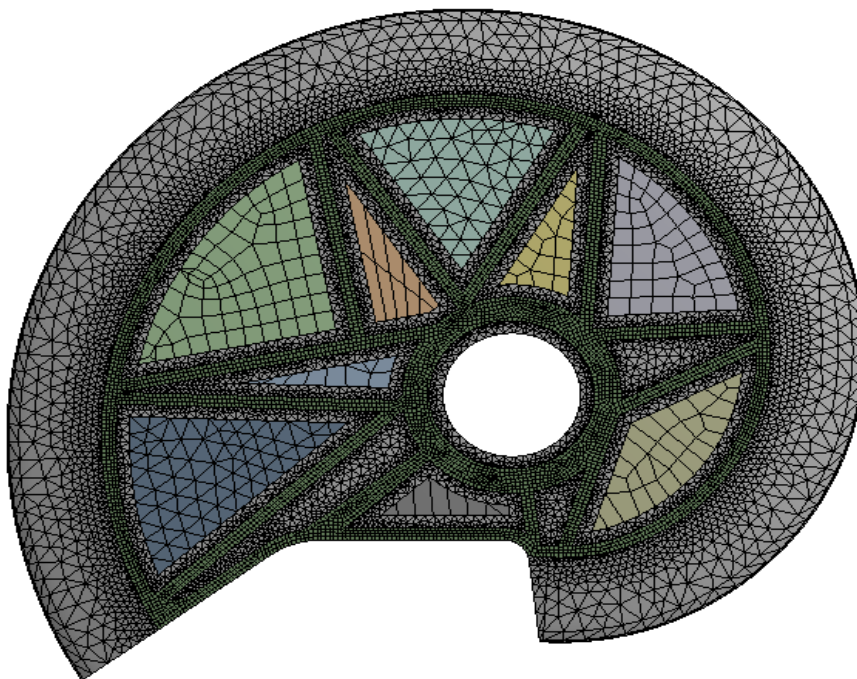


BERICHT

zu

**Berechnungen der Schneid- und Stützkräfte zur
funktionellen Ausstattung von Slicermessern
mit Lasertragwerken und Stabilisatoren durch
die Finite-Elemente-Methode (FEM)**



Datum: 04.05.2017

Erarbeitet durch: Dr.-Ing. Eberhard Haack
Dpl.-Ing.FH Philipp Rau

Wirkung von Laserspuren an Slicermessern

1. Aufgabenstellung

Die Untersuchungen mit den vorliegenden Ergebnissen an runden Slicermessern (Kreismesser) sollen auf Sichelmesser mit außermittiger Krafteinleitung und einem exzentrisch ziehenden Schnittverlauf zur Trennung der Schneidgüter übertragen werden. Durch die Anwendung von Laserspuren sollen verbesserte Rundlauf- und Deformationseigenschaften zum Erreichen einer höheren Gewichtsgenauigkeit portionierter, scheibenförmiger Produkte beim Schneidvorgang erreicht werden. Die Laserspuren stellen eine gezielte werkstoffseitige Veränderung mit höherer Festigkeit im Messer dar. Durch partielles, kurzes, intensives Aufheizen mittels Laserstrahl und anschließender Selbstabschreckung wird eine Umwandlung des vorliegenden Mischkristalls in Martensit erzwungen. Die Laserspuren mit höherer Zugfestigkeit wirken wie Streben im Grundwerkstoff, deren Anordnung können durch verschiedenste Wirkungen äußerer Kräfte entgegengesetzt werden. Das Prinzip wird bisher nur mit dem strahlgeführten Laserhärten bei Schneidwerkzeuge der Fleisch- und Lebensmittelindustrie angewendet. Erfahrungswerte zur Wirkung der Laserstreben wurden durch praktische Untersuchungen in Werkstoffprüfmaschinen, durch metallografische Schlitte und im praktischen Einsatz ermittelt. Durch eine spezielle Technologie konnte das Prinzip für den Einsatz bei normalen Stählen und zum punktgenauen Einsatz weiterentwickelt werden. Die Laserspur hat generell eine makroskopische Breitenrichtung (hier: 10 mm). Die Tiefe der Martensit-Umwandlung (Tiefe der Einhärtung) beträgt bis zu 1,8 mm. Durch diese Umwandlung und der daraus folgenden veränderten Elastizität werden andere Spannungsverteilungs- und Dehnungseigenschaften erhofft, die sich positiv auf die Zielgröße - „axiale Deformation“ („Aufweitung“) - auswirken. Die Effekte konnten simulativ sowie experimentell an anderen Messerarten nachgewiesen werden.

2. Messerkörper

Grundlage für die FEM-Analyse war die Geometrie eines Sichelmessers.

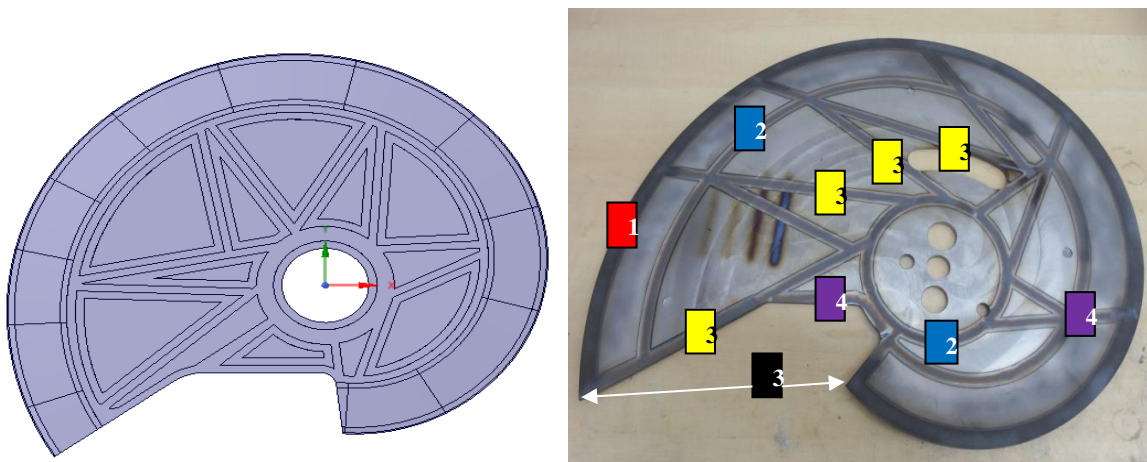


Abbildung 1: reale (rechts) und simulierte (links) Messergeometrie - Beispiele zur Nutzung der Laserspurtechnologie an einem Werkzeug (rechte Darstellung):

- 1.....Laserschneide
 - 2.....Ringanker zur Antriebskrafteinleitung in das Werkzeug
 - 3.....Druckstäbe zur Stabilisierung des Werkzeugkörpers gegen Biegung
 - 4.....Stützstäbe zur Minderung der Biegung
 - 5.....offener Messerbereich mit Geometrieunterbrechung zur kontinuierlichen Schneidgutzuführung
- Angaben zu Laserspur als Stabilisatoren

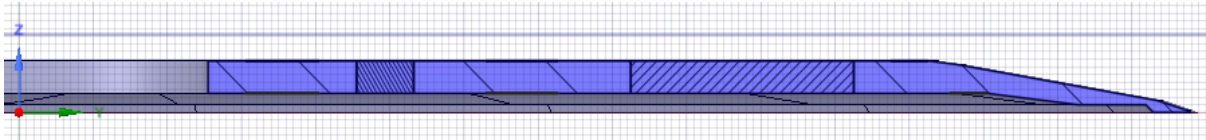


Abbildung 2: Schnitt durch die YZ-Ebene

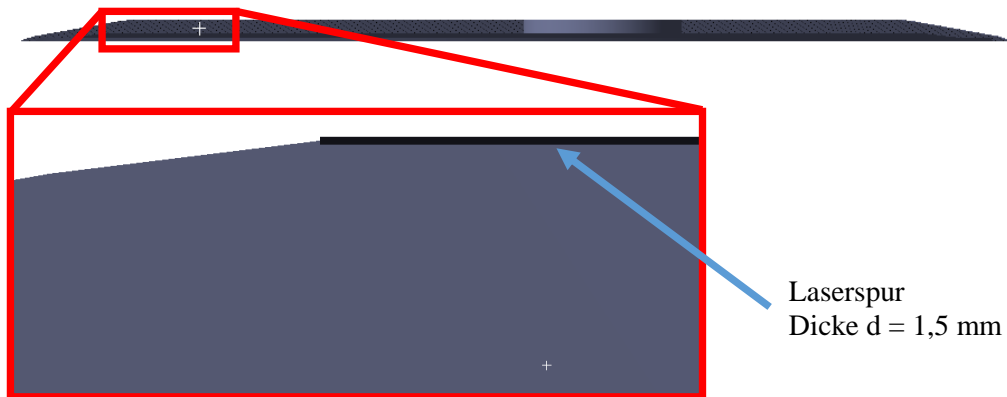


Abbildung 3: Detail Laserspur

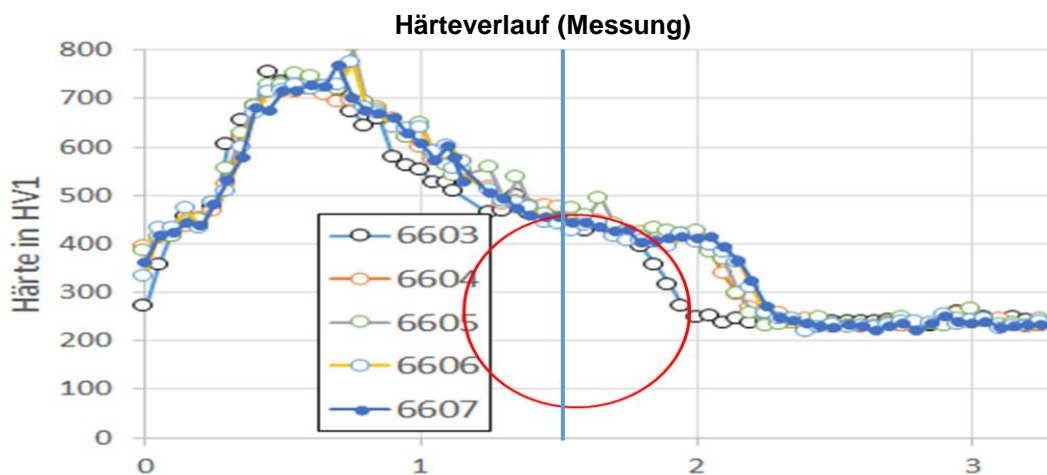
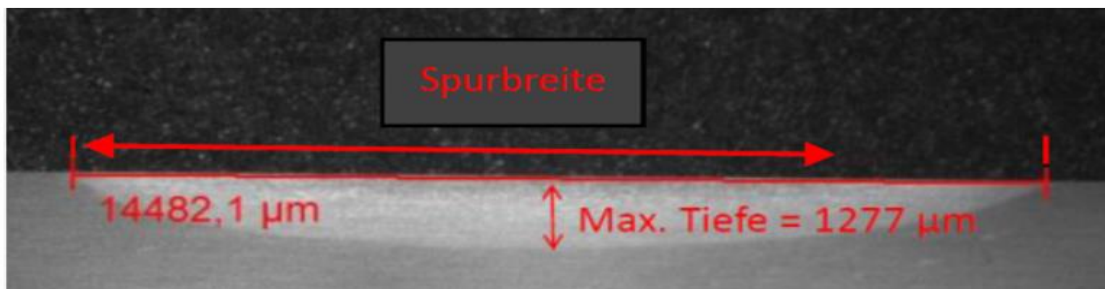


Abbildung 4: Einhärtetiefe entlang einer Schliiffprobe und Festlegung des verwendeten Vergütungsereiches für die FEM-Berechnung



Laserspuren mit der Einhärtetiefe und seinem Berechnungsprofil als Stabilisatoren im Werkzeug

3. Vernetzung

Der Messerkörper wurde zwecks Vernetzung und Materialzuweisung in verschiedene Volumina zerlegt. Die Richtschnur für die Zerlegung gaben definierte Laserspuren vor.

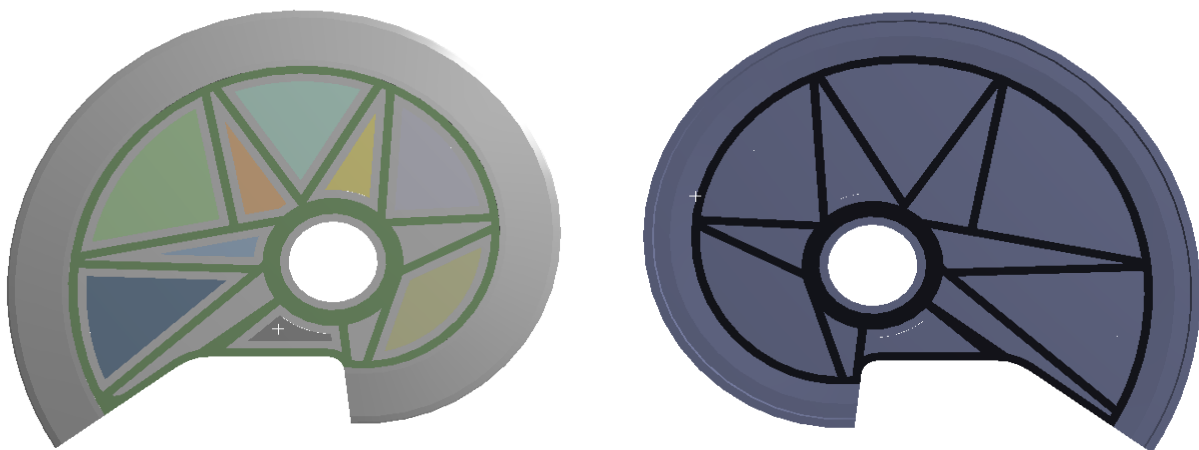


Abbildung 5: abgeleitete Simulationsgeometrie; links Darstellung der Einzelvolumina mit Ansicht von oben; rechts: Hervorhebung der Martensit-Zonen (schwarz) mit Ansicht von unten

Die Areale zwischen den Laserspuren wurden in sinnvolle Flächengrößen geteilt. Der Schnitt wurde im Abstand von 10 mm um die Laserspuren gelegt. Damit konnte einerseits eine gute Kontaktierung der Laserspurvolumina an den Grundkörper sichergestellt werden, andererseits konnte der nicht auswertungsrelevante Zwischenteil separat und mit angepassten Elementqualitäten vernetzt werden. Bei der Vernetzung mussten die Größenunterschiede der Laserspuren und der Messerkörper beachtet werden. Die Laserspuren und im Nahbereich derer (< 10 mm) wurde das Netz mit hohen Güteanforderungen erstellt. Im Bereich der Schneide wurde mit einem mittelfeinem bis feinem Netz gearbeitet, um die Geometrie der spitz zulaufenden Schneide abbilden zu können. Hier wurden keine Spannungsspitzen erwartet, allerdings soll die filigrane Geometrie gut abgebildet werden. Im Bereich zwischen den Laserspuren konnte partiell ein grobes Netz verarbeitet werden. Diese Bereiche dienen der richtigen Abbildung der globalen Steifigkeit, die auch durch eher grobe Netze richtig wiedergegeben werden. In den Zwischenbereichen werden keine Spannungskonzentrationen sichtbar. Das Vorgehen ist damit valide.

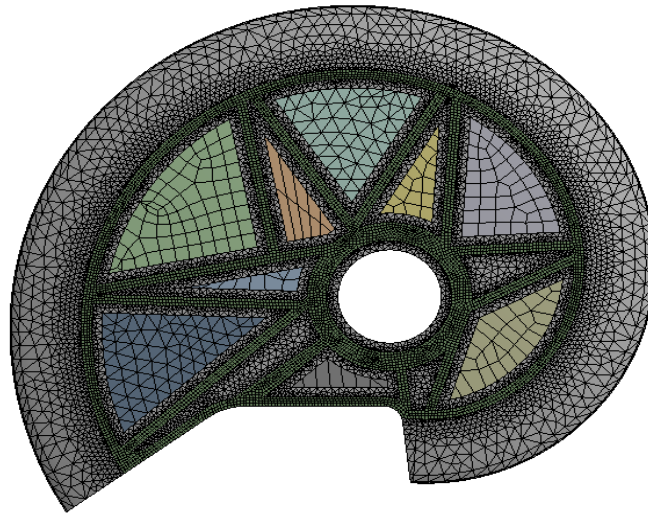


Abbildung 6: Vernetzung

4. Randbedingungen

4.1. Materialdaten

Für die Simulation wurde der Grundkörper aus „Stahl“ modelliert. Die Laserspuren wurden als „Martensit“ modelliert.

	Messergrundkörper	martensitische Laserspuren
Elastizitätsmodul (E-Modul) [GPa]	205	215,23
Poissonzahl	0,3	0,3

Die Stahlsorten unterscheiden sich bei den mechanischen Kennwerten vor allem in Streckgrenze, Zugfestigkeit und Dichte. Die Elastizität (E-Modul) ist dagegen konstant, weil der größte Anteil des Werkstoffs als ferritischer Mischkristall vorliegt, in dem die Legierungsbestandteile gelöst sind. Einzig die martensitischen Anteile weisen eine unterschiedliche Elastizität auf.

4.2. Einspannung

Die Messer wurden an ihrer Innenbohrung fest eingespannt.

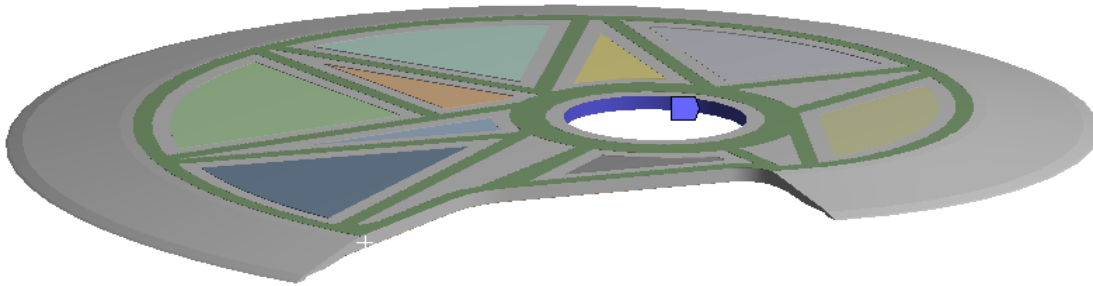


Abbildung 7: Feste Einspannung an der Innenbohrung

4.3. Belastungen

Da für die Belastungen keine Definitionen bestanden, wurden die Annahmen aus Analogie zu anderen Messern sowie technischen Überlegungen getroffen.

Die Annahme der Drehzahl, die zu einer Fliehkraft-Belastung des Messers führt, begründet sich in den technischen Einsatzbedingungen. Die Annahmen zu den Schnittkräften sind nicht direkt bestimmbar. Die nachfolgende Abbildung zeigt und untermauert die beschriebenen grundsätzlichen Überlegungen.

Auf das Messer wirkt eine Stanzkraft. Sie kommt aus dem radialen Eindringen des Messers in das Schnittgut. Sie wirkt als normale Druckkraft auf die Schneide und als Reibkraft auf die Freifläche des Messers. Sie ist verbunden mit der zum Abscheren des Schnittguts am Schneidengrund nötigen Kraft. Durch die kinematische Transformation des Schneidewinkels wird die nötige Druckkraft gegenüber eines senkrechten Eindringens vermindert. Der Betrag ist unbekannt.

Auf das Schnittgut wirkt eine kontinuierliche Vorschubkraft. Während des Schnittprozesses wirkt das Messer als Gegenlager zu dieser Kraft. Deshalb wirkt die Vorschubkraft senkrecht als Druckkraft von hinten auf das Messer. Der Vorschub wird über konstanten Weg erzeugt. Ohne Kenntnis des E-Moduls des Schnittgutes muss auf eine Kraftannahme zurückgegriffen werden.

Weiterhin wirkt eine tangentielle Reibkraft. Das Schnittgut setzt dem Messer bei seiner Drehbewegung einen Widerstand gegen weiteres Bewegen entgegen. Dieser Widerstand – eine Reib- bzw. Schubbeanspruchung – wirkt stärker, je tiefer das Messer in das Schnittgut eintaucht. Wie jede Reibkraft ist sie Ausdruck einer Normalkraft, in diesem Fall die Vorschubkraft. Da weder Vorschubkraft noch Reibkoeffizient bekannt sind, muss eine Annahme getroffen werden.

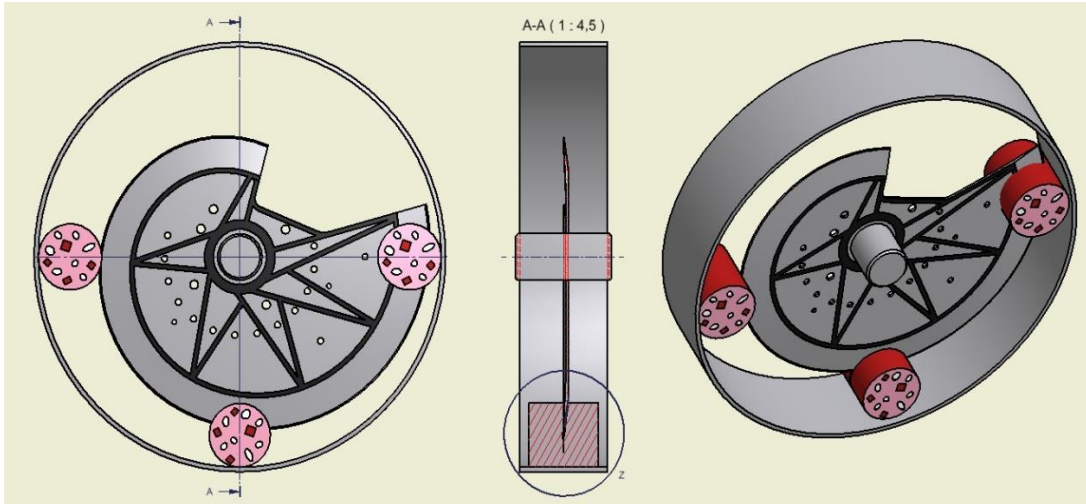


Abbildung 8: Verlauf eines Schnittes mit einem Sichelmesser durch das Schnittgut

4.4. Untersuchungen von Messerbelastungen bei unterbrochenen ziehenden Schnittkräften

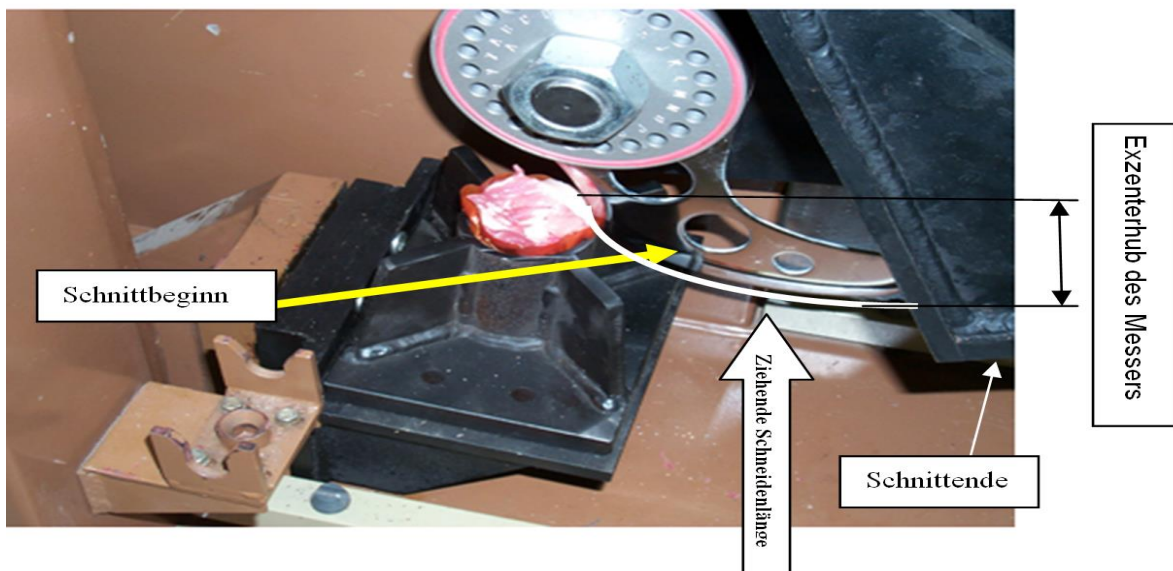


Abbildung 9: Foto von einem Schnittversuch mit einem Sichelkuttermesser zum Schnittbeginn bis Schnittende

4.5. Symbolische Messerbelastungen und auslösende Trennvorgänge im Schneidgut

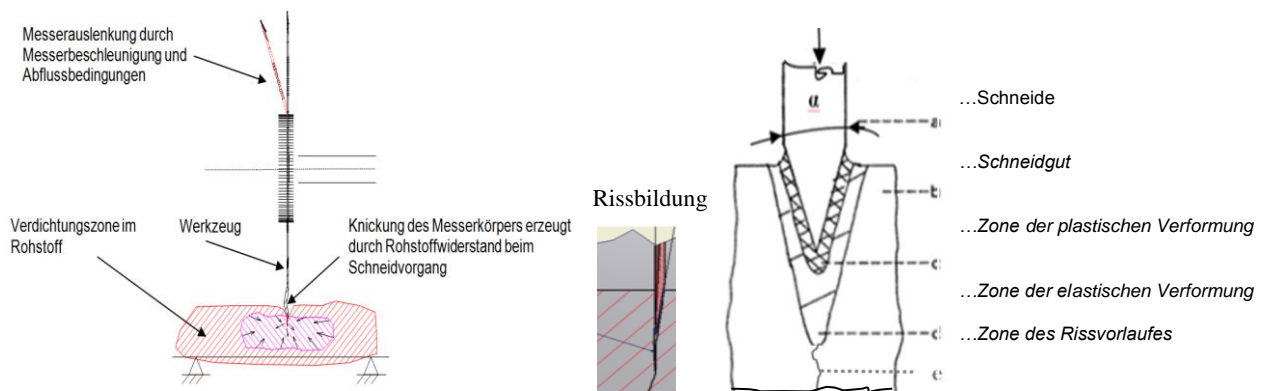


Abbildung 10: Schematische Darstellung der Belastungen im/ am Messerkörper beim Trennvorgang im Schneidgut

Kräfte am Messerkörper und beim Schneidvorgang:

1. Anschnitt des Produktes durch Aufbrechen der Oberfläche durch mechanischen Vorschub
2. Beginnendes Eindringen in das Schneidgut durch mechanischen Vorschub mit ziehenden Schnitt aus der Drehbewegung und der Schneidenlänge- es treten durch die Keilform der Werkzeuges vorrangig Spaltkräfte mit Risswirkungen auf
3. Der zunehmende Rissfortschritt durch die Keilwirkungen erzeugen mit der Riss- und Eindringtiefe seitliche Reibkräfte am Messerkörper mit Bremswirkung, die eine Art Längung des Werkstoffes im Schneidenbereich nach sich zieht. Die Ursache liegt in einer vorauseilenden Antriebskraft gegenüber dem verzögert folgenden Schneidenbreich des Werkzeuges
4. Durch das Öffnen der Werkzeuggeometrie am Ende des Schneidvorganges brechen die eingebrachten Spannungen und Kräfte schlagartig ab. Das Freiwerden dieser Kräfte drückt sich in einer Wedelbewegung des schneidentragenden Messerkörpers aus

Für die Beträge der Einzelbelastungen wurden die folgenden Annahmen getroffen.

- Drehzahl: 100 Upm \rightarrow 10,471 rad/s
- axiale Kraft aus dem Druck des Schnittguts von hinten auf das Messer: 300 N (senkrecht zur Bildebene, gleichmäßig verteilt)
- tangentielle Kraft aus der Reibung am Schnittgut: 100 N (gleichmäßig über die hintere Wirkfläche verteilt); 10 N (gleichmäßig über die vordere Schneidenfläche verteilt (Reib-Normalkraft ist nur Beschleunigungskraft/ Massenträgheit des abgetrennten Schnittguts))
- axiale Kraft aus dem Widerstand gegen Abscherung: 20 N
- axiale Kraft aus der Reibung gegen Eindringen: 50 N

Die beschriebenen Kräfte mit den angenommenen Beträgen wurden auf einen kleinen Bereich der Schneide (Vorderseite) und flächig auf die Projektionsfläche des Schnittgutes (Rückseite; siehe Abbildung) aufgebracht.

Nachweis der Wirkungen der Laserstabilisatoren im Vergleich

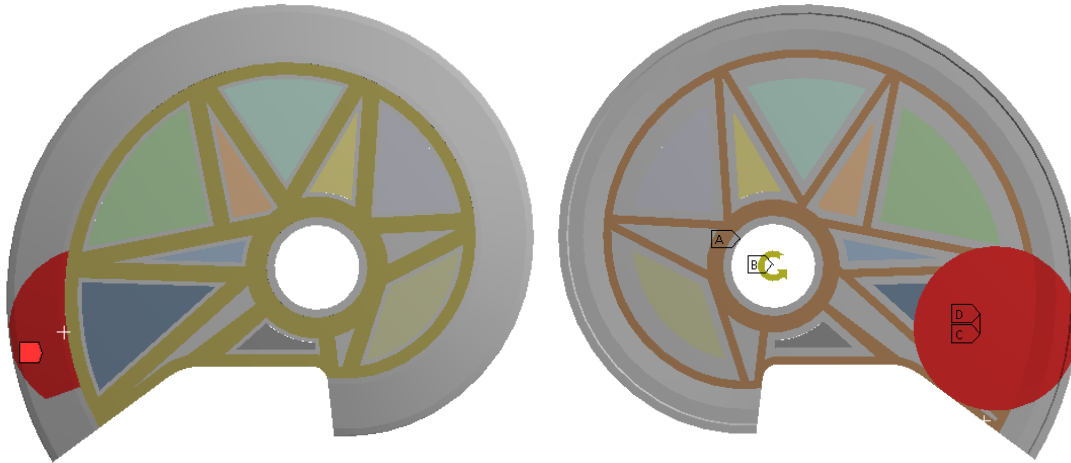


Abbildung 11: Belastungen: Fliehkraft durch Rotation und Kraft auf die Wirkfläche (analog zu einem Schnittgut Durchmesser 100 mm); links: Vorderseite; rechts: Hinterseite

5. Ergebnisse

Nachfolgend sind die Ergebnisse der Berechnung bei gegebenen Randbedingungen dargestellt. Links findet sich immer das unbehandelte Messer, rechts das Messer mit Laserspuren.

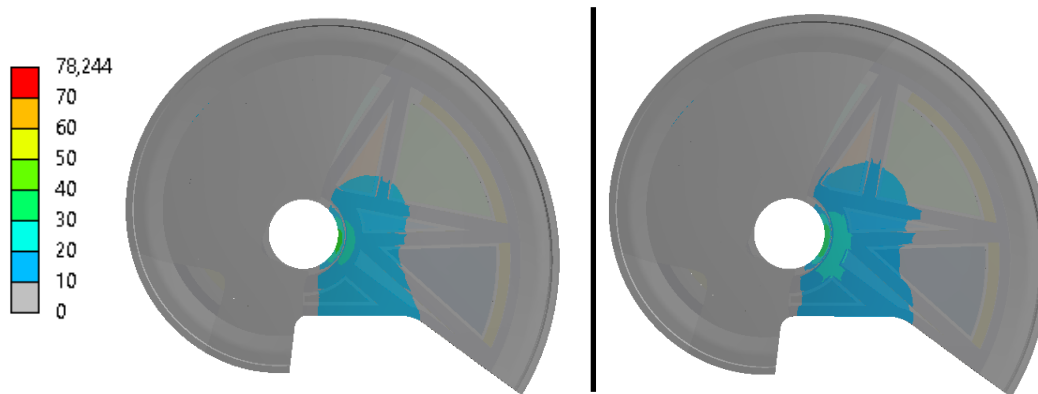


Abbildung 12: Vergleich der GEH-Spannungen an der Unterseite

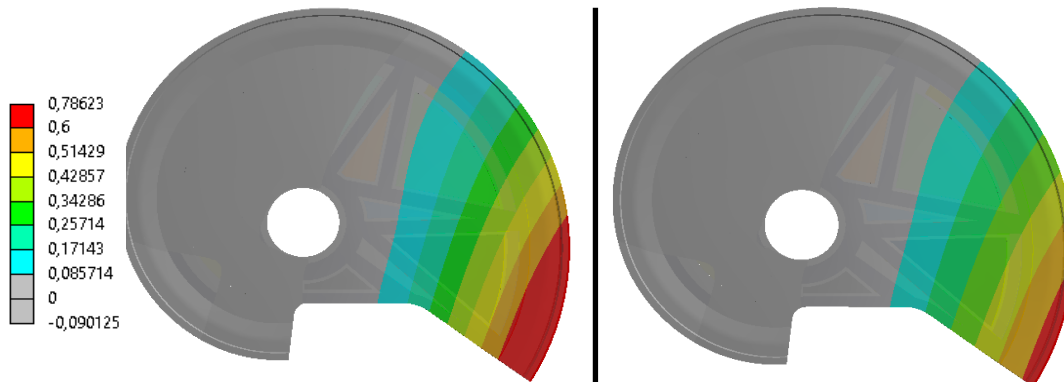


Abbildung 13: Vergleich der Deformationen in axialer Richtung (Aufweitung)

Auf den Abbildungen sind die Unterschiede bei der axialen Aufweitung und der Spannungsverteilung zu erkennen. Zwar ist die Spannungsverteilung im Messerkörper recht ähnlich, doch ziehen die Martensit-Gebiete sich an. Diese Spannungskonzentrationen wirken sich in einer deutlich geringeren Deformation aus. Der rote Bereich – der Bereich der größten Verformung – ist beim Messer mit Laserspuren sichtbar kleiner, auch die maximale Durchbiegung ist kleiner, somit ist die Wirksamkeit der Laserspuren nachgewiesen.

6. Zusammenfassung der Ergebnisse

Nachfolgend wurden die Spitzenwerte von Spannung und Verformung zusammengefasst.

	Standard	Laserspuren
max. GEH-Spannungen [MPa]	58,5	78,2
Deformation gesamt [mm]	0,78675	0,66764
Axiale Aufweitung [mm]	0,78623	0,6672
Unterschied [%] bei Aufweitung	0 (Referenz)	15,1

6.1. Polynom-Anteile

Nach den Regeln der linearen Statik können Verschiebungen aus Einheitslasten beliebig skaliert und kombiniert werden. Dieses Prinzip soll im Nachfolgenden nicht auf beliebige Größenskalen ausgedehnt werden, dennoch werden Polynome vorgestellt, mit deren Hilfe sich die Verschiebung generell auf Grundlage von Einheitslasten für jede realistische Kombination von Skalaren aus Messerdrehzahl, Druck- und Stanzkraft auf den Messerkörper durch ein Schnittgut und Scher- bzw. Gleitreibungskraft an dem Schnittgut (Durchmesser 100 mm) errechnen lässt. Die Koeffizienten wurden mithilfe einer 7-dimensionalen Sensitivitätsanalyse (1 Dimension pro Einzellast) ermittelt.

Axialverschiebung (Aufweitung) [mm] aus:	Standard	Laserspurr	Verbesserung [%]
Drehzahl [Upm]	$1,6288 \cdot 10^{-7} \text{ mm} \cdot \text{s}^2 / \text{rad}^2 \cdot \text{n}^2$	$1,4333 \cdot 10^{-7} \text{ mm} \cdot \text{s}^2 / \text{rad}^2 \cdot \text{n}^2$	12
Vorschubkraft (Schnittgut) [N]	$2,5541 \cdot 10^{-3} \text{ mm} / \text{N} \cdot F_z$	$2,19653 \cdot 10^{-3} \text{ mm} / \text{N} \cdot F_z$	14
Aus Reibung (Schnittgut) [N]	$-2,6194 \cdot 10^{-5} \text{ mm} / \text{N} \cdot F_y$	$-2,3365 \cdot 10^{-5} \text{ mm} / \text{N} \cdot F_y$	9
Stanzkraft (Schnittgut) [N]	$8,6000 \cdot 10^{-5} \text{ mm} / \text{N} \cdot F_x$	$7,3100 \cdot 10^{-5} \text{ mm} / \text{N} \cdot F_x$	15
Massenträgheit (Produkt) [N]	$3,5636 \cdot 10^{-3} \text{ mm} / \text{N} \cdot F_z$	$3,1716 \cdot 10^{-3} \text{ mm} / \text{N} \cdot F_z$	11
Reibung (Produkt) [N]	$3,1605 \cdot 10^{-6} \text{ mm} / \text{N} \cdot F_y$	$2,59161 \cdot 10^{-6} \text{ mm} / \text{N} \cdot F_y$	18
Schnittgutabscherung [N]	$-2,0165 \cdot 10^{-5} \text{ mm} / \text{N} \cdot F_x$	$-1,67370 \cdot 10^{-5} \text{ mm} / \text{N} \cdot F_x$	17

Nach dem Superpositionsprinzip lassen sich die Einzeldeformationen zur resultierenden Deformation addieren. Zur besseren Übersicht wurden die Sensitivitäten auf den Wert der Axialverschiebung aus Vorschubkraft normiert.

Einfluss, normiert auf Vorschubkrafteinfluss aus:	Standard	Laserspurr
Drehzahl [Upm]	$6,377 \cdot 10^{-5}$	$6,5253 \cdot 10^{-5}$
Vorschubkraft (Schnittgut) [N]	1	1
Reibung (Schnittgut) [N]	0,010	0,011
Stanzkraft (Schnittgut) [N]	0,034	0,033
Massenträgheit Produkt [N]	1,395	1,444
Reibung Produkt [N]	0,001	0,001
Schnittgutabscherung [N]	0,007	0,007

7. Schlussfolgerung

Bei anderen Messerarten mit in sich geschlossenen Schneiden (Rundmesser) ist die Wirkung der Laserspuren als Stabilisatoren in Form von Ring- und Zugankern nachgewiesen. Diese Form der Stabilisierung wirkt bei Slicermessern in Sichelform nur begrenzt, da hier eine geöffnete Geometrie vorliegt. Durch diese werden die äußeren Kräfte an der Schneide und im Messerkörper beim Schneiden schlagartig konturbedingt unterbrochen und treten mit sichtbaren Wedelbewegungen infolge der inneren Spannungen am Messerende aus dem Messerkörper aus. Die Dehnungsbehinderung als Zuganker setzt eine tangential, gleichförmige und durchgängige Fläche mit möglichst großem Abstand zur Rotationsachse voraus, die die Deformationskräfte aufnimmt und mit erhöhter Steifigkeit ihnen entgegenwirkt. Das Sichelmesser hat konstruktionsbedingt keine durchgängige Fläche mit großem Abstand zur Rotationsachse. Die Flächenunterbrechung im Messerkörper dient der kontinuierlichen

Schneidgutzuführen bei gleichzeitiger Messerrotation, dennoch wird die axiale Deformation durch den Einsatz der Laserspuren um 15 % gemindert.

Aus der Sensitivitätsanalyse geht hervor, dass die axiale Deformation des Messers die höchste Sensitivität auf die Massenträgheit des beschleunigenden Produkts aufweist. Die beschleunigten Massen der geschnittenen Produktscheibe sind allerdings sehr gering. Weiterhin hat die Vorschubkraft (Druck auf das Messer von hinten) einen hohen Einfluss auf die Deformation in axialer Richtung. Zugleich stellt die Vorschubkraft auch eine dominierende Einzellast dar. Aus dominierender Sensitivität und dominierendem Einfluss lässt sich unschwer folgern, dass die Vorschubkraft sehr relevant ist für die axiale Durchbiegung.

Die Sensitivität der anderen Einzellasten auf die axiale Deformation liegt 2 bis 3 Größenordnungen unter den oben beschriebenen. Der Einfluss der Drehzahl (Fliehkraft) hat die geringste Wirkung auf die axiale Deformation, allerdings geht die Drehzahl quadratisch in die Superposition ein. Eine Vorschubkraft von 100 N hat eine vergleichbare Wirkung wie die Fliehkraft bei 1.200 Upm.

Die Spannungsspitzen, die in der Tabelle bekundet werden, gehen plausibel einher mit einer Zunahme der Steifigkeit. Durch erhöhten Elastizitätsmodul werden die auftretenden Kräfte (Rotation, Biegung und Schub) vermehrt durch die Martensit-Areale geleitet. Die Höhe, zwar nur lokal, stellte aber keine unzulässige Belastung des Martensits dar.