

Simulative Betrachtung der Umformverfahren zur Herstellung von Hairpin Formspulenelementen

Michael Weigelt, Christian Fröschl, Michael Masuch, Andreas Riedel, Jörg Franke,
Lehrstuhl für Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik (FAPS)
der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg

Vorspann

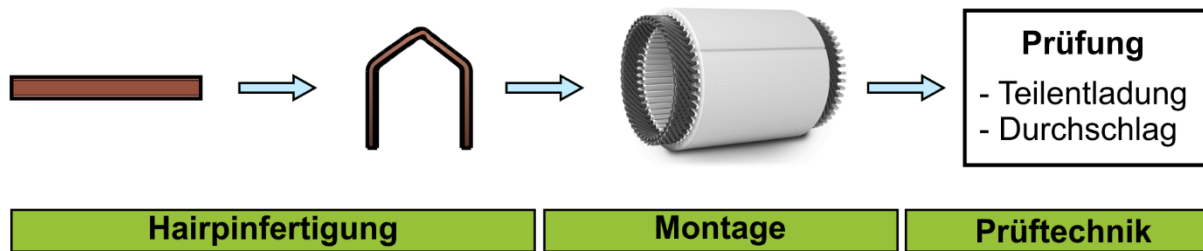
Durch einen simultanen Entwicklungsprozess aus struktur-mechanischer FE-Simulation und Versuchserkenntnissen können Formspulenumwicklungen von Traktionsmotoren kosten- und zeiteffizienter gestaltet und innerhalb eines definierten Prozessfensters gefertigt werden.

Einleitung und Zielstellung

Aufgrund des Anforderungsprofils eines Automobilantriebs hinsichtlich leistungstechnischer und finanzieller Faktoren, eröffnen sich neue Wege und Chancen für applikationsspezifische, innovative Wicklungsformen elektrischer Maschinen und dessen Übertragung in adaptive und skalierbare Produktionseinrichtungen. Dies erfordert jedoch ein tiefes Verständnis bei der Herstellung von Elektromotoren, insbesondere beim Fertigungsschritt der Wicklungserzeugung und –einbringung.

Die Auslegung der Primärisolation von Kupferflachleitern erfolgt mittels eines iterativen, kontinuierlichen Verbesserungsprozesses. Die Prüfung der elektrischen Eigenschaften des umgeformten Leiters wird nicht isoliert, sondern nach der Montage der Spulen in das Blechpaket im Rahmen des Statortests geprüft. Dieser Prozess ist sowohl kosten-, als auch zeitintensiv. Mithilfe eines neuen Ansatzes soll die Auslegung der Halbformspulen unter Mitbetrachtung der fertigungstechnischen Effekte unter Anwendung einer struktur-mechanischen FE-Simulation erfolgen, um eine definierte Einstellung des Prozessfensters zu ermöglichen und somit eine Unter- oder Überdimensionierung der Primärisolation verhindert. Abbildung 1 zeigt die konventionelle iterative Entwicklung gegenüber der simultanen Prozessauslegung, bei der gleichzeitig Erkenntnisse aus Simulation und Prüftechnik zur Hairpingestaltung einfließen.

Konventionelle „End of Line“ (EoL) Entwicklung



Appellierte InLine Entwicklung mit Nachregelung

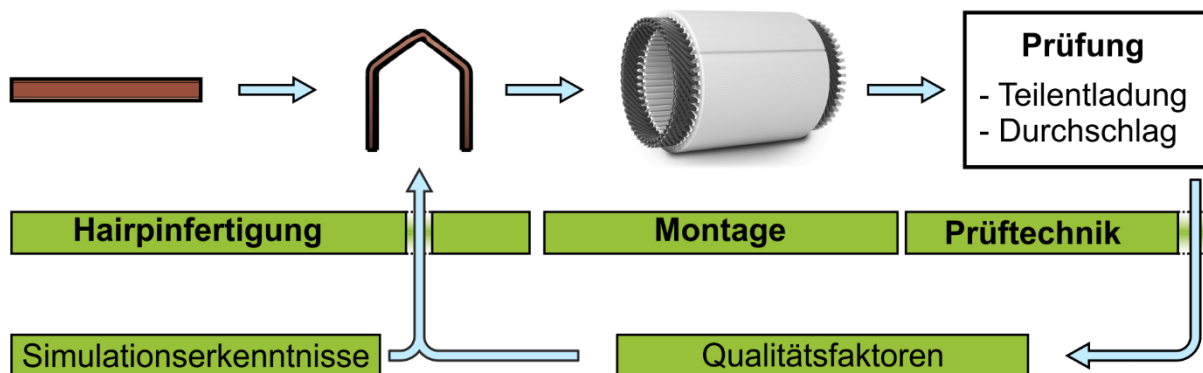


Abbildung 1: Vergleich derzeitiges EoL Modell mit dem InLine Modell

Das Gesamtziel stellt die Entwicklung eines Fertigungsverfahrens zur Herstellung von Hairpin Formspulen dar, das durch ein optimal eingestelltes Prozessfenster auf Basis ganzheitlich betrachtender numerischer Simulationen einen verringerten Prüfaufwand und Ausschuss ermöglicht.

Grundlagen

Die Umformung von Drahthalbzeugen zu Hairpins soll in Zukunft hochautomatisiert erfolgen, um über bestehende Grenzen der genutzten Fertigungsverfahren hinauszugehen und Kostenvorteile zu schaffen. Dabei können zunächst die Grundbelastungen auf einen kombinierten Drei-Punktbiege- und Gesenkbiegezustand abgeleitet werden, der in entsprechende Aufbauten zu DIN EN ISO 7438 abstrahiert wurde, wie Abbildung 2 zeigt. Es können die prozessspezifischen Effekte klar identifiziert werden, sowie kritische Zielgrößen, wie Isolationsschichtdickenänderungen oder Kupferquerschnittsflächen, genau ermittelt werden.

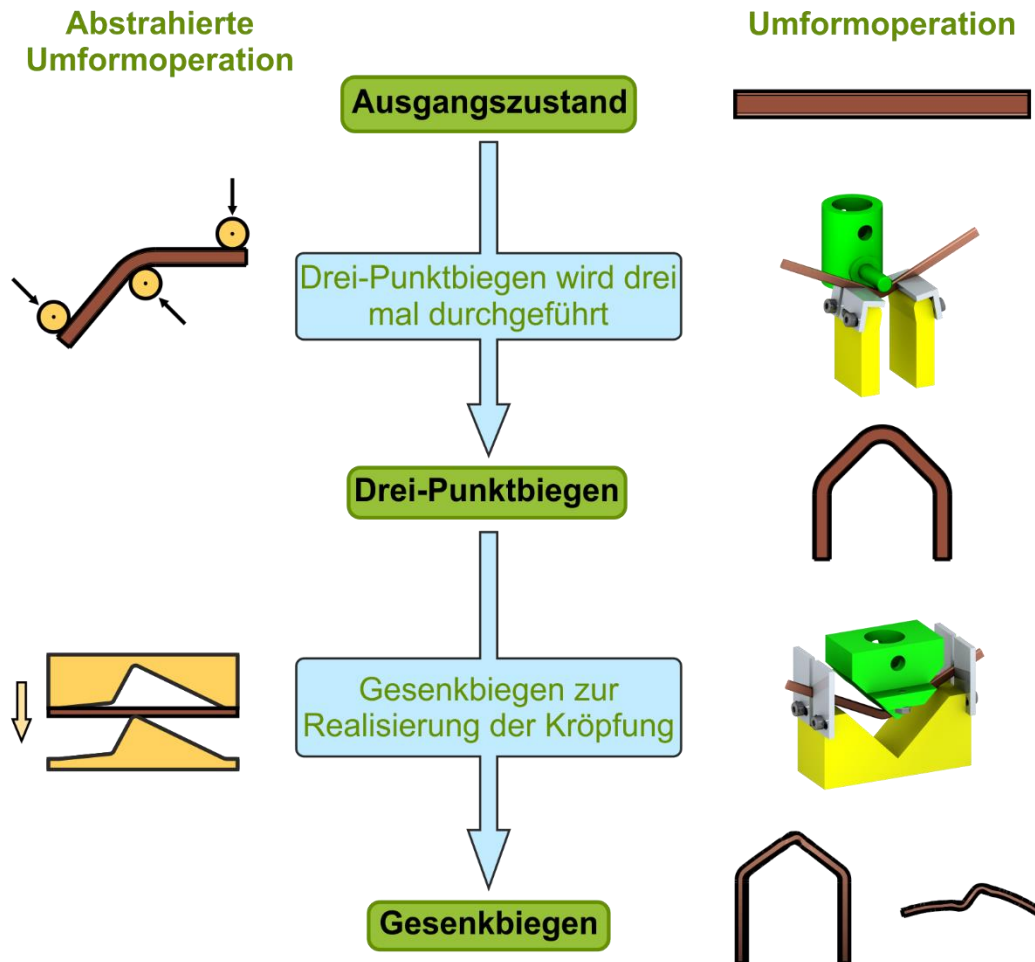


Abbildung 2: Prozessschritte zur Umformung von Hairpins mittels eines kombinierten Drei-Punktbiege- und Gesenkbiegezustands

Daher werden im Folgenden die Drei-Punkt- und Gesenkbiegeumformung mit Flachdrähten simuliert und dessen Auswirkungen quantifiziert, sowie in einem weiteren Schritt identisch umgeformte Proben mittels vorhandener Prüftechniken auf deren Eignung qualifiziert. Als Simulationsumgebung wird die FEM-Software ANSYS LS-DYNA gewählt, um eine Berechnung mit definierten Kontaktparametern zwischen Kupferleiter und Isolation zu ermöglichen.

Erkenntnisse aus den Simulationen

Die Simulationsergebnisse, die mittels Praxisversuchen validiert wurden, zeigen, dass bei beiden Modellen die gleichen Effekte auftreten, diese sich jedoch im Grad der Signifikanz unterscheiden. So sind die Effektursachen grundlegend identisch, bilden sich aber beim Gesenkumformen präsenter aus.

Querschnittsänderung in der Biegesymmetrieffläche

Ein entscheidender Faktor für die Auslegung elektrischer Traktionsantriebe ist die gezielte Führung von elektrischen Feldern, die maßgeblich von dem Kupferfüllfaktor

und der Oberflächennormalenrichtung abhängen. Dabei soll zunächst allgemein die Querschnittsänderung beim Kupferleiter und der Isolationsschicht betrachtet werden, um später lokal aufgelöste Änderungen auf bestimmte Teilbereiche des Isolationskörpers quantifizieren zu können.

Im ersten Schritt wird die Querschnittsflächenänderung zwischen Ausgangszustand und umgeformten Zustand zum Stempelwegende bei $s_{\text{Stempel}} = 25 \text{ mm}$ und definiertem Stempelradius R untersucht. Dafür wurde eine Probe in ihrer Biegesymmetrieffläche, die in Abbildung 3 gezeigt ist, geschnitten und die ergebende Querschnittsfläche betrachtet.

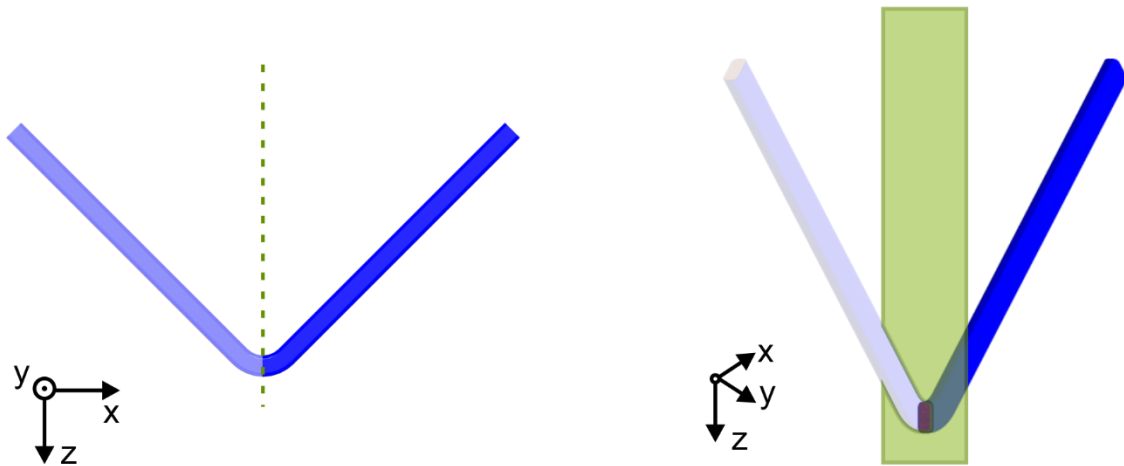


Abbildung 3: Ebene der Biegesymmetrie des Drahtkörpers

Da eine explizite Zeitintegration für die Simulation genutzt wird, sind die gewählten Zeitschritte entsprechend klein. Durch eine Validierung der Simulationen anhand der inneren und kinetischen Energien, sowie mit Praxisversuchen, ist diese Annahme jedoch korrekt und eine hohe numerische Abbildungsqualität folglich gegeben. Die Flächenänderung während der Umformung in der Simulation wird in Abbildung 4 und Abbildung 5 abgebildet.

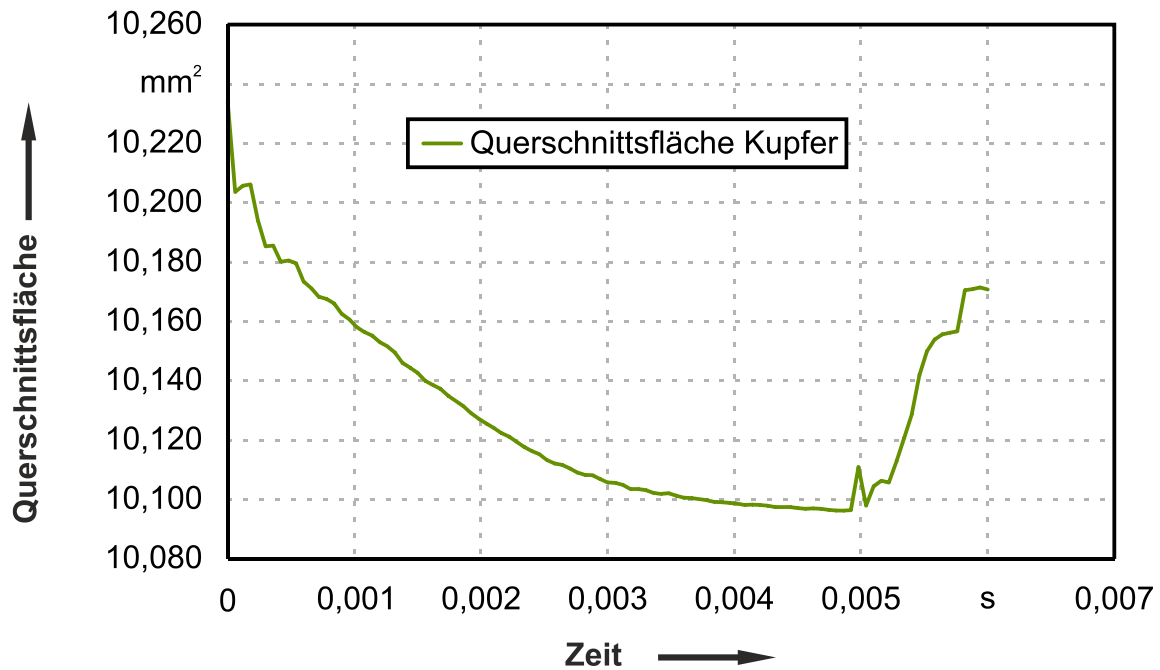


Abbildung 4: Flächenänderung beim Kupferleiter über den Verlauf der Umformung von $s_{Stempel} = 0 \text{ mm}$ bis $s_{Stempel} = 25 \text{ mm}$ in der Biegesymmetrieebene bei $R_{Stempel} = 5 \text{ mm}$

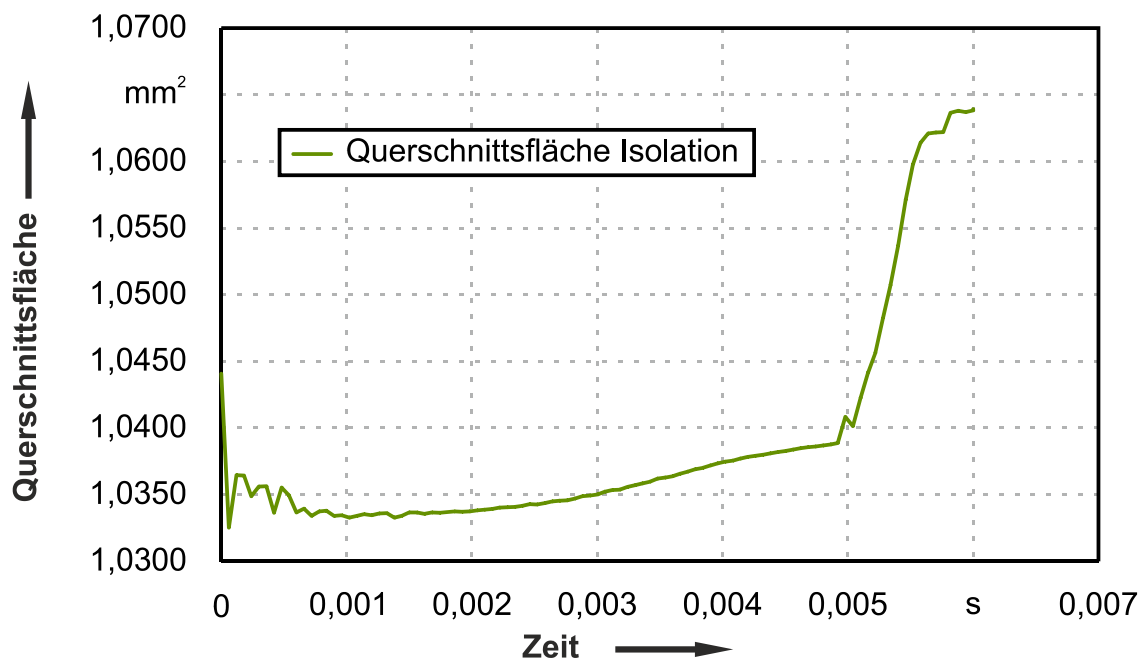


Abbildung 5: Flächenänderung bei der Isolation über den Verlauf der Umformung von $s_{Stempel} = 0 \text{ mm}$ bis $s_{Stempel} = 25 \text{ mm}$ in der Biegesymmetrieebene bei $R_{Stempel} = 5 \text{ mm}$

Beim Kupferleiter kommt es zu Beginn der Umformung zu einer negativen Querschnittsänderung, die sich im weiteren Verlauf umkehrt und zum Endpunkt fast nivelliert. Dies ist mit den verschiedenen Spannungszuständen in den Umformpha-

sen zu erklären. Zu Beginn findet eine große Dehnung des Kupferleiters statt, die aufgrund der Poissonzahl von 0,34 zu einer Ausdünnung des Materials unter Zugbelastung führt. Des Weiteren kommt es zu einer zunehmenden Druckspannung an der Stempelinnenseite, die wiederum eine Volumenausdehnung bewirkt. Da aufgrund der zunehmenden Druckbelastung der Matrize weiterhin die Spannung ansteigt, steigt auch der Flächenquerschnitt des Kupferkörpers an. Abbildung 6 und Abbildung 7 zeigen die Verteilung der Druck- und Zugspannungen zu charakteristischen Stempelwegen.

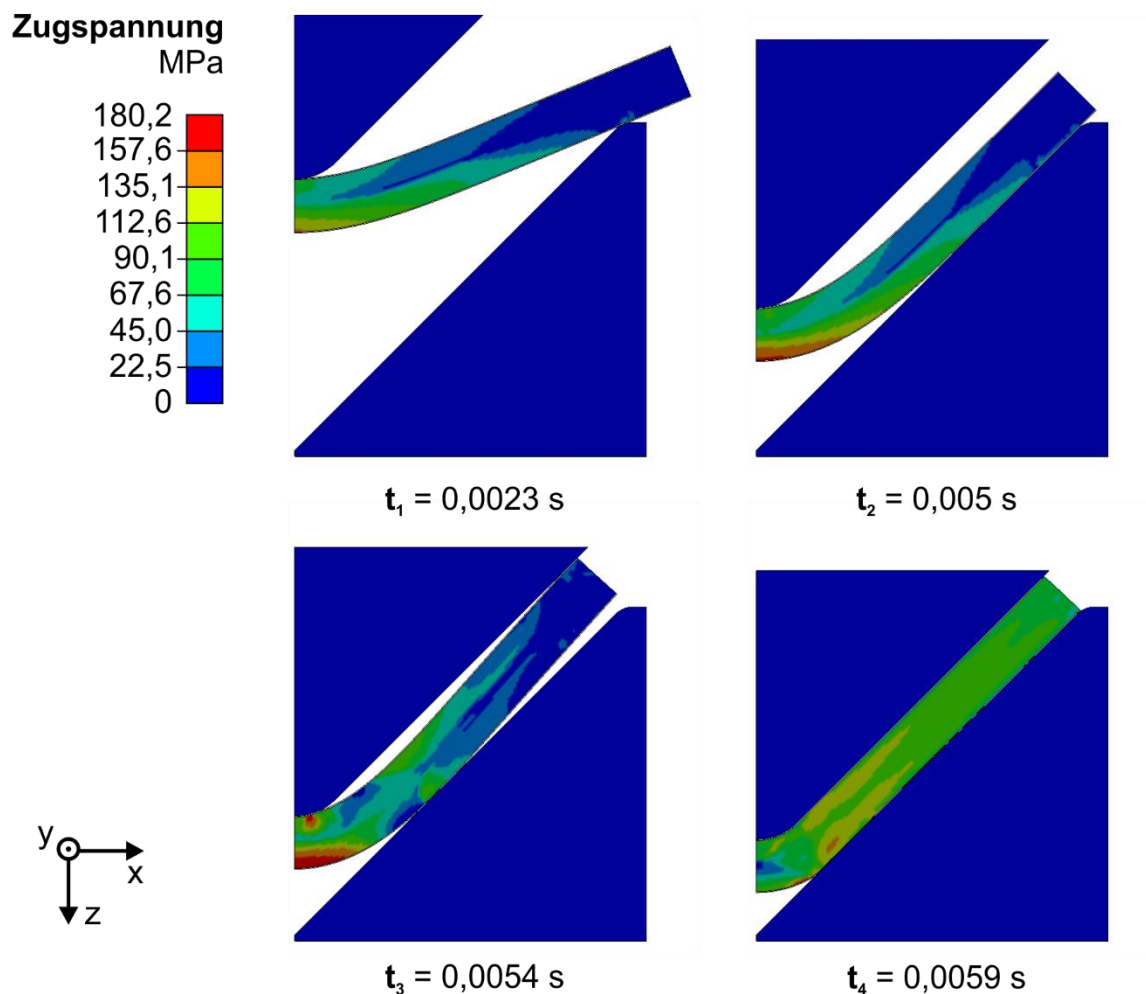


Abbildung 6: Zugspannungsverteilung im Kupferleiter zu charakteristischen Zeitschritten t_x bei $R_{\text{Stempel}} = 5 \text{ mm}$

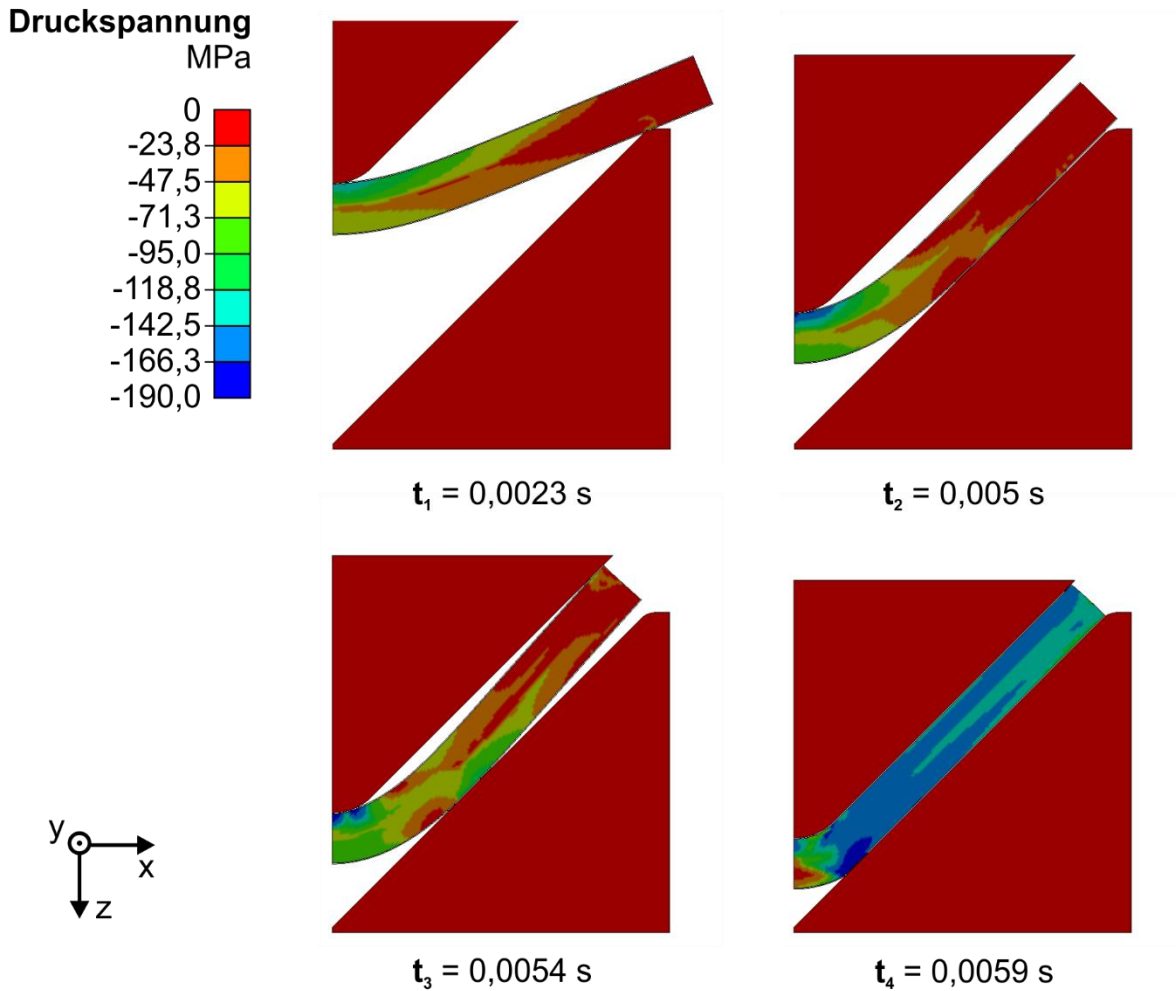


Abbildung 7: Druckspannungsverteilung im Kupferleiter zu charakteristischen Zeitschritten t_x bei $R_{\text{Stempel}} = 5 \text{ mm}$

Entgegen dem Querschnittsflächenverlauf des Kupfers, kommt es bei der Isolationsdicke im Gesamten zu einer stetigen Zunahme, wie Abbildung 5 zeigt. Nur zu Beginn der Umformung findet eine Ausdünnung der Dicke aufgrund der starken Zugbelastung beim Auftreffen des Stempels, sowie der durch die explizite Zeitintegration der Simulation hervorgerufene Beschleunigung der Isolationsschicht statt. Gegen Ende der Umformung kommt es zu einem hohen Anstieg der Isolationsdicke. Da die Isolationsschicht eine Querkontraktionszahl von 0,4 besitzt, findet im Verhältnis zum Kupferleiter eine geringere Volumenänderung während des Umformprozesses statt. Diese ist wiederum mit zwei überlagerten Spannungszuständen an der Drahtober- und Drahtunterseite zu erklären. Wie beim Kupferleiter liegt auf der Unterseite eine Zugspannung vor, während auf der Oberseite der Stempel eine Druckspannung induziert wird. Entgegen der Spannungsverteilung beider Spannungsarten im Kupferleiter, liegt bei der Isolation jedoch eine verhältnismäßig geringere Zugspannungsverteilung vor, wie Abbildung 8 und Abbildung 9 im direkten Vergleich zum Kupferkörper verdeutlicht.

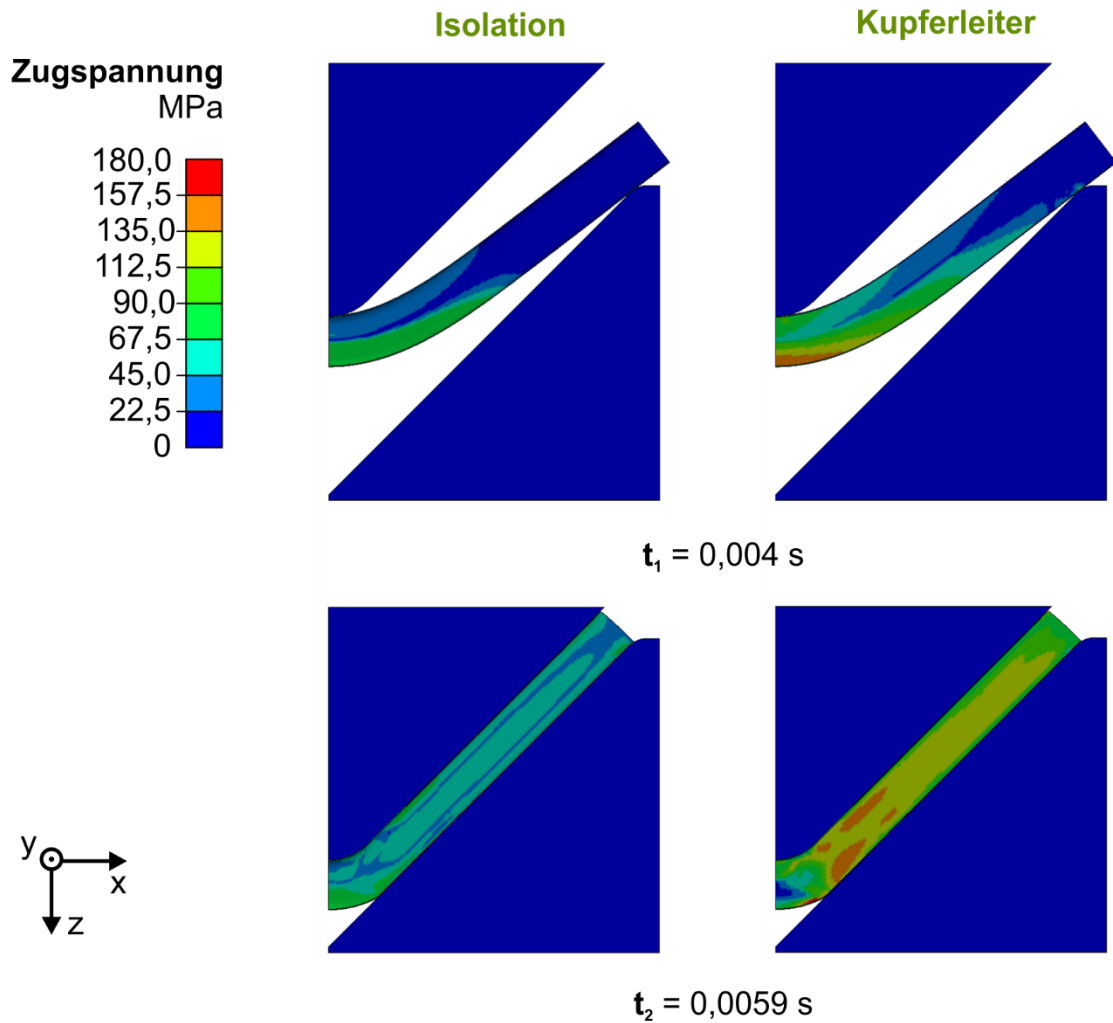


Abbildung 8: Zugspannungsverteilung in der Isolation (links) und Kupferleiter (rechts) bei unterschiedlichen s_{Stempel} und $R_{\text{Stempel}} = 5 \text{ mm}$ in Hochkantanordnung

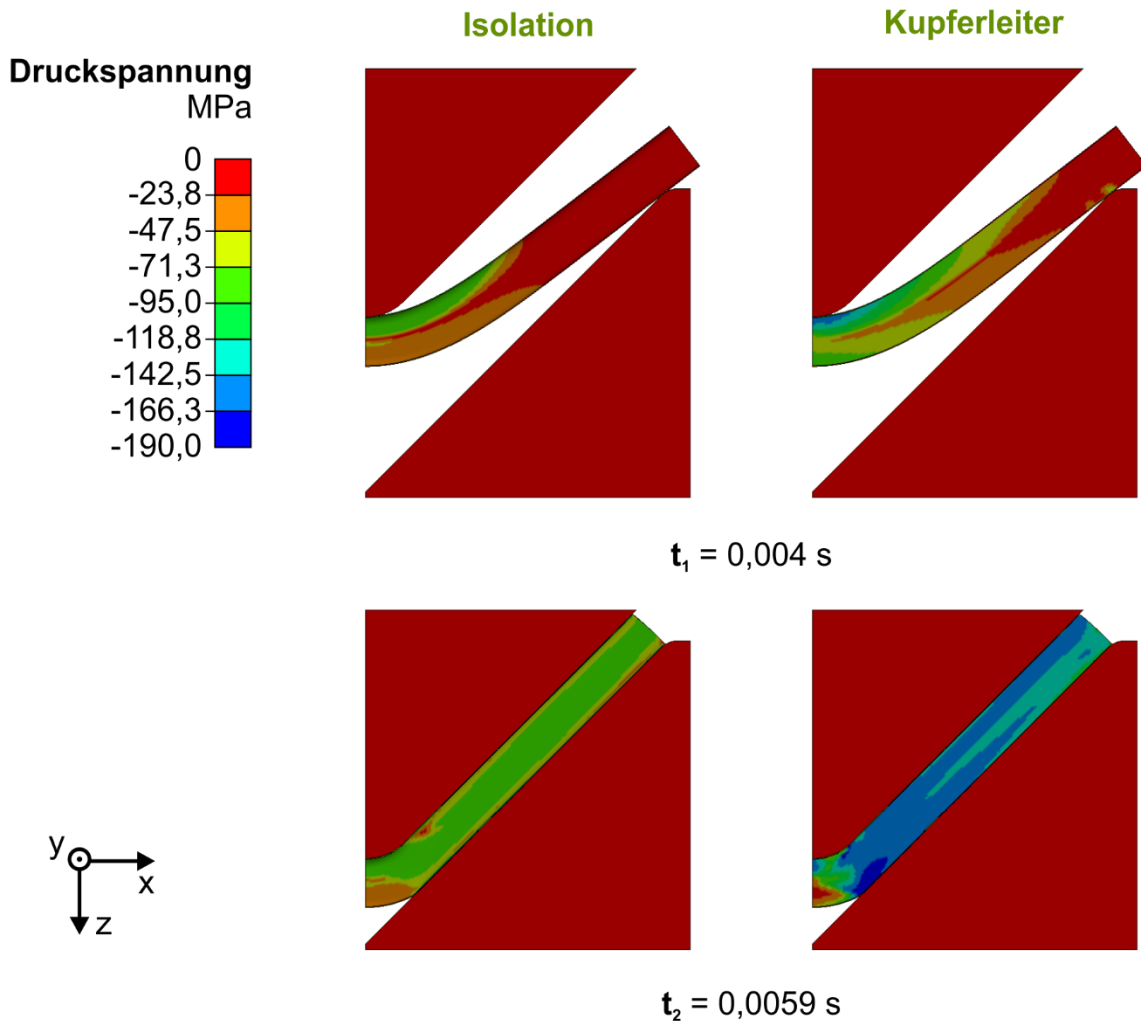


Abbildung 9: Druckspannungsverteilung in der Isolation (links) und Kupferleiter (rechts) bei unterschiedlichen Zeitschritten t_x und $R_{\text{Stempel}} = 5 \text{ mm}$ in Hochkantordnung

Querschnittsflächenänderung bei unterschiedlichen Stempelradien

Bei der Betrachtung der Flächenänderung ist jedoch zu beachten, dass dies bislang eine globale Betrachtung über den gesamten Körperquerschnitt darstellt. Da hinsichtlich der TE-Messung und der Durchschlagprüfung jedoch maßgeblich die Isolation im Fokus der Betrachtung liegt, soll im Folgenden auf dessen Querschnittsänderung während der Umformung bei verschiedenen Stempelradien eingegangen werden.

Für die folgenden Betrachtungen wird die Isolationsschicht in 42 gleich lange Abschnitte entsprechend der Diskretisierung bei der Netzerzeugung unterteilt, um die Veränderung des Querschnitts auf Bereiche einordnen zu können. Abbildung 10 zeigt die Unterteilung in der Biegesymmetrieebene nach Abbildung 3 schematisch am unumgeformten Drahtstück.

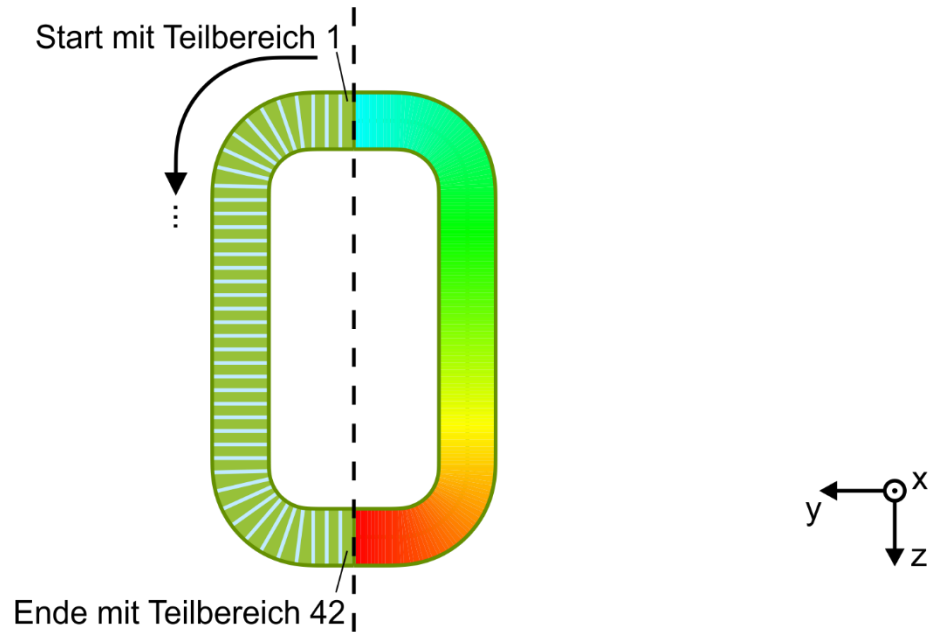


Abbildung 10: Unterteilung der Isolationsschicht in 42 Teilabschnitte

Um eine Aussage über die Querschnittsänderung treffen zu können, wird für jeden Teilabschnitt als Ausgangspunkt die unumgeformte Isolationsschicht mit 100% Fläche definiert. Die Abbildungen 11 bis 14 zeigen den Verlauf der Isolationsquerschnittänderungen über die Dauer der Umformung.

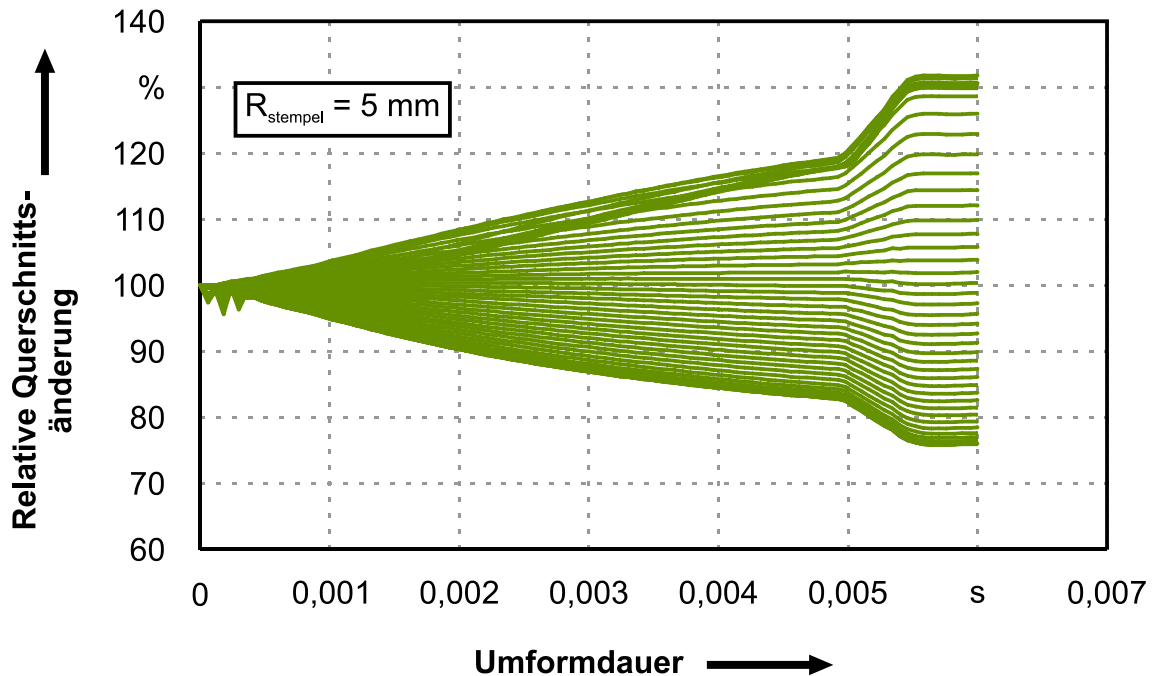


Abbildung 11: Relative Isolationsquerschnittsveränderungen für einzelne Teilbereiche über die gesamte Umformdauer bei $R_{\text{Stempel}} = 5 \text{ mm}$ in Hochkantordnung

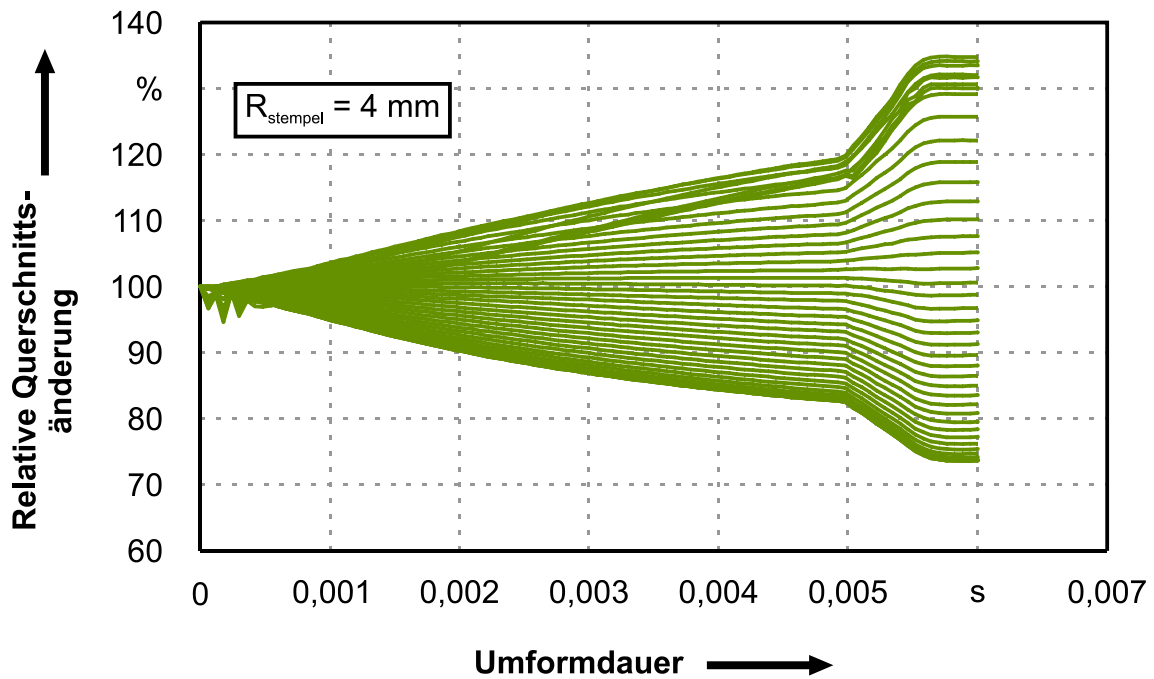


Abbildung 12: Relative Isolationsquerschnittsveränderungen für einzelne Teilbereiche über die gesamte Umformdauer bei $R_{\text{Stempel}} = 4 \text{ mm}$ in Hochkant-anordnung

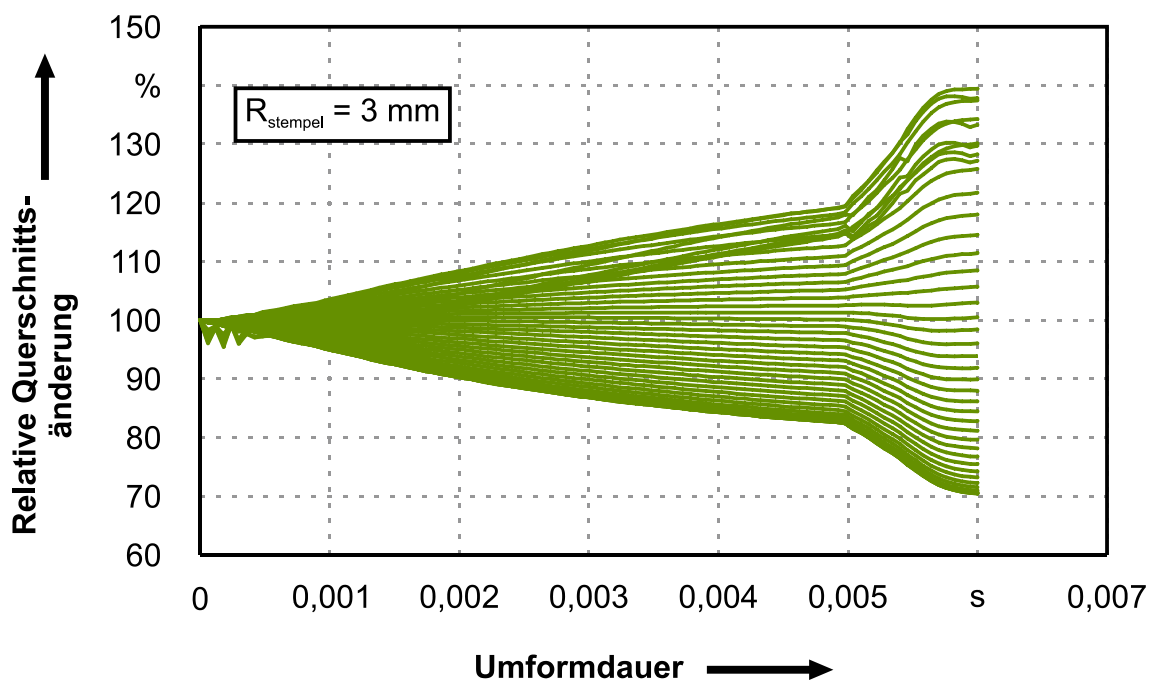


Abbildung 13: Relative Isolationsquerschnittsveränderungen für einzelne Teilbereiche über die gesamte Umformdauer bei $R_{\text{Stempel}} = 3 \text{ mm}$ in Hochkant-anordnung

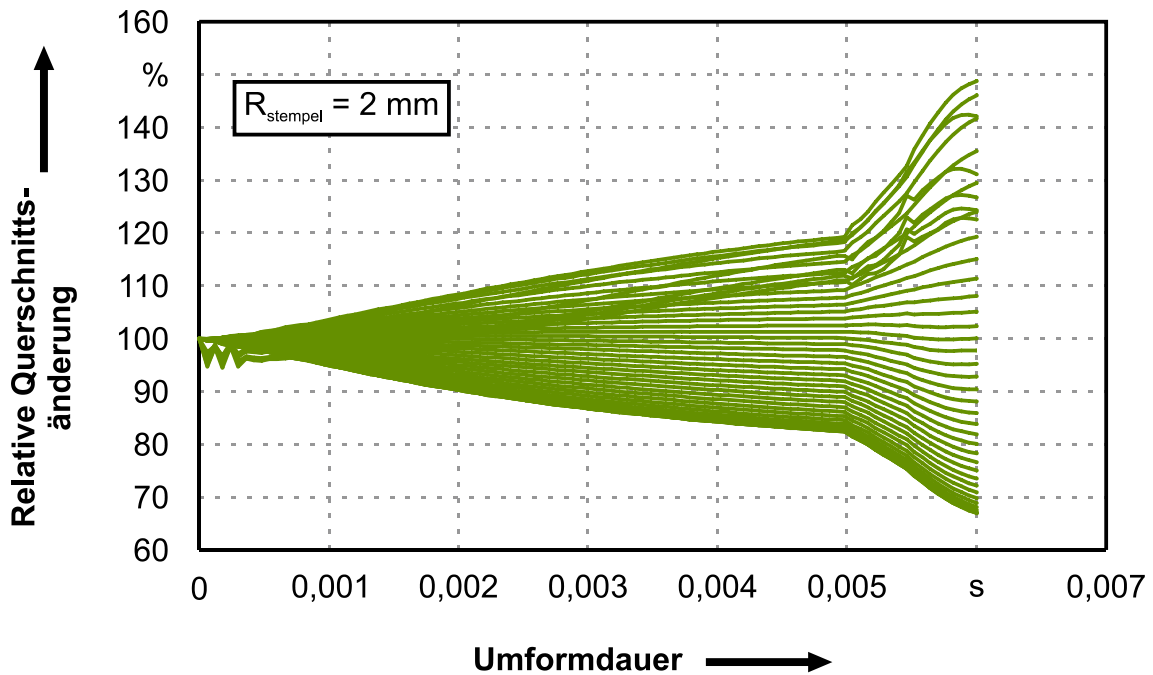


Abbildung 14: Relative Isolationsquerschnittsveränderungen für einzelne Teilbereiche über die gesamte Umformdauer bei $R_{\text{Stempel}} = 2 \text{ mm}$ in Hochkantordnung

Anhand der Abbildungen ist zunächst zu erkennen, dass sich bei den betrachteten Elementen sowohl eine Isolationsdickenzunahme, als auch -abnahme während der Umformdauer entwickelt. Dabei sind diese Änderungen bei allen Stempelradien bis zum Zeitpunkt 0,005 s identisch. Erst ab diesem Zeitschritt findet eine Differenzierung statt und die Querschnittsänderungen zeigen eine stärkere bzw. schwächere Ausprägung. So ist bei $R_{\text{Stempel}} = 5 \text{ mm}$ nur eine Ausdünnung bis zu 24 % und Zunahme bis zu 29% erkennbar, während bei $R_{\text{Stempel}} = 2 \text{ mm}$ bis zu 33% weniger und 46% mehr Fläche am Ende der Umformung lokal zur Verfügung stehen. Die beiden dazwischen befindlichen Stempelradien skalieren sich entsprechend der beiden Extremaradien. Die unterschiedlichen Ausprägungen sind damit zu erklären, dass bei einem spitzeren Stempel eine kleinere Rundung induziert wird, was wiederum auf der Zugseite in einer stärkeren Dehnung resultiert. Gleichzeitig kommt es auf der Stempelinnenseite zu einer stärkeren Quetschung des vorhandenen Materials, das sich im Verlauf der Umformung immer weiter lokal konzentriert und deswegen hinsichtlich der Isolationsdicke aufweitet.

Auffallend ist jedoch die Plateaubildung zu einem diskreten Punkt in der Umformung, bei der keine Querschnittsflächenänderung mehr auftritt. Ab diesem Zeitpunkt bleiben die Flächen konstant und verändern sich bis zum Ende der Umformoperation nicht mehr. Dieser individuelle Plateauzeitschritt bildet den Punkt ab, ab dem es zu einer Verlagerung der maximalen Druckspannung im Draht von der Biegesymmetrieebene weg zu einem Bereich am Ansatzpunkt der Stempelrundung kommt. Abbildung 15 bildet den Verlauf der Druckspannung und dessen Verlagerung zu bestimmten Zeitwerten ab.

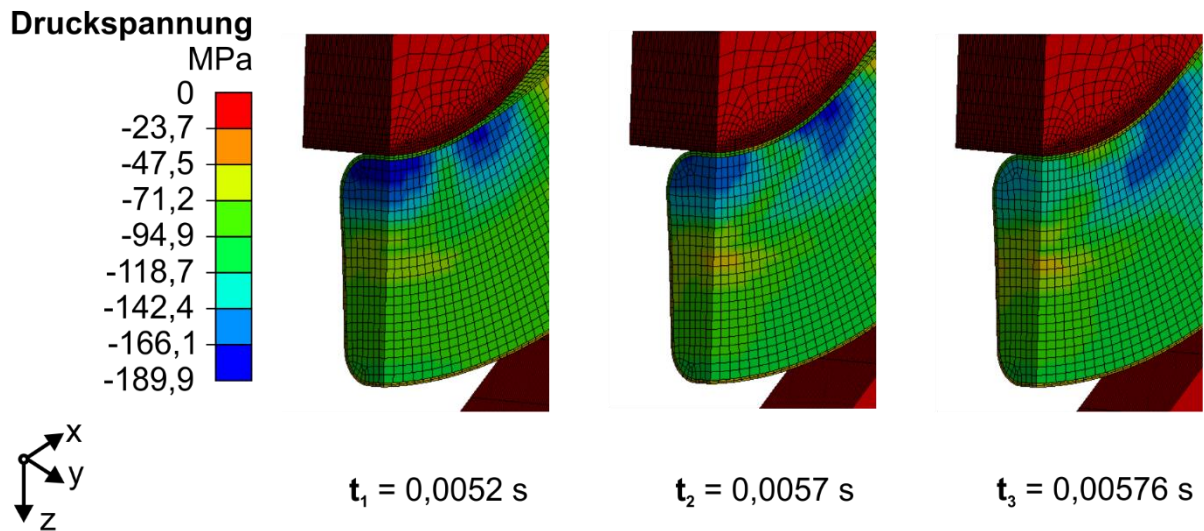


Abbildung 15: Druckspannungen zu verschiedenen Zeitwerten am Draht mit $R_{\text{Stempel}} = 5 \text{ mm}$ und Hochkantanordnung

Die Druckverlagerung bewegt sich kohärent im Kupfer- und Isolationsmaterial.

Um ein lokal aufgelöstes Bild von den Querschnittänderungen zu bekommen, zeigt Abbildung 16 die relativen Querschnittsänderungen pro definierten Teilabschnitt aus Abbildung 10, wobei die Farbskala die Zuordnung der Bereiche zum Ausgangsquerschnitt mitangibt.

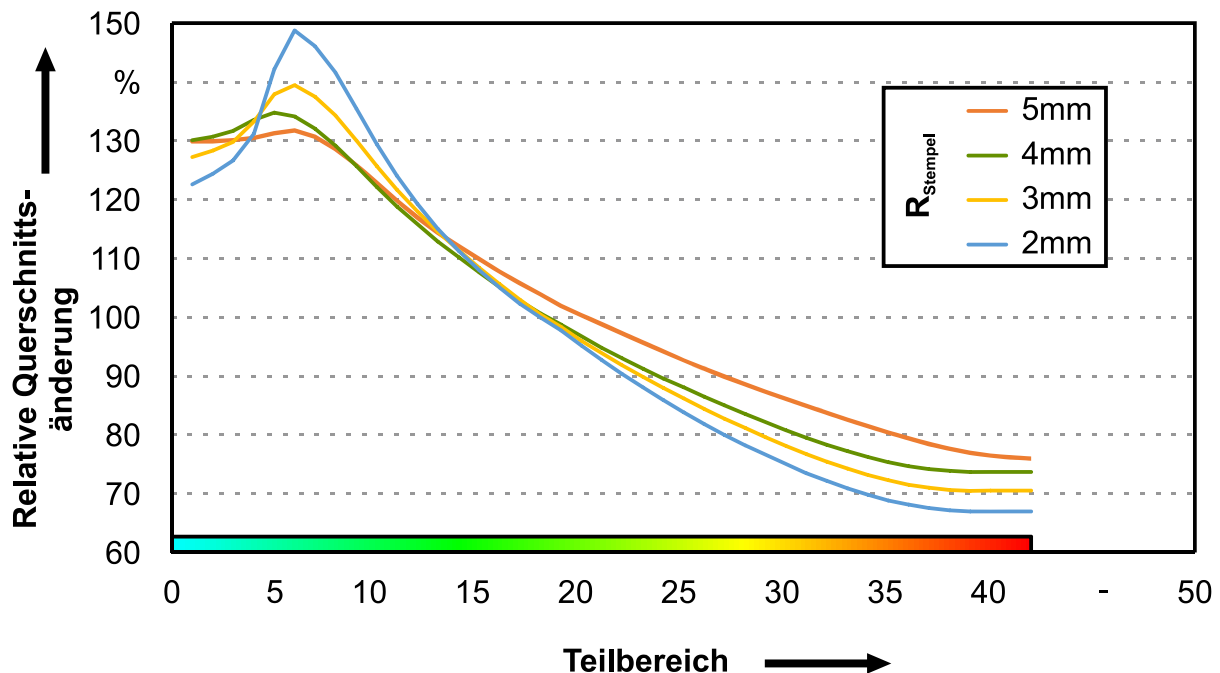


Abbildung 16: Relative Querschnittsänderung der Teilbereiche bei $t_{\text{Umformung}} = 0,006 \text{ s}$ bzw. $s_{\text{Stempel}} = 25 \text{ mm}$ bei unterschiedlichen Stempelradien in Hochkantanordnung

Anhand der Graphen wird die Aussage bestätigt, dass es bei einem kleineren Stempelradius zu einer lokal definierbaren Zunahme und Abnahme des Isolationsquerschnitts während der Umformung kommt. Dabei ist zu erkennen, dass das Minimum der Ausdünnung stets im letzten Teilbereich, also dem untersten Element des Drahts, stattfindet. Im Gegensatz dazu findet die maximale Querschnittszunahme nicht am obersten und in der Betrachtung als erstes definiertes Element statt, sondern im oberen Rundungsbereich des Drahts. Abbildung 17 zeigt diese Stelle zum Ende der Umformoperation.

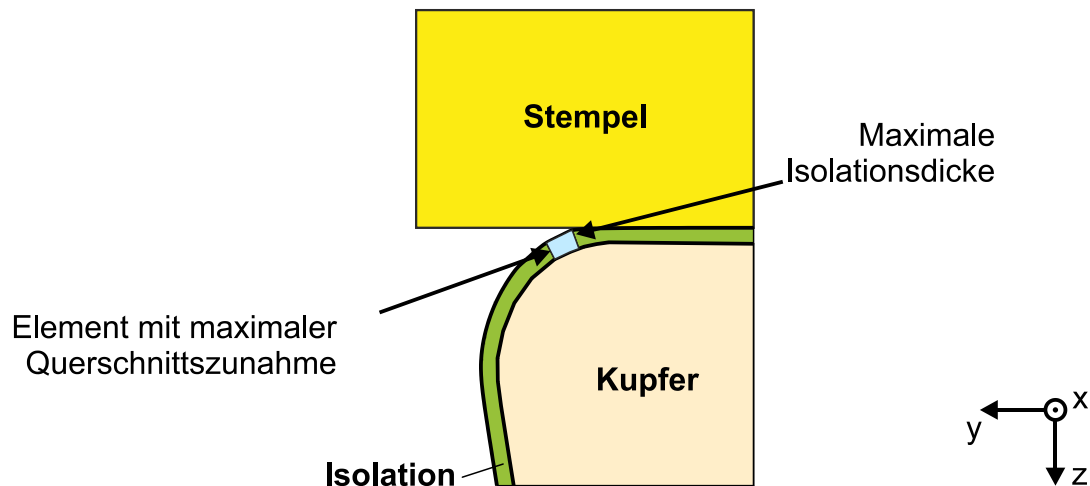


Abbildung 17: Lokale Auflösung des Elements mit der höchsten positiven Querschnittsänderung und Isolationsdicke in der Hochkantordnung

Dies erscheint logisch, da dieses Element im Bereich der maximalen Quetschung der Isolation durch die Stempelbewegung liegt und einen tangentialer Materialfluss der Isolationsschicht aus der Umformzone heraus erfährt. Diese Charakteristik zeigt sich bei jeder Variantensimulation des Stempelradius. Dadurch hat dieses Diskretisierungselement stets die maximale Querschnittszunahme im Vergleich zu den anderen Elementen.

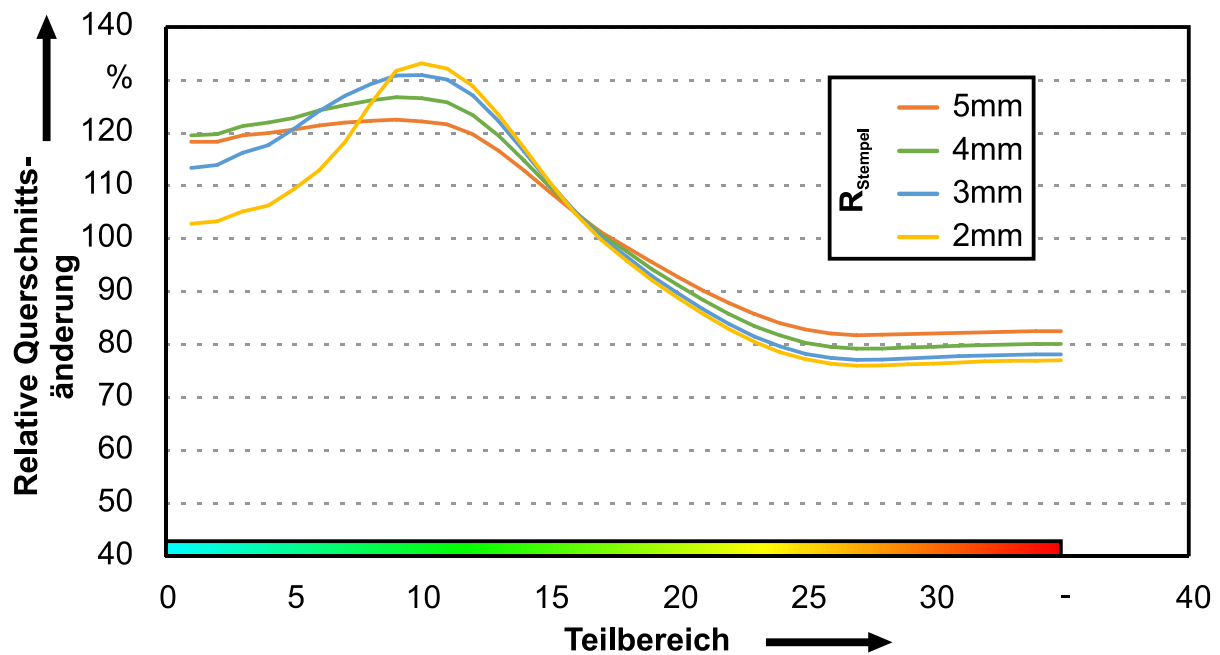


Abbildung 18: Relative Querschnittsänderung der Teilbereiche bei $t_{Umformung} = 0,006$ s bzw. $s_{Stempel} = 25$ mm bei unterschiedlichen Stempelradien in Flachkantanordnung

Abbildung 18 zeigt die relative Querschnittsänderung der Isolation in der Flachkantanordnung. Im Unterschied zur Hochkantanordnung wurde die Isolationsschicht in 35 statt 42 Teilbereiche diskretisiert. Der Graph zeigt eine ähnliche Kurve auf wie in Abbildung 16, jedoch tritt die maximale Querschnittsänderung stets beim Element 10 auf. Dies stellt aber ebenfalls die erste Querschnittsfläche neben der Umformzone dar, sodass die gleichen Ursachen für dessen Flächenänderung wie bei der Hochkantanordnung zutreffen.

Ausdünnung der Isolation

Neben der Querschnittsflächenänderung ist ebenfalls die Ausdünnung der Isolation im diskreten Punkt wichtig für die spätere Auslegung von Gesenkumformoperationen für Flachdrähte. Die Dicke in normaler Richtung zum Leitermaterial beschreibt dabei rechnerisch in einem isotropen Isolationsmodell mit keinen Fehlerquellen die Durchschlagfestigkeit und Teilentladungsbeständigkeit, die als kritische Größen für die Laufzeit elektrischer Maschinen einzuordnen sind.

Daher wird die Dicke der Isolation insbesondere an den beiden Punkten maximaler Spannung untersucht, da in diesem Bereich die Schicht unter der größten Beanspruchung steht. Dies ist zum einen der Druckbereich an der Stempelinnenseite und zum anderen der Zugbereich an der Drahtunterseite. Während es im Druckbereich aufgrund der Querkontraktion und des Fließverhaltens zu einer Verdickung der Isolationsschicht kommt, findet im Zugbereich eine Dehnung und damit Ausdünnung statt. Entsprechend Abbildung 10 wird die Isolationsschicht

erneut in Teilbereiche unterteilt, um die absolute Isolationsdicke darstellen zu können. Diese Darstellung geben Abbildung 19 bis Abbildung 22 wieder und zeigen, dass es zu einer gleichzeitigen Aufdickung und Ausdünnung der Isolationschicht während des Umformvorgangs kommt.

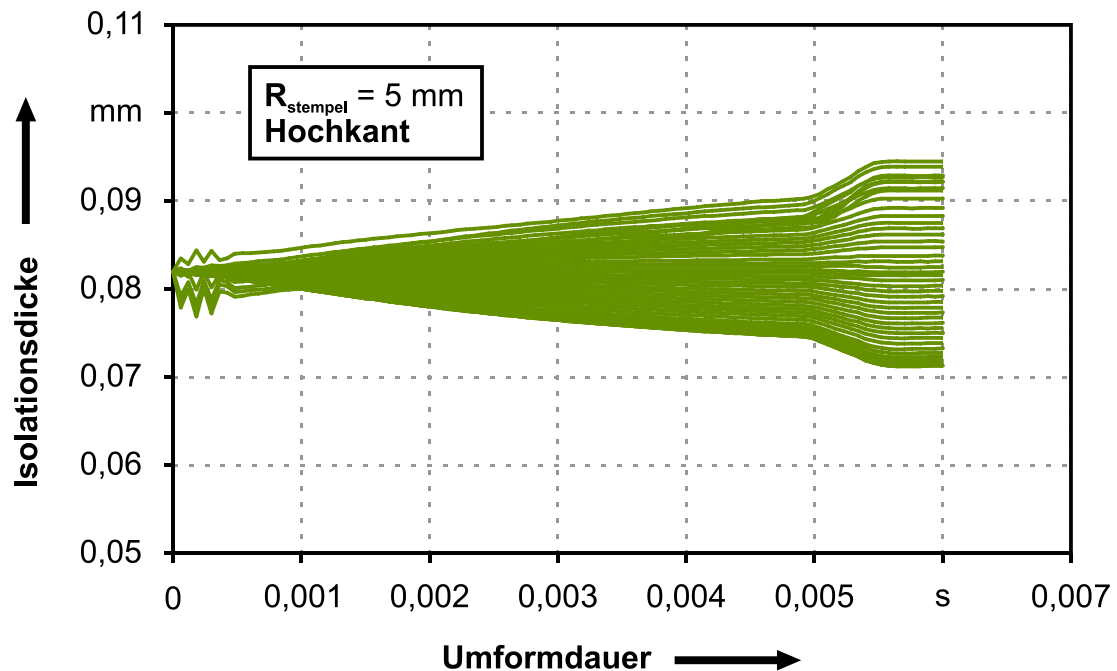


Abbildung 19: Isolationsdickenänderung über die gesamte Umformdauer bei $R_{\text{Stempel}} = 5 \text{ mm}$ in Hochkantanordnung

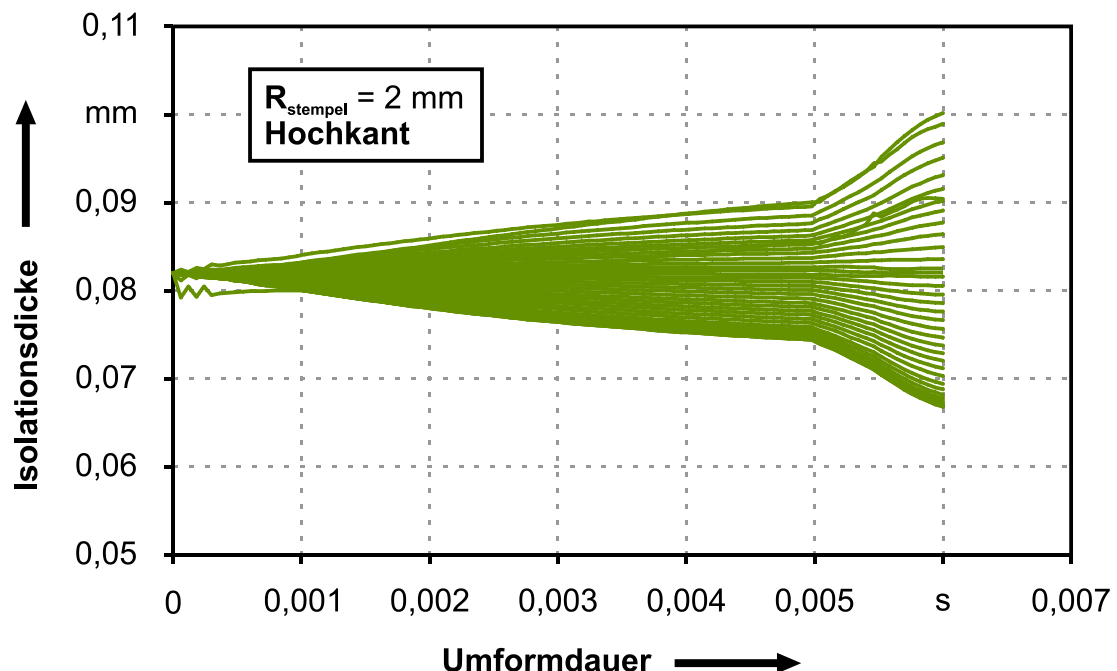


Abbildung 20: Isolationsdickenänderung über die gesamte Umformdauer bei $R_{\text{Stempel}} = 2 \text{ mm}$ in Hochkantanordnung

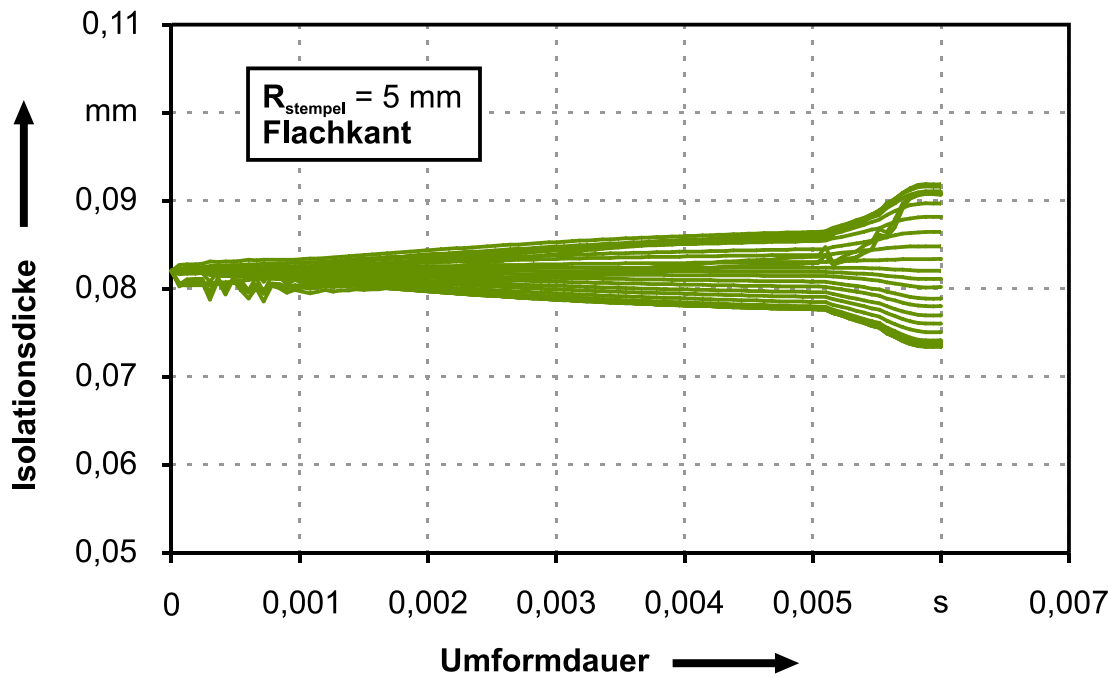


Abbildung 21: Isolationsdickenänderung über die gesamte Umformdauer bei $R_{Stempel} = 5 \text{ mm}$ in Flachkantanordnung

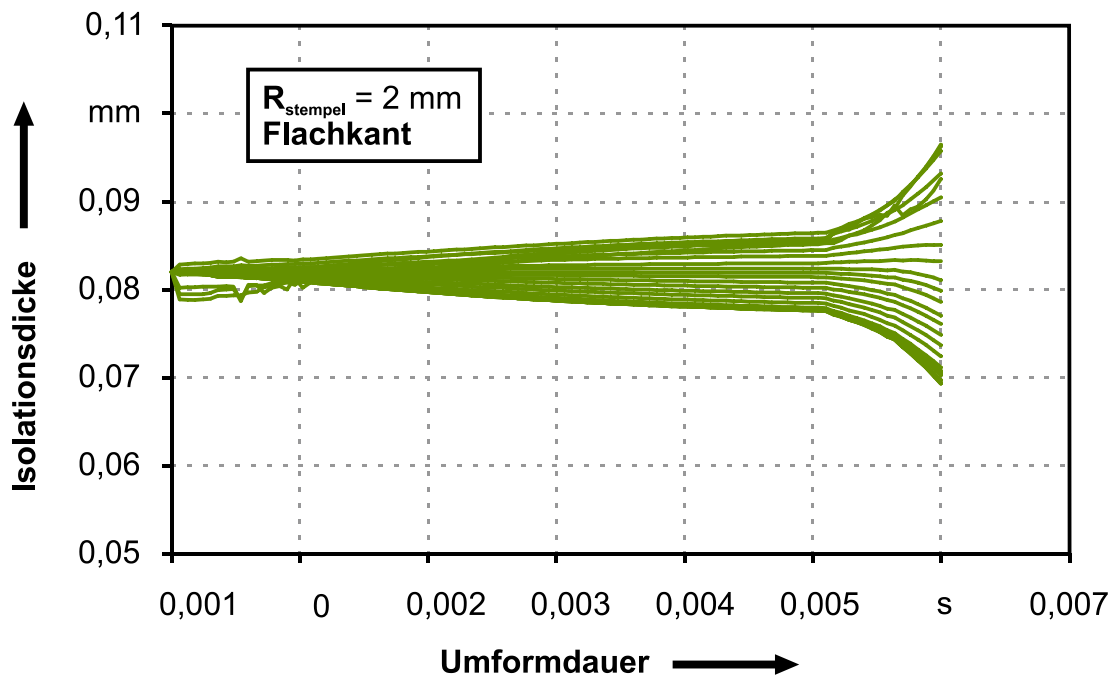


Abbildung 22: Isolationsdickenänderung über die gesamte Umformdauer bei $R_{Stempel} = 2 \text{ mm}$ in Flachkantanordnung

Da sich die Graphen identisch mit den vorangegangenen Erkenntnissen verhalten, wird auf eine vollständige Abbildung jeder Stempelrundung verzichtet und nur die Extrema der beiden Anordnungsarten dargestellt.

Dabei entsprechen die Graphen den vorangegangenen Erkenntnissen und ähneln respektive den Graphen aus Abbildung 11 bis Abbildung 14 in ihrem Verlauf. Daher kann auf die gleichen Effekte zurückgegriffen werden und die Aussage getroffen werden, dass der Stempelradius den entschiedensten Einfluss auf die Isolationsdicke hat. Dieser bestimmt das Spannungsverhältnis im Draht und das Ausmaß der Quetschung auf der Stempelinnenseite und Dehnung an der Drahtunterseite. Dieses Bestimmtheitsmaß trifft jedoch nur für den Zeitraum zu, in dem der Draht noch maßgeblich gebogen wird. Sobald die Drahtoberflächen durch die Stempelseitenflächen und Matrizenoberfläche eine Pressung erfahren, bewegt sich der Spannungsschwerpunkt weg vom Stempelradius hin zu den Pressflächen, wie Abbildung 23 zeigt.

Vergleichsspannung nach v. Mises

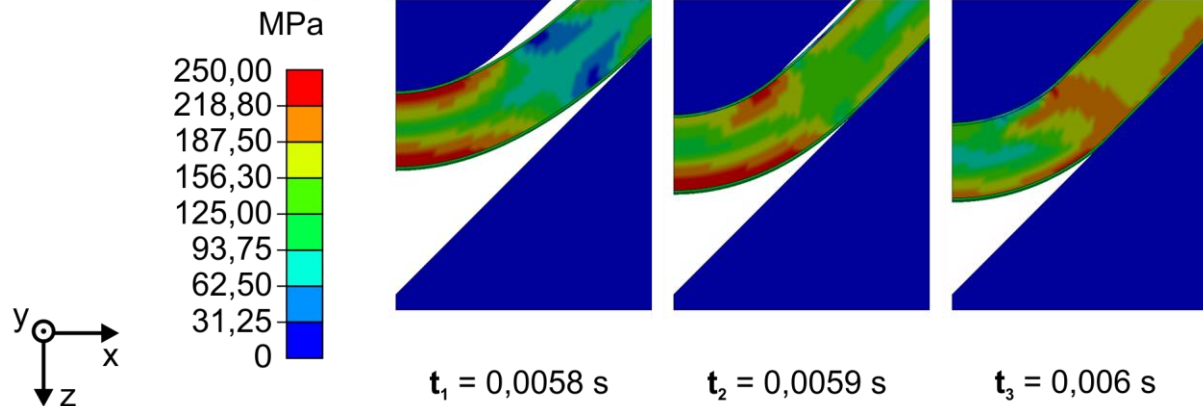


Abbildung 23: Spannungsverlagerung nach v. Mises am Ende der Umformung vom Biegestempel zu den Pressflächen

Die Ausdünnung bzw. Verdickung der Isolationschicht an beiden Punkten erscheint entsprechend der getätigten Beschreibungen logisch. Abbildung 24 zeigt die Orte der beiden Isolationsextrema.

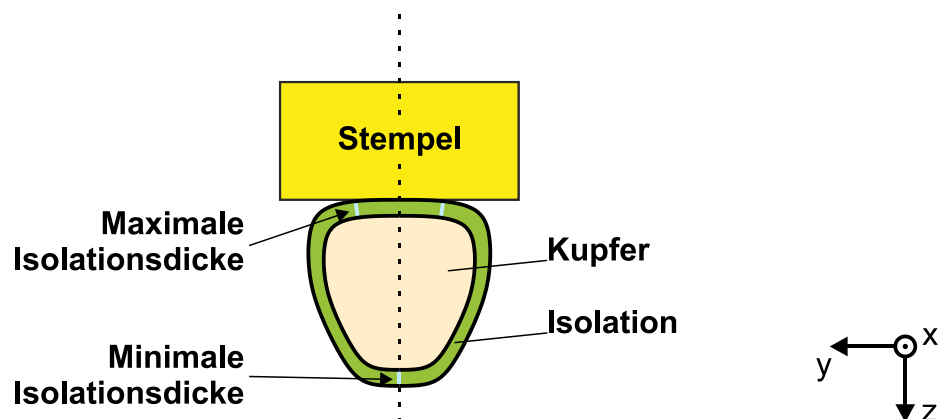


Abbildung 24: Positionen für maximale und minimale Isolationsdicken am Flachdraht

Tabelle 1 zeigt die minimalen und maximalen Isolationsdicken für jede Variantensimulation aus Stempelradius und Drahtanordnung.

Tabelle 1: Maximale und minimale Isolationsdicke für jede Variantensimulation aus Stempelradius und Anordnung zum Umformende bei $s_{\text{Stempel}} = 25 \text{ mm}$ gegenüber Dicke $d_{\text{Ausgangszustand}} = 82 \text{ }\mu\text{m}$

Anordnung	Stempelradius	Maximale Dicke d_{max}	Minimale Dicke d_{min}
Hochkant	2 mm	105,5 μm	66,82 μm
	3 mm	98,99 μm	68,55 μm
	4 mm	95,65 μm	70,13 μm
	5 mm	94,49 μm	71,52 μm
Flachkant	2 mm	96,48 μm	69,36 μm
	3 mm	95,88 μm	70,38 μm
	4 mm	93,72 μm	71,56 μm
	5 mm	91,84 μm	73,41 μm

Anhand der Werte ist ersichtlich, dass ähnlich zum Querschnittsverlauf ein spitzerer Stempelradius zwar eine höhere maximale Isolationsdicke bewirkt, jedoch gleichzeitig durch eine stärkere Dehnung die Isolationsschicht an der Drahtunterseite ausdünn.

Weitere Erkenntnisse der Simulationen

Des Weiteren kann beobachtet werden, dass es insbesondere beim flachkantig gebogenen Draht zu einer seitlichen Flächenaufdickung des Kupferleiters kommt, wie Abbildung 25 zeigt.

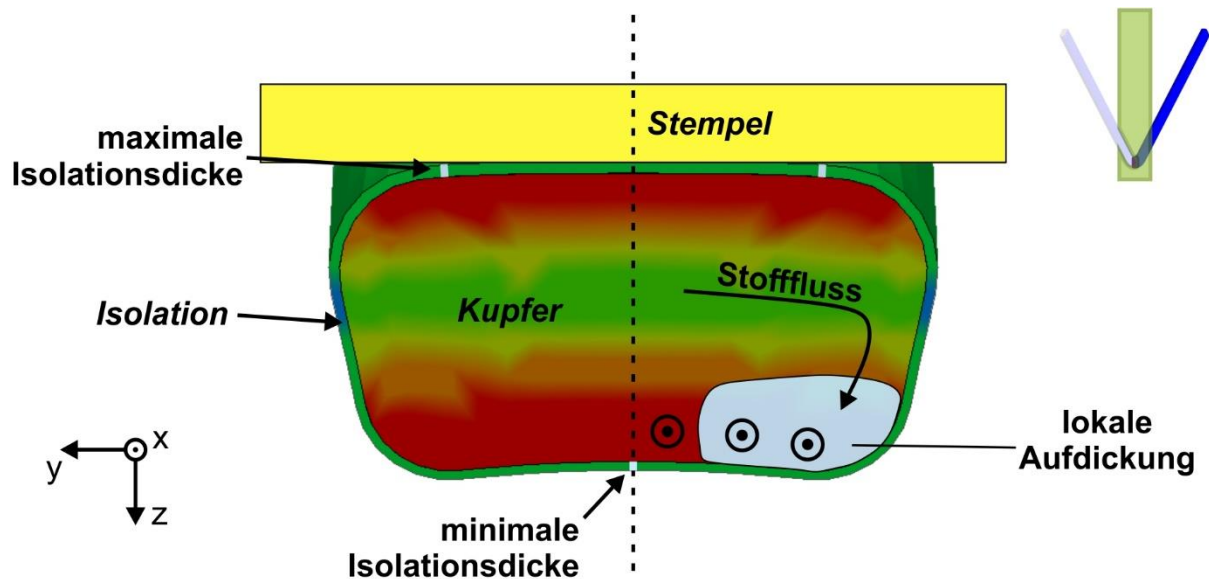


Abbildung 25: Lokale Aufdickung des Drahts an der unteren Rundung

Dies ist mit dem Materialfluss des Kupfers während der Umformung zu erklären. Durch die induzierten Druckspannungen kommt es an der Drahtoberseite zu hohen Spannungen, die eine Kaltverfestigung des Kupfers bedingt. Daher findet ein Werkstofffluss in axialer Y-Richtung statt. Durch die überlagerte Zugspannung an der Drahtunterseite kommt es jedoch zu einer Dehnung des Materials, sodass dort ein tangentialer Stofffluss stattfindet. Durch die Überlagerung beider Fließrichtungen aus Y- und tangentialen Anteilen, kommt es zu einem gerichteten Stofffluss zur unteren Rundung des Drahtes. Dieser Bereich erfährt entsprechend eine lokale Volumenzunahme, was als Ausbeulung sichtbar ist. Dieser Effekt ist maßgeblich von der vorhandenen Dehnung und Druckspannung abhängig und verstärkt sich mit zunehmender Auflagebreite des Drahtes. Dies bedeutet, dass im konkreten Fall eine maximale Ausbeulung an der unteren Drahttrundung bei der Kombination aus $R_{\text{Stempel}} = 2 \text{ mm}$ und Flachkantanordnung vorzufinden ist. Dieses Erkenntnis ist insbesondere in Bezug auf eine spätere Auslegung in einem mehrlagigen Wicklungsaufbau hilfreich, da die Drahtober- und -unterseite nicht planar zueinanderstehen und es entsprechend zu Montageproblemen kommen kann.

Analog zur Abbildung 15, in der die Verlagerung des maximalen Drucks in den Bereich der Pressung zum Umformende gezeigt ist, kann dies durch die Abhebung des Drahts am tangentialen Berührungspunkt in der Biegesymmetrieffläche erklärt werden. Abbildung 26 zeigt die Abhebung der Drahtoberseite vom Stempel als Folge der Spannungsverlagerung.

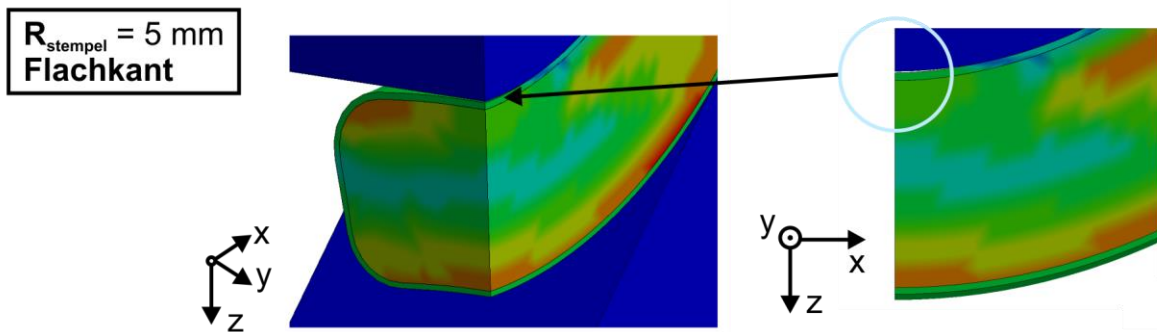


Abbildung 26: Abheben der Drahtoberseite von der Stempelrundung am Ende der Umformung zum Zeitschritt $t = 0,006$ s

Abschließend kommt es bei den Simulationen mit $R_{\text{Stempel}} = 2$ mm in Hochkantanordnung zu einer Aufschiebung der Isolation, wie Abbildung 27 zeigt.

Vergleichsspannung nach v. Mises

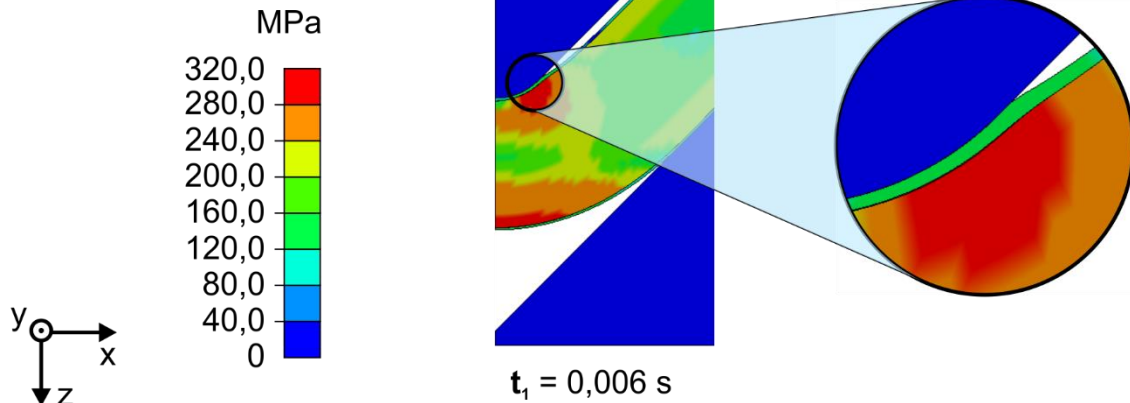


Abbildung 27: Aufschiebung der Isolation am Ende der Umformung bei $R_{\text{Stempel}} = 2$ mm in Hochkantanordnung

Dies hängt ebenfalls mit der Spannungsverlagerung zum Ende der Simulation zusammen, zeigt aber keine Auswirkungen auf den Verbundkontakt zwischen Isolation und Kupfer.

Aussagekraft in Bezug auf Durchschlag und Teilentladung

Anhand der verbleibenden Isolationsdicke aus den Simulationsergebnissen können mittels den Formeln 1 und 2 die Systemgrenzen der Halbformspulen errechnet werden.

Formel 1: Durchschlagsspannung nach dem Paschen-Gesetz

$$U_D = 2422 \text{ kV} \cdot \frac{d}{1 \text{ m}} \frac{p}{1,013 \text{ bar}} \frac{293 \text{ K}}{T} + 60,8 \text{ kV} \cdot \sqrt{\frac{d}{1 \text{ m}} \frac{p}{1,013 \text{ bar}} \frac{293 \text{ K}}{T}}$$

Formel 2: Vereinfachter Ansatz für die Teilentladungseinsetzspannung

$$U_{TEE}(s) = U_{D_{Luft}}(s) \cdot \left(1 + \frac{2 \cdot d_{Lack}}{\epsilon_{r_{Lack}} \cdot s} \right)$$

Dabei stellt d die Isolationsdicke, p den atmosphärischen Normaldruck unter Normbedingungen, T die Temperatur und ϵ_r die Permittivitätszahl dar. Jedoch ist hierbei zu beachten, dass bei Schichtdicken ≤ 1 mm weitere Effekte den formulierten Zusammenhang stärker beeinflussen und damit verfälschen können.

Durch die Kombination der berechneten minimalen Isolationsschichtstärke und den analytischen Zusammenhängen zwischen dieser und den elektrischen Eigenschaften der sich ergebenden Biegeprobe ist es möglich, Vorhersagen bezüglich der elektrischen Eigenschaften auf Basis der Simulation zu treffen.

Zusammenfassung

Zum bisherigen Stand der Untersuchungen können bereits umfassende Grundlagen zur Umformung offener Halbformspulen von Flachdrähten präsentiert werden. Ein stabiles explizites FE-Simulationsmodell in ANSYS LS-Dyna lässt unter Anwendung der ermittelten Werkstoffkenndaten und Kontaktbedingungen eine ganzheitliche Betrachtung und Analyse der Umformprozesse zu. Nur eine kombinierte Betrachtung aus den Erkenntnissen der Versuchsabstraktionen ermöglicht die Definition eines Prozessfensters für Biegeumformungen.

Autorenangabe

Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg

Lehrstuhl für Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik

Fürther Straße 246b, 90429 Nürnberg

Autoren: Michael Weigelt, Christian Fröschl, Michael Masuch, Andreas Riedel, Jörg Franke

Tel.: +49 911 53029062

Michael.weigelt@faps.fau.de

www.faps.de

Förderhinweis

Dieses Forschungsprojekt wird vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) im Rahmen des Förderprogramms ELEKTRO POWER II, FKZ 01MX150111F gefördert. Das Projekt wird vom DLR Projektträger verwaltet. Die Autoren sind für den Inhalt dieser Publikation verantwortlich.

Stichwörter

Gesenkumformen, Traktionsantriebe, Wicklungstechnik, Hairpin