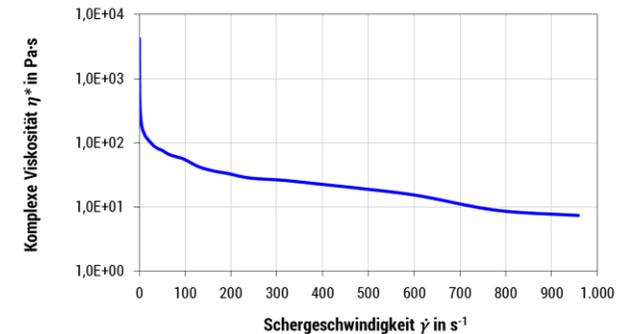
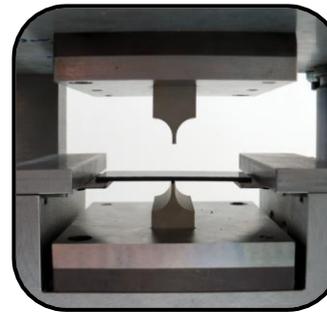


11. Anwendertreffen SAXSIM

Hybridfügen: Numerische Verfahrensentwicklung des Flach-Clinchklebens

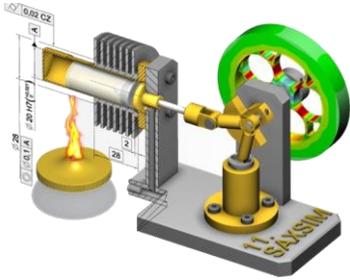


$$k_f = C_1 - (C_1 - C_2) \cdot e^{C_3 \cdot \varphi^{C_4}}$$

$$k_f = C_1 + C_2 \cdot \varphi^{C_3} \cdot \dot{\varphi}^{C_4}$$

$$\eta = K \cdot \dot{\gamma}^{n-1}$$





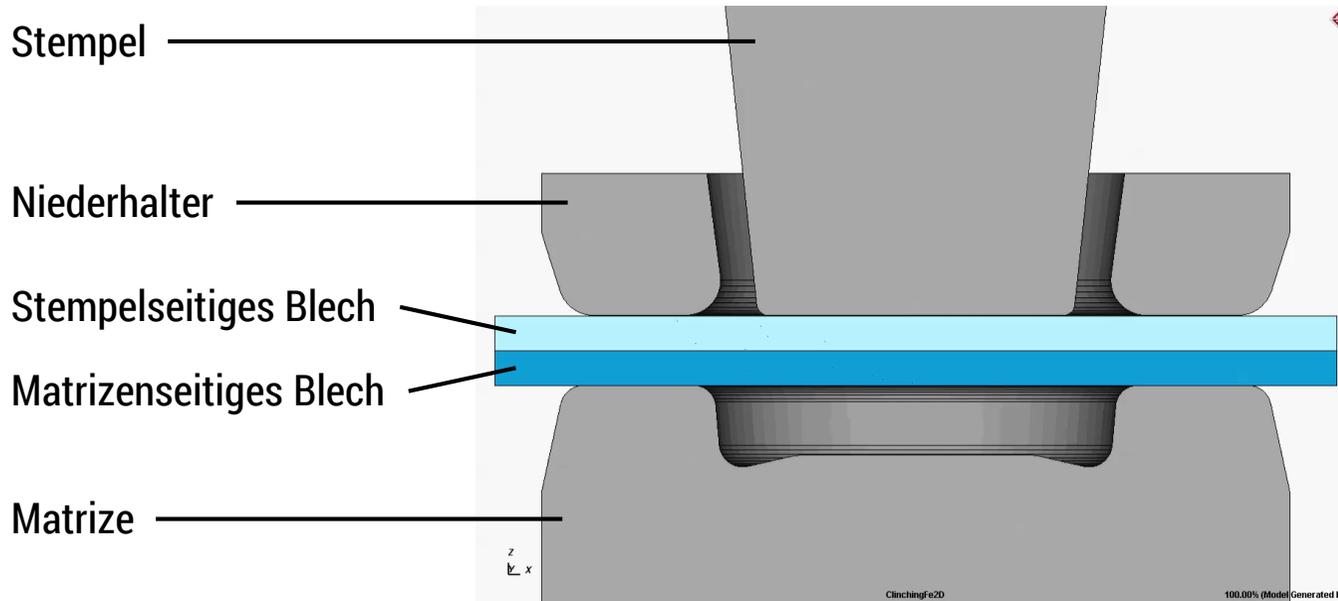
AGENDA

1. Einleitung
2. Materialcharakterisierung
3. Numerische Abbildung des Flach-Clinchklebens
4. Experimentelle Umsetzung
5. Zusammenfassung/Ausblick

1. Einleitung – Konventionelles Clinchen

Clinchen (Durchsetzfügen)

*Einstufiger mechanischer Umformfügeprozess, bei dem die Verbindungsfestigkeit auf **Form- und Kraftschluss** zwischen den Fügepartnern beruht*



1. Einleitung – Flach-Clinchen

Konventionelles Clinchen



Flach-Clinchen



Vorteile:

- Kurze Taktzeiten
- Kein thermischer Einfluss
- Hohe Materialvielfalt

Nachteil:

- Matrizenzeitige **Überhöhung**
→ Restriktion der möglichen Einsatzgebiete

Vorteile:

- Einseitige Ebenheit
- Anwendbarkeit im Bereich von Sicht- und Funktionsflächen

1. Einleitung – Hybridfügen

Kombination von Kleben und (mindestens einem) mechanischen Fügeverfahren

- Gleichmäßigere Spannungsverteilung im Fügebereich
- Höhere Schwingfestigkeit und Verbindungssteifigkeit
- Entlastung bei hohen statischen Lasten (Hemmung zeitabhängiger Kriechvorgänge)
- Höheres Energieaufnahmevermögen bei stoßartiger Belastung
- Verbesserung der Schwingungsdämpfung
- Abdichten des Fügespaltes gegenüber Gasen/Flüssigkeiten



Handhabungsfestigkeit

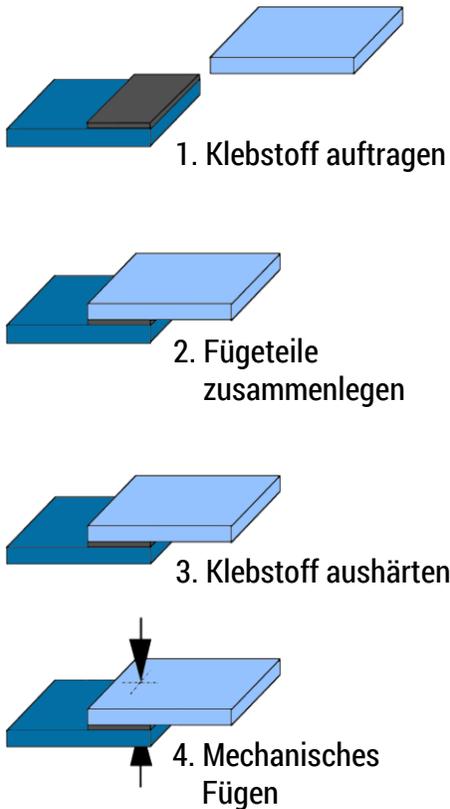
Minimale erforderliche Festigkeit der Verbindung für die Weiterverarbeitung bis zur vollständigen Aushärtung des Klebstoffs

Gebrauchsfestigkeit

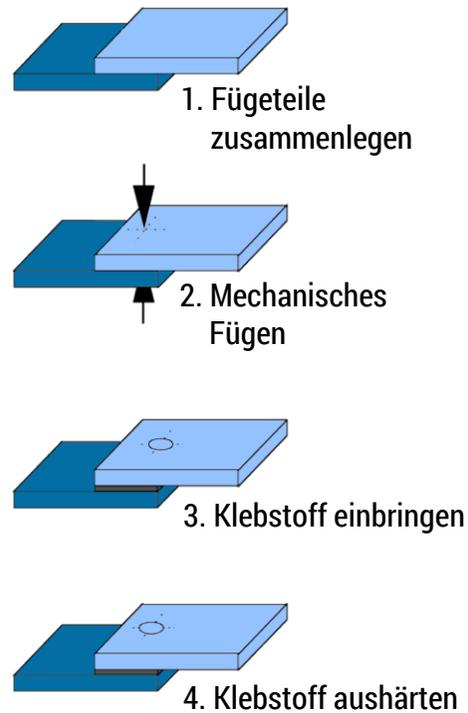
Gesamtfestigkeit der Hybridverbindung nach dem mechanischen Fügen und der Klebstoffaushärtung

1. Einleitung – Verfahrensvarianten Hybridfügen

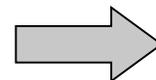
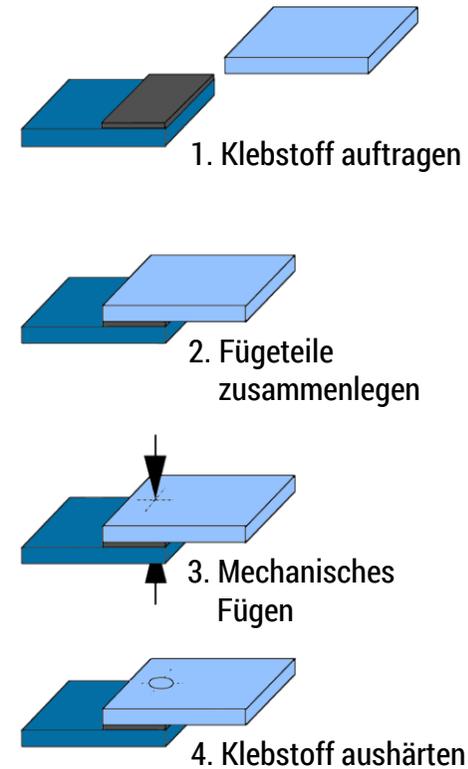
Sequenzmethode



Injektionsmethode



Fixiermethode



Gewährleistung der **Handhabungsfestigkeit** von Klebverbindungen

2. Materialcharakterisierung – Aluminium EN AW-1050A

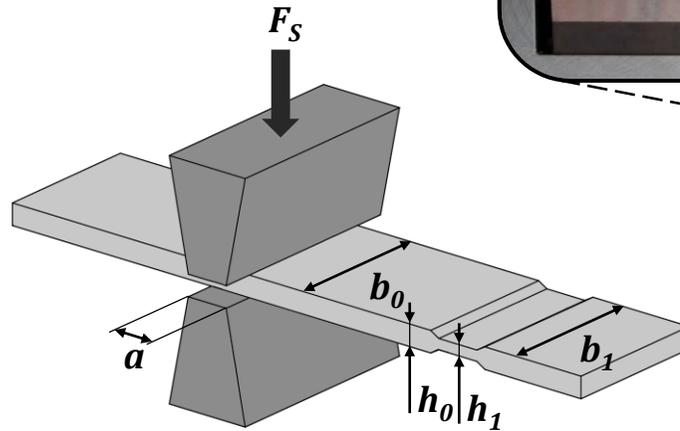
Bestimmung des elastisch-plastischen Fließverhaltens mithilfe des Flachstauchversuchs

Fließspannung $k_f = \frac{F_S}{a \cdot b_0}$

Umformgrad $\varphi_v = \ln \frac{h_1}{h_0}$

Bedingungen:

- $\frac{b_0}{h_0} > 6$
- $\frac{h_0}{a} < 1$

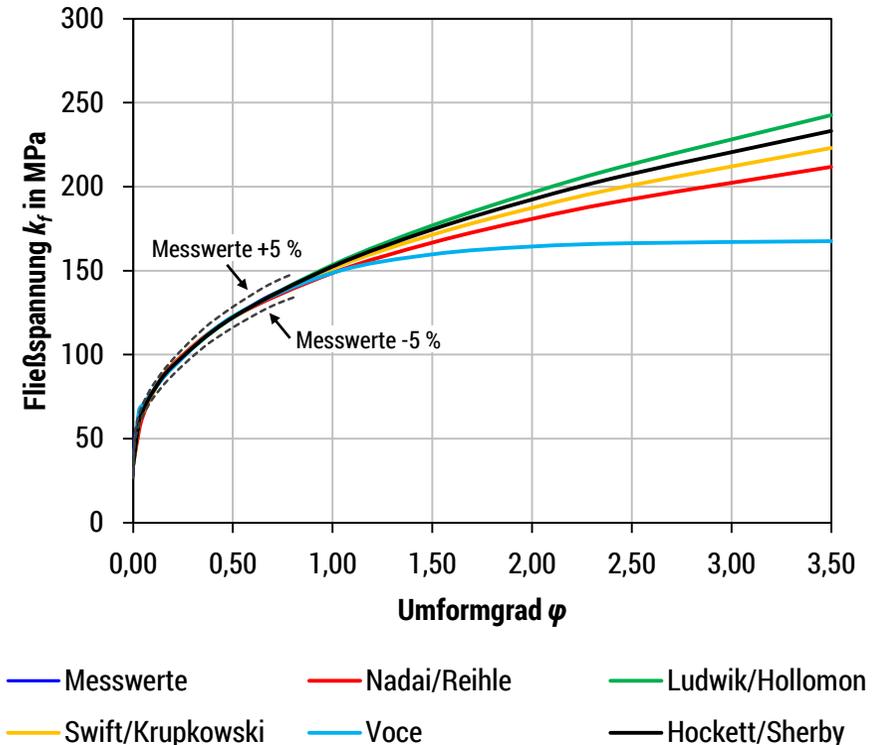


Universalprüfmaschine
 Galdabini Quasar 50 kN

2. Materialcharakterisierung – Aluminium EN AW-1050A

Untersuchung verschiedener analytischer Ansätze zur Fließkurven-Approximation

NADAI/REIHLE	$k_f = C_1 \cdot \varphi^{C_2}$
LUDWIK/HOLLOMON	$k_f = C_1 + C_2 \cdot \varphi^{C_3}$
SWIFT/KRUPKOWSKI	$k_f = C_1 \cdot (C_2 + \varphi)^{C_3}$
VOCE	$k_f = C_1 - (C_1 - C_2) \cdot e^{C_3 \cdot \varphi}$
HOCKETT/SHERBY	$k_f = C_1 - (C_1 - C_2) \cdot e^{C_3 \cdot \varphi^{C_4}}$



$$k_f = 1.010,126 - (1.010,126 - 39,661) \cdot e^{-0,129 \cdot \varphi^{0,513}}$$

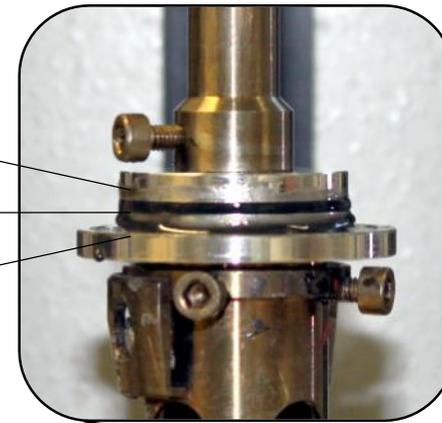
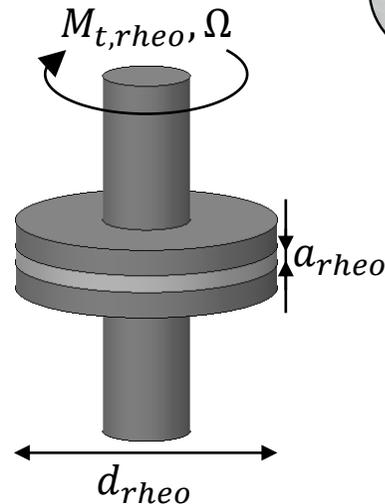
2. Materialcharakterisierung – Klebstoff Henkel Teroson EP 5055

Bestimmung des visko-elastischen Fließverhaltens mithilfe von rheologischen Untersuchungen

$$\text{Schergeschwindigkeit } \dot{\gamma} = \frac{\partial v_{rheo}}{\partial a_{rheo}}$$

$$\text{Schubspannung } \tau = \frac{2 \cdot M_{t,rheo}}{\pi \cdot r_{rheo}^3}$$

$$\text{Viskosität } \eta = \frac{\tau}{\dot{\gamma}}$$



Oszillationsrheometer AR2000ex

2. Materialcharakterisierung – Klebstoff Henkel Teroson EP 5055

Untersuchung des Einflusses auf komplexe Viskosität

- Schergeschwindigkeit
- Klebstofftemperatur
- Verarbeitungszeit

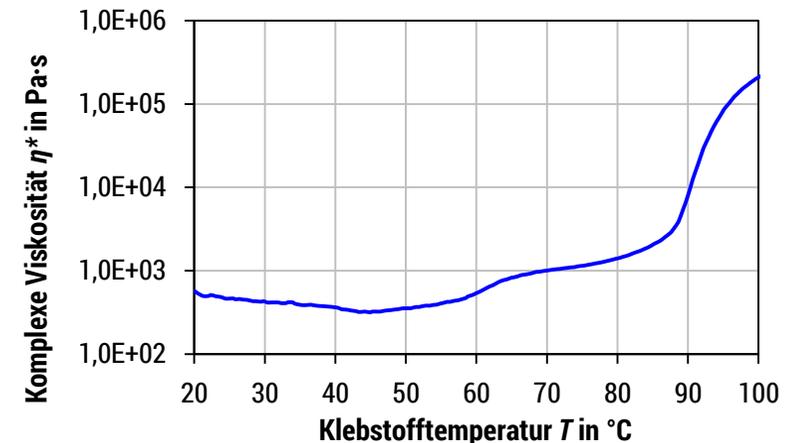
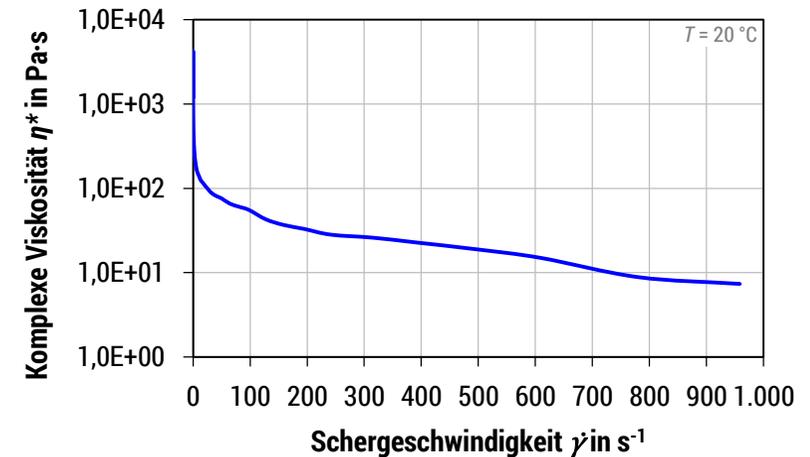
Numerische Implementierung

RATE-POWER-LAW $k_f = C_1 + C_2 \cdot \varphi^{C_3} \cdot \dot{\varphi}^{C_4}$

Vereinfachung $k_f = C_2 \cdot \dot{\varphi}^{C_4}$

Kurvenanpassung $k_f = 3 \cdot \eta^*(\dot{\gamma}) \cdot \dot{\varphi}(\dot{\gamma})$

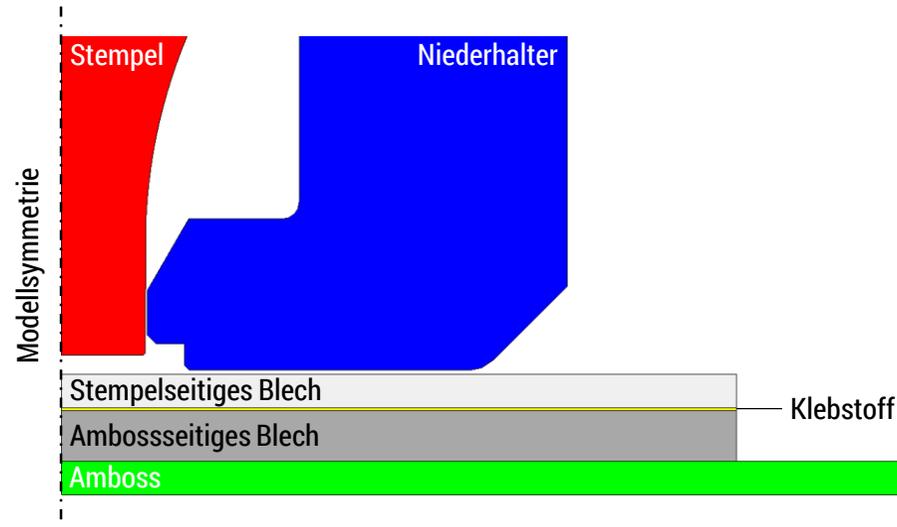
$$k_f = 908,2689 \cdot \dot{\varphi}^{0,5827}$$



3. Numerische Abbildung des Flach-Clinchklebens

Simulationsaufbau

- Simufact.forming Version 12.0.3
- 2D-axialsymmetrisches Modell
- Reale Werkzeuggeometrien (Starrkörper)
- Modellierte Materialdaten (analytisch nach HOCKETT/SHERBY bzw. RATE-POWER-LAW)
- Reale Maschinenkinematik (Tabellenpresse/ generische Feder)
- Angepasste Netzfeinheiten
- Kombiniertes Reibmodell (nach OROWAN)



Numerische Besonderheiten

- Klebstoffschicht als zusätzliches Werkstück (zwischen den Blechen)
- Geometrisches Trennkriterium

3. Numerische Abbildung des Flach-Clinchklebens

Klebstoffverdrängung

- Niederhalter verdrängt Klebstoff überwiegend in radiale Richtung
- Klebstoffverdrängung führt zum lokalen Auftrennen der Klebschicht

Stempelseitiges Blech

Klebstoff

Ambosseitiges Blech



→ Materialtrennung muss zwingend in Simulation berücksichtigt werden

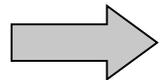
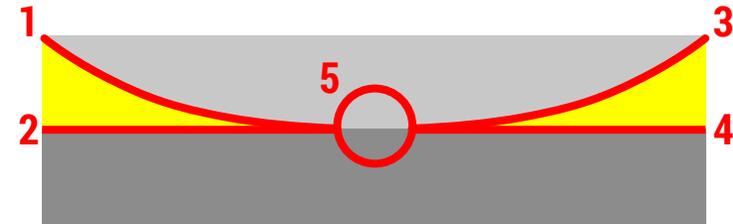
Implementierung eines geometrisches Trennkriteriums

- Auftrennen der Klebstoffschicht bei Unterschreiten einer kritischen Schichtdicke:
 $d_{kleb} < 0,005 \text{ mm}$
- Automatische Löschung von Teilsegmenten:
 $A_{Segment} < 0,1 \% \cdot A_{Gesamtfläche}$

3. Numerische Abbildung des Flach-Clinchklebens

Komplexe Kontaktsituation

- Mehrere deformierbare Kontaktkörper
- Variierende Kontaktkombinationen
- Signifikante Steifigkeits-/Festigkeitsunterschiede
- Stark unterschiedliche Netzfeinheiten



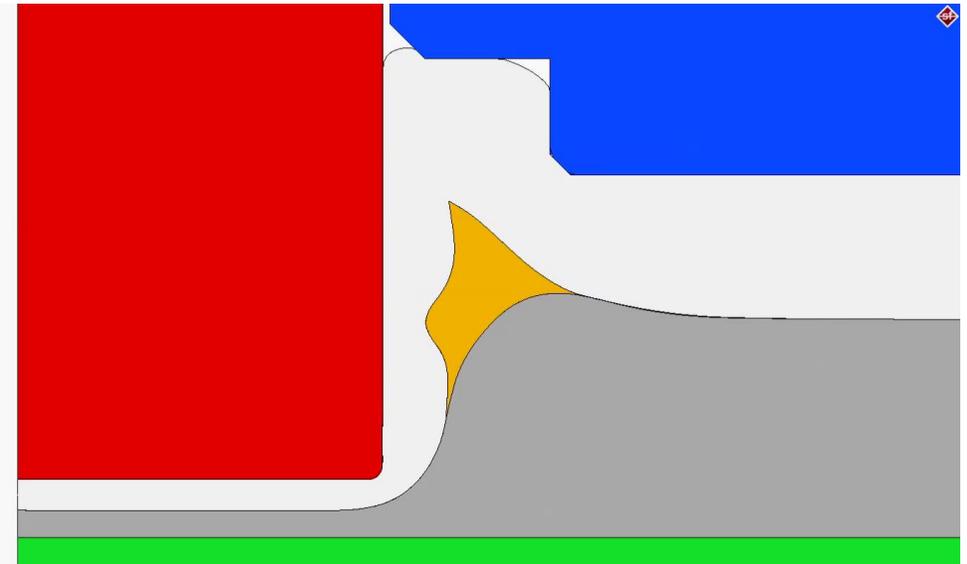
Verwendung des „Segment-zu-Segment“-Kontaktalgorithmus

- Virtuelle Unterteilung der Oberflächen mit zusätzlichen Hilfspunkten
- Detektion potentieller Kontaktbereiche
- Analytische Beschreibung der Kontaktflächen und erneute Kontaktprüfung
- Berücksichtigung von Tangential- und Kontaktnormalspannungen sowie Steifigkeiten
- Gewährleistung eines kontinuierlichen Spannungsverlaufs

3. Numerische Abbildung des Flach-Clinchklebens

Entstehung von Klebstofftaschen

- Niederhalter verdrängt Klebstoff überwiegend in radiale Richtung
 - *Klebstofftrennung wird korrekt abgebildet*
- Eingeschlossenes Klebstoffvolumen behindert Hinterschnittausbildung
 - *Keine haltbare Verbindung herstellbar*
 - *Variation von Klebstoffschichtdicke und Niederhalterkraft erforderlich*



$$d_{kleb} = 0,100 \text{ mm}, F_{NH} = 35 \text{ kN}$$

3. Numerische Abbildung des Flach-Clinchklebens

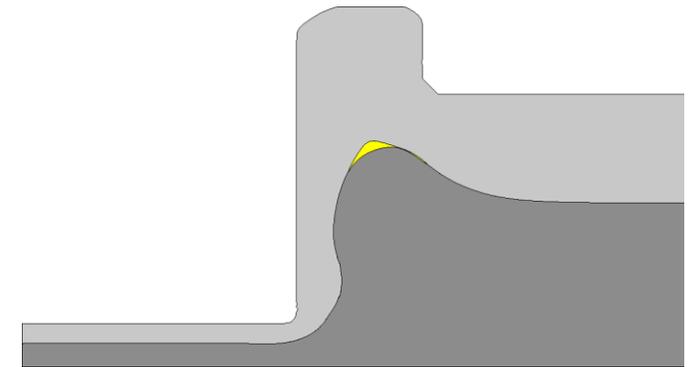
Auswertung der Parametervariation

- Reduzierung der Klebstoffschichtdicke führt zur Verkleinerung der Klebstofftasche

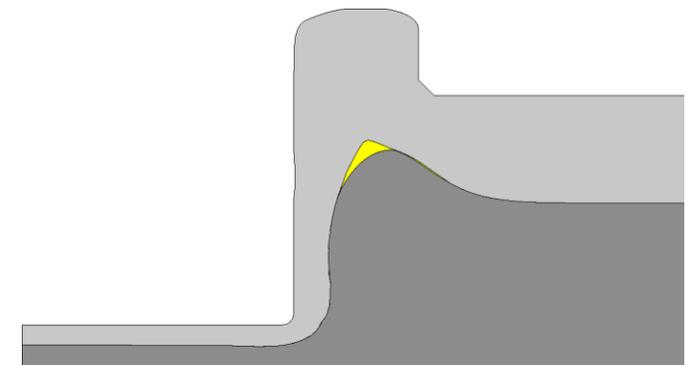
→ *Entstehung und Vergrößerung des Hinterschnittes*

- Reduzierung der Niederhalterkraft bewirkt zunehmendes radiales Fließen des ambosseitigen Blechs

→ *Abnahme des Hinterschnittes*



$d_{kleb} = 0,010 \text{ mm}, F_{NH} = 35 \text{ kN}, f = 0,074 \text{ mm}$

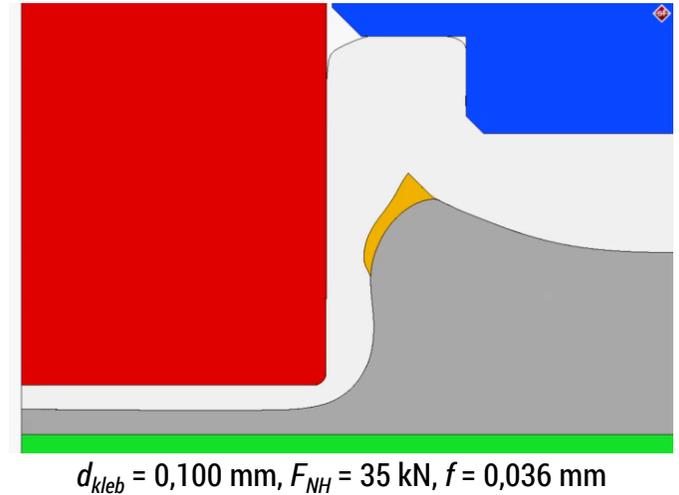


$d_{kleb} = 0,010 \text{ mm}, F_{NH} = 15 \text{ kN}, f = 0,020 \text{ mm}$

3. Numerische Abbildung des Flach-Clinchklebens

Anpassung der Stempelkinematik

- Zeitliches Aufsetzen des Stempels vor dem Niederhalter
 - *Bessere Klebstoffverdrängung*
 - *Für alle untersuchten Klebstoffschichtdicken bildet sich Hinterschnitt aus*



Zwischenstopp

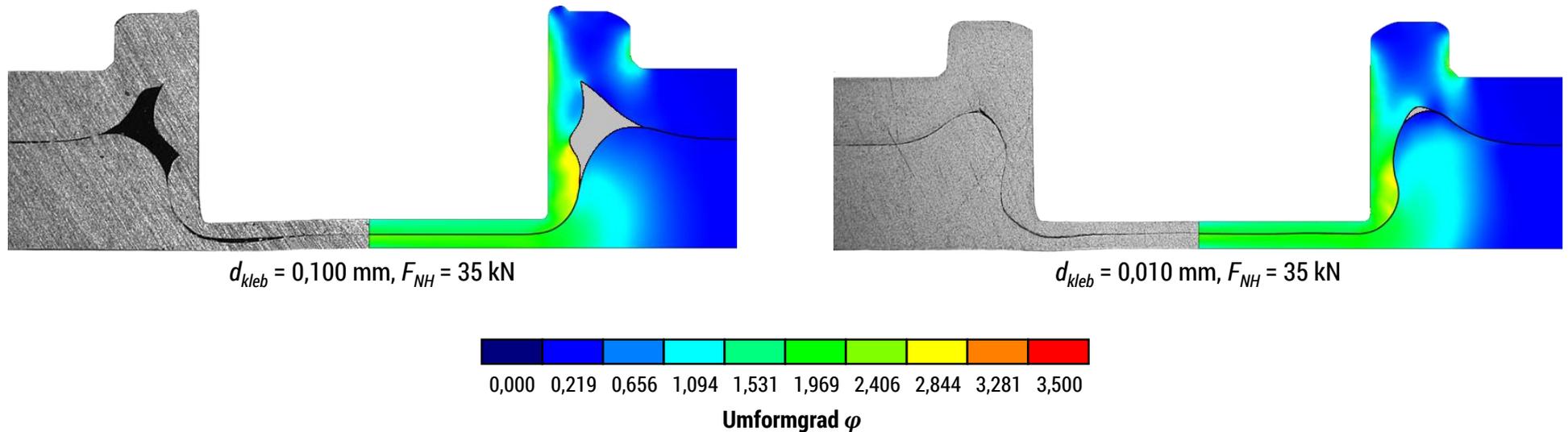
- Zusätzliche Haltezeit auf Zwischenposition erhöht Klebstoffverdrängung
 - *Vergrößerung des Hinterschnittes*

Haltezeit t_{Stop}	Querschnittsfläche der Klebstofftasche A_{kleb}	Hinterschnitt f
0 ms	0,113 mm ²	0,036 mm
50 ms	0,113 mm ²	0,058 mm
100 ms	0,109 mm ²	0,067 mm
500 ms	0,081 mm ²	0,073 mm

4. Experimentelle Umsetzung

Gegenüberstellung Experiment und Simulation

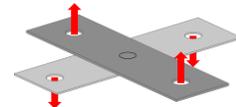
Maschinenseitige Beschränkungen: keine Anpassung der Stempelkinematik möglich



4. Experimentelle Umsetzung

Kopfzugkraft

Verbindung	Mittelwert	Standardabweichung (absolut)	Standardabweichung (relativ)
Elementare Klebverbindung (Gebrauchsfestigkeit)	1.243 N (100,0 %)	168 N	13,5 %
Flach-Clinchkleb-Verbindung (Gebrauchsfestigkeit)	1.322 N (106,4 %)	52 N	3,9 %
Flach-Clinchkleb-Verbindung (Handhabungsfestigkeit)	326 N (26,2 %)	15 N	4,6 %



Scherzugkraft

Verbindung	Mittelwert	Standardabweichung (absolut)	Standardabweichung (relativ)
Elementare Klebverbindung (Gebrauchsfestigkeit)	5.506 N (100,0 %)	64 N	1,2 %
Flach-Clinchkleb-Verbindung (Gebrauchsfestigkeit)	5.479 N (99,5 %)	38 N	0,7 %
Flach-Clinchkleb-Verbindung (Handhabungsfestigkeit)	384 N (7,0 %)	25 N	6,5 %



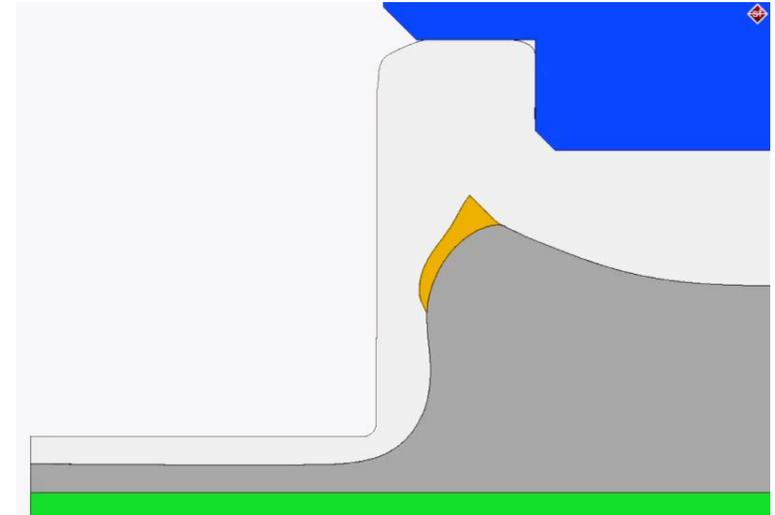
5. Zusammenfassung/Ausblick

Flach-Clinchkleben

- Gewährleistung der Handhabungsfestigkeit von Klebverbindungen
- Haltbare Verbindung bei hoher Niederhalterkraft und geringen Klebstoffschichtdicken
- Anpassung der Stempelkinematik ermöglicht Steigerung des Hinterschnittes und Nutzung höherer Klebstoffschichtdicken

Numerische Besonderheiten

- Bestimmung und Implementierung des Klebstoff-Materialverhaltens
- Berücksichtigung der Klebstoffverdrängung und lokalen Auftrennung der Klebstoffschicht
- Abbildung der komplexen Kontaktsituation mit variierenden Kontaktkombinationen

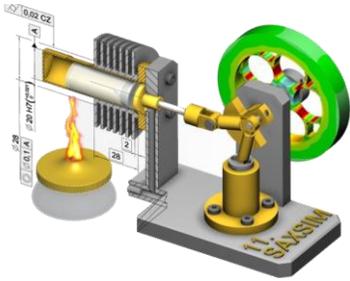


5. Zusammenfassung/Ausblick

Perspektivische numerische Herausforderungen

- Abbildung der Klebstoffaushärtung
 - Schrumpfung
 - Haften zwischen Klebstoff und Blechen
- Numerische Belastungsanalyse
 - 3D-Abbildung von Kopf- und Scherzugbelastung
 - Materialverhalten der ausgehärteten Klebschicht
 - Adhäsions- und Kohäsionsversagen der Klebschicht





11. Anwendertreffen SAXSIM

Hybridfügen: Numerische Verfahrensentwicklung des Flach-Clinchklebens



Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit!



$$k_f = C_1 - (C_1 - C_2) \cdot e^{C_3 \cdot \varphi^{C_4}}$$



Schergeschwindigkeit $\dot{\gamma}$ in s^{-1}	Viskosität η^* in Pa·s
0	1.0E+04
100	1.0E+02
200	1.0E+01
300	1.0E+00
400	~0.5
500	~0.3
600	~0.2
700	~0.15
800	~0.1
900	~0.08
1000	~0.07



$$k_f = C_1 + C_2 \cdot \varphi^{C_3} \cdot \dot{\varphi}^{C_4}$$

$$\eta = K \cdot \dot{\gamma}^{n-1}$$

