

**Prof. M. Oechsner, Dr. J. Beyer, J. Adelman, B. Bozorgian**

## **Hochtemperaturverzinkung von HV-Schrauben großer Abmessungen**

Bericht Nr. 163

Gemeinschaftsausschuss Verzinken e.V.

FD 25

Gefördert durch:



Bundesministerium  
für Wirtschaft  
und Energie

aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

---

Die Untersuchungen wurden vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie über die Arbeitsgemeinschaft Industrieller Forschungsvereinigungen e.V. (AiF) gefördert; AiF-Forschungsvorhaben Nr. 17038 N1.

# Untersuchungen zum Gefährdungspotential einer flüssigmetallinduzierten Rissbildung (LMAC) bei Normal- und Hochtemperaturverzinkung von HV-Schrauben der Abmessungen größer M24

---

Prof. Dr.-Ing. Matthias Oechsner  
Dr.-Ing. Jörg Beyer  
Dipl.-Ing. Jörg Adelman  
Dipl.-Phys. Belash Bozorgian

  
Gemeinschaftsausschuss  
Verzinken e.V.



TECHNISCHE  
UNIVERSITÄT  
DARMSTADT



---

## 1 Kurzdarstellung

Der Einsatz von Schrauben großer Abmessungen wird immer wichtiger. Allein durch den exponentiellen Anstieg der globalen Windenergiegewinnung durch Einsatz von immer leistungsstärkeren Windenergieanlagen sind große Verbindungselemente gefragter denn je zuvor. Die Verwendung von HV-Schrauben großer Abmessung ermöglicht eine im Verhältnis zum Einsatz herkömmlicher Stahlbauschrauben bessere Ausnutzung der Schraubenfestigkeit. Gleichzeitig ermöglichen Schrauben mit vergleichsweise großem Durchmesser die Aufnahme hoher Scherlasten, wie sie bei diesen Anwendungsfällen häufig auftreten. Hierdurch werden bei gleicher Belastung weniger Schrauben benötigt. Dadurch reduziert sich die Gesamtmasse der Konstruktion. Ebenso ergeben sich deutliche Kosteneinsparungen.

Für das Auftreten von LMAC (Liquid Metal Assisted Cracking) ist insbesondere die ungünstige Überlagerung der Faktoren Werkstoffzustand, Zinkschmelze und Beanspruchung ursächlich. Um den Zusammenhang zwischen der thermischen Beanspruchung und der Rissbildung beim Feuerverzinken zu untersuchen, wurden die induzierten Spannungen während des Feuerverzinkens mit der Finiten Elemente Methode simuliert. Demnach ergab sich die größte Wahrscheinlichkeit für Rissbildung im ersten Gewinde, wo die höchsten thermischen Spannungen auftreten. Diese Vorhersage wurde durch die Riss-Untersuchungen an der Probe bestätigt. Dies bildete die Grundlage für die abschließende Diskussion und Deutung der Ergebnisse und ermöglichte relevante Aussagen und Anhaltspunkte für die weitere Forschung.

---

## 2 Problemstellung

Durch eine Feuerverzinkung werden Schrauben sehr schnell und kostengünstig sowohl aktiv als auch passiv gegen Korrosion geschützt. Dabei kommen zwei Methoden zum Einsatz: die Normaltemperatur-Feuerverzinkung (NT-Feuerverzinken) und die Hochtemperatur-

Feuerverzinkung (HT-Feuerverzinken). Die HT-Verzinkung hat den Vorteil, dass der gebildete Zinküberzug homogener als bei einer NT-Verzinkung ist. Schichtdickenunterschiede verursachen Probleme auf den Gewindeflanken, weshalb NT-verzinkte Schrauben in der Regel nachgewalzt werden müssen. Dadurch steigen die Kosten und die Herstellungszeit wird verlängert. Deswegen bedeutet eine optimierte Zinküberzugsdicke sowohl Ressourcenschonung als auch wirtschaftliche Vorteile.

Allerdings ist zu beachten, dass durch die höheren Temperaturen bei der HT-Feuerverzinkung das Risiko einer flüssigmetallinduzierten Rissbildung beim Verzinken insbesondere bei HV-Schrauben großer Abmessungen, erhöht wird.

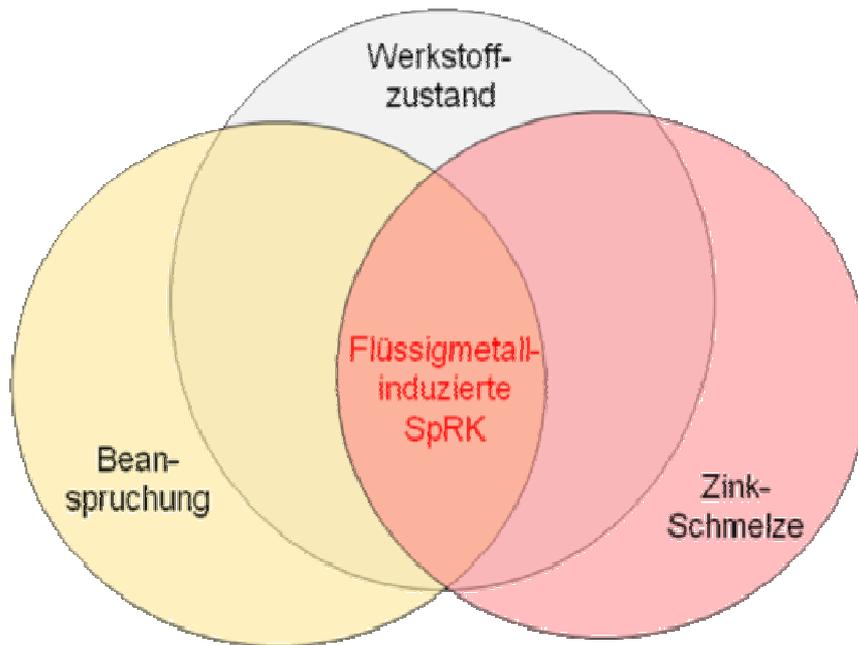
Inzwischen hat die Verwendung von großen Schrauben zugenommen. Windkraftanlagenhersteller verwenden diese großen Schrauben zur Montage ihrer Offshore-Windparks wodurch die Feuerverzinkung von HV -Schrauben mit Abmessungen größer M39 stark gefördert wird. Neuere Untersuchungen zeigen, dass die derzeit für hochfeste Schrauben verwendeten Materialien und den sich dadurch einstellenden Werkstoffzuständen, die für eine HT-Verzinkung zulässige Grenzabmessung von M24 zu überdenken ist und zu größeren Abmessungen erweitert werden kann.

---

### **3 Ziel**

---

Das Ziel der hier vorgestellten Untersuchungen besteht darin, die Anwendungsgrenzen für die NT- und HT-Verzinkung von HV-Schrauben großer Abmessungen zu ermitteln. Zuerst soll dabei die Absicherung der Feuerverzinkung von Schrauben der Abmessungen >M39 unter den Fertigungsbedingungen einer Normaltemperaturverzinkung bei 450°C Schmelztemperatur (NT-Verzinken) untersucht werden. Anschließend soll die Grenzabmessung für HV-Schrauben durch die gewonnenen Erkenntnisse ermittelt werden, bei der eine Hochtemperaturverzinkung (HT-Verzinken) noch nicht zu LMAC führt. Daher wird der Schwerpunkt auf den experimentellen Untersuchungen des LMAC- Gefährdungspotenzials der in Bild 1 dargestellten Einflussgrößen liegen.



**Bild 1: Drei Einflussgrößen einer flüssigmetallinduzierten Spannungsrissskorrosion**

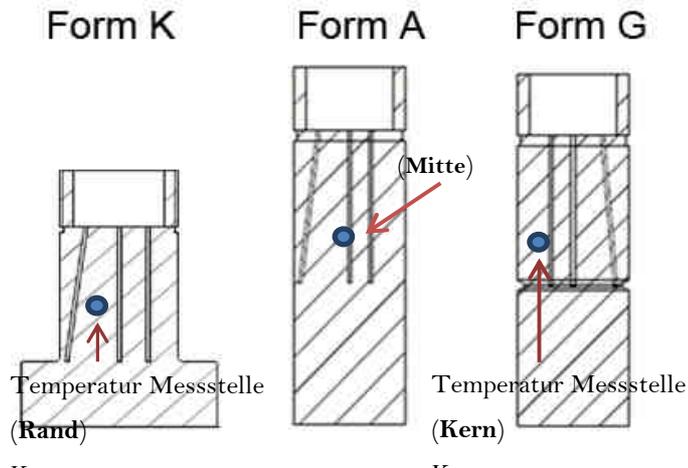
Im Einzelnen sollen die in Bild 1 dargestellten Einflussgrößen, wie der Werkstoffzustand (hochfester Vergütungsstahl), die Beanspruchung infolge des Verzinkungsvorgangs (Größeneinfluss, Wärmespannungen) in Kombination mit der schraubenbedingten geometrischen Kerbwirkung und die Zusammensetzung technisch relevanter Zinkschmelzen bezüglich ihres Gefährdungspotenzials untersucht werden. Hierbei richten sich die Rahmenbedingungen der Untersuchungen an den Anforderungen für HV-Schrauben, wozu zunächst für die Feuerverzinkung von Hochfesten Verbindungselementen erforderlichen Prozessparameter strukturiert analysiert werden.

---

#### **4 Vorgehensweise**

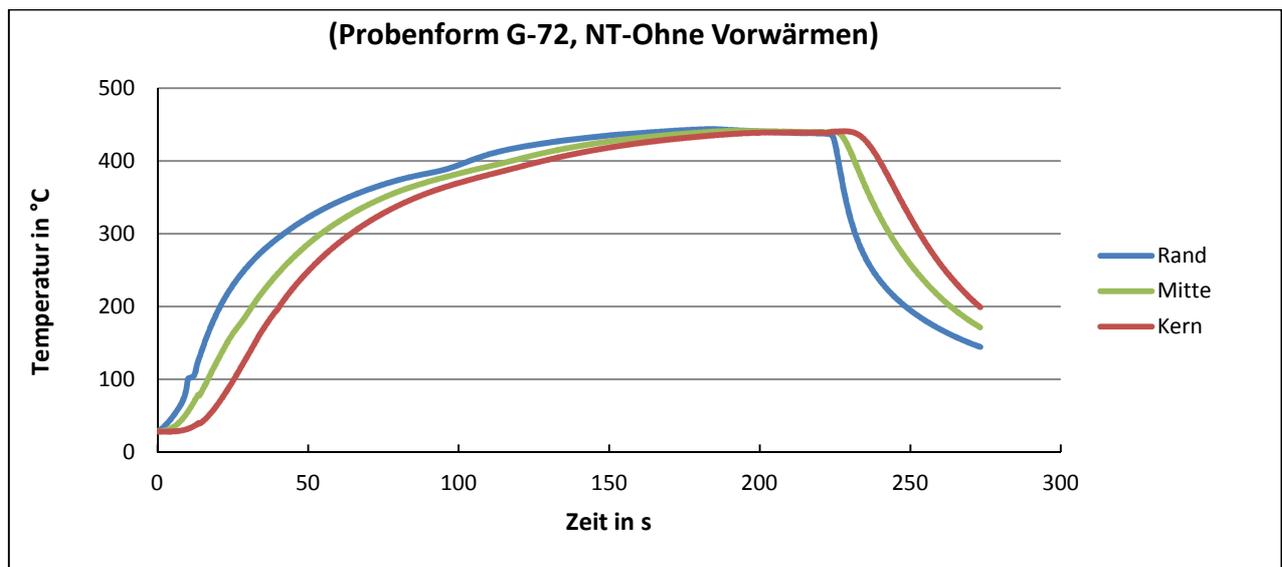
---

Es wurden von verschiedenen Schraubenherstellern Schrauben in den Abmessungen M36, M48 und M72 beschafft. Aus diesen wurden Modellproben mit unterschiedlicher Geometrie für die Messung des Temperaturverlaufs beim Verzinken hergestellt (Bild 2).



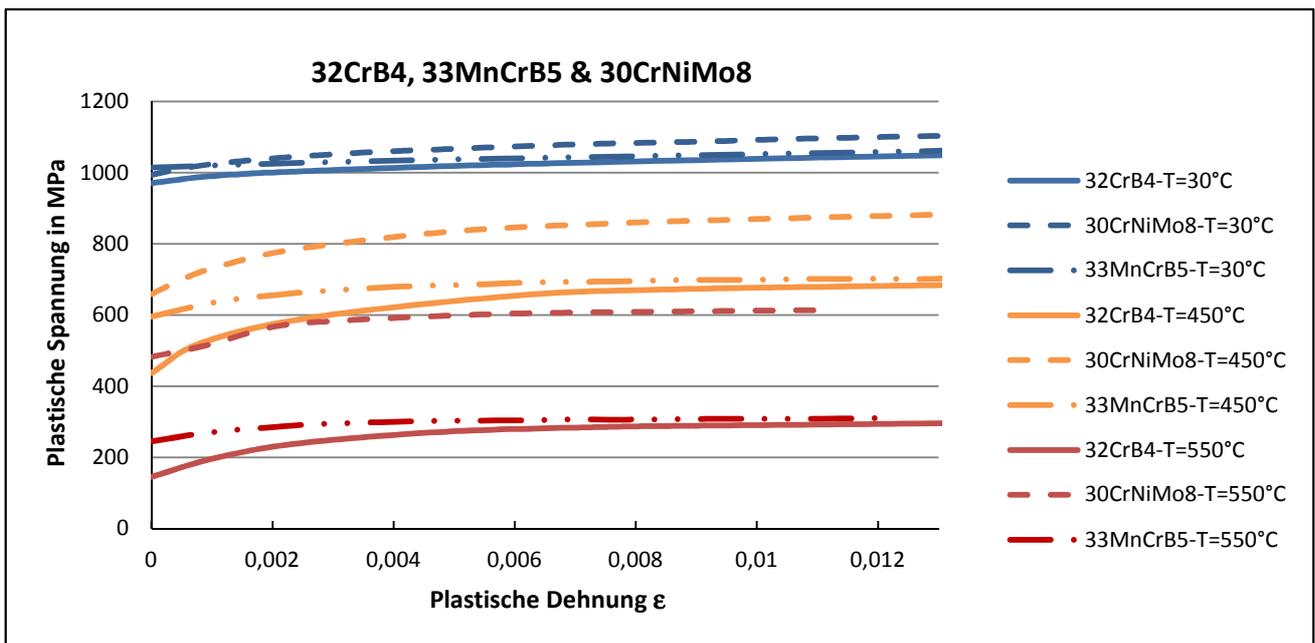
**Bild 2:** Die Proben simulieren die drei verschiedenen Bereiche einer Schraube. Die Temperatur wurde in drei verschiedenen Punkten an der Spitze der Kanäle gemessen.

Für die Berechnung der induzierten Spannungen in Schrauben wurde zuerst die Temperaturverteilung in den Schrauben berechnet. Hierzu war es notwendig, die abgegebene Energie von der Zinkschmelze an der Schraubenoberfläche zu bestimmen (effektiver Wärmeübergangskoeffizient). Dazu wurde die zeitliche Temperaturänderungen an drei Punkten während des Feuerverzinkens für verschiedenen Probentypen aufgenommen (Bild 3). Diese Temperaturverteilungen wurden für zwei Zinkschmelzen und zwei Temperaturen ( $T_{\text{Zink}}=450^{\circ}\text{C}$  und  $T_{\text{Zink}}=560^{\circ}\text{C}$ ) aufgezeichnet. Die Proben wurden mit zwei verschiedenen Anfangstemperaturen ( $T_0=30^{\circ}\text{C}$  und  $T_0=250^{\circ}\text{C}$ ) in die Zinkschmelze getaucht.



**Bild 3:** Temperaturmessung während des Feuerverzinkens. Der Durchmesser der Probe beträgt 72 mm.

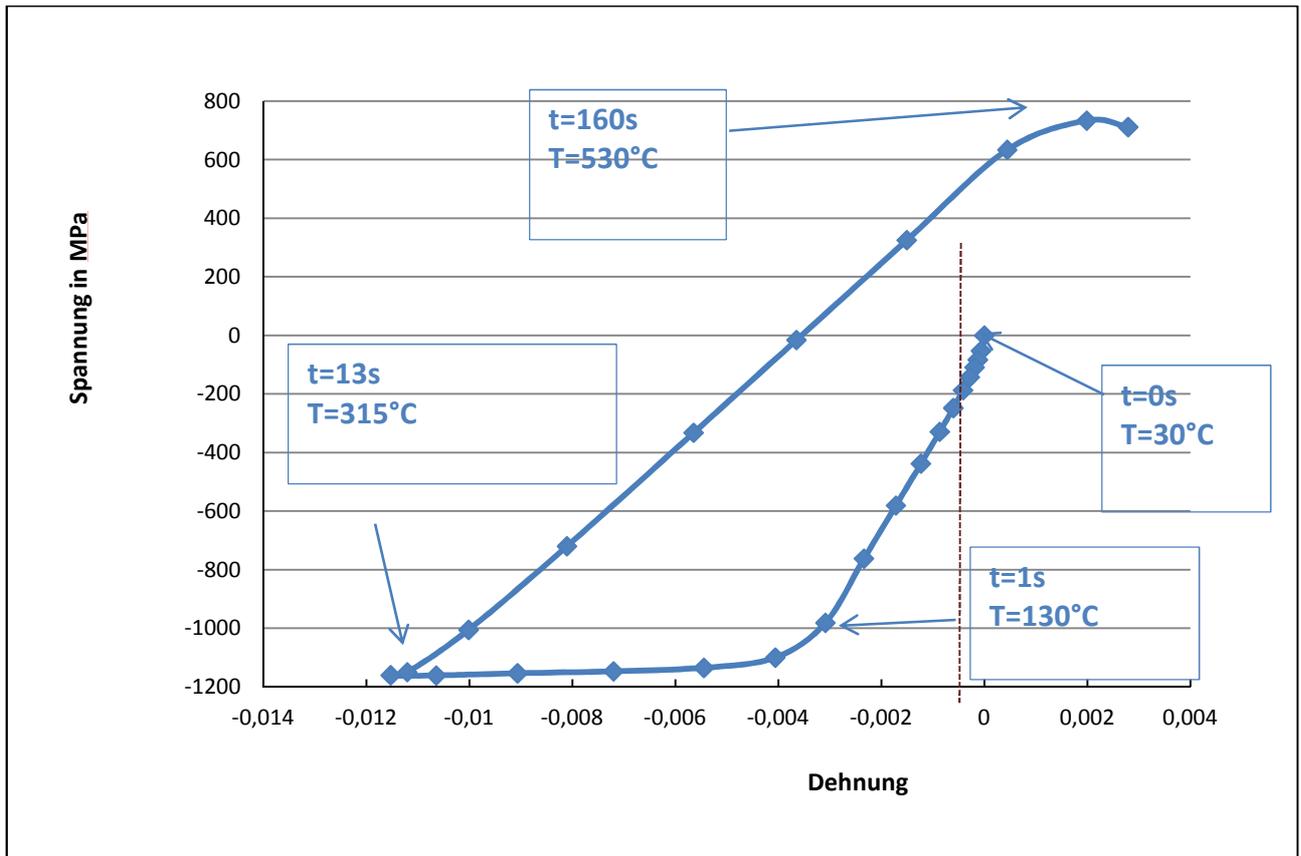
Für eine realistische Simulation der thermisch induzierten Spannungen muss das mechanische Verhalten (Elastizitätsmodul, Fließkurven und Wärmeausdehnungen) der Proben in Abhängigkeit der Temperatur bestimmt werden. Die Elastizitätsmodul und Wärmeausdehnungen wurden aus der Literatur entnommen. Die Fließkurven der Schraubenwerkstoffe zeigen bei Raumtemperatur ein ähnliches mechanisches Verhalten. Das plastische Verhalten der untersuchten Werkstoffe unterscheidet sich dagegen mit zunehmender Temperaturbelastung deutlich voneinander (Bild 4).



**Bild 4: Gemessene Fließkurven der drei Werkstoffe bei verschiedenen Temperaturen**

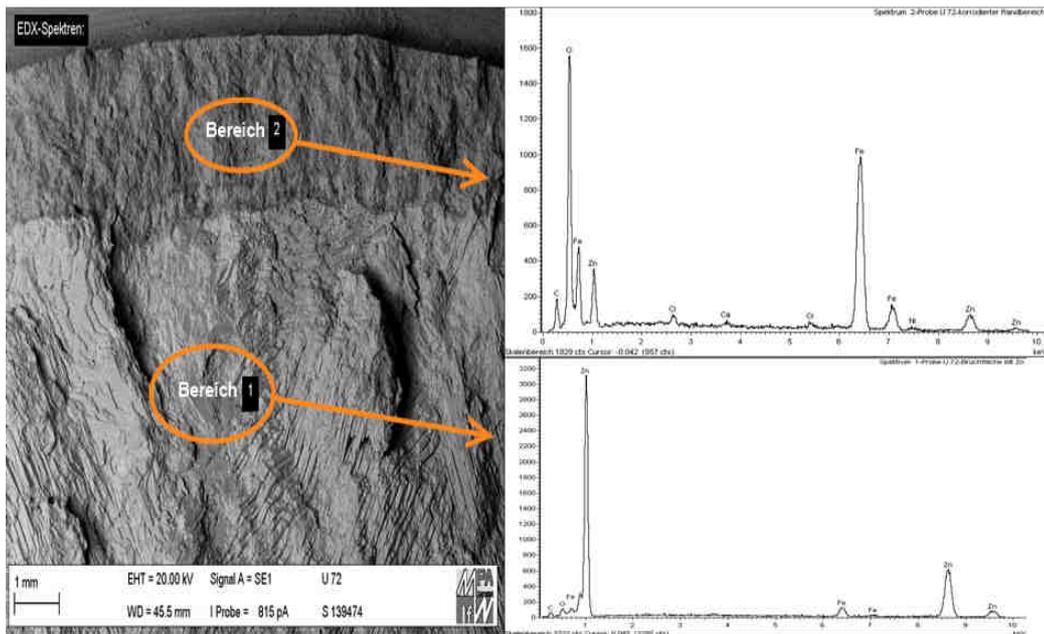
Die induzierten Wärmespannungen wurden für die Schrauben und die Proben mit FEM-Methoden simuliert. Als Simulationsumgebung kam die Software ABAQUS zum Einsatz und durch die Bewertung der örtlichen Spannungen konnten die Stellen der höchsten Beanspruchung der Schrauben beim Feuerverzinken ermittelt werden (Bild 5).

Weiterhin wurden die gelieferten Schrauben und Proben in einer Feuerverzinkerei unter Praxisbedingungen feuerverzinkt. Anschließend erfolgte die Untersuchung der Oberflächen auf Risse und die Dicke der Zinkschicht wurde vermessen. Wie erwartet könnten bei Schrauben der Größe M72 Risse detektiert werden. Zusätzlich wurden die Risse metallographisch untersucht. Die entstandenen Bruchflächen wurden im EDX-Verfahren untersucht und es konnte die Belegung mit Zink nachgewiesen werden (Bild 6)



**Bild 5: Spannungs-Dehnungs-Diagramm im Kerbgrund beim HT-Verzinken einer Probe G72.**

Die Ergebnisse zum bevorzugten Ort der Rissbildung aus der Simulationen wurden mit den Rissuntersuchungen verglichen.



**Bild 6: EDX Untersuchung. Die Oberfläche ist mit Zink bedeckt.**

## 5 Ergebnisse

Die simulierten Temperaturverteilungen in der Probe während der Feuerverzinkung zeigt eine gute Übereinstimmung mit den experimentellen Messungen. Der empirisch ermittelte effektive Wärmeübergangskoeffizient von 3000 W/m<sup>2</sup> stimmt mit dem in der DAST-Richtlinie 022 für die Zinkbadklasse 1 angegebenen Wert überein (Tabelle 1)

Tabelle 1: Effektive Wärmeübergangskoeffizienten  $h_{eff}$  der verschiedenen Zinkbäder.

Zinkbadklasse	Effektiver Wärmeübergangskoeffizient $h_{eff}$ in W/m <sup>2</sup>
1	3000
2	6000
3	15000

Die Lage der Risse stimmt sehr gut mit den Ergebnissen aus der FEM-Berechnung überein. Bei der NT-Verzinkung konnten für keine Abmessungen (bis M72) LMAC-Risse auf Schrauben und Proben nachgewiesen werden. Bei den HT-verzinkten Schrauben zeigten sich Risse nur bei der Abmessung M72 (Bild 7).

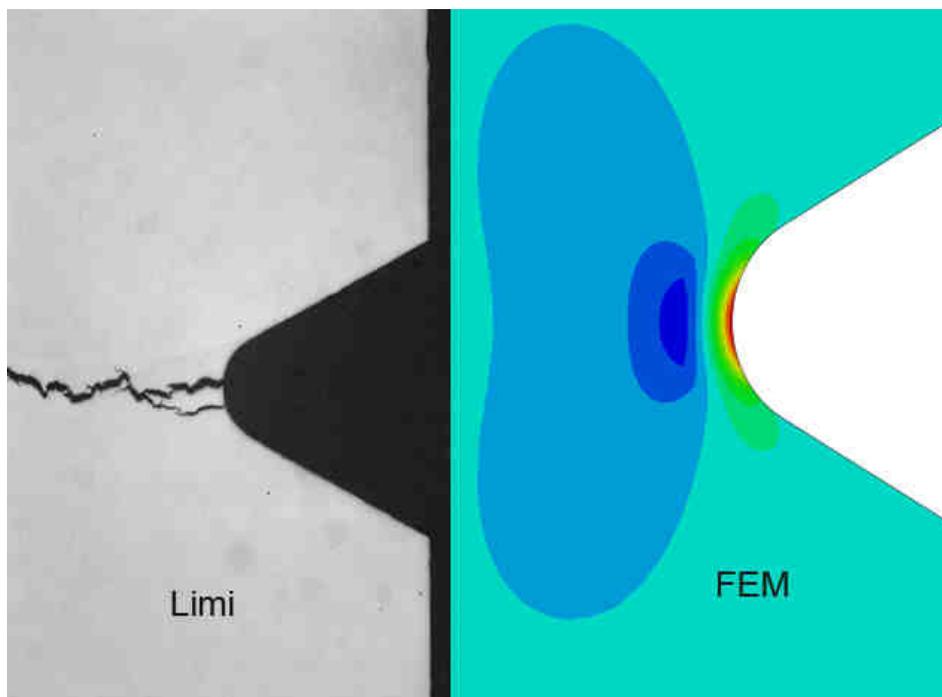


Bild 7: Die Ergebnisse aus der FEM-Berechnung stimmen sehr gut mit den Ergebnissen der Rissuntersuchung überein.

---

## **6 Praktischer Nutzen**

---

Bei der NT-Verzinkung von Schrauben großer Abmessungen konnte LMAC in keinem Fall nachgewiesen werden. Auf der Grundlage der Untersuchungen des vorliegenden Berichts gibt es daher keine Hinweise auf LMAC für NT-Feuerverzinkte Schrauben bis M72. Zudem zeigten die HT-verzinkten Schrauben der Größe M36 und M48 keine LMAC Risse. Daher kann die bisherige Grenze für die HT-Verzinkung bei Schrauben, die eine Anwendung des Verfahrens nur bis zur Dimension M24 zulässt, vermutlich erweitert werden.

Die Anfangstemperaturen ( $T_0$ ) spielen eine wesentliche Rolle. Durch Vorwärmen der Schrauben kann die HT-Feuerverzinkung auf größere Abmessungen erweitert werden ( $>M48$ ), da die thermisch induzierten Spannungen deutlich kleiner sind als beim Verzinken ohne Vorwärmen. Dadurch wird die Gefahr der Rissbildung durch LMAC im Kerbgrund bzw. Gewindeggrund minimiert.

---

## **7 Danksagung**

---

Das IGF-Vorhaben 17038 N1 der Forschungsvereinigung Gemeinschaftsausschuss Verzinken e. V. wurde über die AiF im Rahmen des Programms zur Förderung der industriellen Gemeinschaftsforschung und Entwicklung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.

Das Projekt wurde von dem Institut für Werkstoffkunde der Technischen Universität Darmstadt unter der Leitung von Herrn Prof. Dr.-Ing Matthias Oechsner (MPA/IfW) betreut, wofür ebenfalls herzlich gedankt wird.

Weiterer Dank geht an die Schraubenhersteller Zerbst, Fuchs und August Friedberg für die Bereitstellung des Versuchsmaterials und der Verzinkerei Rentrop für die Feuerverzinkung der Proben.