

# Verschleißschutz durch Hochfrequenzhärtung

Dipl.-Ing. K. Kleinpeter, KDT/Ing. G. Kastner, KDT/Dozent Dr.-Ing. J. Stibbe, KDT  
VEB Prüf- und Versuchsbetrieb Charlottenthal

## Einleitung

Die Verlängerung der Nutzungsdauer landtechnischer Maschinen und Anlagen ist eine zentral gestellte Forderung. Diese Zielstellung ist nur real, wenn auch die Nutzungsdauer der instand gesetzten Einzelteile erhöht wird. Viele der in der Landtechnik anfallenden Einzelteile werden durch Metallaktivgas- (MAG)-Auftragschweißen instand gesetzt. Derart aufgearbeitete Einzelteile haben i. allg. nicht die Oberflächenhärte neuer Teile. Dies wirkt sich teilweise erheblich auf die Nutzungsdauer aus. Zur Qualitätsverbesserung trägt die Nachbehandlung auftragsgeschweißter Teile durch Hochfrequenzinduktionshärtungen bei. Mit diesem Verfahren sollen gleichzeitig solche Technologien abgelöst werden, die auf selbsthärtenden importierten Zusatzwerkstoffen basieren. Sehr effektiv ist auch das Weichglühen mit dem Hochfrequenzinduktionshärtungen. In einigen Fällen kann dadurch die zeit- und energieaufwendige Flammen- und Feuererwärmung abgelöst werden, und es ist dadurch eine Langspanbearbeitung bzw. Instandsetzung von verschlissenen Einzelteilen erst möglich.

## Verfahren und Ausrüstungen zur Hochfrequenzinduktionserwärmung

Allgemeine Zielstellung der Verfahrensentwicklung war zunächst eine Oberflächenhärtung, bei der die Härtetiefe je nach Anwendungsfall zwischen 0,5 bis 2 mm liegen sollte. Da die erreichbare Härtetiefe hauptsächlich von der Frequenz beim Induktionshärtungen abhängt, kommt hierfür nur die Hochfrequenzinduktionserwärmung in Frage. Außer dem eigentlichen Oberflächenhärtungen sind auch andere Anwendungen, wie z. B. Hart- und Weichlöten, Glühen, Schweißen, Sintern, partielle Erwärmung von Werkstücken, möglich [1].

Unter Berücksichtigung aller möglichen Anwendungen wurde die im Bild 1 dargestellte und vom VEB Steremat Berlin gefertigte Vielzweck-Hochfrequenz-Erwärmungsanlage Unitherma 35/50 gewählt. Sie kann zum induktiven und konduktiven Erwärmen von Werkstücken der verschiedensten Formen zum Härten, Glühen und Löten eingesetzt werden, wobei sie beim Oberflächenhärtungen den größten Anwendungsbereich findet. Ihre Arbeitsfrequenz liegt zwischen 250 und 500 kHz. Sie kann in halb- oder vollautomatischer Betriebsweise auch in Fertigungsstraßen eingesetzt werden. Relativ kurze Umrüstzeiten ermöglichen auch bei kleineren Losgrößen ein rationelles Arbeiten. Neben der eigentlichen Induktionserwärmungsanlage ist die Entwicklung und der Bau teilbezogener Induktoren und Wasserbrausen unabdingbare Voraussetzung für die Realisierung der Technologie.

## Verfahrenstechnische Untersuchungen

Die verfahrenstechnischen Untersuchungen [2, 3] wurden an Probekörpern (Rundproben mit einem Durchmesser von 40 mm) und an konkreten Teilen durchgeführt (s. a. Tafeln 1 und 2). Die technologischen Meß-

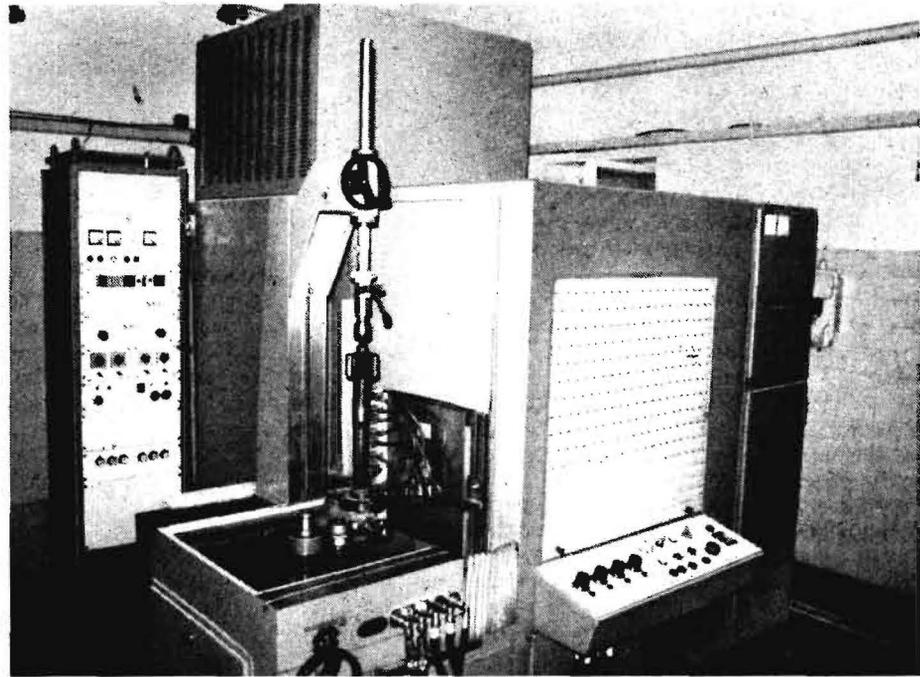


Bild 1. Vielzweck-Hochfrequenz-Erwärmungsanlage Unitherma 35/50 mit eingespanntem rotations-symmetrischem Einzelteil

Tafel 1. Technologische Varianten und erreichte Härteergebnisse beim Induktionshärtungen an Probekörpern

Probennummer	Zusatzwerkstoff MAG-Auftrag-schweißen	Wiederholung MAG-Auftrag-schweißen	Grundwerkstoff	Härtemessung			
				vor dem Härten HV5	nach dem Härten HV5	Härte- steigerung auf HRC %	
1	10MnSi6 oder 8	—	C 45	160	537,2	47,0	335
2	10MnSi6 oder B	1	C 45	160	500,3	44,7	312
3	10MnSi6 oder 8	2	C 45	160	421,7	41,0	263
4	10MnSi6 oder 8	—	C 45	160	550,9	46,0	345
5	30MnCrTi5	—	C 45	220	564,4	51,4	256
6	30MnCrTi5	1	C 45	220	568,4	51,3	258
7	30MnCrTi5	2	C 45	220	545,3	51,1	248
8	30MnCrTi5	—	C 45	220	549,6	53,3	250
9	30MnCrTi5	—	C 45	187,7	751,3	61,6	400
10	30MnCrTi5	—	C 35	204,4	596,6	54,0	292
11	30MnCrTi5	—	St 38 b-2	149,3	445,4	44,4	298

Tafel 2. Bauteilsortiment für die Hochfrequenzwärmebehandlung (ausgewählte Einzelteile)

Benennung	Bedeutung des Einzelteils/ Funktionsstelle	bisherige Instand- setzung	geplante In- standsetzung	Anzahl St./Jahr	Bemerkung
Kolbenstange Traktor MTS-50	einfach/Gleit- lager	MAG-Auftrag- schweißen mit 30MnCrTi5	Härten	6 000	Nullserien- instandsetzung ist erfolgt
Rotorwelle Anlasser Traktor und NKW	funktions- wichtig/ Gleitlager mit Ringnut	MAG-Auftrag- schweißen mit 12MnSiTi8	Härten	28 000	Untersuchungen stehen vor Abschluß
äußerer Mitnehmer Vorderachse Traktor ZT 303	funktions- wichtig/ Nadellager	keine	MAG-Auftrag- schweißen mit 30MnCrTi5 und Härten	180	technologische Untersuchung abgeschlossen
Achsmittelstück Traktor MTS-50	funktions- wichtig/ Gleitlager	Glühen mit Gasschweiß- brenner, Ausbohren, Buchsen	Hochfrequenz- glühen	5 415	Nullserien- instandsetzung ist erfolgt
Achsschenkel MTS-50	Sicherheits- teil/ Gleitlager	MAG-Auftrag- schweißen mit 30MnCrTi5	Härten	8 000	Dauerfestigkeits- untersuchungen geplant

werte bezüglich des Hochfrequenzinduktionshärtens an Probekörpern wurden in Vorversuchen optimiert. Sie sind in Tafel 3 aufgeführt. Die Nachkühlzeit  $t_N$  bezeichnet den Abschnitt, in dem nach Abschalten der Hochfrequenzenergie noch Kühlwasser zugeführt wird. Ein Teil der Proben wurde MAG-auftragsgeschweißt. Der sich einstellende Härteabfall bei wiederholtem Auftragsschweißen infolge unterschiedlicher Mischungsverhältnisse zwischen Zusatzwerkstoff und Grundwerkstoff im Auftragschweißgut fand ebenfalls Berücksichtigung.

Weiterhin kamen die in der DDR verfügbaren Zusatzwerkstoffe 10MnSi6 oder 8 (Standard TGL 39 671) und 30MnCrTi5 (Standard TGL 39 672) jeweils mit einem Durchmesser von 1,2 mm zur Anwendung.

Die Rundproben wurden mit den in Tafel 4 aufgeführten technologischen Meßwerten MAG-auftragsgeschweißt. In Auswertung der Ergebnisse entsprechend Tafel 1 können folgende allgemeine Aussagen zusammengefaßt werden.

Die Anwendung des Hochfrequenzinduktionshärtens bei der Einzelteilinstandsetzung führt zu Härtesteigerungen von 250 bis 400 % je nach Anwendungsfall. Ein wiederholtes MAG-Auftragsschweißen bei der Wiederkehr der Einzelteile in den Instandsetzungszyklus hat bezüglich der dann noch möglichen Härtesteigerung nur einen unwesentlichen Einfluß. Alle Proben wurden nachgewiesenermaßen rißfrei gehärtet. Die Risseprüfung wurde auf der Basis des handelsüblichen magnetischen Risseprüfgeräts RGGW realisiert. Die werkstofftechnischen Untersuchungen [4] wurden in Kooperation durchgeführt.

Aus den Bildern 2 und 3 ist deutlich der realisierte Umwandlungsprozeß erkennbar. Das martensitische Härtegefüge ist allgemein sowohl bei den Proben als auch bei den Bauteilen am Rand je nach dem Kohlenstoffgehalt der nach dem Auftrag vorhandenen „Mischlegierung“ ausgeprägt. Sogar der niedriggekohlte Zusatzwerkstoff 10MnSi8 erreicht in Vermischung mit den Grundwerkstoffen 40Cr4 bzw. C45 relativ gute Ergebnisse. Auf der Basis dieser Ergebnisse wurden konkrete Bauteile nach folgenden Schwerpunkten betrachtet:

- Härten von MAG-auftragsgeschweißten Teilen
- Nachhärten von nachgearbeiteten Teilen
- Härten von Neuteilen
- Weichglühen von Teilen.

Tafel 3. Technologische Meßwerte für das Induktionshärtens von Probekörpern

Einstelldaten beim Generator GI 35-026	
Anodenspannung	8,4 kV
Anodenstrom	6,25 A
Schalterstellung	9
Hochfrequenzspannung	5,9 kV
Gitterstrom	2,1 A
Einstelldaten bei der Vielzweck-Erwärmungsmaschine IV630-006	
Programmnummer	13
Vorschub-Induktor/Schalterstellung	0/10
Umdrehungen der Probe/Schalterstellung	2/30
Nachkühlzeit	10 s
Abschreckmedium	Leitungswasser
Temperatur	10...20°C

Tafel 4. Technologische Meßwerte für das MAG-Auftragsschweißen von Probekörpern

Zusatzwerkstoff (Durchmesser 1,2 mm)	10MnSi6 oder 8	30MnCrTi5
Schweißspannung	21 V	20 V
Schweißstromstärke	120 A	140 A
Drehzahl der Proben	3 min <sup>-1</sup>	3 min <sup>-1</sup>
Brennervorschub	3 mm/U	3 mm/U
Vorwärmtemperatur	-	-

Das Weichglühen hat in diesem Zusammenhang den Zweck, im Rahmen der Aufarbeitungstechnologie eine Langspanbearbeitung zu ermöglichen. Anschließend wird die Verschleißfestigkeit der Teile durch ein erneutes Härten garantiert.

Die Härte der Neuteile liegt entsprechend Tafel 1 (Probennummern 9 bis 11) zwischen 44 und 62 HRC. Die vorgesehene Aufarbeitungsvariante (MAG-Auftragsschweißen mit 30MnCrTi5) mit Hochfrequenzinduktionshärtung liegt mit 51 bis 53 HRC annähernd im Bereich der Härte der Neuteile.

#### Verfahrenssicherheit

Zur Gewährleistung der Verfahrenssicherheit wurden folgende Zuverlässigkeitsuntersuchungen durchgeführt:

- Verschleißprüfungen von Probekörpern und Bauteilen (Tafeln 5 und 6)
- Erprobung unter betriebspraktischen Bedingungen (Einsatzerprobung, Tafel 7).

Bei Sicherheitsteilen (z. B. Lenkungsteilen) laufen Arbeiten zur Dauerfestigkeitsprüfung und die üblichen werkstofftechnischen Untersuchungen.

Die vergleichenden zeitraffenden Verschleißprüfungen zwischen Grundwerkstoff-

fen und MAG-auftragsgeschweißten Varianten an Probekörpern für Gleit- und Nadellagersitze bestätigen die Hochfrequenzinduktionshärtung von MAG-Auftragschichten aus 30MnCrTi5 als die Vorzugsaufarbeitungsvariante [5, 6].

#### Einzelteilsortiment und Ökonomie

Bei dem untersuchten Einzelteilsortiment handelt es sich um härtbare Grundwerkstoffe (Einsatz- und Vergütungsstahl, Stahlguß), die nach den Zeichnungsangaben der Hersteller an den betreffenden Funktionsstellen hart sein müssen (je nach Bauteil bis 60 HRC). Häufig wird mit den Zusatzwerkstoffen 10MnSi6 oder 8, 30MnCrTi5 oder 45CrSi34 (DUR600) aufgearbeitet, wobei nur der letztere Zusatzwerkstoff ausreichend selbsthärtendes Schweißgut ergibt.

Hinsichtlich der Teile und ihrer charakteristischen Funktionsstellen wird unterschieden zwischen:

- Wellen
- Bohrungen
- figurellen Einzelteilen (z. B. Gehäuse)
- Gleit- und Festlagern sowie Ringnuten
- Profilen (Keil-, Zahn- und Kerbprofil)
- Nadellagerlaufflächen.

Da sich die Instandsetzungsbereiche auch zunehmend mit der Neuteilfertigung beschäftigen müssen, werden auch diese Teile gehärtet.

Beim Einzelteilsortiment zur induktiven Wärmebehandlung mit Hochfrequenzstrom handelt es sich von der Bedeutung her um folgende Teile:

- allgemeine Teile mit geringer funktionaler Bedeutung, die nicht erprobt werden müssen

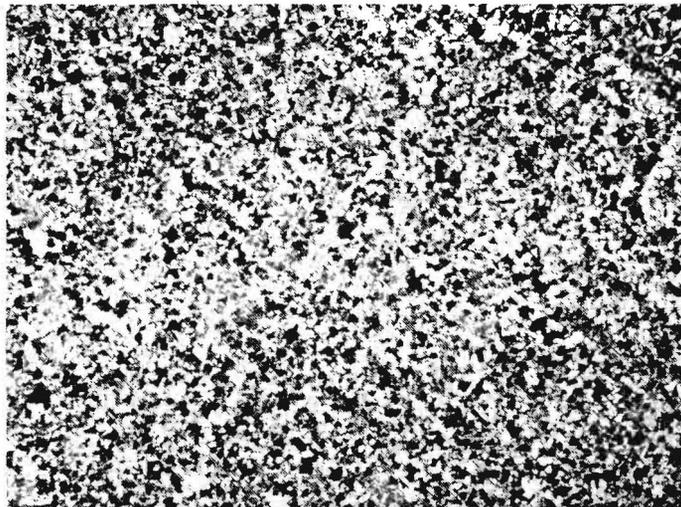


Bild 2 Feinkörniges ferritisch-perlitisches Ausgangsgefüge des Grundwerkstoffs C45

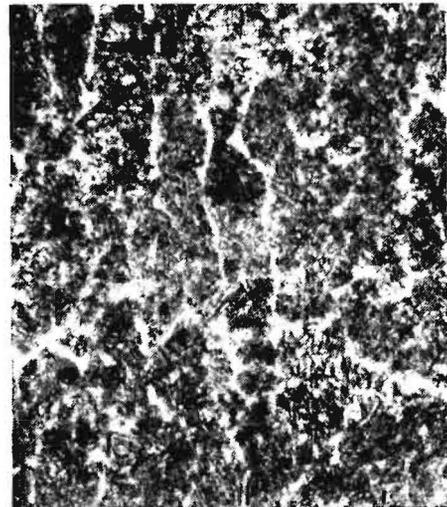


Bild 3 Randzone aus feinnadligem Martensit nach dem Induktionshärtens des mit 30MnCrTi5 auftragsgeschweißten Grundwerkstoffs C45

Tafel 5. Werkstoff- und Verschleißkennwerte der zeitraffenden Prüfung an Probekörpern [5]

Probekörper	Härte	Rauhigkeit		Reibwert	Belastungs- grenze MPa	Verschleißbetrag		Laufzeit 10 <sup>6</sup> Uml.
	HV5	Ra µm	Rm µm			Grundkörper- µm	Gegenkörper g/10 <sup>6</sup> Uml.	
<b>Gleitlagersitze</b> Grundwerkstoff 40CrV4 gehärtet	788	–	1,4	0,07	17,5	0,4	0,0154	12
<b>MAG-Auftrag-</b> <b>schweißen mit</b> <b>10MnSi6 oder 8</b> <b>und Hochfrequenz-</b> <b>induktionshärten</b> ungehärtet	593	0,37	3,7	0,0033	12,6	0,01	–	12
	213	0,69	5,9	0,0066	9,5	0,4	–	12
<b>MAG-Auftrag-</b> <b>schweißen mit</b> <b>30MnCrTi5 und</b> <b>Hochfrequenz-</b> <b>induktionshärten</b> ungehärtet	618	0,36	2,6	0,0050	17,3	0,001	–	12
	241	0,63	5,4	0,0083	5,5	0,8	–	12
<b>Nadellagersitze</b> Grundwerkstoff 16MnCr5 einsatzgehärtet	494	0,10	2,0	–	2 290	0,15	–	28,3
<b>MAG-Auftrag-</b> <b>schweißen mit</b> <b>10MnSi6 oder 8</b> <b>und</b> <b>Hochfrequenz-</b> <b>induktionshärten</b>	566	0,06	0,91	–	1 262	0,35	–	30,0
<b>MAG-Auftrag-</b> <b>schweißen mit</b> <b>30MnCrTi5 und</b> <b>Hochfrequenz-</b> <b>induktionshärten</b>	593	0,10	2,4	–	1 862	0,10	–	18,5

Tafel 6. Verschleißergebnisse auf dem Prüfstand für Vorgelegewelle des Traktors ZT 300 (Keilwellenprofil) [6]

Zusatzwerkstoff Teilecharakteristik	Wärmebehandlung	Grundwerkstoff	Verschleißmaß in mm	Verschleißfestigkeit zum Neuteil in %
Neuteil	Einsatzhärten	16MnCr5 <sup>1)</sup>	0,08	100
30MnCrTi5 TGL 39672	Induktionshärten	16MnCr5 <sup>1)</sup>	0,095	84,2
110MnCrTi8 TGL 39672	ohne	16MnCr5 <sup>1)</sup>	0,176	45,4
30MnCrTi5	ohne	16MnCr5 <sup>1)</sup>	0,244	32,8

1) nach Standard TGL 6546

Tafel 7. Ergebnisse der Einsatzerprobung an MAG-auftraggeschweißten und induktionsgehärteten Einzelteilen

Benennung	Zusatzwerk- stoff	betrachtete Funktionsstelle	Anzahl der Erprobungs- teile	erreichte Nutzungsdauer in h	Bemerkungen
Vorgelegewelle Traktor ZT 300	30MnCrTi8	Keilwellenprofil	4	1 250...2 630	keine Ausfälle
Kolbenstange Traktor MTS-50	10MnSi6 oder 8	Gleitfläche	5	480...970	keine Ausfälle
Hohlwelle Geräteträger RS 09	30MnCrTi5	Keilwellenprofil	2	505...685	keine Ausfälle
Doppelgelenkwelle ZT 303 (äußerer Mitnehmer)	30MnCrTi8	Nadellagersitz	5	105...245	keine Ausfälle
Ankerwelle Anlasser 1,32 kW (Multicar)	30MnCrTi8	Gleitlagersitz Ringnut	5	130...305	keine Ausfälle

- funktionswichtige Teile (z. B. Getriebeteile)
- Sicherheitsteile (Lenkungs- und Brems-  
teile, schutzgütebestimmende Teile), die  
stark auf Dauerfestigkeit beansprucht wer-  
den.

In drei Betrieben des VEB Kombinat Land-  
technische Instandsetzung wurden 115000  
Aufarbeitungsteile für 40 Positionen ermit-  
telt. Eingeschätzt wird, daß wesentlich mehr  
auftraggeschweißte Einzelteile hochfre-  
quenzinduktionsgehärtet werden müssen.

Tafel 2 zeigt ein ausgewähltes Sortiment von  
Einzelteilen für eine Hochfrequenzwärmebe-  
handlung durch Härten und Glühen. Das  
Hochfrequenzinduktionshärten ist ein sehr  
effektives Verfahren zur lokalen Wärmebe-  
handlung von Einzelteilen. Wesentliche Ge-  
sichtspunkte der Effektivität der Anwendung  
des Verfahrens sind:

- kurze Härte- bzw. Wärmebehandlungszei-  
ten (bei den untersuchten Positionen  
< 1 min je Funktionsstelle)
- geringer Energieeintrag je Einzelteil im  
Gegensatz zu thermochemischen Verfah-  
ren sowie minimaler Verzug
- Steigerung der Härte MAG-auftragge-  
schweißter Teile auf 250 bis 400 %, da-  
durch Erhöhung der Standzeit aufgearbei-  
teter Teile (≥ 50 % gegenüber dem Ist-  
stand.)

Der ermittelte volkswirtschaftliche Nutzen  
wird mit 2,2 Mill. M/Jahr eingeschätzt. Dem  
Anwenderbetrieb des Härtens kommt dieser  
Nutzen allerdings bisher nicht zugute. Er  
hätte lediglich einen höheren Arbeitsauf-  
wand zu realisieren. Die Nutzungsdauerver-  
längerung bewirkt aber eine verlängerte  
Wiederkehrzeit der durch Hochfrequenzin-  
duktionshärten veredelten Einzelteile und da-  
mit ihrer wiederholten Aufarbeitung. Da-  
durch wird Aufarbeitungskapazität frei. Es ist  
vorgesehen, daß im Bereich der landtechni-  
schen Instandsetzung die Betriebe, die bei  
der Instandsetzung Veredlungstechnologien  
realisieren, die nachweislich zu einer verlän-  
gerten Nutzungsdauer der instand gesetzten  
Einzelteile führen, durch Gewinnbeteiligung  
stärker stimuliert werden.

### Zusammenfassung

Es werden die ersten Untersuchungsergeb-  
nisse zur Anwendung des Induktionshärtens  
in der Einzelteilinstandsetzung landtechni-  
scher Arbeitsmittel dargelegt.

Schwerpunktmäßig geht es um das Härten  
MAG-auftraggeschweißter Einzelteile. Es  
kommt eine 35/50-kW-Hochfrequenzwärme-  
anlage zur Anwendung, die universell ein-  
setzbar ist.

Zur Ermittlung der optimalen Parameter  
beim Härten wurden die notwendigen ver-  
fahrenstechnischen Untersuchungen und  
technologischen Erprobungen durchgeführt.  
Im Ergebnis konnte eine Härtesteigerung der  
untersuchten Einzelteile von 250 bis 400 %  
nachgewiesen werden.

Die Untersuchungen zur Verfahrenssicher-  
heit basieren auf positiven Ergebnissen aus  
dem Einsatz von Proben auf dem Verschleiß-  
prüfstand und von Bauteilen unter betriebs-  
praktischen Bedingungen. Diese Zuverlässig-  
keitsuntersuchungen, die noch nicht abge-  
schlossen sind, sind bei Sicherheitsteilen

durch Dauerfestigkeitsuntersuchungen zu bestätigen.

Aus dem umfangreichen Sortiment an Einzelteilen werden Beispielpositionen angegeben, wobei diese in Gruppen nach funktioneller Bedeutung und nach Art der Funktionsstellen eingeteilt wurden. Anschließend wird auf die Effektivität des Induktionshärtens in der Einzeleinstandsetzung eingegangen (kurze Härtezeiten, geringer Energieeintrag je Einzelteil, Erhöhung der Nutzungsdauer der gehärteten Bauteile  $\geq 50\%$ ).

## Literatur

- [1] Benkowsky, G.: Induktionserwärmung. Berlin: VEB Verlag Technik 1980.
- [2] Kleinpeter, K.: Anwendung des Induktionshärtens bei der Einzeleinstandsetzung. VEB Prüf- und Versuchsbetrieb Charlottenthal, Abschlußbericht A4 1987 (unveröffentlicht).
- [3] Kleinpeter, K.: Anwendung des Induktionshärtens bei der Einzeleinstandsetzung. VEB Prüf- und Versuchsbetrieb Charlottenthal, Zwischenbericht V3/V5 1988 (unveröffentlicht).
- [4] Werkstofftechnische Untersuchungen. Inge-

neurhochschule Wismar, Prüfbericht 1987 (unveröffentlicht).

- [5] Leverenz, K.: Untersuchungen zum Verschleißverhalten von Auftragsschichten. VEB Prüf- und Versuchsbetrieb Charlottenthal, Forschungsbericht A4 1988 (unveröffentlicht).
- [6] Runki, G.: Verschleiß- und Haltbarkeitsprüfung an MAG-auftragsgeschweißten Vorgelegewellen des Traktors ZT 300. Kombinat Fortschritt Landmaschinen, VEB Erntemaschinen Neustadt, Stammbetrieb, Betriebsteil Automatisierungstechnik Leipzig, Bericht 1987 (unveröffentlicht).

A 5755

# Elektronenstrahltechnologien in der landtechnischen Instandsetzung

Dr.-Ing. S. Keitel, Zentralinstitut für Schweißtechnik Halle

Dipl.-Ing. M. Flechner, KDT/Dozent Dr.-Ing. J. Stibbe, KDT, VEB Prüf- und Versuchsbetrieb Charlottenthal

## 1. Einleitung

Im Bereich der landtechnischen Einzeleinstandsetzung bestehen die Forderungen, das Instandsetzungsniveau zu erhöhen, längere Einsatzzeiten aufgearbeiteter Teile zu erreichen und ihre Zuverlässigkeit zu verbessern. Neben Möglichkeiten der Werkstoffsubstitution haben in den letzten Jahren immer mehr die verschiedenen Verfahren der Randschichthärtung und -veredlung (Strahltechnologien) an Bedeutung gewonnen, um mit gleichem oder geringerem Materialeinsatz höhere Nutzeffekte zu erzielen. Die Elektronenstrahltechnik bietet vielfältige Anwendungsmöglichkeiten in der metallverarbeitenden Industrie, vor allem zum Schweißen und zur Randschichtbehandlung von kompliziert gestalteten Getriebeteilen.

In Vorbereitung des Einsatzes einer neuen Elektronenstrahl-Anlage (Strahlleistung 10 kW, Beschleunigungsspannung 60 kV) im VEB Landtechnisches Instandsetzungswerk (LIW) Pritzwalk wurden Untersuchungen zur Anwendung des Elektronenstrahl-Schweißens und der Elektronenstrahl-Randschichtbehandlung auf der Anlage ESA 150-MR (50 kW/150 kV) des Zentralinstituts für Schweißtechnik Halle durchgeführt (Bild 1).

## 2. Entwicklungsstand der Elektronenstrahltechnik

Die industrielle Anwendung der Elektronenstrahltechnik hat in den letzten 20 Jahren einen umfassenden Aufschwung erfahren. Erste Veröffentlichungen in der Fachliteratur der DDR stammen aus dem Jahr 1965. Die Kompliziertheit des Anlagensystems, in dem Erkenntnisse u. a. aus den Fachgebieten Elektronik, Elektronenoptik, Hochspannungs- und Vakuumtechnik integriert sind, die sichere Beherrschung der Elektronenstrahl-Erzeugung und -Wirkung und nicht zuletzt der daraus resultierende Kostenaufwand hemmte in der Anfangszeit eine rasche Verbreitung. Der hohe Preis wird auch heute als nachteilig angesehen, die Technik selbst ist jedoch dem Laborstadium längst entwachsen.

Gegenwärtige Entwicklungsarbeiten beziehen sich besonders auf bessere Möglichkeiten der Strahlführung sowie der Vervollkommnung des Pumpen- und Werkstückma-

nipulationssystems. Neben Universalsystemen werden dem spezifischen Einsatzfall angepaßte Anlagen gefertigt, deren klein gehaltenes Kammervolumen schnelle Evakuierungszeiten und somit problemlose Einordnung in automatisierte Fertigungssysteme erlaubt.

Eine Elektronenstrahl-Anlage besteht aus folgenden 6 Hauptbaugruppen [1, 2]:

- Elektronenstrahlkanone (Elektronenstrahl-Erzeugung)
- Vakuumarbeitskammer (Elektronenstrahl-Wirkung)
- Vakuumpumpensystem (für Strahler und Vakuumkammer)
- Werkstückmanipulator
- Meß-, Steuer- und Regelsystem
- Energieversorgungssystem.

## 3. Charakteristik

### des Elektronenstrahl-Schweißens

Der Aufprall der im Vakuum erzeugten und beschleunigten Elektronen führt zu einer schnellen Erwärmung des Werkstoffs mit Aufheizgeschwindigkeiten bis  $10^4$  K/s. Die Wirkung beruht auf der Umwandlung der kinetischen in thermische Energie während des Abbremsens der Elektronen im Werkstoff bei einer Eindringtiefe von 20 bis 80  $\mu\text{m}$ . Es kommt am Auftreffort zur lokal stark begrenzten Materialverdampfung und bei oberflächenscharfer Fokussierung des Elektronenstrahls zur Herausbildung einer metaldampfgefüllten Kapillare, die von einem Schmelzmantel umhüllt ist [1].

Entsprechend der Fokussierung des Elektronenstrahls (Brennfleckdurchmesser  $\geq 0,4$  mm) und der gewählten Vorschubgeschwindigkeit wird durch die Dampfkapillare und Vorgänge der Wärmeleitung eine Tief-

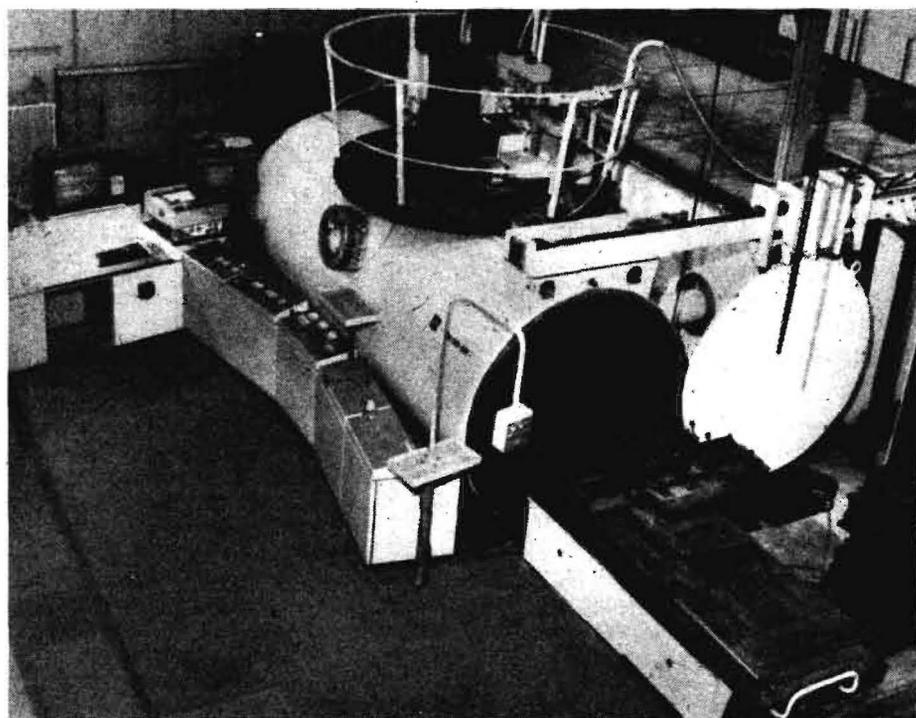


Bild 1. ESA 150-MR (Hersteller: Forschungsinstitut „Manfred von Ardenne“ Dresden; Baujahr: 1981)

(Foto: B. Birnbaum)