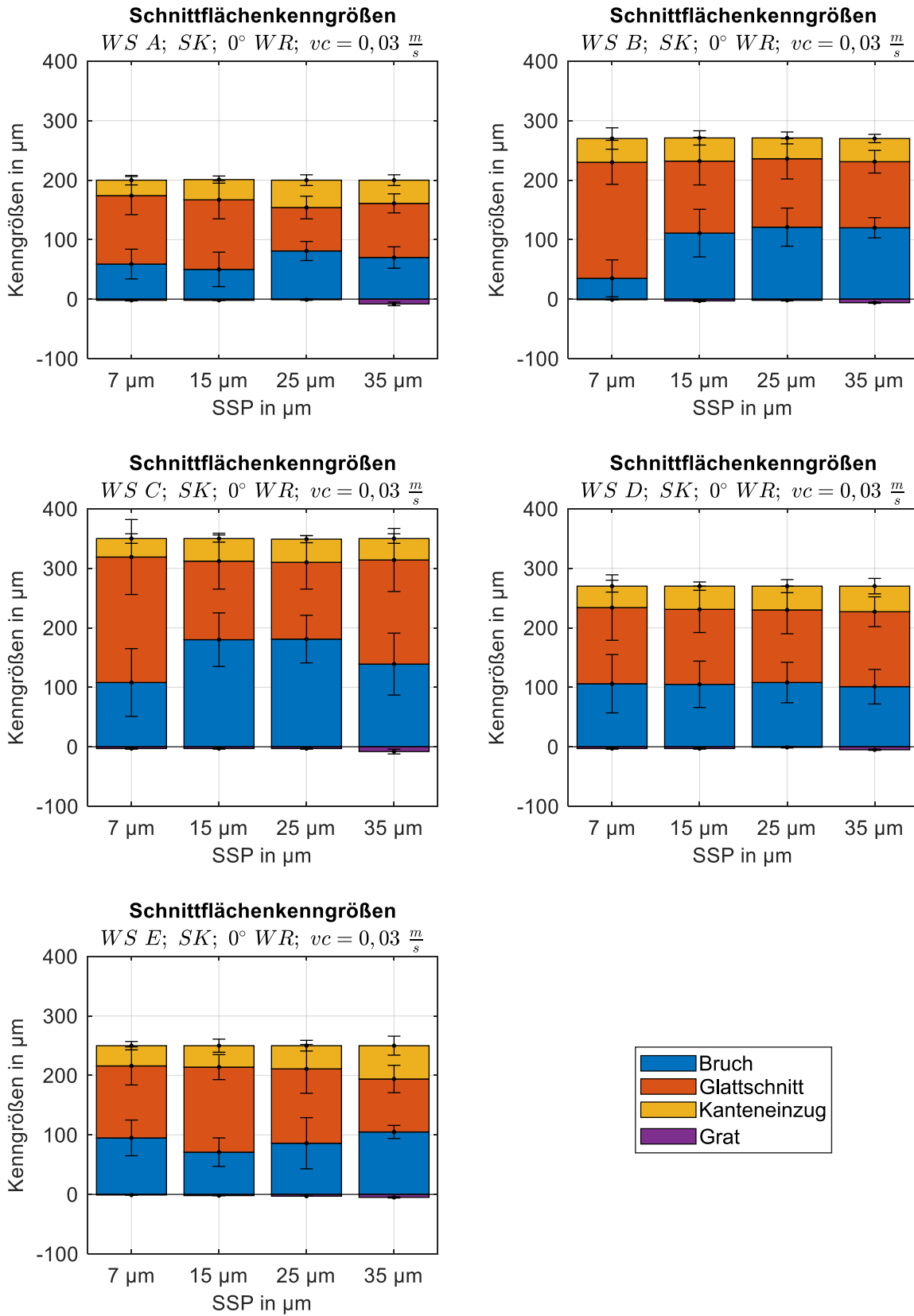


Abbildung 26: Einfluss des Schneidspalts auf die Schnittflächenkenngrößen.

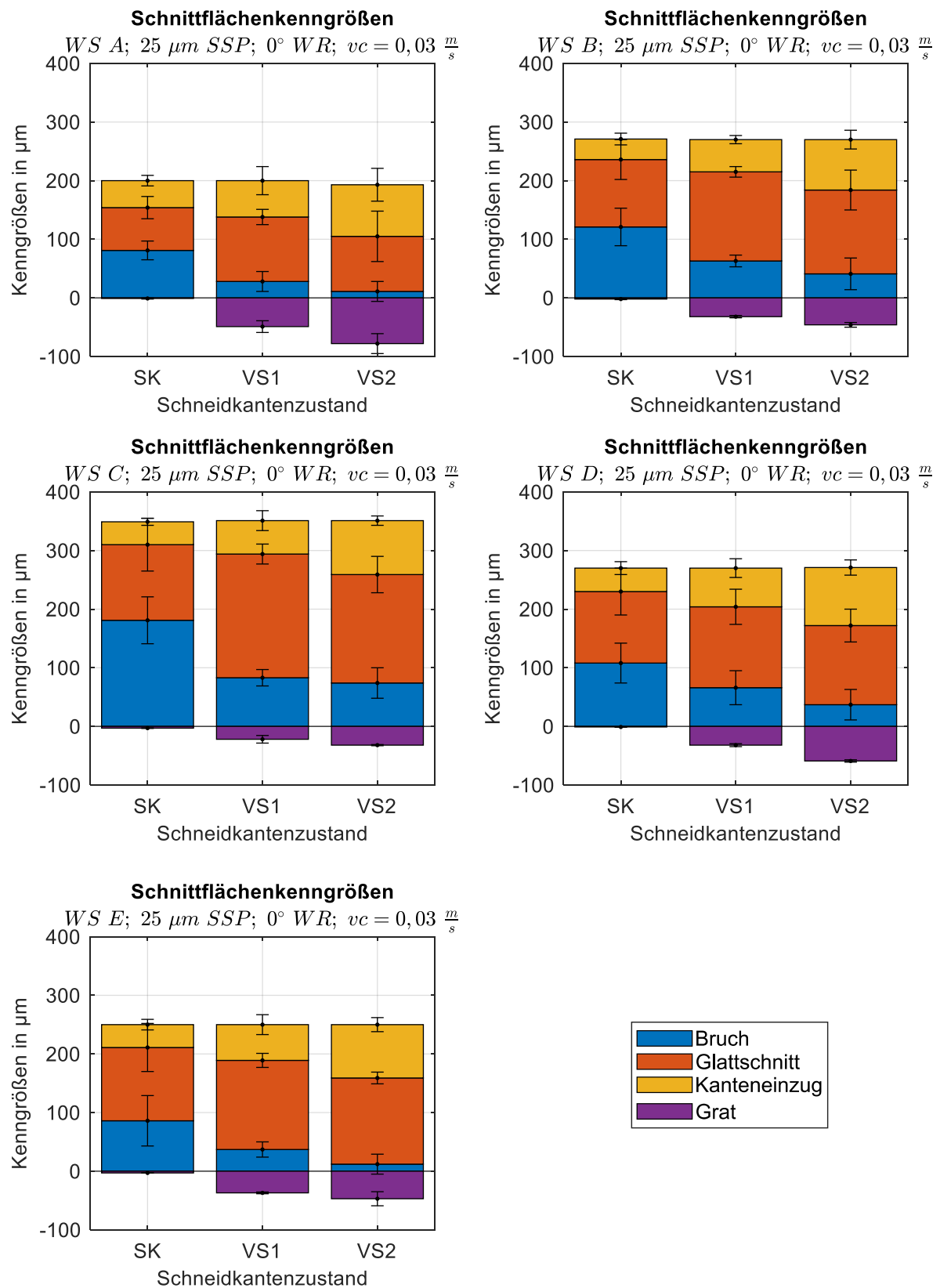


Abbildung 27: Einfluss des Schneidkantenzustands auf die Schnittflächenkenngrößen beim Schneidspalt mit 25 µm SSP.

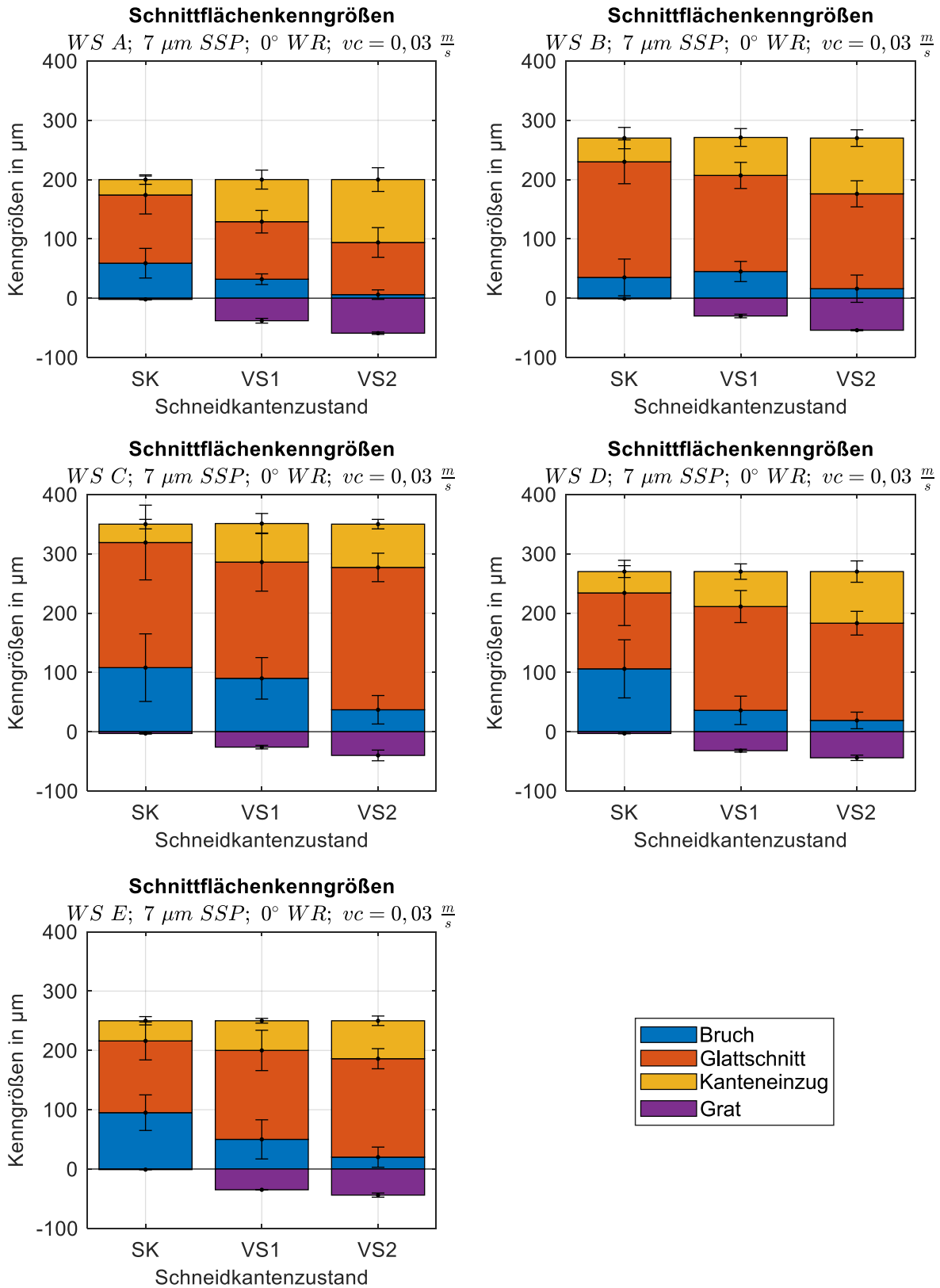


Abbildung 28: Einfluss des Schneidspalts auf die Schnittflächenkenngrößen beim Scherschneiden mit 7 µm SSP.

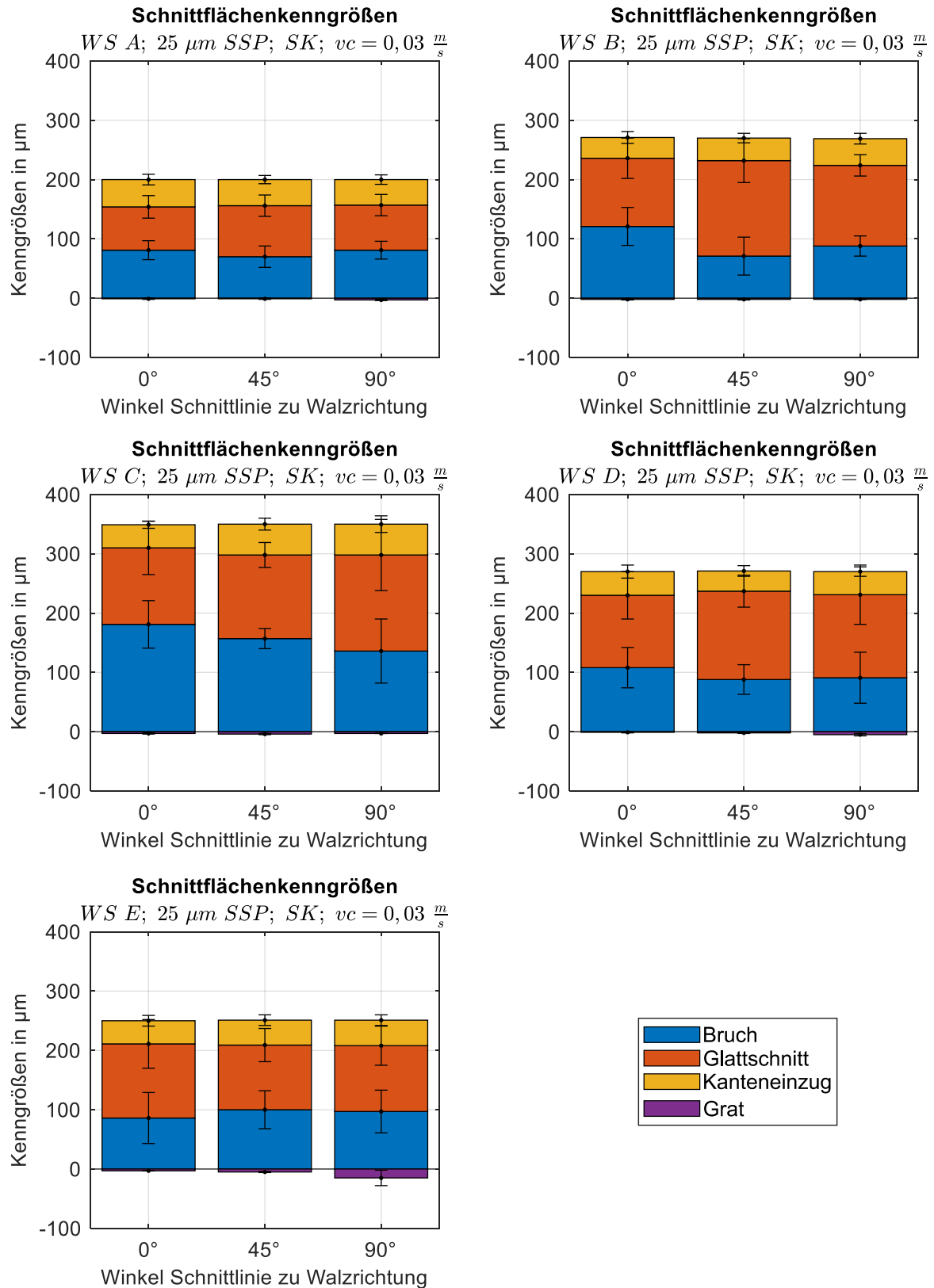


Abbildung 29: Einfluss der Orientierung der Schnittlinie zur Walzrichtung auf die Schnittflächenkenngrößen.

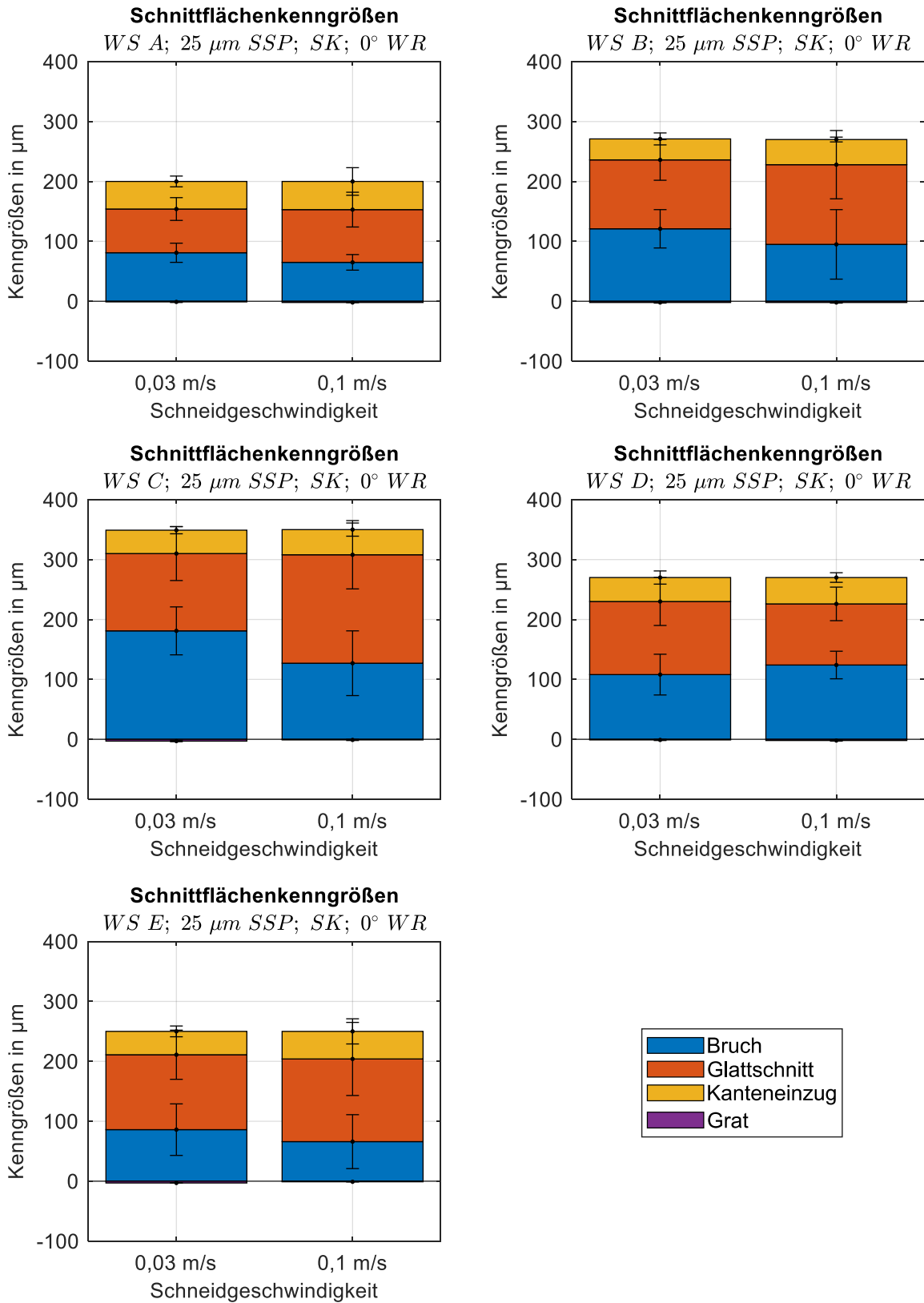


Abbildung 30: Einfluss der Schneidgeschwindigkeit auf die Schnittflächengrößen.

4.6 Aufhärtung der Schnittkanten

In Abbildung 31 sind die Härtemessungen der verschiedenen Werkstoffe in Abhängigkeit der Prozessgröße Schneidspalt dargestellt. Innerhalb dieser Betrachtung sind die Schneidkanten der Werkzeuge stets scharfkantig, ist die Schnittlinie parallel zur Walzrichtung und liegt die Schneidgeschwindigkeit bei 0,03 m/s. Für die Mehrheit der betrachteten Werkstoffe führt eine Erhöhung des Schneidspalts zu einer stärkeren Aufhärtung des Werkstoffs an der Schnittkante.

In Abbildung 32 sind die Härtemessungen der verschiedenen Werkstoffe in Abhängigkeit der Prozessgröße Schneidkantenzustand und für einen Schneidspalt von 25 μm dargestellt, während Abbildung 33 ebenfalls die Härtemessungen der verschiedenen Werkstoffe in Abhängigkeit der Prozessgröße Schneidkantenzustand, aber für einen Schneidspalt von 7 μm , darstellt. Innerhalb dieser Betrachtung ist die Schnittlinie parallel zur Walzrichtung und liegt die Schneidgeschwindigkeit bei 0,03 m/s. Generell lässt sich schlussfolgern, dass verschlissene Schneidkanten zu einer stärkeren Aufhärtung an der Schnittkante führen. In der Regel führt der Schneidkantenzustand VS2 auch noch einmal zu einer Erhöhung der Aufhärtung im Vergleich zu VS1.

In Abbildung 34 sind die Härtemessungen der verschiedenen Werkstoffe in Abhängigkeit des Winkels zwischen Schnittlinie und Walzrichtung dargestellt. Innerhalb dieser Betrachtung beträgt der Schneidspalt 25 μm , sind die Schneidkanten scharfkantig und liegt die Schneidgeschwindigkeit bei 0,03 m/s. Es kann kein signifikanter Einfluss des Winkels zwischen Schnittlinie und Walzrichtung auf die Aufhärtung festgestellt werden.

In Abbildung 35 sind die Härtemessungen der verschiedenen Werkstoffe in Abhängigkeit der Schneidgeschwindigkeit dargestellt. Innerhalb dieser Betrachtung beträgt der Schneidspalt 25 μm , sind die Schneidkanten scharfkantig und beträgt der Winkel zwischen Schnittlinie und Walzrichtung 0° . In der Mehrheit der Fälle führt eine Erhöhung der Schneidgeschwindigkeit zu einer Abnahme der Aufhärtung. Im Vergleich der Prozessgrößen führt Schneidkantenverschleiß allgemein zu der stärksten Aufhärtung, sowohl was die maximal erreichte Vickershärte als auch die Eindringtiefe in den Werkstoff betrifft. Eine Erhöhung des Schneidspalts erhöht zwar die Aufhärtung unmittelbar an der Schnittkante, wirkt sich aber nicht auf die Eindringtiefe in den Werkstoff aus. Ähnlich wie eine Schneidspalterhöhung wirkt sich auch eine Reduktion der Schneidgeschwindigkeit aus, allerdings in geringerem Maß.

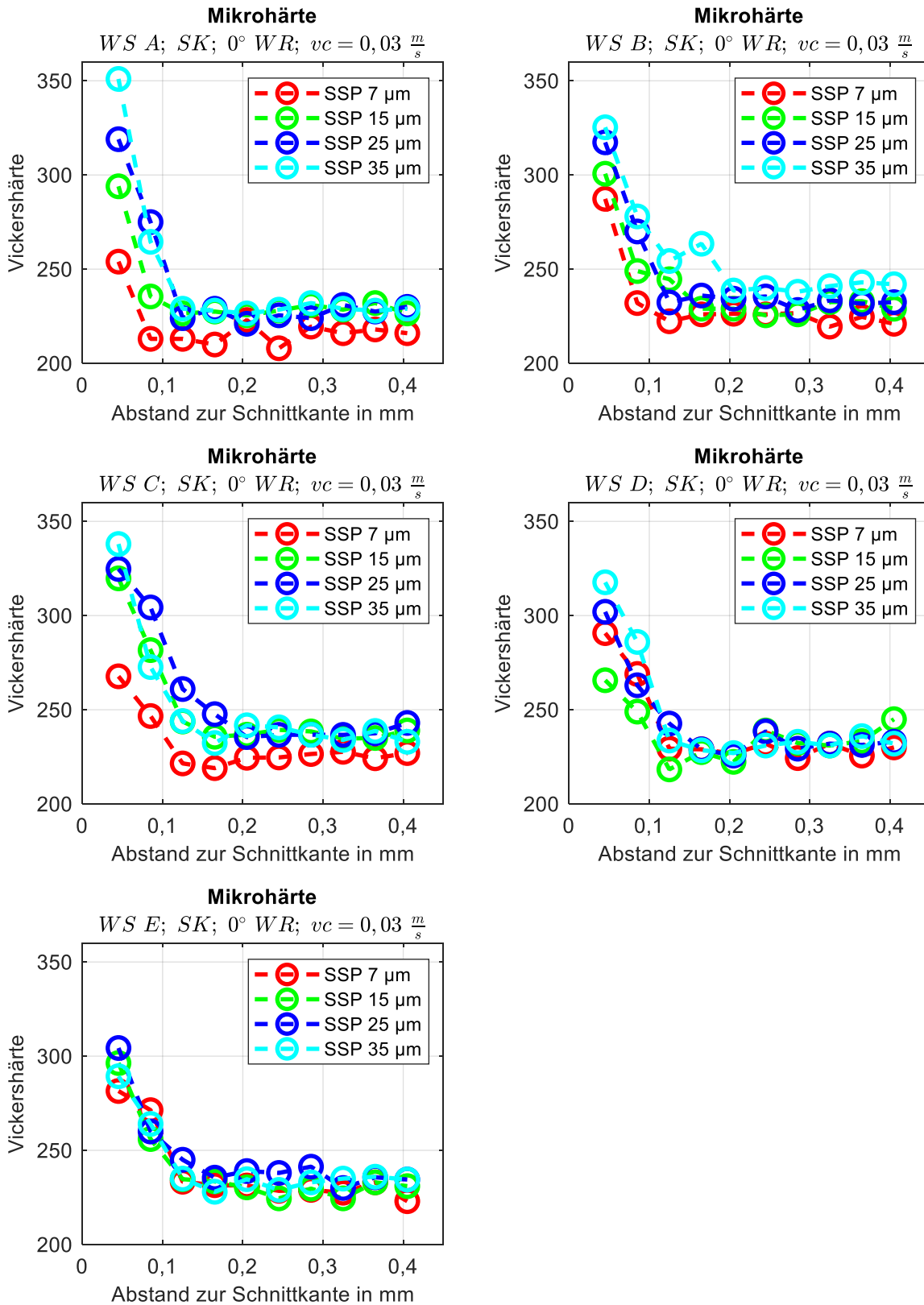


Abbildung 31: Einfluss des Schneidspalts auf die Aufhärtung an der Schnittkante.

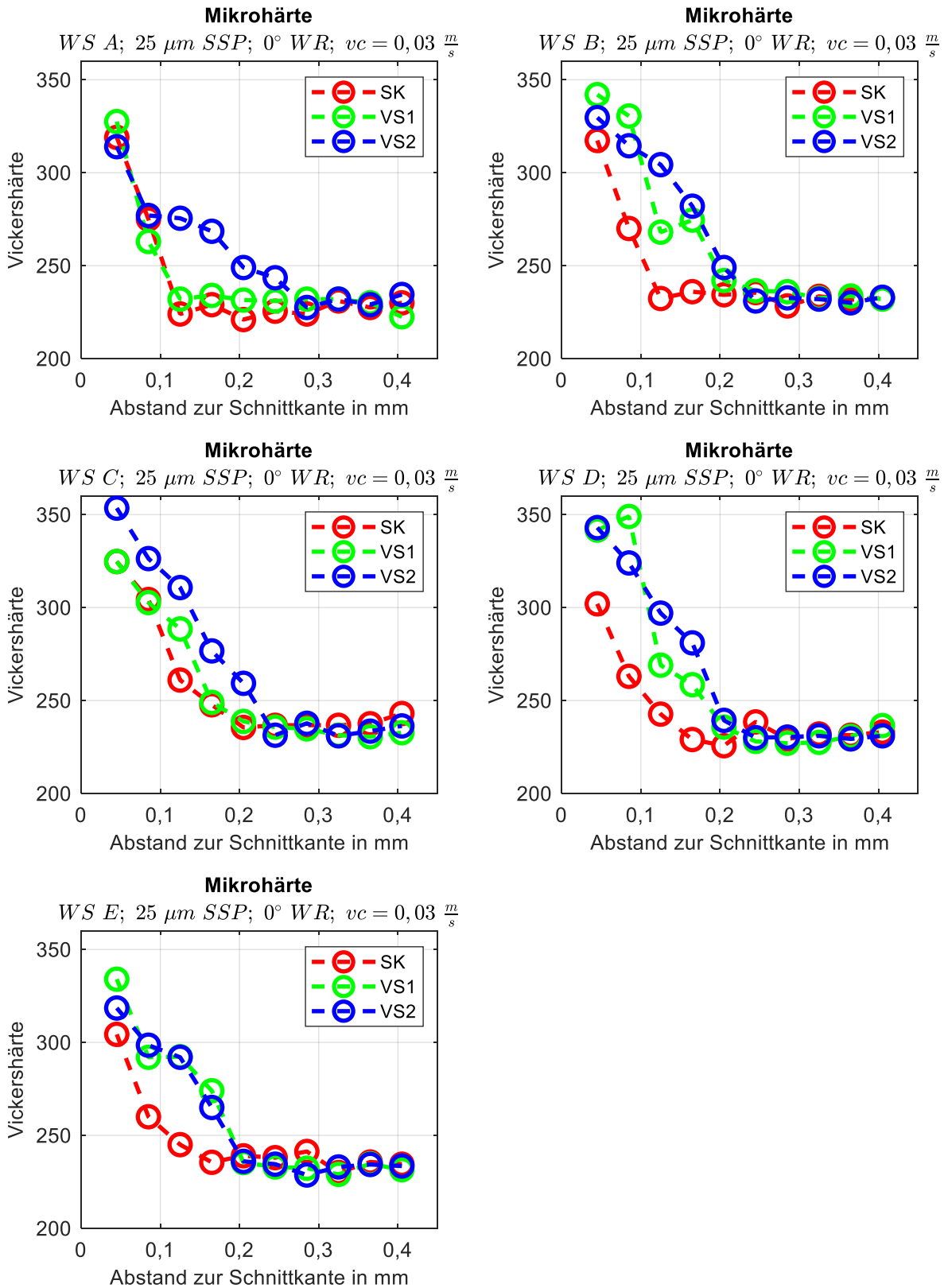


Abbildung 32: Einfluss des Schneidkantenzustands auf die Aufhärtung an der Schnittkante bei 25 μm Schneidspalt.

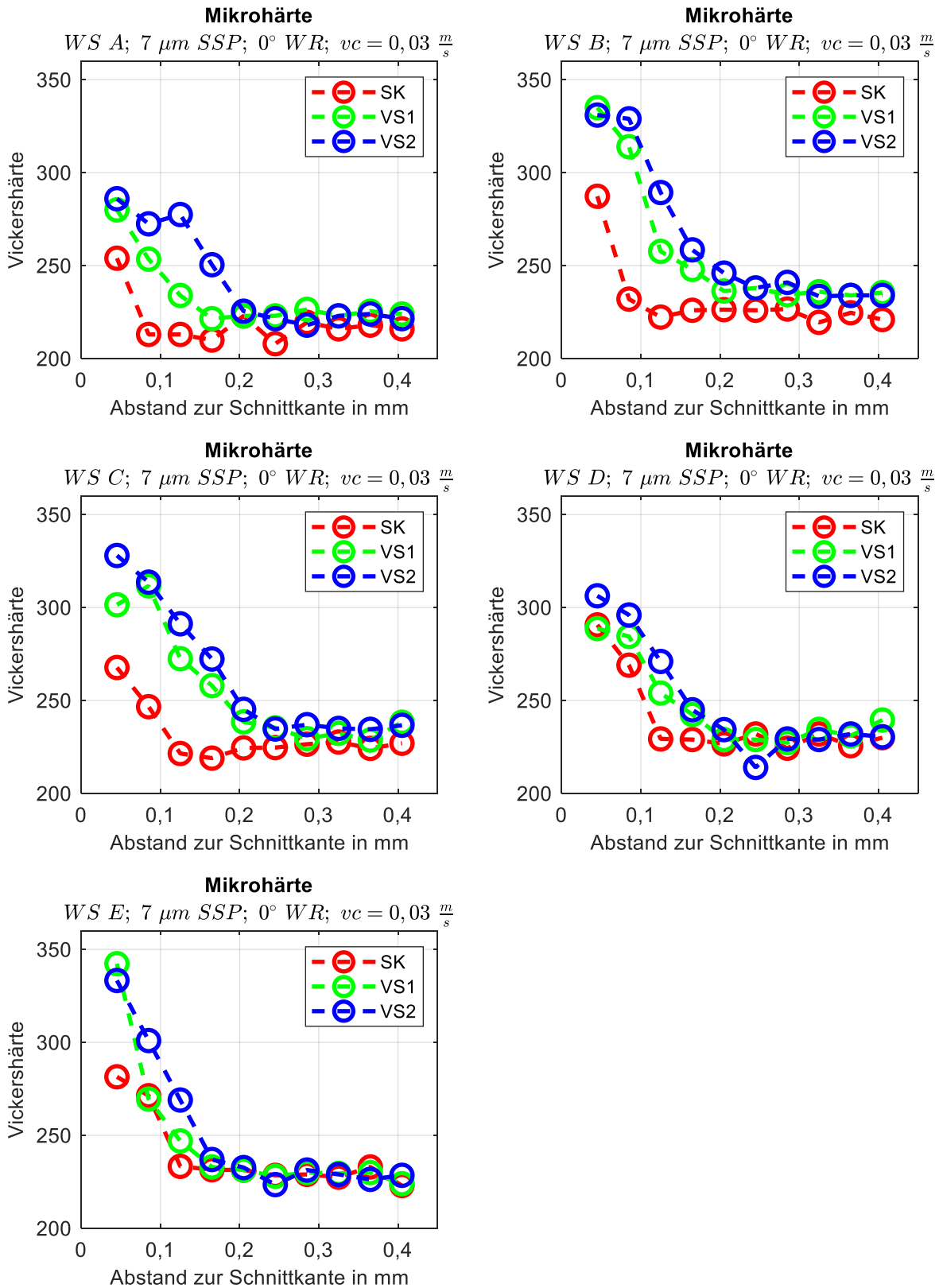


Abbildung 33: Einfluss des Schneidkantenzustands auf die Aufhärtung an der Schnittkante bei $7\ \mu\text{m}$ Schneidspalt.

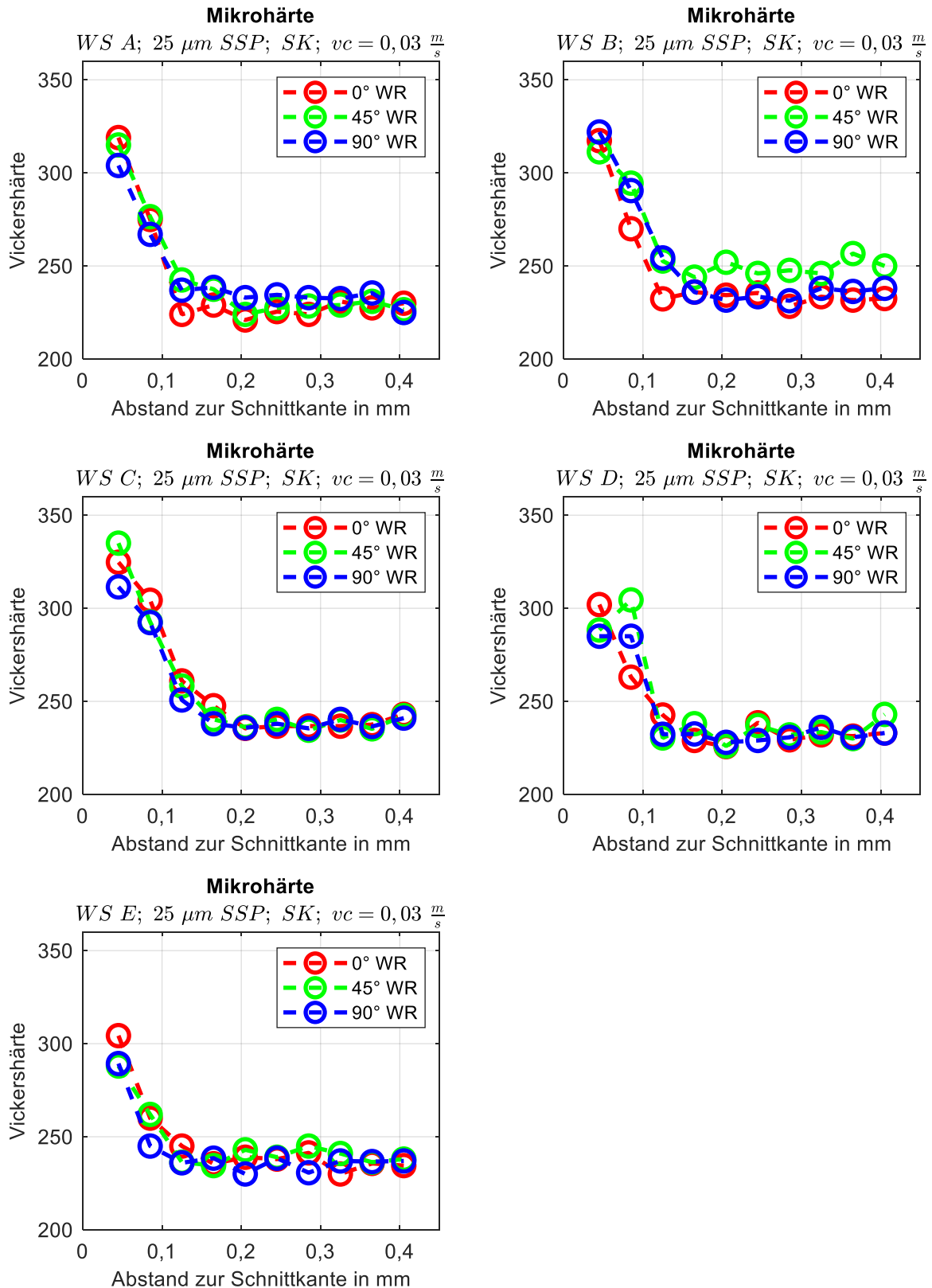


Abbildung 34: Einfluss des Winkels zwischen Schnittlinie und Walzrichtung auf die Aufhärtung an der Schnittkante.

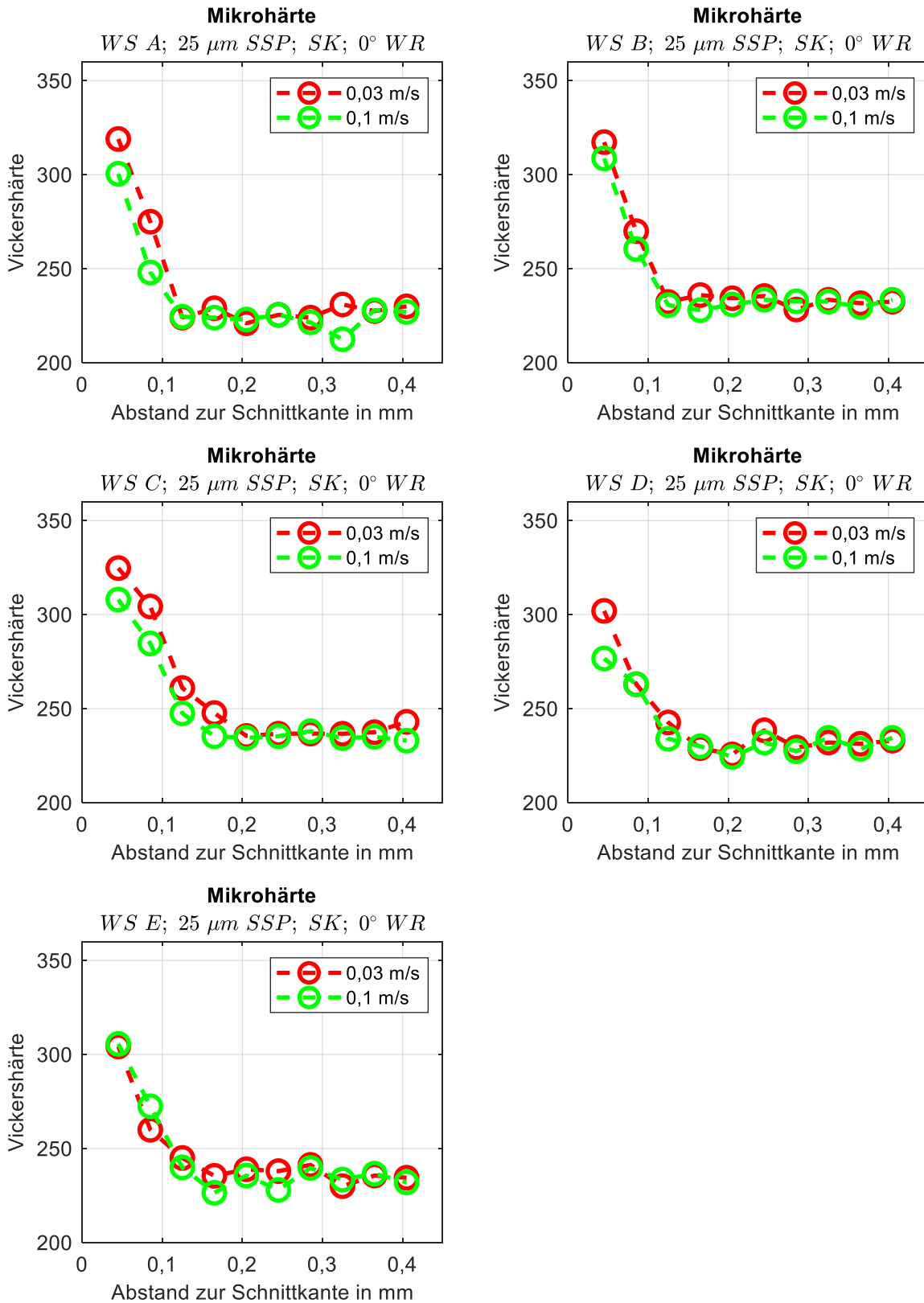


Abbildung 35: Einfluss der Schneidgeschwindigkeit auf die Aufhärtung an der Schnittkante.

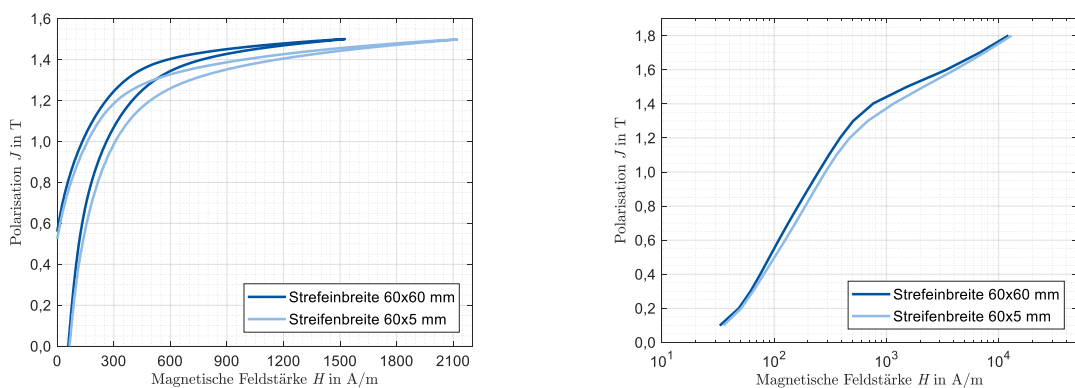
5 Auswertung magnetische Charakterisierung

Für die Auswertung der magnetischen Eigenschaften der untersuchten Werkstoffe wird das Magnetisierungs- und verlustverhalten bei Frequenzen von 50 Hz und 1000 Hz untersucht, so dass mögliche frequenzabhängige Effekte zusätzlich zum Scherschneiden berücksichtigt werden können.

Für die trennsichere Bewertung des Einflusses der mechanischen Bearbeitung und insbesondere des Scherschneidens werden für die Auswertung nur Werkstoffproben mit den Abmessungen 60x5 mm untersucht. Abbildung 36 veranschaulicht den Einfluss der Streifenbreite auf das Magnetisierungsverhalten eines weichmagnetischen Werkstoffs. Der durch Scherschneiden erhöhte mechanische Spannungszustand in der Probe mit der geringeren Streifenbreite 60x5 mm führt zu einer Scherung der Hysterese und somit zu einer geringen Permeabilität. Wesentlich ist jedoch, dass für Polarisierungen J oberhalb von ca. 80 % der Sättigungspolarisation, also im Bereich der Domänenrotation, das Magnetisierungsverhalten von beiden Proben nahezu gleich ist. Für hohe Polarisierungen wird eine Änderung der magnetischen Flussdichte B nicht mehr von den mikromagnetischen Eigenschaften des jeweiligen Werkstoffs bewirkt, sondern nur noch durch eine Erhöhung des anliegenden magnetischen Felds H :

$$\Delta B = \Delta J + \mu_0 \cdot \Delta H \approx \mu_0 \cdot \Delta H.$$

Damit ist der Einfluss der mechanischen Bearbeitung in magnetisch hoch gesättigten Werkstoffen zu vernachlässigen (vgl. Abbildung 36 b)) [8].



- a) Hysterese für verschiedene Streifenbreiten bis zur Maximalpolarisation $J_{\max} = 1,5$ T. b) Magnetisierungskennlinie für verschiedene Streifenbreiten.

Abbildung 36: Vergleich der Magnetisierungen für unterschiedliche Streifenbreiten.

Nach der exemplarischen Vorstellung und Auswertung der Veränderung der magnetischen Eigenschaften unter Berücksichtigung aller Scherschneidparameter für den Werkstoff C folgt ein Werkstoffvergleich unter Verwendung von Feld- und Verlustfaktoren [9]:

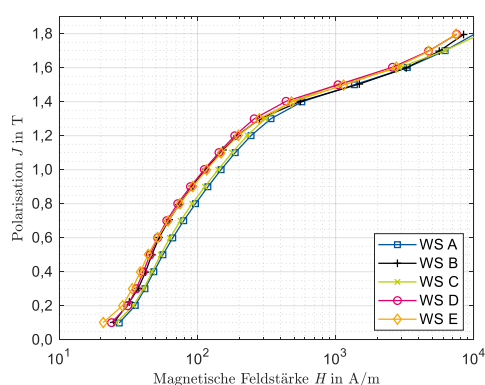
$$C_H(J, f) = \frac{H_{\text{Zustand}}(J, f)}{H_{\text{ref}}(J, f)} \quad \text{und} \quad C_P(B, f) = \frac{P_{\text{Zustand}}(B, f)}{P_{\text{ref}}(B, f)}.$$

Ein Faktor $C_H(J, f) > 1$ bedeutet hierbei, dass der jeweilige Bearbeitungszustand des Werkstoffs dazu führt, dass eine höhere magnetische Feldstärke im Vergleich zur Referenzprobe notwendig ist, um die gleiche Polarisation bei gleicher Magnetisierungsfrequenz hervorzurufen. Der Verlustfaktor $C_P(B, f)$ gibt an, ob sich im Vergleich zur Referenzprobe bei gleicher Magnetisierungsfrequenz und magnetischer Flussdichte die Ummagnetisierungsverluste durch einen Bearbeitungszustand erhöhen oder verringern.

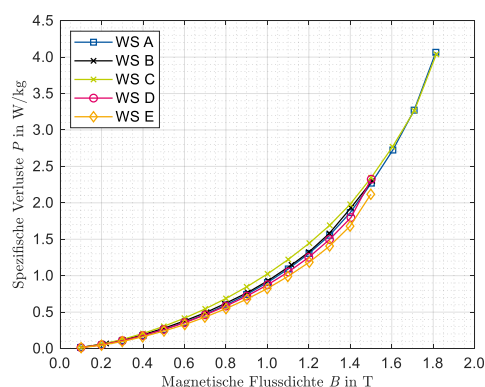
5.1 Vergleich der magnetischen Eigenschaften der erodierten Werkstoffproben

Abbildung 37 und Abbildung 38 zeigen das Magnetisierungsverhalten der untersuchten Werkstoffe auf logarithmischer Achse und die spezifischen Ummagnetisierungsverluste bei 50 Hz und 1000 Hz. Die Werkstoffproben sind dabei erodiert, sodass der Einfluss mechanischer Bearbeitung zu vernachlässigen ist.

Bei geringen Magnetisierungsfrequenzen unterscheiden sich bei den Werkstoffen die spezifischen Verluste unwesentlich. Eine Differenz in der Verlustleistung ergibt sich durch die Höhe der korngößenabhängigen Hystereseverluste; Werkstoffe mit großen Körnern haben im Vergleich geringere Ummagnetisierungsverluste [10]. Bei hohen Frequenzen ist der Einfluss der Blechdicke dominant. Durch die quadratische Abhängigkeit der Wirbelstromverluste von der Werkstoffdicke d zeigt Werkstoff E erwartungsgemäß die höchsten spezifischen Verluste. Die Ummagnetisierungsverluste der übrigen Werkstoffe sinken entsprechend ihrer geringeren Dicke. Die entstehende Verlustleistung führt zu einer charakteristischen Auswölbung der Hysteresekurve, sodass die Magnetisierbarkeit abnimmt. Neben der Blechdicke hat der Legierungsanteil mit Silizium und damit die spezifische Leitfähigkeit κ des Werkstoffs einen signifikanten Einfluss auf die Ummagnetisierungsverluste.

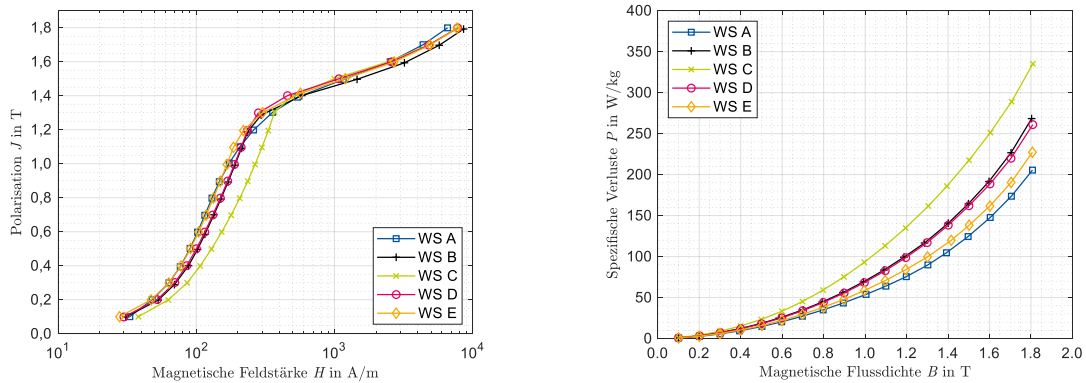


a) Vergleich Magnetisierungsverhalten.



b) Vergleich Verlustverhalten.

Abbildung 37: Vergleich der magnetischen Eigenschaften der untersuchten Werkstoffe bei einer Magnetisierungsfrequenz von 50 Hz.



a) Vergleich Magnetisierungsverhalten.

b) Vergleich Verlustverhalten.

Abbildung 38: Vergleich der magnetischen Eigenschaften der untersuchten Werkstoffe bei einer Magnetisierungsfrequenz von 1000 Hz.

5.2 Auswertung der magnetischen Schädigung für WS C

5.2.1 Veränderung Schneidspalt

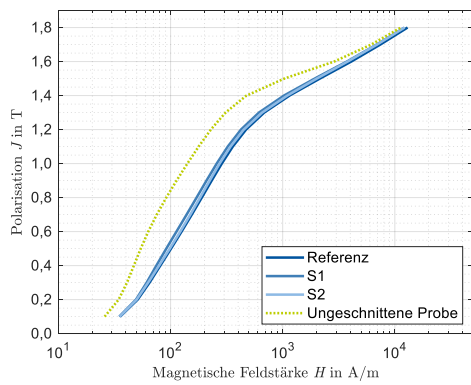
Zuordnung	Schneidspalt			Schneidkante	Walzrichtung	Schneidgeschwindigkeit
	7 μm	25 μm	35 μm	Scharf	0°	0,03 m/s
Referenz		X		X	X	X
S1	X			X	X	X
S2			X	X	X	X

Tabelle 4: Übersicht der Variationen des Scherleidparameters: Schneidspalt.

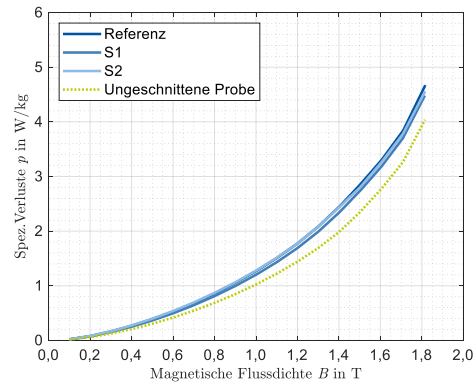
Tabelle 4 zeigt die die Variationen des Schneidspalts (S1 und S2) im Vergleich zur definierten Referenz für einen Schneidspalt von SSP = 25 μm . Die übrigen Scherschneidparameter bleiben zur Bewertung des Einflusses eines kleineren (S1) und größeren (S2) Schneidspalts gleich.

In Abbildung 39 sind die magnetischen Eigenschaften für eine Variation des Schneidspalts dargestellt. Die gestrichelte Kurve zeigt dabei im Vergleich das Magnetisierungsverhalten bzw. die spezifischen Verluste der erodierten Werkstoffprobe. Es folgt zum einen das Ergebnis, dass grundsätzlich die mechanische Bearbeitung die Permeabilität signifikant reduziert und die Umagnetisierungsverluste erhöht und zum anderen, dass ein im Vergleich geringerer Schneidspalt die magnetische Schädigung reduziert.

Abbildung 40 zeigt den entsprechenden Vergleich bei einer Magnetisierungsfrequenz von 1000 Hz mit qualitativ vergleichbaren Ergebnissen. Damit lässt sich keine Frequenzabhängigkeit der magnetischen Schädigung in Folge einer Veränderung des Schneidspalts feststellen.

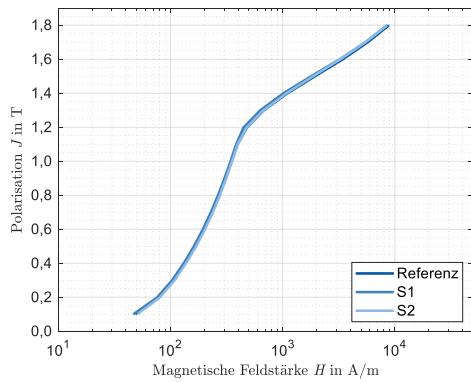


a) Magnetisierungsverhalten.

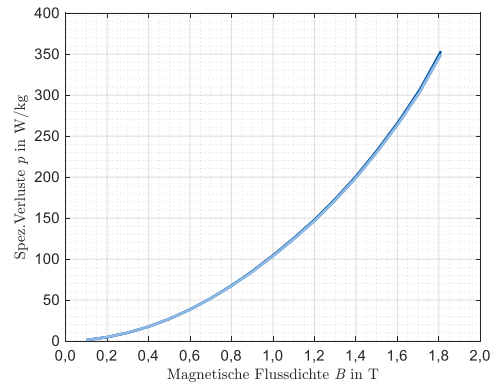


b) Verlustverhalten.

Abbildung 39: Magnetische Eigenschaften bei Variationen des Schneidspalts und einer Magnetisierungsfrequenz von 50 Hz.



a) Magnetisierungsverhalten.



b) Verlustverhalten.

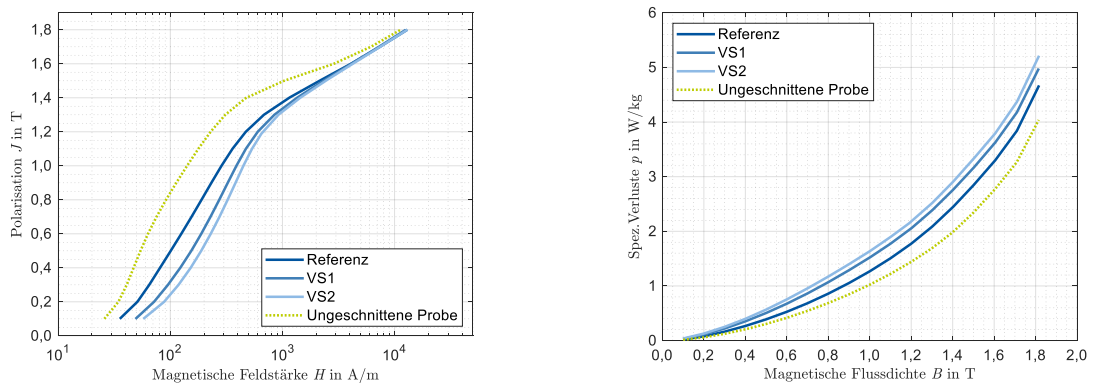
Abbildung 40: Magnetische Eigenschaften bei Variationen des Schneidspalts und einer Magnetisierungsfrequenz von 1000 Hz.

5.2.2 Veränderung Verschleißzustand

Zuordnung	Schneidspalt	Schneidkante		Walzrichtung	Schneidgeschwindigkeit
	25 μm	Scharf	VS 1		
Referenz	X	X		0°	0,03 m/s
VS 1	X		X	X	X
VS 2	X			X	X

Tabelle 5: Übersicht der Variationen des Scherleidparameters: Verschleißzustand.

Tabelle 5 zeigt die Variationen des Schneidkantenverschleißes (VS1 und VS2) im Vergleich zur definierten Referenz für einen festen Schneidspalt und scharfer Schneidkante. Die übrigen Scherschneidparameter bleiben zur Bewertung des Einflusses eines zunehmenden Schneidkantenverschleißes von VS1 zu VS2 gleich. Abbildung 41 zeigt den Vergleich der Magnetisierungscharakteristik und der spezifischen Verluste für zunehmenden Schneidkantenverschleiß.

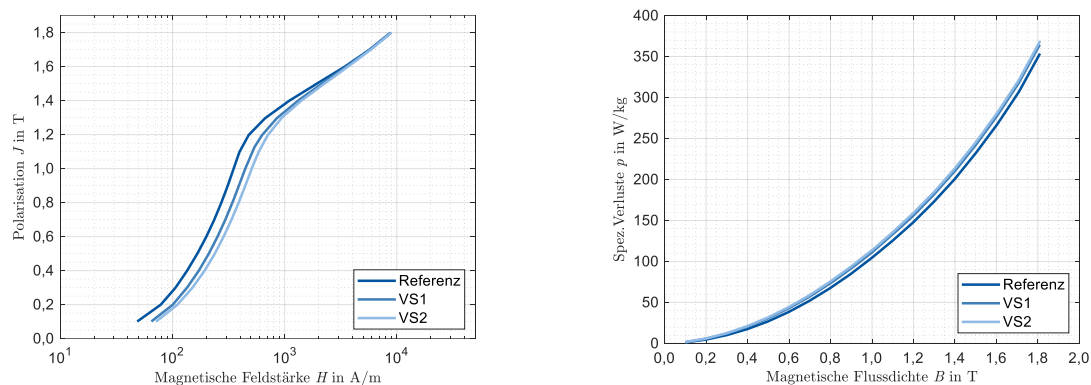


a) Magnetisierungsverhalten.

b) Verlustverhalten.

Abbildung 41: Magnetische Eigenschaften bei Variationen des Schneidkantenverschleißes und einer Magnetisierungsfrequenz von 50 Hz.

Die mechanische Bearbeitung mit verschlissenen Schneidaktivelementen führt zu einer Verringerung der Permeabilität und einem Anstieg der Ummagnetisierungsverluste. Eine Zunahme des Schneidkantenverschleißes (VS2) korreliert mit einer Verschlechterung der magnetischen Eigenschaften. Weiterhin ist der beobachtete Effekt qualitativ nicht abhängig von der Magnetisierungsfrequenz (vgl. Abbildung 42).



a) Magnetisierungsverhalten.

b) Verlustverhalten.

Abbildung 42: Magnetische Eigenschaften bei Variationen des Schneidkantenverschleißes und einer Magnetisierungsfrequenz von 1000 Hz.

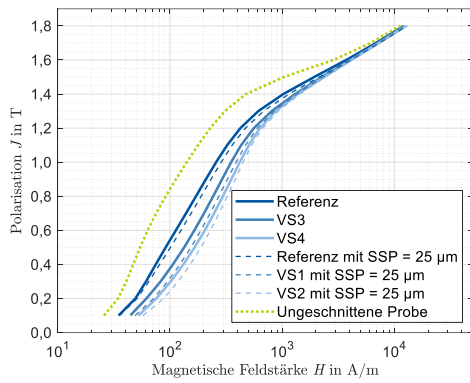
5.2.3 Veränderung Verschleißzustand bei kleinem Schneidspalt

Zuordnung	Schneidspalt	Schneidkante			Walzrichtung	Schneidgeschwindigkeit
	7 μm	Scharf	VS 1	VS 2	0°	0,03 m/s
Referenz	X	X			X	X
VS 3	X		X		X	X
VS 4	X			X	X	X

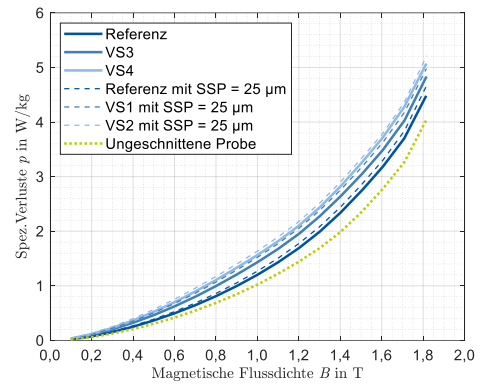
Tabelle 6: Übersicht der Variationen des Scherleidparameters: Verschleißzustand bei kleinem Schneidspalt.

Tabelle 6 zeigt die Variationen des Schneidkantenverschleißes (VS3 und VS4) im Vergleich zur definierten Referenz für einen festen Schneidspalt und scharfer Schneidkante. Im Vergleich zur Auswertung in Abschnitt 5.2.2 beträgt hier der Schneidspalt $SSP = 7 \mu\text{m}$. Die übrigen Scherschneidparameter bleiben zur trennsicheren Bewertung des Einflusses eines zunehmenden Schneidkantenverschleißes von VS1 zu VS2 gleich.

Aus Abbildung 43 geht hervor, dass, wie im Abschnitt 5.2.2 gezeigt, eine Zunahme des Schneidkantenverschleißes die magnetischen Eigenschaften grundsätzlich verschlechtert. Im dargestellten Vergleich zum Schneidspalt $SSP = 25 \mu\text{m}$ ist es mit den Ergebnissen aus Abschnitt 5.2.2 plausibel, dass der geringe Schneidspalt die magnetische Schädigung reduziert. Der beobachtete Effekt ist unabhängig von der Magnetisierungsfrequenz (vgl. Abbildung 44).

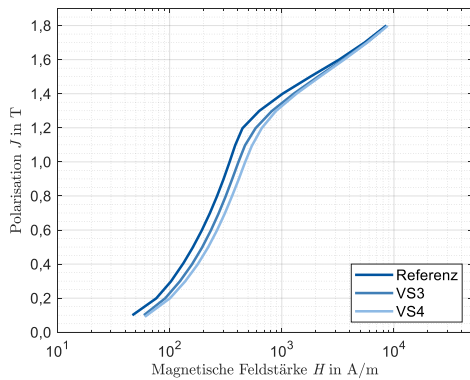


a) Magnetisierungsverhalten.

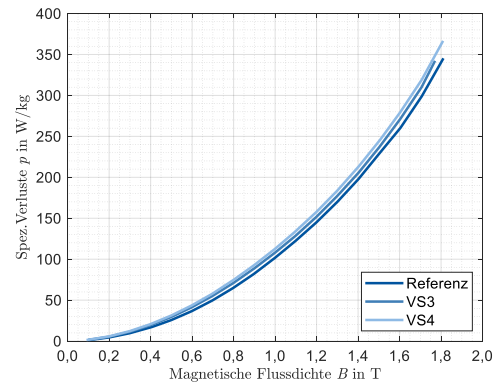


b) Verlustverhalten.

Abbildung 43: Magnetische Eigenschaften bei Variationen des Schneidkantenverschleißes bei kleinem Schneidspalt und einer Magnetisierungsfrequenz von 50 Hz.



a) Magnetisierungsverhalten.



b) Verlustverhalten.

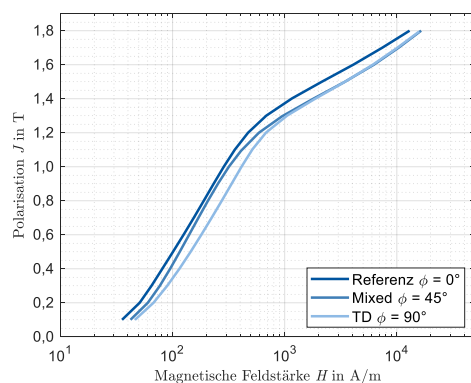
Abbildung 44: Magnetische Eigenschaften bei Variationen des Schneidkantenverschleißes bei kleinem Schneidspalt und einer Magnetisierungsfrequenz von 1000 Hz.

5.2.4 Veränderung des Winkels zwischen Schnittlinie und Walzrichtung

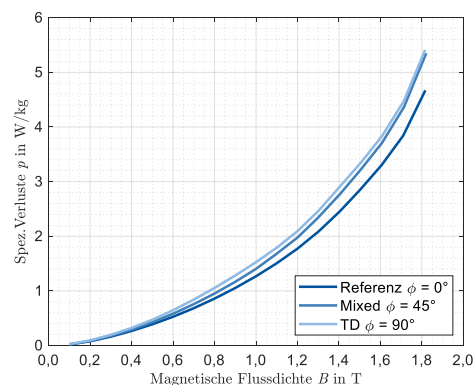
Zuordnung	Schneidspalt	Schneidkante	Walzrichtung			Schneidgeschwindigkeit
	25 μm	Scharf	0° (RD)	45° (Mixed)	90° (TD)	0,03 m/s
Referenz	X	X	X			X
Mixed	X	X		X		X
TD	X	X			X	X

Tabelle 7: Übersicht der Variationen des Scherleidparameters: Schnitttrichtung zur Walzrichtung.

Tabelle 7 zeigt die Variationen des Winkels der Schnittlinie relativ zur Walzrichtung im Vergleich zur definierten Referenz (Magnetisierung in Walzrichtung (RD)). Die übrigen Scherschneidparameter bleiben zur trennsicheren Bewertung des Einflusses der Magnetisierungsrichtung gleich.



a) Magnetisierungsverhalten.

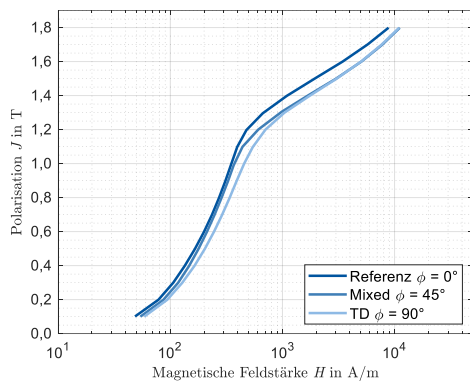


b) Verlustverhalten.

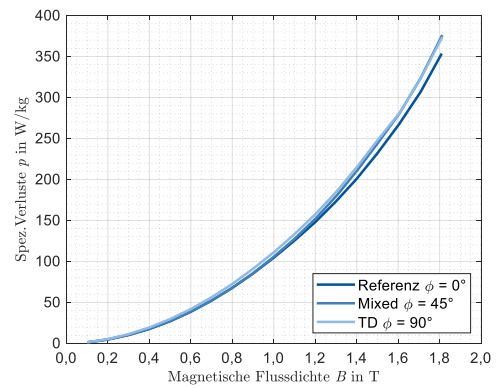
Abbildung 45: Magnetische Eigenschaften bei Variationen der Schnitttrichtung relativ zur Walzrichtung und einer Magnetisierungsfrequenz von 50 Hz.

Grundsätzlich weist nichtkornorientiertes Elektroband eine geringe magnetische Anisotropie auf. Das heißt, dass die Werkstoffe bei Magnetisierung in RD permeabler sind und geringere spezifische Verluste zeigen als bei einer Magnetisierung in TD (vgl. Abbildung 45). Die Richtungsabhängigkeit der magnetischen Eigenschaften ist zudem qualitativ nicht abhängig von der Magnetisierungsfrequenz (vgl. Abbildung 46).

Eine Legierung mit Silizium reduziert die magnetische Anisotropie, sodass hier die Bewertung des Scherschneidparameters allein intrinsisch werkstoffabhängig ist [11]. Im Anwendungsbezug von Traktionsmotoren ist die Berücksichtigung möglicher magnetischer Anisotropie bedingt durch eine Vielzahl an Flussrichtungen im Mittel zu vernachlässigen.



a) Magnetisierungsverhalten.



b) Verlustverhalten.

Abbildung 46: Magnetische Eigenschaften bei Variationen der Schnitttrichtung relativ zur Walzrichtung und einer Magnetisierungsfrequenz von 1000 Hz.

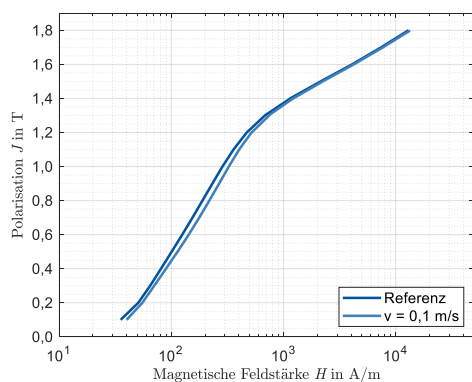
5.2.5 Veränderung Schneidgeschwindigkeit

	Schneidspalt	Schneidkante	Walzrichtung	Schneidgeschwindigkeit	
Zuordnung	25 μm	Scharf	0°	0,03 m/s	0,1 m/s
Referenz	X	X	X	X	
$v_c = 0,10 \text{ m/s}$	X	X	X		X

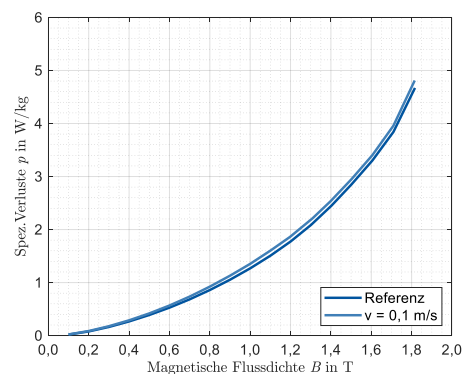
Tabelle 8: Übersicht der Variationen des Scherneckparameters: Schneidgeschwindigkeit.

Tabelle 8 zeigt die Übersicht über den Werkstoffzustand für eine Variation der Schneidgeschwindigkeit in der Probenherstellung. Die übrigen Scherschneidparameter bleiben zur trennsicheren Bewertung des Einflusses der Schneidgeschwindigkeit gleich.

In Abbildung 47 ist die Veränderung der magnetischen Eigenschaften im Vergleich zu einer Verdreifachung der Schneidgeschwindigkeit dargestellt. Zentrales Ergebnis ist, dass eine Veränderung der Schneidgeschwindigkeit, unabhängig von der Magnetisierungsfrequenz (vgl. Abbildung 48), einen vernachlässigbaren Einfluss auf die resultierenden magnetischen Eigenschaften hat.

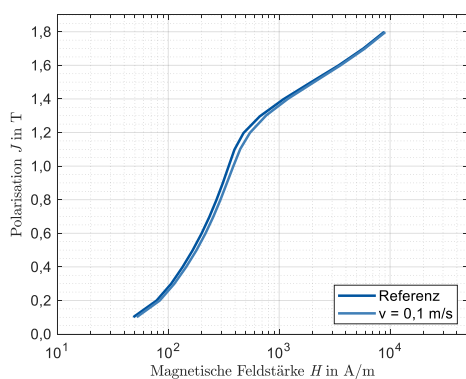


a) Magnetisierungsverhalten.

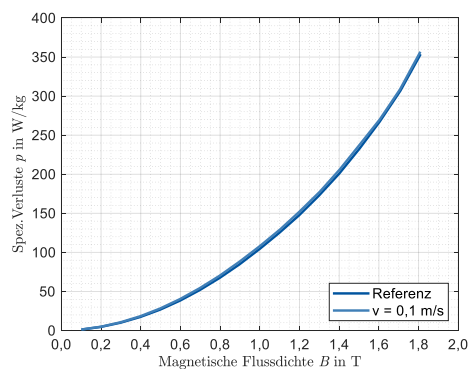


b) Verlustverhalten.

Abbildung 47: Magnetische Eigenschaften bei Variation der Schneidgeschwindigkeit und einer Magnetisierungsfrequenz von 50 Hz.



a) Magnetisierungsverhalten.



b) Verlustverhalten.

Abbildung 48: Magnetische Eigenschaften bei Variation der Schneidgeschwindigkeit und einer Magnetisierungsfrequenz von 1000 Hz.

5.2.6 Zusammenfassung

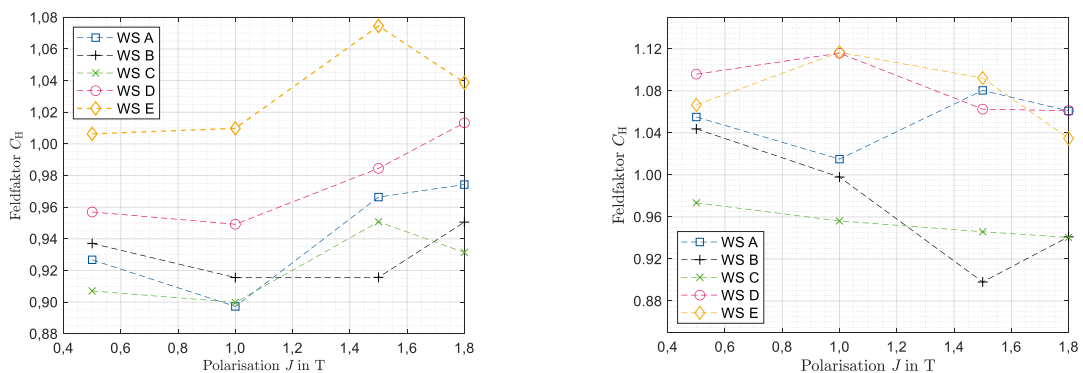
Eine Erhöhung des Schneidspalts sowie des Schneidkantenverschleißes sind diejenigen Scherschneidparameter, welche die magnetischen Eigenschaften im Vergleich signifikant verschlechtern. Zusammenfassend ist also bei der Fertigung des geschnittenen Eisenkerns des Traktionsmotors in Bezug zur Verschlechterung der magnetischen Eigenschaften auf einen geringen Schneidspalt sowie auf einen möglichst geringen Schneidkantenverschleiß zu achten. Einschlägige Voruntersuchungen bestätigen diese Beobachtung [8][12–14]. Im Folgenden werden daher für den Werkstoffvergleich die oben genannten Scherschneidparameter berücksichtigt.

5.3 Werkstoffvergleich

5.3.1 Veränderung Schneidspalt

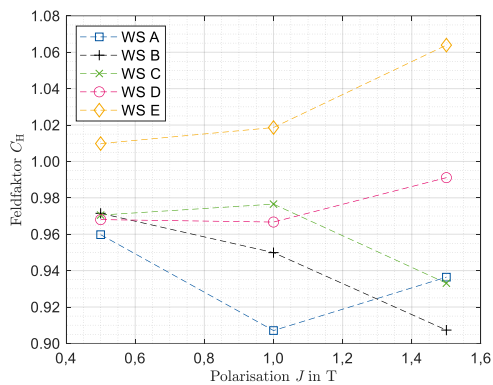
Zuordnung	Schneidspalt			Schneidkante	Walzrichtung	Schneidgeschwindigkeit
	7 μm	25 μm	35 μm	Scharf	0°	0,03 m/s
Referenz		X		X	X	X
S1	X			X	X	X
S2			X	X	X	X

Tabelle 9: Übersicht der Variationen des Scherneidparameters Schneidspalt für den Werkstoffvergleich. Aus dem Vergleich der Feld- und Verlustfaktoren (vgl. Abbildung 49 bis Abbildung 52) geht hervor, dass die singuläre Beobachtung aus Abschnitt 5.2 auch im Materialvergleich überwiegend zutreffend ist: Eine Verringerung des Schneidspalts führt im Vergleich zu verbesserten magnetischen Eigenschaften in Bezug auf Magnetisierbarkeit (Feldfaktoren) und spezifische Verluste (Verlustfaktoren). Grundsätzlich ist dieser Effekt auch qualitativ unabhängig von der Magnetisierungsfrequenz des jeweiligen Werkstoffs. Für Polarisationen bzw. magnetische Flussdichten unterhalb von ca. 1,6 T sind die Abweichung der Feld- und Verlustfaktoren ($C_H \neq 1$ und $C_P \neq 1$) am größten. In diesem Bereich wird die Änderung der Polarisation im Werkstoff jeweils durch Domänenwandbewegung und Domänenwandverschiebung, also durch eine mikromagnetische Ursache, bewirkt. Für hohe Polarisierungen werden die Faktoren gegen 1 konvergieren (siehe Abschnitt 5).

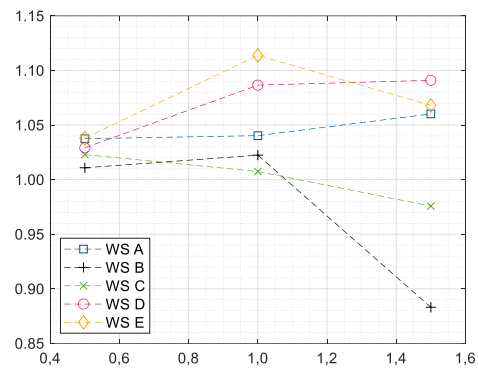


- a) Feldfaktor C_H für eine im Vergleich Verringerung des Schneidspalts (Zustand S1).
 b) Feldfaktor C_H für eine im Vergleich Erhöhung des Schneidspalts (Zustand S2).

Abbildung 49: Vergleich der Feldfaktoren für die Bearbeitungszustände S1 und S2 für eine Magnetisierungsfrequenz von 50 Hz.

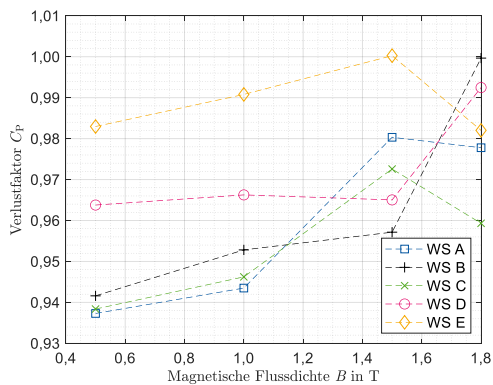


a) Feldfaktor C_H für eine im Vergleich Verringerung des Schneidspalts (Zustand S1).

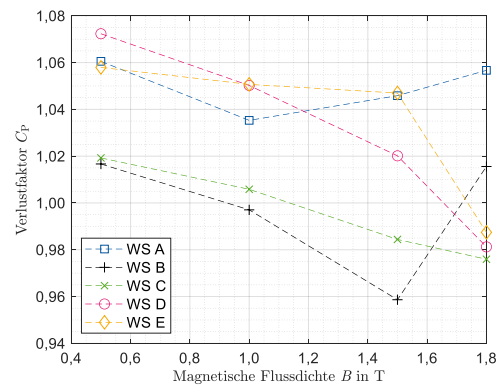


b) Feldfaktor C_H für eine im Vergleich Erhöhung des Schneidspalts (Zustand S2).

Abbildung 50: Vergleich der Feldfaktoren für die Bearbeitungszustände S1 und S2 für eine Magnetisierungsfrequenz von 1000 Hz.

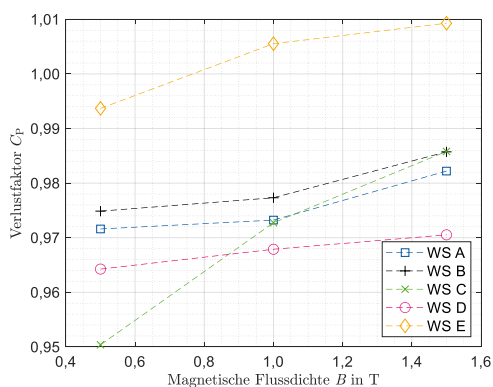


a) Verlustfaktor C_p für eine im Vergleich Verringerung des Schneidspalts (Zustand S1).

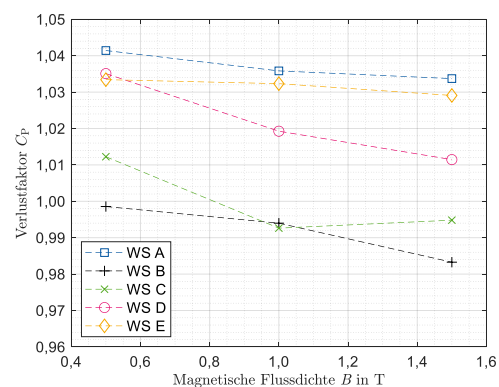


b) Verlustfaktor C_p für eine im Vergleich Erhöhung des Schneidspalts (Zustand S2).

Abbildung 51: Vergleich der Verlustfaktoren für die Bearbeitungszustände S1 und S2 für eine Magnetisierungsfrequenz von 50 Hz.



a) Verlustfaktor C_p für eine im Vergleich Verringerung des Schneidspalts (Zustand S1).

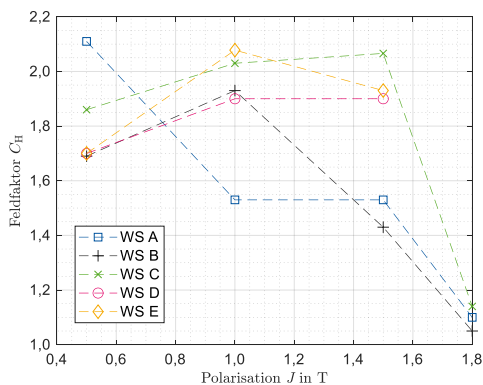


b) Verlustfaktor C_p für eine im Vergleich Erhöhung des Schneidspalts (Zustand S2).

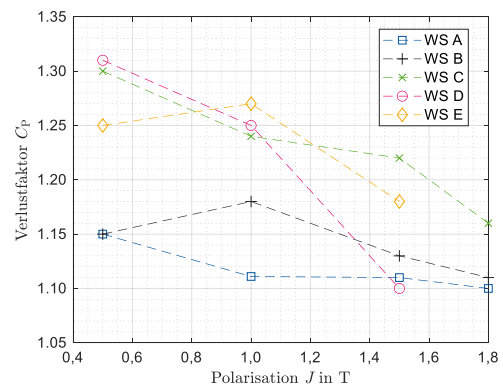
Abbildung 52: Vergleich der Verlustfaktoren für die Bearbeitungszustände S1 und S2 für eine Magnetisierungsfrequenz von 1000 Hz.

Auffällig ist, dass Werkstoffe A und E im Vergleich einen Trend mit den höchsten Verlust- und Feldfaktoren haben.

Zur weiteren Untersuchung wird ein konstantes Verhältnis von Schneidspalt zur Blechdicke $\gamma = SSP/d$ berücksichtigt [2]. Für die Werkstoffe A, B, D und E wird dazu der Schneidspalt $SSP = 15 \mu\text{m}$ und für Werkstoff C ein Schneidspalt von $SSP = 25 \mu\text{m}$ gewählt. Damit liegen die relativen Schneidspalte im geringen Schwankungsbereich von $\gamma = 5.6 \%$ bis $\gamma = 7.5 \%$. In Abbildung 53 und Abbildung 54 sind die Verläufe der Feld- und Verlustfaktoren für die Magnetisierungsfrequenzen von 50 Hz und 1000 Hz im Materialvergleich dargestellt. Die Referenzwerte für die Feldstärke und die Verlustleistung sind jeweils durch die magnetischen Eigenschaften der erodierten Referenzprobe gegeben. Konkrete Wirkzusammenhänge zwischen der Verschlechterung der magnetischen Eigenschaften und den Werkstoffparametern lassen sich nicht schlussfolgern. Es lässt sich jedoch der Trend ableiten, dass bei einem konstanten relativen Schneidspalt im Vergleich dünnere Werkstoffe vorteilhaft sein können.

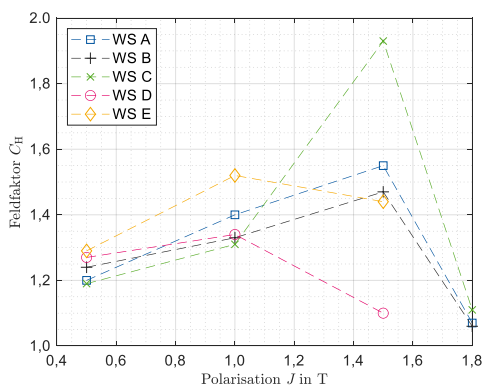


a) Feldfaktor C_H für einen konstanten relativen Schneidspalt.

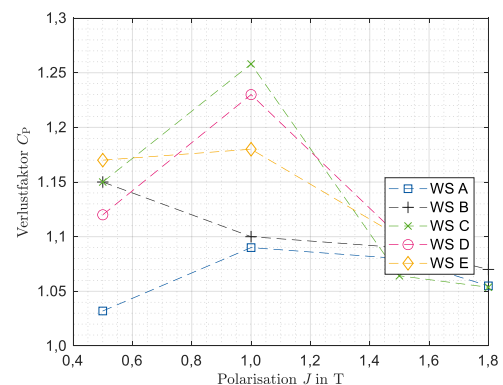


b) Verlustfaktor C_P für einen konstanten relativen Schneidspalt.

Abbildung 53: Vergleich der Feld- und Verlustfaktoren bei einem konstanten relativen Schneidspalt für eine Magnetisierungsfrequenz von 50 Hz.



a) Feldfaktor C_H für einen konstanten relativen Schneidspalt.



b) Verlustfaktor C_P für einen konstanten relativen Schneidspalt.

Abbildung 54: Vergleich der Feld- und Verlustfaktoren bei einem konstanten relativen Schneidspalt für eine Magnetisierungsfrequenz von 1000 Hz.

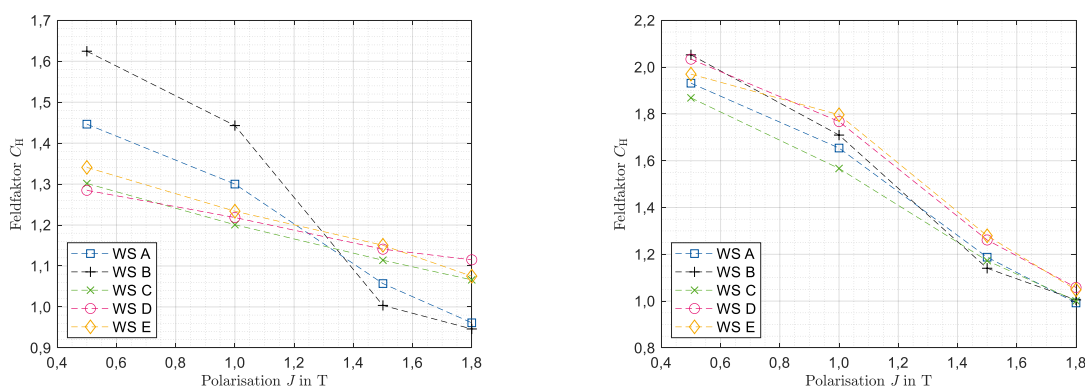
5.3.2 Veränderung Verschleißzustand

Zuordnung	Schneidspalt	Schneidkante		Walzrichtung	Schneidgeschwindigkeit
	25 μm	Scharf	VS 1		
Referenz	X	X		X	X
VS 1	X		X	X	X
VS 2	X			X	X

Tabelle 10: Übersicht der Variationen des Scherleidparameters Verschleißzustand für den Werkstoffvergleich.

Insbesondere für den höheren Verschleißzustand VS2 sind für niedrige Polarisierungen bis zu einer doppelten Feldstärke nötig, um die Referenzmagnetisierung im Werkstoff zu erzeugen (siehe Abbildung 55 und Abbildung 56). Auch führt eine Erhöhung des Schneidkantenverschleißes zu einer nahezu werkstoffunabhängigen Verlustzunahme von bis zu 50%. Im Materialvergleich lässt sich zudem eine geringfügig systematische Frequenzabhängigkeit der magnetischen Schädigung feststellen. Die Feld- und Verlustfaktoren sind für eine Magnetisierungsfrequenz von 1000 Hz im Vergleich leicht reduziert.

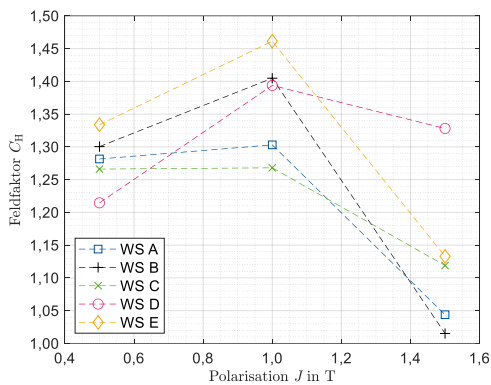
Vergleichbar mit den Ergebnissen aus Abschnitt 5.3.1 sind die Werkstoffe A und E in Bezug auf das Magnetisierungs- und Verlustverhalten besonders sensitiv gegenüber einer Erhöhung des Schneidkantenverschleißes.



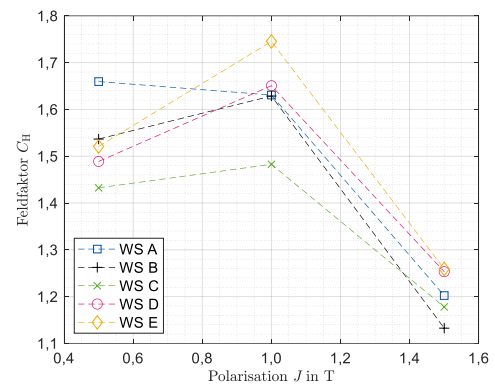
a) Feldfaktor C_H für Schneidkantenverschleißzustand VS1.

b) Feldfaktor C_H für Schneidkantenverschleißzustand VS2.

Abbildung 55: Vergleich der Feldfaktoren für die Bearbeitungszustände VS1 und VS2 für eine Magnetisierungsfrequenz von 50 Hz.

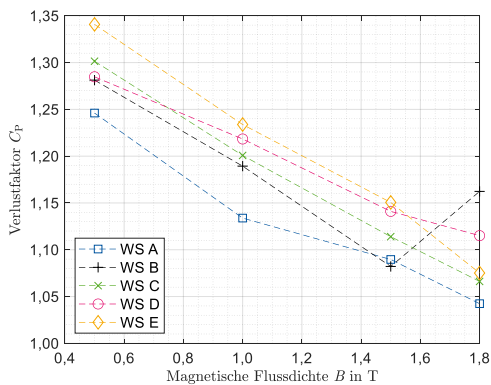


a) Feldfaktor C_H für Schneidkantenverschleißzustand VS1.

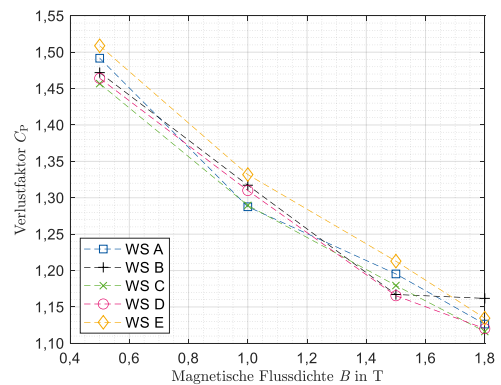


b) Feldfaktor C_H für Schneidkantenverschleißzustand VS2.

Abbildung 56: Vergleich der Feldfaktoren für die Bearbeitungszustände VS1 und VS2 für eine Magnetisierungsfrequenz von 1000 Hz.

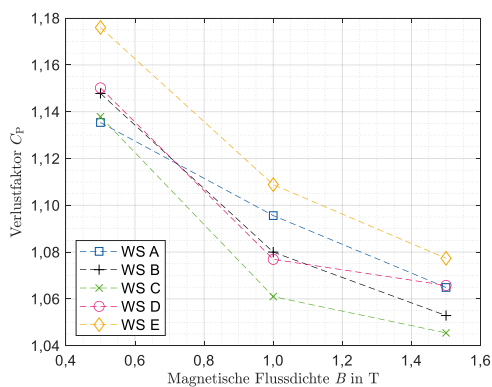


a) Verlustfaktor C_P für Schneidkantenverschleißzustand VS1.

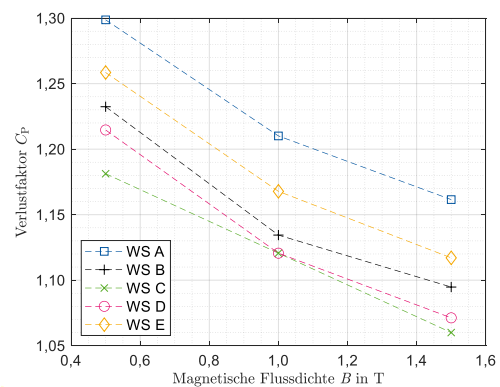


b) Verlustfaktor C_P für Schneidkantenverschleißzustand VS2.

Abbildung 57: Vergleich der Verlustfaktoren für die Bearbeitungszustände VS1 und VS2 für eine Magnetisierungsfrequenz von 50 Hz.



a) Verlustfaktor C_P für Schneidkantenverschleißzustand VS1.

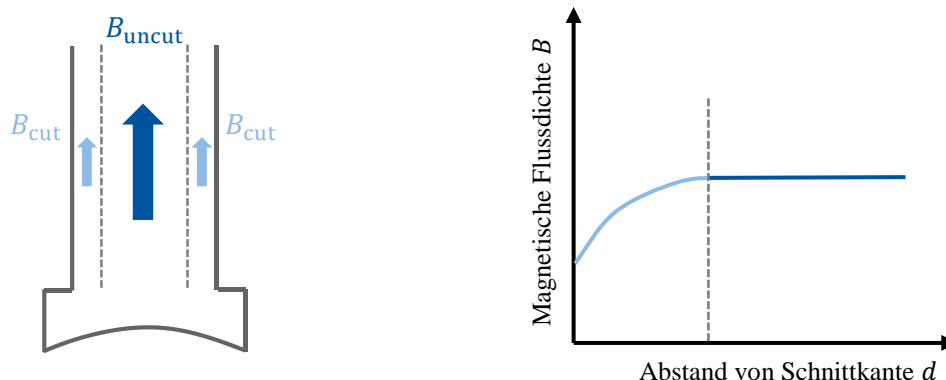


b) Verlustfaktor C_P für Schneidkantenverschleißzustand VS2.

Abbildung 58: Vergleich der Verlustfaktoren für die Bearbeitungszustände VS1 und VS2 für eine Magnetisierungsfrequenz von 1000 Hz.

6 Schnitkantmodell

Eine Verschlechterung der magnetischen Eigenschaften des Eisenkerns in rotierenden elektrischen Maschinen in Folge mechanischer Bearbeitung wie dem Scherschneiden ist im Anwendungsbezug ein lokaler Effekt. Durch das Schneiden des Werkstoffs wird, in Abhängigkeit vom Abstand zur Schnittkante, die Magnetisierbarkeit reduziert und die spezifischen Ummagnetisierungsverluste nehmen zu. Diese lokale Beeinträchtigung der magnetischen Flussführung im Werkstoff wird als Schnitkanteneffekt bezeichnet. In Abbildung 59 ist dieser Effekt schematisch dargestellt. In Abhängigkeit der Eindringtiefe δ der induzierten Eigenspannung ergibt sich ein Bereich mit reduzierter Magnetisierbarkeit mit einem angenommen stetigen Übergang in einen Bereich mit magnetisch ungeschädigtem Werkstoffverhalten. Die Eindringtiefe als auch der Permeabilitätsabfall sind sowohl abhängig vom Werkstoff als auch von Schneidparametern [15–18].



- a) Flussdichteverteilung im magnetisch geschädigten und ungeschädigten Bereich unter Berücksichtigung der Eindringtiefe in einem Statorzahn (schematisch). b) Lokale magnetische Flussdichteverteilung als Funktion des Abstands von der Schnittkante (schematisch).

Abbildung 59: Schematische Darstellung des Einflusses des Schnitkanteneffekts auf die lokale magnetische Flussdichteverteilung.

6.1 Modellierung

Für die mechanismengerechte Modellierung des lokalen Permeabilitätsverlaufs sind in [19] Randbedingungen angegeben. Wesentlich sind dabei, dass die magnetische Schädigung homogen entlang der Schnittkante ist und dass sich ein stetiger Übergang zum ungeschädigten Bereich ergibt.

Im Rahmen der Werkstoffvermessung am SST wird ein gemittelter Polarisationswert $J(H)$ angegeben. Im Übergang zu lokalen Polarisierungen $J(H, x)$ in Folge der Schnittkanten muss gelten

$$J(H) = \frac{1}{b} \int_{-\frac{b}{2}}^{\frac{b}{2}} J(H, x) dx,$$

wobei b die Streifenbreite der Materialprobe ist. Die lokale Polarisation wird dabei beschrieben mit [19]:

$$J(H, x) = \mu_0 \cdot \mu_r \cdot H = \mu_0 \cdot (\mu_{r,\text{uncut}}(H) - \mu_{r,\text{cut}}(H, x)) \cdot H.$$

Der lokale Verlauf der Permeabilität im magnetisch geschädigten Bereich wird modelliert durch

$$\mu_{r,\text{cut}}(H, x) = \Delta\mu_c(H) \cdot \eta(x)$$

und ist damit aufgeteilt in das Produkt zwischen dem feldstärkeabhängigen Permeabilitätsgradienten $\Delta\mu_c(H)$ und der ortsabhängigen Schädigungsfunktion $\eta(x)$. Wesentlich ist, dass der Permeabilitätsgradient somit rein werkstoffabhängig ist. Durch Integration ergibt sich [18]:

$$\Delta\mu_c(H) = \frac{\mu_{r,\text{uncut}}(H) - \mu_{r,\text{cut}}(H, b)}{F(b)}.$$

Der Permeabilitätsgradient kann also direkt aus gemessenen Permeabilitätsverläufen für Werkstoffproben mit verschiedenen Streifenbreiten b und der integrierten Schädigungsfunktion $F(b)$ bestimmt werden. Das Minimierungsproblem zur Lösung der integrierten Schädigungsfunktion und damit des Permeabilitätsgradienten ergibt sich damit zu [18]:

$$\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^{n-1} \sum_{k=1, k \neq j}^{n-1} \left(\frac{\mu_{r,\text{uncut}}(H_i) - \mu_{r,\text{cut}}(H_i, b_j)}{F(b_j)} - \frac{\mu_{r,\text{uncut}}(H_i) - \mu_{r,\text{cut}}(H_i, b_k)}{F(b_k)} \right)^2.$$

6.2 Auswertung

In Abbildung 60 und Abbildung 61 sind die Verläufe der relativen Permeabilität als Funktion der Streifenbreite für die Scherschneidparameter VS2 und S2 und Werkstoff C dargestellt. Bei der Streifenbreite von $b = 60$ mm handelt sich um die erodierte Referenzprobe. Für geringe Feldstärken ist der Einfluss der magnetischen Schädigung am größten und sinkt für steigende Feldstärken bzw. Polarisierungen im Werkstoff. Im Vergleich ist auch hier deutlich zu erkennen, dass der Permeabilitätsabfall bei gleicher Streifenbreite für eine Erhöhung des Schneidkantenverschleißes deutlich höher ist als für eine Erhöhung des Schneidspalts. Insbesondere für die Streifenbreite von $b = 5$ mm ist dieser Effekt deutlich zu beobachten.

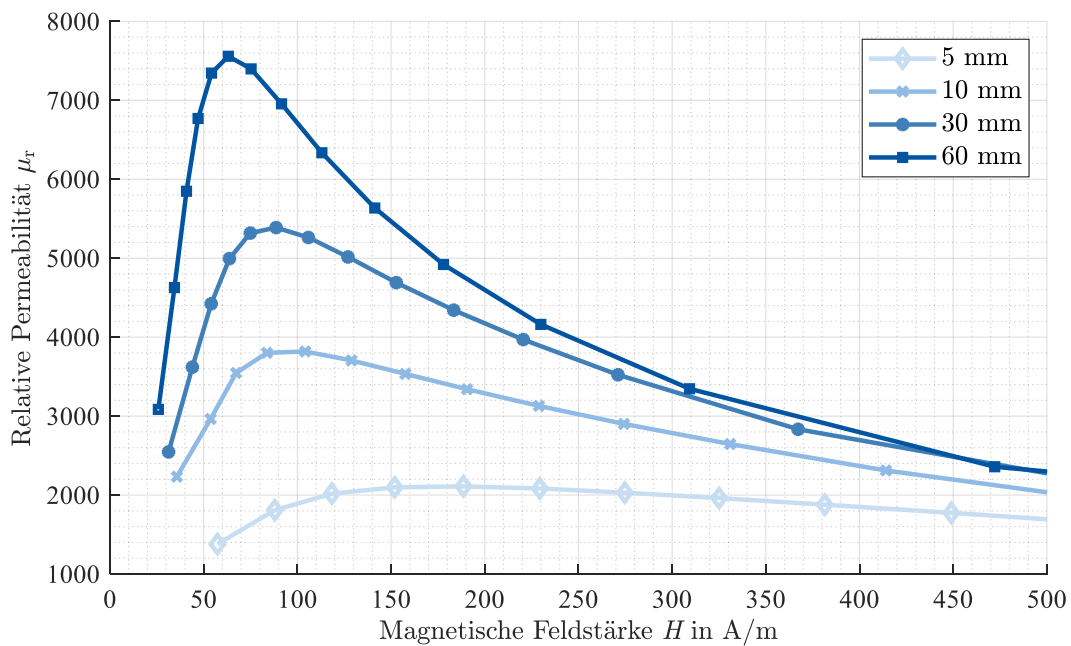


Abbildung 60: Verlauf der relativen Permeabilität als Funktion der Streifenbreite für Verschleißzustand VS2 im Werkstoff C für eine Magnetisierungsfrequenz von 50 Hz.

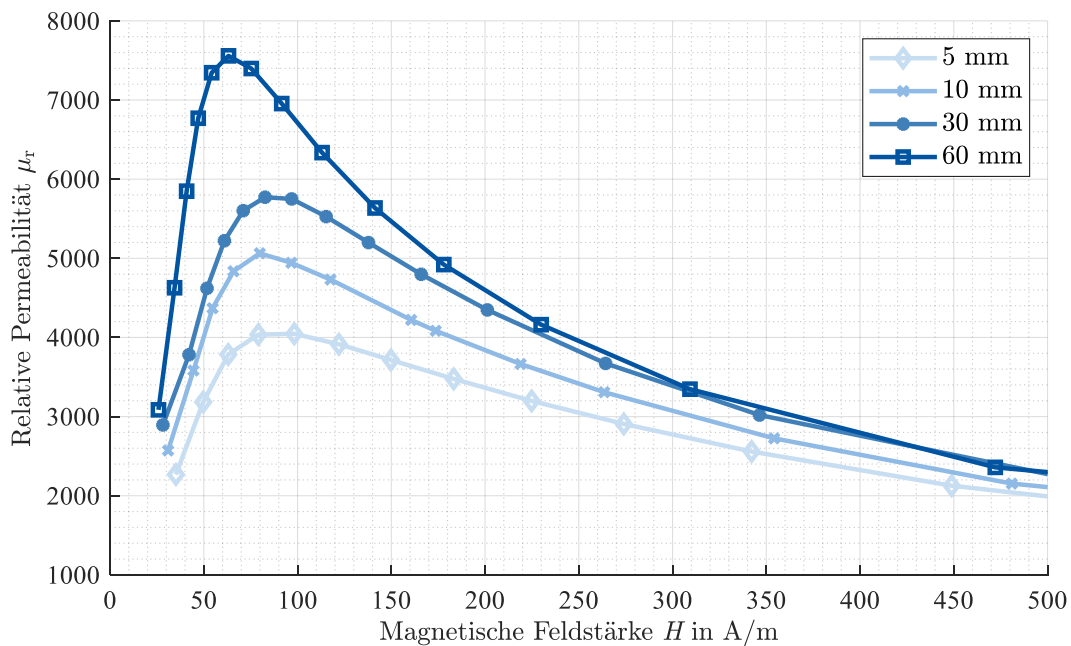


Abbildung 61: Verlauf der relativen Permeabilität als Funktion der Streifenbreite für einen Schneidspalt von $SSP = 35 \mu\text{m}$ (S2) im Werkstoff C für eine Magnetisierungsfrequenz von 50 Hz.

In Abbildung 62 ist der Permeabilitätsverlauf als Funktion der magnetischen Feldstärke und des Abstands von der Schnittkante für Werkstoff C bei einer Magnetisierungsfrequenz von 50 Hz für den Scherschneidparameter VS2 dargestellt. Nach einem bestimmten werkstoff- und bearbeitungsabhängigen Abstand von der Schnittkante steigt die Permeabilität auf ihren Referenzwert. Für eine feste magnetische Flussdichte zeigt die Schädigung einen exponentiellen Verlauf bzw. Abfall.

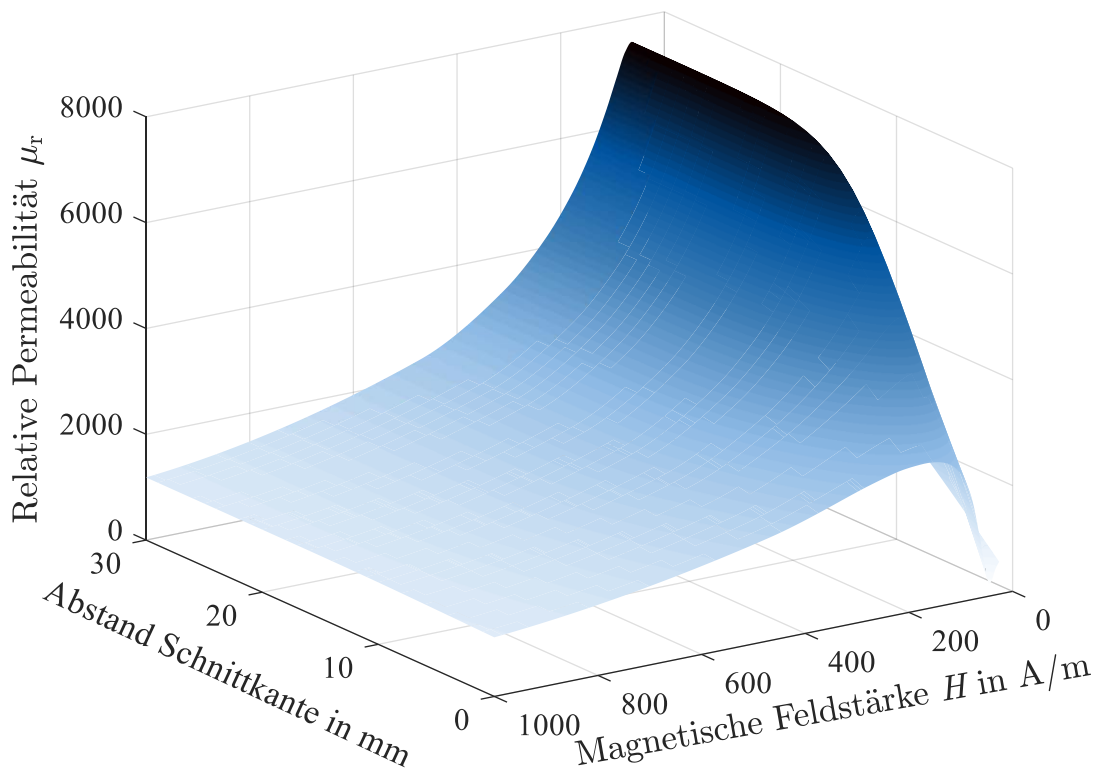


Abbildung 62: Verlauf der relativen Permeabilität als Funktion der magnetischen Feldstärke und des Abstandes von der Schnittkante für den Scherschneidparameter VS2 und Werkstoff C bei einer Magnetisierungsfrequenz von 50 Hz.

In Abbildung 63 ist der Vergleich der Permeabilitätsgradienten für die Scherschneidparameter VS2 und S2 beim Werkstoff C dargestellt. Anhand der Modellierung des Schnittkanteneffekts lassen sich aus dem Verlauf des werkstoff- und bearbeitungsabhängigen Permeabilitätsgradienten die Ergebnisse aus den Abschnitten 5.2 und 5.3 validieren.

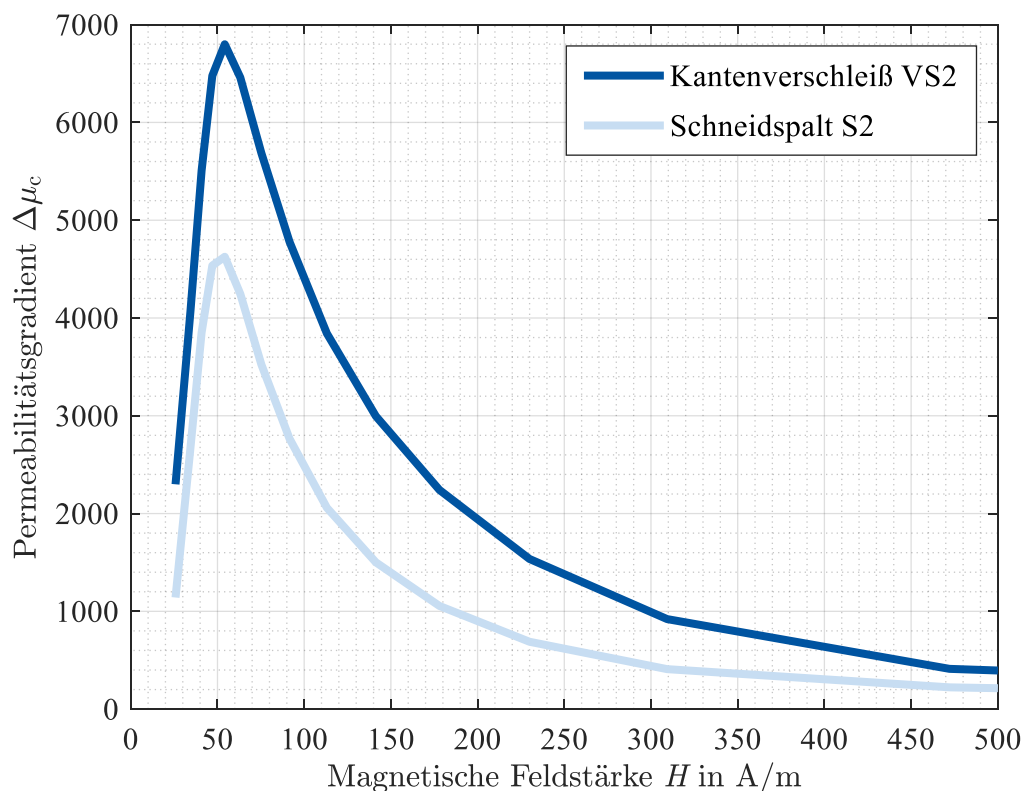
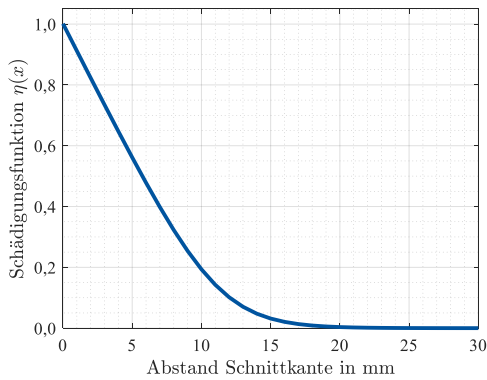


Abbildung 63: Vergleich der Permeabilitätsgradienten für die Scherschneidparameter VS2 und S2 bei einer Magnetisierungsfrequenz von 50 Hz für Werkstoff C.

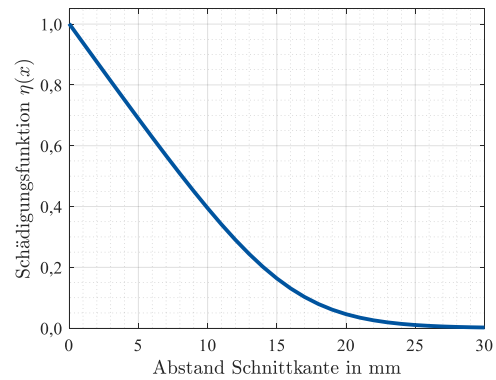
6.3 Diskussion der Modellierung

Der sich im Rahmen der Modellierung des Schnittkanteneffekts ergebende Permeabilitätsgradient ist eine übergeordnete Größe. Anhand des frequenzabhängigen Magnetisierungsverhaltens wird über eine Reihe von gemessenen Streifenbreiten eine global zuzuordnende Größe zur Bewertung der magnetischen Schädigung definiert. Somit kann sowohl das werkstoffabhängige Schädigungsverhalten für einen Scherschneidparameter, als auch das Schädigungsverhalten für einen Werkstoff in Abhängigkeit unterschiedlicher Scherschneidparameter systematischer bewertet werden. Wesentliche Grundlage hierfür ist allerdings die Kenntnis der lokalen Schädigungsfunktion in Abhängigkeit der Scherschneidparameter. Im gegenwärtigen Stand der Modellbildung werden jeweils eine Schädigungsfunktion angenommen und folgend rein mathematisch die Modellparameter bestimmt. Abbildung 64 zeigt die Verläufe der Schädigungsfunk-

tionen für die Scherschneidparameter VS2 und S2. Eindringtiefen von ca. 5 mm sind physikalisch unplausibel, da messtechnische Untersuchungen gezeigt haben, dass Eindringtiefen der magnetischen Schädigung bei unterhalb von 1 mm liegen [20]. Zum anderen ist, entgegen des Ergebnisses aus Abbildung 63, die Eindringtiefe der magnetischen Schädigung für den Scherschneidparameter S2 höher als für VS2. Ursache ist hierfür ein mathematisch motivierter Ansatz der Modellierung. Zielführend ist hier zunächst eine Untersuchung der Schädigungsprofile und davon ausgehend die Systematisierung der Aufstellung einer werkstoffunabhängigen, aber verfahrensabhängigen Schädigungsfunktion. Die davon ausgehende Parameterbestimmung geschieht dann auf der Grundlage der gemessenen, werkstoffabhängigen magnetischen Eigenschaften.



a) Schädigungsfunktion $\eta(x)$ für den Scherschneidparameter VS2.



b) Schädigungsfunktion $\eta(x)$ für den Scherschneidparameter S2.

Abbildung 64: Vergleich der Verläufe der ermittelten Schädigungsfunktionen als Funktion des Abstands von der Schnittkante.

7 Ergebnisverknüpfung mechanischer und magnetischer Werkstoffcharakterisierungen

In diesem Kapitel werden Wirkzusammenhänge zwischen den mechanischen Eigenschaften der geschnittenen Werkstoffproben und den resultierenden magnetischen Eigenschaften untersucht. Dabei werden zwei Ziele verfolgt. Zum einen geht es um unmittelbar ergebnisbezogene Aussagen über mögliche Korrelationen zwischen bspw. der Schnittflächencharakterisierung und einer quantitativen Verschlechterung der magnetischen Eigenschaften unter einem Scherschneidparameter. Zum anderen geht es um die Ableitung von Prädiktionen, die es a-priori ermöglichen, anhand mechanischer Werkstoffcharakterisierung qualitative Rückschlüsse auf die Verschlechterung der magnetischen Eigenschaften zu ziehen.

7.1 Korrelation Mikrohärtemessung mit magnetischen Eigenschaften

Abbildung 65 zeigt für WS A die Aufhärtung als Funktion des Abstands zur Schnittkante für unterschiedliche Schneidspalte und Verschleißzustände bei ansonsten gleichen Scherschneidparametern. In Abbildung 66 und Abbildung 67 sind die zugehörigen Magnetisierungs- und Verlustkennlinien dargestellt. Die Mikrohärtete nimmt sowohl für zunehmenden Schneidspalt als auch Schneidkantenverschleiß zu. Die Aufhärtung des Werkstoffs korreliert qualitativ mit einer Verschlechterung der magnetischen Eigenschaften. Im Vergleich lässt sich zudem feststellen, dass die Eindringtiefe der Schädigung des Werkstoffs auch einen Einfluss auf das Magnetisierungs- und Verlustverhalten hat. So ist beim Schneidkantenverschleiß VS2 der Schädigungsbereich in den Werkstoff hinein am größten; gleichzeitig nehmen die Ummagnetisierungsverluste im Vergleich am stärksten zu.

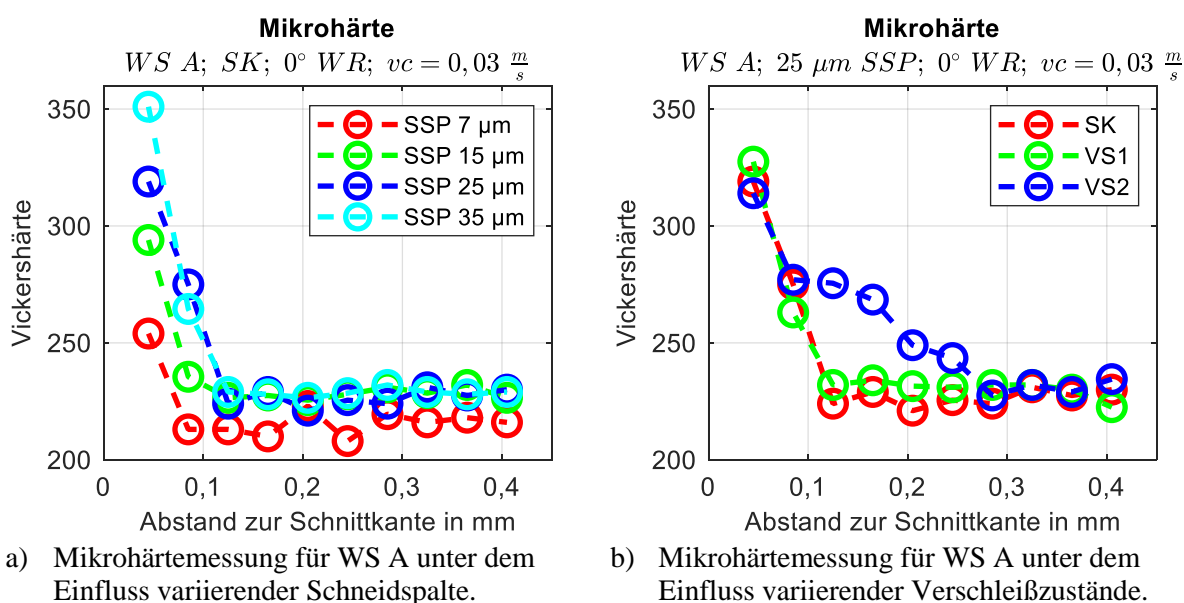
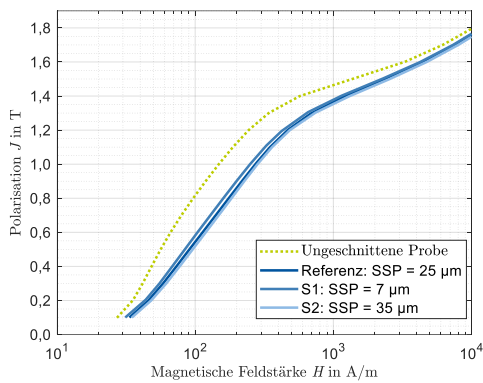
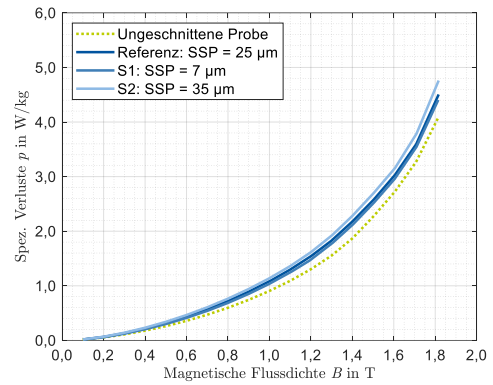


Abbildung 65: Mikrohärtemessung für WS A unter dem Einfluss variierender Schneidspalte und Verschleißzustände.

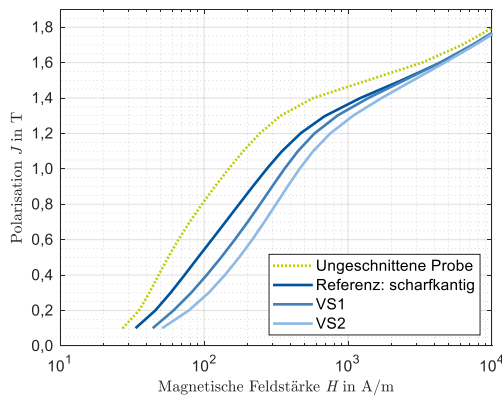


a) Magnetisierungsverhalten.

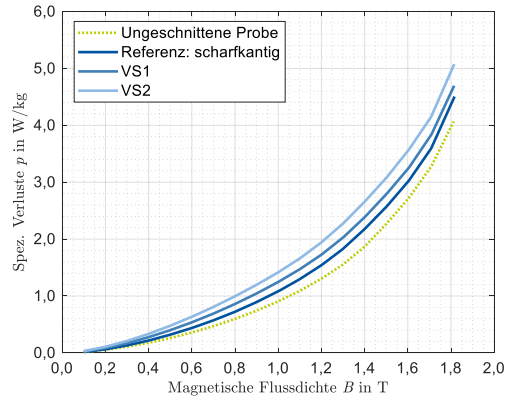


b) Verlustverhalten.

Abbildung 66: Magnetisierungs- und Verlustverhalten von WS A unter dem Einfluss variierender Schneidspalte bei einer Magnetisierungsfrequenz von 50 Hz.



a) Magnetisierungsverhalten.



b) Verlustverhalten.

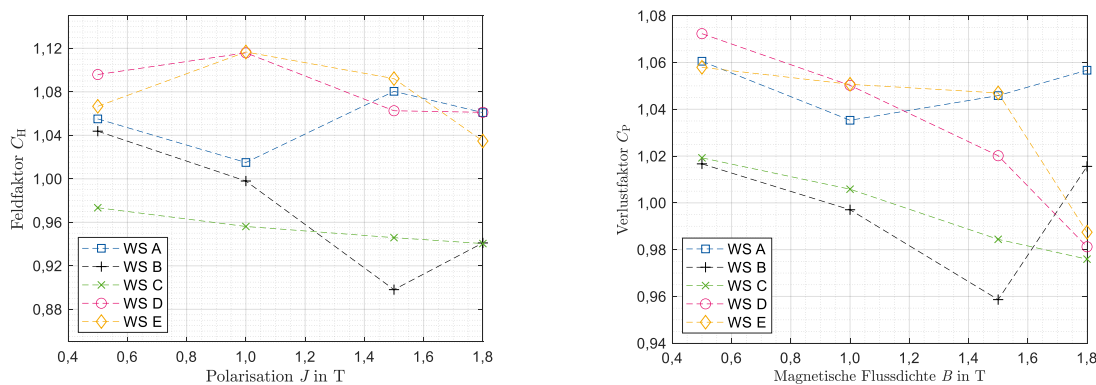
Abbildung 67: Magnetisierungs- und Verlustverhalten von WS A unter dem Einfluss variierender Verschleißzustände bei einer Magnetisierungsfrequenz von 50 Hz.

7.2 Korrelation Schnittflächencharakterisierung mit magnetischen Eigenschaften

In Abbildung 68 sind exemplarisch die Feld- und Verlustfaktoren für den Bearbeitungszustand S2 bei einer Magnetisierungsfrequenz von 50 Hz dargestellt. Besonders sensitiv sind die Werkstoffe A und E bei einer Erhöhung des Schneidspalts (S2); im Trend sind für diese beiden Werkstoffe die Feld- und Verlustfaktoren am höchsten, wohingegen die magnetischen Eigenschaften für WS C im Vergleich am geringsten zur Referenz (SSP = 25 μm) verändert werden. Bei der Auswertung der Schnittflächencharakterisierung (vgl. Tabelle 11) zeigt sich, dass WS A und WS E den im Vergleich höchsten relativen und WS C den niedrigsten Kanteneinzug haben. Daraus folgernd ergibt sich ein Wirkzusammenhang zwischen dem werkstoffabhängigen Kanteneinzug und der daraus folgenden Verschlechterung der magnetischen Eigenschaften. Damit ist auch ein a-priori Kriterium gegeben: Wird im Zuge der mechanischen Bearbeitung des Scherschneidens ein hoher relativer Kanteneinzug gemessen, so ist mit höheren Umagnetisierungsverlusten und geringerer Permeabilität zu rechnen.

Werkstoff	Kanteneinzug absolut	Kanteneinzug in % der Blechdicke
A	39 μm	19,5 %
B	39 μm	14,4 %
C	36 μm	10,3 %
D	43 μm	15,9 %
E	56 μm	22,4 %

Tabelle 11: Kanteneinzugshöhe für Proben der Werkstoffe A-E bei 35 μm Schneidspalt, scharfen Schneidkanten, 0° zwischen Schnittlinie und Walzrichtung und 0,03 m/s Schneidgeschwindigkeit.



a) Feldfaktoren C_H für Schneidspalt S2.

b) Verlustfaktoren C_P für Schneidspalt S2.

Abbildung 68: Vergleich der Feld- und Verlustfaktoren für den Bearbeitungszustand S2 und für eine Magnetisierungsfrequenz von 50 Hz.

7.3 Korrelation der Schneidarbeit mit magnetischen Eigenschaften

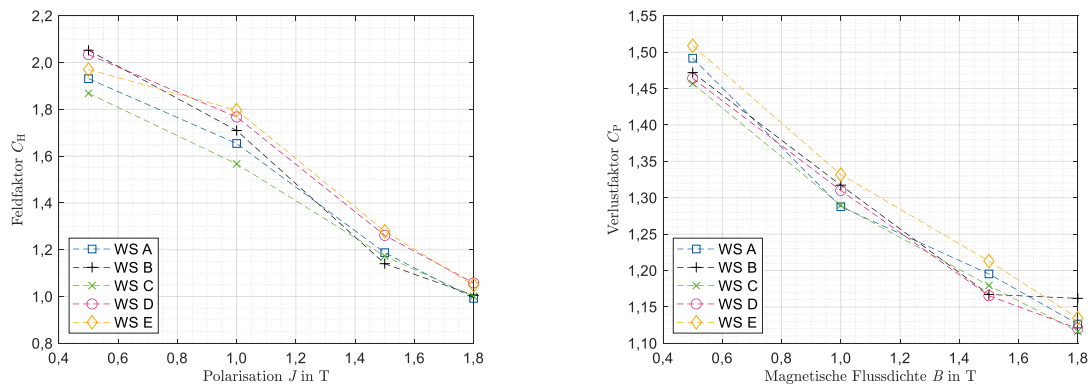
So wie die Kanteneinzugshöhe, steigt auch die Schneidarbeit mit zunehmendem Schneidkantenverschleiß an. Durch die Messung der Schneidarbeit im Scherschneidprozess kann der Fortschritt des Schneidkantenverschleißes bewertet werden. Nachdem der Schneidkantenverschleiß mit den magnetischen Eigenschaften korreliert, ist die Schneidarbeit ein geeignetes Kriterium zur Beurteilung der verschleißbedingten Verschlechterung magnetischer Eigenschaften. Tabelle 12 stellt die Schneidarbeiten und Verlustfaktoren mit Bezug zur erodierten Referenzprobe bei jeweils einer Magnetisierungsfrequenz von 50 Hz und einer Flussdichte von 1 T für zunehmenden Schneidkantenverschleiß für Werkstoff C, 25 μm Schneidspalt, scharfe Schneidkanten und eine Schneidgeschwindigkeit von 0,03 m/s gegenüber.

Schneidkantenzustand	Schneidarbeit	Verlustfaktor
Scharfkantig	2,59 Nm	1,24
VS1	3,97 Nm	1,49
VS2	4,36 Nm	1,60

Tabelle 12: Schneidarbeiten und Verlustfaktoren (bezogen auf die erodierte Referenzprobe bei jeweils einer Magnetisierungsfrequenz von 50 Hz und einer Flussdichte von 1 T) bei zunehmendem Schneidkantenverschleiß für Werkstoff C, 25 μm Schneidspalt, scharfe Schneidkanten und eine Schneidgeschwindigkeit von 0,03 m/s.

7.4 Einfluss von Größeneffekten

Zur Untersuchung von Zusammenhängen zwischen mikro- und makromagnetischen Eigenschaften wird der Size Factor betrachtet [1, 20, 21]. Die Werkstoffe A und E haben dabei den größten, WS C den geringsten Size Factor (vgl. Abschnitt 4.3).

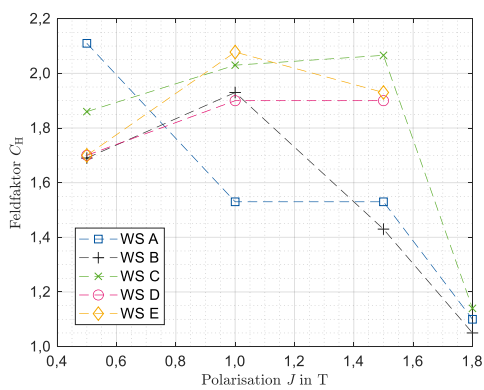


a) Feldfaktoren C_H für Verschleißzustand VS2. b) Verlustfaktoren C_P für Verschleißzustand VS2.

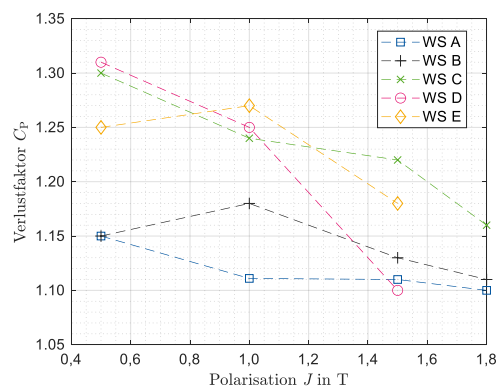
Abbildung 69: Vergleich der Feld- und Verlustfaktoren für den Bearbeitungszustand VS2 und für eine Magnetisierungsfrequenz von 50 Hz.

Aus dem Vergleich der Feld- und Verlustfaktoren in Abbildung 68 und Abbildung 69 ist zu erkennen, dass WS A und WS E im Trend die höchsten Feld- und Verlustfaktoren für die dominanten Scherschneidparameter Schneidspalt und Schneidkantenverschleiß haben.

Um einen direkten Zusammenhang zur Korngröße der Werkstoffe betrachten zu können, werden im Werkstoffvergleich ähnliche geometrische Schneidbedingungen gewählt. Bei der Betrachtung des relativen Schneidspalts wird die Dickenabhängigkeit separiert. Wenn das Verhältnis von Schneidspalt zu Blechdicke konstant gehalten wird, dann zeigen die Werkstoffe A und E den geringsten Einfluss der mechanischen Bearbeitung (vgl. Abbildung 70). Die Tatsache, dass bei der Betrachtung relativer Schneidspalte ebenfalls Unterschiede im Einfluss der mechanischen Bearbeitung auf die magnetischen Eigenschaften der Werkstoffe hervortreten, deutet wiederum auf Größeneffekte beim Scherschneiden von Elektroblech hin: Werkstoffe mit einem hohen Size Factor scheinen unter der Voraussetzung ähnlicher Schneidbedingungen vorteilhaft zu sein.



a) Feldfaktor C_H für einen konstanten relativen Schneidspalt.



b) Verlustfaktor C_P für einen konstanten relativen Schneidspalt.

Abbildung 70: Vergleich der Feld- und Verlustfaktoren für einen konstanten relativen Schneidspalt bei einer Magnetisierungsfrequenz von 50 Hz.

8 Zusammenfassung

Im Rahmen dieses Projekts wurden von 5 weichmagnetischen Werkstoffen (WS A - WS E) die mechanischen und magnetischen Eigenschaften unter dem Einfluss verschiedener Scherschneidparameter untersucht. Scherschneiden ist ein mechanisches Trennverfahren zur Erzeugung der Rotor- und Statorgeometrie. Betrachtet wurden die Parameter „Schneidspalt, Schneidkantenverschleiß, Schneidgeschwindigkeit und Schneidrichtung relativ zur Walzrichtung“. Die Werkstoffe unterscheiden sich sowohl hinsichtlich der Dicke als auch der Korngröße und geringfügig in der Legierung. Tabelle 13 fasst die Werkstoffkenngrößen zusammen.

Werkstoff	Dicke	Korngröße	Legierungsanteil Silizium	Legierungsanteil Aluminium
A	0,20 mm	117 μm	2,87 %	0,78 %
B	0,27 mm	110 μm	3,16 %	0,80 %
C	0,35 mm	121 μm	3,18 %	0,82 %
D	0,27 mm	103 μm	3,06 %	0,82 %
E	0,25 mm	146 μm	2,88 %	1,18 %

Tabelle 13: Zusammenfassung der Werkstoffkenngrößen.

Zentrales Ergebnis ist, dass materialübergreifend qualitativ Schneidspalt und Schneidkantenverschleiß die dominanten Einflussfaktoren des Scherschneidens auf die magnetischen Materialeigenschaften sind. Eine absolute Erhöhung des Schneidspalts sowie des Schneidkantenverschleißes korreliert mit einer Verschlechterung der magnetischen Eigenschaften. Die untersuchten Werkstoffe A und E zeigen dabei die höchste Sensitivität gegenüber mechanischer Bearbeitung. Eine dezidierte Frequenzabhängigkeit der magnetischen Beeinträchtigung konnte nicht festgestellt werden. Der Einfluss der Schneidgeschwindigkeit ist im Vergleich zu vernachlässigen. Im Hinblick auf eine Veränderung der Schnittlinienrichtung relativ zur Walzrichtung lässt sich verallgemeinernd schlussfolgern, dass jeder weichmagnetische Werkstoff für den Einsatz in elektrischen Maschinen eine geringe Anisotropie aufweist, die wesentlich abhängig ist von der jeweiligen Textur. Damit führt werkstoffunabhängig eine Magnetisierung quer zur Walzrichtung stets zu erhöhten Ummagnetisierungsverlusten.

Unter Berücksichtigung der mechanischen Untersuchungen der geschnittenen Werkstoffproben ist ein Ergebnis der Projektarbeiten, dass die a-priori Untersuchung der Schnittflächen sowie des Size Factors als Verhältnis von Korngröße zu Blechdicke prädiktiv sind in Bezug zu den resultierenden magnetischen Eigenschaften. Ein hoher Kanteneinzug sowie eine Zunahme der Schneidarbeit und der Aufhärtung an der Schnittkante korrelieren mit einer Verschlechterung der magnetischen Eigenschaften. Wird das Verhältnis von Schneidspalt zu Blechdicke (relati-

ver Schneidspalt) konstant gewählt, so sind Werkstoffe mit im Vergleich geringerer Dicke sowie Werkstoffe mit einem hohen Size Factor tendenziell vorteilhaft. Ein genauer Wirkzusammenhang zwischen den Legierungsanteilen und der resultierenden Verschlechterung der magnetischen Eigenschaften in Folge der betrachteten Scherschneidparameter konnte nicht herausgearbeitet werden. Für die weitere Aufschlüsselung von Korrelationen zwischen Mikroparametern (wie bspw. Legierungsgehalt, Korngröße, Textur) und der resultierenden Verschlechterung der magnetischen Eigenschaften unter dem Einfluss mechanischer Bearbeitung sind fortführende Untersuchungen notwendig.

Zur Beschreibung der lokalen magnetischen Schädigung in einem weichmagnetischen Werkstoff in Folge mechanischer Bearbeitung wurde ein mathematischer Modellierungsansatz vorgestellt. Damit kann die Permeabilität stetig als Funktion des Abstands zur Schnittkante dargestellt werden. Als übergeordnetes Bewertungskriterium der magnetischen Schädigung eignet sich insbesondere der Vergleich der modellierten Permeabilitätsgradienten als Funktion der magnetischen Feldstärke. Im gegenwärtigen Stand der Modellierung sind die Parameter nicht unbedingt physikalisch korrekt interpretierbar. Grund dafür ist die Annahme einer global einheitlichen exponentiellen Schädigungsfunktion zur Abbildung des Schädigungsprofils im Werkstoff. Zur weiteren Plausibilisierung des Modellansatzes ist die genaue Untersuchung von verfahrensabhängigen Schädigungsprofilen notwendig.

Quellenverweise

- [1] N. Leuning, S. Elfgen, H. A. Weiss, W. Volk, and K. Hameyer, “Der Einfluss des Schneidens von Elektroblechlamellen und die geeignete numerische Modellierung,” (in De;de), *Elektrotech. Inftech.*, vol. 136, no. 2, pp. 184–194, 2019.
- [2] H. A. Weiss, “Fertigung effizienter Elektromotoren,” Technische Universität München. [Online]. Available: <https://mediatum.ub.tum.de/?id=1463362>
- [3] H. Hoffmann, *Handbuch Umformen*. München: Hanser Verlag, 2012. [Online]. Available: <http://www.hanser-elibrary.com/doi/book/10.3139/9783446430044>
- [4] W. W. Seidel and F. Hahn, *Werkstofftechnik: Werkstoffe, Eigenschaften, Prüfung, Anwendung*, 11th ed. München: Hanser, 2018. [Online]. Available: <https://www.hanser-elibrary.com/doi/book/10.3139/9783446456884>
- [5] F. Vollertsen, D. Biermann, H. N. Hansen, I. S. Jawahir, and K. Kuzman, “Size effects in manufacturing of metallic components,” *CIRP Annals*, vol. 58, no. 2, pp. 566–587, 2009.
- [6] T. Kals and R. Eckstein, “Miniaturization in sheet metal working,” *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 103, no. 1, pp. 95–101, 2000.
- [7] X. Lai, L. Peng, P. Hu, S. Lan, and J. Ni, “Material behavior modelling in micro/meso-scale forming process with considering size/scale effects,” *Computational Materials Science*, vol. 43, no. 4, pp. 1003–1009, 2008.
- [8] H. A. Weiss, P. Trober, R. Golle, S. Steentjes, N. Leuning, S. Elfgen, K. Hameyer, and W. Volk, “Impact of Punching Parameter Variations on Magnetic Properties of Nongrain-Oriented Electrical Steel,” *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 54, no. 6, pp. 5869–5878, 2018.
- [9] S. Steentjes, G. von Pfingsten, and K. Hameyer, “An Application-Oriented Approach for Consideration of Material Degradation Effects Due to Cutting on Iron Losses and Magnetizability,” *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 50, no. 11, pp. 1–4, 2014.
- [10] X. Wei, A. Krämer, G. Hirt, A. Stöcker, R. Kawalla, M. Heller, S. Korte-Kerzel, L. Böhm, W. Volk, N. Leuning, K. Hameyer, and J. Lohmar, “Influence of Process Parameters on Grain Size and Texture Evolution of Fe-3.2 wt.-% Si Non-Oriented Electrical Steels,” *Materials*, vol. 14, no. 22, p. 6822, 2021.
- [11] Y. Oda, M. Kohno, and A. Honda, “Recent development of non-oriented electrical steel sheet for automobile electrical devices,” *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, vol. 320, no. 20, pp. 2430–2435, 2008.
- [12] P. Baudouin, M. de Wulf, L. Kestens, and Y. Houbaert, “The effect of the guillotine clearance on the magnetic properties of electrical steels,” *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, vol. 256, 1-3, pp. 32–40, 2003.
- [13] H. A. Weiss, P. Tröber, R. Golle, S. Steentjes, N. Leuning, K. Hameyer, and W. Volk, “Loss reduction due to blanking parameter optimization for different non-grain oriented electrical steel grades,” in *2017 IEEE International Electric Machines and Drives Conference (IEMDC)*, 2017, pp. 1–7.
- [14] H. A. Weiss, N. Leuning, S. Steentjes, K. Hameyer, T. Andorfer, S. Jenner, and W. Volk, “Influence of shear cutting parameters on the electromagnetic properties of non-oriented electrical steel sheets,” *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, vol. 421, pp. 250–259, 2017.

-
- [15] S. Elfgen, S. Steentjes, S. Bohmer, D. Franck, and K. Hameyer, "Continuous Local Material Model for Cut Edge Effects in Soft Magnetic Materials," *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 52, no. 5, pp. 1–4, 2016.
- [16] S. Elfgen, P. Rasilo, and K. Hameyer, "Hysteresis and eddy-current losses in electrical steel utilising edge degradation due to cutting effects," *Int J Numer Model*, vol. 33, no. 5, e2781, 2020.
- [17] S. Elfgen, S. Steentjes, S. Bohmer, D. Franck, and K. Hameyer, "Influences of Material Degradation Due to Laser Cutting on the Operating Behavior of PMSM Using a Continuous Local Material Model," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 53, no. 3, pp. 1978–1984, 2017.
- [18] N. Leuning, S. Elfgen, H. A. Weiss, W. Volk, and K. Hameyer, "Der Einfluss des Schneidens von Elektroblechlamellen und die geeignete numerische Modellierung," (in De;de), *Elektrotech. Inftech.*, vol. 136, no. 2, pp. 184–194, 2019.
- [19] S. J. H. Elfgen, "Beitrag zur Untersuchung des Schnittkanteneinflusses von nicht-kornorientiertem Elektroband auf das Betriebsverhalten rotierender elektrischer Maschinen," Dissertation, Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen; Shaker Verlag.
- [20] H. A. Weiss, S. Steentjes, P. Tröber, N. Leuning, T. Neuwirth, M. Schulz, K. Hameyer, R. Golle, and W. Volk, "Neutron grating interferometry investigation of punching-related local magnetic property deteriorations in electrical steels," *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, vol. 474, pp. 643–653, 2019.
- [21] N. Leuning, S. Steentjes, and K. Hameyer, "Impact of grain size distribution on the magnetic deterioration due to cutting of electrical steel sheets," *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, vol. 497, p. 166080, 2020.

Bisher in der FAT-Schriftenreihe erschienen (ab 2019)

Nr.	Titel
316	MULTIC-Tooling, 2019
317	EPHoS: Evaluation of Programming - Models for Heterogeneous Systems, 2019
318	Air Quality Modelling on the Contribution of Brake Wear Emissions to Particulate Matter Concentrations Using a High-Resolution Brake Use Inventory, 2019
319	Dehnratenabhängiges Verformungs- und Versagensverhalten von dünnen Blechen unter Scherbelastung, 2019
320	Bionischer LAM-Stahlleichtbau für den Automobilbau – BioLAS, 2019
321	Wirkung von Systemen der aktiven, passiven und integralen Sicherheit bei Straßenverkehrsunfällen mit schweren Güterkraftfahrzeugen, 2019
322	Unfallvermeidung durch Reibwertprognosen - Umsetzung und Anwendung, 2019
323	Transitionen bei Level-3-Automation: Einfluss der Verkehrsumgebung auf die Bewältigungsleistung des Fahrers während Realfahrten, 2019
324	Methodische Aspekte und aktuelle inhaltliche Schwerpunkte bei der Konzeption experimenteller Studien zum hochautomatisierten Fahren, 2020
325	Der Einfluss von Wärmeverlusten auf den Rollwiderstand von Reifen, 2020
326	Lebensdauerberechnung hybrider Verbindungen, 2020
327	Entwicklung der Verletzungsschwere bei Verkehrsunfällen in Deutschland im Kontext verschiedener AIS-Revisionen, 2020
328	Entwicklung einer Methodik zur Korrektur von EES-Werten, 2020
329	Untersuchung zu den Einsatzmöglichkeiten der Graphen- und Heuristikbasierten Topologieoptimierung zur Entwicklung von 3D-Rahmenstrukturen in Crashlastfällen, 2020
330	Analyse der Einflussfaktoren auf die Abweichung zwischen CFD und Fahrversuch bei der Bestimmung des Luftwiderstands von Nutzfahrzeugen, 2020
331	Effiziente Charakterisierung und Modellierung des anisotropen Versagensverhaltens von LFT für Crashsimulation, 2020
332	Charakterisierung und Modellierung des Versagensverhaltens von Komponenten aus duktilem Gusseisen für die Crashsimulation, 2020
333	Charakterisierung und Meta-Modellierung von ungleichartigen Punktschweißverbindungen für die Crashsimulation, 2020
334	Simulationsgestützte Analyse und Bewertung der Fehlertoleranz von Kfz-Bordnetzen, 2020
335	Absicherung des autonomen Fahrens gegen EMV-bedingte Fehlfunktion, 2020
336	Auswirkung von instationären Anströmeffekten auf die Fahrzeugaerodynamik, 2020
337	Analyse von neuen Zell-Technologien und deren Auswirkungen auf das Gesamtsystem Batteriepack, 2020
338	Modellierung der Einflüsse von Mikrodefekten auf das Versagensverhalten von Al-Druckgusskomponenten mit stochastischem Aspekt für die Crashsimulation, 2020

- 339 Stochastisches Bruchverhalten von Glas, 2020
- 340 Schnelle, breitbandige Datenübertragung zwischen Truck und Trailer als Voraussetzung für das hochautomatisierte Fahren von Lastzügen, 2021
- 341 Wasserstoffkompatibilität von Aluminium-Legierungen für Brennstoffzellenfahrzeuge, 2021
- 342 Anforderungen an eine elektrische Lade- und Wasserstoffinfrastruktur für gewerbliche Nutzfahrzeuge mit dem Zeithorizont 2030, 2021
- 343 Objective assessment of database quality for use in the automotive research and development process, 2021
- 344 Review of non-exhaust particle emissions from road vehicles, 2021
- 345 Ganzheitliche Betrachtung von Rollwiderstandsverlusten an einem schweren Sattelzug unter realen Umgebungsbedingungen, 2021
- 346 Studie zur Abschätzung der Anwendungspotentiale, Risiken und notwendigen Forschungsbedarfe bei der Verwendung von Glashohlkugeln in Kombination mit thermoplastischem Schaumspritzguss, 2021
- 347 Typgenehmigungsanforderungen an Level-3-Autobahnssysteme - Hintergrundbetrachtungen zu technischen Anforderungen für eine automatisierte Fahrfunktion, 2021
- 348 Einfluss der Kantenbearbeitung von Aluminiumblechen auf das Restumformvermögen sowie die Festigkeitseigenschaften unter quasistatischer und schwingender Beanspruchung, 2021
- 349 Verstärkung dünner formgehärteter Bauteile mittels FVK-Verrippungen, 2021
- 350 HMI Anforderungen für den automatisierten Individualverkehr unter Berücksichtigung von Leistungsmöglichkeiten und -grenzen älterer Nutzer, 2021
- 351 Compatibility of polymers for fuel cell automobiles, 2021
- 352 Entwicklung einer gewichtsoptimierten Batteriegehäusestruktur für Volumenfahrzeuge, 2021
- 353 Charakterisierung und Modellierung des Deformations- und Versagensverhaltens von nicht-faserverstärkten Thermoplasten unter mehrachsiger Crashbelastung, 2021
- 354 Untersuchung zum thermischen Komfort im Pkw für den Grenzbereich des Luftzugempfindens, 2021
- 355 Anforderungen an die Güte, Verfügbarkeit und Vorausschau einer Reibwertschätzung aus Funktionssicht, 2021
- 356 Entwicklung einer standardisierten Prüfanordnung zur Bewertung der Übernahmeleistung beim automatisierten Fahren, 2022
- 357 Vorstudie zu Verkehrsemissionen - Räumlich und zeitlich aufgelöste Daten durch Schwarmmessungen, 2022
- 358 Produktivitätssteigerung und Kostensenkung der laser-additiven Fertigung für den Automobilbau, 2022
- 359 Analyse der Einflussfaktoren auf die Abweichung zwischen CFD und Fahrversuch bei der Bestimmung des Luftwiderstands von Nutzfahrzeugen mit Fokus auf den Ventilationswiderstand von Nfz-Rädern, 2022
- 360 Werkstoffmodelle und Kennwertermittlung für die industrielle Anwendung der Umform- und Crash-Simulation unter Berücksichtigung der thermischen Behandlungen beim Lackieren im Prozess bei hochfesten Werkstoffen, 2022
- 361 Compatibility of polymers for fuel cell automobiles, 2022
- 362 Ermüdung kurzfaserverstärkter thermoplastischer Polymerwerkstoffe, 2022
- 363 Market research and definition of procedure to comparison of comfort measuring systems for a vehicle cabin, 2022

- 364 Methodische Ansätze zur Auswahl von Bordnetzstrukturen mit erhöhten Zuverlässigkeitsanforderungen, 2022
- 365 Fahrwiderstand von Lenk- und Liftachsen in Kurven und auf gerader Strecke unter realen Umgebungsbedingungen, 2022
- 366 Klimadaten und Nutzungsverhalten zu Auslegung, Versuch und Simulation an Kraftfahrzeug-Kälte-/Heizanlagen, 2022
- 367 Experimentelle und numerische Untersuchung des selbsttätigen Losdrehens von Schraubenverbindungen mit konstanten und variablen Amplituden und Entwicklung einer Bewertungsmethode, 2022
- 368 Objective assessment of database quality for use in the automotive research and development process – Part 2, 2023
- 369 Level 2 hands-off – Recommendations and guidance, 2023
- 370 Funktionale Sicherheitsbewertung und Cybersecurity Analysen relevanter Use Cases für die Datenübertragung zwischen Truck und Trailer als Voraussetzung für das hochautomatisierte Fahren von Lastzügen, 2023
- 371 Study on the technical evaluation of decentralization based de-identification procedures for personal data in the automotive sector, 2023
- 372 Legal evaluation of decentralization based de-identification procedures for personal and non-personal data in the automotive sector, 2023
- 373 Quantifizierung der mechanischen Belastbarkeit von Infrarot-Schweißverbindungen in zyklisch belasteten Thermoplast-Bauteilen, 2023
- 374 Lebensdauerbewertung von geschweißten Verbindungselementen unter Montagevorspannung, 2023
- 375 Einfluss verschiedener Scherschneidparameter auf die elektro-magnetischen Eigenschaften von NO-Elektroblech automobiler Traktionsantriebe, 2023

Impressum

Herausgeber	FAT Forschungsvereinigung Automobiltechnik e.V. Behrenstraße 35 10117 Berlin Telefon +49 30 897842-0 Fax +49 30 897842-600 www.vda-fat.de
ISSN	2192-7863
Copyright	Forschungsvereinigung Automobiltechnik e.V. (FAT) 2023

Verband der Automobilindustrie e.V. (VDA)
Behrenstraße 35, 10117 Berlin
www.vda.de
Twitter @VDA_online

VDA | Verband der
Automobilindustrie

Forschungsvereinigung Automobiltechnik e.V. (FAT)
Behrenstraße 35, 10117 Berlin
www.vda.de/fat

FAT | Forschungsvereinigung
Automobiltechnik