

Universität Bremen

FB4 Produktionstechnik
FG05 Fertigungseinrichtungen

Systemtechnik-Projekt

Formgebende Werkzeugspulen für die elektromagnetische Umformung

von

Zelgai Nemati (4516359)

Melvin Öncü (4515769)

Ciwan Gülpinar (4523460)

Studiengang:	Systems Engineering
Betreuender Professor:	Prof. Dr.-Ing Bernd Kuhfuß
Betreuer:	M. Sc. Björn Beckschwarte
Abgabedatum:	30. Oktober 2020

**Bremer Institut für Strukturmechanik
und Produktionsanlagen**
Prof. Dr.-Ing. Bernd Kuhfuß

Erklärung

Hiermit versichere ich, dass ich die vorliegende Arbeit ohne Hilfe Dritter und nur mit den angegebenen Quellen und Hilfsmitteln angefertigt habe. Alle Stellen, die aus den Quellen entnommen wurden, sind als solche kenntlich gemacht.

Bremen, den 29. Oktober 2020

Vorname, Name

Bremen, den 29. Oktober 2020

Vorname, Name

Bremen, den 29. Oktober 2020

Vorname, Name

Kurzfassung

Die vorliegende Projektarbeit thematisiert die elektromagnetische Umformung mittels formgebender Werkzeugspule. In der Industrie werden überwiegend abbildende Umformoperationen eingesetzt, welche auf formgebundene Werkzeuge basieren [EMU16, Fin14]. Aus diesen konventionellen Verfahren erschließen sich Nachteile, wie die begrenzte Belastbarkeit der formgebundenen Werkzeuge oder der Verschleiß an Werkzeugen, die bei der elektromagnetischen Umformung ohne formgebende Matrize nicht auftreten. Das elektromagnetische Umformen ist ein Hochgeschwindigkeitsumformverfahren, dass durch berührungslose Krafteinteilung eine Formgebung durchführt, welche es erlaubt sensible Oberflächen ohne Schmiermittel umzuformen. Der Umformungsprozess wird durch z.B. den Stromfluss im Werkstück, welcher abhängig von der Spulengeometrie, dem Abstand vom Spulenkörper zum Werkstück und der Stromstärke in der Spule ist, beeinflusst, weshalb die Umformung matrizenlos erfolgt. Diese Größen werden verändert, sodass eine Veränderung der Umformung bzw. erzeugten Geometrie ermöglicht werden kann. Die Sollgeometrie soll dazu durch Anpassung der Spulengeometrie und des Stromflusses in dem Werkstück hinterlegt werden. Mittels Simulationen wird zuerst der Einfluss verschiedener Parameter in Relation auf die Kraftwirkung untersucht. Anhand dieser Ergebnisse werden verschiedene Konzepte zur formgebenden Werkzeugspule erstellt. In Experimenten werden diese Konzepte anhand einfacher Sollgeometrien erprobt, sodass als Ergebnis eine Werkstückgeometrie ohne formgebende Matrize erzeugt werden kann. Das Ziel der Projektarbeit ist es, die elektromagnetische Umformung, ohne eine formgebende Matrize zu ermöglichen. Dabei sollte der auftretende Verschleiß zwischen Werkstück und Werkzeug minimiert werden. Des Weiteren soll die matrizenlose Umformung es ermöglichen, Geometrien zu erzeugen, welche durch konventionelle Matrizen nicht abgebildete oder nicht ohne Werkstückversagen abgeformt werden können.

Abstract

This project deals with the electromagnetic forming with a form-given die coil. Conventional forming, which is based on form-given dies, is usually used in the industry, but there are resulting many disadvantages, for example the limited durability of the formgiven die or the wear on the die, that with the use of the electromagnetic forming would be solved. Even sensitive surfaces without lubricants can be formed by electromagnetic forming, which is a high velocity forming method. The form changing capacity for many materials will be increased due to the high velocity forming.

The electromagnetic forming is being influenced by the electric current in the workpiece, which depends from the coil geometry, the distance from the coil to the workpiece and the current of the coil, that is why the whole forming process is without a formgiven die. These parameters can be changed, so that a change in the created geometry could be allowed. The influence of different parameters is shown first via simulations. On the basis of these results several concepts will be created, that should be used in experiments. The intention of this work is, to do the electromagnetic forming without using a form given die.

INHALTSVERZEICHNIS

1	EINLEITUNG	8
2	ZIELSTELLUNG	9
3	STAND DER FORSCHUNG	10
3.1	Magnetisches Feld zeitlich veränderlicher Ströme	11
3.1.1	Stärke eines Magnetfelds	11
3.1.2	Lorentzkraft	11
3.1.3	Magnetischer Fluss	12
3.1.4	Ausbreitung des Magnetfelds	13
3.1.5	Elektromagnetische Induktion	14
3.1.6	Biot-Savart-Gesetz	15
3.1.7	Skineffekt und Skintiefe	16
3.1.8	Verhalten von Werkstoffen im magnetischen Feld	17
3.2	Umformtechnik	19
3.2.1	Hauptgruppen der konventionellen Umformoperationen	19
3.2.2	Elektromagnetische Umformung (EMU)	21
4	SIMULATIONEN	22
4.1	Simulationsmodell – Grundlagen	22
4.2	Inhomogenitätsbestimmung	24
4.2.1	Erstes Inhomogenitätskriterium	26
4.2.2	Zweites Inhomogenitätskriterium	27
4.3	Auswertung der Simulationen	28
4.3.1	Welchen Einfluss nimmt der Leiterabstand auf die lokale Kraftwirkung beim elektromagnetischen Umformen?	29
4.3.2	Welchen Einfluss hat die Spulengeometrie auf die lokale Kraftwirkung beim elektromagnetischen Umformen?	32
4.3.3	Welchen Einfluss hat die Spulenorientierung auf die lokale Kraftwirkung beim elektromagnetischen Umformen?	36

4.3.4	Welchen Einfluss hat der Spulenquerschnitt auf die lokale Kraftwirkung beim elektromagnetischen Umformen?	39
5	EXPERIMENTE	42
5.1	Prägen auf Fläche zur Untersuchung der Lokalität (Spulenvariation)	42
5.2	Abbildung in freiem Flug	46
6	FAZIT UND AUSBLICK.....	49
7	LITERATURVERZEICHNIS	51

Symbole und Abkürzungen

Symbole

\times	Kreuzprodukt
$*$	Skalare Multiplikation

Abkürzungen

EMU	Elektromagnetische Umformung
i.M.	im Maßstab

Formelzeichen

Zeichen	Einheit	Erklärung
A	mm^2	Probenquerschnitt
\vec{B}	T	Magnetische Flussdichte
C	F	Kapazität
\vec{H}	1 Am^{-1}	Magnetische Feldstärke
I	A	Strom
I_{z1}	N/mm^3	Inhomogenitätswert 1 (Steigung)
I_{z2}	mm	Inhomogenitätswert 2 (Breite)
κ	S/m	Elektrische Leitfähigkeit
q	C	Ladung
r	mm	Abstand von Leiter und definiertem Punkt im Raum
t	s	Zeit
U	V	Spannung
U_i	V	Induktionsspannung
μ_0	N/A^2	Permeabilitätskonstante
μ_r	-----	Permeabilität
w	J/m^3	Volumetrische Energiedichte
ω	$1/\text{s}$	Kreisfrequenz
ϕ	Vs	Magnetischer Fluss
δ	m	Eindringtiefe / Skintiefe

1 Einleitung

In der Industrie wird oft auf abbildende Umformoperationen wie Tiefziehen oder Streckziehen gesetzt, welche auf formgebenden Werkzeugen basieren [EMU16, Fin14]. Da diese aufgrund von Verschleiß in ihrer Belastbarkeit begrenzt sind und so die konventionelle Umformung ihre Grenzen erreicht, werden andere Umformverfahren benötigt. Selbst Umformungen von Bauteilen mit niedrigem Komplexitätsgrad besitzen angesichts hoher Werkzeugkosten einen hohen Zeitaufwand.

Das elektromagnetische Umformen (kurz EMU) ist ein Hochgeschwindigkeitsumformverfahren, welches durch berührungslose Krafteinleitung eine Formgebung durchführt. Die Krafteinleitung erfolgt über die Energiedichte gepulster Magnetfelder [Mun14, EMU16]. Folglich ist auch kein Kontakt zwischen Werkstück und Werkzeugspule erforderlich. Die EMU erlaubt funktionsangepasste und individuell gestaltete Strukturen in Bauteile anzubringen. Durch kontaktlose Umformung ohne formgebende Matrizen bzw. Kraftwirkung kommt es zu keinem mechanischen Kontakt zwischen Werkstück und Werkzeugspule, sodass es keine Oberflächenverunreinigungen oder Werkzeugabdrücke geben wird. Es wird somit auf Fertigungshilfsstoffe (Schmiermittel), welche die Umwelt belasten, verzichtet. Der Verzicht auf diese Schmiermittel, würde auch zur einer Kostenreduktion führen.

2 Zielstellung

Das Ziel der Projektarbeit ist, die elektromagnetische Umformung, ohne eine formgebende Matrize zu ermöglichen. Dazu sollte untersucht sein, welche Parameter was für einen Einfluss auf die EMU haben. Um eine möglichst präzise Umformung, mit möglichst genauen Konturen, durchführen zu können, soll ebenfalls im Rahmen dieser Arbeit eine möglichst inhomogene Werkzeugspule konstruiert werden. Die Sollgeometrie soll durch Anpassung, der Spulengeometrie und des Stromflusses (in der Werkzeugspule), hinterlegt werden. Mithilfe der Grundlagen der Elektrotechnik soll die elektromagnetische Grundlage des Umformprozesses dargelegt werden. Speziell betrachtet wird das zeitlich veränderliche magnetische Feld, welches für die EMU eine wichtige Komponente ist. Die EMU ist von einer Großzahl an Variablen beziehungsweise Parametern abhängig, daher ist es nötig durch Grundlagen Veränderungen von Parametern/Variablen nachzuvollziehen.

Mittels des Simulationsprogramms Ansys Electronics werden Simulationen durchgeführt, um theoretische Erkenntnisse zum Umformungsprozess zu erhalten. In diesen Simulationen werden verschiedene Variablen, wie der Abstand der Spule zum Blech oder die Form der Spule, variiert. Folgend werden dann die Ergebnisse der Simulationen ausgewertet und daraufhin in Experimenten weiter ausgeführt.

3 Stand der Forschung

Um einen Bezug zwischen der Grundlagenforschung und dem Projektthema herzustellen, wird in diesem Kapitel die Erkenntnisse aus den Kapiteln 3.1 und 3.2 vor dem Hintergrund des Projektgegenstands betrachtet. Im Rahmen dieser Betrachtung, sollen grundlegende Parametereinflüsse auf die EMU erläutert werden, welche in den Kapiteln 4 und 5 weiter untersucht werden.

Im Kapitel 3.1.6, in dem das Biot-Savart-Gesetz thematisiert wird, wird erläutert, dass sich die magnetischen Feldgrößen für beliebige Geometrien mithilfe der beiden Formeln (3-5) und (3-6) bestimmen lassen. Beide erwähnten Größen sind abhängig von dem Abstand r eines Punktes im Raum zum Leiter, der das Magnetfeld durch den Stromfluss erzeugt. Mithilfe der Formel (3-2) kann gefolgert werden, dass der Abstand r zum stromdurchflossenen Leiter einen Einfluss auf die Lorentzkraft an diesem Punkt hat. Eine erste These, zum Einfluss des Leiterabstands auf die Lorentzkraft, wird im ersten Abschnitt des Kapitels 4.3.1 aufgestellt, die dann im letzten Abschnitt des Kapitels 4.3.1 durch eine Simulation verifiziert wird. Dass die Lorentzkraft elementar für den Umformungsprozess durch die EMU ist, wird in dem Kapitel 3.1.5 erläutert.

Ein weiterer Parametereinfluss lässt sich ebenfalls aus dem Biot-Savart-Gesetz ableiten. Da über die komplette Hülle des stromdurchflossenen Leiters integriert werden muss, kann daraus geschlossen werden, dass verschiedene Leitergeometrien unterschiedliche Magnetfeldgrößen bei einem Stromdurchfluss aufweisen können. Der Einfluss der Spulengeometrie auf die EMU wird im Kapitel 4.3.2 betrachtet.

Die Lage des Leiters im Raum bzw. die Masseverteilung der Werkzeugspule im Raum hat ebenfalls einen theoretischen Einfluss auf das Integral, dass in der Formel (3-5) beschrieben wird. Auch der Einfluss der Leiterorientierung wird im gesonderten Kapitel 4.3.3 näher betrachtet.

3.1 Magnetisches Feld zeitlich veränderlicher Ströme

Bei Ladungsträgerbewegung bilden sich Magnetfelder aus. Im Rahmen dieser Projektarbeit wird diese Ladungsträgerbewegung durch einen Stromfluss hervorgerufen, welcher die Werkzeugspule durchflutet. Aufgrund der zeitlichen Abhängigkeit des Stromes, werden in den folgenden Kapiteln die elektromagnetischen Grundlagen, magnetischer Felder zeitlich veränderlicher Ströme, thematisiert.

3.1.1 Stärke eines Magnetfelds

Um einen stromdurchflossenen Leiter entsteht ein magnetisches Feld [Stu17, Ste07]. Die Stärke eines Magnetfeldes kann durch zwei Größen definiert werden, die magnetische Flussdichte B und die magnetische Feldstärke H . Beide Größen stehen im Zusammenhang durch die Formel (3-1) [Hag11, Bus15, Ste07, Mar09]. μ und ihr Einfluss auf das Magnetfeld werden im Kapitel 3.1.8 weiter thematisiert.

$$\vec{B} = \mu * \vec{H} \quad (3-1)$$

3.1.2 Lorentzkraft

Die Lorentzkraft ist die Kraft, die ein magnetisches Feld auf bewegte Ladungen ausübt [Hag11, Mar09, Wei15, Ste07]. Es wird angenommen, dass sich Elektronen in einem stromdurchflossenen Leiter vom Minuspol zum Pluspol bewegen, wie in Bild 1 durch den blauen Pfeil symbolisiert wird. Befindet sich dieser Leiter in einem Magnetfeld, so wirkt die Lorentzkraft auf die sich im Leiter bewegenden Elektronen. Bei der Lorentzkraft wird von einer vektoriellen Größe ausgegangen.

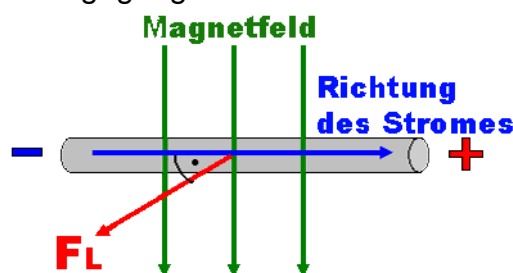


Bild 1: Richtungssinn der Lorentzkraft [DLK20]

Die Formel (3-2), zur Bestimmung der Lorentzkraft auf n Elektron, setzt sich aus derer summierten Ladung q , der Geschwindigkeit v und der Stärke B des magnetischen Feldes zusammen [Hag17]. Der Kreuzproduktoperator hat zur Folge, dass die Lorentzkraft senkrecht zur Bewegungsrichtung der Elektronen und zur Wirkrichtung des Magnetfelds gerichtet ist. Dieser geometrische Zusammenhang wird ebenfalls im Bild 1 symbolisiert.

$$\vec{F}_L = q(\vec{v} \times \vec{B}) \quad (3-2)$$

3.1.3 Magnetischer Fluss

Die Gesamtheit der Feldlinien im magnetischen Feld wird als magnetischer Fluss ϕ bezeichnet [Bus15]. Dabei wird die magnetische Flussdichte B als die Feldliniendichte im magnetischen Feld angesehen [Hag11]. Die Formel (3-3) beschreibt diesen Zusammenhang mithilfe eines Integrals über die komplette vom Magnetfeld durchsetzte Fläche [Wei15].

$$\phi = \int_A \vec{B} d\vec{A} \quad (3-3)$$

Im Bild 2 ist eine Leiterschleife mit der Fläche A abgebildet, die durch Magnetfeldlinien durchströmt wird. Diese Feldlinien haben eine magnetische Flussdichte von B . Die Berechnung des magnetischen Flusses wird vereinfacht als Multiplikation dargestellt, da die Flussdichte auf der kompletten Fläche A der Leiterschleife konstant ist.

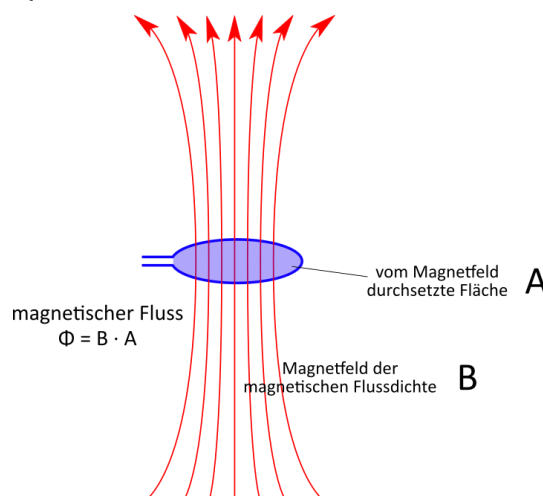


Bild 2: Von einem Magnetfeld durchsetzte Leiterschleife [Indo20]

3.1.4 Ausbreitung des Magnetfelds

Es wird angenommen, dass ein Einleiter senkrecht zur Zeichenebene (Bild 3a und 3b) bzw. zur Schriftebene aufgestellt ist. Fließt nun ein Strom durch den Leiter, so verlaufen die Feldlinien kreisförmig um den Leiter [Hag17]. Wenn der Strom in die Schriftebene hineinfließt, dann bewegen sich die Feldlinien im Uhrzeigersinn (Bild 3a). Die entgegengesetzte Stromrichtung bewirkt, dass sie sich gegen den Uhrzeigersinn bewegen (Bild 3b) [Hag17].

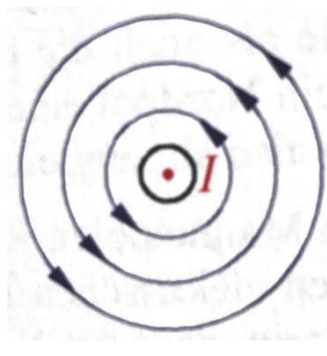
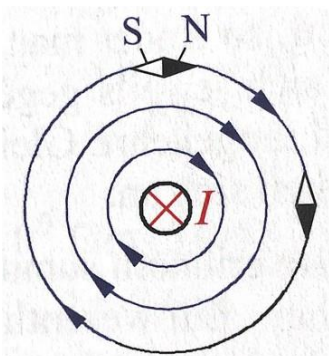


Bild 3a: Strom fließt in Zeichenebene [Hag17] **Bild 3b:** Strom fließt aus Zeichenebene [Hag17]

Die Stromrichtung bzw. die daraus resultierende Ausbreitung des Magnetfelds besitzt einen Einfluss auf die elektromagnetische Induktion, die im folgenden Kapitel thematisiert wird.

Im Bezug zum Projektgegenstand ist die Erkenntnis aus diesem Kapitel von Interesse, da sich bei dem im Kapitel 4.1 definierten Modell die Stromrichtung stetig ändert und es somit zu Magnetfeldimpulsen in verschiedene Raumrichtungen kommt.

3.1.5 Elektromagnetische Induktion

Die Induktion beschreibt das Entstehen einer Spannung, durch Änderung des magnetischen Flusses [Hag11, Bus15, Mar09, Ste07]. Folgend wird diese induzierte Spannung als Induktionsspannung bezeichnet. Es gibt zwei unterschiedliche Methoden diese Induktionsspannung zu erzeugen:

1. Die vom Magnetfeld durchsetzte Fläche einer Leiterschleife ist variabel.
2. Die magnetische Feldstärke ist variabel.

Die in einer Leiterschleife induzierte Spannung ist stets gleich der pro Zeiteinheit auftretenden Änderung des von der Schleife umfassten magnetischen Flusses [Hag11].

$$U_i = -N \frac{d\phi}{dt} \quad (3-4)$$

Im Kapitel 4.1 wird das Simulationsmodell beschrieben aus dem hervorgeht, dass sowohl die Werkzeugspule als auch das zu verformende Werkstück eine feste Position haben. Daher kommt die Spannungsinduktion nach dem 1. Prinzip nicht in Frage, da die vom Magnetfeld durchströmte Fläche des Werkstücks konstant ist. Jedoch wird die Spule durch einen sinusförmigen Wechselstrom durchflutet, der bewirkt, dass die Magnetfeldstärke zeitabhängig bzw. variabel ist. Somit wird im Werkstück eine Spannung nach der 2. beschriebenen Möglichkeit induziert. Die Elektronen im Werkstück, welches aus Aluminium besteht, sind frei beweglich, deshalb entstehen Wirbelströme, die in Kapitel 3.1.7 im Zusammenhang mit dem Skineffekt thematisch behandelt werden. Da sich das Werkstück im ursprünglichen Magnetfeld der Werkzeugspule befindet, wirkt die Lorentzkraft auf die sich bewegenden Elektronen im Werkstück. Die Lorentzkraft auf die Elektronen des Werkstücks sorgt schließlich für die Umformung [Jos07, Klo06].

3.1.6 Biot-Savart-Gesetz

Zur Bestimmung von Parametern im Magnetfeld wurden bislang die Formeln (3-1) für die magnetischen Feldgrößen und die Formel (3-3) für die magnetische Durchflutung erläutert. Jedoch ist die Berechnung dieser Parameter bei beliebig geformten stromführenden Leitern mithilfe dieser Gesetze nicht möglich [Stu17, Mar09]. Hier bedarf es der Hinzunahme des Biot-Savart-Gesetzes, um die Berechnung der Parameter, im Magnetfeld, bei beliebig geformten Leitern zu ermöglichen [Hag11]. Dabei ist zu beachten, dass die Integration über einer geschlossenen Kurve, um die gesamte Leiterlänge durchgeführt werden muss [Hag11, Stu17, Gdm15]. Die Formel ist nur in der Luft und nicht für ferromagnetische Werkstoffe, welche sich in der Nähe des Leiters befinden, gültig [Mar09]. Dafür wird das Wegelement $d\vec{l}$ benötigt [EFE15]. Dieses stellt einen Vektor in aktueller Stromrichtung dar [Mar09] [Hag11].

$$\vec{H} = \frac{I}{4\pi} \int_L \frac{d\vec{l} \times \vec{r}}{r^3} \quad (3-5)$$

Aus der Formel (3-5) lässt sich folgern, dass bei steigendem Leiterabstand die magnetische Feldstärke abnimmt. Aus der Formel (3-1) lässt sich folgender Zusammenhang herleiten:

$$\vec{B} = \mu * \frac{I}{4\pi} \int_L \frac{d\vec{l} \times \vec{r}}{r^3} \quad (3-6)$$

Somit lässt sich mithilfe der Formel (3-5), der erwähnte Zusammenhang zwischen Leiterabstand und magnetischer Feldstärke, auch auf die magnetische Flussdichte übertragen. Also besitzt nach der Formel (3-6) der Leiterabstand einen Einfluss auf die magnetische Flussdichte und nach der Formel (3-2) auch auf die Lorentzkraft. Da die Lorentzkraft, wie in Kapitel 3.1.5 beschrieben, die EMU ermöglicht, wird dieser Zusammenhang (zwischen Lorentzkraft bzw. EMU und Leiterabstand) im Kapitel 4.3.1 näher untersucht.

3.1.7 Skineffekt und Skintiefe

Wenn ein hochfrequenter Wechselstrom einen elektrischen Leiter durchfließt, resultiert daraus, dass die Stromdichte im Inneren des Leiters niedriger ist als im äußeren Bereich. Nahezu der gesamte Strom fließt in einer dünnen Schicht an der Leiteroberfläche bzw. der Strom wird auf die Oberfläche des Leiters verdrängt. Dieser Effekt bewirkt, dass sich bei einem viereckigen Leiterquerschnitt, der Strom hauptsächlich an den Kanten konzentriert [Hag11, Bus15]. Im weiteren Verlauf des Projekts wird die Form einer viereckigen Spule weiter thematisiert, bei der dieser Effekt zur genaueren Betrachtung herangezogen werden kann. Der Skineffekt resultiert aus den Folgen des Induktionsgesetzes, da die Wirbelströme (im Leiter) um die magnetische Feldlinie sich nur dann bilden können, sofern sich die Intensität dieser Feldlinien zeitlich ändert, folgerichtig $d\Phi/dt \neq 0$ ist [Hag11, Bus15]. Diese Wirbelströme, welche von der Frequenz abhängig sind, sind dem ursprünglichem Strom entgegen gerichtet und schwächen ihn somit ab (Lenzsche Regel) [Hag11, Sch20]. Je schneller sich der Stromfluss ändert, desto intensiver ist die Wirbelstrombildung. Folglich vergrößert sich dann auch $d\Phi/dt$. Daraus resultiert, dass der Strom umso mehr an die Leiteroberfläche gedrängt wird [Bus08, Sch20]. Aufgrund des Wechselstroms werden elektrische Felder erzeugt, welche als Träger der Energie fungieren, wobei diese infolge der hohen Leitfähigkeit des Materials gar nicht erst in das Material eindringen können [Bus08, Sch20]. Die Skintiefe beschreibt die Eindringtiefe des äußeren Feldes in den Leiter. Der Strom kann nur bis zu dieser Tiefe effektiv in den Leiter eindringen. Diese Tiefe wird im Bild 4 veranschaulicht und kann durch die Formel (3-7) berechnet werden [For01, Mag07].

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\omega \kappa \mu_0 \mu_r}} \quad (3-7)$$

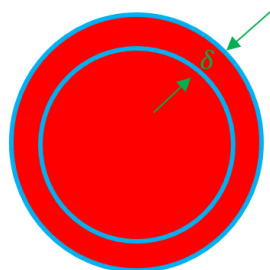


Bild 4: Veranschaulichung der Skintiefe

3.1.8 Verhalten von Werkstoffen im magnetischen Feld

Befindet sich ein Körper im Wirkungsbereich, eines sich ausdehnenden Magnetfelds, so besitzt die magnetische Eigenschaft dieses Stoffes einen Einfluss auf die Stärke des Feldes [Hag11, Mar09, Ste07]. Diese magnetische Eigenschaft eines Stoffes lässt sich mit der spezifischen Permeabilitätszahl μ_r ausdrücken. Dies besitzt im Vakuum den Wert eins und besitzt bei beliebigen Stoffen einen Wert ungleich von eins [Hag11]. Der Zusammenhang der magnetischen Flussdichte und der Permeabilität wurde mithilfe der Formel (3-1) veranschaulicht. Die Formel (3-8) beschreibt die Zusammensetzung der Permeabilität [Hag11, Bus15, Ste07].

$$\mu = \mu_0 * \mu_r \quad (3-8)$$

Dieser magnetische Einfluss ist eine Folge des atomaren Aufbaus der Stoffe. Die Elektronen, welche sich auf den Atomhüllen befinden, erzeugen magnetische Felder (Elementarfelder) [Hag11]. Wird der Stoff von keinem äußeren Magnetfeld beeinflusst, so heben sich die Elementarfelder gegenseitig auf, wobei noch kein resultierendes Magnetfeld nach außen hin in Erscheinung tritt [Hag11]. Sobald der Stoff jedoch von einem äußeren Magnetfeld durchsetzt wird, resultiert daraus ein inneres Magnetfeld, welches sich mit dem äußeren Magnetfeld überlagert [Mar09].

Das magnetische Verhalten der Stoffe lässt sich grob in drei Klassen unterteilen. Dabei wird zwischen ferromagnetischen, diamagnetischen und paramagnetischen Stoffen unterschieden [Bus15, Hag11].

Bei diamagnetischen Stoffen werden, bei Einfluss eines äußeren Magnetfelds, Kreisströme in den Atomen induziert [Hag11]. Aufgrund der Lenzschen Regel sind die daraus resultierenden Elementarfelder so gerichtet, dass sie der äußeren Flussänderung entgegenwirken [Hag11]. Demzufolge kommt es zu einer Verringerung der Flussdichte B des äußeren Magnetfelds. Diamagnetische Stoffe haben eine Permeabilitätszahl $\mu_r < 1$ (jedoch nahe eins). Dieser diamagnetische Effekt ist sehr gering jedoch, bei der Analyse eines Versuchsaufbaus oder eines Simulationsmodells, zu berücksichtigen [Bus15].

Paramagnetische Stoffe haben die Eigenschaft, dass die durch das äußere Magnetfeld verursachten Kreisströme innerhalb eines Atoms sich nicht gegenseitig aufheben [Hag11]. Ein äußeres Magnetfeld hat demnach zur Folge, dass Atome im Stoff das Feld verstärken. Die Permeabilitätszahl $\mu_r > 1$ (jedoch nahe 1). Die Verstärkung des Magnetfelds durch diese Stoffgruppe ist minimal. Paramagnetische Stoffe sind nur magnetisch, wenn sie durch ein äußeres magnetisches Feld durchsetzt werden [Bus15].

Ferromagnetische Stoffe führen zu einer hohen Verstärkung des äußeren Magnetfeldes. Grund dafür ist einerseits, dass sich wie bei paramagnetischen Stoffen die Kreisströme im Atom sich nicht gegenseitig aufheben [Hag11]. Andererseits richten sich die Atome von selbst in einheitlichen Richtungen, innerhalb eines Bezirks, aus. Diese Bereiche werden Weißsche Bezirke genannt [Hag11, Stu17, Ste07]. Sobald ein äußeres Magnetfeld ein ferromagnetisches Material durchdringt, führt dies zu einer Vergrößerung der Flussdichte, des äußeren Magnetfelds [Hag11, Ste07]. Ferromagnetische Stoffe sind, auch ohne Einfluss eines externen magnetischen Feldes, magnetisch [Hag11, Mar09].

3.2 Umformtechnik

In den folgenden Unterkapiteln werden die konventionellen Umformoperationen und die EMU behandelt.

3.2.1 Hauptgruppen der konventionellen Umformoperationen

Das Umformen ist eine von sechs Hauptgruppen der Fertigungsverfahren [Klo17, Umf20]. Der Begriff des Umformens bezeichnet die gezielte, plastische Formänderung eines Werkstücks. Im Umformungsprozess wird weder überschüssiges Material entfernt oder hinzugefügt, weshalb es ein volumenkonstanter Prozess ist. Das Umformen selbst kann in fünf Untergruppen aufgeteilt werden (Aufteilung nach Spannungszustand). Diese sind in Bild 6 veranschaulicht [Umf20]

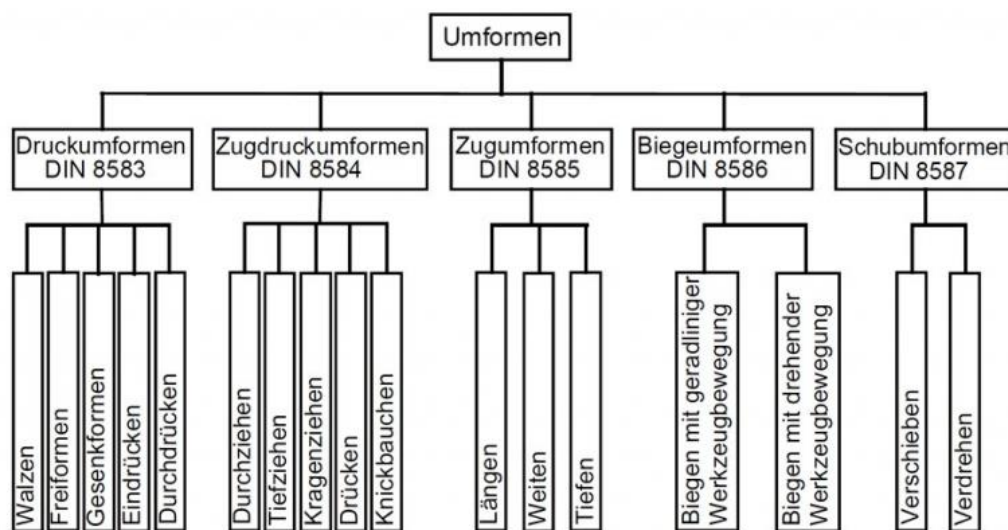


Bild 5: Untergruppen des Umformens mit Beispielen [Umf20]

Weitere Alternativen zur Unterteilung der Umformarten sind eine Unterscheidung nach Massiv- und Blechumformung d.h., nach Art der Werkstücke und nach der Werkstücktemperatur (Warm- und Kaltumformung) [Klo17, Umf20].

Die Vielzahl der konventionellen Umformoperationen sind effektiv, aber dennoch im Formveränderungsmögen begrenzt. So werden auch formgebundene Werkzeuge in

konventionellen Umformprozessen benutzt [Klo17, Umf20]. Außerdem ist in konventionellen Umformprozessen die Einbringung von Hinterschnitten nicht möglich, wonach sie durch nachträgliche Bearbeitung eingebracht werden müssen [Klo17, Umf20]. Dies wiederum sorgt für erhöhte Fertigungskosten und eine geringwertige Materialausnutzung. Bei konventionellen Umformverfahren entsteht ebenfalls ein Verschleiß am Werkzeug und Werkstück [Par16]. Um diesem Verschleiß entgegenzuwirken werden beim Umformen umweltbelastende und kostenintensive Schmiermittel eingesetzt [Umf20].

3.2.2 Elektromagnetische Umformung (EMU)

Eine große Anzahl der Nachteile die bei konventionellen/abbildenden Umformprozessen entstehen, können mit der EMF behoben werden. Das elektromagnetische Umformen ist ein Hochgeschwindigkeitsumformverfahren, welches zeitlich schnell veränderliche (inhomogene) magnetische Felder und die daraus resultierende Lorentzkraft benutzt, um Werkstücke umzuformen [EMU16]. Dabei sind die Werkstücke aus elektrisch leitfähigen Materialien, um die Kraftwirkung zu ermöglichen. Die Kraftwirkung erfolgt dabei kontaktlos und wird erzeugt durch eine von einer Werkzeugspule, induziertem inhomogenen Magnetfeld [Fin14]. Aufgrund des Wechselstromes durch die Werkzeugspule, findet eine Spannungsinduktion durch Magnetfeldänderung im Werkstück statt. Die nun im Werkstück induzierten Wirbelströme wirken, nach der Lenzschen Regel, dem ursprünglichen Magnetfeld entgegengesetzt [Sch85, Muf20]. Durch die darauffolgenden Wechselwirkungen zwischen dem ursprünglichen Magnetfeld und den Wirbelströmen kann die Lorentzkraft eine Umformung des Werkstücks bewirken, wie im Kapitel 3.1.5 bereits erläutert wurde [Jos07, Klo06]. Die EMF bietet ein breites Anwendungsspektrum z.B. in der Automobilindustrie. Die Werkzeugkosten halten sich im

Umformmaschinen, welche eine hohe Flexibilität besitzen, gering [Par16]. Außerdem ist der Magnetfeldimpuls genau dosier- und reproduzierbar [Sch85, Li16]. Der gesamte Umformungsprozess ist dank hoher Umformgeschwindigkeiten binnen einiger Mikrosekunden abgeschlossen, was die Formgebungsgrenzen erweitert [Ahm11, Par16]. Das EMF besitzt eine geringere Rückfederungskompensation, wobei Produktions- sowie Wiederholungsraten gesteigert werden können [Li16]. Ein großer Nachteil der EMF ist, dass die verwendeten Spulen eine kurze Lebensdauer besitzen. Dabei muss die Spule ebenfalls von hoher technischer Qualität (hohe Gegenstandshaltbarkeit) sein, was die Kosten steigert [Sch85, Muf20].

4 Simulationen

In den folgenden Unterkapiteln werden zunächst das Simulationsmodell und die Inhomogenitätskriterien behandelt. Anschließend werden im Kapitel 4.3 die einzelnen Simulationen thematisiert, durchgeführt und ausgewertet.

4.1 Simulationsmodell – Grundlagen

Um verschiedene Erkenntnisse zum Forschungsgegenstand zu sammeln, werden unterschiedliche Versuchsaufbauten verwendet. In diesem Kapitel werden die konstanten Bedingungen beschrieben, unter denen die folgenden Simulationen durchgeführt werden. Zusätzlich ist jeder Fragestellung ein Kapitel zugeordnet, welches die spezifische Modellanpassung näher beschreibt.

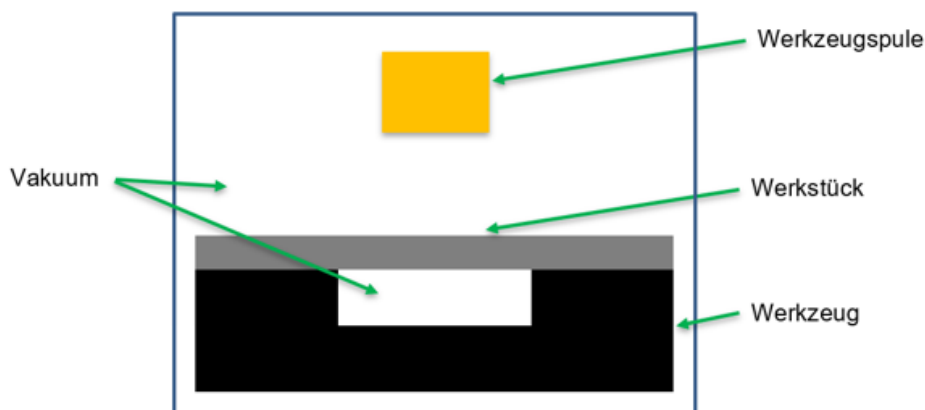


Bild 6: Simulationsmodell

Im Rahmen dieses Projekts werden 2D Simulationen verwendet. Der Versuchsaufbau besteht dabei aus Werkzeugspule, Blech und einem Werkzeug. Die Werkzeugspule hat einen Flächeninhalt von 25 mm^2 , ist quadratisch und besteht aus Kupfer. Da die Werkzeugspule aus Kupfer besteht, ist sie diamagnetisch und hat, wie in Kapitel 3.1.8 erläutert, einen leichten abschwächenden Einfluss auf das Magnetfeld. Dieser Effekt kann jedoch vernachlässigt werden, da das Material der Werkzeugspule bei allen folgenden Simulationen konstant bleibt. Das Werkstück besteht aus Aluminium und hat eine Dicke von 0.2 mm . Somit ist das Werkstück paramagnetisch und hat einen leicht positiven Effekt auf das Magnetfeld, aber auch hier kann der Effekt vernachlässigt

werden, da diese Parameter über alle Simulationen hinweg konstant bleiben. Dieses Blechstück liegt auf dem Werkzeug mit einer Größe von $50\text{ mm} \times 25\text{ mm}$, welches im oberen Sektor über einen quadratischen Hohlraum mit einer Seitenlänge von 8 mm verfügt. Zudem befindet sich die gesamte Umgebung in einem Vakuum, das einen Bereich von $100\text{ mm} \times 64,4\text{ mm}$ einschließt. Alle in den Simulationen verwendeten Spulen werden durch einen Strom durchflutet, welcher durch eine 1800 J Ladeenergie erfolgt. Dies wird im Bild 7 dargestellt.

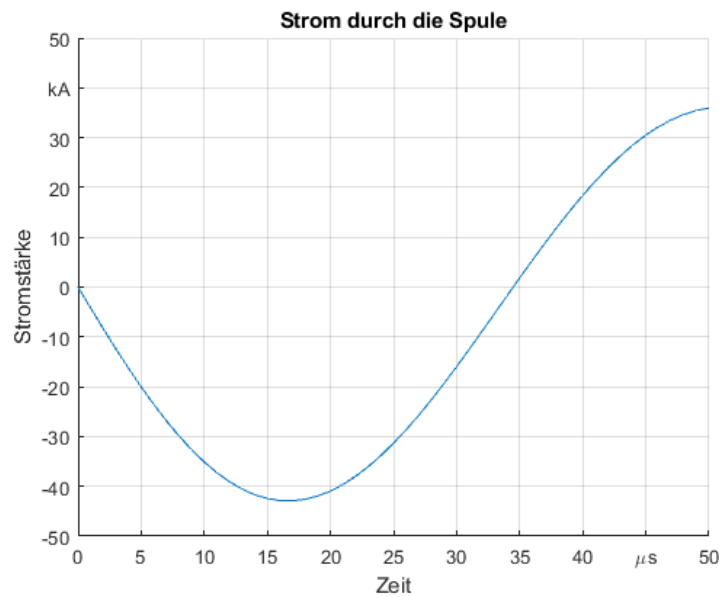


Bild 7: Zeitabhängiger Strom durch die Werkzeugspule

4.2 Inhomogenitätsbestimmung

Bereits in der Zielstellung wurde erwähnt, dass eine möglichst inhomogene Spule, mit möglichst lokaler Kraftwirkung, konstruiert werden soll. Um bewerten zu können, ob eine Spule eine inhomogenere Kraftwirkung auf ein Werkstück besitzt als eine zweite Spule, werden die Kraftwerte auf das Werkstück simuliert und ausgewertet werden. Da es sich wie im Kapitel 4.1 beschrieben um eine 2D-Simulation handelt, muss die Kraft in X-Richtung und in Y-Richtung auf das Werkstück untersucht werden. Beispielhaft für solche Kraftfunktionen stehen die Bilder 8 und 9.

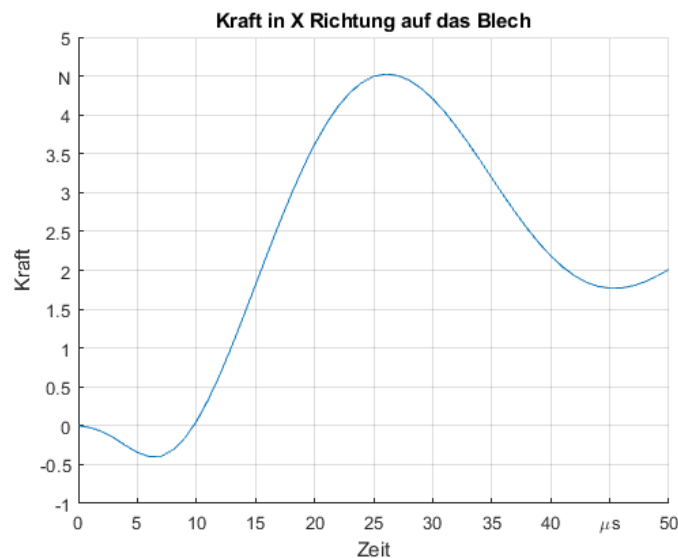


Bild 8: Beispielhafte Kraft in X-Richtung

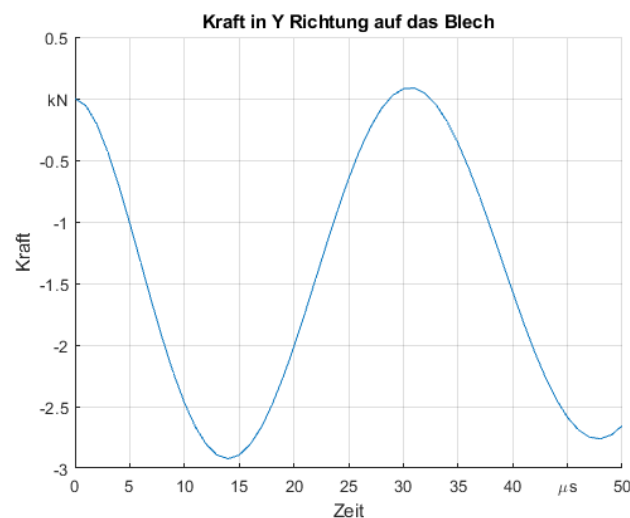


Bild 9: Beispielhafte Kraft in Y-Richtung

Jedoch geben diese Funktionen keinen Aufschluss über die Lokalität der Kraft. Deshalb werden auf der Oberfläche des Werkstücks 50 Messpunkte mit einem Abstand von je 1 mm definiert. An diesen Punkten werden die insgesamt wirkenden magnetischen Kräfte gemessen. Diese Kraftwerte sind aufgrund des Simulationsmodells mit einem negativen Vorzeichen versehen, da sich die Werkzeugspule über dem Werkstück befindet. Die erhaltenen Kraftwerte werden über der jeweiligen Position abgebildet. Beispielhaft für einen solche Kraftkurve steht Bild 10.

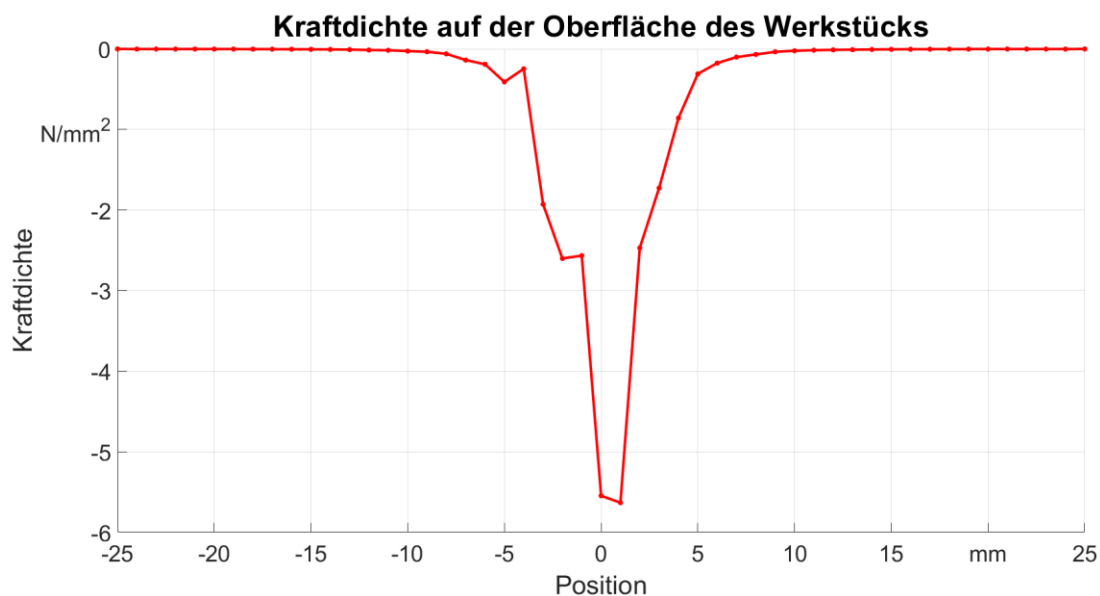


Bild 10: Beispielhafte Kraftkurve auf Werkstück

Die grundlegende Auswertung der Kräfte reicht nicht aus, um die Inhomogenität einer Spule bewerten zu können. Es müssen Bewertungskriterien definiert werden, welche anhand einer gegebenen Kraftkurve, wie in Bild 10, die Inhomogenität der Kraftwirkung erschließen. Diese Kriterien werden in den Kapiteln 4.2.2 und 4.2.3 erläutert.

4.2.1 Erstes Inhomogenitätskriterium

Beim ersten Verfahren wird die Steigung in einem definierten Intervall beobachtet. Da der Verlauf der Kraftkurve einer Gauß'schen Normalverteilung ähnelt, werden zunächst zwei Sigma Umgebungen bestimmt. Eine deckt 68.3 % des Integrals und die zweite Umgebung deckt 95.4 % des Integrals ab. Für beide Intervalle wird jeweils eine linke und eine rechte Begrenzung berechnet. Es werden die Schnittpunkte dieser Begrenzungen mit der Kraftkurve bestimmt. Ermittelt wird die Steigung der Gerade zwischen den Schnittpunkten der linken Begrenzungen und der rechten Begrenzungen zum Betrag. Es wird auf beiden Seiten die Steigung bestimmt, da eine begrenzte Anzahl von Messpunkten vorliegen und zwischen diesen interpoliert wird, somit ist ein genauerer Wert gewährleistet. Der erhaltene Wert wird auf einen Referenzwert von 10 (empirisch im Laufe der Simulationen bestimmt) normiert.

$$I_{z1} = \frac{1}{20} \left(\left(\left| \frac{f(-2\sigma) - f(-\sigma)}{-\sigma} \right| \right) + \left(\left| \frac{f(\sigma) - f(2\sigma)}{-\sigma} \right| \right) \right) \quad (4-1)$$

$$\text{für } \sigma = \sqrt{12.5}$$

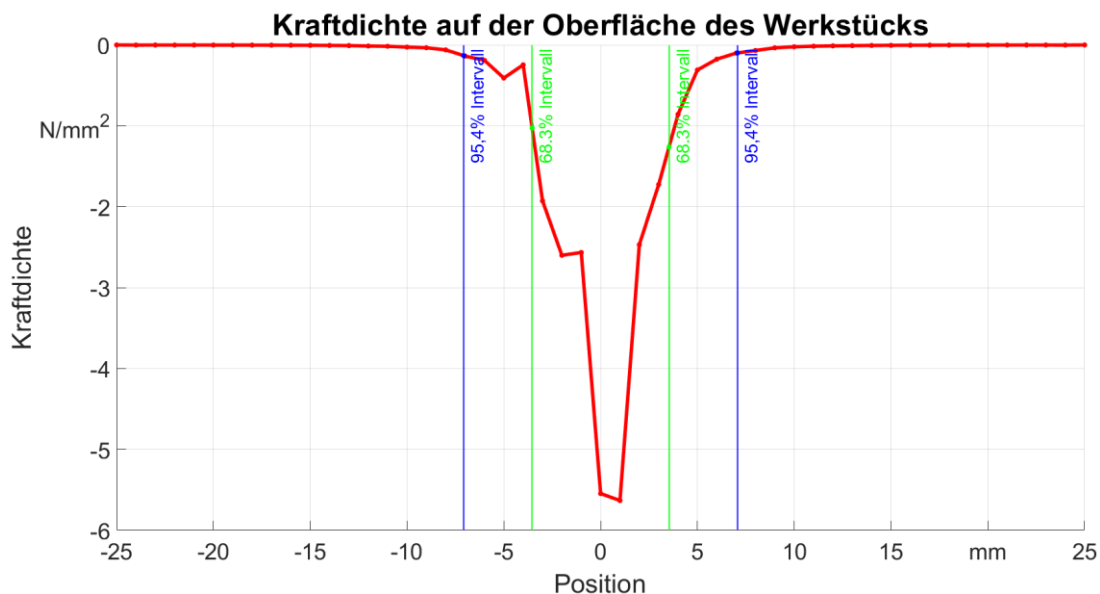


Bild 11: Anwendung des ersten Inhomogenitätskonzepts

4.2.2 Zweites Inhomogenitätskriterium

Beim zweiten Verfahren wird die Breite der Kraftkurven genauer betrachtet. Dazu werden vier Höhewerte bestimmt, die prozentual von der Gesamthöhe abhängen. Es werden die Schnittpunkte dieser Höhenlinien mit der Kraftkurve ermittelt (falls mehrere Schnittpunkte vorhanden wird der äußerste genommen). Danach wird der Abstand der zwei Schnittpunkte auf einer Höhenlinie berechnet. Zum Schluss wird der Durchschnitt dieser Abstandswerte gebildet. Da eine höchstmögliche Inhomogenität angestrebt wird, soll der Breitewert so gering wie möglich sein. Der erhaltene Wert wird auf einen Referenzwert von 0.4 normiert. Um diesen Zusammenhang zu vereinfachen, wird der normierte Wert von 1 abgezogen. Nun steht ein höherer Wert I_{Z2} für eine höhere Inhomogenität.

$$I_{Z2} = 1 - \left(\frac{5}{4} * \sum_{m=1}^4 f^{-1} \left(\frac{m * |Y_{\max}|}{5} \right) \right) \quad (4-2)$$

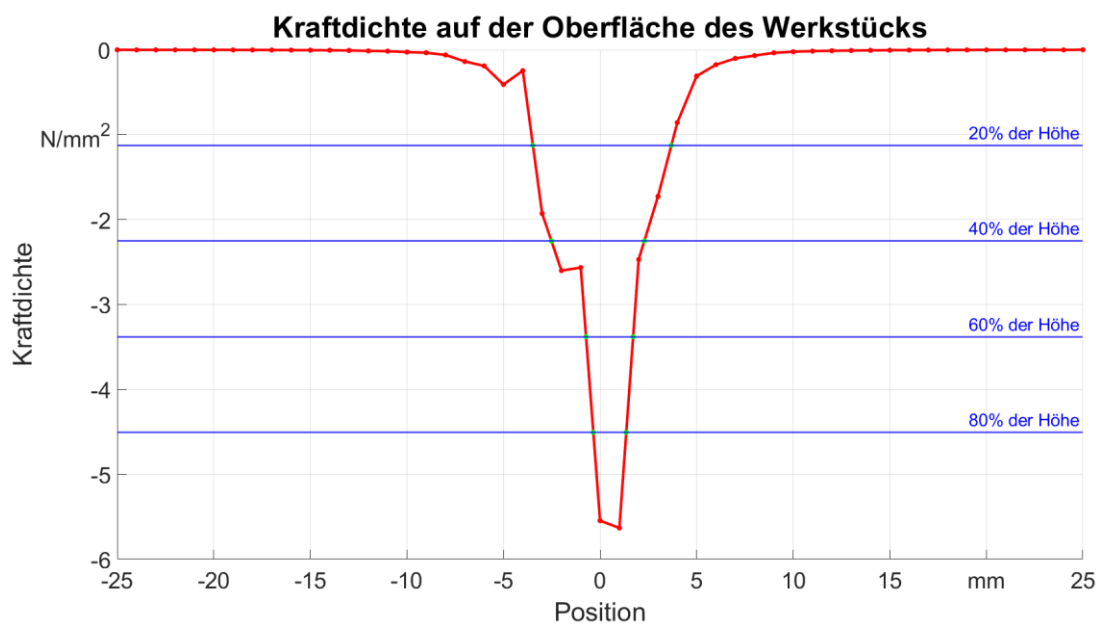


Bild 12: Anwendung des zweiten Inhomogenitätskonzepts

4.3 Auswertung der Simulationen

In den folgenden Unterkapiteln werden die einzelnen Simulationen thematisiert, durchgeführt und ausgewertet. Grundlegend werden dabei vier Fragestellungen, mittels der Ergebnisse einer geeigneten Simulation, beantwortet. Das Kapitel zu einer spezifischen Fragestellung wird dabei in drei Abschnitte gegliedert. Im ersten Abschnitt werden jeweils die elektromagnetischen Grundlagen aus dem Kapitel 3.1 aufgegriffen, aus welchen eine These abgeleitet wird. Im zweiten Abschnitt wird näher auf das spezifische Simulationsmodell eingegangen und im dritten Abschnitt werden die Ergebnisse der Simulation ausgewertet.

4.3.1 Welchen Einfluss nimmt der Leiterabstand auf die lokale Kraftwirkung beim elektromagnetischen Umformen?

Grundlagen zur Fragestellung

Um zu überprüfen, ob und was der Leiterabstand für einen Einfluss auf die Kraftverteilung bzw. die Lokalität des magnetischen Feldes besitzt, muss theoretisch sowie experimentell (Simulationen, Praxistests) erforscht werden. In der Theorie ist der Betrag der Lorentzkraft auf das Werkstück von Bedeutung, wie bereits im Kapitel 3.1.5 erläutert wurde. Wenn die Formeln (3-1), (3-2) und das Biot-Savart-Gesetz im Zusammenhang betrachtet werden, ergibt sich die Formel (3-11) für die Lorentzkraft, welche unter anderem abhängig vom Leiterabstand r ist.

$$\vec{F}_L = q * \left(\vec{v} \times \left(\mu * \frac{I}{4\pi} \int_L \frac{d\vec{l} \times \vec{r}}{r^3} \right) \right) \quad (4-3)$$

Im Rahmen dieser Fragestellung, werden die drei spezifische Leiterabstände $0.2mm$, $0.5mm$ und $2mm$ betrachtet. Da der Leiterabstand im Nenner des Integrals steht folgt, dass die Lorentzkraft bei steigendem Leiterabstand abnimmt. Somit kann theoretisch allein durch den Leiterabstand bestimmt werden, wie viel Kraft auf das Werkstück wirken soll. Ob jedoch die Kraftkurve bei steigender Spaltbreite homogener wird, kann zum jetzigen Zeitpunkt noch nicht beurteilt werden. Dies wird in den folgenden Kapiteln, die sich thematisch dieser Fragestellung anschließen, näher untersucht.

Modellanpassung

Eine grundlegende Simulationsmodellbeschreibung ist bereits im Kapitel 4.1 erfolgt. In diesem Abschnitt sollen nur die spezifischen Parameter und Änderungen des bereits thematisierten Grundmodells erläutert werden.

Um eine hohe Qualität der Simulationsergebnisse, der beschriebenen ersten Fragestellung, zu gewährleisten, werden alle einflusstragenden Parameter, ausschließlich dem Leiterabstand, als Konstante definiert. Dies ist notwendig, um die Wirkung anderer Parameter, auf die magnetische Kraft, auszuschließen. Im Rahmen dieser Fragestellung ist mit Leiterabstand die, im Bild 13 durch den roten Pfeil markierte, Spaltbreite gemeint. Wie im ersten Abschnitt dieses Kapitels erwähnt, kann die Spaltbreite zwischen 0.2 mm , 0.5 mm und 2 mm variieren.

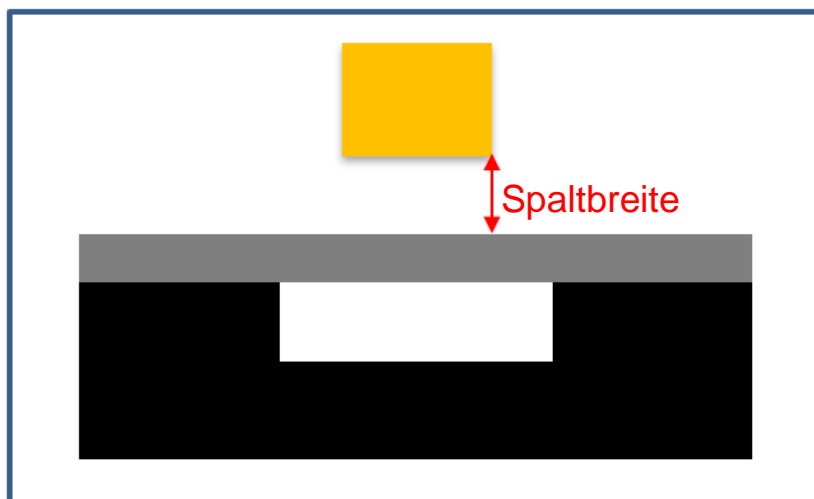


Bild 13: Spezifisches Simulationsmodell zur ersten Fragestellung

Zwischenfazit und Vergleich

„Wenn sich die Spaltbreite vergrößert, sinkt die Kraftwirkung auf das Werkstück.“. Diese These wurde im ersten Abschnitt dieses Kapitels, aufgrund des theoretischen Zusammenhangs zwischen der Spaltbreite und der Lorentzkraft, aufgestellt. Offen blieb jedoch, ob bei steigendem Leiterabstand auch die Kraftkurve zunehmend homogener wird. Nun wurden anhand des, im Kapitel 4.1 beschriebenen und im vorherigen Abschnitt spezifizierten Simulationsmodells, Simulationen für drei verschiedene Spaltbreiten durchgeführt. Mithilfe der beiden definierten Inhomogenitätskriterien werden die erhaltenen Kraftwerte analysiert. Die berechneten Inhomogenitätswerte werden im Bild 14 als gefüllte Kreise symbolisiert, welche dann durch eine gestrichelte Linie verbunden werden.

Dem Bild 14 kann entnommen werden, dass bei steigendem Leiterabstand, die Inhomogenitätswerte sinken. Die Spule, welche im Rahmen der Zielstellung konstruiert werden soll, muss einen möglichst geringen Abstand zum Werkstück haben, um eine möglichst inhomogene Kraftwirkungen zu erzielen.

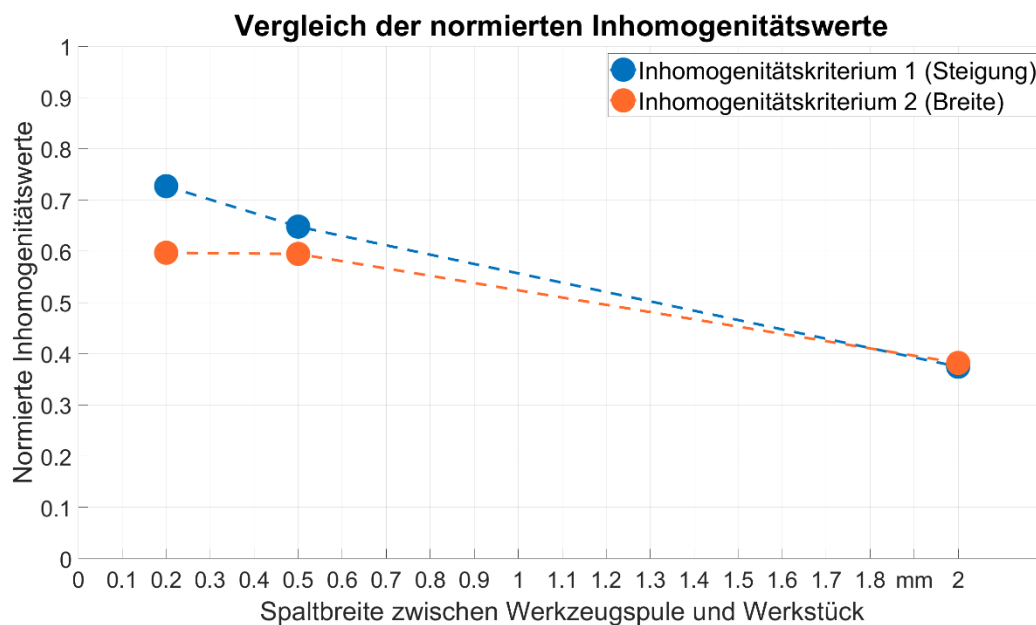


Bild 14: Normierte Inhomogenitätswerte für $r = [0.2\text{mm}, 0.5\text{mm}, 2\text{mm}]$

4.3.2 Welchen Einfluss hat die Spulengeometrie auf die lokale Kraftwirkung beim elektromagnetischen Umformen?

Grundlagen der Fragestellung

Es soll auf theoretischer Grundlage eine Hypothese aufgestellt werden, die den Einfluss der Spulengeometrie auf die Lokalität der Kraftkurve beschreibt. Jedoch ist es vor dem Hintergrund der in Kapitel 3 behandelten Elektromagnetischen Grundlagen nicht möglich, eine mathematisch fundierte These aufzustellen, wie es beim Kapitel 4.3.1 der Fall ist.

Beim Vergleich der Charakteristika, der zu untersuchenden Formen, ergibt sich, dass das Dreieck die inhomogenste Flächenverteilung aufweist. Im Vergleich zum Kreis und Sechseck hat es bei gleichem Flächeninhalt den größten absoluten Breitewert und den geometrisch niedrigsten Schwerpunkt, wenn wie im folgenden Kapitel davon ausgegangen wird, dass eine Kante dem Werkstück zugewandt ist. Aufgrund dessen (größter Breitewert), kann die erste These aufgestellt werden, dass das zweite Inhomogenitätskriterium, welches die Breite der Kraftkurve analysiert, dem Dreieck die homogenste Kraftwirkung zuordnet.

Bereits erläutert wurde, dass eine Kante des gleichseitigen Dreiecks dem Werkstück zugewandt wird. Daraus kann gefolgert werden, dass das Dreieck vom Werkstück weg gerichtet spitz zuläuft. Aufgrund dessen kann die zweite These aufgestellt werden, dass das erste Inhomogenitätskriterium dem Dreieck die inhomogenste Kraftkurve zuordnet, da es im zu untersuchenden Sigtabereich die größte Steigung aufweist.

Die folgenden Kapitel schließen sich thematisch dieser Fragestellung an und verfolgen das Ziel, die aufgestellten Vermutungen zu be- oder widerlegen.

Modellanpassung

Auch dieser Abschnitt baut, wie schon der Abschnitt zur Modellanpassung im Kapitel 4.3.1, auf den Spezifikationen des Simulationsmodells aus Kapitel 4.1 auf. Äquivalent zur ersten Fragestellung ist es das Ziel aus der Simulation den größtmöglichen Informationsgehalt zu ziehen. Dazu werden alle Parameter konstant definiert bis auf die Form der Werkzeugspule. Dabei kann die Werkzeugspule die geometrische Form eines Dreiecks, Kreises und Sechsecks annehmen. Im Bild 15 steht die quadratische Spule stellvertretend für die drei erwähnten Spulengeometrien. Dies wird durch den hellblauen Pfeil symbolisiert, der die in der Simulation zu verwendenden Spulenformen mit der stellvertretenden quadratischen Spule verbindet.

Im Gegensatz zu den restlichen Simulationen werden zwei Möglichkeiten herangezogen, den Leiterabstand zu definieren. Es werden, wie bei der ersten Fragestellung schon, die Spaltbreite mit einem Wert von 2 mm und zusätzlich der Mittelpunktabstand mit einem Wert von $4,5\text{ mm}$ betrachtet. Für beide Abstandsformen, die ebenfalls durch verschiedenfarbige Pfeile im Bild 15 visualisiert werden, wird die gleiche Simulation nach beschriebenem Modell durchgeführt.

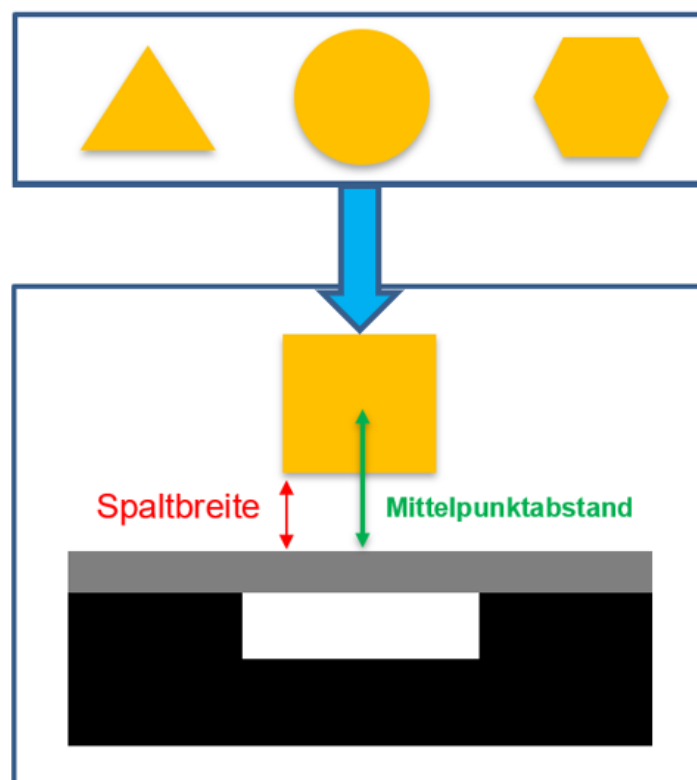


Bild 15: Spezifisches Simulationsmodell zur zweiten Fragestellung

Zwischenfazit und Vergleich

Im ersten Abschnitt dieses Kapitels wurde bereits erläutert, dass mithilfe der behandelten Elektromagnetischen Grundlagen, weder eine Aussage zur gesamten Kraftwirkung auf das Werkstück, noch zur Lokalität der Kraftkurven möglich ist. Es wurden zwei Thesen aufgestellt, die in diesem Kapitel be- oder widerlegt werden sollen.

Das Kapitel zur spezifischen Modellanpassung hat bereits behandelt, dass im Rahmen dieser Fragestellung zwei verschiedene Leiterabstandsformen definiert werden. Für beide liegt ein separates Balkendiagramm vor, das zunächst separat betrachtet und analysiert wird.

Bei dem Bild 16 und 17 handelt es sich um Balkendiagramme, da die Abbildung auf einer reellen X-Achse nicht möglich ist (es liegen Gruppierungen vor). Dem Bild 16, welches die Ergebnisse der 2 mm-Spaltbreite-Simulation visualisiert, kann entnommen werden, dass die blau markierten Balken von links nach rechts kleiner werden. Die orange markierten Balken werden von links nach rechts größer. Somit zeigen beide Inhomogenitätskriterien verschiedene Ergebnisse auf. Durch gezielte Interpretation der Ergebnisse können jedoch differenziertere Aussagen hergeleitet werden, da die mathematische Funktionsweise der Kriterien bekannt ist. Da der Kraftkurve der dreieckigen Werkzeugspule, durch das erste Kriterium, die größte Inhomogenität zugeordnet wird, kann daraus geschlossen werden, dass diese im betrachteten Sigmaintervall die größte Steigung aufweist. Somit kann mit einer dreieckförmigen Spule die tiefste Prägung erzielt werden. Wie bereits erwähnt nimmt die Größe der orangefarbenen Balken von links nach rechts zu. Somit wird der sechseckigen Werkzeugspule der größte Inhomogenitätswert durch das zweite Kriterium zugeordnet, daraus kann geschlossen werden, dass die Kraftkurve am schmalsten ist. Falls eine sehr schmale Prägung angestrebt wird, sollte die Werkzeugspule die Form eines Sechsecks haben. Beide Zusammenhänge wurden im ersten Abschnitt zu dieser Fragestellung im Rahmen einer Vermutung geäußert, die nun bei der Interpretation des ersten Diagramms verifiziert werden konnten.

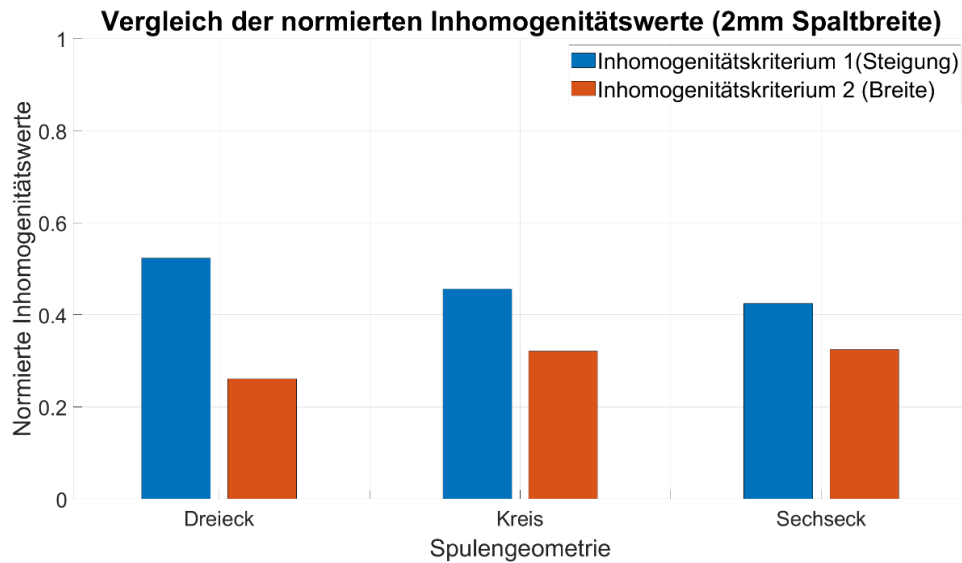


Bild 16: Normierte Inhomogenitätswerte verschiedener Spulengeometrien bei konstanter Spaltbreite

Dem Bild 17, welches die Ergebnisse der 4.5 mm-Mittelpunktabstand-Simulation visualisiert, kann entnommen werden, dass äquivalent zu Bild 16 die blauen Balken von links nach rechts größer und die orangenen Balken in gleicher Leserichtung kleiner werden. Somit können aus diesem Diagramm die gleichen Schlüsse gezogen werden wie aus dem Bild 16.

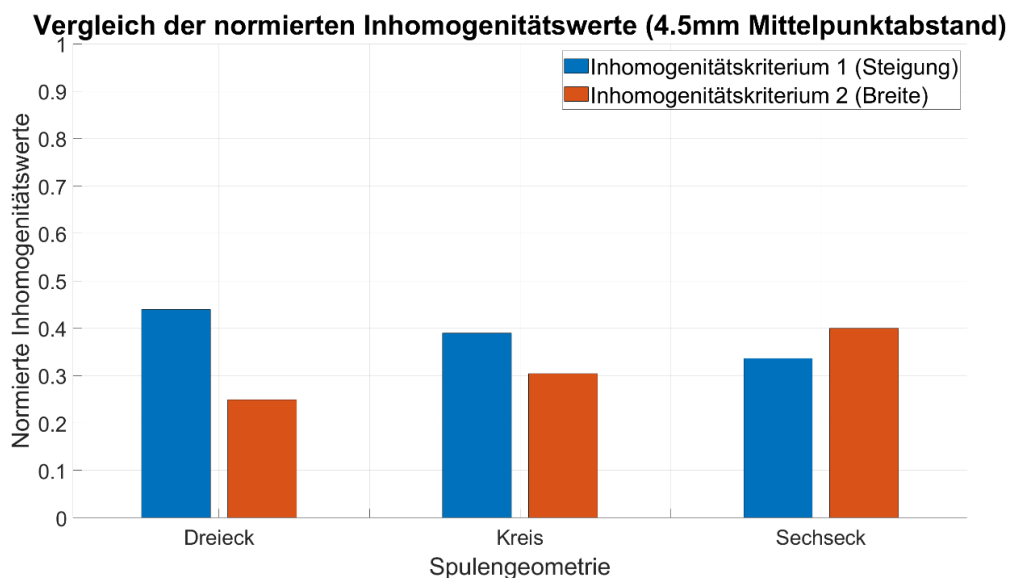


Bild 17: Normierte Inhomogenitätswerte verschiedener Spulengeometrien bei konstantem MA

Zusammenfassend können folgende Konstruktionsrichtlinien festgehalten werden:

1. Die dreieckige Werkzeugspule erzeugt die Kraftkurve mit der größten Steigung im Sigmaintervall.
2. Die sechseckige Werkzeugspule erzeugt die schmalste Kraftkurve.

4.3.3 Welchen Einfluss hat die Spulenorientierung auf die lokale Kraftwirkung beim elektromagnetischen Umformen?

Grundlagen der Fragestellung

Im Rahmen dieser Fragestellung, werden drei unterschiedliche Leiterausrichtungen betrachtet, um den Einfluss einer Spulenrotation auf die EMU zu untersuchen. Rotiert wird die Werkzeugspule um den Mittelpunkt, was bedeutet, dass alle drei Leiterausrichtungen den gleichen Mittelpunktabstand zum Werkstück haben. Äquivalent zur Grundlagenthematisierung im Kapitel 4.3.2, kann keine mathematisch fundierte These aufgestellt werden.

Es kann davon ausgegangen werden, dass die räumliche Flächenverteilung der Werkzeugspule die Inhomogenität der Kraftkurve auf das Werkstück beeinflusst. Die Spule, welche um 90° gedreht wurde, hat die niedrigste Maximalbreite, weshalb angenommen werden kann, dass das zweite Inhomogenitätskriterium ihr die inhomogenste Kraftkurve zuordnet.

Die These wird dann im Abschnitt „Zwischenfazit und Vergleich“ mithilfe einer Simulation näher untersucht.

Modellanpassung

Auch dieses Kapitel baut auf den Spezifikationen des Simulationsmodells aus Kapitel 4.1 auf. Dem Simulationsmodell in Bild 18 kann entnommen werden, dass die Werkzeugspule um den Mittelpunkt rotiert wird. Dabei steht die viereckige Spule stellvertretend für die rotierten rechteckigen Spulen. Diese haben eine Breite von 8 mm und eine Höhe von 3.125 mm . Der Mittelpunktabstand beträgt $5,11\text{ mm}$.

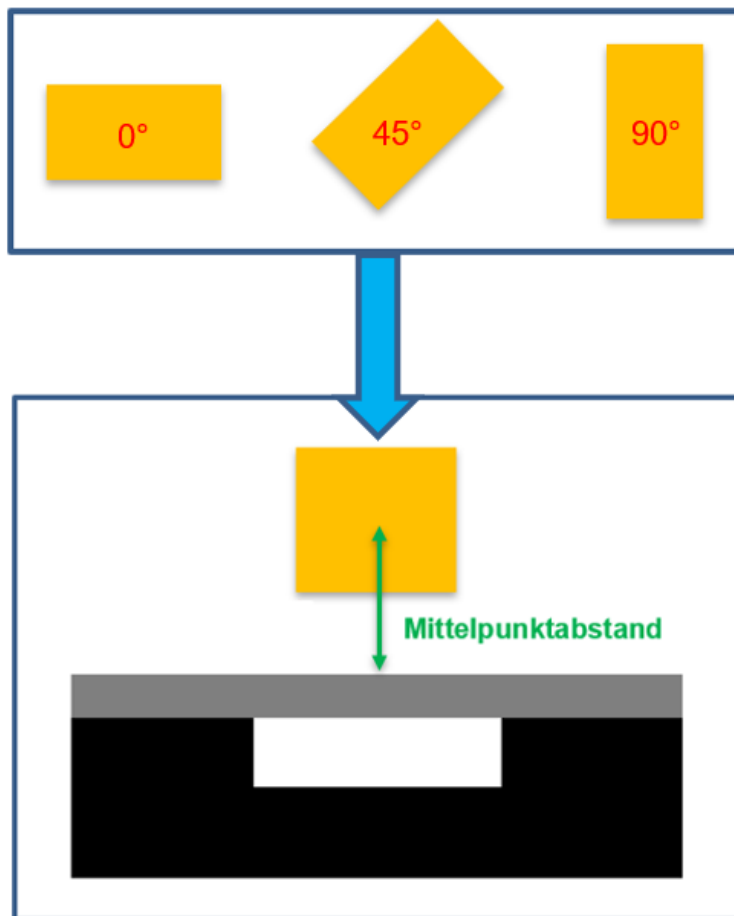


Bild 18: Spezifisches Simulationsmodell zur dritten Fragestellung

Zwischenfazit und Vergleich

Im Abschnitt, in dem die elektromagnetischen Grundlagen zur Fragestellung aufgegriffen werden, wird erläutert, warum eine mathematisch fundierte Aussage nicht möglich ist. Deshalb kann nur die Vermutung aufgestellt werden, dass das zweite Inhomogenitätskriterium der um 90° gedrehten Spule, die inhomogenste Kraftkurve zuordnet, da sie die niedrigste Maximalbreite hat.

Dem Bild 19 ist zu entnehmen, dass beide gestrichelte Linien, welche die Inhomogenitätswerte miteinander verbinden, eine positive Steigung haben. Die aufgestellte These wird mithilfe dieses Diagramms verifiziert. Als Konstruktionsrichtlinie kann gefolgert werden, dass die Spule möglichst senkrecht zum Werkstück stehen sollte, um eine möglichst inhomogene Kraftwirkung auf das Werkstück auszuüben.

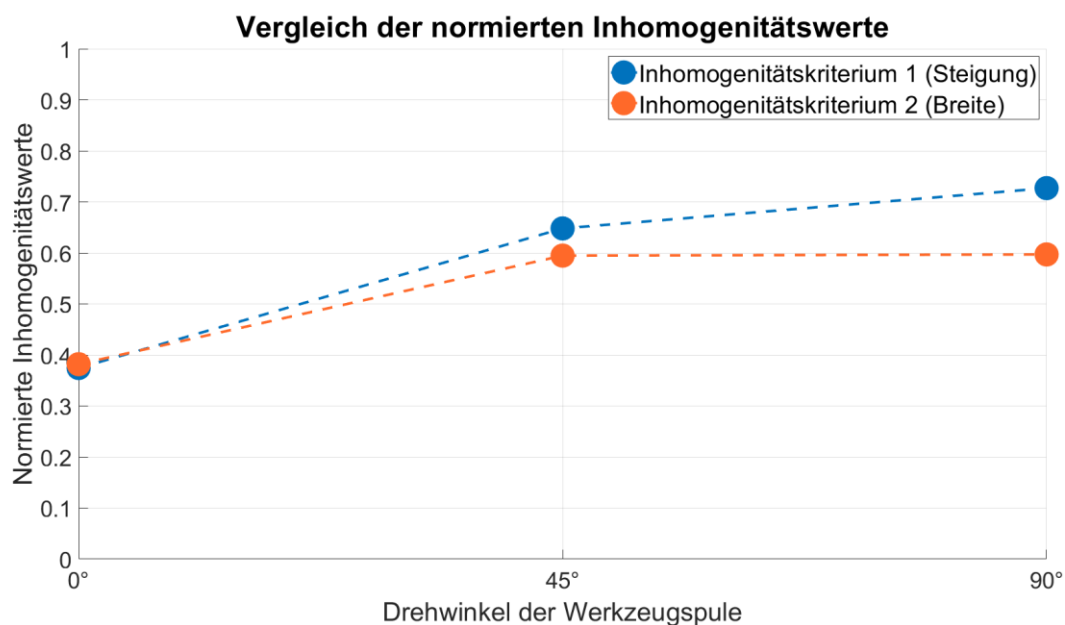


Bild 19: Normierte Inhomogenitätswerte verschiedener Spulenorientierungen bei konstantem MA

4.3.4 Welchen Einfluss hat der Spulenquerschnitt auf die lokale Kraftwirkung beim elektromagnetischen Umformen?

Grundlagen der Fragestellung

Der theoretische Einfluss des Leiterquerschnitts auf die Lokalität der Kraftwirkung soll in diesem Abschnitt näher erläutert werden. Im Kapitel 4.2.3 wurde das zweite Kriterium definiert, welches die Inhomogenität einer gegebenen Kraftkurve, anhand ihrer Breite, bewertet. Vor dem Hintergrund, dass im folgenden Kapitel zur spezifischen Modellanpassung vier verschiedene zweidimensionale Leiterquerschnitte vorgestellt werden, kann die These aufgestellt werden, dass das zweite Kriterium der Spule mit der geringsten Breite die größte Inhomogenität zuweist. Aufbauend auf dieser These kann eine weitere hergeleitet werden, dass das zweite Kriterium der Spule mit der größten Breite die geringste Inhomogenität zuweist. Diese beiden Thesen werden im übernächsten Abschnitt aufgrund einer Simulation verifiziert.

Modellanpassung

In diesem Kapitel werden vier unterschiedliche Querschnitte untersucht. Diese sind in der Tabelle 1 aufgelistet.

Tabelle 1 Spulenquerschnitte

Querschnitt der Spulen
$2.5\text{ mm} * 10\text{ mm}$
$5\text{ mm} * 5\text{ mm}$
$8\text{ mm} * 3.125\text{ mm}$
$10\text{ mm} * 2.5\text{ mm}$

Die alleinstehende quadratische Spule steht im Bild 20 nur stellvertretend für die tatsächlich zu betrachtenden Spulen. Auch im Rahmen dieser Simulation wird mit der Spaltbreite gearbeitet, welche eine konstante Größe von 2 mm hat.

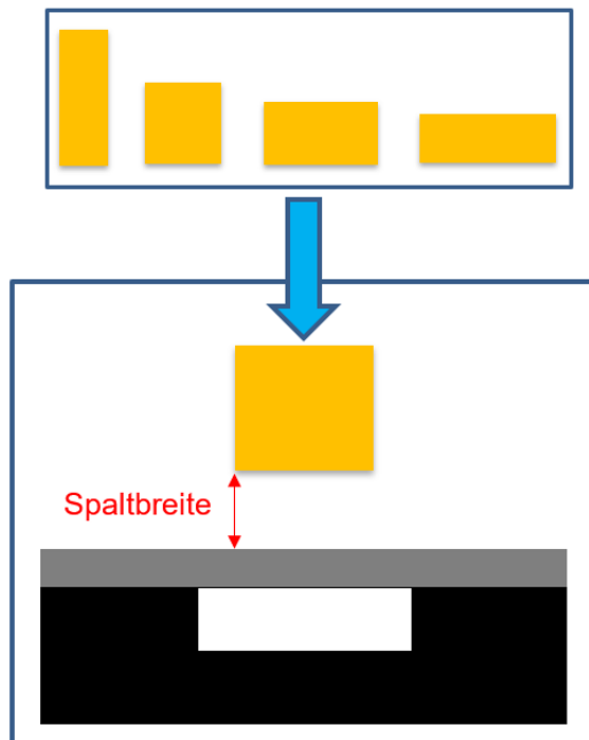


Bild 20: Spezifisches Simulationsmodell zur vierten Fragestellung

Zwischenfazit und Vergleich

Dem Bild 21 ist zu entnehmen, dass beide Inhomogenitätskriterien den gleichen Verlauf darstellen und somit äquivalente Ergebnisse liefern. Bereits im ersten Abschnitt dieses Kapitels wurden zwei Thesen aufgestellt, die sich beide auf das zweite Inhomogenitätskriterium beziehen. Da der $2.5\text{ mm} * 10\text{ mm}$ Spule mit der kleinsten Breite die größte Inhomogenität und der $10\text{ mm} * 2.5\text{ mm}$ Spule mit der größten Breite die geringste Inhomogenität zugeordnet wird, können die aufgestellten Thesen verifiziert werden. Bezüglich des ersten Kriteriums konnten noch keine Thesen aufgestellt werden. Bereits erläutert wurde, dass beide Kriterien äquivalente Ergebnisse liefern, weshalb die Erkenntnisse des zweiten Kriteriums sogar durch die Ergebnisse des ersten Kriteriums verifiziert werden.

Als Konstruktionsrichtlinie kann festgehalten werden, dass die Werkzeugspule eine möglichst geringe Breite haben sollte, um eine möglichst inhomogene Kraftwirkung auf das Werkstück zu haben.

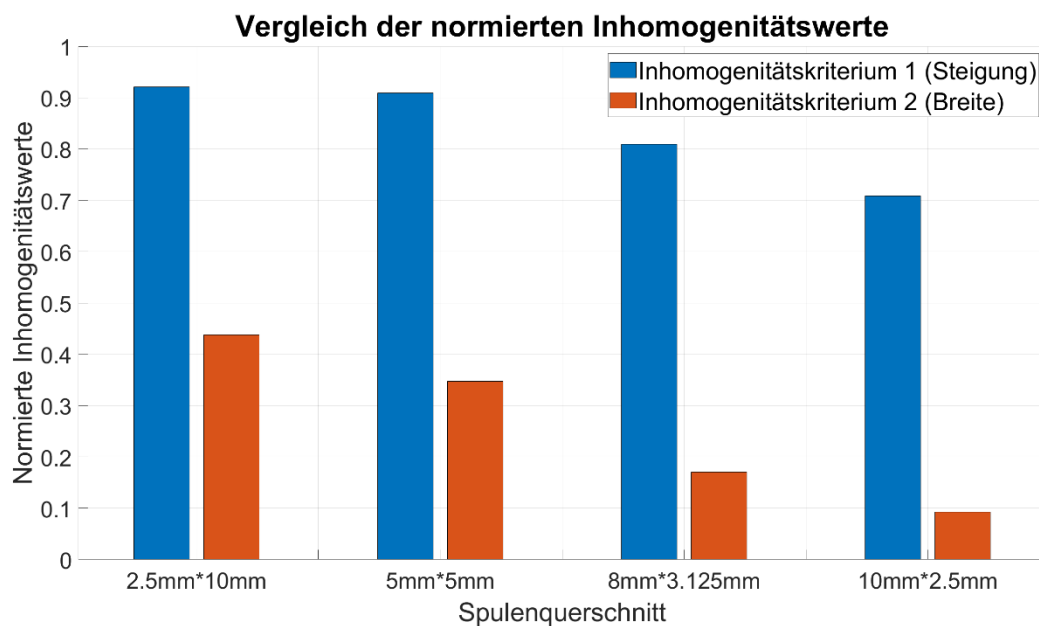


Bild 21: Normierte Inhomogenitätswerte verschiedener Spulenquerschnitte bei konstanter Spaltbreite

5 Experimente

Um die theoretischen Erkenntnisse in der Praxis zu verifizieren, werden in den folgenden zwei Unterkapiteln Experimente thematisiert. Im ersten Experiment wird die Prägung mithilfe unterschiedliche Spulenquerschnitte und Werkzeuge untersucht. Im zweiten Experiment wird die These, zur Hinterlegung der Spulengeometrie im Werkstück, untersucht.

5.1 Prägen auf Fläche zur Untersuchung der Lokalität (Spulenvariation)

Im Rahmen dieses Experiments sollen vordergründig die Erkenntnisse aus dem Kapitel 4.3.4 untersucht werden.

Die einzelnen Parameter wurden dabei äquivalent zu denen der Simulationen gewählt, da so ein bestmöglicher Vergleich der Simulationen und Experimente möglich ist. Diese werden in der folgenden Tabelle 2 zusammengefasst.

Tabelle 2 Parameter zum ersten Experiment

Parameter	Wert
Ladeenergie (Stromanlage)	1800 J
Werkzeugspule Material	Kupfer
Werkzeugspule Querschnitt	25 mm ²
Werkstück Material	Aluminium
Werkstück Dicke	0,2 mm

Der Versuchsaufbau ist im Bild 22 vereinfacht in der Vorderansicht dargestellt. Zwischen Werkzeug und Werkzeugspule befindet sich das Werkstück. Alle beschriebenen Bauteile

werden durch eine Halterung fixiert. Im Gegensatz zur Simulation wird der Aufbau nicht von Vakuum, sondern von Raumluft umgeben.

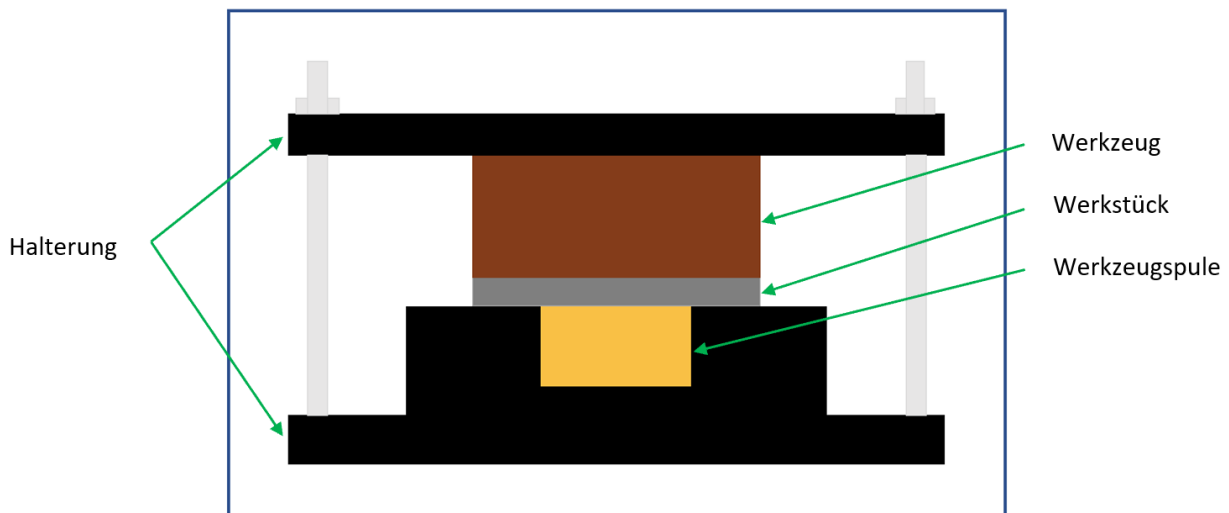


Bild 22: Versuchsaufbau des ersten Experiments

Dabei wird die Querschnittsform der Spule, aus der Vorderansicht, variiert. Sie kann die drei folgenden Querschnitte annehmen: $2.5\text{ mm} \times 10\text{ mm}$, $5\text{ mm} \times 5\text{ mm}$ und $10\text{ mm} \times 2.5\text{ mm}$. Die gewählten Formen gleichen denen aus dem Kapitel 4.3.4, um das bereits erläuterte Ziel der praktischen Verifikation erreichen zu können. Bild 23a, 23b und 23c zeigen die beschriebenen Spulen.

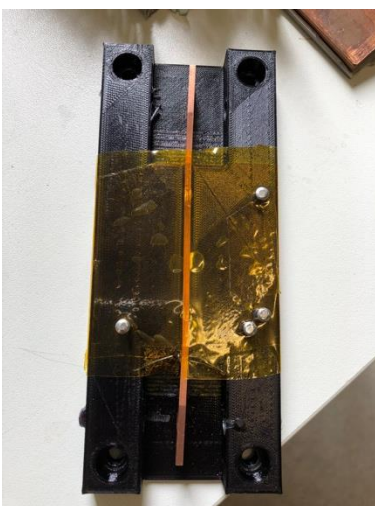


Bild 23a: $2.5\text{ mm} \times 10\text{ mm}$ Spule



Bild 23b: $5\text{ mm} \times 5\text{ mm}$ Spule

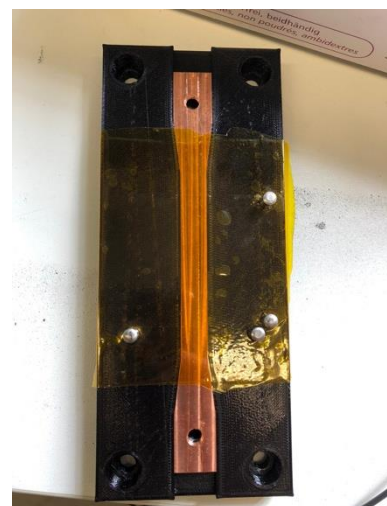


Bild 23c: $10\text{ mm} \times 2.5\text{ mm}$ Spule

Das Werkzeug wird im Rahmen dieses Experiments ebenfalls variiert. Es werden eine optische Oberfläche und eine raue Oberfläche (Sandpapier mit Grid 500) verwendet. Bild 24a und 24b zeigen die beschriebenen Werkzeuge.



Bild 24a: Optische Oberfläche (i.M. 1:1.25)

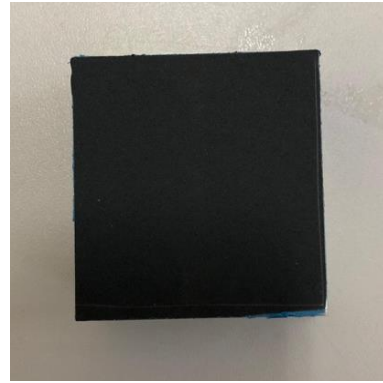


Bild 24b: Sandpapier (i.M. 1:1.25)

Es werden für jede Kombination von Werkzeugspule und Werkzeug drei verschiedene Umformungen durchgeführt. Daraus ergeben sich insgesamt $2 \cdot 3^2$ bzw. 18 Werkstücke. Nach dem Verformungsprozess mittels EMU ist ein Wirkbereich auf dem Werkstück zu erkennen. Die Breite dieser Bereiche wurde mithilfe eines Digitalmikroskop gemessen. Dies wird im Bild 25 veranschaulicht.

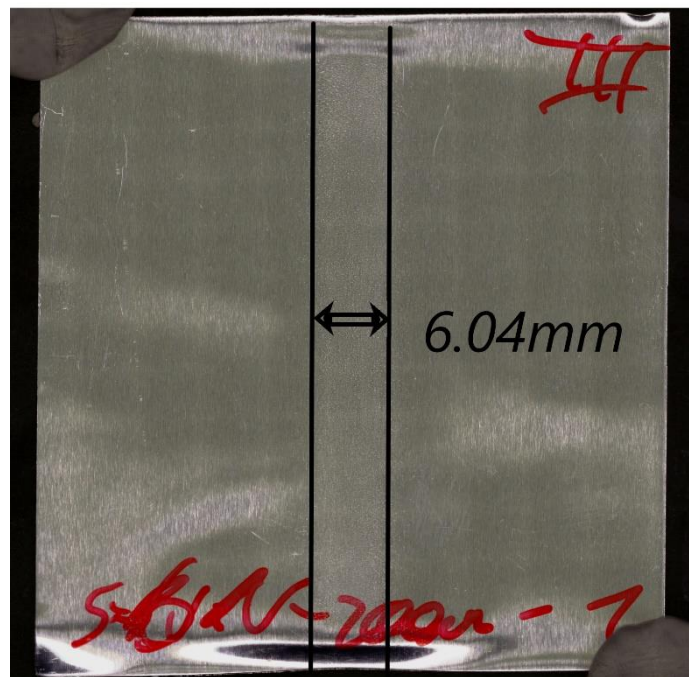


Bild 25: Beispielhafte Wirkbereichsmessung am Mikroskop

Es wird ein Balkendiagramm verwendet, da die Abbildung auf einer realen Achse nicht möglich ist. Die erhaltenen Breitewerte werden dabei über dem zugehörigen Querschnitt abgebildet. Bei der Betrachtung von Bild 26 kann festgestellt werden, dass sowohl die blau als auch die orange gefärbten Balken den gleichen Verlauf aufweisen. Dem Diagramm kann entnommen werden, dass eine breitere Spule zu einer breiteren Prägung auf dem Werkstück führt.

Ein größerer Wirkungsbereich ist laut der Definition des zweiten Inhomogenitätskriteriums mit einer inhomogeneren Kraftwirkung auf das Werkstück gleichzusetzen. Somit kann die Erkenntnis aus dem Kapitel 4.3.4, dass die Werkzeugspule eine möglichst geringe Breite haben sollte, um eine möglichst inhomogene Kraftwirkung auf das Werkstück zu haben, verifiziert werden.

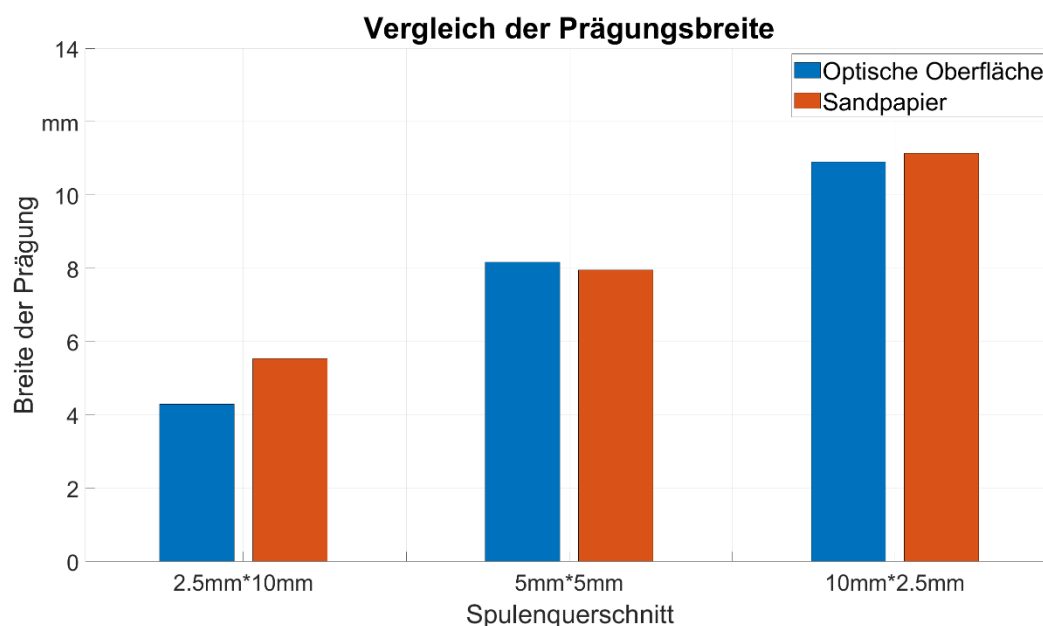


Bild 26: Breite der einzelnen Prägungen im Vergleich

5.2 Abbildung in freiem Flug

Die Werkstücke, welche im Rahmen von Kapitel 5.1 mithilfe einer Einleiterspule umgeformt wurden, hatten eine geradlinige Prägung aufzuweisen (siehe Bild 25). Die These, dass das Werkstück die geometrische Form der Werkzeugspule beim Umformungsprozess annimmt soll in diesem Experiment untersucht werden. Dazu wird eine komplexere Spulenform, als der Einleiterspule verwendet. Aufbauend auf dieser Zielstellung werden alternierend die Ladeenergie und der Abstand zwischen Werkstück und Werkzeug variiert. Auch der Einfluss dieser Parameter wird durch einen gezielten Vergleich der umgeformten Werkstücke bestimmt.

Dazu wird der gleiche Versuchsaufbau wie im Kapitel 5.1 verwendet, welcher im Bild 22 dargestellt wurde, bis auf die drei folgenden Anpassungen:

1. Z-Spule anstatt einer Einleiter-Spule.
2. Schwamm anstatt eines Werkzeugs, um den Rückstoß auf das Werkstück zu dämpfen.
3. Werkstück hat eine Dicke von $50\text{ }\mu\text{m}$.

Die Z-Spule, welche im Rahmen dieses Experiments verwendet wird, ist im Bild 27 dargestellt.



Bild 27: Z-Spule

Insgesamt werden 6 Werkstücke umgeformt. Dabei werden die zu untersuchenden Größen (Ladeenergie und Abstand zwischen Schwamm und Werkstück) variiert. Diese Werte werden in der Tabelle 3 festgehalten.

Tabelle 3 Werkstücknummern und die zugehörigen Parameter

Werkstücknummer	Abstand	Ladeenergie
1	0 mm	200 J
2	60 mm	200 J
3	60 mm	800 J
4	0 mm	450 J
5	0 mm	800 J
6	0 mm	1250 J

Beispielhaft werden zwei Vergleiche vorgenommen, um die jeweiligen Einflüsse, der Parameter, auf die Umformung zu veranschaulichen.

Vergleich zwischen den Werkstücken 1 und 2 (Abstand)

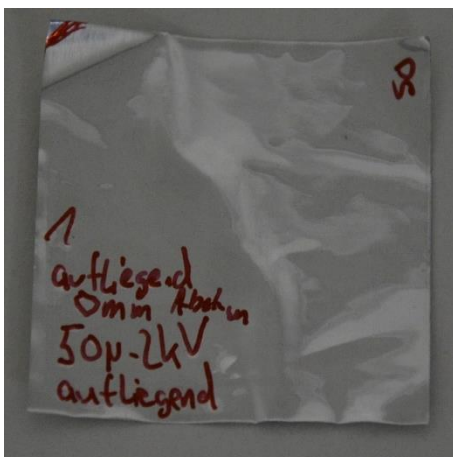


Bild 28a: Werkstück mit Nummer 1 (i.M. 1:1)

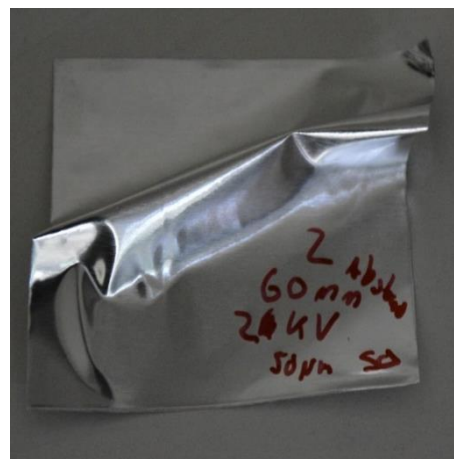


Bild 28b: Werkstück mit Nummer 2 (i.M. 1:1)

Beide Bleche wurden mit der gleichen Ladeenergie von 200 J , jedoch mit einem unterschiedlichen Abstand zum Werkzeug, umgeformt. Beim Vergleich der Bleche kann festgestellt werden, dass sich das Umformvermögen erhöht, dies kann aus der signifikanten Krümmung des zweiten Werkstücks gefolgert werden.

Vergleich zwischen den Werkstücken 4 und 6 (Ladeenergie)



Bild 29a: Werkstück mit Nummer 4 (i.M. 1:1)



Bild 29b: Werkstück mit Nummer 6 (i.M. 1:1)

Beide Bleche wurden mit dem gleichen Abstand zum Werkzeug, jedoch mit einer unterschiedlichen Ladeenergie umgeformt. Beim Vergleich der beiden Bleche kann festgestellt werden, dass Kanten präziser in das Blech geformt werden bzw. Konturen deutlicher zu erkennen sind.

Die Betrachtung aller umgeformten Bleche hat ergeben, dass das Werkstück die Form der verwendeten Z-Spule annimmt. Vor dem Hintergrund der Erkenntnis aus dem Kapitel 4.3.1, die folgend zusammengefasst ist, ist dies auch zu erwarten:

Je niedriger der Leiterabstand, desto größer und inhomogener die Kraft.

Deshalb werden Bereiche, die einen besonders geringen Abstand zur Werkzeugspule haben, deutlich stärker umgeformt. Dieses Phänomen, dass das Werkstück die Form der Werkzeugspule annimmt, kann auch wie bereits erwähnt den umgeformten Blechen aus dem Kapitel 5.1 entnommen werden. In dem ersten Versuch wurden Einleiterspulen verwendet und die Form der Prägung war dementsprechend geradlinig (siehe Bild 25). Somit lässt sich durch die Spulenform eine flächige Verteilung hervorrufen und so eine Geometrie (in Bezug auf das Werkstück) erzeugen.

6 Fazit und Ausblick

Durch die Vielzahl der Vorteile (kein Verschleiß, erhöhte Verformbarkeit vieler Materialien etc.) kann das EMU die bisherigen Hauptgruppen, der abbildenden Umformungsmethoden, erweitern, welche im Kapitel 3.2.1 thematisiert wurden. Im Rahmen dieser Projektarbeit wurden die einflusstragenden Parameter, welche die EMU beeinflussen, untersucht. Dazu wurden vier Fragestellungen aus den behandelten elektromagnetischen Grundlagen abgeleitet. Die sich aus der Simulation ergebenden Werte wurden anschließend mithilfe der eigen definierten Inhomogenitätskriterien analysiert. Aus diesen Vergleichen konnten Konstruktionsrichtlinien abgeleitet werden, die im Folgenden zusammengefasst werden:

1. Die Spule sollte einen möglichst geringen Abstand zum Werkstück haben, um eine möglichst inhomogene Kraftwirkungen zu erzielen.
2. Die dreieckige Werkzeugspule erzeugt die Kraftkurve mit der größten Steigung im Sigmaintervall.
3. Die sechseckige Werkzeugspule erzeugt die schmalste Kraftkurve.
4. Die Spule sollte möglichst senkrecht zum Werkstück stehen, um eine möglichst inhomogene Kraftwirkung auf das Werkstück auszuüben.
5. Die Spule sollte eine möglichst geringe Breite haben, um eine möglichst inhomogene Kraftwirkung auf das Werkstück zu haben.

In den praktischen Versuchen sollten dann die Simulationen validiert werden. Mithilfe des ersten Experiments konnte die Erkenntnis aus dem Kapitel 4.3.4 verifiziert werden. Im zweiten Experiment wurden weitere Erkenntnisse gewonnen, die ebenfalls im Folgenden zusammengefasst sind:

1. Bei steigendem Dämpfungsabstand erhöht sich das Umformvermögen des Werkstücks.
2. Bei steigender Ladeenergie erhöht sich die Kantenschärfe.

Es wurden einige Erkenntnisse in Bezug auf die EMU gewonnen, die ein gezieltes Umformen ermöglichen sollen. Aufbauend auf den im Rahmen dieser Projektarbeit gewonnenen Erkenntnissen, können weitere Simulationen und Experimente durchgeführt werden, um zusätzliche Konstruktionsrichtlinien aufzustellen. Als Beispiel wäre die Erweiterung des Kapitels 4.3.2 eine Möglichkeit diesen Erkenntnisstand zu bereichern. Eine Rotation der dreiecksförmigen Werkzeugspule wäre von Interesse, denn im Rahmen der zweiten Simulation wurde die Charakteristik des Dreiecks (inhomogene Flächenverteilung) nicht in aller Ausführlichkeit untersucht. Außerdem konnte anhand der Experimente in den Kapiteln 5.1 und 5.2 gezeigt werden, dass das Werkstück die Geometrie der Werkzeugspule annimmt. Weitere Experimente, mit komplexen Spulengeometrien, zur Validierung dieser Ergebnisse, wären die nächsten Schritte dieser Forschungsarbeit.

7 Literaturverzeichnis

[Ahm11] AHMED, M., PANTHI, S. K., RAMAKRISHNAN, N., JHA, A. K., YEGNESWARAN, A. H., DASGUPTA, R., & AHMED, S. (2011). Alternative flat coil design for electromagnetic forming using FEM. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, Vol.21(3), 618–625. [https://doi.org/10.1016/s1003-6326\(11\)60759-0](https://doi.org/10.1016/s1003-6326(11)60759-0)

[Bus08] Busch, R. (2008). Elektrotechnik und Elektronik (5. Aufl.). Wiesbaden, Deutschland: Vieweg+Teubner Verlag.

[Bus15] Busch, R. (2015). Elektrotechnik und Elektronik, für Maschinenbauer und Verfahrenstechniker. (7. Aufl.). Magdeburg, Deutschland: Springer Vieweg.

[Bus15] Busch, R. (2015). Elektrotechnik und Elektronik (7. Aufl.). Berlin, Deutschland: Springer Vieweg.

[DLK20] Die LORENTZ – Kraft. Abgerufen von <https://www.ulfkonrad.de/physik/ph-10-lorentz>

[EFE15] Elektromagnetische Felder und Elektrodynamik. (2015). Abgerufen von <https://itp.tugraz.at/~arrigoni/vorlesungen/elektrodynamik/scripts-elektro/actual/allscript.pdf>

[EFT12] Electromagnetic Forming (EMF) Technologies - Historical Development and Current Trends. (2012, Januar 24). Abgerufen von http://publica.fraunhofer.de/eprints/urn_nbn_de_0011-n-2281173.pdf

[EMU16] Elektromagnetische Umformung. (2016). Abgerufen von <https://www.iwu.fraunhofer.de/content/dam/iwu/de/documents/Broschueren/IWU-KB-Elektromagnetische-Umformung.pdf>. Abgerufen am 26.06.2020.

[Fin14] Finus, F. (2014). Berührungslos umformen, trennen und fügen mit elektromagnetischen Impulsen. Abgerufen von <https://www.blechnet.com/beruehrungslos-umformen-trennen-und-fuegen-mit-elektromagnetischen-impulsen-a-456894/>. Abgerufen am 22.06.2020.

[For01] Formelsammlung. (2001). Abgerufen von <http://techniker.pi-pro.de/fs/nae/pdf/pegel-skin-leitungen.pdf>. Abgerufen am 21.05.2020.

[GdM15] Grundlagen des Magnetismus. (2015). Abgerufen von <https://www.wmi.badw.de/teaching/Lecturenotes/magnetismus/Kapitel-2.pdf>. Abgerufen am 21.05.2020.

[Gia04] Giannoglou, A., Kladas, A., Tegopoulos, J., Koumoutsos, A., Manolakos, D., & Mamalis, A. (2004). Electromagnetic forming. COMPEL - The international journal for computation and mathematics in electrical and electronic engineering, Vol.23(3), 789–799. <https://doi.org/10.1108/03321640410540737>

[Gol13] Golovashchenko, S.F. (2013). Electrohydraulic Forming of Near-Net Shape Automotive Panels. 2013.

[Gro16] Großmann. (2016). Grundlagen der Elektrotechnik 2. Abgerufen von <https://docplayer.org/9157126-Inhalt-grundlagen-der-elektrotechnik-2.html>. Abgerufen am 05.06.2020.

[Hag11] Hagmann, G. (2011). Grundlagen der Elektrotechnik. (15.Aufl.). Wiebelsheim, Deutschland: AULA-Verlag.

[Hag17] Hagmann, G. (2017). Grundlagen der Elektrotechnik. (17.Aufl.). Wiebelsheim, Deutschland; AULA-Verlag

[Ind20] Induktion. Abgerufen von <http://mondbrand.de/Induktion.html>. Abgerufen am 23.05.2020.

[Jos07] Joswig, A. (2007). Berechnung der elektromagnetischen Kräfte bei der elektromagnetischen Blechumformung unter Berücksichtigung der Strukturänderung. Abgerufen von <https://eldorado.tu-dortmund.de/handle/2003/23326>. Abgerufen am 01.07.2020.

[Klo06] Klocke, M. (2006). Zur Anwendung der numerischen Feldberechnung bei der Lösung spezieller Probleme der elektromagnetischen Energiewandlung. Abgerufen von <https://eldorado.tu-dortmund.de/handle/2003/26195>

-
- [Kno00] Knoepfel, H.E. (2000). Magnetic Fields: A Comprehensive Theoretical Treatise for Practical Use. Vereinigte Staaten von Amerika: John Wiley & Sons, Inc.
- [Klo06] Klocke, M. (2006). Zur Anwendung der numerischen Feldberechnung bei der Lösung spezieller Probleme der elektromagnetischen Energiewandlung. Abgerufen von <https://eldorado.tu-dortmund.de/handle/2003/26195>. Abgerufen am 24.07.2020.
- [Klo17] Klocke, F. (2017). Fertigungsverfahren 4. Berlin: Springer Vieweg.
- [Lai15] Lai, Z., Cao, Q., Zhang, B., Han, X., Zhou, Z., Xiong, Q., Li, L. (2015). Radial Lorentz force augmented deep drawing for large drawing ratio using a novel dual-coil electromagnetic forming system. Journal of Materials Processing Technology, Vol.222, 13–20. <https://doi.org/10.1016/J.JMATPROTEC.2015.02.029>
- [Li16] Li, N., Yu, H., Xu, Z., Fan, Z., & Liu, L. (2016). Electromagnetic forming facilitates the transition of deformation mechanism in 5052 aluminum alloy. Materials Science and Engineering: A, Vol.673, 222–232. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2016.07.039>
- [Li17] Li, S., Cui, X., Feng, H., & Wang, G. (2017). An electromagnetic forming analysis modelling using nodal integration axisymmetric thin shell. Journal of Materials Processing Technology, Vol. 244, 62–72. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2017.01.028>
- [Mag07] Magdowski, M. (2007). Modellierung des Skineffekts im Zeitbereich für die Beschreibung von Verbindungsstrukturen in der Schaltungssimulation. Abgerufen von https://www.researchgate.net/profile/Mathias_Magdowski/publication/261178609_Modellierung_des_Skineffekts_im_Zeitbereich_fur_die_Beschreibung_von_Verbindungsstrukturen_in_der_Schaltungssimulation/links/0c960533804b8eafe5000000/Modellierung-des-Skineffekts-im-Zeitbereich-fuer-die-Beschreibung-von-Verbindungsstrukturen-in-der-Schaltungssimulation.pdf
- [Mar09] Marinescu, M. (2009). Elektrische und magnetische Felder. (2. Aufl.). Frankfurt: Springer Verlag.
- [Mar12] Marinescu, M. (2012). Elektrische und magnetische Felder (3. Aufl.). Frankfurt am Main, Deutschland: Springer Vieweg.

- [Mun14] Munde, A. (2014).** Berührungslos umformen, trennen und fügen mit elektromagnetischen Impulsen. Abgerufen von <https://www.blechnet.com/beruehrungslos-umformen-trennen-und-fuegen-mit-elektromagnetischen-impulsen-a-456894>. Abgerufen am 29.07.2020.
- [Par16] Park, H., Kim, D., Lee, J., Kim, S.-J., Lee, Y., & Moon, Y. H. (2016).** Effect of an aluminum driver sheet on the electromagnetic forming of DP780 steel sheet. *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 235, 158–170.
<https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2016.04.023>
- [Pla16] [Sch16] Plaßmann, W. & Schulz, D. (2016).** Handbuch Elektrotechnik: Grundlagen und Anwendungen für Elektrotechniker (German Edition) (7. Aufl.). Wiesbaden, Deutschland: Springer Vieweg.
- [Sch20] Schnabel, P. (2020).** Skineffekt/Skin-Effekt. Abgerufen von <https://www.elektronik-kompodium.de/sites/grd/1102141.html>. Abgerufen am 25.05.2020.
- [Sch85] Schmoeckel, D., Stöferle, T. Spur, G. (1985).** Handbuch der Fertigungstechnik. München: Hanser Verlag.
- [Ste07] [Bau07] Steffen, H. & Bausch, H. (2007).** Elektrotechnik (6. Aufl.). Berlin, Deutschland: Springer Vieweg.
- [Stu17] Stuchlik, W. (2017).** Grundlagen der Elektrotechnik: Berechnungen im magnetischen Feld. Lampoldshausen, Deutschland.
- [Umf20] Umformen als Fertigungsverfahren: Trends und Implementierung.** Abgerufen von <https://www.iph-hannover.de/de/dienstleistungen/fertigungsverfahren/umformen/>. Abgerufen am 12.07.2020.
- [Wei15] Weißgerber, W. (2015).** Elektrotechnik für Ingenieure - Formelsammlung (5. Aufl.). Berlin, Deutschland: Springer Vieweg.
- [Win73] Winkler, R. (1973).** Hochgeschwindigkeitsbearbeitung, Grundlagen technischer Anwendung elektrisch erzeugter Schockwellen und Impulsmagnetfelder. Berlin: VEB Verlag, 1973.