

3.3. Zur Geschichte der Lasertechnik in der DDR

D. Pollack, G. Wiedemann, Fraunhofer IWS

Vorbemerkungen

Die Autoren D. Pollack und G. Wiedemann begannen 1970, unmittelbar nach Ihrem Studium, mit ersten Untersuchungen zu Möglichkeiten und Grenzen der Laserstrahlmaterialbearbeitung für die Textil-, Bekleidungs- und Chemiefaserstoffindustrie am damaligen Wissenschaftsbereich Textiltechnik der TU Dresden. Bis zu Ihrem Eintritt in die Altersrente waren sie auf dem Gebiet der Forschung zur Materialbearbeitung tätig, zuletzt am Fraunhofer Institut für Werkstoff- und Strahltechnik in Dresden. Der nachfolgende Beitrag entstand aus diesem Blickwinkel heraus und kann die „Geschichte der Lasertechnik in der DDR“ nur punktuell beleuchten. Insbesondere im Hinblick auf die Entwicklung von Laserstrahlquellen und deren umfangreichen Anwendungen über die Materialbearbeitung hinaus sei auf andere Quellen verwiesen /1, 2, 3, 4, 5/.

Einen Schwerpunkt des Beitrages bildet die Laseranwendungsforschung in Dresden. Für das Anliegen des Beitrages fällt dies auf Grund vieler Analogien zu den anderen „Zentren“ der Applikationsforschung in der DDR nur unwesentlich ins Gewicht.

Zu den Anfängen der Lasertechnik in der DDR

„Laser sollt ihr machen!“ Mit diesem Aufruf von P. Görlich, Ordentliches Mitglied der Akademie der Wissenschaften der DDR (AdW), Direktor des Institutes für Optik und Spektroskopie und Forschungsdirektor bei VEB Carl Zeiss Jena, wurde die Laserforschung in der DDR Anfang der 60-er Jahre eingeleitet.

Von den führenden Wissenschaftlern der DDR wurde die Bedeutung der Lasertechnik ebenfalls schon zeitig erkannt. Zur besseren Koordinierung der Forschung wurde 1962 die Kommission „Laser“ des Forschungsrates gebildet. Unter der Leitung von Prof. K. Junge wurde die Kommission von 1974 bis 1990 als Zentraler Arbeitskreis „Laser und ihre Anwendungen“ beim Forschungsrat der DDR weitergeführt /1, 2, 3/.

Nach T. Maiman in den USA (1960) und D. Röß in der BRD (1962) führte K. Lenz am 7. August 1962 am damaligen Institut für Optik und Spektroskopie (IOS) in Berlin den ersten Rubinlaser der DDR vor /1, 2/. Anlässlich eines physikalischen Kolloquiums präsentierten R. Neubert und W. Meinel, Mitarbeiter einer von Prof. G. Wiederhold am Physikalischen Institut der FSU Jena geleiteten Arbeitsgruppe, am 3. Dezember 1962 erstmals öffentlich sowohl einen mit Hochfrequenz angeregten Gaslaser (He-Ne-Laser; $\lambda = 1,15 \mu\text{m}$) als auch Festkörperlaser (Rubin- und Nd-Glas-Laser) /1, 3, 4/. Zum Festkörperlaser ZFL 750 weiterentwickelt fanden letztere Laser in dem wohl ersten kommerziellen laserbasierten Messgerät Deutschlands, dem von H. Moenke bei Carl Zeiss entwickelten Laser-mikrospektralanalysator LMA 1¹ seine erste „industrielle“ Anwendung /1, 6/.

1964 präsentierte der VEB Carl Zeiss Jena zur Leipziger Frühjahrsmesse den ersten HeNe-Gaslaser. Dieser Laser wurde in den Folgejahren zu einer Typenreihe mit unterschiedlichen Leistungen und mit speziellen Strahleigenschaften ausgebaut. Einsatzgebiete waren und sind z. B. laserbasierte Messge-

¹ Das Gerät befindet sich heute im Deutschen Historischen Museum in Bonn /1/

räte (u. a. Entfernungsmessung, Feinmesstechnik, Interferometer, Analysenmesstechnik, Spektroskopie). Aber auch als Fluchtungs laser im Bauwesen und für die Steuerung von Großgeräten im Tunnel-, Tage- und Gleisbau kamen die Laser zum Einsatz. Die Applikationsforschung für diese Anwendungen betrieb die Bauakademie der DDR /7/.

Erwähnt sei zudem der 1968 im Zentralinstitut für Optik und Spektroskopie (ZOS)² von W. Radloff entwickelte Laser für den Einsatz im Physikunterricht der Erweiterten Polytechnischen Oberschulen /8/. Der Auftrag für diese Entwicklung kam von der damaligen Bildungsministerin der DDR, die Umsetzung fiel dann leider den hohen Gesamtkosten des Vorhabens zum Opfer. Der heute noch funktionsfähige Prototyp ist in der Ausstellung zu sehen.

Insgesamt war die Zeit bis 1970, wie auch in den übrigen Ländern mit traditioneller physikalischer Forschung, durch die Entwicklung und den Nachweis der Funktionsweise verschiedener Laserquellen (Nd-Glas- und Nd-YAG-Laser, Argonlaser, Farbstofflaser, Halbleiterlaser usw.) geprägt. Zentren der Laserentwicklung waren das ZOS in Berlin, die Sektion Physik der FSU Jena sowie der VEB Carl Zeiss Jena. Der Mauerbau verhinderte den Zugriff auf bestimmte Materialien, z. B. Laserstäbe, und erschwerte spürbar die Produktion von Lasergeräten. Dennoch begannen in den Zentren schon bald erste Untersuchungen zur Materialbearbeitung (z. B. Bohren) mit den selbst entwickelten Lasern. 1969, mit dem ersten im ZOS realisierten kontinuierlichen CO₂-Laser mit > 100 W Ausgangsleistung /2/, erfuhren diese Arbeiten noch einen zusätzlichen Schub.

Zu den hier unbedingt noch zu nennenden Verdiensten des ZOS Berlin gehören die Organisation und Durchführung der Internationalen Tagung „Laser und ihre Anwendungen“. Es war die im „Ostblock“ größte Tagung auf dem Gebiet der Lasertechnik und fand zwischen 1973 und 1989 mehrmals im Dresdner Rathaus statt. 1977 nahm an der Tagung in Dresden auch Prof. N. G. Basow als Vortragender teil /2, 9/. Nobelpreisträger Prof. N. G. Basow und forschte auf dem Gebiet der laserbasierten Kernfusion /2/ und leitete das Physikalische Institut der Akademie der Wissenschaften der UdSSR (FIAN) in Moskau, welches in enger Kooperation mit dem ZOS und den anderen Laserzentren in der DDR stand. Die im FIAN installierte Versuchsanlage mit der Bezeichnung „Delphin“ bestand aus 256 Festkörperlasern, deren zeitlich exakt synchronisierten Laserpulse auf ein in einer Prozesskammer befindliches Target fokussiert wurden. Ein von Prof. K. Junge zur Verfügung gestellter Originallaserstab der „Delphinanlage“ befindet sich in der Ausstellung.

Auch über die genannten Zentren der Laserforschung hinaus begann man sich sehr frühzeitig mit den Möglichkeiten des neuen Werkzeuges auseinander zu setzen. So befasste sich z. B. das Forschungsinstitut Manfred von Ardenne kurzzeitig mit Überlegungen und experimentellen Untersuchungen zur Anwendung des Lasers zum Schweißen, stellte diese Arbeiten aber bereits 1965 wieder ein /10, 11/.

Nachhaltiger waren dagegen die Arbeiten des von Prof. W. Gilde geleiteten Zentralinstitutes für Schweißtechnik (ZIS) der DDR in Halle. Hier erschienen bereits 1962 erste Aufsätze in der viel beachteten Hauszeitschrift ZIS-Mitteilungen von G. Buneß³ /12, 13/. In der Nachfolgeeinrichtung des ZIS,

² 1969/1970 erfolgte der Zusammenschluss der Berliner ADW-Institute - Institut für Optik und Spektroskopie, II. Physikalisch-Technisches Institut, Institut für spezielle Probleme der theoretischen Physik - und der Forschungsstelle für Messtechnik und Automatisierung Jena der AdW zum Zentralinstitut für Optik und Spektroskopie (ZOS), Direktor Prof. K. Junge

³ neben den bereits o. g. genannten Personen ein weiterer Pionier der Laserapplikation der DDR

der Schweißtechnischen Lehr- und Versuchsanstalt beim DVS, werden bis heute Forschungsarbeiten auf dem Gebiet der Laser- und Elektronenstahltechnik durchgeführt.

Angesichts der vielfältigen Aktivitäten verwundert es etwas, dass die nächste Veröffentlichung zur Laseranwendung in den ZIS-Mitteilungen erst 1972 erschien /14/. Man beachte dabei, dass die materiell-technische Basis für Laseranwendungen zum Schneiden und Schweißen außerhalb der oben genannten Zentren noch nicht gegeben war und zu damaliger Zeit in der Regel von den „Enthusiasten“ selbst geschaffen werden musste.

Forschung zur Lasermaterialbearbeitung in Dresden bis 1980

Der für seine Weitsicht bekannte Prof. W. Bobeth, Ordentliches Mitglied der AdW und Leiter des damaligen Wissenschaftsbereiches Textiltechnik der Sektion Verarbeitungs- und Verfahrenstechnik der TU Dresden, hörte 1970 auf einer Akademiesitzung einen Vortrag von Prof. K. Junge zu Perspektiven der Lasertechnik. Er initiierte unmittelbar darauf eine Diplomarbeit zu Möglichkeiten des Lasereinsatzes in der Textil-, Bekleidungs- und Chemiefaserstoffindustrie /15/. Die in der von den Autoren mitbetreuten Arbeit aufgezeigten prinzipiellen Anwendungsgebiete der Lasertechnik in den genannten Branchen waren der Ausgangspunkt für den Einstieg in dieses Forschungsgebiet.

Anfangs war die Durchführung experimenteller Untersuchungen für die Dresdner Forscher immer mit Dienstreisen zum ZOS in Berlin verbunden. Schnell wurde deshalb parallel mit der Schaffung einer eignen materiell-technischen Basis begonnen. So entstand in Zusammenarbeit mit den Erfahrungsträgern des ZOS in Dresden der erste gleichspannungsangeregte CO₂-Laser mit 50 W Ausgangsleistung, siehe Abb. 1. Auf die gleiche Weise hat sich auch das ZIS Halle seinen ersten CO₂-Laser geschaffen /14/.



Abb. 1 Erster CO₂-Laser außerhalb des ZOS an der TU Dresden (1970)

Die Vervollkommnung der Experimentiertechnik wie z. B. Fokussieroptik, Materialtransport- und Positioniereinrichtung für reproduzierbare Experimente, Absaugung zur Beseitigung der bei der Bearbeitung entstehenden Stäube und Dämpfe, u.v.m. stand in den nächsten Jahren immer wieder im Mittelpunkt der Aktivitäten. Daneben wurden vor allem Untersuchungen zum Trennen von textilen Flächengebilden und zur Fadenerwärmung bei Hochgeschwindigkeitsprozessen durchgeführt. So kam der Laser z. B. beim Schnellspinnen zum Einsatz, wo Fadenlaufgeschwindigkeit größer 4000 m/min an der Tagesordnung sind. Industrieller Partner war hier der VEB Chemiefaserkombinat Schwarza in Thüringen, wo 1972 die Ersterprobung der neuen Technologie stattfand. Schnell zeigte

sich, dass der Laser das ideale Werkzeug dafür ist, hohe (Wärme)Energie in kürzesten Wechselwirkungszeiten auf kleinste Flächen zu übertragen /16/.

Auf Grund der erfolgversprechenden Ergebnisse in Schwarza wurde zur Weiterführung der Arbeiten am Wissenschaftsbereich Textilchemie der TU Dresden ein Schnellspinn-Versuchsstand errichtet, siehe Abb. 2. Die Forschergruppe wurde darüber hinaus mit dem Universitätspreis der TU Dresden ausgezeichnet /17/.

1973 wurde das Thema „Möglichkeiten der Laseranwendung in der Textilindustrie“ in Regie des Textilkombinates Cottbus, später des Forschungsinstitutes für Textiltechnologie Karl-Marx-Stadt, in den Staatsplan für Wissenschaft und Technik eingeordnet.

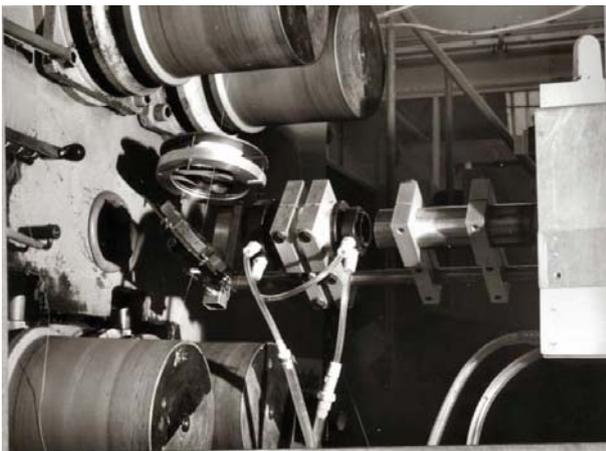


Abb. 2 Versuchsstand zur lasergestützten Synthesefadenherstellung an der TU Dresden (1976); Laserkopf im Bild rechts.

Mit der Erprobung in Schwarza wurde auch nachgewiesen, dass sich der Laserstrahl über Spiegel relativ einfach zu einem vom Standort der Strahlquelle unabhängigen Einsatzort transportieren und somit gut in bestehende Fertigungsanlagen integrieren lässt. Allerdings zeigte sich auch, dass

- 50 W Laserleistung auf Grund der relativ hohen Prozessgeschwindigkeiten in der Verarbeitungsindustrie oft zu gering sind
- zunehmend von den Industriepartnern der Wunsch herangetragen wurde, im Labor erreichte qualitativ gute Ergebnisse (wie z. B. Trennen bei gleichzeitiger Schnittkantenverfestigung ohne zusätzlichen Nähprozess) unter Praxisbedingungen nachzuweisen und
- CO₂-Laser in der DDR noch gar nicht industriell verfügbar waren.

Deshalb wurde 1974 ein kompakter, transportabler und gegenüber dem Laborbetrieb höheren Sicherheitsanforderungen genügender CO₂-Laser mit 200 W Ausgangsleistung konzipiert und in einer überbetrieblichen Neuerer-Vereinbarung⁴ realisiert (Abb. 3). Ein stabiles Gehäuse ermöglichte den einfachen Anbau variabler Bearbeitungsköpfe⁵. Die Kabel- und Schlauchverbindungen zu dem fahrbaren „Versorgungsschrank“ mit Steuerung, Netzteil (20 kV) und Kühlung ließen sich mit Schnellkupplungen lösen. Weiteres Novum war der schnelle Strahlverschluss, der hier aus einem elektrisch

⁴ Neuerer-Vereinbarungen erwiesen sich in dieser Zeit als probates Mittel, unabhängig von den jeweiligen „Planaufgaben“ der Partner schnell und unabhängig von Plan und Bilanzen Geräte zu realisieren. Partner im vorliegenden Fall waren Erfahrungsträger des ZOS und die Zentralwerkstatt der Sektion Verarbeitungs- und Verfahrenstechnik der TU Dresden.

⁵ Mit Bearbeitungskopf ist allgemein die Einheit bezeichnet, die die bedarfsgerechte Optik, Kühlung und Gasführung für Schutz- oder prozessunterstützendes Gas enthält.

aus dem Strahl herausziehbaren Umlenkspiegel bestand, der den Strahl zur Unterbrechung des Strahlaustritts in einen wassergekühlten Absorberkegel lenkte⁶.



Abb. 3 Transportabler 200 W-CO₂-Laser mit Bearbeitungskopf im Labor an der TU Dresden (1974)

Mit dieser technischen Basis wurden in den Folgejahren verschiedenste Entwicklungsprojekte durchgeführt. Erwähnt seien hier die grundlegenden Untersuchungen für den Medizinbereich. Diese fanden ihren erfolgreichen Abschluss in der Mitarbeit am ersten chirurgischen Lasergerät der DDR, welches 1979 in der Charité Berlin in Betrieb genommen wurde /18/.

Ein häufiges Forschungsthema war der Kantenbeschnitt textiler Flächengebilde bei gleichzeitiger Stabilisierung der Schnittkante. Zum Teil wurde direkt an den Produktionsanlagen gearbeitet /19/. Abb. 4 zeigt den Randbeschnitt von Polyamid-Elementarfadenvliesstoff im VEB Technische Textilien Olbersdorf. Ziel war es hier, den Randbeschnitt vor dem Beschichten des Vlieses mit einem Mittel auf Latexbasis durchzuführen. Damit wollte man Sondermüll vermeiden, das reine Randstreifenmaterial wieder für den Schmelzspinnprozess verwenden und gleichzeitig Beschichtungsmaterial einsparen. Auf Grund der filigranen Struktur des unbeschichteten Vlieses war dies nur mit einem berührungslos arbeitenden thermischen Werkzeug möglich /20/.



Abb. 4 Laserrandbeschnitt von Polyamid-Elementarfadenvliesstoff vor der Beschichtung in Olbersdorf (1976)

Weitere Beispiele waren der Randbeschnitt von Geweben aus Glasfaserstoffen für die Dachpappen- und Tapetenherstellung im VEB Glaswerke Haselbach, BT Brattendorf (Thüringen), das Konfektionieren von Windeln aus Nähwirkvliesstoff, Gewebe und Vliesstoffe für Filter und der Randbeschnitt von Regenschirmbespannstoff (Polyesterseidengewebe) im VEB Greika Greiz (Abb. 5). In /21/ sind weitere Einsatzmöglichkeiten der Lasertechnik in der Textilindustrie aufgezeigt.

⁶ Bislang wurde an den Experimentierlasern im Labor der Strahl i. d. R. durch einen in den offenen Strahlengang gestellten Ziegelstein unterbrochen; ein kurzzeitiges Ab- u. Zuschalten der gleichspannungsgeregten Laser war nicht möglich.



Abb. 5 Spann-, Trocken- u. Fixiermaschine mit integrierten CO₂-Lasern und Randstreifenabsaugungen zum Randbeschnitt von Regenschirmbespannstoff in Greiz (1979)

Für die genannten und für weitere untersuchte Anwendungen wurde neben der technischen Lösung auch die Wirtschaftlichkeit auf Basis der „Eigenbaulaser“ nachgewiesen /19/. Es erhebt sich daher die Frage, warum es nicht zu einer Einführung in den jeweiligen Betrieben gekommen ist. Hauptgründe dafür waren sowohl subjektiver als auch objektiver Natur:

- die Textilindustrie galt als relativ investitionsschwacher Wirtschaftszweig
- den Betrieben fehlte der ökonomische Druck, das vermeintliche Risiko bei der Einführung einer für den Industriezweig völlig neuen Technik einzugehen
- für Konturenschnitte fehlte es an Systemlösungen (Laser, Maschinen- und Anlagenkonstruktion sowie –bau, elektronische Steuerungen für Schnittgeschwindigkeiten deutlich über 1 m/min, anwendungsspezifische Systeme für Strahlführung, Strahlformung, Strahlfokussierung möglichst aus einer Hand) /22/
- Generelle Verfügbarkeit von Lasersystemen, die den hohen Zuverlässigkeitsforderungen (24 h-Betrieb) und Aufstellbedingungen (z. B. hohe Umgebungstemperatur) in der Textilindustrie genügen
- hohe Kosten und eingeschränkte Gewährleistung der ersten in der DDR produzierten CO₂-Laser⁷

Im Frühjahr 1982 wurde die Lasergruppe der Sektion Verarbeitungs- und Verfahrenstechnik der TU Dresden in das Zentralinstitut für Festkörperphysik und Werkstofforschung (ZFW) eingegliedert. Die Arbeiten für die Textilindustrie kamen zum Erliegen, die Laserbearbeitung metallischer Werkstoffe rückte mehr und mehr in den Mittelpunkt⁸.

Forschung und Entwicklung zur Lasermaterialbearbeitung in Halle, Jena und anderen Zentren

Ein Blick auf andere bereits ab den 70-er Jahren aktive Forschungsstellen in der DDR (IHS Mittweida /23/, TH Ilmenau /24/, Sektion Technologie der FSU Jena /25/) zeigt analoge Probleme.

Erwähnenswert ist die bereits 1973 auf Initiative von Dr. L. Städtler erfolgte Industrieintroduction der Oberflächengravur von hochwertigen Gebrauchsgläserserien (z. B. Sekt-, Wein u. Biergläser) im VEB Lausitzer Glas in Weißwasser. Die Gläser wurden mit einer die CO₂-Laserstrahlung reflektierenden Kupferfolie abgedeckt, deren Aussparungen das jeweilige Muster enthielten. Sie wurden so positio-

⁷ Die vom VEB Feinmechanische Werke als Prototypen ab 1978 gebauten Laser LGL 200 hatten einen Preis von > 280.000 Mark der DDR /18/.

⁸ Kommentar von Prof. Bobeth: „Wir waren wohl etwas zu zeitig“. Heute ist das Lasertrennen von textilen Flächengebilden eine eingeführte Technologie, z. B. Zuschnitt von Airbags.

niert, dass sich bei der Drehbewegung der Laserstrahlfokus auf der Glasoberfläche befand und durch die Relativbewegung feine Glaspartikel linienförmig abgesprengt wurden. Während der Drehbewegung wurde das Glas kontinuierlich um die „Spurbreite“ angehoben, so dass die in der Abdeckfolie offenen Flächen überfahren werden konnten und ein flächiges Dekor entstand.

Eine Ausnahmestellung nimmt das ZIS in Halle ein, wo von Prof. G. Buneß 1972 ein 200 W-CO₂-Laser in Betrieb genommen wurde /14/. Schwerpunkt der Untersuchungen war das Trennen von 0,2 bis 1,5 mm dicken Blechen (Dünnblech) mit Schnittgeschwindigkeiten bis maximal 2 m/min. Schnell wurde hierbei erkannt, dass für weitere Erprobungen und die industrielle Umsetzung der qualitativ guten Schneidergebnisse neben Laser und Fokussiereinrichtung eine zumindest zweidimensional gesteuerte Relativbewegung zwischen Laserstrahl und Werkstück erforderlich ist. Deshalb wurde eine in der Brennschneidtechnik der DDR eingesetzte Kreuzwagenbrennschneidmaschine K 70 mit lichtelektronischer Steuerung mit dem verfügbaren 200 W-CO₂-Laser verkoppelt, wodurch maximale Bahngeschwindigkeiten von 3 m/min realisierbar wurden. Die daraus resultierende Laser-Trenneinrichtung wurde zur Leipziger Frühjahrsmesse 1974 präsentiert /26/.

Die Hauptbaugruppen des Schweißrobotersystems ZIS 995 bildeten im folgenden u. a. die Basis für die erste CNC-Laserschneidmaschine des VEB Rationalisierungsmittelbau Neukirch im Landmaschinenkombinat „Fortschritt“ Neustadt (heute Trumpf Lasertechnik Sachsen GmbH) /27/. Auch eine Mehrzweck-Laserstrahlanlage des ZFW fußte auf diesem Konzept /28/. Zudem entstand auf Basis der kontinuierlich weiterentwickelten Systemtechnik eine der ersten Industrieanwendungen des CO₂-Laserstrahltrenns. Im VEB Neontechnik Halle, Hersteller der in den 80-er Jahren aufkommenden Leuchtreklame, kam der Laser beim Zuschnitt von Plexiglas-Teilen zum Einsatz. Vorteile des Laser-trenns waren die „glasklaren“ transparenten Schnittkanten, die beim mechanischen Trennen nur durch aufwendiges Nachpolieren erreichbar sind.

Im ZIS wurde auch das Mikroschweißen mit Laser vorangetrieben. Dabei kamen aus der UdSSR importierte Laser auf Basis der Quant-Typenreihe zum Einsatz. Mit dem Einschweißen der temperaturempfindlichen Elektronik in Herzschrittmachergehäuse /29, 30/ (siehe auch Ausstellung TSD) und von Halbleitermodulen im Werk für Fernsehlektronik Berlin entstanden die ersten industriellen Schweißanwendungen in der DDR.

1975 begann der VEB Feinmechanische Werke Halle (FEHA)⁹ unter der fachlichen Leitung von Dr. M. Pöhler, Mitarbeiter an der FSU Jena, mit der Entwicklung von CO₂-Lasern für den industriellen Einsatz. 1978 wurden erste Prototypen verkauft. Wie alle bisher erwähnten CO₂-Laser handelte es sich dabei um sogenannte langsam längs geströmte Laser /31/. Ressourcen für andere CO₂-Lasertypen (z. B. quer- oder schnell längs-geströmt) waren nicht vorhanden. Zudem setzte Dr. M. Pöhler bereits zu Beginn der 80-er Jahre auf die mit langsam längs geströmt Lasern erzielbare hohe Strahlqualität. Die Erkenntnis, dass für die Materialbearbeitung die Leistungsdichte, also die Leistung pro Wirkfleckdurchmesser, und nicht die Ausgangsleistung des Lasers eine der prozessbestimmenden Einflussgrößen ist, hatte sich zunehmend durchgesetzt¹⁰.

⁹ Der VEB Feinmechanische Werke Halle (FEHA) war ein Betrieb des Ministeriums für Bezirksgeleitete Industrie und Lebensmittelindustrie. Das Ministerium war von 1965 bis 1989 verantwortlich für die bedarfsgerechte Be- und Verarbeitung von Agrarprodukten zu Nahrungs-, Genuss- und Futtermitteln sowie für ausgewählte Betriebe der Konsumgüterproduktion.

¹⁰ Da sich Laserstrahlen mit höherer Strahlqualität besser, d. h. auf kleinere Strahldurchmesser fokussieren lassen und der Strahldurchmesser quadratisch in die Wirkfläche eingeht, werden bei gleicher Laserleistung deutlich höhere Leistungsdichten erzielt.

Ab 1981 wurden bei FEHA die ersten Singlemodelaser der SM-Baureihe produziert (SM 150; siehe auch Ausstellung TSD). Die SM-Baureihe wurde kontinuierlich weiterentwickelt (SM 400 ab 1984, SM 1200 bis 1990) /32/. Die konsequente und beharrliche Verfolgung dieses Prinzips sicherte FEHA das „Überleben“ nach der politischen Wende. Neben der Kooperation mit dem ZIS auf dem Gebiet der Systemtechnik ging FEHA auch eigene Wege. In Kooperation mit Unternehmen in der CSSR entstand 1988 das CNC-CO₂-Laserschneidsystem LCS 400-1 mit einer Bearbeitungsfläche von 2015 x 1450 mm² /33/. Diese Anlage wurde u. a. im Reichbahnausbesserungswerk (RAW) Cottbus (Vertragspartner des ZFW) zum Schneiden großformatiger Dichtungen für Diesellokomotiven eingesetzt.

An der Sektion Physik der FSU Jena wurden in einer Arbeitsgruppe unter Prof. G. Wiederhold u. a. Nd-YAG-Festkörperlaser mit Ausgangsleistungen von 20 W bis 100 W für den Einsatz in der Messtechnik und Mikromaterialbearbeitung entwickelt /3/. Neben dem Schneiden dünner Folien und dem Abgleich von Widerständen erwies sich die Lasergravur als Applikationsfeld von besonderem Interesse. So konnte die Produktion der Laser sowie wichtiger Baugruppen, z. B. Güteschalter, in den VEB Mikrofontechnik Gefell (MTG) überführt werden.

Nach 1983 begann mit diesen Lasern auch die Entwicklung von Lasergravurautomaten an der FSU Jena und im VEB MTG. Mit einer extrem hohen Fertigungstiefe nahezu aller Systembaugruppen (Scannerantriebe, Güteschalter, Modenblenden, HF-Baugruppen, ...) und großem Enthusiasmus gelang es dem Unternehmen, den Laserbeschriftungsautomat GSA ab 1986 zu produzieren. In der Ausstellung ist der Beschrifteter nebst Originalsteuerung, jedoch ohne Stromversorgung und Kühlung für den Laser, im Vergleich zu einem modernen Beschrifteter der Fa. Trumpf ausgestellt. Nach 1990 gründete sich die Lasersparte des VEB MTG als RABE-Lasertechnik aus.

Laseroberflächenveredlung in Dresden, Entwicklung und Bau von Hochleistungslasern in Jena und in Pirna

Nach der Einbeziehung der AdW in die staatliche Planung der Wirtschaft widmete sich die AdW in den 70-er Jahren neben der Grundlagenforschung verstärkt der Anwendungsforschung. Dazu gehörte auch die Ausrichtung der Forschung auf die Nutzung der Lasertechnologie. Folgerichtig erhielt auch das Zentralinstitut für Festkörperphysik und Werkstoffforschung (ZFW) von Prof. G. Albrecht, Leiter des Forschungsbereiches Physik der AdW, die Anregung, die Laserstrahlmaterialbearbeitung in grundlegendem Umfang als Arbeitsrichtung aufzunehmen. Im Fokus stand die Entwicklung neuartiger Technologien zur Veredlung von Oberflächen /34/.

Ab 1981 wurden am ZFW, im Wesentlichen unter der fachlichen Leitung von R. Krumphold (†), W. Pompe und W. Reitzenstein eine Reihe jeweils mehrjähriger Projekte, zunächst der Grundlagenforschung (G) und darauf aufbauend der Anwendungsforschung (A) zur Laser-Oberflächenveredlung bearbeitet.

- Lasertechnik für die Entwicklung neuer Werkzeugwerkstoffe (G)
- Grundlagen der Strukturentwicklung bei der LOV (G)
- Laser-Oberflächenveredlung von C-haltigen Stählen und Gusseisen (G)
- Laser-Oberflächenveredlung durch Um- und Einschmelzen (G)
- Laser-Oberflächenveredlung von Maschinenbauteilen (A)
- Laser-Oberflächenveredlung von großen und formkomplizierten Bauteilen (A)

Zur Laserbestrahlung von Oberflächen standen zunächst nur Laser mit niedrigen Leistungen zur Verfügung (200-W-Eigenbaulaser der ehemaligen TU-Arbeitsgruppe, ab 1982 der Laser LGL 200 und ab 1984 der SM 400 von FEHA). Damit konnten durchaus Erkenntnisse zu prinzipiell möglichen Strukturveränderungen bei der Laser-Oberflächenveredlung und den damit verbundenen Eigenschaftsverbesserungen gewonnen werden /35/. Auch erste Anwendungen zur Standzeiterhöhung von Maschinenbauteilen z. B. durch das Härten von Kanten, wurden realisiert. Erwähnt sei hier zudem das Härten von Bobkufen für die Schlitten von Dynamo Zinnwald und der Nationalmannschaft.

Die Laserbearbeitung großer und formkomplizierter Bauteile bedingt Einrichtungen für die Strahlübertragung, -formung und/oder -fokussierung sowie für Bauteiltransport, Positionierung und Steuerung. Die „Dresdner Lösung“ bestand aus einem modifizierten CNC-gesteuerten Koordinatenbohrwerk BKOX vom VEB Mikromat, welches mit verschiedenen Einrichtungen für die Strahlübertragung, Strahlformung und/oder -fokussierung kombiniert wurde. Die „Baukastenlösung“ ermöglichte es den Forschern, je nach Bedarf verschiedene Laser zu nutzen (vgl. auch Abb. 6).

Ein volkswirtschaftlich effektiver Einsatz der LOV in der Industrie erforderte Laser mit höheren Ausgangsleistungen. Dies wurde seitens der AdW-Leitung frühzeitig erkannt. In der zweiten Hälfte der achtziger Jahre erhielt das ZFW mit Unterstützung von Prof. G. Albrecht im Rahmen des devisenlosen Akademieaustausches mit der Sowjetischen Akademie der Wissenschaften einen langsam längsgerichteten CO₂-Laser mit 800 W Strahlleistung (Katun). (Als Gegenleistung bekam die sowjetische Seite eine lichtelektronisch gesteuerte Kreuzwagenbrennschneidmaschine K 70 mit einem Laser SM 400.)



Abb. 6: Blick ins 1. Applikationslabor des ZFW Dresden, Mitte: Laser Katun, rechts: modifiziertes Koordinatenbohrwerk (Mikromat), links: Laser SM 400 einschl. Strahlübertragung

Trotz unbefriedigender Leistungsstabilität erweiterte der Katun die Möglichkeiten für die Bauteilbearbeitung beträchtlich, vor allem durch hohen Einsatz der Experimentatoren. Parallel dazu beauftragte Prof. G. Albrecht bereits 1983 das Physikalisch-Technische Institut (PTI) der AdW in Jena mit der Entwicklung eines CO₂-Hochleistungslasers mit 5 kW Laserleistung /36/. Leiter der 6-köpfigen Arbeitsgruppe war Prof. W. Triebel.

Entsprechend dem damaligen Stand und vor allem der materiell technischen Voraussetzungen wurde die Entwicklung eines Querstromlasers aufgenommen. Bereits 1986 wurde im PTI das realisierte Funktionsmuster vorgeführt /37/. Für die Fertigung von zunächst 6 geplanten Lasern auf der Grundlage des Funktionsmusters wurde der VEB Strömungsmaschinenbau Pirna (SMP) gewonnen. Das erste Gerät wurde bereits 1987 dem ZFW, das nächste dem ZIS Halle zur weiteren Erprobung und zum

Einsatz für die Applikationsforschung übergeben. Für die Überführung von Forschungsergebnissen erhielten die Vertragspartner des ZFW, RAW Cottbus, RAW Schöneweide, Rohrkombinat Riesa und SMP ebenfalls Laser aus der Vorserie. Der letzte der geplanten 6 Laser wurde 12/1988 im SMP fertiggestellt. Ein Originalgehäuse mit den noch verfügbaren Baugruppen ist in der Ausstellung zu sehen.

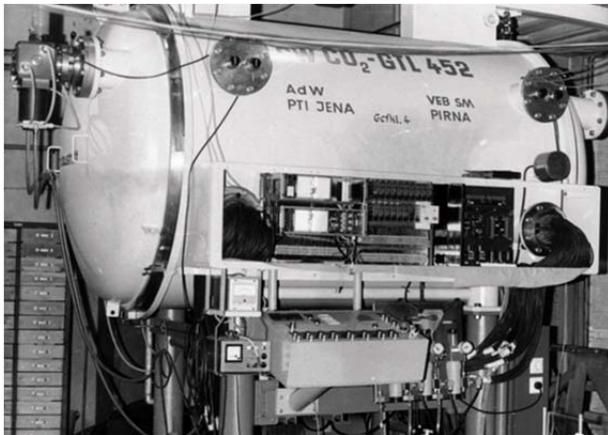


Abb. 7: Gastransportlaser GTL 452 im ZFW Dresden, Entwicklung PTI Jena, Fertigung SM Pirna

Die genannten Entwicklungs- und Realisierungszeiten sind umso höher zu bewerten, wenn man die Voraussetzungen näher betrachtet. Laser- und Optikkomponenten, die Leistungen > 1 kW standhalten, unterlagen den Embargobestimmungen. Kommerziell verfügbare unter Vakuumbedingungen einsetzbare Kühler, Gebläse und Antriebsmotoren waren nicht erhältlich. Auch lagen keinerlei Erfahrungen für vakuumdichte Kabeldurchführungen für Entladestrom und Antriebe vor.

Auf der Basis der Ergebnisse der werkstoffwissenschaftlichen Grundlagenuntersuchungen zur gezielten Eigenschaftsbeeinflussung von Werkstoffoberflächen wurden unter Nutzung des CO₂-Lasers SM 400, des Lasers Katun und des CO₂-Gastransportlasers GTL am ZFW eine Reihe von Überführungslösungen erarbeitet /38/. Im nachfolgenden Kapitel soll eine kleine Auswahl beschrieben werden.

Ausgewählte industrielle Anwendungsbeispiele der Laseroberflächenveredlung in der DDR

Ein wichtiger Arbeitsschwerpunkt der Dresdner Forscher war das Laserstrahlumwandlungshärten von Stählen und Gusswerkstoffen (GGL). Das konventionelle Härten dieser Werkstoffe basiert ganz allgemein auf der Bauteil- bzw. Randschichtwärme bis zur Austenitumwandlung und anschließender schneller Abkühlung. Merkmale des Randschichthärtens mittels Laserstrahlen sind der sehr gut steuerbare Wärmeeintrag¹¹ in ein räumlich begrenztes, oberflächennahes, kleines Werkstoffvolumen und die sogenannte „Selbstabschreckung“.

Letzteres bezeichnet die beim Laserstrahlhärten typische schnelle Materialabkühlung, die nach dem Beenden der Laserstrahleinwirkung durch Wärmeleitung ins Materialinnere erfolgt. Sie ist um ein Vielfaches schneller als die durch Wärmeübergang an ein Abschreckmedium erreichbare Wärmeleitung. Daraus resultieren u. a.

- eine zum Teil deutlich höhere Härte der oberflächennahen Bereiche auf Grund der höheren Abschreckgeschwindigkeit

¹¹ Mit dem Laser ist es möglich, bis knapp unter die Schmelztemperatur zu erwärmen.

- die Bauteile behalten ihre übrigen Materialeigenschaften, weshalb in einigen Fällen preisgünstigere Grundwerkstoffe eingesetzt werden können
- die Bauteile bleiben nahezu verzugsfrei (keine Nacharbeit)
- eine hohe Energieeffizienz bei der Erwärmung, weil nur Funktionsflächen behandelt bzw. nur kleine Volumen erwärmt werden.

Dass Laserstrahlhärten wird deshalb bei „kleinen“ Funktionsflächen an formkomplizierten und großformatigen Bauteilen besonders attraktiv.

Erste Anwendungsbeispiele kamen u. a. aus dem Instandhaltungssektor. In vielen Fällen war es aus materialökonomischer Sicht sinnvoll, Bauteile für die Dauer eines weiteren Laufzyklus zu ertüchtigen anstatt sie zu ersetzen. Dazu wurden die verschlissenen Funktionsflächen durch Nacharbeit auf ein für die Beanspruchung ausreichendes Maß und die geforderte Oberflächengüte gebracht. Anschließend wurden die Funktionsflächen laserstrahlgehärtet. Weitere Bauteileigenschaften, wie z. B. die Zug- und Dauerschwingfestigkeit, bleiben unbeeinflusst.

Beispiel 1: Härten von Endstufenschaufeln für Wärmekraftwerke:

Aufgabe: Endstufen-Laufschaukeln von großen Dampfturbinen in Wärmekraftwerken unterliegen während ihres Betriebes einer sehr hohen Verschleißbelastung durch Tropfenschlag. Dieser entsteht im Bereich der Schaufelspitzen, die sich mit einer Umfangsgeschwindigkeit nahe Schallgeschwindigkeit bewegen, durch Aufprall bereits kondensierter Wassertröpfchen. Selbst an den bei Neubauplaten zum Verschleißschutz aufgebrauchten Stelliteplatten entsteht an der Dampf-Eintrittskante ein deutlicher Materialabtrag (vgl. Ausstellung und Abb. 7). Die Endstufe einer 500 MW-Dampfturbinen besteht aus z. B. 96 Schaufeln zum Preis von je 5.000 (Valuta-)Mark.

Ziel: Verwendung der Schaufeln für einen weiteren Laufzyklus (36.000 Stunden zusätzlich)

Ergebnis: Bis 1991 wurden im ZFW in Regie des VEB Bergmann-Borsig Berlin mehrere Sätze Endstufenschaufeln für die Kraftwerke Boxberg, Lübbenau und Vetschau funktionsgerecht für einen weiteren Zyklus gehärtet. Die in /28/ und /39/ beschriebene Anlage kam bei der Durchführung des Turbinenschaufelhärtens zur Anwendung.

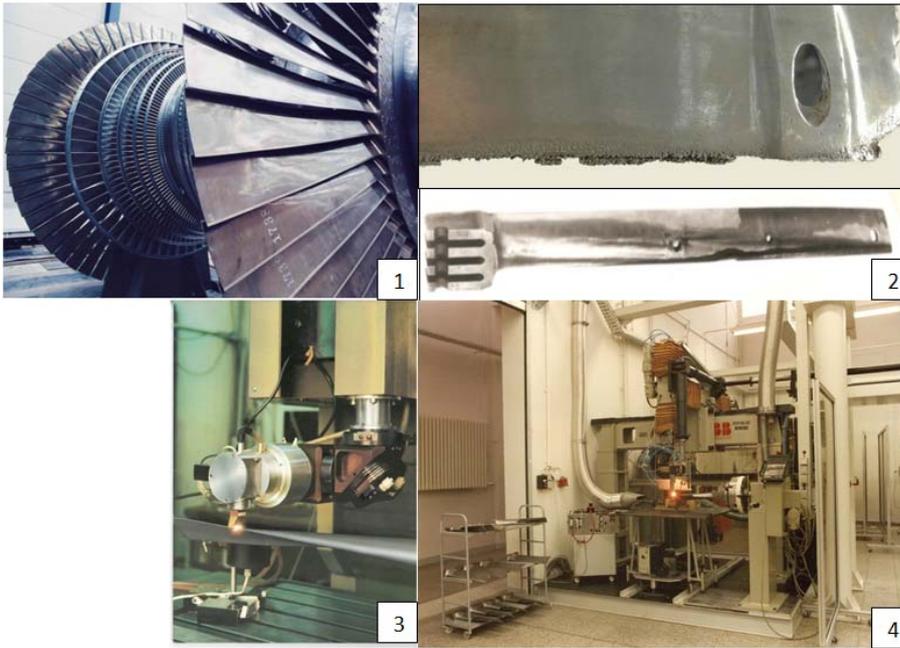


Abb. 8 Laserstrahlhärten von Endstufenschaufeln für Wärmekraftwerke

1 Turbinenläufer mit Endstufenschaufeln

2 Verschlissene Schaufelkante (oben), Reko-Schaukel mit „Ersatzkontur“ und gehärteter Eintrittskante (unten)

3 Erster Versuchsaufbau zum Laserstrahlhärten einer Reko-Schaukel im ZFW Dresden (1987)

4 Laseranlage zum Turbinenschaufelhärten im ZFW Dresden (1989) /28/

Beispiel 2: Verfahrensentwicklung zum Härten der Kammzonen für Riffelwalzen zur Herstellung von Wellpappe für VEB Kombinat Verpackung Leipzig

Aufgabe: Bei der Herstellung von Wellpappe werden flache Papierbahnen zwischen zwei zahnradförmigen Walzenkämmen in die Wellenform umgeformt. Bei Papierbahngeschwindigkeiten von ca. 250 m/min entsteht an den oberen Bereichen der Kammzonen Verschleiß. Schmutzpartikel infolge des zunehmenden Einsatzes von Altpapier verstärken den Verschleiß zusätzlich. Die Kosten für einen Riffelwalzenwechsel liegen zwischen 50.000 Mark und 300.000 Mark, je nachdem ob 2-, 3- oder 5-fach Wellpappe geformt wird.

Ziel: Standzeiterhöhung und damit Laufzeitverlängerung zwischen Walzenwechsel von Neuals auch regenerierter Walzen

Ergebnis: Erhöhung der Standzeit durch Laserstrahlhärten um durchschnittlich 50 %

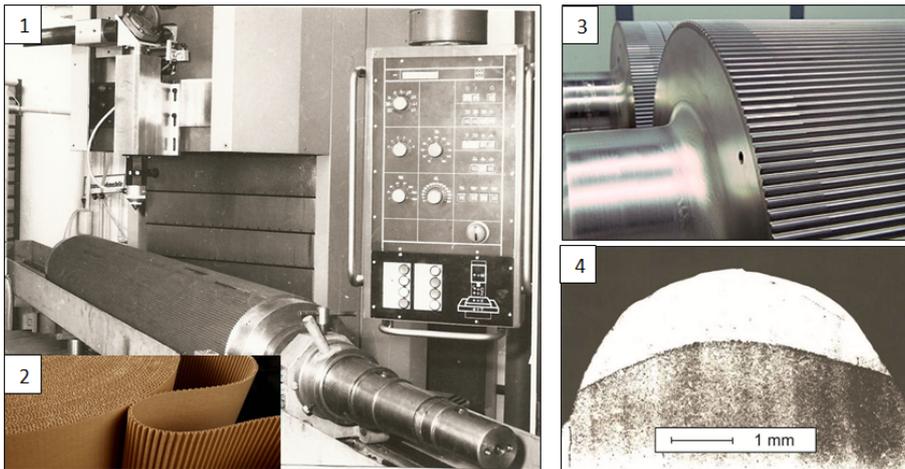


Abb. 9 Laserstrahlhärten von Riffelwalzenkämmen
 1 Versuchsanlage im ZFW Dresden
 2 Wellpappe
 3 Riffelwalzenpaar
 4 Querschliff durch gehärteten Kamm

Beispiel 3: Verfahrensentwicklung für beanspruchungsgerechtes Härten der Verschleißzone von Zylinderlaufbuchsen von Großdiesellokomotiven (Höhe 520 mm, Innendurchmesser 260 mm) für das Reichsbahnausbesserungswerk Cottbus

Aufgabe: Im Bereich des oberen Totpunktes der Laufbuchsen tritt hoher Verschleiß auf. Besonders kritisch sind Frühausfälle einer einzelnen Zylinderlaufbuchse bei Zwölfzylindermotoren.

Für den Import von neuen Zylinderlaufbuchsen fallen hohe Kosten an.

Ziel: Standzeiterhöhung, Vermeidung von Frühausfällen

Lösung: Beanspruchungsgerechtes bzw. verschleißbildgerechtes Härten der Innenwand durch Steuerung der Einhärtetiefe und Spuranordnung

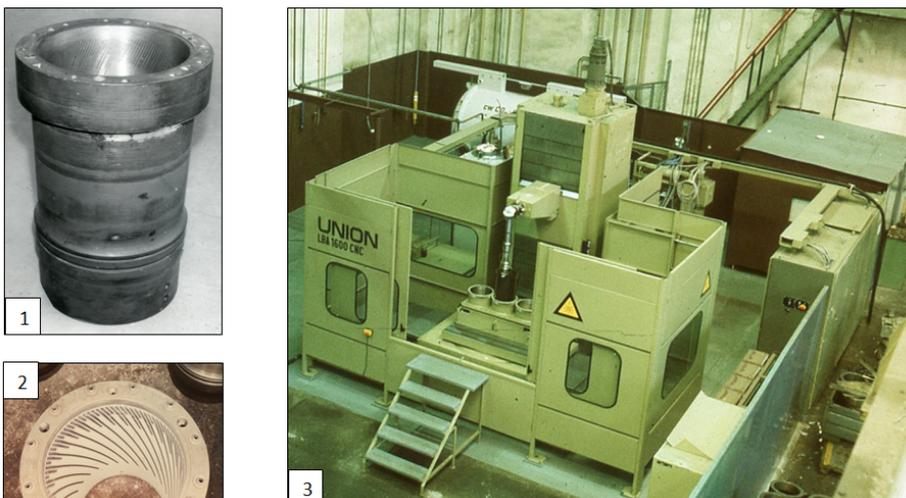


Abb. 10 Beanspruchungsgerechtes Härten von Zylinderlaufbuchsen im RAW Cottbus
 1 Laufbuchse
 2 Anordnung der Härtespuren
 3 Laserbearbeitungsanlage LBA 1600 CNC vom VEB Werkzeugmaschinenfabrik Union Karl-Marx-Stadt (links hinten GTL 452, vorn Innenbestrahlungskopf und Laufbuchsenaufnahme für 3 Bauteile) im RAW Cottbus (1988)

Für das RAW Cottbus wurde darüber hinaus die Technologie zum Härten der Haupt- und Pleuellager der Kurbelwellen von Großdiesellokomotiven entwickelt und überführt /40/.

Des Weiteren wurden am ZFW Dresden Technologien zum

- Härten von Knüpfernadeln für Hochdrucksammelpressen zum Bündeln von Stroh für das Landmaschinenkombinat Fortschritt Neustadt,
- Härten von Radsätzen der Berliner S-Bahn für das RAW Berlin-Schöneweide,
- Umschmelzhärten von Gusswerkstoffen, z. B. für das Rohrkombinat Riesa sowie
- Pulverauftragsschweißen von Verschleißschutzschichten auf Ventiltassenstößel für LKW

entwickelt. Ebenso wurden für den Werkzeugmaschinenbau Technologien zum Härten von Systempaletten und für Maschinenbetten von Präzisionsdrehmaschinen erarbeitet /41/.

Aufgrund der Verfügbarkeit der Anlagentechnik für die 3D-Bearbeitung wurde für den VEB Strömungsmaschinen Pirna eine Technologie zum 3D-Schneiden entwickelt und überführt. Diese diente zum Herstellen von schmalen Schlitzern zur formschlüssigen Aufnahme von Schaufeln für Strömungswandler, um bei gleicher Baugröße höhere Drehmomente zu beherrschen. Die Strömungswandler werden z. B. in Diesellokomotiven und auch in Dieselmotoren zum Umschalten zwischen Hub- oder Senkbewegung unter Last benötigt. Dass die Schlitzlöcher einen definierten, von der Senkrechten zur Oberfläche abweichenden Schnittkantenwinkel aufweisen mussten, war neben der Bauteilgeometrie eine zusätzliche Herausforderung /42, 43/.

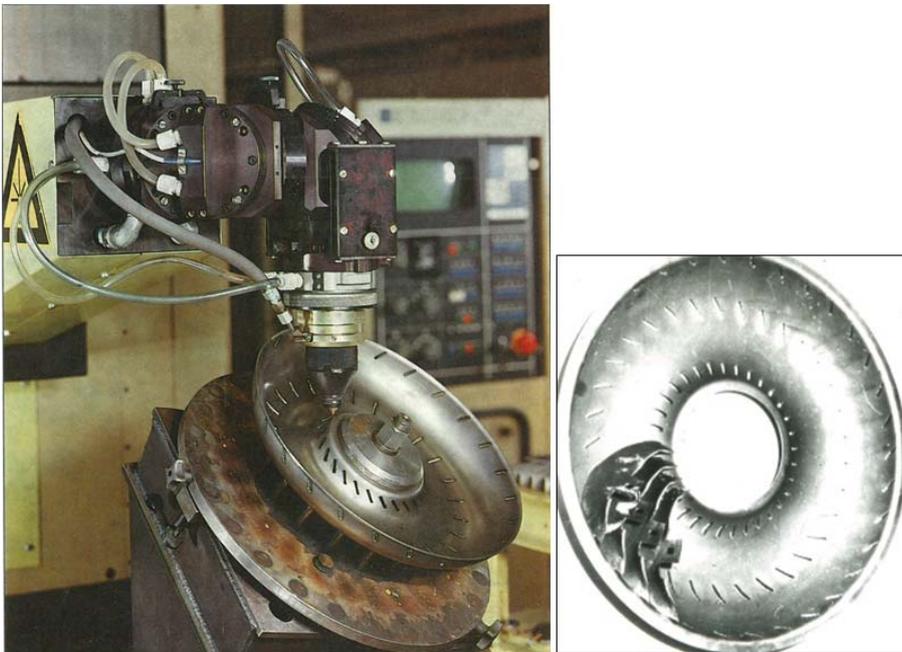


Abb. 11 Anlage zum Schlitzern von Wandlerchalen, kleines Bild zeigt eine Wandlerchale mit formschlüssig eingesetzten Schaufeln im SM Pirna (1987)

Zusammenfassung

Die am ZFW erzielten Ergebnisse zur Laseroberflächenveredlung und zur Systemtechnik einschließlich der für die damalige Zeit beachtliche Anzahl von Industrieüberführungen waren nach Auflösung der AdW am 31.12.1991 letztlich die Voraussetzung für die Übernahme des ZFW-Bereiches „Laseroberflächenveredlung“ (gemeinsam mit dem Bereich „Laserbasierte Verfahren zur Schichtabscheidung“) in die Fraunhofer Gesellschaft.

Analog trifft dies auch auf die anderen auf dem Gebiet der Lasertechnik tätigen und im Beitrag erwähnten Forschungs- und Fertigungseinrichtungen der DDR zu. Nahezu alle arbeiten noch heute auf dem Gebiet der photonischen Technologien in den Zentren Berlin, Dresden und Jena. Sie sind in Instituten der führenden Forschungsorganisationen oder in ausgegründeten Unternehmen beheimatet. Dies ist letztlich auch als Anerkennung der in der DDR trotz Embargobestimmungen, Nichtverfügbarkeit von Bauteilen und mangelnder Valutamittel geleisteten Forschungs- und Entwicklungsarbeit zu sehen.

Literaturverzeichnis

- /1/ Albrecht, H.: Laserforschung in Deutschland 1960 – 1970. Eine vergleichende Studie zur Frühgeschichte von Laserforschung und Lasertechnik in der BRD und der DDR. Habilitationsschrift an der Fakultät für Geschichts-, Sozial- und Wirtschaftswissenschaften an der UNI Stuttgart. 1996
- /2/ Witega e. V. (Hrsg): Wissenschaftshistorische Adlershofer Splitter Nr. 6 - Vom optischen Laboratorium in Berlin-Karow bis zum Zentralinstitut für Optik und Spektroskopie 1946 - 1991 - . 2000. ISSN 1434-1638
- /3/ Wiederhold, G.: Vier Jahrzehnte Laserentwicklung in Jena. Jenaer Jahrbuch zur Technik und Industriegeschichte Bd. 2;. Glaux Verlag. Jena 2000
- /4/ Koch, G.: Laserentwicklung und –fertigung in Jena: Von den Anfängen unter Paul Görlich bis zur Gegenwart. Jenaer Jahrbuch zur Technik und Industriegeschichte. Paul-Görlich-Sonderband 2006. Glaux Verlag. Jena 2006
- /5/ Fischer, E. P.: Laser -Eine deutsche Erfolgsgeschichte von Einstein bis heute-. Siedler Verlag. München 2010
- /6/ Moenke, H.: Laser-Mikrospektalanalyse. In: Jenaer Rundschau 11 (1966) 3
- /7/ Apel, P., Hoffmeister, H. u. a.: Lasertechnik im Bauwesen. VEB Verlag f. Bauwesen. Berlin 1984
- /8/ Radloff, W.: Lasergerät für Schul- u. Lehrzwecke. radio und fernsehen 13/67, S. 69-72
- /9/ ZOS u. Physik. Gesellschaft d. DDR ((Hrsg.): Tagungsband 3. Internationale Tagung „LASER und ihre Anwendungen“. Dresden 28. 03. – 01. 04. 1977
- /10/ v. Ardenne, M.: Visionen zur Technik des Jahres 2000. Technische Gemeinschaft 10 (1962). S. 3-4
- /11/ Festschrift 10 Jahre Forschungsinstitut M. v. Ardenne Dresden. 10 Jahre Forschung auf dem Felde Elektronenphysik, Ionenphysik, Kernphysik, Übermikroskopie, medizinische Elektronik und Physik. Dresden Weißer Hirsch. März 1955 bis März 1965.
- /12/ Buneß, G.: Laser - eine bahnbrechende technische Neuheit. ZIS-Mitteilungen 1962. S. 1276-1277
- /13/ Buneß, G.: Anwendung der Laser für die Schweißtechnik. ZIS-Mitteilungen 1963. S. 824-835
- /14/ Buneß, G.: Erste Schneidversuche mit dem CO₂-Laser ZIS 738. ZIS-Mitteilungen 1973. S. 282-287
- /15/ Schmiedel, R.: Analyse der Lasertechnik als neues Wirkprinzip in der Chemiefaserstoff-, Textil- und Bekleidungsindustrie. Diplomarbeit am Bereich Textiltechnik der Sektion Verarbeitungs- u. Verfahrenstechnik der TUD. 1970
- /16/ Bobeth, W., Pollack, D. u. Wiedemann, G.: Überblick über Grundlagen und Einsatzmöglichkeiten der Lasertechnik in der Textil-, Bekleidungs- und Chemiefaserstoffindustrie. Textiltechnik 25 (1975) Heft 2, S. 88–95
- /17/ UZ (Universitätszeitung der TUD) 10/1977

- /18/ Das gerechtfertigte Risiko. Gespräch zur Inbetriebnahme des ersten Chirurgischen CO₂-Lasers der DDR in der Charité Berlin. Technische Gemeinschaft (TG) 27 (1979) 9, S.33–34 (Teilnehmer: Doz. Dr. sc. med. K. F. Lindenau u. Dr.-Ing. J. Liebethuth (Charité), Dr. L. Wiczorek u. Ing. H. Kittel (ZOS d. AdW), Dr.-Ing. Wiedemann (FifT Karl-Marx-Stadt), A. Bux (BV d. KdT Bln.)
- /19/ Brunner, P., Pollack, D., Schlösser, H. u. Wiedemann, G.: Trennen textiler Flächengebilde mit nichtkonventionellen Trennverfahren. Forschungsbericht (A4) FIFT. Karl-Marx-Stadt 1978, S. 1–222 (plus Literatur und Anlagen)
- /20/ Böhmer, V., Pollack, D., Schlösser, H. u. Wiedemann, G.: Betrachtungen zum Einsatz des Lasertrennens im Industriezweig Technische Textilien. Techn. Textilien. 20(1977)2/3, S. 36-41
- /21/ Pollack, D. u. Wiedemann, G.: Anwendung der Lasertechnik in der Textilindustrie. Textiltechnik 32 (1982) 2, S. 117-123 u. 126
- /22/ Stein, B.: Ökonomische Bewertung der Entwicklung, Herstellung und Anwendung technologischer Laser für die Makromaterialbearbeitung in der DDR. Dissertation B (Dr. sc. oec.). HU Bln. 1990
- /23/ Zscherpe, G.: Mikrobearbeitung mit Laserstrahlung - Grundlagen und Anwendungsgebiete. Feingerätetechnik 25. Jg. H. 10 1976, S.444-446
- /24/ Mehlhorn, H. u. Herzer, H.: Entwicklungstendenzen der Laserbearbeitung in der Gerätetechnik. Feingerätetechnik 29. Jg. Heft 6/1980, S.246-249
- /25/ Ziermann, R.: Trennen von zylindrischen Hohlkörpern aus Glas. Wiss. Ztschr. Friedrich-Schiller-Univ.Jena. Math.-Nat. R., 23 Jg. (1974) Heft 6, S. 901-908
- /26/ Buneß, G., Domrau, H., Echtermeyer, F. u. Weber, S.: CO₂-Laser-Trenneinrichtung FEHA 100/ZIS 853. ZIS-Mitteilungen 11/74. S. 1376-1382
- /27/ Reichel, G., Renkewitz, W.,Tischer, K. u. Lehmann, B.: Anlage zum Laserstrahlschneiden großflächiger Blechteile. Maschinenbautechnik, Berlin 35 (1986) 4, S. 174-176
- /28/ Duscha, F., Göttert, W., Storch, W. u. Brenner, B.: Aufbau und Funktion der Mehrzweck-Laserstrahlführungsmaschine ZIS 15 – 57. ZIS-REPORT Halle 1(1990)7, S. 36-42
- /29/ Däne, K.: Teilautomatisiertes Schweißen mit Festkörperlaser. FE-Bericht 1-41/0. ZIS Halle 1985 u. ZIS Mitteilung, Halle 9 (1987)1, S.79-84
- /30/ Orlick, H.: Technologische Festkörperlaser-Anlagen zum Schweißen.(Teil I bis II). ZIS-Mitteilungen 1988 u.1989,
- /31/ Prospekt FEHA LGL 200 (1978)
- /32/ Prospekt FEHA SM-Laser-Typenreihe (1990)
- /33/ Prospekt FEHA LCS 400-1 (1988)
- /34/ Reitzenstein, W.: Am Anfang stand ein Ende – Entstehungsgeschichte des Fraunhofer-Instituts für Werkstoff- und Strahltechnik (IWS) Dresden -. Unveröffentlichtes Material IWS Dresden 2014

- /35/ Brenner, B., Winderlich, B., Franke, R. u. Reitzenstein, W.: Möglichkeiten der Laseroberflächenveredlung zur Verbesserung der mechanischen Eigenschaften. Jahrbuch LASER. Vulkanverlag Essen 1988. S. 264-267
- /36/ Triebel, W. u. a.: cw-CO₂-Hochleistungslaser. Forschungsbericht G1. PTI Jena 10/83
- /37/ Triebel, W., Ose, E., Michel, G. u. Petrich, A.: Experimental and theoretical investigation of a transverse flow cw CO₂-laser. Proc. SPIE 1031, 7. Int. Symposium on Gas Flow and Chemical Lasers, 41 (June 20), 1989
- /38/ Paul, H. u. a.: Laseroberflächenveredlung großformatiger, formkomplizierter Bauteile. Forschungsbericht (A). ZFW Dresden 11/88
- /39/ Brenner, B., Storch, W. u. a.: Laserstrahlhärten – ein effektives Verfahren zur Laufzeiterweiterung Tropfenschlag belasteter Turbinenschaufeln. Tagungsband der VGB-Werkstofftagung 1991. Essen 09. – 10. 01. 1991. S. 11.1 – 11.25
- /40/ Wagner, K., Schreiber, W., Vagt, J. u. Schieske, J.: Lasertechnik zur Regenerierung und Verschleißfestmachung von Baugruppen. Schienenfahrzeuge 31 (1987) 1, S. 14-16
- /41/ Paul, H., Pollack, D. u. a.: Einsatz von CO₂-cw-Leistungslasern zur Bearbeitung von Maschinenbauteilen im Applikationslabor des ZFW Dresden. Jahrbuch LASER. Vulkanverlag Essen 1988. S. 267-271.
- /42/ Morgenthal, L., Wiedemann, G. u. Frost, H.: Erfahrungen bei der Einführung des Laserschneidens ebener und räumlicher Maschinenbauteile. Maschinenbautechnik 6/87. S. 244-247
- /43/ Flemming, D., Haffner, P., Krause, H.-P., Morgenthal, L. u. Wiedemann, G.: Entwicklung und Einsatz einer flexiblen 3-D Lasermehrzweckbearbeitungsanlage. Maschinenbautechnik 4/87. S. 182-187

Dank

Wir möchten uns bei allen herzlich bedanken, die den Beitrag mit vielen Informationen in persönlichen Gesprächen und den historischen Teil der Ausstellung mit Exponaten unterstützt haben. Stellvertretend seien hier die Herren Prof. K. Junge, Prof. W. Triebel, Prof. W. Radloff, Dr. P. Seiler, Dr. K. Mann, J. Held und B. Hoppert, Frau Dr. A. Fies sowie die Vertreter der Firmen bzw. deren Nachfolger ZIS bzw. SLV Halle, FEHA Halle bzw. Feha Lasertec GmbH, MTG bzw. RABE Lasertechnik, RAW bzw. DB Fahrzeuginstandhaltung Cottbus genannt.