

Gradientenstahl für Achsfedern

Dipl.-Ing. Alexander Tump (Vortragender)
Mubea Fahrwerksfedern GmbH

Prof. Dr. rer. nat. Robert Brandt (Co-Autor)
Universität Siegen: Lehrstuhl für Werkstoffsysteme für den Fahrzeuggestaltungsbau

Dipl.-Ing. Steffen Klapprott (Co-Autor)
Mubea Fahrwerksfedern GmbH

Kurzfassung

Um weiteres Leichtbaupotential an der Achsfeder zu erschließen wurde der Vergüteprozess für Achsfedern weiter optimiert. Dazu wird in die Vergütungsanlage eine induktive Erwärmereinheit integriert. Dies ermöglicht die Randschicht des Achsfederdrahts gezielt zu entfestigen.

Die Randschichtentfestigung, „Surface Layer Modification“ (SLM) genannt, stellt einen definierten Härtegradient in der Randzone ein. Dieser Härteverlauf führt zu höherer Zähigkeit in dieser Randschicht, welche den Schwellwert zum Rissstart erhöht und die Risswachstumsgeschwindigkeit reduziert.

1 Einführung

Fahrzeug-Tragfedern stützen das Fahrzeug ab und fangen Schwingungen und Stöße durch Fahrbahnunebenheiten auf. Damit sorgen die Tragfedern für den nötigen Fahrkomfort. Gleichzeitig stellen die Federung und Dämpfung eine gute Bodenhaftung der Räder sicher. Tragfedern tragen so zur Gewährleistung der Fahrsicherheit bei. Für eine Tragfeder bedeutet dies, dass ein möglichst großer elastischer Arbeitsbereich vorhanden sein soll. Gleichzeitig sollen die Federn, zur Reduktion der ungefederten Massen, ein möglichst geringes Gewicht besitzen.

Eine Tragfeder wird neben der konstanten statischen Belastung (Fahrzeuggewicht) fast ausschließlich dynamisch durch Biege- und Torsionsmomente belastet. Bei Untersuchungen der Brüche aus Ermüdungsversuchen stellt man fest, dass die Brüche in sehr vielen Fällen von der Oberfläche des Federdrahtes oder von Bereichen unmittelbar unter der Oberfläche, also von der Randschicht, ausgehen. Die Rissinitiierung findet an Ungängen der Oberfläche oder an nichtmetallischen Einschlüssen in der Randschicht statt [1], [2].

Betrachtet man die Ausfälle von Fahrzeugfedern in der Praxis, ist die Ausfallursache fast immer auf Korrosion zurückzuführen. Unter korrosiver Belastung sind fast ausschließlich die Korrosionsnarben an der Oberfläche für die Rissbildung verantwortlich. Anhand der auftretenden Ausfallmechanismen ist deshalb die Randzone der entscheidende Bereich für die Ermüdungslebensdauer der Tragfeder.

Ein üblicher Weg zur Steigerung der Ermüdungslebensdauer ist die Verwendung von Legierungselementen wie Ni, V, Nb, Ti, W, Cu [3]. Diese Elemente werden zugesetzt, um die Zähigkeit (Ni), die Feinkörnigkeit (V, Nb, Ti) oder die Korrosionsresistenz (Cu) zu erhöhen, wobei V und Nb zusätzlich über Karbonitride ausscheidungshärtend wirken [4]. Darüber hinaus wird in der Literatur eine Aufhärtung der Randzone bzw. -schicht zur Steigerung der Ermüdungs-

lebensdauer genannt. Beispiele sind das Nitrieren oder Einsatzhärten mit Aufkohlen. [5], [6], [7] Höhere Festigkeiten gehen aber gewöhnlich mit einer Verschlechterung der Verformbarkeitseigenschaften einher. Das führt zu einer höheren Kerb- und Wasserstoffempfindlichkeit. Zudem sind diese Maßnahmen kostenintensiv und deshalb weniger attraktiv für eine Massenfertigung von Tragfedern.

Ein alternativer Ansatz zur Steigerung der Beanspruchbarkeit einer Fahrzeugtragfeder ist deshalb die SLM-Technologie („Surface-Layer-Modifikation“). SLM ist ein optimierter Vergütungsprozess, der einen hochfesten Federstahl mit einer charakteristischen Härteverteilung erzeugt. Dieser neue Gradientenstahl besitzt eine entfestigte Randzone und einen höchstfesten Kern. Die entfestigte Randzone reduziert die Kerb- und Wasserstoffempfindlichkeit, die besonders unter Korrosion kritisch ist. Der höchstfeste Kern stellt die Trag- und Setzfestigkeit der Achsfeder sicher.

2 Beanspruchung einer Achsfeder

Im Fahrbetrieb überlagern sich in Fahrzeugtragfedern fertigungsbedingte Eigenspannungen mit den auftretenden Lastspannungen. Letztere lassen sich heute bequem mit Hilfe der Finiten Elemente Analyse (FEA) bestimmen.

Die Lastspannungen bei Fahrzeugtragfedern werden im Betrieb hauptsächlich durch Torsion verursacht. Tordiert man einen runden Querschnitt, z.B. den Federdraht, sind die Spannungen an der Randzone am höchsten. Zusätzlich kommt es infolge der Federdrahtkrümmung an der Windungsinenseite des Drahtquerschnittes zu einer weiteren Spannungsüberhöhung (**Abbildung 1 - links**).

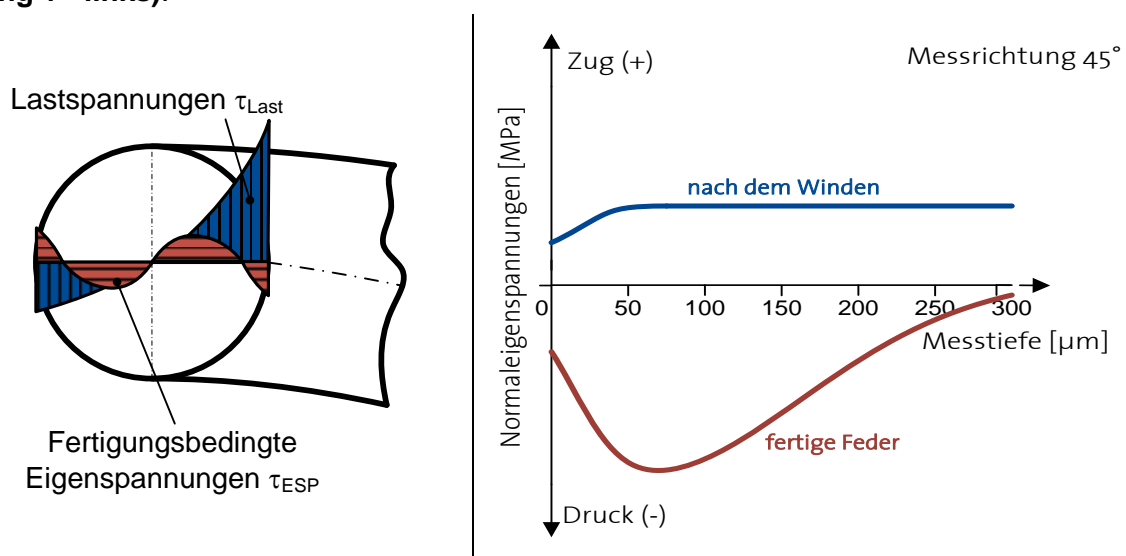


Abbildung 1: links: Last- und Eigenspannungsprofil an einer Fahrzeugtragfeder; rechts: Fertigungsbedingte Eigenspannungen nach verschiedenen Fertigungszuständen einer Tragfeder

Eigenspannungen entstehen bereits im ersten Prozessschritt bei der Formgebung zur Fahrzeugtragfeder (auch Winden genannt). Diese Eigenspannungen, insbesondere die Zugspannungen, können lebensdauerermindernd wirken. Alle Fertigungsschritte: Das Spannungsarmglühen, Setzen und Verfestigungsstrahlen- dienen der Verringerung der Zugeigenspannungen und dem Aufbau von Druckeigenspannungen (Abbildung 1 - rechts).

Überlagert man die Last- und Eigenspannungen, wird ersichtlich, dass der Drahttrandzone, eine besondere Bedeutung zukommt. In diesem Bereich liegen die höchsten Beanspruchungen vor. Ermüdungslebensdauerprüfungen bestätigen dies, da fast alle Federbrüche von der Oberfläche des Drahtes, oder von Bereichen unmittelbar unter dieser ausgehen. Die Ursache liegt an der hohen Randzonenbeanspruchung. Zusätzlich treten Schwachstellen an der Oberfläche auf.

Zum besseren Verständnis der Schadensmechanismen wird der Achsfederdraht als Schalenmodell dargestellt (**Abbildung 2**). Das Modell besteht aus vier Schalen:

- I) Unmittelbare Oberfläche:
Die erste Schale ist die Oberfläche selbst. An ihr wirken die höchsten Lastspannungen. Bei technischen Oberflächen treten Kerben, insbesondere durch den Kugelstrahlprozess auf. Darüber hinaus wirkt hier die Korrosion.
- II) Bereich maximaler Druckeigenspannungen:
Die zweite Zone umfasst das Volumen von der unmittelbaren Oberfläche bis fast zum Nulldurchgang der Druckeigenspannungen (ca. 50 - 300 μm). In diesem Bereich sind Druckeigenspannungen maximal. Sofern keine Materialfehler, wie Einschlüsse oder Risse vorliegen, ist der Bruchausgang nicht in dieser Zone zu finden.
- III) Bereich ohne Druckeigenspannungen mit hohen Lastspannungen:
Die dritte Schale ist der Bereich von ca. 300 μm bis 1000 μm Tiefe. In dieser Zone existieren keine nennenswerten Druckeigenspannungen aus dem Kugelstrahlprozess mehr. Die Lastspannungen sind aber recht hoch. Dies führt dazu, dass Einschlüsse zum Federbruch führen können.
- IV) Unkritische Kernzone
Die Kernzone ist typischerweise ein unkritischer Bereich, da hier eine eher geringe Beanspruchung vorliegt. In diesem Bereich können nur sehr große Materialfehler zum Bauteilausfall führen, was bei den verwendeten Super-Clean-Stählen normalerweise nicht vorkommt.

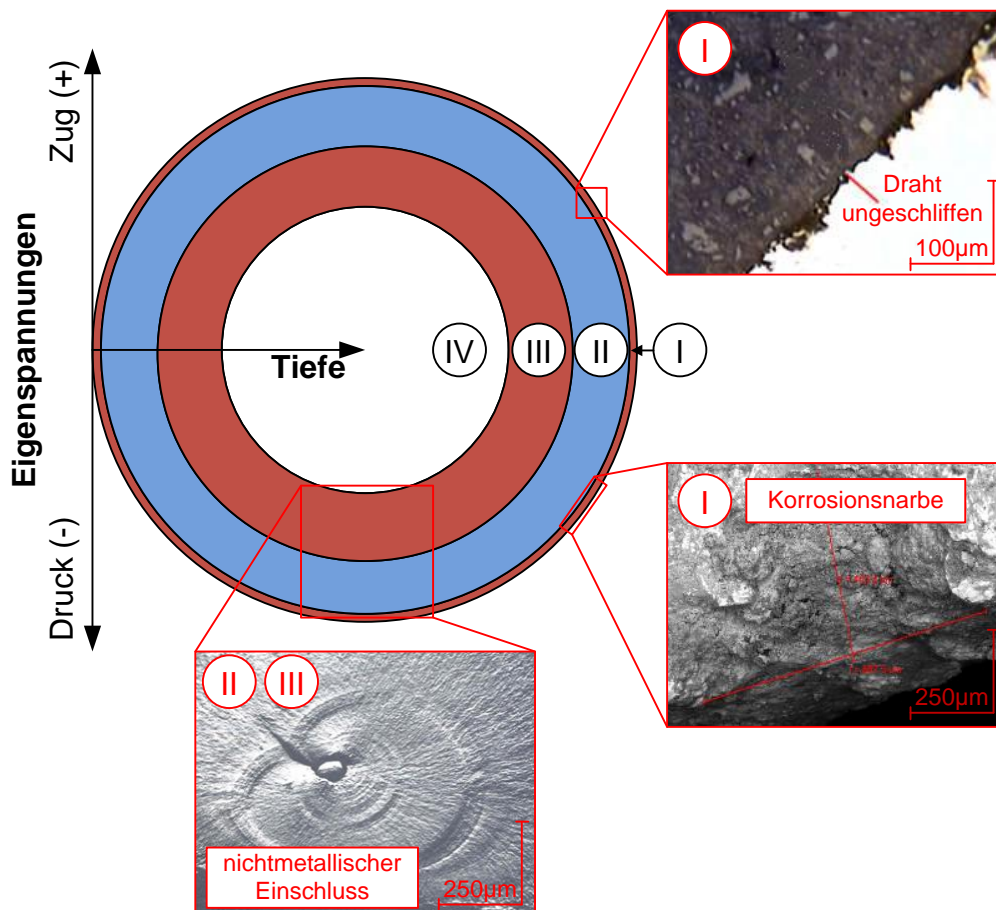


Abbildung 2: Schalenmodell zur Visualisierung der häufigsten Schädigungsmechanismen an der Achsfeder mit I) unmittelbare Oberfläche, II) Bereich maximaler Druckeigenspannungen III) Bereich ohne Druckeigenspannungen mit hohen Lastspannungen, IV) unkritische Kernzone

Anhand des Schalenmodells wird ersichtlich, dass insbesondere die Randzone bis zu einer Tiefe von 1 mm die höchste Bedeutung für die Federlebensdauer hat.

3 Funktionsweise der „Surface Layer Modifikation“

Die Basis für den SLM-Prozesses ist die induktive Drahtvergütung, der auch „Inductive Tempered Wire Prozess“ (ITW-Prozess) genannt wird. Der Federstahl wird zunächst auf die Austenitisierungstemperatur (900 - 1000 °C) erwärmt und nachfolgend abgeschreckt. Im Anschluss wird der Draht bei einer Temperatur angelassen, um die nötige Zähigkeit von 400 – 500°C einzustellen. Durch die kontinuierliche induktive Vergütung entsteht ein sehr homogenes, zähes und feinkörniges Martensitgefüge (**Abbildung 3**) mit Zugfestigkeiten bis zu 2100 MPa.



Abbildung 3: Gefüge eines Vergüteten Federdrahts (ASTM E 112)

Ein nächster Optimierungsschritt des induktiven Vergüteprozesses ist die Randschichtmodifikation (**Abbildung 4**): Surface Layer Modification (SLM).

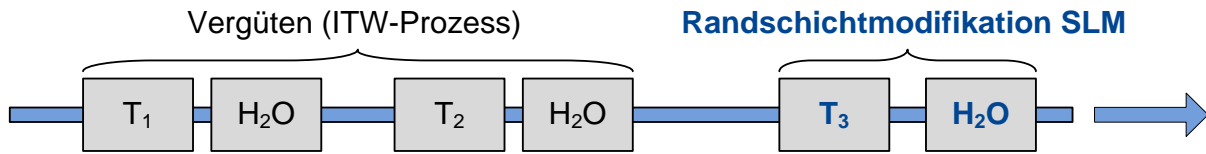


Abbildung 4: Prinzip-Schaubild Vergütung mit Randschichtmodifikation

Für die Randschichtmodifikation wird der vergütete Federstahl ein weiteres Mal kurzzeitig erwärmt und abgeschreckt. Dieser zusätzliche Schritt führt zu einer Endfestigung der Randzone. Der 3D-Härteplot (**Abbildung 5**) zeigt das Ergebnis.

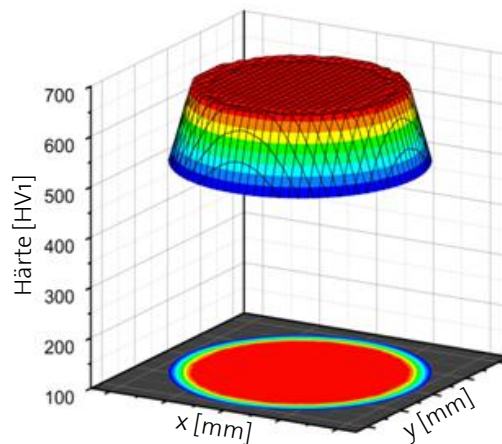


Abbildung 5: 3D-Härteplot eines randschichtmodifizierten Achsfederdrahts

Die Randzone wird beim SLM-Prozess bis in eine Tiefe von 1 mm entfestigt, wobei die Oberflächenhärte nicht unter 450 HV abfallen sollte. Weiterhin wird die Kernhärte des Drahtes angehoben, um die Setzfestigkeit (Widerstand gegen auftretende Längen- oder Kraftänderungen der Feder) der höchstbeanspruchten Feder zu gewährleisten (**Abbildung 6**).

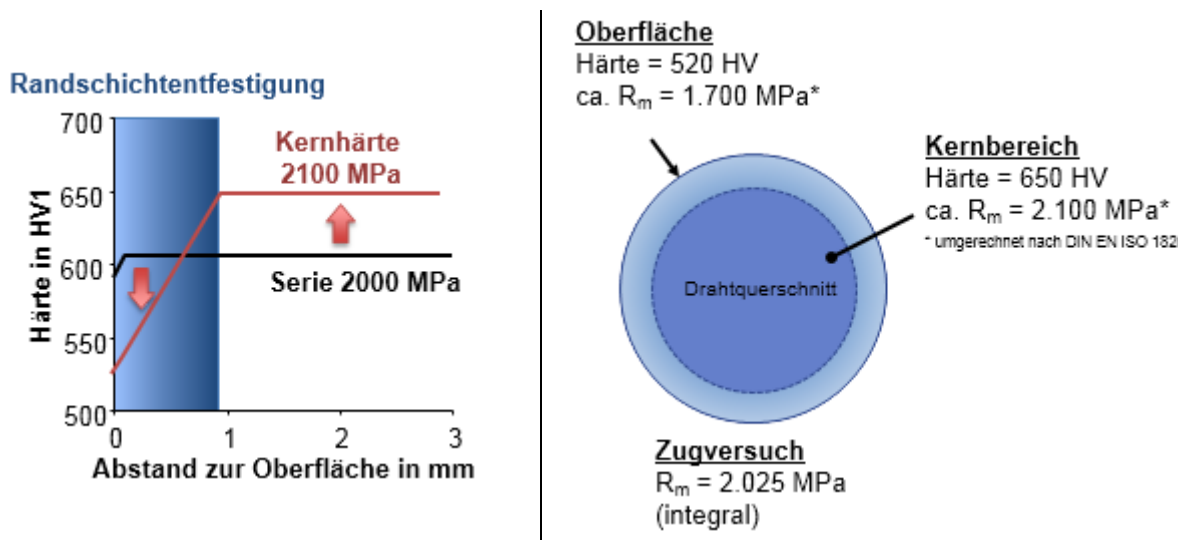


Abbildung 6: links: Vergleich eines Gradientendrahts mit einem Standarddraht über das Härteprofil; rechts: Profilsansicht eines Gradientendrahts

Die integrale Festigkeit wird zum Vergleich eines Gradientendraht mit einem Standarddraht verwendet (Abbildung 6 – rechts).

4 Wirkmechanismen der Surface-Layer-Optimierung

Der Optimierungsansatz von SLM zur Erhöhung der Beanspruchbarkeit einer Achsfeder enthält drei wesentliche Elemente:

- 1) Vermeidung der Rissbildung
- 2) Reduktion der Rissausbreitungsgeschwindigkeit
- 3) Optimierung der Druckeigenspannungen

Der wichtigste Parameter zur Optimierung ist dabei das Festigkeitsprofil des Stahls.

Werkstoffleichtbau für Fahrzeugtragfedern wird durch die Anhebung der Materialfestigkeit erzielt. Die Dauerfestigkeit von Federstählen nimmt mit wachsender Härte linear zu. Dies zeigen Untersuchungen bei Umlaufbiegeprüfungen (**Abbildung 7 - links**). Dieser Zusammenhang gilt aber nur bis zu einem charakteristischen Härtewert. Bei Erreichen und Überschreiten dieses Wertes nimmt die Dauerfestigkeit nicht mehr zu und kann sogar deutlich absinken. Die bruchmechanische Beschreibung von Federstahl zeigt Ursachen für dieses Verhalten auf. Sowohl die der Schwellwert ΔK_{th} (Abbildung 7 - rechts) für die Rissinitiierung als auch die Bruchzähigkeit K_{IC} (**Abbildung 8**) nehmen mit höherer Härte des Federstahls ab.

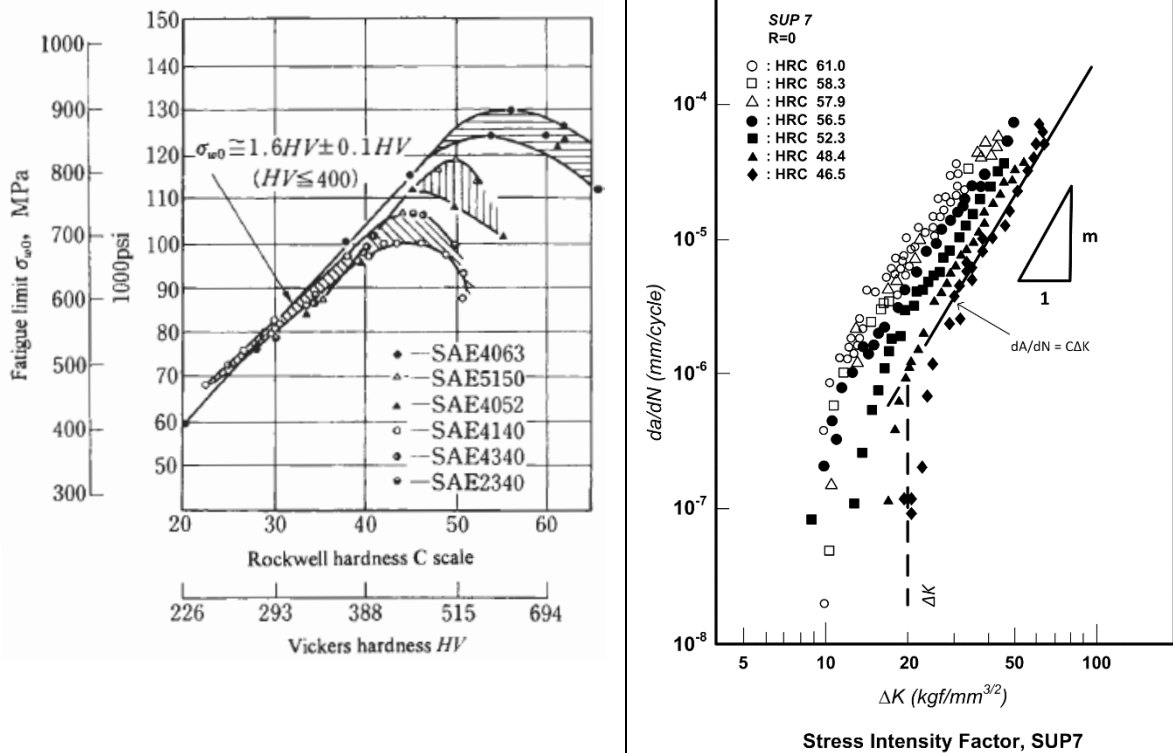


Abbildung 7: links: Beziehung zwischen Härte und Dauerfestigkeit [8]; rechts: Risslängenzuwachs pro Lastwechsel da/dN in Abhängigkeit zum Schwellwertes ΔK für verschiedene Festigkeiten [9]

Angewendet auf eine Fahrzeugtragfeder bedeutet dies folgendes: Die höchsten Zugspannungen treten bei einer Tragfeder an der Oberfläche (Schale I) auf. Gleichzeitig sind dort die Druckeigenspannungen nicht maximal. Zum Schutz der Feder vor Rissentstehung ist es deshalb sinnvoll, den Schwellwert ΔK_{th} durch die Reduktion der Härte anzuheben. Funktionsbedingt benötigt die Tragfeder aber einen großen elastischen Arbeitsbereich und eine möglichst gute Setzfestigkeit. Dies setzt eine hohe Materialfestigkeit voraus.

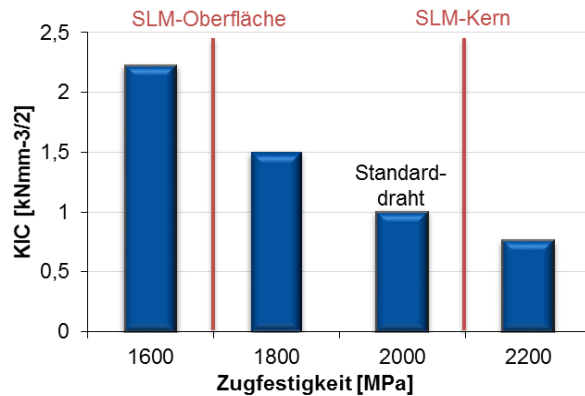


Abbildung 8: Abhängigkeit der Bruchzähigkeit zur Zugfestigkeit für den Werkstoff 54SiCr6

Zur Lösung der konkurrierenden Anforderungen wird daher in Schale I (Oberfläche) lokal die Härte reduziert und im Kern etwas angehoben. Damit ist die Integrale Festigkeit mit einem Standarddraht identisch und alle Anforderungen an eine Tragfeder werden erfüllt.

Im Fahrzeug muss die Tragfeder nicht nur dynamischer Belastung standhalten. Durch Beschädigung der Beschichtung z.B. durch Steinschlag oder Abrieb kann Korrosion entstehen. Unter dem Einfluss von Korrosion wird die Oberfläche des Federdrahts angegriffen und löst sich lokal auf. Insbesondere anodische Spannungsrisskorrosion und wasserstoffinduzierte Schwingungsrisskorrosion können dazu führen, dass die Schale II mit den höchsten Druckeigenspannungen von Rissen geschädigt werden. Mit Hilfe der Randschichtentfestigung gelingt es, die Schale II mit den höchsten Druckeigenspannungen in Richtung größerer Tiefen auszudehnen. Dies zeigen Messungen der Eigenspannungsprofile an Federn mit homogen vergüteten Drähten und an Federn mit randschichtentfestigten Drähten. Die SLM Schale II kann um mehr als 100 μm ausgedehnt werden (**Abbildung 9**).

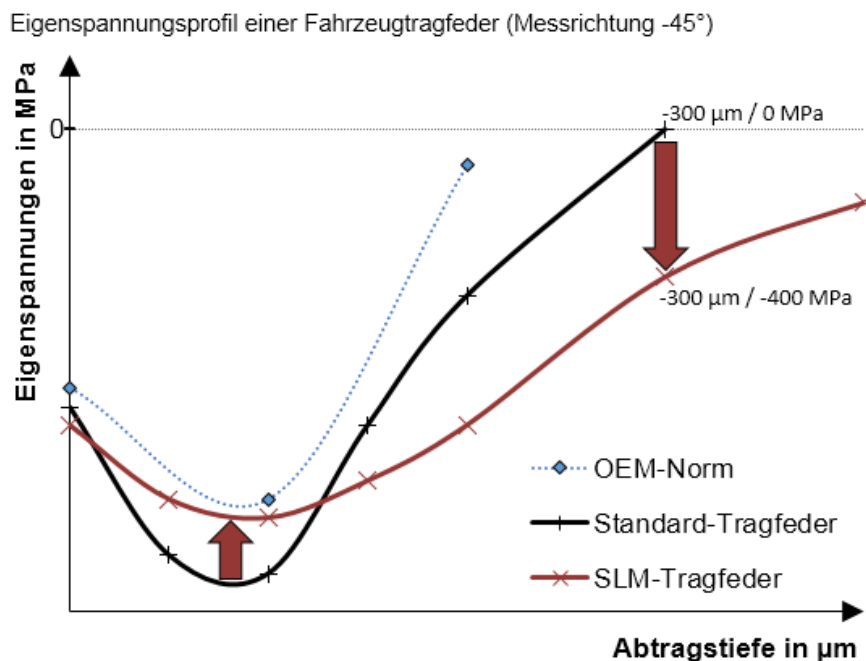


Abbildung 8: Eigenspannungsverläufe einer fertigen Fahrzeugtragfeder mit Standard- und mit SLM-Draht (integrale Festigkeit je 2030 MPa) und OEM-Vorgabe

Durch die weiter ins Material eindringenden Eigenspannungsverläufe werden die Druckeigen-
spannungen in der nicht kritischen Schale I etwas reduziert, dafür erhöhen sich diese in der
Schale II. Dies bedeutet das SLM-Tragfedern resistenter gegen Ungängen sind, welche beim
Standardmaterial zum Bruch führen können. Beispielhaft existieren in einer Tiefe von 300 µm
bei der Standardfeder bereits keine Druckspannungen mehr, wohingegen bei der SLM-Feder
noch Druckeigenstress von -400 MPa vorliegen.

5 Schwingungs- und Spannungsrissskorrosion bei SLM optimierten Achsfedern

Tragfedern müssen bei einer anwendungsgerechten Auslegung nicht nur hinsichtlich ihrer Er-
müdungslebensdauer, sondern auch hinsichtlich der Resistenz gegen Schwingungsrissskorro-
sion oder Spannungsrissskorrosion ausgelegt werden. Insbesondere hier zeichnet sich die
SLM-Technologie aus, da bereits eine „Vorschädigung“ der Feder existiert und die Rand-
schichtentfestigung risshemmend wirkt. Verifiziert wurde die Surface-Layer-Modification unter
anderem mit einem Spannungsrissskorrosionstest und einer dynamischen Korrosionswechsel-
prüfung (Schwingungsrissskorrosion).

Bei dem durchgeführten Spannungsrissskorrosionstest werden unbeschichtete Federn unter
Vorspannung in ein Säurebad gestellt und dort bis zum Bruch belassen. Anschließend wird
die Zeitdauer in Tagen ausgewertet (**Abbildung 9**). Je länger eine Achsfeder die Prüfung
übersteht, desto besser ist ihr Widerstand gegen Spannungsrissskorrosion.

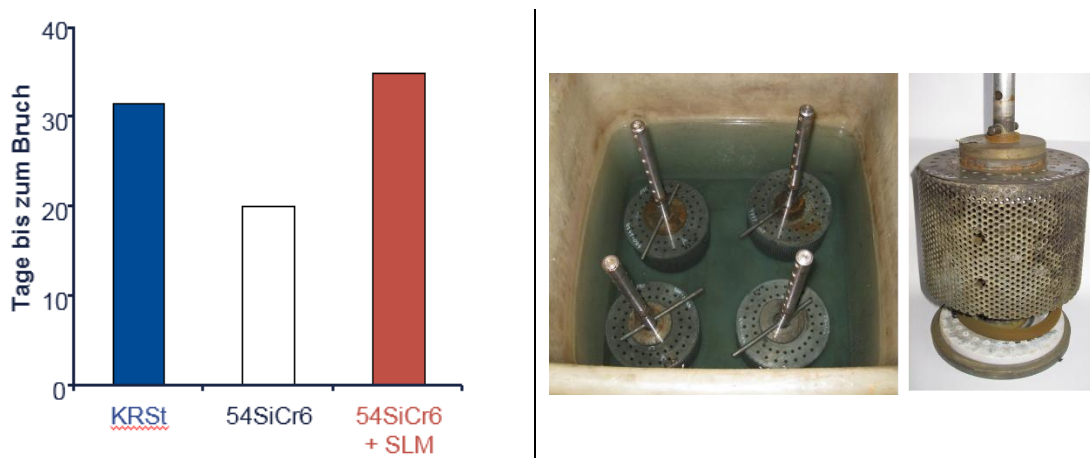


Abbildung 9: links: Ergebnisse des Spannungsrissskorrosionstest an Federn mit dem Standardmaterial 54SiCr6 (weiß), einem korrosionsresistenten Federstahl KRSt (blau) und Standardmaterial mit SLM (rot); rechts: Prüfaufbau des Spannungsrissskorrosionstest

Der korrosionsresistente Stahl zeigt mit 32 Tagen erwartungsgemäß eine höhere Beständigkeit gegen Spannungsrissskorrosion als der Federstahl 54SiCr6 mit nur 20 Tagen. Der Stahl mit SLM Technologie erreicht sogar 35 Tage, was in diesem Fall eine kostengünstige Substitution des kostenintensiveren, korrosionsresistenteren Stahls möglich macht.

Die Prüfung für die Schwingungsrissskorrosion erfolgt durch eine dynamische Korrosionswechselprüfung. Hier wird die Beschichtung der Federn systematisch vorgeschädigt. Anschließend wird die Feder für 24 h in einer Klimakammer Salzsprühnebel, einem Heißtrocknen und einem Salzbad ausgesetzt. Die Trocknung erfolgt bei Raumtemperatur. Zuletzt wird die Feder dynamisch für 150.000 Lastwechsel bei normalem Prüfhub geprüft. Die letzten beiden Prüfschritte werden dabei solange wiederholt, bis die Fahrzeugtragfeder bricht (**Abbildung 10 - links**).

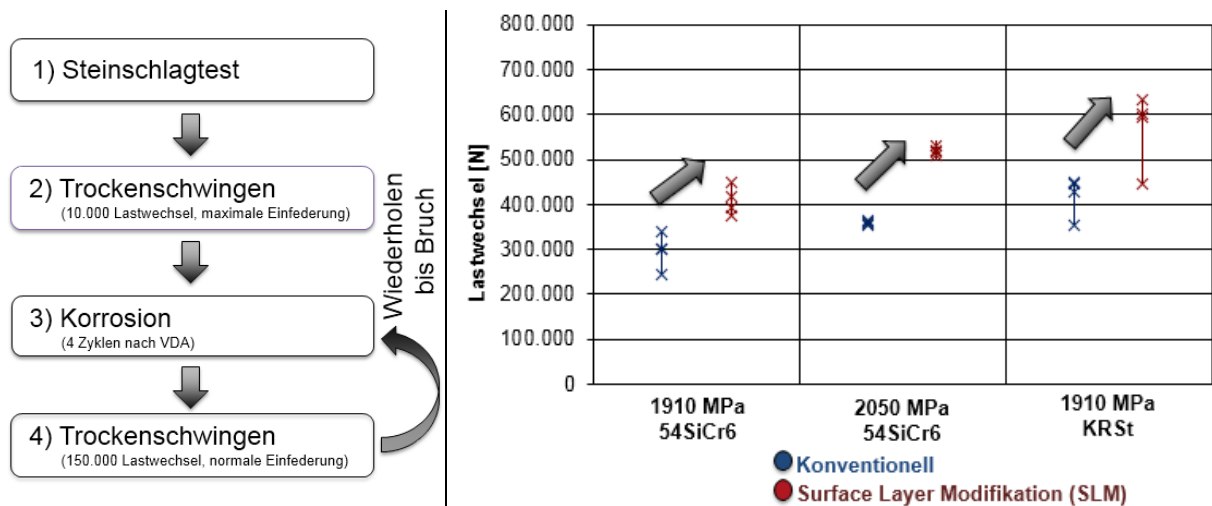


Abbildung 10: links: Prüfabfolge der dynamischen Korrosionswechselprüfung; rechts: Prüfergebnisse der dynamischen Korrosionswechselprüfung an Standardstahl 54SiCr6 mit zwei verschiedenen Festigkeiten und an einem korrosionsresistenten Stahls (KRSt), jeweils mit und ohne Randschichtentfestigung

In allen durchgeführten Korrosionswechselprüfungen zeigt sich: Wenn SLM angewendet wird verbessert sich die Lebensdauer, unabhängig vom verwendeten Werkstoff. Beim Spannungsrisskorrosionstest ist zu sehen, dass sich der kostenintensivere korrosionsresistente Stahl durch einen normalen Standardstahl und SLM-Technologie substituieren lässt. Es ist sogar möglich, die Vorteile des besseren Stahls mit der SLM-Technologie zu kombinieren, um eine noch bessere Resistenz gegen Schwingungsrisskorrosion zu erhalten.

Ein zusätzlicher Vorteil erschließt sich, durch Leichtbau. Durch die höhere Lebensdauer kann die Federauslegung der randschichtentfestigten SLM-Feder angepasst werden, um die geforderte Performance zu erreichen.

Am Einfachsten lässt sich dies an einem Praxis-Beispiel veranschaulichen. Eine konventionelle Feder mit Standardfederdraht wird zunächst mit der „Mubea-New-Gen-Technologie“ erneut ausgelegt. Dadurch lassen sich die Lastspannungen der Achsfeder homogenisieren und ermöglichen schon ein Gewichtsvorteil. Anschließend wird die New-Gen-Feder als optimierte SLM-Variante ausgelegt (**Abbildung 11**).

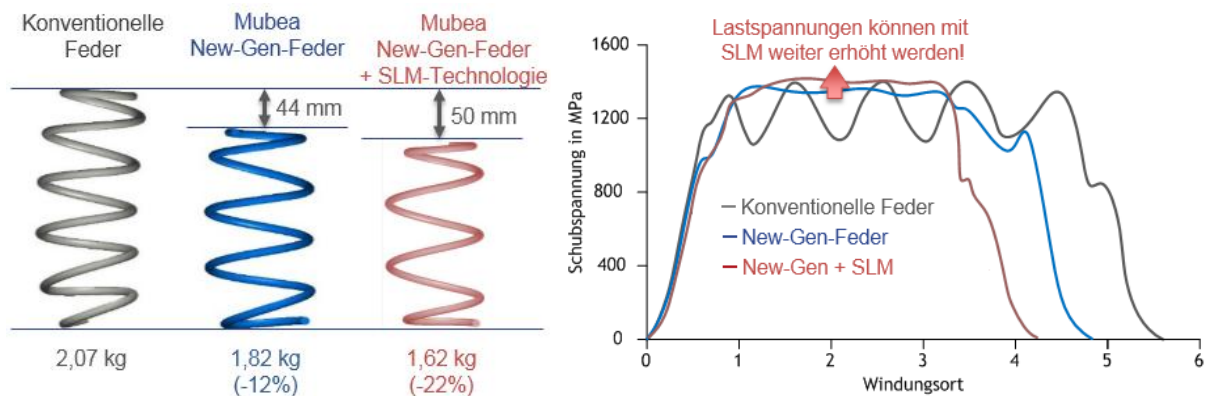


Abbildung 11: Leichtbau einer Fahrzeugtragfeder durch Mubea New Gen und durch die Mubea SLM-Technologie – links: Massen und Baulängenersparnis; rechts: Spannungsverläufe

Die SLM-Feder hat eine Masse von 1,62 kg, d.h. 22% weniger als die klassische Feder bzw. 10% weniger als die New-Gen-Feder. Die numerische Spannungsanalyse (Abbildung 12 – rechts) zeigt ebenfalls ein homogenes Spannungsprofil auf erhöhtem Niveau.

6 Zusammenfassung und Ausblick

Um die Robustheit der Fahrzeugtragfeder weiter zu erhöhen und eine weitere Gewichtsreduktion zu ermöglichen, hat Mubea die innovative Prozesstechnologie SLM für Achsfederdraht entwickelt.

SLM bewirkt:

- eine erhöhte Bruchzähigkeit in der Randschicht.
- ein verbessertes Setzverhalten.
- optimierte Druckeigenstressungen an der Oberfläche.

SLM basiert auf:

- der Absenkung der Härte in der Randschicht des Federdrahts.
- der Anhebung der Härte im Kernbereich.

SLM bietet:

- Kompatibilität mit allen Mubea-Prozessen und Technologien
- ein Gewichtsreduktionspotential von 10%
- Robustheit und damit die Möglichkeit zur Substitution von teuren, korrosionsresistenten Stählen durch Federstahl 54SiCr6.

Die Surface Layer Technologie (SLM) ist prozesssicher und reif in der Anwendung!

Literatur

- [1] Lackowski, B.: Untersuchungen zum Rißbeginn in einem Cr-Si-Federstahl; Fertigungstechnik und Betrieb, Band 41, Heft 3, S. 158-160, (1991)
- [2] Bauschke, T.: Entstehung der Windeigenstressung und deren Einfluss auf die Ermüdungslebensdauer bei kalt- halbwarm geformten Fahrzeugfedern; Dissertation Universität Siegen; Muhr und Bender KG; (2011)
- [3] JP 2001-131699 A; EP1096031A3A2; US6,322,747B1; published on 15.05. 2001 (Mitsubishi Steel)
- [4] Perrard, F. et al.: High strength steels with improved ductility and corrosion resistance; SCT2008; S.106-113
- [5] Nishimura, T.; Hagiwara, Y ; Yamada, K. et al. : The Valve Springs Carbo-Nitrided at High Temperature for High Speed Engines; SAE Technical Paper Series, no. 890777, ISSN 0148-7191
- [6] Offenlegungsschrift DE 19908407 A1; Hochfeste Ventilefeder und Verfahren zu ihrer Herstellung; Offenlegungstag: 16.09.1999
- [7] Bomas, H.: Schwingfestigkeit einsatzgehärteter Gefügein: Einsatzhärten: Grundlagen – Verfahren – Anwendung – Eigenschaften einsatzgehärteter Gefüge und Bauteile; S.107-130 (1994)
- [8] Garwood M.F., Zurburg H.H. and Erickson M.A.: Correlation of Laboratory Tests and Service Performance, Interpretation of Tests and Correlation with Service, ASM, Philadelphia, PA, 1951, S.1-77
- [9] Tange A., Shot Peening for Springs: Fatigue Fracture Processes and Improvement of Fatigue for Springs, 2013