

Schomäcker Federnwerk GmbH, Melle

**Entwicklung eines EnergieReduzierten Verfahrens für den
Erwärmungs- und Umformungsprozess von Parabel-
Lenkerfedern durch Verkürzung der Verfahrenskette
(„EnRed“)**

Abschlussbericht über ein Entwicklungsprojekt,
gefördert unter dem Aktenzeichen 25933
von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt

von

Hubert Temmen
Artur Pietz
Christoph Piela
Dr. Torsten Bispink

Februar 2010

Projektkennblatt
der
Deutschen Bundesstiftung Umwelt



Az 25933	Referat 21/0	Fördersumme	349.000 €
-----------------	---------------------	-------------	-----------

Antragstitel	EnRed-Verfahren (Entwicklung eines energiereduzierten Verfahrens für den Erwärmungs- und Umformungsprozess durch Verkürzung der Verfahrenskette)
---------------------	---

Stichworte	Energie, Verfahren
-------------------	--------------------

Laufzeit	Projektbeginn	Projektende	Projektphase(n)
24 Monate	16.11.2007	15.11.2009	

Zwischenberichte:	Alle 6 Monate Kurzbericht
-------------------	---------------------------

Bewilligungsempfänger	Schomäcker Federnwerk GmbH Borgholzhausener Strasse 1 49324 Melle
------------------------------	---

Tel 05422/108-0
Fax 05422/108-127
Projektleitung Herr Dr. Torsten Bispink
Bearbeiter Herr Hubert Temmen

Kooperationspartner	Roschiwal & Partner Ingenieur GmbH, Augsburg
----------------------------	--

Zielsetzung und Anlass des Vorhabens

Ziel des Projekts ist die Entwicklung eines energiesparenden innovativen Verfahrens für den Erwärmungs- und Umformungsprozess zur Herstellung von Lenkerfedern. Dieser Prozess stellt eine Integration von bisher getrennten Erwärmungs- und Umformungsprozessen zu einer verkürzten Verfahrensabfolge dar.

Im Rahmen dieses FuE-Vorhabens sollen die grundlegenden Technologien entwickelt werden, die zur Verkürzung der Verfahrensfolge notwendig sind. Die Projektergebnisse bilden damit die Grundlage für eine großtechnische Produktion von Parabellenkern mit deutlich gesteigerter Energie- und Kosteneffizienz bei geringerem Materialeinsatz.

Darstellung der Arbeitsschritte und der angewandten Methoden

Arbeitspaket 1: Konzepterstellung

In der Konzeptphase wird die Bearbeitung eines Parabellenkers in seine einzelnen Prozessschritte untergliedert. Dabei erfolgt eine detaillierte Festlegung der Reihenfolge von Prozessschritten und des Anforderungsprofils der eingesetzten Maschinen.

Arbeitspaket 2: Entwicklung der Fertigungsfolge für den Umformungsprozess

Zwischen der Erwärmung und dem Härten sollen an dem Parabellenker in einer thermomechanischen Prozessfolge alle umformenden und trennenden Bearbeitungsschritte nacheinander vollzogen werden. Hierzu sind maschinen- und anlagentechnische Lösungskonzepte zu erarbeiten. Zur Lösung der formulierten Aufgaben ist eine intensive Zusammenarbeit mit den Anlagenherstellern notwendig.

Arbeitspaket 3: Entwicklung der Parabelwalzmaschine

Ein wesentlicher Bestandteil der neuen Lenkeranlage ist die Entwicklung einer auf die verkürzte Verfahrensfolge angepassten Parabelwalzmaschine mit deutlich erhöhter Walzgeschwindigkeit. Zudem ist die Entwicklung einer Steuerung, die die neuen Werkstoffparameter berücksichtigt, notwendig.

Arbeitspaket 4: Werkstückgruppenbezogene Technologieentwicklung sowie Verifizierung

Um Parabellenker verschieden komplexer Geometrien und Merkmale mit dem neu entwickelten Verfahren bearbeiten zu können, ist eine werkstückbezogene Verfahrensentwicklung erforderlich.

Ergebnisse und Diskussion

Das neu entwickelte EnRed-Verfahren zur Herstellung von Parabel-Lenkerfedern benötigt für deren sehr energieaufwändigen Formgebungs- und Härteprozesse rund ein Drittel weniger Energie als konventionelle Herstellverfahren.

Legt man als Bezugsgröße den europaweiten Bedarf an Lenkerfedern von 49 Tausend Tonnen zu Grunde, so lassen sich mit dem neu entwickelten Verfahren pro Jahr 32.144 MWh an Primärenergie einsparen. Dies entspricht einer Reduktion des CO₂-Ausstoßes von 7.105 Tonnen p.a.

Überträgt man das Verfahren auf Parabelfedern, so ergeben sich in Europa weitere Energieeinsparungspotenzialen von knapp 100 GWh bzw. eine Reduktion des CO₂-Ausstoßes von 21 Tausend Tonnen.

Die Entwicklung des EnRed-Verfahrens steht mit Ablauf dieses Projektes erst am Beginn seiner Entwicklungsmöglichkeiten. In diesem Abschlussbericht werden weitere Perspektiven aufgezeigt, durch Weiterentwicklungen des EnRed-Verfahrens den Energiebedarf pro kg hergestelltem Fertigprodukt weiter zu senken.

Öffentlichkeitsarbeit und Präsentation

- Bis zum Projektende ist keine Veröffentlichung der Ergebnisse erfolgt.
- Es ist geplant, das neu entwickelte EnRed-Verfahren auf dem nächsten VDFI-Fahrzeugfedern-Seminar zu präsentieren, das voraussichtlich im März 2011 an der Technischen Akademie Esslingen abgehalten wird.

Fazit

Mit EnRed ist ein innovatives, energiereduziertes Verfahren für den Erwärmungs- und Umformungsprozess von Parabel-Lenkerfedern durch Verkürzung der Verfahrenskette entwickelt worden. Die zu Projektbeginn gesteckten Energieeinsparziele sind vollständig erreicht worden. Damit verbunden sind entsprechende Reduktionen des CO₂-Ausstoßes.

Gleichzeitig konnten mit der neu entwickelten Verfahrenskette die Produkteigenschaften verbessert werden, was weitere Potenziale für Energieeinsparungen mit sich bringt. In der Zukunft bestehen sehr gute Aussichten, unter Ausnutzung aller Eigenschaften des Werkstoffes Stahl weitere Potenziale zur energieeffizienten Prozessgestaltung zu erschließen.

Erst nach Optimierung der Verfahrenskette und Ausnutzung aller Potenziale werden die wirklichen Einsparpotenziale zu beziffern sein.

Inhalt

1. Verzeichnisse.....	1
1.1 Bilder.....	1
1.2 Tabellen.....	1
1.3 Begriffen und Definitionen.....	2
2. Zusammenfassung.....	3
3. Zielsetzung.....	4
4. Ausgangssituation.....	4
5. Stand der Technik.....	5
6. Konzept des EnRed-Verfahrens.....	5
7. Realisierung.....	6
7.1 Produktionsanlage.....	6
7.2 Parabelwalze.....	7
7.3 Werkstückklemmung.....	8
8. Produkte.....	9
8.1 Geometrie.....	9
8.2 Vormaterial.....	10
9. Gestaltung des Produktionsprozesses.....	10
9.1 Auslegung des Umform- und Vergüteprozesses.....	11
9.1.1 Austenitisierungsprozess.....	11
9.1.2 Halte- und Umformprozess.....	12
9.1.3 Abschreckprozess.....	13
9.1.4 Anlassprozess.....	14
9.1.5 Verzug und Genauigkeit.....	14
9.1.6 Oberfläche und Randzone.....	16
10. Untersuchungsergebnisse.....	19
10.1 Grobkornbildung.....	19
10.2 Gefügefleckigkeit.....	19
10.3 Seigerungen.....	20
10.4 Randzeitigkeit.....	20
10.5 Karbidbildung.....	21
10.6 Mechanische Kennwerte.....	22
10.7 Härte.....	22
10.8 Festigkeit und Zähigkeit.....	22
10.9 Lebensdauerprüfungen.....	25
11. Energiebedarf.....	27
11.1 Konventionelle Fertigung.....	27
11.2 EnRed-Verfahren.....	29
11.3 Vergleich des EnRed- mit dem konventionellen Verfahren.....	30
13. Auswirkungen des Einsatzes von EnRed auf die Umwelt.....	32
13.1 Energieeinsparung.....	32
13.2 CO ₂ -Bilanz.....	32
14. Fazit.....	33
15. Literaturverzeichnis.....	34

1. Verzeichnisse

1.1 Bilder

Bild 1: Luftfederungssystem.....	4
Bild 2: Prinzipskizze der EnRed-Produktionsanlage.....	6
Bild 3: Prinzipskizze der Parabelwalze.....	7
Bild 4: Prinzipskizze der Schlitten	8
Bild 5: Endkontur eines typischen Parabellenkers für Anhänger-Luftfederungen	9
Bild 6: 3D-Ansicht der Parabel-Lenkerfeder	9
Bild 7: Temperaturverteilung im Werkstoffquerschnitt	12
Bild 8: Wärmeübergangskoeffizientkurven unterschiedlicher Härtemedien	13
Bild 9: Errechnete Gefügestruktur im Betrachtungsquerschnitt bei einer Oberflächen- temperatur nach der Austenitisierung von 1050°C und einer Aufheiz- und Halte- zeit von jeweils 3 min. für Grenzchargen.....	14
Bild 10: Ursachen-Wirkungs-Diagramm für das Merkmal Längssymmetrieabweichung.	15
Bild 11: Gewichtszunahme-Zeit-Kurven eines Stahls mit 0,35% Si bei 750°C u. 1.050°C...17	17
Bild 12: Einfluss steigender Wasserdampf- und Kohlendioxidgehalte auf die Zunderkon- stante bei 0,35% Si, 750°C u. 950°C (li.) u. bei 1,14% Si und 1.050°C (re.).....	17
Bild 13: Kornbildung im Kern (angelassenes Gefüge).....	19
Bild 14: Gefügefleckigkeit	19
Bild 15: Unterschiedliche Ausprägung von Seigerungen.....	20
Bild 16: Beispiele für Randzeitigkeit	21
Bild 17: Beispiele für Karbidbildung.....	21
Bild 18: Vergütedefestigkeitsabhängige Dehnung.....	23
Bild 19: Gefügeuntersuchungen an Zugproben.....	24
Bild 20: Weibull-Verteilung der Lebensdauerprüfungen	25
Bild 21: Wahrscheinlichkeitsnetz der Lebensdauer	26
Bild 22: Sankey-Diagramm für konventionellen Fertigungsprozess.....	28
Bild 23: „Verwendung“ der Primärenergie beim konventionellen Herstellverfahren	28
Bild 24: Sankey-Diagramm für das EnRed Verfahren	30
Bild 25: „Verwendung“ der Primärenergie beim EnRed Verfahren	30
Bild 26: Vergleich der „Energieverwendung“ beider Verfahren.....	31
Bild 27: Energieeinsparung durch das EnRed-Verfahren	31

1.2 Tabellen

Tabelle 1: Herstellungsprozess eines Parabellenkers mit konventionellem Verfahren	5
Tabelle 2: Herstellungsprozess eines Parabellenkers mit dem EnRed-Verfahren.....	5
Tabelle 3: Ermittlung der Energieverluste beim konventionellen Herstellungsverfahren pro kg Endprodukt.....	28
Tabelle 4: Ermittlung der Energieverluste beim EnRed Verfahren pro kg Endprodukt	29

1.3 Begriffe und Definitionen

Austenitisieren	Aufheizen des Werkstoffes oberhalb der GS-Linie des Eisen-Kohlenstoff-Diagramms
Entkohlungsgrad	Verhältnis von tatsächlichem Anteil zu theoretisch möglichem Anteil an Kohlenstoff
Lufthärtung	Teilweise martensitische Härtung der Seigerungsbereiche im unvergüteten Anlieferungszustand
Transkristalline Segregation	Karbidausscheidung im Korninneren
Austenitgebiet	Fläche in Eisen-Kohlenstoff-Diagramm oberhalb der GOSE-Linie
Dynamische Rekristallisation	Neubildung des Gefüges in der Hochtemperaturphase während bzw. unmittelbar nach dem Umformvorgang
Abschreckhärte	Härte nach dem Härteprozess
Streckgrenzverhältnis	$R_{p0,2} / R_m$
Gleichmaßdehnung	Dehnung bis R_m
R_p	Festigkeit bei Dehngrenze
R_m	Zugfestigkeit
$\epsilon_{(R_m)}$	Dehnung bei Zugfestigkeit
CO ₂ -Äquivalent	Umrechnungsfaktor zur Ermittlung des CO ₂ -Ausstosses zum Vergleich verschiedener Energieträger
m_{CO_2}	CO ₂ -Ausstoß in kg

2. Zusammenfassung

In den 80er Jahren hat sich bei LKW-Sattelauflegern und Anhängern weitgehend die Luftfederung durchgesetzt. Ein wichtiges Bauteil für das Luftfederungssystem stellt dabei die Parabel-Lenkerfeder dar. Deren Produktion ist jedoch aufgrund der erforderlichen Warmformgebungs- und Wärmebehandlungsprozesse grundsätzlich nicht sehr energie- und umweltschonend. Im Rahmen dieses Projektes ist ein neues Produktionsverfahren entwickelt worden, das rund ein Drittel weniger Energie zur Umformung und Härtung der beschriebenen Produkte benötigt als die konventionelle Herstellung.

Kern des neuen Produktionsverfahrens ist die Substitution der mehrfachen Materialaufheizung in gasbeheizten Öfen durch die einmalige Induktionserwärmung des Rohlings. Durch die Induktionserwärmung verkürzt sich die Aufheizzeit, so dass das Material durch höhere Austenitisierungstemperaturen, kürzere Haltezeiten und ein lokal unterschiedliches Härtetemperaturprofil andere Gefügeeigenschaften erhält als beim konventionellen Herstellungsverfahren. Dieser Zusammenhang ist bei dem neu entwickelten EnRed-Verfahren gezielt zur Prozessgestaltung und dessen Auslegung genutzt worden.

Die induktive Erwärmung führt zu einer geringeren Randzonenentkohlung und begünstigt dadurch die Bildung von härteren Gefügearten nach dem Vergüteprozess. Darüber hinaus kann der Gefügeaufbau der Randzone mit dem EnRed-Verfahren gezielt gestaltet werden. Diese beiden Effekte werden dazu genutzt, in der Randschicht ein höheres Druckeigenspannungsniveau zu erzeugen, was in der Praxis zu deutlich höheren Produktlebensdauern führt.

Innerhalb des Projektes ist es gelungen, alle untersuchten Parabel-Lenkerfedertypen mit dem EnRed-Verfahren prozessstabil herzustellen. Die Erwärmungstemperaturen lagen zwischen 1.080 und 1.100°C. Die geforderten Produkteigenschaften sind dabei erreicht und z.T. noch deutlich übertroffen worden.

Durch Energievergleiche mit konventionellen Herstellungsverfahren konnte der Nachweis erbracht werden, dass durch Einsatz des EnRed-Verfahrens rund ein Drittel an Primärenergie eingespart werden kann. Dies entspricht in absoluten Zahlen einer Einsparung von rund 30.000 MWh p.a. Bei Übertragung auf Parabelfedern ergeben sich weitere Perspektiven von knapp 100 GWh für den europäischen Federnbedarf.

Für die CO₂-Bilanz stellen sich durch das EnRed-Verfahren ähnliche Einsparpotenziale dar. Bezogen auf den europaweiten jährlichen Bedarf an Parabel-Lenkerfedern lässt sich bei konsequenter Anwendung des neu entwickelten Verfahrens der CO₂-Ausstoß um mehr als 7.000 Tonnen p.a. reduzieren.

Die Entwicklung des EnRed-Verfahrens steht mit Ablauf dieses Projektes erst am Beginn seiner Entwicklungsmöglichkeiten. Weitere Energieeinsparungen sind möglich durch

- Reduktion der Aufheiztemperaturen in Richtung 1.000° C
- Weniger Materialeinsatz pro Lenkerfeder durch höhere erzielbare Lebensdauern
- Geringerer Energieverbrauch durch weniger benötigte Ersatzlenkerfedern
- Weitere Gewichtseinsparungen durch gezielte Ausnutzung der Eigenschaften des Werkstoffes Stahl

Aufgrund des völlig neuen Prozesses waren zu Projektbeginn erhebliche technische und kaufmännische Risiken vorhanden. Der Deutschen Bundesstiftung Umwelt (DBU) gilt an dieser Stelle besonderer Dank, die durch finanzielle Förderung der Entwicklung des EnRed-Verfahrens die Entscheidung zur Durchführung dieses innovativen Projektes positiv beeinflusst hat. Anzumerken ist, dass die in dem Projektantrag formulierten Ziele innerhalb des Projektes vollständig erreicht worden sind.

5. Stand der Technik

Der Umformungsprozess von Parabellenkern erfolgt beim herkömmlichen Stand der Technik durch mehrfaches Erwärmen von Werkstückabschnitten auf ca. 1.000 °C und sich daran anschließende Umformprozesse. Der 4. Erwärmungsschritt dient zum Anlassen. Der Verfahrensablauf erfolgt entsprechend der folgenden Ablaufschritte:

A 1	Sägen von der Stange
A 2	Erwärmungs- und Umformungsprozess des vorderen Lenkerarms
A 2.1	Erwärmung des vorderen Lenkerarms in gasbeheiztem Ofen
A 2.2	Auswalzung des vorderen parabelförmigen Querschnittverlaufs
A 2.3	Richten des vorderen Lenkerarms
A 2.4	Formschnitt des vorderen Lenkerarms mit hydraulischer Presse
A 2.5	Rollen des Lenkerauges
A 2.6	Kalibrieren der Lenkeraugenbreite
A.2.7	Abkühlung des Lenkers
A 3	Erwärmungs - und Umformungsprozess des hinteren Lenkerarms
A 3.1	Erwärmung des hinteren Lenkerarms in gasbeheiztem Ofen
A 3.2	Auswalzung des hinteren parabelförmigen Querschnittverlaufs
A 3.3	Richten des hinteren Lenkerarms
A 3.4	Formschnitt und Lochung des hinteren Lenkerarms
A 3.5	Kröpfung des Lenkers (Formgebung des stufenförmigen Verlaufs)
A 3.6	Abkühlung des Lenkers
A 4	Erwärmungs- und Umformungsprozess des gesamten Lenkers
A 4.1	Erwärmung des gesamten Lenkers in gasbeheiztem Ofen
A 4.2	Herstellung der Sprengung (Wölbungsverlauf) mittels hydraulischer Presse
A 5	Härtung des Lenkers im Ölbad
A 6	Anlassen

Tabelle 1 Herstellungsprozess eines Parabellenkers mit konventionellem Verfahren

6. Konzept des EnRed-Verfahrens

In dem Projekt ist der Erwärmungs- und Umformprozess von Parabellenkern neu gestaltet worden, so dass die genannten Nachteile bei der Herstellung deutlich reduziert werden konnten. Dazu wurden die drei bisher getrennten Erwärmungsschritte auf einen Aufheizprozess reduziert und alle daran anschließenden Umformungen am Werkstück in einer verkürzten Prozesskette zusammengefasst. Die insgesamt auf zwei Erwärmungsschritte verkürzte Prozessfolge zur Substitution der oben beschriebenen Ablaufschritte A1 bis A6 wird im Folgenden dargestellt:

B 1	Erwärmungs- und Umformungsprozess des gesamten Lenkers
B 1.1	Erwärmung des benötigten Abschn. der Rohmaterialstange mittels Induktion
B 1.2	Abschneiden auf Längenmaß
B 1.3	Auswalzung beider Lenkerenden
B 1.4	Richten des vorderen und hinteren Lenkerarms
B 1.5	Formschnitt und Lochung des Lenkers
B 1.6	Rollen des Lenkerauges
B 1.7	Kalibrieren der Lenkeraugenbreite mit hydraulischer Presse
B 1.8	Formgebung (Erzeugung von Kröpfung und Sprengung) mit hydraulischer Presse
B2	Härtung des Lenkers im Ölbad
B 3	Anlassen

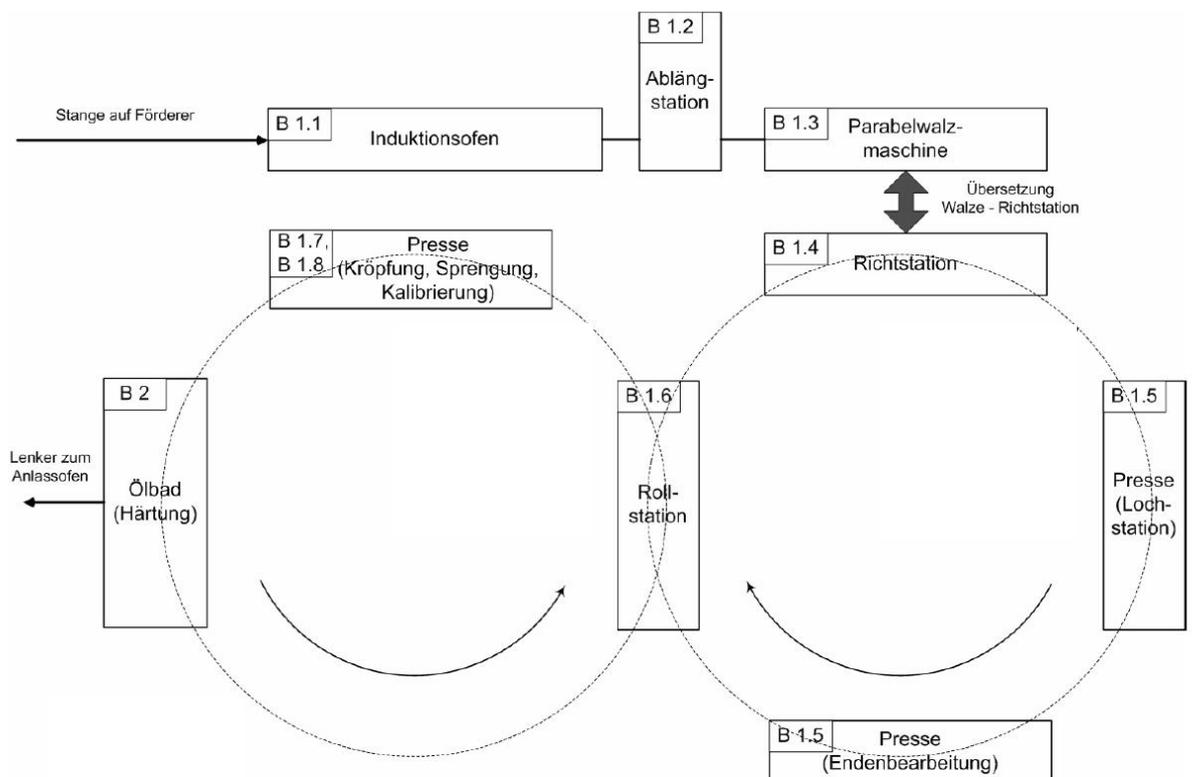
Tabelle 2: Herstellungsprozess eines Parabellenkers mit dem EnRed-Verfahren

7. Realisierung

7.1 Produktionsanlage

Zur Realisierung des verkürzten Ablaufes mit nur einmaliger Erwärmung bis zum Härten ist es erforderlich, dass das Werkstück noch ausreichend hohe Temperatur für den Härteprozess aufweist. Diese beträgt 830 °C. Dazu ist eine ausreichend hohe Ausgangstemperatur erforderlich. Da die Aufheizung auf Temperaturen von über 1.000 °C oxidative Prozesse, wie Randzonenentkohlung und Verzunderung des Werkstückes, begünstigen, ist eine sehr kurze Erwärmungsphase anzustreben, die mittels Induktion oder Konduktionsaufheizung realisiert werden kann. Im Projekt ist die Entscheidung für die Induktionserwärmung getroffen worden. Als zweite Voraussetzung ist die Begrenzung der Durchlaufzeit von der Erwärmung bis zur Abhärtung zu nennen, damit sich das Bauteil während dieser Zeit nicht zu stark abkühlt. Hierzu ist die Parabelwalze als zeitkritische Anlagenkomponente neu entwickelt worden. Sie ist in der Lage, in nur einem Prozess beide Seiten der Lenkerfeder auszuwalzen.

Während des Herstellungsprozesses wird das Langmaterial der Induktionsanlage zugeführt (Bild 2) und entsprechend des herzustellenden Artikels abgelängt. Anschließend wird der Abschnitt auf beiden Seiten ausgewalzt. Die Richtmaschine erzeugt die notwendige Symmetrie für die anschließende Bearbeitung des hinteren Lenkerendes, die aus Loch-, Schneide- und Prägeoperationen besteht. Die Augenformanlage rollt anschließend das Auge an das vordere Lenkerende, dessen Breite mittels einer Kalibrierpresse auf Nennmaß gebracht wird. In der Formgebungsoperation werden die Kröpfung und die Sprengung erzeugt und der gesamte Lenker auf Maß kalibriert. Anschließend findet im Werkstück eine martensitische Gefügeumwandlung durch Abschreckung im Ölbad statt. Zur Erzeugung der gewünschten mechanischen Bauteileigenschaften wird das Werkstück abschließend angelassen.



© Schomäcker Federwerk GmbH 2010

Bild 2: Prinzipskizze der EnRed-Produktionsanlage

Die Entwicklung der Produktionsanlage konnte innerhalb der vorgegebenen Parameter umgesetzt werden:

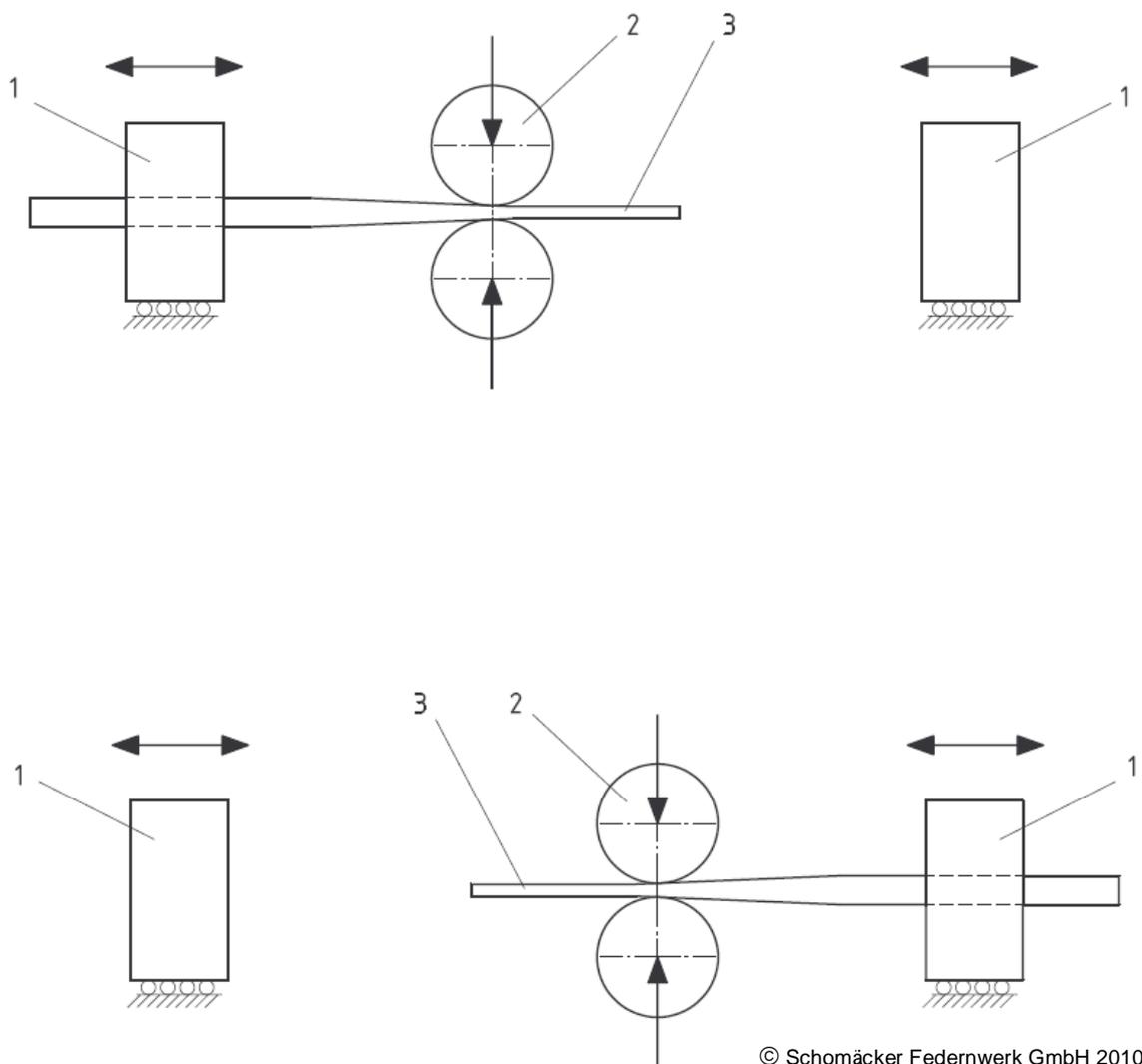
- Zuführung des erwärmten Halbzeugs
- Parabelwalzmaschine
- Richtmaschine
- Augenformmaschine
- Warmbearbeitungsmaschinen und
- Handhabungssysteme,

die eine Bearbeitung des Werkstückes innerhalb der metallurgisch bedingten, kurzen Bearbeitungszeit ermöglichen.

Eine wesentliche Herausforderung bei der Entwicklung bestand in der Verkürzung der Bearbeitungszeit. Sowohl der gesamte Ablauf als auch die Einzelschritte konnten auf die Vorgabezeiten verkürzt werden. Durch die Neugestaltung der Parabelwalze konnten nennenswerte Durchlaufzeiteinsparungen realisiert werden.

7.2 Parabelwalze

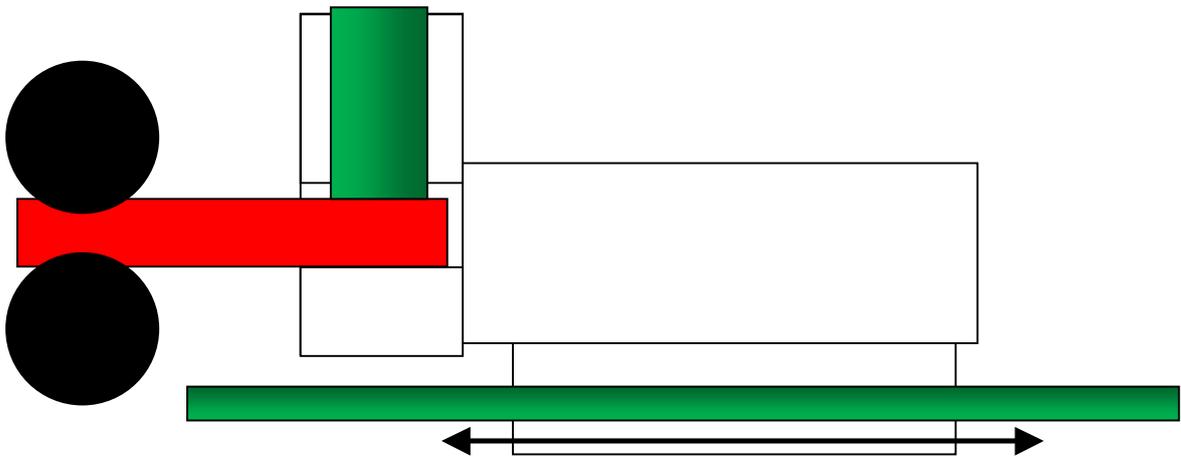
Das Werkstück wird dazu auf beiden Seiten durch Steuerung des Walzenspaltes (Bild 3) entsprechend der vorgegebenen Bauteilgeometrie verjüngt.



© Schomäcker Federwerk GmbH 2010

Bild 3: Prinzipskizze der Parabelwalze

Der Walzschlitten wird von einer Linearführung geführt und klemmt das Werkstück mittels einer hydraulisch betätigten Klemmvorrichtung. (Bild 4).



© Schomäcker Federwerk GmbH 2010

Bild 4: Prinzipskizze der Schlitten

7.3 Werkstückklemmung

Zur Fixierung des Werkstückes in der Parabelwalze ist eine entsprechende Klemmeinheit entwickelt worden, die in der Lage ist, die für das Walzen erforderliche hohe Zugkraft so in das Werkstück einzuleiten, dass es dabei nicht beschädigt wird. Die durch die extrem niedrige zur Verfügung stehende Prozesszeit erforderlichen hohen Beschleunigungen der Anlagenkomponenten, die durch die Klemmungen an das Werkstück übertragen werden, führen dabei nicht zu unerlaubten Beschädigungen an der Werkstückoberfläche. Abhängig von den in das Werkstück eingeleiteten Kräften, der Greifposition und der Bewegungsbahn beim Transport des Werkstückes mit unterschiedlichen Störkonturen werden verschiedene Lösungen hinsichtlich der Greiferkinematik, der Klemmkrafteinleitung und der Klemmbackengestalt verwendet.

So werden die Einflüsse der Klemmeinheiten auf die Qualität der Werkstücke innerhalb der Grenzen der metallurgischen Eigenschaften und der Oberflächenstruktur gehalten.

8. Produkte

8.1 Geometrie

Die Bilder 5 und 6 zeigen die typische Geometrie eines Lenkers. Je nach Artikel liegt die Breite des Ausgangsmaterials zwischen 50 und 100 mm, die Höhen zwischen 40 und 70 mm und die Längen der Stangenabschnitte zwischen 600 und 1000 mm.

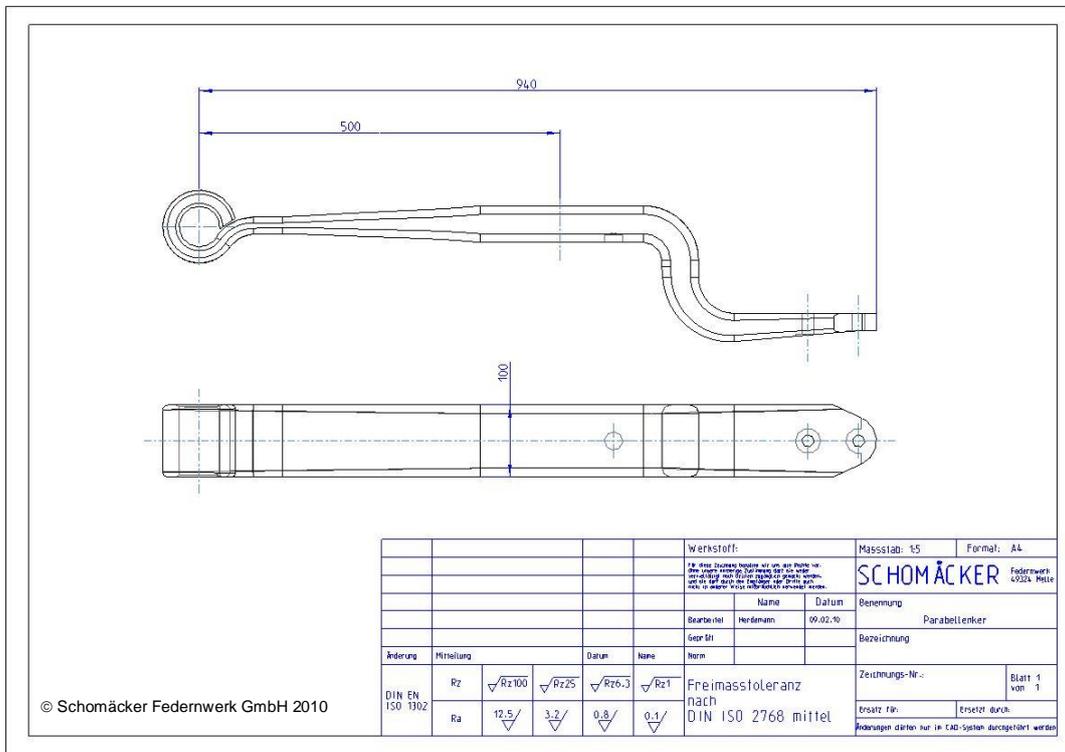


Bild 5: Endkontur eines typischen Parabellenkers für Anhänger-Luffederungen

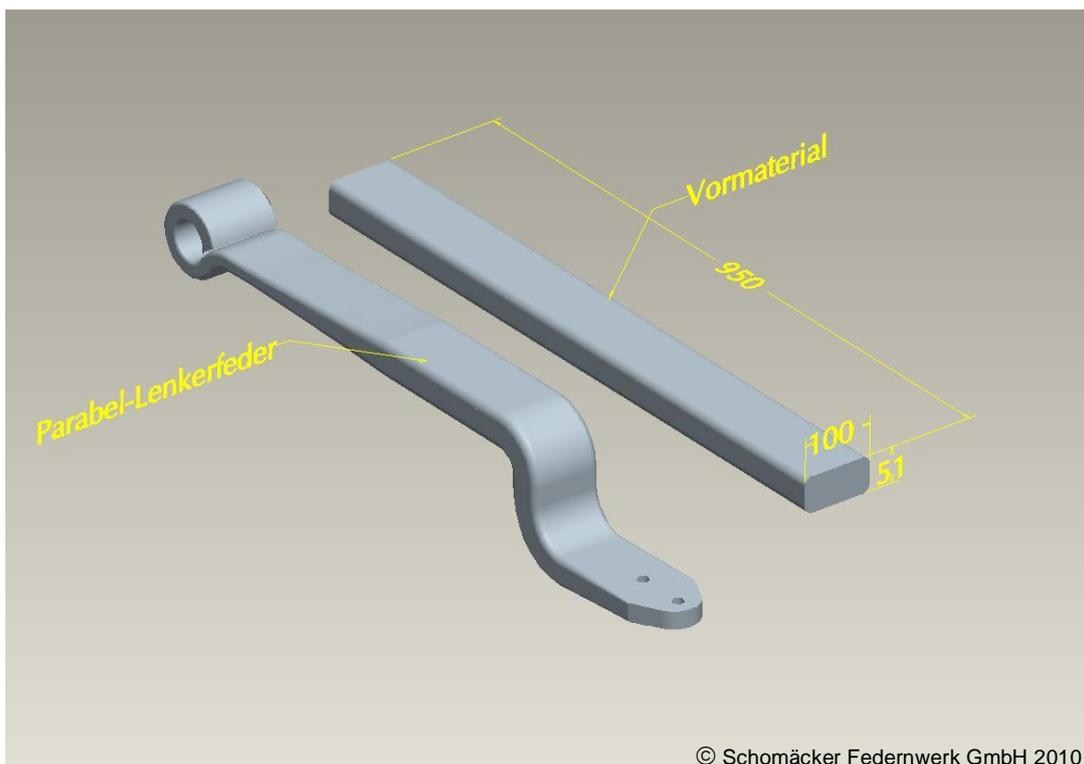


Bild 6: 3D-Ansicht der Parabel-Lenkerfeder

8.2 Vormaterial

Bei dem Vormaterial werden in der Federnindustrie üblicherweise zwei Materialqualitäten eingesetzt. Es handelt sich um die niedriglegierten Edelbaustähle für warmgeformte, vergütbare Federn 51CrV4 und 52CrMoV4, welche gemäß der EN 10089: 2002 und ergänzenden Sonderspezifikationen bestellt werden. Dabei wird ein homogenes Gefüge über den gesamten Produktquerschnitt gefordert. Bei dem gelieferten Vormaterial ist herstellungsbedingt mit lokalen Abweichungen der chemischen Zusammensetzung von den spezifizierten Werten zu rechnen, wie sie in der mitgelieferten Analyse beschrieben ist. Das Vormaterial weist dabei zwei Schwächen auf:

- Zum einen besteht aufgrund der Erwärmung in oxidierenden Atmosphären eine unregelmäßig ausgeprägte Randentkohlungszone, welche innerhalb des Halbzeugs von Seite zu Seite schwankt und unterschiedlich starken Entkohlungsgrad aufweist.
- Zum anderen prägen sich mit wachsendem Querschnitt des Produktes die Kernseigerungen stärker aus.

Die gewünschten Eigenschaften des fertigen Produktes werden durch dessen Vergütung erzeugt, was wiederum bedeutet, dass aufgrund der Unterlegierung am Rande des Bauteils und der Überlegierung im Kern lokal unterschiedliches Vergüteverhalten des Werkstoffes vorhanden ist.

9. Gestaltung des Produktionsprozesses

Mit wachsenden Querschnittsunterschieden innerhalb des Produktes steigen die Unterschiede im örtlichen Aufheiz- und Abkühlverlauf. Durch den Einsatz eines einzigen Abkühlmediums (Härteöl) sind den zu erreichenden Abkühlgeschwindigkeiten klare Grenzen gesetzt, welche nur geringfügig durch die Wahl der Härte- bzw. Abschrecktemperatur beeinflussbar sind. Dementsprechend gibt es Verschiebungen in den ZTA bzw. ZTU Diagrammen (vgl. Bild 9), welche dazu führen, dass keine gleichmäßige Primärhärtung und somit auch kein gleichmäßiges Anlasshärtebild über dem Querschnitt erreicht wird.

Das beim EnRed-Verfahren eingesetzte Auswalzen des Produktes erfordert höhere Austenitisierungstemperaturen als beim konventionellen Prozess. Durch Anwendung höherer Umformgrade kann dem Kornwachstum entgegengewirkt werden. Die mit der Anwendung der Induktionserwärmung verbundene Lage des Energiemaximums unterhalb der Oberfläche reduziert die Verzunderung und die Entkohlung der Oberfläche. Die im Kern gespeicherte Energie kann gezielt zum Nachwärmen der kalt gewordenen Oberflächenbereiche genutzt werden. Der vom Kern zur Oberfläche gerichtete Wärmestrom führt zu einem Kornwachstum in gleicher Richtung.

Unter den Aspekten der Werkstoffhärtebarkeit wurde bei der Prozessgestaltung der Zielgefügezustand des Produktes festgelegt. In der Randschicht des Produktes ist zumindest die Vergütung in der unteren Zwischenstufe anzustreben. Optimal ist dabei die Bildung feinkörnigen Lattenmartensits mit einer Martensitnadellänge von ca. 20 µm oder feiner. Im geseigertem Kern ist es dagegen unvermeidbar, dass eine martensitische Aufhärtung stattfindet. Den großen Spannungsunterschieden im Kern ist durch einen ca. 20%-Anteil bainitischen Gefüges und durch niedrige Primärhärte in den Seigerungsstreifen zu begegnen, was zur Folge hat, dass das Seigerungsgefüge leichter angelassen werden kann. Dieser Zielzustand wird unabhängig von der Streuung der chemischen Zusammensetzung des gelieferten Stahlwerkstoffes angestrebt. Damit lassen sich unzulässig hohe Spannungen infolge der Vergütung vermeiden und eine hohe Zähigkeit des Produktes erreichen.

Die verzugsarme Vergütung wird dadurch erreicht, dass während der gesamten Prozesskette die Differenzen zwischen den Oberflächen- und den Kerntemperaturen in den Aufheiz-

und Abkühlphasen so gestaltet werden, dass keine großen Spannungsunterschiede im Produkt entstehen [Eck77].

Für die Prozessgestaltung ergeben sich damit folgende Prinzipien, welche zu beachten sind:

- Es darf sich an der Oberfläche des Produktes kein ferritisches Gefüge vor dem Abschrecken bilden.
- Die maximale Austenitisierungstemperatur muss so gewählt werden, dass nach der letzten Umformung die mindestens benötigte Härtetemperatur an der kritischen Stelle des Produktes vorhanden ist.
- Die maximale Austenitisierungstemperatur muss so gewählt werden, dass beim EnRed-Verfahren die vorgeschriebenen Umformgrade realisiert werden, ohne dass das Gefüge voll dynamisch rekristallisiert.
- Während der Abschreckung ist der $t_{3/5}$ – Temperaturgradient möglichst steil zu gestalten.
- Die Oberflächentemperatur am Produkt vor dem Anlassprozess darf den Flammpunkt des Härteöls nicht überschreiten.

Die auf die Produkteigenschaften und Lebensdauererwartungen gezielt angepasste Prozessauslegung innerhalb des Projektes hat seitens der Hauptkunden zu einer schnelle Prozess- und Produktfreigabe gemäß der VDA 4 geführt. Die Freigabe der werkstofflichen Eigenschaften erfolgte anhand der Gefügeuntersuchungen und der Lebensdauerests.

9.1 Auslegung des Umform- und Vergüteprozesses

Aus Voruntersuchungen der Wärmebehandlungsprozesse zu Beginn des Projektes war bekannt, dass das bei dem EnRed-Verfahren erzeugte Gefüge gegenüber dem Gefüge aus der konventionellen Fertigung höhere Dauerfestigkeitswerte aufweisen wird [Pet97], [Eck77], [Ra65]. Diese Untersuchungen wurden für einstufige Prozesse durchgeführt und ausschließlich an Proben, jedoch nicht an Produkten, getestet. Die Fertigung einer warmgeformten Feder beinhaltet eine Abfolge von Warmumformschritten, welche neben der Wärmebehandlung einen entscheidenden Einfluss auf die Ausbildung des Materialgefüges besitzen.

Dieser Zusammenhang bedurfte einer analytischen Beleuchtung der Werkstoffeigenschaften des Produktes während der Umform- und Abkühlprozesse. Die durchgeführte Wärmebehandlungsauslegung fand unter folgenden Annahmen statt:

- Vollständige Durchwärmung des Querschnittes
- Homogener Gefügestand
- Ermittlung der Abkühlkurven am Federstahl unter Berücksichtigung des Einflusses der Zunderbildung

Im Folgenden werden exemplarisch die theoretischen Ergebnisse dieser Abschätzungen dargestellt und durch mechanische Kennwertermittlung unterstützt.

9.1.1 Austenitisierungsprozess

Die Austenitisierung des Stangenmaterials durch eine Induktionsspule erfolgt mit einer wesentlich höheren Aufheizgeschwindigkeit als bei der herkömmlichen Gaserwärmung, welche bei einer Aufheizgeschwindigkeit von ca. 0,8°C/s stattfindet. Dabei wird angestrebt, dass die A_{c3} -Temperatur sowohl an der Oberfläche als auch im Kern überschritten und angeglichen wird.

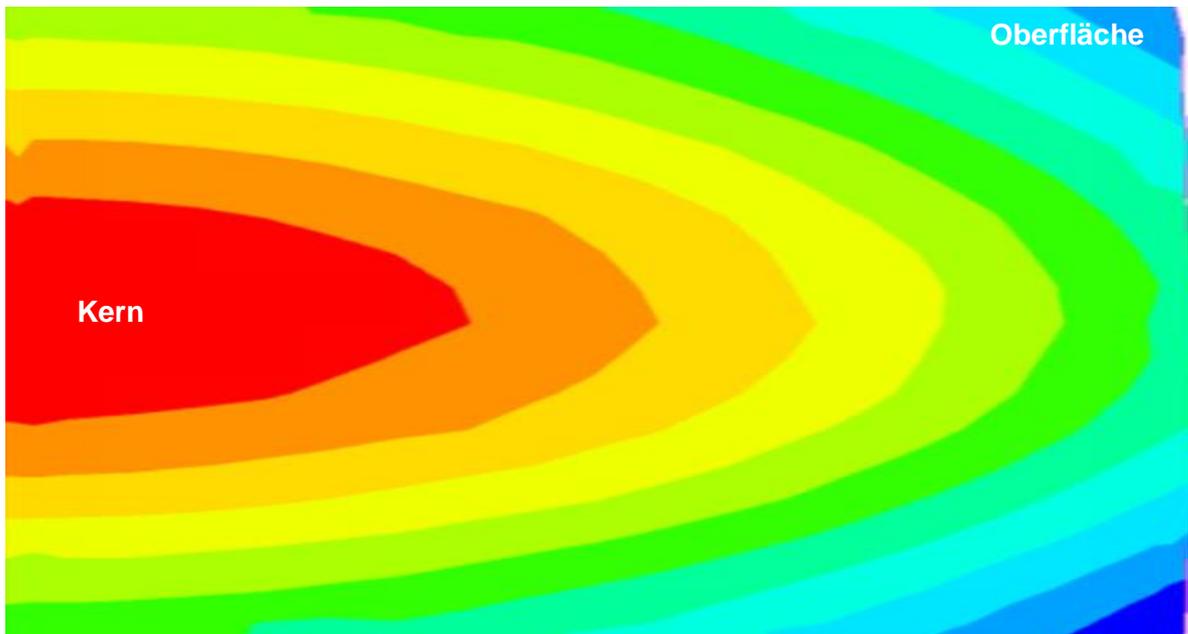


Bild 7: Temperaturverteilung im Werkstoffquerschnitt

Grundsätzlich sind die werkstofftechnischen Vorgänge in der Hochtemperaturphase des EnRed-Prozesses ähnlich wie beim konventionellen Austenitisieren. Es kommt allerdings zu zeitlich temperaturabhängigen Verschiebungen der Umwandlungslinien im ZTA-Diagramm, was dazu führt, dass bestimmte Diffusionsprozesse sehr verlangsamt oder gar nicht ablaufen. Folglich muss dem Vorbehandlungszustand des eingesetzten Werkstoffes größere Aufmerksamkeit geschenkt werden. Im Vergleich zu der konventionellen Austenitisierung ergeben sich folgende Vorteile:

- Geringere Zunderschichtdicken
- Geringere Randentkohlungstiefen
- Geringerer Entkohlungsgrad in der Randschicht
- Erheblich kleinere Austenitkornsehnenlänge

Diese Vorteile können nur dann genutzt werden, wenn die werkstoffbedingte Temperatur-Zeit-Folge beim Austenitisieren exakt eingehalten wird, denn die mehrfache Kornneubildung durch Umkristallisation beim Überschreiten der Umwandlungslinien, wie es im konventionellen Prozess auftritt, ist nicht mehr gegeben.

9.1.2 Halte- und Umformprozess

Der konventionelle Halteprozess zur Herstellung des „homogenen“ Gefügestandes vor der Umformung entfällt beim EnRed-Verfahren. Er verteilt sich auf kleinere Zeitintervalle zwischen den einzelnen Teilumformprozessen, wobei die Eigennachwärmung zur Erreichung des Temperatenausgleiches der abgekühlten Bereiche gezielt genutzt wird.

Der Umformprozess und insbesondere der Umformgrad ist dabei eine Steuergröße zur Erzeugung der Werkstoffmikrostruktur des Produktes. Insbesondere ist der Umformprozess so zu gestalten, dass die höchstbeanspruchten Teile der Parabel-Lenkerfeder verformt werden, so dass eine gezielte Gefügestruktur in Richtung der Hauptbelastung entsteht. Dabei ist zu verhindern, dass die Struktur nicht vollständig dynamisch rekristallisiert, denn eine martensitische Umwandlung wird im wesentlichen durch die Existenz von Gitterfehlern begünstigt.

9.1.3 Abschreckprozess

Das bei der konventionellen Fertigung über dem Produktquerschnitt gewünschte einheitliche Gefügebild wird beim EnRed-Verfahren aus zwei Gründen nicht zwingend angestrebt.

- Die Belastung ist innerhalb des Produktes nicht konstant.
- Das Gefüge des lieferbaren Vormaterials erschwert die Einhaltung dieses Kriteriums (gilt auch für die konventionelle Fertigung).

Für die Prozessführung wurde der wärmebehandlungskundliche Grundsatz angewendet, so schnell wie möglich und so milde wie möglich abzuschrecken. Zur produktionstechnischen Umsetzung kam es nur in Frage, ein Härtemedium im kontinuierlichem Abschreckprozess zu benutzen. Aus den Wärmeübergangskurven (vgl. Bild 8) der vorhandenen Härtemedien wurde schnell deutlich, dass diese Forderung zum überwiegenden Teil durch die gezielte Einstellung des Temperaturprofils am Bauteil mit der EnRed-Prozesskette zu erfüllen sein wird.

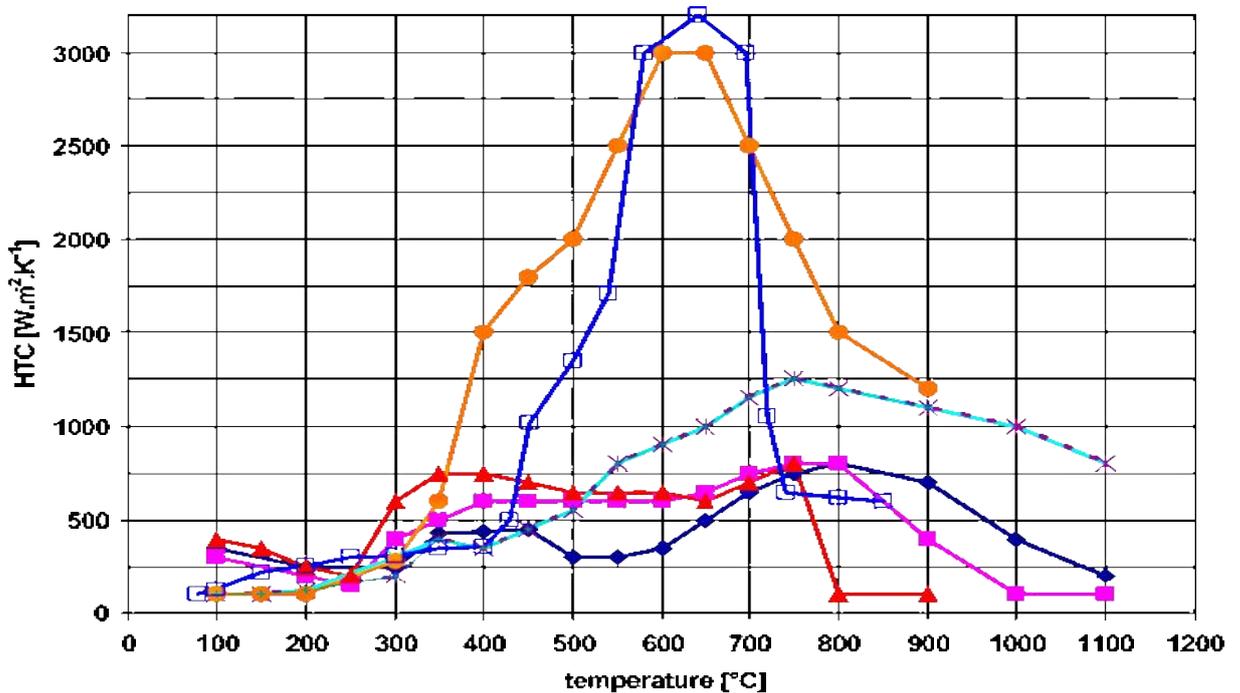


Bild 8: Wärmeübergangskoeffizientkurven unterschiedlicher Härtemedien [Tom07]

Eine Optimierung des Abschreckgefüges konnte durch die Modifikation des Härtemediums in der Konvektionsphase des Abschreckprozesses erzielt werden.

Das im Produkt lokal benötigte Gefügebild leitet sich aus dem Belastungskollektiv des Parabellenkers ab. Nachdem die Belastungsprofile für bestimmte Bauteilbereiche ermittelt und klassifiziert worden sind, war es möglich, den Umform- und Härteprozess zu entwerfen.

Es stellt sich grundsätzlich die Frage nach den örtlichen Abkühlgeschwindigkeiten, die am Produkt erreicht werden sollen, um den geforderten Gefügeverlauf zu erzeugen. Durch eine iterative Vorgehensweise bei der Auslegung der EnRed Prozessschritte, die durch Fertigungsversuche unterstützt worden sind, konnte anhand der aufgenommenen Abkühlkurven (wie im Abschrecktest nach ISO 9950 an geometrisch abgewandelten Härteproben aus dem Federwerkstoff 51CrV4) ein ortsabhängiger Härte-temperaturverlauf definiert werden, der die erzeugte Gefügestruktur festlegt (Bild 9).

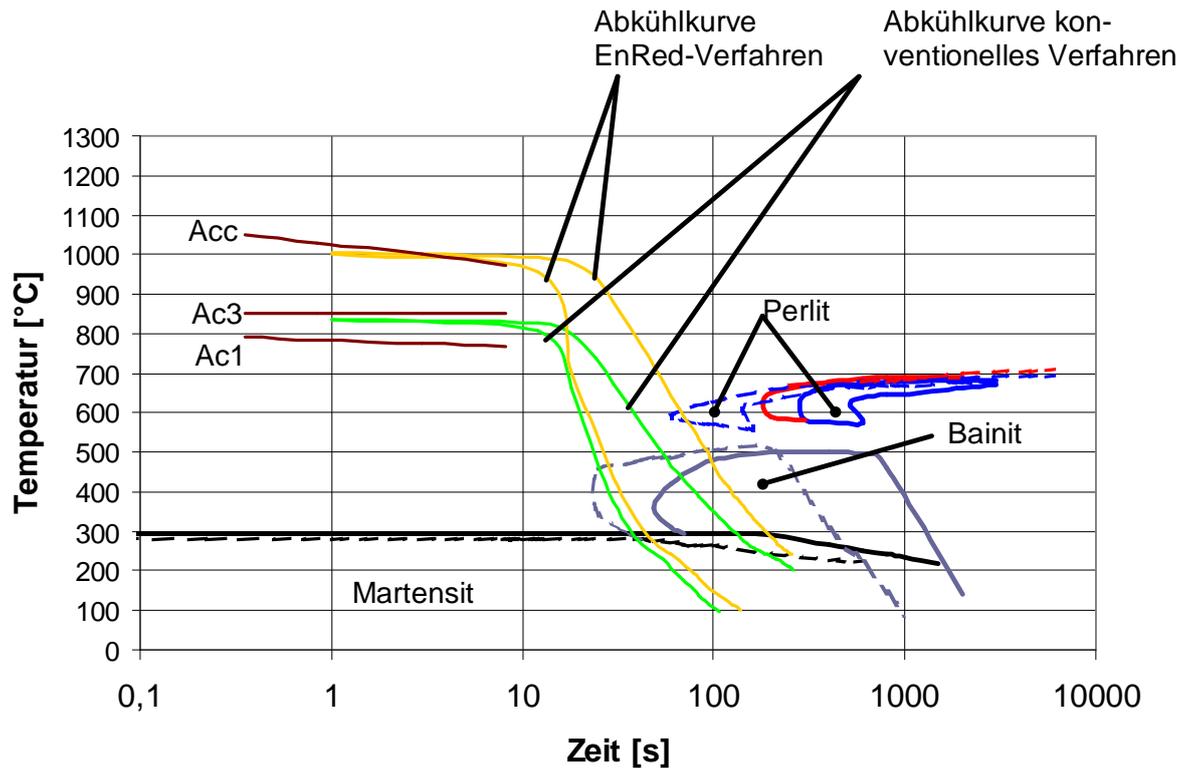


Bild 9: Errechnete Gefügestruktur im Betrachtungsquerschnitt bei einer Oberflächentemperatur nach der Austenitisierung von 1050°C und einer Aufheiz- und Haltezeit von jeweils 3 min. für Grenzchargen

Abschreckversuche am Produkt haben die erwarteten Gefügestrukturen metallographisch bestätigt.

9.1.4 Anlassprozess

Aus Gründen der Prozesssicherheit wurde bei der Prozessauslegung des EnRed-Verfahrens auf das Anlassen der Bauteile nicht verzichtet. Der Gefahr der Restaustenitbildung infolge der schnelleren Austenitisierung wurde gefügetechnisch durch die Wahl der Vormaterialqualität sowie durch die Zulassung von ca. 20% Bainitanteil in der Nähe der neutralen Fase der Parabelkerfeder vorgebeugt. Grundsätzlich wurden am Produkt folgende positive Eigenschaftsänderungen infolge der EnRed-Verfahrenskette festgestellt:

- Höhere Bruchreserve
- Höhere Gleichmaßdehnung
- Längere Lebensdauer der Produkte

9.2 Verzug und Genauigkeit

Eine der größten Herausforderungen bei der Herstellung von warmgeformten Parabelkerfedern ist die Einhaltung der Symmetrievorgaben bezüglich der Längsachse des Produktes. Die systematische Erfassung der Einflüsse auf Symmetrieabweichung sowie deren Darstellung ist in dem folgenden Ishikawa-Diagramm (vgl. Bild 10) dargestellt.

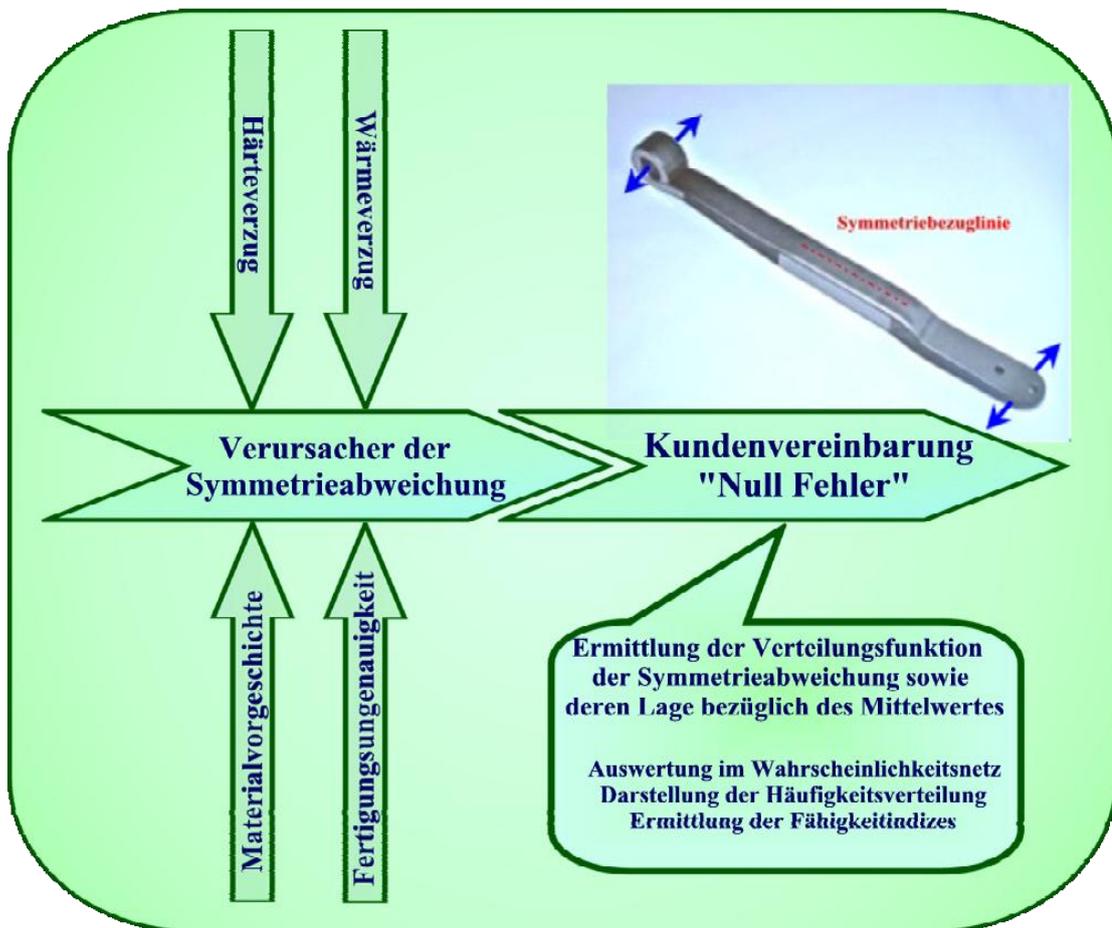


Bild 10: Ursachen-Wirkungs-Diagramm für das Merkmal Längssymmetrieabweichung

Die Ursachen für Symmetrieabweichungen am fertigen Bauteil beginnen bereits bei dem eingesetzten Vormaterial, welches aufgrund von Aufheiz- und Abkühlprozessen einen Eigenspannungszustand in Folge des sich dadurch einstellenden inhomogenen Gefüges aufweist. Zusätzlich zu diesen Spannungen kommen die Restspannungen aus der mechanischen Bearbeitung, z. B. dem Kaltrichten des Stangenmaterials im Stahlwerk, hinzu. Diese Einflussgrößen werden durch die Streuung der Materialeigenschaften zwischen verschiedenen Lieferanten noch verstärkt.

Um den Verzug zu analysieren, der durch das EnRed-Verfahren entsteht, mussten folgende Voraussetzungen erfüllt werden:

- In den Messreihen wird das Vormaterial eines einzigen Lieferanten eingesetzt.
- Es erfolgt chargenreine Fertigung.
- Messungen erfolgen immer am gleichen Produkt, an gleichen Stellen mit gleicher Methode und mit gleichem Personal.

Dadurch konnte der Einfluss des Vormaterials herausgefiltert werden und die Untersuchung konnte sich auf die verbleibenden drei Ursachen konzentrieren:

- Einfluss der Fertigungsungenauigkeiten auf die Produktsymmetrie
- Einfluss des Wärmeverzugs (Aufheiz- und Abkühlvorgänge)
- Einfluss des Härteverzuges auf die Parabellenkersymmetrie

Nach jedem Prozessschritt der konventionellen Fertigung wurde die Parabellenkersymmetrie bezüglich der Mittelachse des Produktes gemessen, die entsprechende Abweichung aufgezeichnet und mit den Ergebnissen des „internen Vorlieferanten“ verglichen.

Für die Prozessauslegung des EnRed-Verfahrens wurden aus Vorversuchen mit dem konventionellen Verfahren folgende Erkenntnisse gewonnen:

- Der Wärmeverzug ist beim Aufheizen sehr gering und liegt knapp über dem Messfehler der Messvorrichtung.
- Die Zwischenabkühlung nach einer Umformstufe hat einen wesentlichen Einfluss auf den Verzug des Produktes, was zum Teil auf die Lufthärtungseigenschaften der eingesetzten Federwerkstoffe zurückzuführen ist, zum anderen Teil auf die Einflüsse der Abkühlstrecke der Anlage.
- Eine ungleichmäßige Umströmung des Produktes beim Abschrecken führt zur unkontrollierten Streuung der Symmetriewerte.
- Der Anlassverzug liegt im Bereich des Messfehlers und kann nicht eindeutig nachgewiesen werden.

Aus den Untersuchungsergebnissen wurden für das EnRed-Verfahren konkrete Grundsätze abgeleitet und umgesetzt:

- Für die höchste Produktgenauigkeit ist es notwendig, eine kräfteoptimierte Behandlung des Werkstücks anzuwenden.
- Die Umströmung und der Transport der Produkte beim Abschrecken muss bezüglich der Verzugsrichtung optimiert werden.
- Die Abschreckwirkung des Härtemediums muss in der Konvektionsphase an die Gegebenheiten angepasst werden.

9.3 Oberfläche und Randzone

Die meisten Stähle, und insbesondere Si-Cr-legierte Stähle, verzundern in wasserdampf- und kohlenmonoxidhaltiger Atmosphäre wesentlich schneller als in trockener, kohlendioxidhaltiger Gasumgebung. In trockener Atmosphäre führen bereits kleine Mengen an Silizium zu einem Aufbau von stabilen Schutzschichten. Dieser Aufbau einer Zunderschicht folgt einem parabolischen Zeitgesetz, dessen Verlauf von der Betriebstemperatur abhängig ist, was die Vorausbestimmung der Verzunderungsgeschwindigkeit erschwert [Rah65]. Diese Schutzwirkung geht jedoch bei wasserdampfhaltigen und oxidationsfähigen Atmosphären verloren. D.h., das Wachstum der Zunderschichten wird sehr stark beschleunigt, die Schichten werden dicker, und aufgrund der unterschiedlichen Wärmeausdehnungskoeffizienten zwischen der Schicht und dem Grundwerkstoff kommt es zu deren Segmentierung und Abplatzung, was wiederum eine Schichtneubildung an diesen Stellen bedeutet. Die Verzunderung der Stahloberfläche hat dann keinen negativen Effekt, wenn der Aufbaumechanismus der Schicht im Prozess gezielt gesteuert werden kann.

Eine dünne und fest haftende Zunderschicht ist der einzige stabile Schutz der Stahloberfläche vor Randentkohlungen in oxidierenden Atmosphären und kann den Ausgleich des Kohlenstoffgehaltes während einer konventionellen Wärmebehandlung in die Randzone begünstigen [Eck77]. Bei dem EnRed Verfahren, bei dem der Austenitisierungsvorgang mittels Induktion innerhalb kurzer Zeit erfolgt, ist nicht ausreichend Zeit vorhanden, um die Kohlenstoffdiffusion gezielt zu beeinflussen. Bei der induktiven Austenitisierung geht es vielmehr darum, die Stahloberfläche möglichst schnell und dünn zu verzundern. Bei Vormaterial mit sehr geringer Entkohlungstiefe und geringem Entkohlungsgrad haftet die Zunderschicht sehr gut an der Oberfläche, platzt nicht ab und verursacht dadurch keine Narben. Die Eigenschaften der Randschicht bleiben dadurch praktisch unverändert.

Für die Gestaltung des Austenitisierungsprozesses lassen sich folgende Grundlagenprinzipien ableiten:

- Keine wasserdampfhaltige Verbrennungsgasatmosphäre verwenden
- Anteil an oxidierenden Gaskomponenten minimieren
- Trockene Gasatmosphäre beim Austenitisieren herstellen
- Temperatur-Zeit-Verlauf der Austenitisierung sehr steil wählen

Die Ausführungen werden durch die Vergleiche der nachfolgenden Gewichtszunahme- Zeit-Kurven bei zwei unterschiedlichen Temperaturen (750°C und 1050°C) und der Zunderkonstanten bei unterschiedlichen Si- Gehalten (0,35% und 1,14%) erläutert.

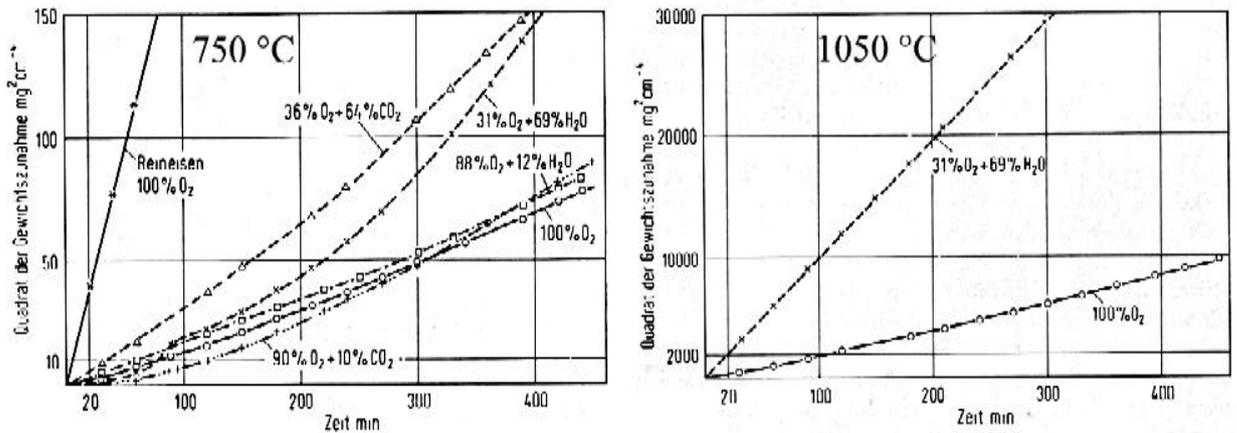


Bild 11: Gewichtszunahme-Zeit-Kurven eines Stahls mit 0,35% Si bei 750°C und 1.050°C [Rah65]

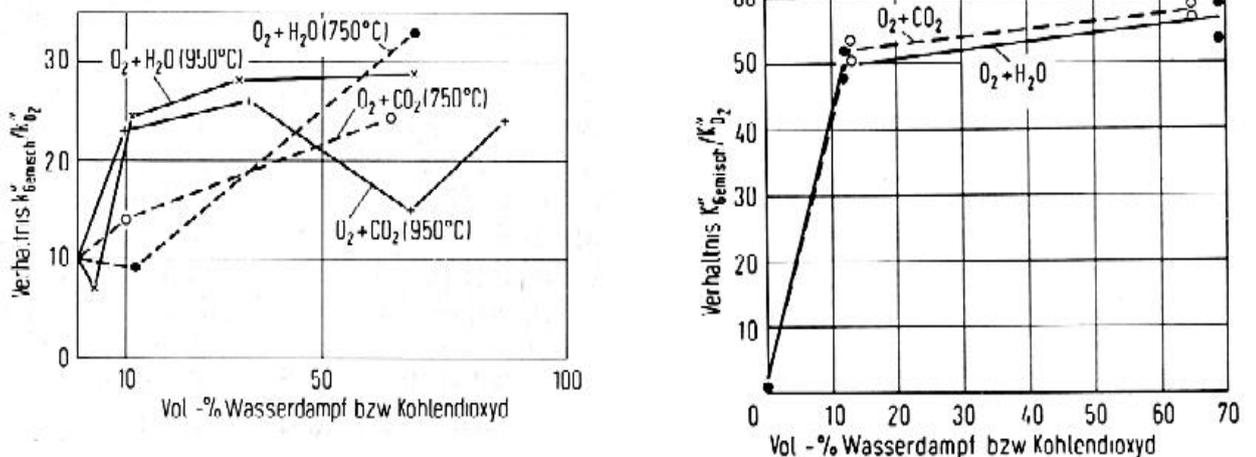


Bild 12: Einfluss steigender Wasserdampf- und Kohlendioxidgehalte auf die Zunderkonstante bei 0,35% Si, 750°C und 950°C (links) und bei 1,14% Si und 1.050°C (rechts) [Rah65]

Folglich ist die induktive Erwärmung der Federstähle eine Technologie, welche viel besser die vier Auslegungsregeln als die konventionelle Gaserwärmung erfüllt, bei der immer Wasserdampf entsteht. Somit können durch diese Technologie die Ausdehnungen der randentkohnten Zonen im Vergleich zur konventionellen Parabellenkerfertigung reduziert werden. Eine Randzone mit geringer Entkohlungstiefe und kleinem Entkohlungsgrad begünstigt die Bildung von härteren Gefügearten nach dem Vergüteprozess. Eine stark kohlenstoffhaltige Gefügeschicht neigt stärker dazu, sich eher elastisch als plastisch zu verformen und kann dazu genutzt werden, ein höheres Druckeigenspannungsniveau in der Randschicht zu erzeugen.

Als Hauptursache für Streuungen der Randentkohlung des Produktes verbleibt dann das eingesetzte Vormaterial.

Im Rahmen von Kundenfreigaben von Produkten, die mit dem EnRed-Verfahren hergestellt worden sind, wurde der Einfluss von Stählen verschiedener Hersteller auf die Produktqualität untersucht. Die Untersuchungen umfassten vier verschiedene Chargen namhafter europäischer Federstahlhersteller. Der Vergleich fand unter folgenden Bedingungen statt:

- Gleiche Prozesstaktzeit für jede Charge
- Gleiche Losgröße pro Fertigung
- Es wird immer der gleiche Lenker aus der Fertigungsfolge geprüft
- Metallographische Untersuchung der gleichen Stelle im Lenker
- Die Mikrohärteprüfung erfolgt unter den selben Bedingungen

Die Ergebnisse der Untersuchung wurden anhand der Zugfestigkeitsverläufe und der Mikrostruktur der Randschicht und des Kerns miteinander verglichen. Grundsätzlich war es möglich, gegenüber konventionell hergestellten Lenkerfedern die Zugfestigkeitswerte in der Randschicht um mindestens 200 MPa zu erhöhen. Dabei zeigte sich, dass trotz der erheblichen Prozessoptimierung und Qualitätsverbesserung am Produkt die Produktqualität der Parabellenker weiterhin vom Vormaterial abhängt.

10. Untersuchungsergebnisse

10.1 Grobkornbildung

Bei der EnRed Prozesskette wird durch die Induktionserwärmung der Werkstückkern auf eine höhere Temperatur als die Randschicht gebracht. Die im Vergleich zum konventionellen Prozess umgekehrte Wärmeverteilung ($T_{\text{Kern}} > T_{\text{Oberfl.}}$) verursacht eine Kornvergrößerung in der Querschnittsmitte des Materials, welche teilweise durch die Wahl der Vorbehandlung des Vormaterials beeinflusst werden kann. Im linken Teil von Bild 13 sind im Kernseigerungsstreifen die ehemaligen Austenitkorn Grenzen sichtbar.

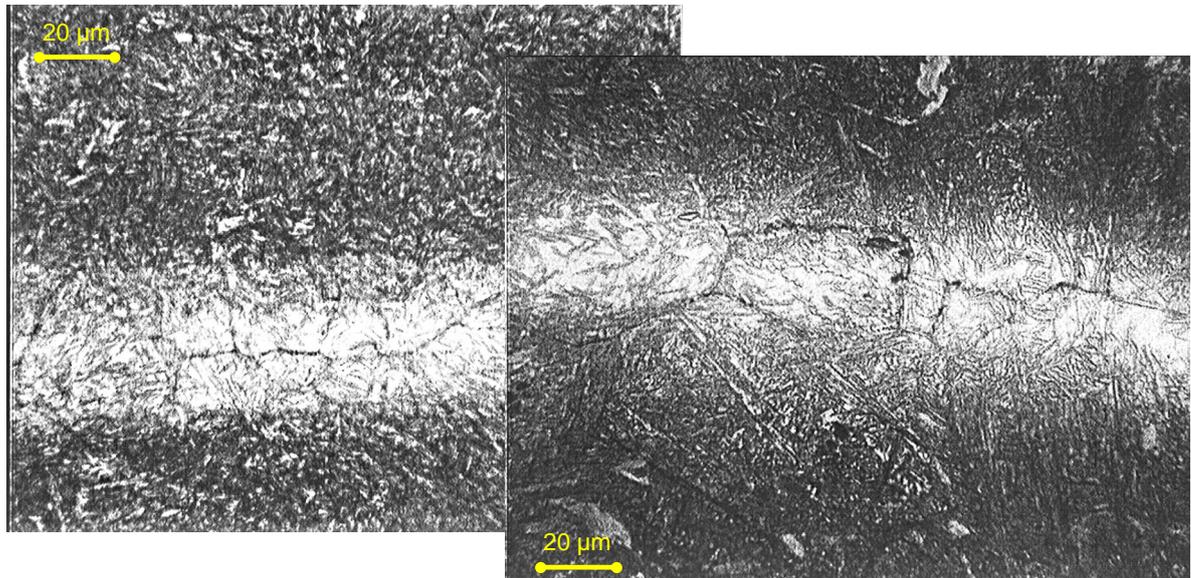


Bild 13: Kornbildung im Kern (angelassenes Gefüge)

Im Vergleich zu der linken Darstellung wurde rechts das Material eines anderen Stahlherstellers eingesetzt. Dieses Vormaterial besaß bereits im Anlieferungszustand eine gröbere Struktur des Normalgefüges, welche sich nach der Wärmebehandlung in der größeren Sehnenlänge in den ehemaligen Austenitkörnern widerspiegelt.

10.2 Gefügefleckigkeit

Die Untersuchung der Gefügefleckigkeit erfolgt an einem Längsschliff von Material aus dem Übergangsbereich zwischen der Randschicht und dem Kern. Bei den weißen Streifen handelt es sich um Verformungsgefüge, welches aufgrund der Defektdichte und der Kornorientierung etwas edler und somit schlechter anätzbar ist. Die dunklen Flecken stellen die ehemaligen Austenitkörner dar und resultieren vermutlich aus der verkürzten Haltezeit aufgrund der geänderten Prozessführung bei der EnRed Prozesskette. Weil sich die Haltezeit in Zeitintervalle zwischen den einzelnen Teilumformschritten gliedert, variiert die Ausprägung der Fleckigkeit über den Parabellenkerverlauf, was jedoch keinen negativen Einfluss auf die Lebensdauer hat.



Bild 14: Gefügefleckigkeit

10.3 Seigerungen

Bei den Kernseigerungen handelt es sich meistens um eine Überlagerung des Elementes Kohlenstoff, was sich im Gefügebild in einem hellen Streifen ausdrückt. Diese hellen Streifen bestehen aus einem martensitischen Gefüge, welches sich in unterschiedlichen Anlassenstufen befinden kann und somit auch unterschiedliche Zugfestigkeitswerte annimmt. Dieses Verhalten kann man auch deutlich in dem durchgeführten Materialvergleich erkennen. Ein nicht angelassener Martensit kann eine Zugfestigkeit von ca. 2.200 MPa in einer angelassener Matrix von ca. 1.500 MPa aufweisen. Ein solches Gefüge ist im linken Teil des Bildes 15 dargestellt. Ein anderes Seigerungsverhalten ist im rechten Teil des Bildes dargestellt. Die Kernseigerung besitzt einen Kohlenstoffgehalt von mehr als 0,6% und wird sehr gut angelassen, so dass ein Lattenmartensit mit etwas gröberer Struktur entsteht. Zwischen dem Lattenmartensit sind weiße Flecken zu einem Streifen angeordnet. Dabei handelt es sich um den weichen Restaustenit. Beide Arten der Gefügeausbildung sind in den Bereichen der neutralen Faser des Produktes vorzufinden und entstehen bereits im Materialherstellungsprozess der Halbzeuges. Bei Lebensdauertests und Fahrversuchen mit konventionell hergestellten Lenkerfedern konnte bisher jedoch noch nie festgestellt werden, dass eine Rissausbreitung vom Kern ausgegangen ist.

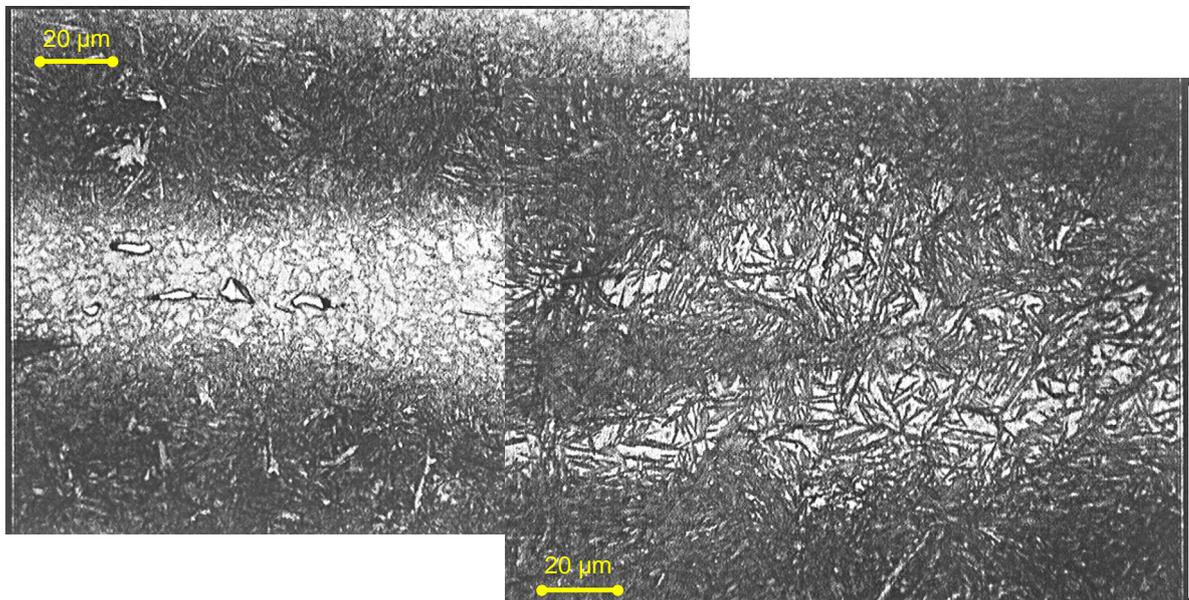


Bild 15: Unterschiedliche Ausprägung von Seigerungen

10.4 Randzeitigkeit

Die nachfolgend abgebildete Randzeitigkeit entsteht aufgrund der EnRed Verfahrenskette. Deren Ausprägung hängt im Wesentlichen von der Umformgeschwindigkeit, Oberflächentemperatur, Erholungszeit nach dem Walzen und Austenitstruktur ab. Der Walzprozess erzeugt Spannungen in den oberflächennahen Zonen des Werkstücks, deren Maximum unterhalb der Oberfläche liegt. Diese führen zu einer plastischen Verformung und zu einer Verfestigung der Randschicht. Bei der Randzeitigkeit handelt es sich um ein eingeformtes Gefüge, welches nicht vollständig dynamisch rekristallisiert. Der Werkstoff setzt sich hier aus einem Verbund von härteren, verfestigten sowie weicheren Schichten zusammen, welche übereinandergeschichtet sind. Je nach eingesetzter Werkstoffqualität besteht das Gefüge in unmittelbarer Nähe zur Oberfläche (bis etwa 300 µm Tiefe) mindestens aus unterem Bainit. Im tieferen Verlauf bestehen beide Schichten aus angelassenem Lattenmartensit. Unterhalb von 2 mm kann dieser Effekt nicht mehr beobachtet werden.

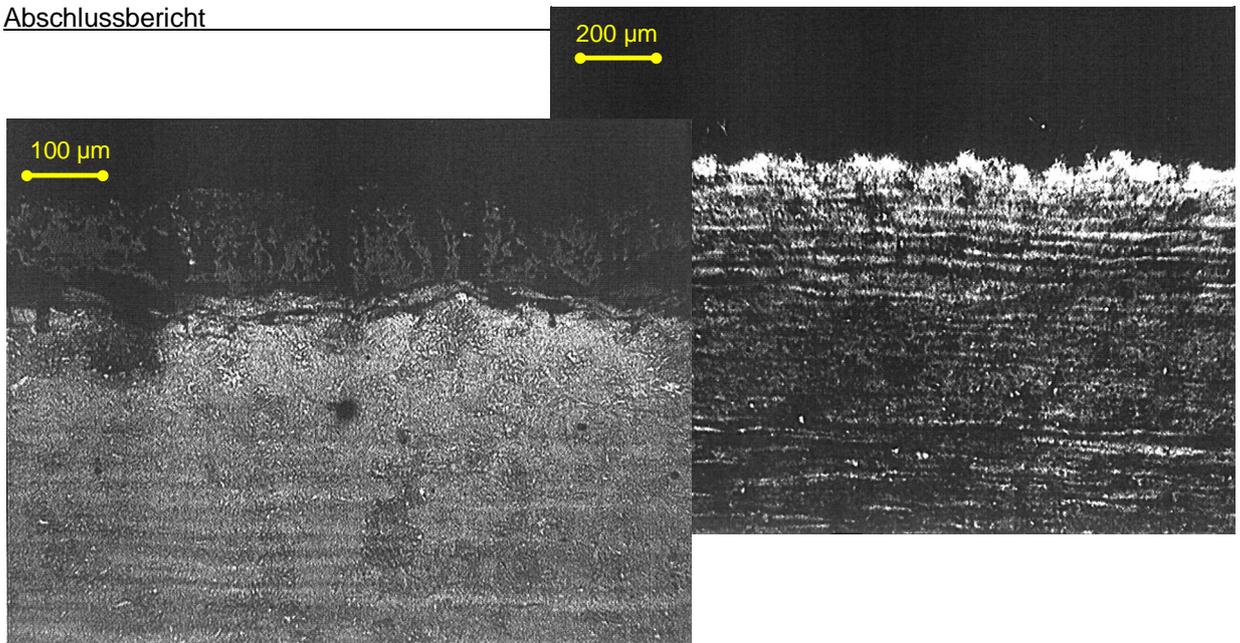


Bild 16: Beispiele für Randzeitigkeit

Dieser Gefügebautbau der Randschicht führt zur Steigerung der Lebensdauer der mit dem EnRed-Verfahren hergestellten Produkte.

10.5 Karbidbildung

Bei den Gefügeuntersuchungen wurde festgestellt, dass die Anzahl der Karbide sowie deren Dichte vom Kern zu der Oberfläche zunimmt. Während im Kern der Kohlenstoff fast vollständig in Lösung geht, schwächt sich dieser Effekt zum Rand hin ab, was darauf hindeutet, dass der Konzentrationsausgleich verlangsamt abläuft und dass die Umformung zumindest teilweise im Gebiet des inhomogenen Austenites oberhalb der A_{C_3} -Temperatur stattfindet. Dieser Effekt kann sich je nach Größe der Karbide und deren transkristallinen Segregation positiv auf die Lebensdauer auswirken. Bei den durchgeführten Untersuchungen konnte jedoch nicht nachgewiesen werden, dass dieser Effekt durch das EnRed-Verfahren, und nicht durch die eingesetzte Vormaterialqualität hervorgerufen wird.

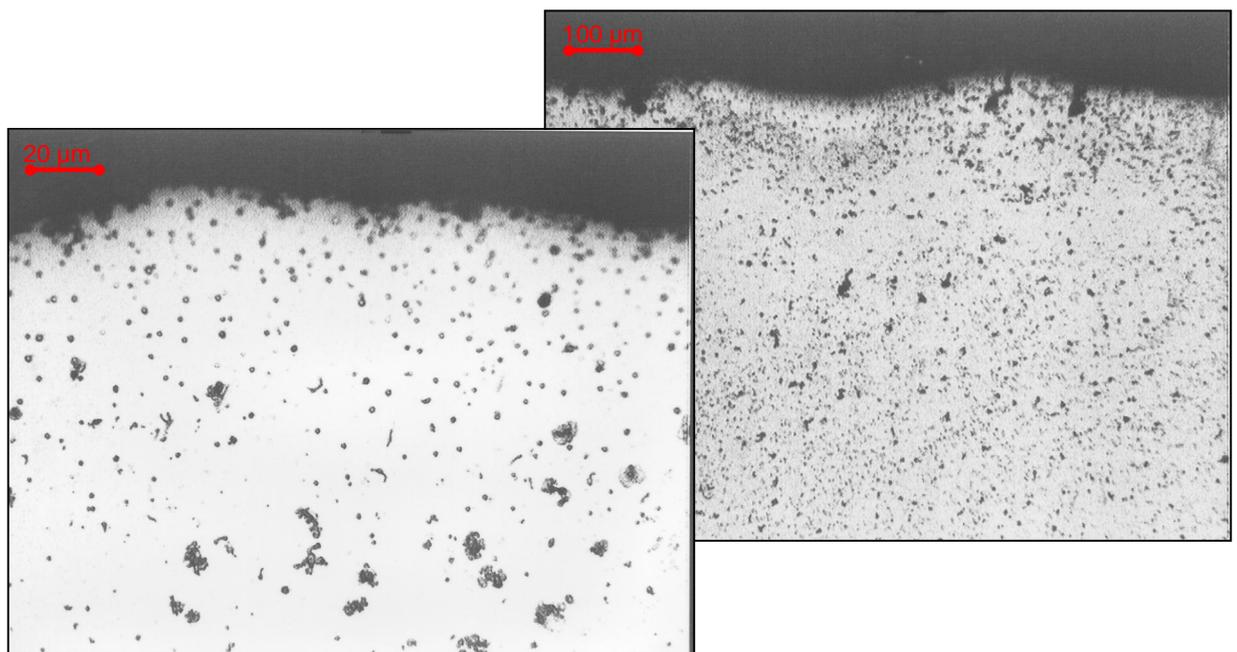


Bild 17: Beispiele für Karbidbildung

10.6 Mechanische Kennwerte

Die Dimensionierung einer Feder basiert auf deren geforderte Eigenschaften, wie maximale Federkraft, Weg und Federdiagramm. Somit ist die Funktionsweise eines Parabellenkers anhand von statischen Kenngrößen festgelegt. Wird am realen Produkt der Festigkeitsnachweis erfolgreich geführt, ist die Dimensionierung der Feder als ausreichend anzusehen. Diese Vorgehensweise hat sich in der Praxis als sehr einfaches, sicheres und effizientes Verfahren bewährt.

Heutzutage wird jedoch seitens des Kunden eine Gewichts- bzw. Volumenoptimierung in eingegrenzten Toleranzvorgaben bei niedrigeren Produktkosten gefordert. Bei der oben beschriebenen Standardvorgehensweise stößt der Konstrukteur in der Entwurfsphase jedoch sehr schnell an Grenzen der maximal zulässigen Werkstoffkennwerte und wird veranlasst, eine höherwertige Werkstoffqualität einzusetzen, die meistens auch mit einem Kostennachteil verbunden ist. Ein weiterer Aspekt bei der Dimensionierung der Feder, welcher i.d.R. nicht ausreichend berücksichtigt wird, ist der heterogene Werkstoffanlieferungszustand und die Beeinflussung der Produktqualität durch die Fertigungsprozesse, insbesondere durch diejenigen, welche in der Hochtemperaturphase (Austenitgebiet) des Werkstoffes ablaufen.

Die übliche Vorgehensweise zur Federdimensionierung wird grundsätzlich als gut erachtet und soll auch auf Lenker angewendet werden, die mit dem EnRed-Verfahren hergestellt werden. Im Gegensatz zum konventionellen Herstellverfahren werden hierbei die mechanischen Kennwerte allerdings nicht mehr aus dem Zugversuch des unverformten Rohmaterials, sondern aus dem Zugversuch von Materialabschnitten des Produktes ermittelt und die Ergebnisse durch Lebensdauertests bestätigt.

10.7 Härte

Die Anlasshärte ist ein gefügeabhängiger Kennwert, der infolge eines Temperatur-Zeit-Verlaufes während des Anlassprozesses eingestellt werden kann. Der Einfluss der Temperatur ist dabei viel größer als der Anlasszeit.

Aufgrund des beim EnRed-Verfahren vorhandenen Härtetemperaturprofils am Bauteil, der daraus resultierenden unterschiedlichen lokalen Abkühlgeschwindigkeiten und des Verfestigungsverhaltens des Werkstoffes, der nicht oder nur teilweise dynamisch rekristallisiert [Pet97], kommt es zur ungleichmäßigen Verteilung der primären Abschreckhärte am Bauteil, welche dazu führt, dass auch die sekundäre Anlasshärte über das Bauteil eine entsprechende Verteilung aufweist.

10.8 Festigkeit und Zähigkeit

Der statische Zugversuch ist das wichtigste Verfahren zur Ermittlung der Werkstoffeigenschaften. Die Marktentwicklung der letzten Jahre in Richtung des Einsatzes von höherfesten Werkstoffen bei reduziertem Gewicht bzw. Bauraumvolumen veranlasst den Konstrukteur, die Produkte einsatzorientiert auszulegen. Wie bereits in Kap. 10.6 beschrieben, bedeutet dies, dass die Kennwerte zur Federdimensionierung produkt- und nicht werkstoffbezogen ermittelt werden müssen.

Das Streckgrenzenverhältnis drückt die elastische Ausnutzung des Zugfestigkeitsbereiches aus. Für die eingesetzten Werkstoffqualitäten 51CrV4 und 52CrMoV4 im vergüteten Zustand existiert nach dem Vergüten keine ausgeprägte obere Streckgrenze. Folglich wird die 0,2%-Dehngrenze als Grenzwert herangezogen. In der Praxis wird mit Streckgrenzenverhältnissen zwischen 0,88 und 0,92 gearbeitet.

Es stellt sich dabei die Frage, welches Streckgrenzenverhältnis zu einer höheren Lebensdauer des Produktes führt. Diese Frage lässt sich anhand der ermittelten Festigkeitswerte bzw. Streckgrenzenverhältnisse nicht eindeutig beantworten. Wird jedoch die Werkstoffzähigkeit betrachtet, dann ist folgendes festzustellen:

- Die Betrachtung der Bruchdehnung und der Brucheinschnürung ist für das Produkt Parabellenker nicht zweckmäßig.
- Die Einbeziehung des plastischen Bereiches der Gleichmaßdehnung bei der Federdimensionierung ist sinnvoll und sollte je nach Einsatz ausgeweitet werden.
- Im Lebensdauertest am fertigen Produkt werden gute Ergebnisse erzielt, wenn der Werkstoff im vergüteten Zustand eine Gleichmaßdehnung von mindestens 4 % aufweist.

Aus den durchgeführten Zugversuchen konnte vergütefestigkeitsabhängig folgende Beziehung ermittelt werden, Bild 18.

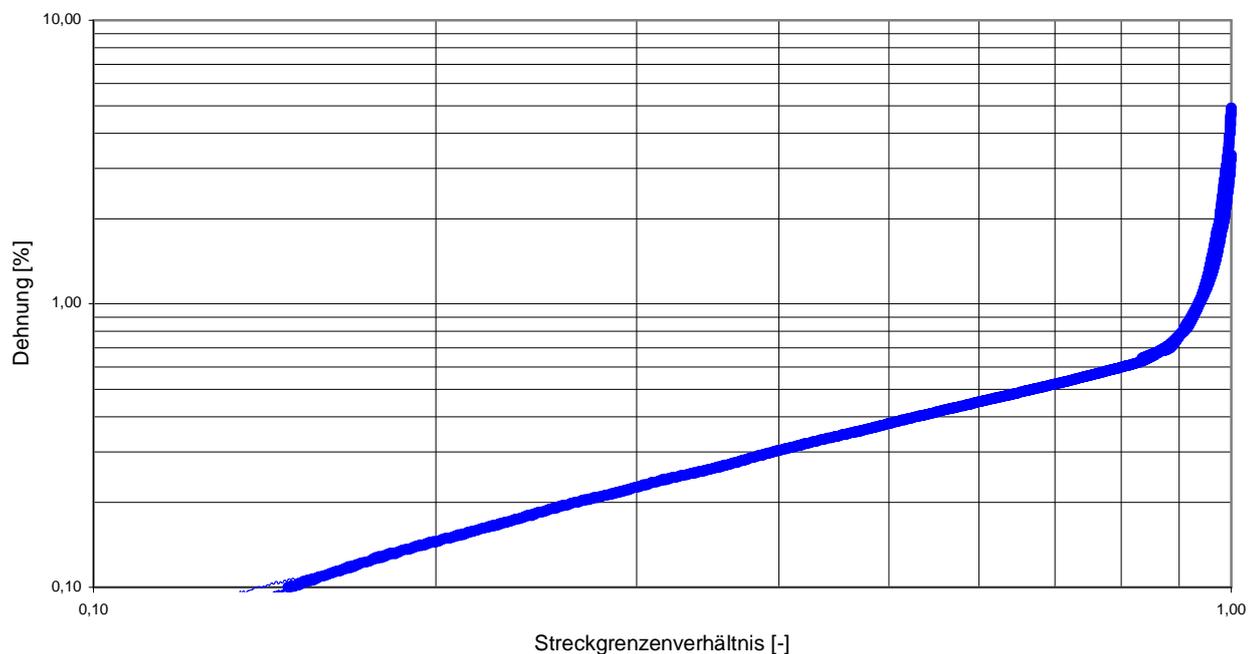


Bild 18: Vergütefestigkeitsabhängige Dehnung

Aus dem Bild geht hervor, dass für eine bestimmte Vergütefestigkeit und die eingestellten Streckgrenzenverhältnisse die Auslegungskriterien hinreichend genau durch zwei Geraden beschrieben werden können. Wird der Graph in zwei Bereiche gegliedert und einzeln linearisiert, dann ergeben sich folgende Geradenbeziehungen:

$$0,0 \leq R_p/R_m \leq 0,95: \quad \epsilon_{(R_m)} = 0,96 * (R_p/R_m) - 0,07$$

$$0,95 < R_p/R_m \leq 1,0: \quad \epsilon_{(R_m)} = 34,40 * (R_p/R_m) - 31,50$$

Diese Verhältnisse gelten nur für eine bestimmte Vergütefestigkeit und eine bestimmte Kurvenschar. Die Grundlage für diese Ergebnisse waren Versuche an Zugproben, welche aus den höchstbelasteten Zonen einer Parabellenkerfeder entnommen worden sind. Eine Lage längs der Verformungsrichtung erwies sich am zweckmäßigsten. Die Entnahme der Zugprobe im Querschnitt nach dem 1/3 – 1/3 – Prinzip, wie es etwa in Stahlwerken üblich ist, war nicht zweckdienlich, denn sie würde aufgrund der Kohlenstoffseigerungsstreifen zu niedrigen Dehnungswerten führen. Des Weiteren würde die Abbildung dieses Produktbereiches keine Aussagen über die maximal zulässige Werkstoffausnutzung in dem höchstbeanspruchten, parabolisch ausgewalzten Verlauf zulassen.

In den folgenden drei metallographischen Aufnahmen (Bild 19) sind verschiedene mit der Enred Verfahrenskette hergestellte Werkstückbereiche im Querschliff bei einer Vergrößerung von 50:1 dargestellt, für die bei gleicher Vergütetestigkeit unterschiedliche Gleichmaßdehnungen festgestellt worden sind. Wie zu erwarten war, ist die größte Gleichmaßdehnung bei der feinsten Struktur des Gefüges ermittelt worden.

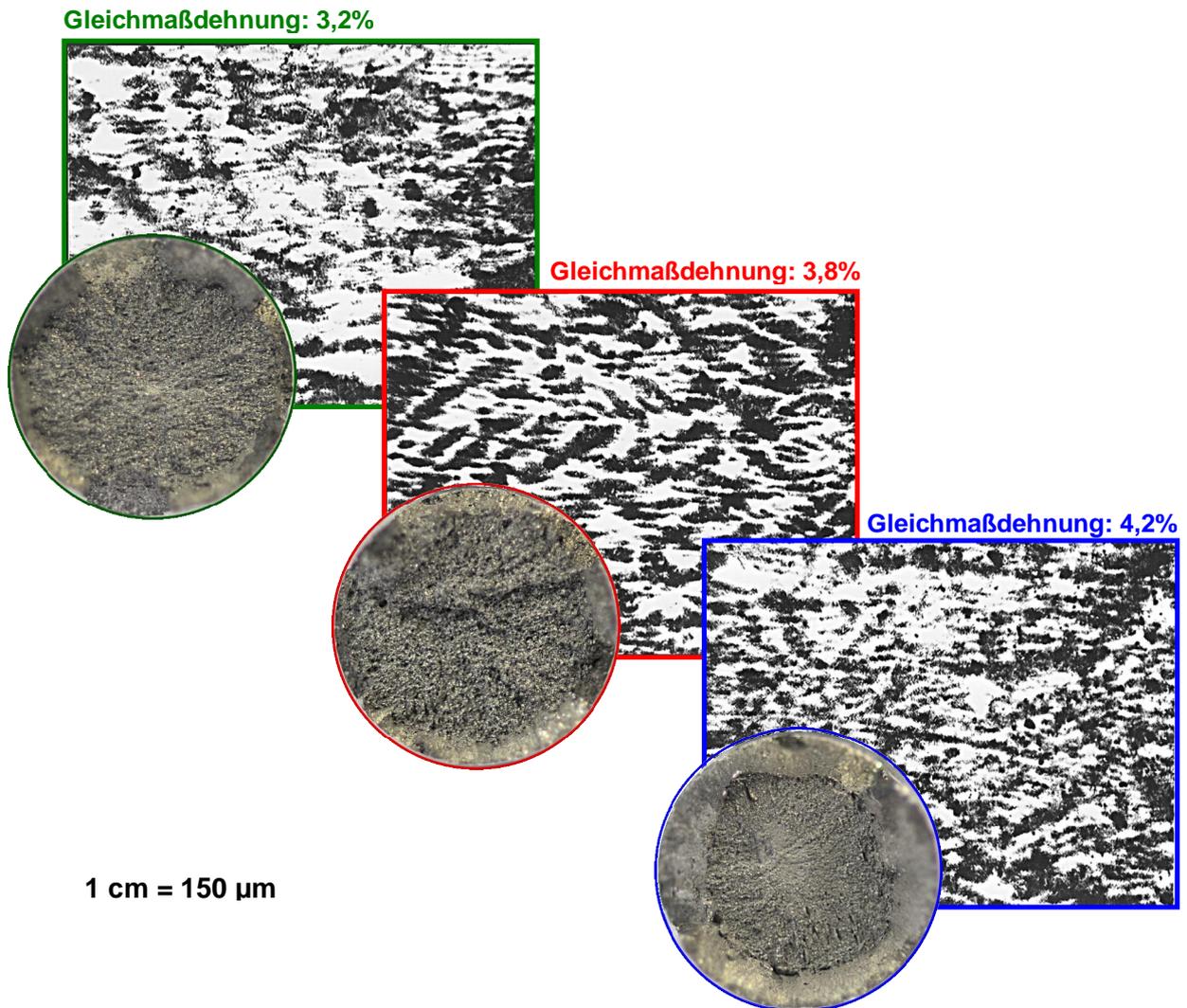


Bild 19: Gefügeuntersuchungen an Zugproben

Die Bruchfläche bei der Gleichmaßdehnung von 3,2% besitzt eine sehr kleine Scherlippe (unscharfe Randbereiche in der Draufsicht) am Rande der Zugprobe. Die Scherlippe wird in Richtung der größer werdenden Gleichmaßdehnung deutlicher ausgeprägt. Bei Gleichmaßdehnungen oberhalb von 4,2% ist ein makroskopisch sichtbarer Einschnüreffekt an der Zugprobe zu beobachten.

Die feinkörnige Struktur des Werkstoffes kann teilweise durch den EnRed-Umformprozess verbessert werden. Einen wesentlichen Einfluss besitzt jedoch der Anlieferungszustand des Vormaterials.

10.9 Lebensdauerprüfungen

Für die Kundenfreigabe neuer Artikel bzw. neuer Prozesse sind Lebensdauerprüfungen durchgeführt worden. Die Prüfungen fanden auf firmeneigenen Prüfständen statt. Zusätzlich haben einigen Kunden Prüfungen mit eigenen Prüfeinrichtungen durchgeführt.

Die Ergebnisse der Dauerschwingprüfungen der Parabellenker, die mit dem EnRed-Verfahren hergestellt wurden, sind mit denen konventionell hergestellter Lenkern verglichen worden. Für den Vergleich sind alle Prüfungen mit den gleichen Parametern durchgeführt worden.

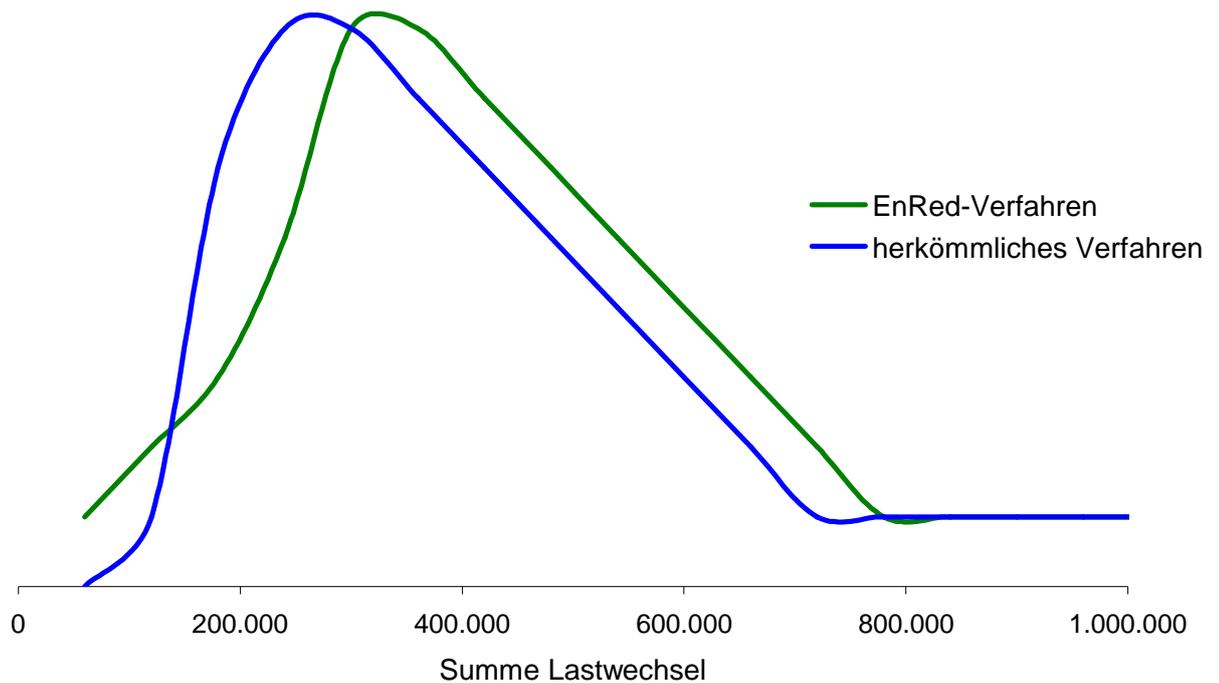


Bild 20: Weibull-Verteilung der Lebensdauerprüfungen

Im Bild 20 sind die Weibull-Verteilung für Produkte, die mit dem des EnRed-Verfahren produziert worden sind, den konventionell produzierten Lenkern gegenübergestellt. Es handelt sich um Lebensdauerprüfungen des vorderen Lenkerarms, der beim Einsatz im Anhänger den höchsten Belastungen ausgesetzt ist. Obwohl nur wenige Prüfungen durchgeführt worden sind, ist bereits schon nach den ersten Ergebnissen eine deutliche Verbesserung der Dauerschwingfestigkeit der mit dem EnRed-Verfahren erzeugten Produkte erkennbar.

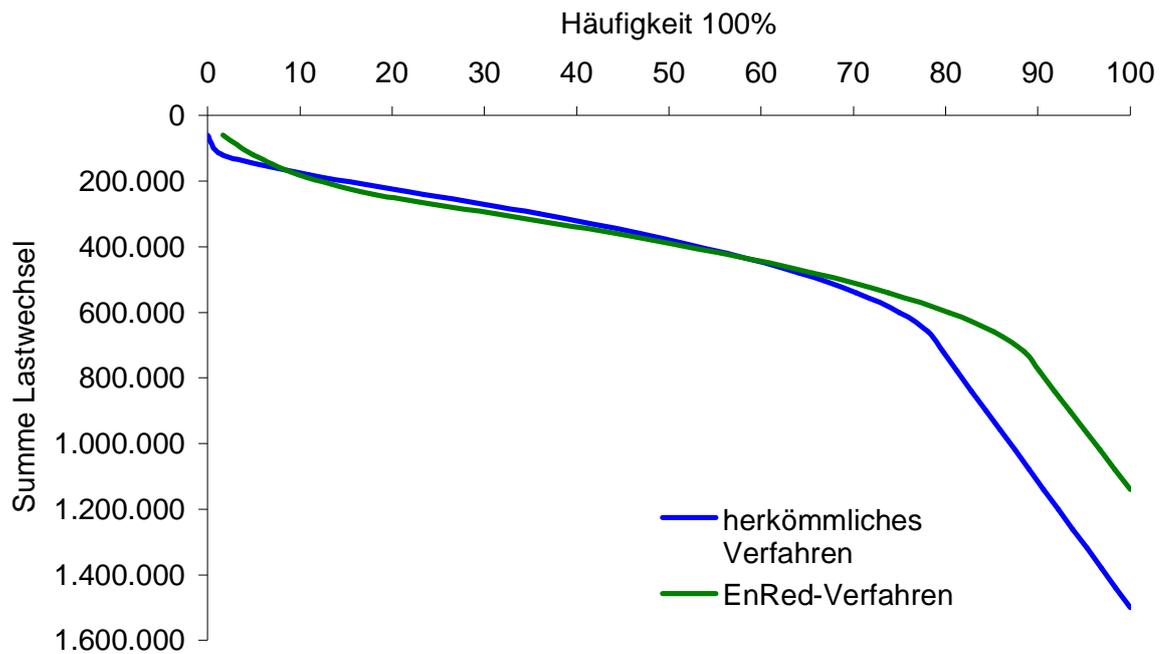


Bild 21: Wahrscheinlichkeitsnetz der Lebensdauer [Gra03]

Im Wahrscheinlichkeitsnetz (Bild 21) erkennt man im vorderen Häufigkeitsbereich zwischen 10 bis 60%, dass in beiden Prozessen gleich große vorzeitige Ausfälle zu erwarten sind. Die Verschleiß- und Ermüdungsausfälle verschieben sich bei Anwendung des EnRed-Verfahrens um ca.10 - 15% zu höheren Werten.

11. Energiebedarf

In diesem Abschnitt wird der Energiebedarf des im Projekt „EnRed-Verfahren für Parabellenker“ entwickelten Prozessablaufes einem konventionellen Herstellprozess gegenübergestellt.

11.1 Konventionelle Fertigung

Die konventionelle Fertigung von Parabellenkern bis zur Primärhärtung beinhaltet folgende drei Erwärmungsvorgänge, vgl. Kap. 5.

A 2.1 Erwärmung des vorderen Lenkerarms

Für die erste Teilerwärmung wird der Stangenabschnitt zu etwa 65 % seiner Gesamtlänge in den Ofen geschoben und dabei von Umgebungstemperatur (20°C) auf ca. 1.000°C erwärmt. Dabei findet in dem Bauteil ein Wärmeausgleich statt, so dass Energie nach außen getragen wird und verloren geht. Die mittlere Oberflächentemperatur des außerhalb des Ofens befindlichen Werkstückabschnittes liegt zum Ende des Erwärmungsvorganges bei 600 - 700 °C.

A 3.1 Erwärmung des hinteren Lenkerarms

Bei der zweiten Teilerwärmung wird das Werkstück ebenfalls zu etwa 65 % seiner Gesamtlänge in den Ofen geschoben. Kann das Material aus Ofen 1 direkt im Anschluss weiterverarbeitet werden, so ist davon auszugehen, dass das nun zu erwärmende Werkstückende auf unter 100°C abgekühlt ist und ebenfalls auf 1.000°C erhitzt werden muss. In der betrieblichen Praxis ist jedoch aus vielerlei Gründen eher davon auszugehen, dass sich das Werkstück wieder bis auf Umgebungstemperatur (20°C) abgekühlt hat.

A 4 Erwärmung des gesamten Lenkers

Bei der dritten Erwärmung wird das gesamte Werkstück erwärmt. Werden die Lenker unmittelbar nach den beiden ersten Erwärmungsschritten weiterverarbeitet, so ist von einer mittleren Bauteiltemperatur von 100°C auszugehen, welche auf 1.000°C erwärmt werden muss.

Aufgrund der mehrmaligen Erwärmung von Materialzonen, die prozessbedingt gar nicht erwärmt werden müssen, ist in der industriellen Praxis ein höherer Energieverbrauch als theoretisch notwendig erforderlich. Zusätzlich führt der dritte Aufheizvorgang zu weiterer Energie-Ineffizienz. Darüber hinaus wird weiterer Energiebedarf zum Halten des Temperaturniveaus im Ofen gegenüber der Umgebung benötigt, bedingt durch Strahlung und Konvektion über die Ofenfläche und die einseitig offenen Öfen.

Die Energiebilanz für das konventionelle Verfahren basiert auf den tatsächlich aufgewendeten Gasverbräuchen für die Lenkerfertigung nach dem oben beschriebenen Stand der Technik. Um den Energieeinsatz von Verfahren unterschiedlicher Energieträger untereinander vergleichbar zu machen, ist der eingesetzte Energieträger mit seinem Primärenergiefaktor zu multiplizieren. Für das eingesetzte Erdgas beträgt der Primärenergiefaktor 1,14 [IWU106].

Unter Annahme eines Energieinhaltes von 9,882 kWh/m³ von Erdgas errechnet sich aus den aufgezeichneten Gasverbräuchen und Produktionsmengen pro kg Fertigware konventionell hergestelltem Parabellenker ein

Energiebedarf Gas = 1,588 kWh/kg.

Dies entspricht unter Berücksichtigung des Primärenergiefaktors von Erdgas einem

Primärenergiebedarf = 1,810 kWh/kg.

In einem Sankey-Diagrammes lässt sich die „Energieverwendung“ grafisch darstellen, Bild 22. Die Ofenverluste lassen sich durch Vergleich mit dem theoretisch erforderlichen Wärmebedarf ermitteln, der sich aus der Wärmekapazität von Stahl (0,0001325 kWh/kg K) errechnet lässt, Tabelle 3. Obwohl die Werkstücke zu 65% ihrer Gesamtlänge in Ofen 1 und 2 geschoben werden, muss für den eigentlichen Prozess jeweils nur 50% der Bauteillänge erwärmt werden. Dieser Wert wird zur Berechnung des theoretisch erforderlichen Wärmebedarfes herangezogen.

	Verbrauch		nutzbar		Verluste	
	kWh/kg	%	kWh/kg	%	kWh/kg	%
Energiebereitstellung	1,810	100	1,588	87,7	0,222	12,3
Ofen 1: 50 % der Länge von 20°C auf 1.000°C	0,405	22,4	0,065	3,6	0,340	18,8
Ofen 2: 50% der Länge von 100°C auf 1.000°C	0,404	22,3	0,060	3,3	0,344	19,0
Ofen 3: 100% der Länge von 100°C auf 1.000°C	0,779	43,0	0,119	6,5	0,660	36,5
Öfen gesamt:	1,588	87,7	0,244	13,4	1,344	74,3

Tabelle 3: Ermittlung der Energieverluste beim konventionellen Herstellungsverfahren pro kg Endprodukt

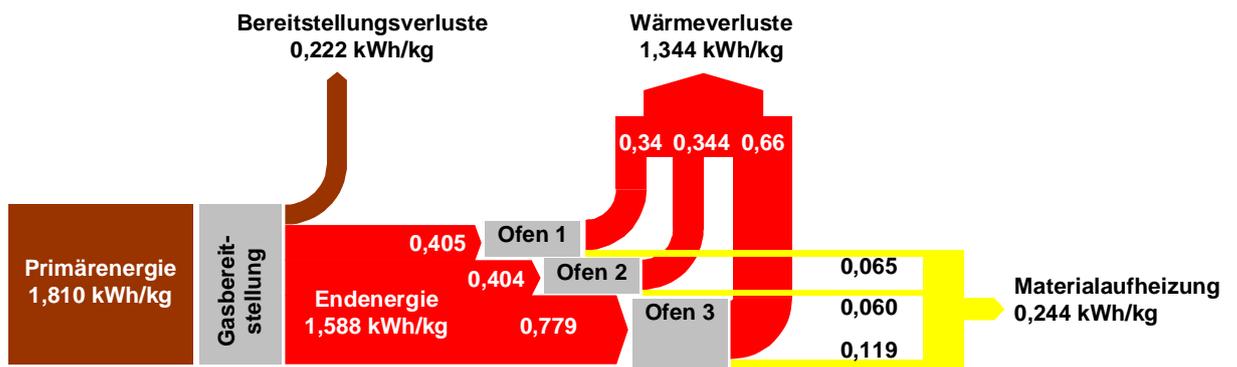


Bild 22: Sankey-Diagramm für konventionellen Fertigungsprozess

Die „Verwendung“ der Primärenergie zeigt das Kreisdiagramm, Bild 23.

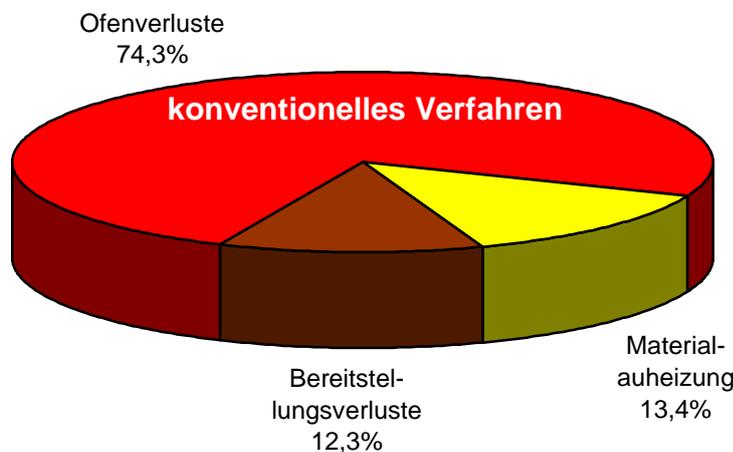


Bild 23: „Verwendung“ der Primärenergie beim konventionellen Herstellungsverfahren

11.2 EnRed-Verfahren

Der beim EnRed-Verfahren entwickelte Prozessablauf ermöglicht die Durchführung sämtlicher Umformungsschritte nach dem einmaligen Erwärmen des kompletten Werkstückes und vermeidet somit das mehrmalige Erhitzen einzelner Materialzonen. Durch den Einsatz eines Induktionsofens reduziert sich der Energieverlust durch Konvektion und Abstrahlung deutlich gegenüber einem konventionellen Gasofen.

Wie bereits beschrieben, benötigt die Herstellung von Parabellenkern mit der EnRed-Verfahrenskette bis zur Primärhärtung nur einen einzigen Erwärmungsschritt, vgl. Kap. 6. Die bisher durchgeführten Versuche sind mit Austenitisierungstemperaturen zwischen 1.000°C und 1.250°C durchgeführt worden. Innerhalb des Projektes konnte das EnRed Verfahren so weit entwickelt werden, dass alle Werkstücke bei 1.100°C prozesssicher hergestellt werden konnten. Bei einzelnen Produkten kann die Erwärmungstemperatur sogar auf 1.080°C abgesenkt werden. Obwohl erfolgversprechende Ansätze vorhanden sind, die Erwärmungstemperatur generell in Richtung 1.000°C zu bringen, soll der Energievergleich in diesem Abschlussbericht mit einer Aufheiztemperatur von 1.100°C durchgeführt werden. Zum Energievergleich wird der in Kap. 6 beschriebene Aufheischritt zu Grunde gelegt:

B 1.1 Erwärmung des benötigten Abschnittes der Rohmaterialstange mittels Induktion

Das gesamte Werkstück wird von Umgebungstemperatur (20°C) auf 1.100°C erwärmt.

Der Energiebedarf lässt sich aus der benötigten Scheinleistung der Induktionsanlage und dem zugehörigen Werkstoffmassenstrom ermitteln. Zur Vergleichbarkeit mit den Energieverbräuchen des konventionellen Verfahrens, die auf Produktionsdaten eines gesamten Geschäftsjahres basieren, wird beim EnRed Verfahren unterstellt, dass 5% des aufgewärmten Materials nicht verwendbar ist (Endabschnitte, einzugringende Löcher, Einstell- und Ausschussteile, sonstiges). Bei einer Erwärmungstemperatur von 1.100°C ergibt sich ein

Energiebedarf Induktion = 0,386 kWh/kg.

Unter Berücksichtigung des Primärenergiefaktors von Strom von 2,99 [IWU106] lässt sich der

Primärenergiebedarf Induktion = 1,154 kWh/kg

berechnen.

Auch hier lässt sich durch Darstellung im Sankey-Diagramm die Verteilung der Energieströme darstellen.

	Bedarf / Verbrauch		nutzbar / erforderlich		Verluste	
	kWh/kg	%	kWh/kg	%	kWh/kg	%
Energiebereitstellung	1,154	100	0,386	33,4	0,768	66,6
Ofen 1: 100% der Länge von 20°C auf 1.000°C	0,386	33,4	0,130	11,2	0,256	22,2

Tabelle 4: Ermittlung der Energieverluste beim EnRed Verfahren pro kg Endprodukt

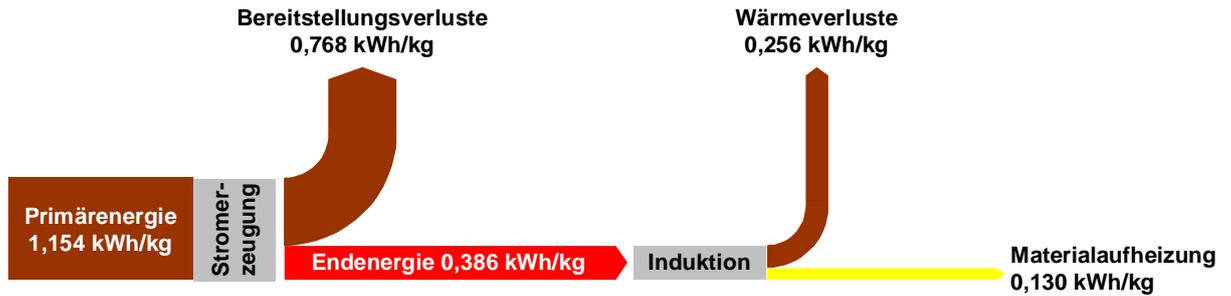


Bild 24: Sankey-Diagramm für das EnRed Verfahren

Die „Verwendung“ der Primärenergie zeigt das Kreisdiagramm, Bild 25.

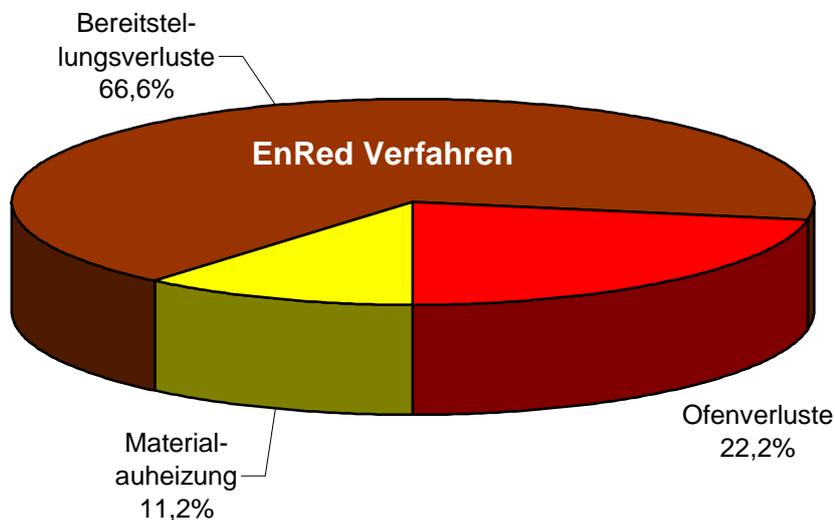


Bild 25: „Verwendung“ der Primärenergie beim EnRed Verfahren

11.3 Vergleich des EnRed- mit dem konventionellen Verfahren

Mit Hilfe des EnRed-Verfahrens ist es gelungen, die Energieverbräuche bei der Produktion von Parabel-Lenkerfedern um 36,2 % zu senken. Die Einsparungen resultieren dabei sowohl aus der geringeren benötigten Materialaufheizenergie, weil der Werkstoff nur ein einziges Mal erhitzt werden muss, als auch aus den geringeren Verlusten durch kurze Aufheizzeiten durch die Induktionserwärmung.

In den Bildern 26 und 27 wird die Energiebilanz beider Verfahren miteinander verglichen.

Über die in diesem Kapitel quantifizierten Werte hinaus bietet das EnRed Verfahren noch weitere Einsparmöglichkeiten von Primärenergie durch:

- weitere Absenkung der Aufwärmtemperatur in Richtung 1.000°C
- geringere Bauteilquerschnitte aufgrund höherer Festigkeiten
- geringeren Ersatzteilbedarf durch längere Lebensdauern (weniger produzierte Lenker)
- energieeffizientere Produktion kleiner Lose durch Abschalten der Energiequelle während des Rüstens

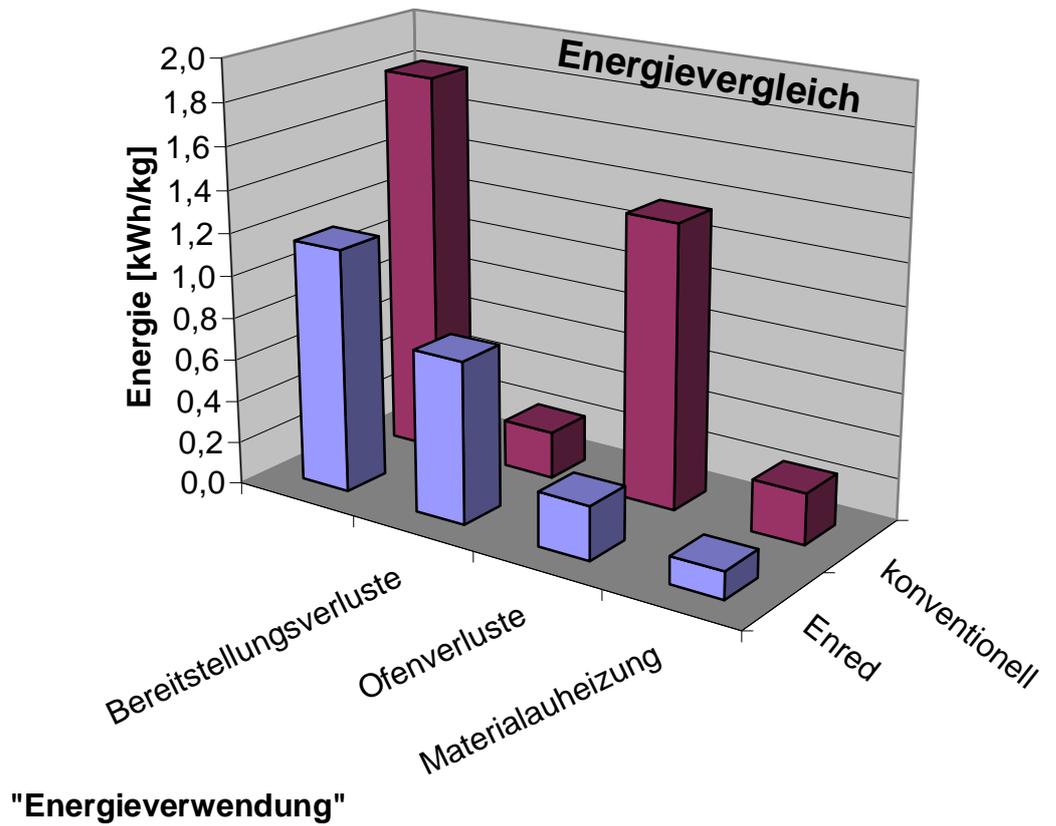


Bild 26: Vergleich der „Energieverwendung“ beider Verfahren

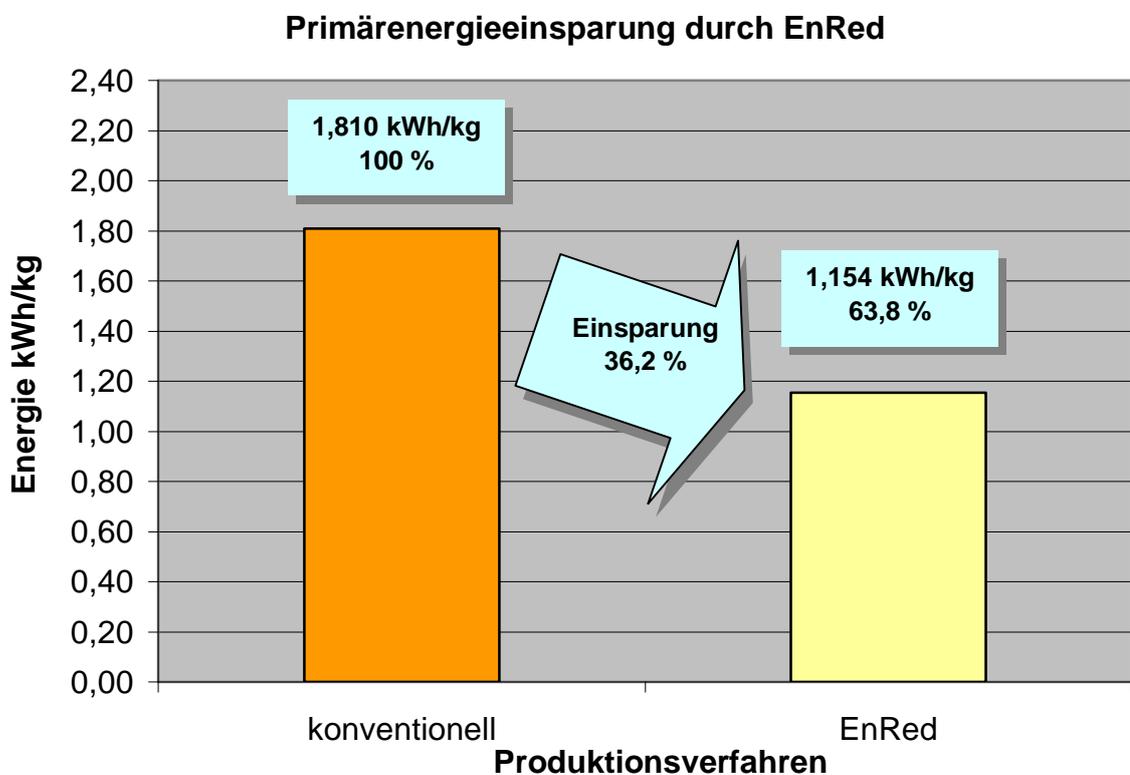


Bild 27: Energieeinsparung durch das EnRed-Verfahren

13. Auswirkungen des Einsatzes von EnRed auf die Umwelt

13.1 Energieeinsparung

Mit dem EnRed Verfahren lässt sich pro kg Werkstückgewicht ein Primärenergie von 0,656 kWh einsparen. Das entspricht einer Reduktion von 36,2%.

In Europa werden durchschnittlich 1.400.000 Lenker p.a. benötigt. Bei einem durchschnittlichen Gewicht von 35 kg/Lenkerfeder bedeutet dies eine Produktionsmenge von 49.000 Tonnen. Mit der genannten Werten ergibt sich damit ein jährliches

Einsparpotenzial an Primärenergie durch das EnRed Verfahren = 32.144 MWh.

Gelingt es, das Verfahren auch für die Produktion von Parabelfedern anzuwenden, so gibt sich mit einem Jahresbedarf von 147.400 Tonnen ein

Zusätzl. Einsparpot. an Primärenergie durch das EnRed Verfahren = 96.694 MWh.

Weitere Prozessoptimierungen des EnRed Verfahrens und die Nutzung aller werkstofftechnischen Möglichkeiten von Stahl werden zu weiteren Einspareffekten führen.

13.2 CO₂-Bilanz

Bei einem Ofenbetrieb mit Gas muss von einem CO₂-Äquivalent von 249 g CO₂/kWh_{End} ausgegangen werden [IWU106]. Der CO₂-Ausstoß des konventionellen Prozesses ergibt sich somit pro kg produziertem Lenker

$$m_{\text{CO}_2 \text{ konventionell}} = 0,395 \text{ kg CO}_2 / \text{kg}_{\text{Endprodukt}}$$

Bei einer Verwendung von Strom aus dem deutschen Netz zum Betrieb der Induktionserwärmung des EnRed-Verfahrens beträgt das CO₂-Äquivalent 647 g CO₂/kWh_{End} [IWU106]. Der CO₂-Ausstoß des EnRed-Verfahrens liegt demzufolge bei

$$m_{\text{CO}_2 \text{ EnRed}} = 0,250 \text{ kg CO}_2 / \text{kg}_{\text{Endprodukt}}$$

Somit ergibt sich eine Verringerung des CO₂-Ausstoßes durch das EnRed-Verfahren von

$$\Delta m_{\text{CO}_2 \text{ EnRed - konventionell}} = 0,145 \text{ kg CO}_2 / \text{kg}_{\text{Endprodukt}}$$

Das EnRed-Verfahren reduziert also den CO₂-Ausstoß um 36,7 %.

Bezogen auf die genannten Produktionsmengen von Lenkerfedern ist damit europaweit jährlich eine

Reduktion des CO₂-Ausstoßes von 7.105 Tonnen

möglich.

14. Fazit

Mit EnRed ist ein innovatives, energiereduziertes Verfahren für den Erwärmungs- und Umformungsprozess von Parabel-Lenkerfedern durch Verkürzung der Verfahrenskette entwickelt worden. Die zu Projektbeginn gesteckten Energieeinsparziele sind vollständig erreicht worden. Damit verbunden sind entsprechende Reduktionen des CO₂-Ausstoßes.

Gleichzeitig konnten mit der neu entwickelten Verfahrenskette die Produkteigenschaften verbessert werden, was weitere Potenziale für Energieeinsparungen mit sich bringt. In der Zukunft bestehen sehr gute Aussichten, unter Ausnutzung aller Eigenschaften des Werkstoffes Stahl weitere Potenziale zur energieeffizienten Prozessgestaltung zu erschließen.

Erst nach Optimierung der Verfahrenskette und Ausnutzung aller Potenziale werden die wirklichen Einsparpotenziale zu beziffern sein.

15. Literaturverzeichnis

- [Eck77] Eckstein, Hans-Joachim „Technologie der Wärmebehandlung von Stahl“
VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, Leipzig
1977
- [Gra03] Graebig, Klaus „Tabellen, Auswertblätter und Nomogramme zu den
statistischen Methoden des Qualitätsmanagements“
DGQ Arbeitsmittel 18-105, 2003
- [Pet97] Peters, Andreas „Verbesserung der mechanischen Eigenschaften von
Federstählen durch Mikrolegierung und
thermomechanische Behandlung“, Shaker Verlag 1997
- [Ros72] Rose, Adolf „Atlas zur Wärmebehandlung der Stähle“,
Hougardy, Hans Verlag Stahleisen 1972
- [Rah65] Rahmel, A. „Einfluss von Wasserdampf und Kohlendioxid auf die
Tobolski, J. Oxidation von Eisen- Silizium- Legierungen in
Sauerstoff bei Temperaturen von 750 bis 1050 °C“,
Verlag Chemie 1965
- [Tom07] Tomita Y., Fukuhara K., „The Influence of Cooling Characteristics and
Asada S., Funatani K. Viscosity on Hardening Behaviour of Steels”
5 QCD 2007, Berlin
- [Kri07] Hans Kristoffersen H., „New tool for calculation of heat transfer
Troell E., Felde I., coefficients, microstructure and hardness from
Bodin J., Segerberg S. the cooling curve”
5 QCD 2007, Berlin
- [Guo07] Guo Z., Saunders N. „Modelling Phase Transformations and Material
Miodownik P., Schillé J.- Properties Critical to Prediction of Distortion
P. during Heat Treatment of Steels”
5 QCD 2007, Berlin
- [IWU106] N.N. IWU-Infoblatt vom 09.01.2006, basierend auf GEMIS
4.3
- [Dom94] Domke Werkstoffkunde und Werkstoffprüfung, Cornelsen,
Giradet 1994