

Zeitschrift: Schweizerische Bauzeitung
Herausgeber: Verlags-AG der akademischen technischen Vereine
Band: 85 (1967)
Heft: 41

Artikel: Die Laser-Strahlung als Hilfsmittel zur Materialbearbeitung
Autor: Guekos, G.
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-69551>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. [Siehe Rechtliche Hinweise.](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. [Voir Informations légales.](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. [See Legal notice.](#)

Download PDF: 16.05.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

Die Laser-Strahlung als Hilfsmittel zur Materialbearbeitung

DK 535.211:621.791

Von G. Guekos, dipl. El.-Ing. ETH, Zürich

1. Einleitung

Seit der praktischen Verwirklichung des Lasers* zu Beginn der sechziger Jahre sind viele Anwendungen sowohl in der wissenschaftlichen Forschung als auch der Technik in Betracht gezogen worden. Es hat sich gezeigt, dass die Laser-Strahlung für verschiedene Gebiete von grossem Nutzen sein kann. Über ihre Anwendungsmöglichkeiten der Nachrichtentechnik, der Spektrographie, des Radars, der Geodäsie, der Medizin und der Biologie liegt bereits ein reiches Schrifttum vor. Frühere Spekulationen über die zukünftige Rolle der Laser-Strahlung in der Industrie haben sich allerdings nur teilweise als richtig erwiesen. Der Laser befindet sich in einem sich rasch entwickelnden Stadium, und sein Einfluss auf die technologischen Aufgaben in der Industrie wird immer bedeutender.

Das Interesse für die Laser-Strahlung als mögliches Mittel zum Schweißen, Bohren oder sogar Schneiden von Werkstoffen begann insbesondere mit der Entwicklung von Festkörper-Lasern. Diese können, im Gegensatz zu anderen Gruppen von Lasermaterialien, hohe Lichtintensitäten abgeben. Durch Fokussierung der austretenden Laser-Strahlung auf ein sehr kleines Volumen lassen sich extrem hohe Temperaturen erzeugen. Verdampfen oder Schmelzen von Materie wird dadurch ermöglicht. Die Idee, Lichtquellen für die Materialbearbeitung zu verwenden, ist natürlich nicht neu, und verschiedenartige Lichtquellen sind bis heute zu diesem Zweck angewandt worden wie zum Beispiel der Lichtbogen, die Azetylen-Flamme, der H_2-O_2 -Strahl-Brenner, Hochdruck-Hg- bzw. -Xe-Lampen. Der grösste Nachteil lag bei diesen Quellen vor allem an der Tatsache, dass die relativ schwache zeitliche und räumliche Kohärenz des austretenden Lichtes die Fokussierung grosser Energien auf die gewünschten kleinen Volumina verunmöglichte. Bei der Laser-Strahlung bestehen diese Nachteile nicht. Mit Hilfe von Linsen kann sie leicht auf kleine Flächen konzentriert werden; dadurch werden Energiedichten entwickelt, die um Zehnerpotenzen höher liegen als diejenige der Sonnenstrahlung. Geräte, welche das Prinzip der Fokussierung der Laser-Strahlung zur Erzeugung hoher Temperaturen benützen, sind in Europa und in den U.S.A. entwickelt worden oder befinden sich im Entwicklungsstadium. Sie sind vor allem zum Bohren kleiner Löcher, zur Materialabtragung oder zum Schweißen bestimmt.

In diesem Aufsatz werden nach einer kurzen Einführung in die physikalische Arbeitsweise des Lasers die Probleme, welche durch Fokussierung der Strahlung auf Materie entstehen, und die Anwendungsmöglichkeiten der Laser-Strahlung zur Bearbeitung von Werkstoffen erörtert.

2. Physikalische Grundprinzipien und Eigenschaften der Laser-Strahlung

Die Entwicklung des Lasers beruht auf der Einsteinschen Theorie der stimulierten Emission aus dem Jahre 1917 [1]. Damals war schon bekannt, dass ein System von Atomen, Ionen oder Molekülen nur in gewissen stationären, diskreten energetischen Zuständen existieren kann. Jeder dieser Zustände ist durch seinen Energiewert charakterisiert. Der Zustand (auch Niveau genannt) mit dem kleinsten Energiewert wird als Grundzustand bezeichnet. Im absoluten Temperatur-Nullpunkt befinden sich alle Teilchen – Atome, Ionen oder Moleküle – eines geschlossenen Systems im Grundzustand. Wird die Temperatur des Systems erhöht, so werden dadurch Teilchen angeregt und besetzen höhere Energiezustände. Betrachtet man zum Beispiel die Niveaus n und m , so kann, falls thermodynamisches Gleichgewicht vorhanden ist, mit Hilfe des Boltzmannschen Gesetzes folgende Beziehung zwischen der Zahl der Teilchen N_n und N_m und den entsprechenden Niveaus angegeben werden:

$$(1) \quad N_n = N_m e^{-(E_n - E_m)/kT}$$

Hierbei bedeuten T die absolute Temperatur des Systems, k die Boltzmannsche Konstante und E_n bzw. E_m die Energie des Niveaus n bzw. m .

Gleichung (1) besagt, dass in einem System, das sich unter der Temperatur T im thermischen Gleichgewicht befindet, die Bevölkerung eines energetisch tieferen Zustandes stets grösser als diejenige eines energetisch höheren Zustandes sein muss.

Ein solches System kann mit elektromagnetischer Strahlung in Wechselwirkung kommen. Zwischen den Energiezuständen können die Teilchen Übergänge ausführen, welche mit Emission oder Absorption von Energie verknüpft sind. Führt zum Beispiel ein Teilchen einen «strahlenden» Übergang zwischen den Niveaus n und m aus, so wird dabei ein Strahlungsquant emittiert oder absorbiert, dessen Frequenz ν durch die Plancksche Beziehung gegeben wird:

$$(2) \quad h \nu_{nm} = E_n - E_m$$

wobei h die Plancksche Konstante bedeutet.

Vor dem Jahre 1917 war bekannt, dass die Wechselwirkung zwischen einem atomischen System und elektromagnetischer Strahlung auf zwei verschiedene Arten vor sich gehen kann: a) *stimulierte Absorption* der Strahlung mit entsprechender Erhöhung der Teilchenenergie durch Übergänge in energetisch höhere Zustände und b) *spontane Emission* der Strahlung durch Übergänge in energetisch tiefere Zustände unter gleichzeitiger Abgabe von Energiequanten. Im Jahre 1917 konnte aber A. Einstein beweisen, dass noch eine dritte Art von Übergängen möglich ist, nämlich die *induzierte oder stimulierte Emission*. Dabei kann ein angeregtes Teilchen im Zustand n unter dem Einfluss des anregenden Feldes in den tieferen Zustand m übergehen und ein Quant abgeben. Alle drei Arten von Übergängen sind in Bild 1 schematisch dargestellt.

Zur näheren Erläuterung der Vorgänge betrachte man ein System bei der Temperatur T , das sich nicht unbedingt im thermodynamischen Gleichgewicht befindet. m und n seien zwei Zustände des Systems, charakterisiert durch die Energiewerte E_m bzw. E_n , wobei $E_m < E_n$. Kommt ein Strahlungsfeld von der Dichte $\varrho(\nu)$ mit der Frequenz ν in Wechselwirkung mit dem System, so ist die Wahrscheinlichkeit P_{nm} , dass ein Atom vom Niveau n ins Niveau m «fällt» und damit ein Quant emittiert:

$$(3) \quad P_{nm} = A_{nm} + \varrho(\nu) B_{nm}$$

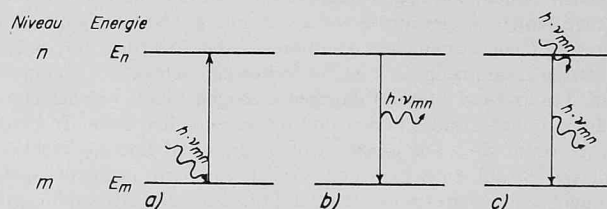


Bild 1. Die drei möglichen Arten von Uebergängen eines Atoms in einem atomischen System

- das Atom geht infolge *stimulierter Absorption* eines Quants mit der Energie $h \cdot \nu_{mn}$ aus dem Zustand m in den höheren energetischen Zustand n über
- spontane Emission* eines Photons, wenn ein Atom ohne äussere Einwirkung, also spontan, vom Niveau n in das Niveau m «fällt»
- ein durchlaufendes Quant kann den Uebergang eines Atoms vom Niveau n ins Niveau m induzieren. Dabei wird ein Quant emittiert, welches dieselbe Frequenz, Richtung und Phase wie das ursprüngliche hat. Dies ist die *induzierte oder stimulierte Emission*

* Laser ist die Abkürzung für *Light Amplifier by Stimulated Emission of Radiation*

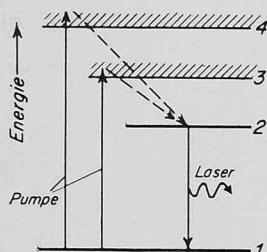
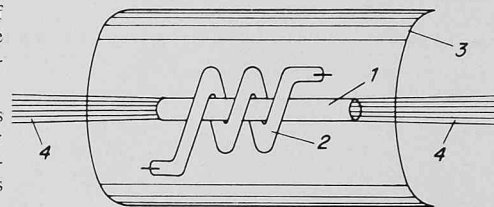


Bild 2 (links). Atomische Übergänge in einem Rubin-Laser. Die Atome werden unter Absorption der einfallenden Strahlung auf die «Energiebänder» 3 und 4 «gehoben». Von dort gehen sie spontan in den Zwischenzustand 2 über. Die einfallende Strahlung bewirkt den stimulierten Übergang von 2 nach 1

Bild 3 (rechts). Schematische Darstellung der Anordnung eines Rubin-Lasers. 1 Rubin-Kristall, 2 Flashlampe, 3 reflektierender Hohlraum zur Fokussierung des Flashlichtes auf dem Rubin-kristall, 4 austretender Laser-Strahl. Der Divergenzwinkel des Strahls liegt zwischen $0,5^\circ$ und 1°



Das erste Glied der rechten Seite von (3) stellt den Anteil der spontanen und das zweite den der stimulierten Emission dar. Die Wahrscheinlichkeit des inversen Überganges von m nach n , also des «Aufhebens» eines Atoms vom Niveau m auf das höhere Niveau n , ist

$$(4) \quad P_{mn} = \rho(\nu) B_{mn}.$$

P_{mn} ist also die Wahrscheinlichkeit der Absorption der einfallenden Strahlung. A_{nm} , B_{nm} und B_{mn} werden Einsteinsche Koeffizienten genannt, wobei $B_{nm} = B_{mn}$. Die totale Anzahl Übergänge von n nach m pro Sekunde ist

$$(5) \quad (A_{nm} + \rho(\nu) B_{nm}) N_n$$

und diejenige der Übergänge von m nach n

$$(6) \quad \rho(\nu) B_{mn} N_m.$$

Ist $N_n < N_m$, dann wird das ursprüngliche Feld geschwächt, und zwar durch

$$(7) \quad (N_m - N_n) \rho(\nu) B_{mn} \quad \text{Quanten pro Sekunde.}$$

Offensichtlich wird also eine Strahlung, die in Wechselwirkung mit einem System kommt, bei welchem die energetisch tieferen Zustände mehr bevölkert sind als die höheren, immer an Intensität verlieren. Wäre es dagegen möglich ein System zu haben, bei welchem $N_n > N_m$ ist (Bevölkerungsinversion), so würde dies die einfallende Strahlung verstärken. Dieser Umstand lag der Idee zugrunde, welche zur Verwirklichung des Masers und Lasers geführt hat.

Bis in die fünfziger Jahre hinein waren einige wichtige Aufsätze veröffentlicht worden, bei welchen das Problem diskutiert und Vorschläge zur Realisierung der Bevölkerungsinversion gemacht wurden. Die erste Vorrichtung, mit der diese Inversion zustandegebracht und zur Verstärkung von Strahlung benützt wurde, konnte erst um 1954 von C. H. Townes [2] hergestellt werden. Dies war der erste Maser. Der Buchstabe M stellt die Abkürzung für das Wort Microwave (Mikrowelle) oder Molecular dar. Der Maser von Townes hat bei einer Frequenz von 23870 MHz gearbeitet, was einer Wellenlänge von 1,25 cm entspricht. Als Material diente Ammoniak (NH_3).

Mit der Erfindung des Masers hat auch die Hoffnung auf eine Erweiterung des Frequenzfeldes in den sichtbaren Bereich hinein (Wellenlängen zwischen etwa 0,4 und $0,75 \mu\text{m}$) Auftrieb erhalten. Der erste «optische Maser» oder Laser wurde im Jahre 1960 von T. H. Maiman entwickelt [3]. Dies war ein Festkörperlaser mit Rubin ($\text{Cr}^{3+} : \text{Al}_2\text{O}_3$) als aktives Material, der auf einer Wellenlänge von etwa $0,69 \mu\text{m}$ emittierte. Kurz danach entstand der Gas-Laser [4], und im Jahre 1962 folgte die Entwicklung des Halbleiterlasers.

Welches sind die Vorteile, die der Laser gegenüber andern Lichtquellen besitzt? Sie liegen hauptsächlich in der räumlichen und zeitlichen Kohärenz der austretenden Strahlung. Die üblichen Lichtquellen sind Generatoren einer Strahlung, deren Spektrum aus vielen Frequenzen zusammengesetzt ist. Sie weisen eine schwache Direktionalität auf. Lasers (und Masers) dagegen erzeugen Licht, welches eine Kohärenz hohen Grades besitzt und im wesentlichen bei einer Frequenz ausgestrahlt wird. Die ganze Lichtenergie ist in einem scharf konzentrierten Strahl enthalten und besitzt eine sehr schmale spektrale Linienbreite (siehe zum Beispiel [5]). Für die Anwendungen der Materialbearbeitung, wie zum Beispiel Schweißen, Bohren oder Abtragen von Materie, kommt natürlich nur Laserlicht von hoher Intensität in Frage. Bis heute konnten nur die Festkörper-Laser sowie in letzter Zeit ein spezieller Gas-Laser ($\text{CO}_2\text{-N}_2\text{-Gas}$) hohe Ausgangsenergien liefern. Bild 2 zeigt in Vereinfachung die Energiezustände und die Übergänge für einen Rubin-Laser [5]. Die Atome werden aus dem Grundzustand 1 auf die Niveaus 4 und 3 (hier als «Energiebänder» gezeichnet) gehoben («gepumpt»). Von dort an gehen sie spontan in den Zwischenzustand 2 über. Der Übergang von 2 nach 1 stellt den eigentlichen Laserübergang dar. Die Emission des Lichtes aus dem Rubin-kristall (mit 0,05% Cr) erfolgt auf der Wellenlänge $0,6943 \mu\text{m}$, das

heisst rotes Licht. Die Bevölkerungs-inversion wird mit Hilfe der Energie des aus einer Hg- oder Xe-Flashlampe austretenden Lichtes zustande gebracht.

Bild 3 zeigt die schematische Anordnung eines Rubin-Lasers. Der Rubinkristall, in Form eines Zylinders, wird in einer geeigneten Kavität untergebracht. Der Durchmesser des Rubin-zylinders variiert gewöhnlich zwischen etwa 0,1 und 2,5 cm und seine Länge zwischen etwa 2 und 40 cm. Die Grundflächen sind zwei parallele, möglichst fein polierte Ebenen. Durch einen Silberüberzug wird die eine Grundfläche für die Strahlung total reflektierend gemacht. Die andere hat einen Reflexionsfaktor zwischen 5 und 80%. Die Flashlampe, zum Beispiel in schraubenartiger Form, wird in der unmittelbaren Nähe des Kristallzylinders montiert und ihr Licht optisch auf dem Rubin-zylinder fokussiert. Die Folge ist eine Strahlungs-entwicklung im Rubinmaterial durch spontane und stimulierte Emission. Ein Teil der Strahlung tritt durch die Zylinderfläche aus und spielt für den weiteren Vorgang keine Rolle mehr. Ein anderer Teil wandert längs des Zylinders und wird an dessen Grundflächen hin und her reflektiert. Jede Durchfahrt durch das Medium verstärkt die Intensität der Strahlung. Genügt die Verstärkung, um die Verluste an den Reflexionsgrundflächen und im aktiven Medium zu kompensieren, so können im Kristall Schwingungen aufrechterhalten werden; es entstehen stehende Wellen. Die durch den teilweise durchlässigen Spiegel austretende Strahlung ist scharf gebündelt, zeitlich und räumlich kohärent.

Neben Rubin kommen auch andere Kristalle als Lasermaterialien in Frage. Nicht kristalline Elemente wie Glas und organische Elemente können auch als Lasermedien benützt werden. Rubin wird aber bis heute am meisten verwendet. Es kann relativ leicht als Einkristall hergestellt werden.

Der Wirkungsgrad von Rubin-Laser ist bei Zimmertemperatur etwa 0,1%. Durch Kühlung des Rubins mit flüssigem Stickstoff können Wirkungsgrade von etwa 1% erreicht werden.

Der beschriebene Rubin-Laser wird im allgemeinen durch Flash-Impulse «gepumpt». Die dabei von der Flashlampe gelieferte Energie muss hoch sein. Sie variiert zum Beispiel für einen Rubin-zylinder mit 0,8 cm Durchmesser und 4 cm Länge zwischen 500 und 1000 Joule für Impulse von etwa 1 bis 5 Millisekunden (ms) Dauer und von einigen Impulsen pro Minute Repetitionsfrequenz. Die vom Kristall austretende Laser-Energie beträgt in diesem Fall etwa 0,5 bis 1 Joule. Der Betrieb des Rubin-Lasers ist auch im Dauerstrich möglich. Dabei wird der Kristall meistens gekühlt. Im allgemeinen liegen die austretenden Leistungen des kontinuierlichen Rubin-Lasers unter 1 Watt. Sehr hohe Ausgangsleistungen können aus einem gepulsten Rubin-Laser mittels einer besonderen Methode gewonnen werden (Q-switch), wie im folgenden Kapitel erläutert werden soll.

3. Fokussierung des emittierten Lichtes und auftretende Leistungen

Die Laser-Strahlung kann leicht mit Hilfe eines Linsensystems fokussiert werden, wozu sich übliche Linsen eignen. Bild 4 zeigt den idealisierten Fall eines Laser-Strahls, der senkrecht zur Ebene einer konvexen Linse gerichtet ist und sie gleichmässig beleuchtet. Der Strahl wird im Brennpunkt der Linse fokussiert, und es entsteht ein Beugungsbild, bestehend aus einem zentralen Lichtpunkt hoher Intensität und einer Anzahl konzentrischer Kreise mit diesem Punkt als Mittelpunkt. Die Leistungsdichte σ des Lichtpunktes beträgt:

$$(8) \quad \sigma = \frac{a}{\lambda^2 f^2} P.$$

Hier bedeuten a die Querschnittsfläche des Strahls, λ seine Wellenlänge, f die Brennweite der Linse und P die Leistung der ankommenden Strahlung. Nehmen wir zum Beispiel den Fall eines gepulsten Rubin-Lasers (Q-switch) mit einer Spitzenleistung von 10^6 Watt, mit $\lambda = 0,7 \mu\text{m}$ und $a = 50 \text{ mm}^2$, so wird, für $f = 1 \text{ cm}$, die Leistungsdichte im Brennpunkt:

$$\sigma = 10^{14} \text{ Watt/cm}^2.$$

Es handelt sich also um enorm hohe Leistungsdichten. Zum Vergleich sei bemerkt, dass die Leistungsdichte auf der Sonnenoberfläche etwas kleiner als 10^4 Watt/cm² beträgt. Mit dem Rubin-Laser können Leistungsdichten erzeugt werden, die diejenige der Sonnenoberfläche zehnmilliardenmal übertreffen!

Theoretisch kann diese Leistung auf einem Punkt mit dem Durchmesser λ – im betrachteten Fall $0,7 \mu\text{m}$ – konzentriert werden. Praktisch wird aber eine Fokussierung auf einem so kleinen Punkt wegen des nicht absolut monochromatischen Charakters der Strahlung (Moden) und des Vorhandenseins von Kristallfehlern unmöglich. Der zentrale Lichtpunkt weist einen Durchmesser auf, der etwa zehnmal grösser ist als λ .

Verschiedene Hochenergie- bzw. Hochleistungs-Laser sind bis heute entwickelt worden. Dank einer speziellen Methode (Q-switched-Laser) können extrem hohe Energien geliefert werden. Dabei wird der Austritt der Strahlung aus dem Kristall für eine gewisse Zeitdauer verhindert, so dass Energie im Kristallinneren gespeichert bleibt. Sie wird dann plötzlich freigelassen, und es entstehen Riesenimpulse, welche Energien von mehreren hundert Joule aufweisen. Die Repetitionsfrequenz der Impulse ist allerdings klein; die Zeitdifferenz zwischen den Impulsen kann sogar mehrere Minuten betragen. Typische Impulslängen sind 10 bis 50 ns ($1 \text{ ns} = 10^{-9} \text{ s}$; siehe zum Beispiel [6]). Für die Materialbearbeitung verwendet man vor allem gepulste Laser mittlerer Leistung sowie auch kontinuierlich arbeitende Festkörper-Laser. Gepulste Festkörper-Laser, andere als Rubin, geben Energien zwischen etwa 100 und 1000 Joule ab. Dabei beträgt die Dauer des Impulses etwa 10^{-3} s und die gelieferte Leistung liegt zwischen 10^5 und 10^6 Watt; die Repetitionsfrequenz variiert zwischen 0,1 und 1 Hz. Diese Laser arbeiten bei Zimmertemperatur. Die bei dieser Temperatur kontinuierlich arbeitenden Kristall-Laser können Leistungen bis 100 Watt abgeben. Ihr hauptsächlichster Nachteil scheint der geringe Wirkungsgrad zu sein, der im allgemeinen Werte zwischen 0,1 und 5% besitzt.

Der einzige Gas-Laser, welcher mit seiner Ausgangsleistung für die Materialbearbeitung in Frage kommt, ist der CO₂-N₂-Molekular-Laser. Seine Ausgangsleistung kann etwa 1000 Watt betragen mit einem Wirkungsgrad von nur 0,1%. Die Anwendungsmöglichkeiten dieses Gas-Lasers für die Materialbearbeitung sind noch nicht so weit erforscht, wie dies bei den Festkörper-Lasern der Fall ist.

4. Wechselwirkung zwischen Laser-Strahlung und Materie

Richtet man einen Laser-Strahl auf eine Metalloberfläche, so wird ein Teil der auffallenden Strahlung zurückgeworfen und der Rest vom Material absorbiert. Der Anteil der reflektierten Strahlung ist durch die Wellenlänge, das Material und den Oberflächenzustand bestimmt. Für Metalle zum Beispiel liegt der Reflexionskoeffizient zwischen etwa 5 und 50%. Er ist während der Bestrahlungsdauer keine konstante Grösse. Für eine exakte Berechnung muss deshalb die Veränderung des Reflexionskoeffizienten mit der Zeit berücksichtigt werden, was auf komplizierte mathematische Ausdrücke führt. Für kurze Impulse rechnet man einfachheitshalber mit einem konstanten Wert. Die Intensität der absorbierten Strahlung klingt im Material mit der Eindringtiefe exponentiell ab. Die Eindringtiefen sind von der Grössenordnung der Wellenlänge.

Der absorbierte Energieteil setzt sich im Material in Wärme um, und es entsteht ein zeitlich veränderlicher Temperaturgradient. Ist der Schmelzpunkt überschritten, so wird im entsprechenden Bereich die flüssige Phase eintreten, welche, falls die Temperatur noch höher ansteigt, von der Dampfphase gefolgt ist. Bild 5 zeigt einen Laser-Strahl, der auf einer ebenen Materialoberfläche fokussiert ist. Eine mögliche Temperaturverteilung im Material ist eingezeichnet worden. Die Temperaturverteilung auf einer Ebene, welche die Achse AA' enthält, kann durch die Angabe der Isothermen dargestellt werden. Die Isotherme T_s (wobei T_s die Schmelztemperatur des Materials bezeichnet) gibt die Grenze zwischen der festen und der flüssigen Phase an und die Isotherme T_v (T_v ist die Verdampfungstemperatur) grenzt dasjenige Volumen ab, das zu verdampfen beginnt. Eine exakte Berechnung der Temperaturverteilung in einem, von einem hochenergetischen Laser-Strahl getroffenen, festen Körper führt auf komplizierte Gleichungen, die nur für die verschiedenen Anwendungsfälle mit Hilfe von Rechenmaschinen gelöst werden können. Durch vereinfachende Annahmen wurden jedoch die Wärmeleitungsgleichungen gelöst und approximative Formeln für die Temperaturverteilung angegeben [7], [8], [9], [10]. So gilt zum Beispiel für den Temperaturanstieg ΔT im Einfallpunkt [10], [11]:

$$(9) \quad \Delta T \cong K \frac{\sqrt{\alpha}}{\kappa} \frac{P}{S \sqrt{\tau}},$$

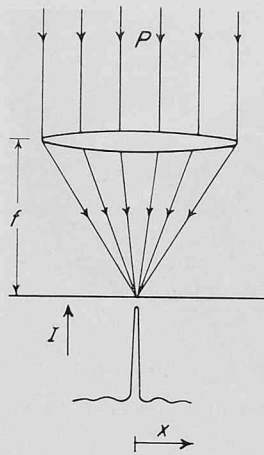


Bild 4. Fokussierung eines Laser-Strahls mittels einer Linse auf einer Oberfläche (schematisch). f Brennweite der Linse, I Intensität der fokussierten Strahlung

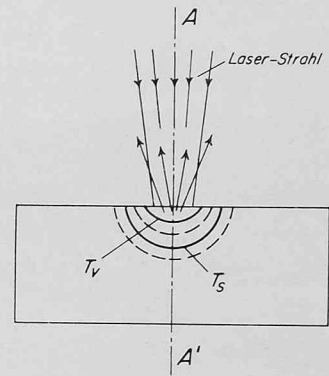


Bild 5. Schematische Darstellung der Temperaturverhältnisse, die entstehen, wenn ein Laser-Strahl auf eine Materialoberfläche fokussiert wird. Verdampftes und verflüssigtes Material wird ausgeschleudert. Einige Isothermen sind eingezeichnet. Die Isotherme T_s grenzt die verschmolzene, die Isotherme T_v die verdampfte Zone ab

falls T der Beziehung

$$(10) \quad T = B \sigma t$$

gehorcht. Hierbei sind:

- α = thermische Diffusivität in cm²s⁻¹,
- κ = thermische Leitfähigkeit in Watt/cm Grad,
- P = einfallende Strahlungsenergie in Watt · s,
- τ = Zeitdauer des Laserimpulses in s,
- S = Einfallfläche in cm²,
- K = materialabhängiger Koeffizient.

B stellt einen weiteren materialabhängigen Faktor dar und σ bedeutet wieder die einfallende Leistungsdichte in Watt/cm². Gleichung (9) zeigt, dass die Temperaturerhöhung proportional zur einfallenden Leistung und umgekehrt proportional zur Fläche S und zu $\sqrt{\tau}$ ist. Kleine Impulsdauern bewirken also eine Vergrösserung des Temperaturanstieges. Aus (9) sieht man auch, dass Metalle mit einer kleinen thermischen Leitfähigkeit schneller aufgeheizt werden als solche mit einer hohen Leitfähigkeit. Zu den ersten gehört zum Beispiel Eisen, zu den zweiten zum Beispiel Kupfer.

Die Geschehnisse nach der Einstrahlung können mit Hilfe von Reihenaufnahmen mit schnellen Kameras beobachtet werden. Ready [12] hat das Licht eines 0,6-Joule-Impuls-Lasers auf Graphitoberflächen fokussiert und den Vorgang mit kinematographischen Aufnahmen festgehalten. Die Impulsdauer betrug etwa 20 ns. Er stellte fest, dass nach etwa 45 ns nach Beginn des Impulses eine leuchtende Dampf Wolke sich in entgegengesetzter Richtung der einfallenden Strahlung bildete. Auf Grund der zeitlichen Verschiebung des Temperaturmaximums gegenüber dem Strahlungsmaximum interpretiert Ready diese Verzögerung durch folgenden Absorptionsmechanismus: Das Material erreicht in einer kleinen Tiefe unter der Oberfläche die Verdampfungstemperatur, bevor die oberflächenschicht die zum Verdampfen notwendige Wärme aufgenommen hat. Es bildet sich ein Impuls von hohem Druck, der zu einem explosionsartigen Ausschleudern von flüssigem und verdampftem Material führt. Ein ähnlicher Vorgang darf auch bei der Untersuchung von Harries [13] angenommen werden. Die Dampf Wolke zeigt eine grosse Fortpflanzungsgeschwindigkeit, nach Ready etwa $2 \cdot 10^6$ cm/s. Der Rückstoss bei dieser thermischen Explosion läuft in das innere hinein. Es wird flüssiges Material nach aussen gedrückt und weggeschleudert. Exaktere Berechnungen der Temperaturverteilung in einem halbumendlich ausgedehnten Körper und auf dünnen Scheiben sind in [14] und [15] angegeben worden. Ein Versuch zur Schätzung der zum Schmelzen von Metallen notwendigen Energie wurde dort unternommen. Die mit der Dampf Wolke verknüpften Vorgänge sind in verschiedenen Arbeiten untersucht worden [16], [17], [18]. Gregg und Thomas [24] haben die Impulse aus einem Rubin-Laser auf die Oberfläche ver-

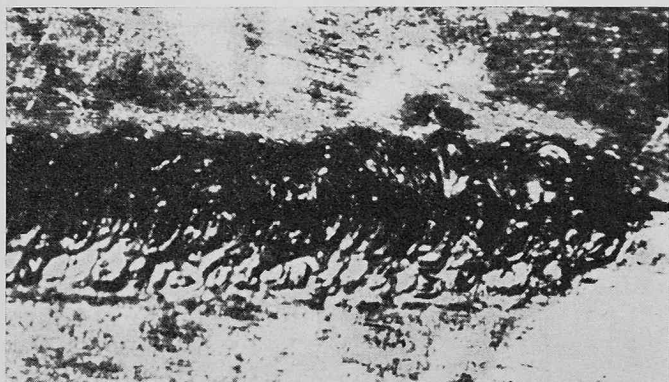


Bild 6. Laserschweißnaht einer Stumpfschweißung von 18/8 Cr-Ni-Stahl [10]

schiedener Metalle fokussiert und die Temperatur des entstandenen Dampfplasmas berechnet. So haben sie Temperaturen bis 8×10^5 °K feststellen können. Das Entstehen und die Eigenschaften des Plasmas sind in [17] behandelt worden. Dabei wurden für die Fortpflanzung der Dampf Wolke Geschwindigkeiten von über 10^7 cm/s gemessen.

5. Anwendungsmöglichkeiten für die Materialbearbeitung; Schweißen und Bohren

Die Erzeugung hoher Temperaturen mit der Laser-Strahlung ist für technische Anwendungen, wie Schweißen und Bohren, von bedeutendem Interesse. Die für die Materialbearbeitung erforderlichen Leistungsdichten liegen in der Größenordnung von 10^3 bis 10^9 Watt/cm². Ein Vergleich bezüglich Leistungsdichte zwischen den verschiedenen thermischen Quellen, welche für die Materialbearbeitung in Frage kommen, ist auf Tabelle 1 angegeben [20].

a) Schweißen [10], [19], [20], [8], [22], [21]

Nach dem Aufprall des Laser-Strahls wird die Oberflächentemperatur des Metalls rasch erhöht, während die thermische Leitfähigkeit das Hineindringen der Wärme in das Material ermöglicht. Für das Schweißen muss die Leistungsdichte hoch genug sein, damit durch die Oberflächentemperatur der Schmelzpunkt, nicht aber der Verdampfungspunkt, erreicht wird. Die Bestrahlungsdauer sollte kurz gewählt werden, so dass ein lokalisierter Punkt rasch zum Schmelzen gebracht werden kann. Gleichzeitig muss sie aber genügend lang sein, damit die geschmolzene Zone in das Materialinnere eindringt. Die Größenordnungen liegen um etwa 10^{-3} s herum. Als rohe Annäherung für die optimale Impulsdauer τ gilt nach [20] und [8] $\tau \cong h^2/\alpha$ (h = Materialdicke in cm). Eine angenäherte Berechnung der zum Schweißen notwendigen Energie als Funktion der Laser-Leistung, der Impulsdauer und der Eigenschaften des Materials wurde in [15] durchgeführt, doch scheint es zweckmässiger, anhand von einigen Probenschweißpunkten die notwendige Leistung, Repetitionsfrequenz und Impulsdauer für den interessierenden Fall zu bestimmen.

Die Vorrichtung besteht im allgemeinen aus einem Rubinkristall als aktivem Lasermaterial und einer Xe-Flashlampe mit gepulster Arbeitsweise. Wenn nötig wird der Kristall mit Wasser oder Luft gekühlt, um den Laser vor Beschädigung durch Erwärmung zu

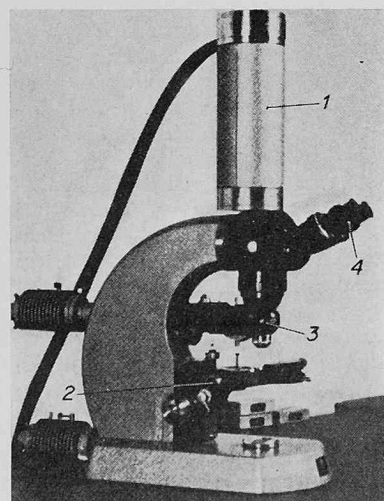


Bild 7 (links). Laser-Schweißvorrichtung gekoppelt mit einem Mikroskop [10]

- 1 Laser
- 2 Zentriervorrichtung
- 3 fokussierende Linse
- 4 Objektiv

schützen. Üblich sind Leistungen von einigen Joules sowie Repetitionsraten von 5 bis 60 Impulsen pro Minute. Durch eine optische Vorrichtung wird der Strahl auf die Probe fokussiert, die man entweder manuell oder automatisch gemäss einem Programm bewegt. Eine Schweißnaht besteht aus einer Folge von dicht aneinander gereihten Schweißpunkten, Bild 6. Ein Beobachtungsmikroskop kann zu der Apparatur montiert werden, Bild 7.

Experimentell konnte festgestellt werden, dass für die Verbindung zweier Bleche durch Schweißpunkte ein optimales Verhältnis zwischen dem Durchmesser des Laser-Strahls und der Dicke des Bleches besteht. Dieses ist ungefähr gleich 2. Folgende Zahlen geben ein Beispiel für eine Punktverbindung zweier Bleche: Für zwei 0,6 mm dicke Aluminium-Bleche ist eine Energie des Laserstrahls von 4 Joule bei einer Impulslänge von 10 ms notwendig; die Punktschweisstelle weist einen Durchmesser von 0,6 mm auf. Tabelle 2 gibt einige Werte für das Schweißen von Draht mit Draht und Blech mit Blech.

Metalle wie Cu, Ag, Au, eignen sich zum Laserschweißen am besten. Sie können sehr hohen, plötzlich auftretenden Temperaturen widerstehen, ohne dass dabei ein Ausschleudern von verflüssigtem Material stattfindet. Ausserdem besitzen sie eine genügend hohe thermische Diffusivität.

Die wichtigsten Vorteile, die der Laser im Gebiet des Schweißens von Metallen mit sich brachte, seien wie folgt zusammengefasst: Das Schweißen von dünnen Metallschichten oder Drähten kann in kleinen Punkten durchgeführt werden, ohne dass die Temperatur in der unmittelbaren Umgebung des Schweißpunktes merklich erhöht wird. Dies verspricht interessante Anwendungen in der Technologie von Dioden, Transistoren und integrierten Schaltungen; extrem kleine Drähte können auf eine Unterlage geschweisst werden, Bild 8. Man muss nicht im Vakuum arbeiten, wie dies mit dem Elektronenstrahl der Fall ist. Das zum Schweißen bestimmte Material kann nötigenfalls in einem mit einem Gasgemisch erfüllten Raum untergebracht werden, wobei man den Laserstrahl durch ein Fenster von aussen auf die gewünschte Stelle fokussiert. Es sind keine zusätzlichen Werkzeuge notwendig wie zum Beispiel Elektroden. Für das Mikroschweißen ist dies von entscheidender Wichtigkeit, weil damit eine mechanische Deformation oder Zerstörung von Teilen nahe der Schweisstelle vermieden wird. Die Bilder 9a und 9b zeigen weitere Beispiele von Blech-mit-Blech- und Draht-mit-Draht-Schweisstellen.

b) Bohren [10], [23], [25]

Zum Bohren von Löchern, oder allgemein zum Abtragen von kleinen Materialmengen, sind kürzere Laser-Impulse anzuwenden als beim Schweißen. Die Verdampfungstemperatur soll ja möglichst schnell erreicht werden, ohne dass grössere Wärmeverluste in der unmittelbaren Umgebung entstehen. Durch längere Impulse wird, neben der Verdampfung, Material durch die lange Wärmeeinwirkung verschmolzen, so dass das entstandene Loch keine scharfen Ränder aufweist. Die notwendigen Charakteristiken (Energie des Laser-Strahls, Anzahl der Impulse, Länge und Repetitionsfrequenz) werden auch hier am besten experimentell bestimmt. Als Beispiel sei hier angeführt, dass mit zwanzig Laser-Impulsen von je 4 Joule und je 1 ms Dauer ein 3 mm dickes Blech aus Wolfram-Karbid gebohrt werden kann. Das Loch weist eine konische Form mit 300 μ m Eingangsdurchmesser und 50 μ m Ausgangsdurchmesser auf.

Tabelle 1. Leistungsdichten verschiedener Wärmequellen

Thermische Quelle	Leistungsdichte Watt/cm ²
Laser	$\cong 10^9$
Elektronen-Strahl	$\cong 10^9$
Azetylen-Flamme	10^3
Lichtbogen (Ar, 200 A)	$1,5 \cdot 10^4$
H ₂ -O ₂ -Strahl-Brenner	$3 \cdot 10^3$

Tabelle 2. Impulsdauer und Energiebedarf für das Schweißen von Blechen bzw. Drähten

Drahtdurchmesser cm	0,0010	0,0038	0,018	0,072
Blechdicke cm	0,0005	0,0025	0,010	0,046
Impulsdauer ms	1	2	5	10
Energie/Impuls J	0,3	1	5	20

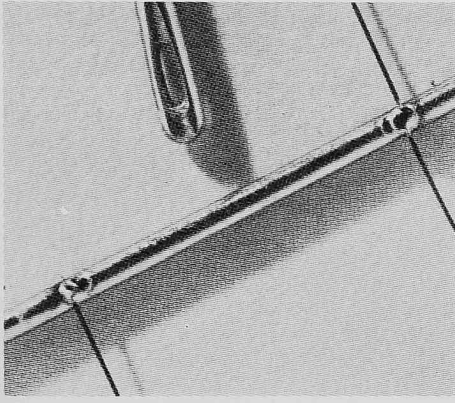


Bild 8. Punktschweißen zweier feinen Drähte aus W mit einem dickeren Draht aus Ni [5]. Der Durchmesser der dünnen Drähte ist 0,08 mm und derjenige des dickeren Drahtes ist 0,5 mm

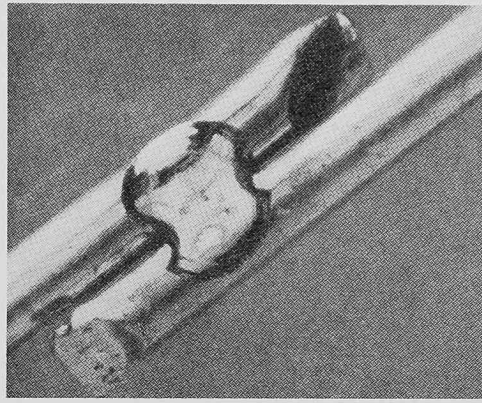


Bild 9a. Punktschweißen zweier Drähte aus Ni mit 0,5 mm Durchmesser [20]

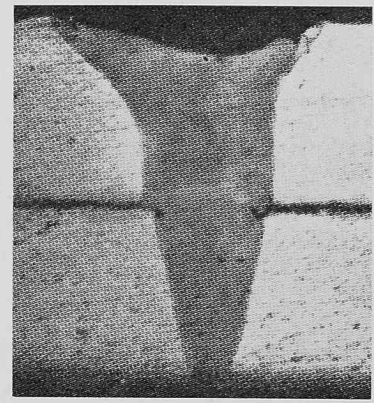


Bild 9b. Zwei Al-Bleche mit 0,8 mm Dicke sind mit Laserimpulsen zusammengeschweisst

Trotz sehr kurzen Impulsen entstehen beim Bohren verschiedener Materialien, wie Aluminium und Kupfer, grössere Schmelzzonen, welche die Schärfe des Lochrandes stark beeinträchtigen [10]. Diese Erscheinung kann durch folgende Methode bedeutend vermindert werden: Das zu bohrende Blech wird mit einem Schutzblech zugeeckt. Somit entstehen die verschmolzenen Randzonen nur auf diesem Schutzblech. Beim Eisen und verschiedenen Stahlsorten tritt das Verschmelzen nicht so stark in Erscheinung, so dass relativ scharfe Löcher von 10 bis 100 μm Durchmesser hergestellt werden können. Diese Zahlen zeigen, dass sich mit dem Laser-Strahl sehr kleine Löcher herstellen lassen, was mit anderen Methoden schwieriger wäre. Ein weiterer Vorteil beruht auf der Bearbeitung von Materialien grosser Härten. Es können kleine Löcher in Diamant, Saphir usw. gebohrt oder sehr kleine Mengen von diesen Materialien verdampft und abgetragen werden. In der Elektrotechnik können Schichtwiderstände mit engen Toleranzgrenzen (0,5 %) durch sukzessive Materialabtragung hergestellt werden. Bild 10 zeigt Beispiele von Laserbohrungen in Stahl.

Lasergeräte zum Schweißen und zum Bohren sind von mehreren Firmen in Europa und in den USA entwickelt worden. Die kommerziell angebotenen Geräte verwenden gepulste, meistens gekühlte Rubinkristalle. Apparaturen mit anderen Laserkörpern befinden sich in Entwicklung. Der Nachteil bei den bis heute verfügbaren Geräten liegt vor allem in den niedrigen Repetitionsfrequenzen der Impulse und in der kurzen Lebensdauer sowohl der Flashlampen als auch des Laser-Kristalls; 10000 Impulse von 1 Joule stellen einen typischen Lebensdauerwert dar. Als weiterer Nachteil wird oft der relativ hohe Anschaffungspreis der Einrichtung betrachtet.

6. Schlussfolgerung

Mit Hilfe der Laser-Strahlung können sehr hohe Temperaturen erzeugt werden. Sie lassen sich zum Schmelzen und Verdampfen von Materie verwenden. Dazu wird der Lichtstrahl aus einem gepulsten Festkörper-Laser auf eine Oberfläche gerichtet. Die dadurch entstehende Temperaturerhöhung bewirkt ein örtliches Verschmelzen oder Verdampfen der Materie. Mit Hilfe von Untersuchungen an verschiedenen Metallen sind Temperaturen des entstehenden Dampfplasmas bis 800000°K festgestellt worden.

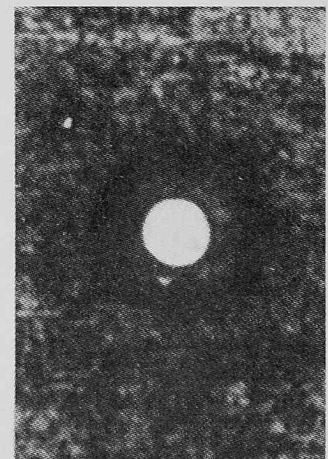
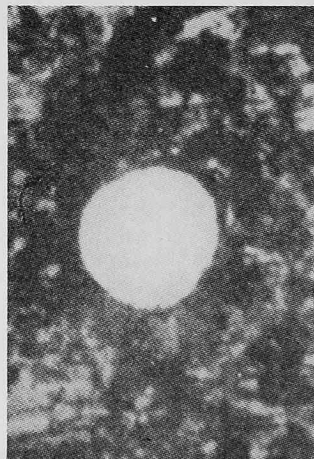
Relativ dünne Bleche oder Folien können durch Punktschweißen mit einem Laser-Strahl schnell und sauber geschweisst werden. Sehr feine Drähte lassen sich miteinander oder mit grosser Genauigkeit auf Unterlagen fixieren. Ebenso vermag ein Laser-Strahl Löcher von kleinstem Durchmesser – Grössenordnung einige μm – in Metallblech oder in Folien oder in sonst schwer zu bearbeitenden Stoffen – wie Diamant – mit grosser Präzision herzustellen. Bei diesen Prozessen bietet die Anwendung des Lasers folgende Vorteile: Keine merkliche Temperaturerhöhung der unmittelbaren Umgebung der Schweissstelle, keine Elektroden, keine Notwendigkeit, im Vakuum zu arbeiten wie beim Elektronenstrahl, Möglichkeit einer Automatisierung durch Programmierung, handliche Steuerung durch optische Fokussierung des Strahls.

Mit der weiteren Entwicklung der Lasertechnik, der zukünftigen Anwendung von starken, kontinuierlichen Laserstrahlen und nach besserer Abklärung der mit der Materialbearbeitung zusammenhängenden Phänomene werden die Laser-Geräte zum Schweißen und Bohren weitere interessante Möglichkeiten bieten.

Schrifttum

- [1] Einstein, A.: Zur Quantentheorie der Strahlung, «Phys. Zeitschr.», Vol. 18 S. 121–128, März 1917.
- [2] Gordon, J. P., H. J. Zeiger und C. H. Townes, «Phys. Rev.», 95, S. 282, 1954.
- [3] Maiman, T. H.: Stimulated Optical Radiation in Ruby, «Nature» 87, S. 493–494, 1960.
- [4] Javan, A., W. R. Bennett und D. R. Herriott: Population Inversion and Continuous Optical Maser Oscillation in a Gas Discharge Containing a He-Ne Mixture, «Phys. Rev. Letters» 6, S. 106–110, 1961.
- [5] Lengyel, B. A.: Introduction to Laser Physics, John Wiley & Sons, New York, 1966.
- [6] Birnbaum, G.: Optical Masers, Academic Press, New York, 1964.
- [7] Bahun, C. J. und R. D. Enquist: Metallurgical Applications of Lasers, «Proc. of the Nat. Electronics Conf.», Chicago, Oct. 1962.
- [8] Fairbanks, R. H. und Adams, C. M.: Laser Beam Fusion Welding, «Welding J.» 43, S. 97–102, 1964.
- [9] Ready, J. F.: Effects Due to Absorption of Laser Radiation, Opt. Soc. Am., Report Spring Meeting 1963.
- [10] Panzer, S.: Die Anwendung des Lasers für die Materialbearbeitung, «Zeitschr. für angew. Math. und Physik», Vol. 16, Fasc. 1, S. 138 bis 155, 1965.
- [11] Pátek, K.: Lasers, Iliffe Books Ltd., London, 1967.
- [12] Ready, J. R.: Development of Plume of Material Vaporised by Giant Pulse Laser, «Appl. Phys. Letters», 3, S. 11–13, 1963.
- [13] Harris, T. J.: High Speed Photographs of Laser Induced Heating, «IBM J. of Research and Development», S. 342–344, 1963.
- [14] Rykalin, N. N. und Krasulin, Yu. L.: Evaluation of Energy Parameters in the Laser Welding of Metals, «Soviet Physics-Doklady», Vol. 10, No 7, S. 659–661, 1966.
- [15] Rykalin, N. N. und Uglov, A. A.: Heating of Thin Sheets in Laser Welding, «Sov. Phys.-Doklady», Vol. 10, No 11, S. 1106–1108, 1966.
- [16] Linlor, W. I.: Some Properties of Plasma Produced by Giant Laser Pulse, «Phys. Rev. Letters», Vol. 12, No 14, S. 383–385, 1964.

Bild 10. Laserbohrung im Stahl (Rasierklinge) [10], Lochdurchmesser links 0,125 mm, rechts 0,030 mm



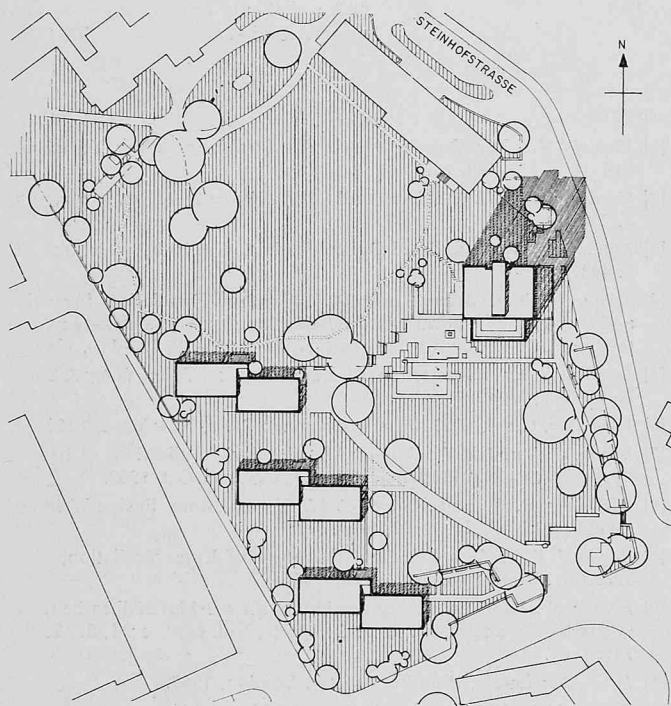
- [17] Basov, N. G. et al: Heating and Decay of Plasma Produced by a Giant Laser Pulse Focussed on a Solid Target, «Sov. Phys.-JETP», Vol. 24, No 4, S. 659-666, 1967.
- [18] Opower, H. und Burlefinger, E.: Temperature Determination of Plasmas Produced by Giant Laser Pulses, «Phys. Letters», Vol. 16, No 1, S. 37-38, 1967.
- [19] Dunlap, G. W. und Williams, D. I.: High Power Laser for Welding Application, Proc. of the Nat. Electronics Conf. 18, S. 601, 1962.
- [20] Anderson, J. E. und Jackson, J. E.: Theory and Application of Pulsed Laser Welding, «Welding J.», Vol. 44, No 2, S. 1018, 1965.
- [21] Williams, D. L.: The laser as a machine tool, Proc. of the nat. Electronics Conf. 19, S. 574-587, 1963.
- [22] Feldmann, D.: Lichttechnische Probleme mit hochenergetischen Lasern, «Lichttechnik» 9, S. 445-448, 1964.
- [23] Angerer, K. et al: Herstellung von Blendenbohrungen mit Laserstrahlung, «Phys. Verh.» 14, S. 162, 1963.
- [24] Gregg, D. W. und Thomas, S. J.: Plasma Temperatures Generated by Focussed Laser Giant Pulses, «J. of Appl. Physics», Vol. 38, No 4, S. 1729-1731, 1967.
- [25] Nelles, M.: Energy beams as working tools, Proc. of the Nat. Electronics Conf. 22, S. 991-992, 1966.

Die Alterssiedlung Eichhof in Luzern

Erwin Bürgi, dipl. Architekt BSA/SIA, Zürich

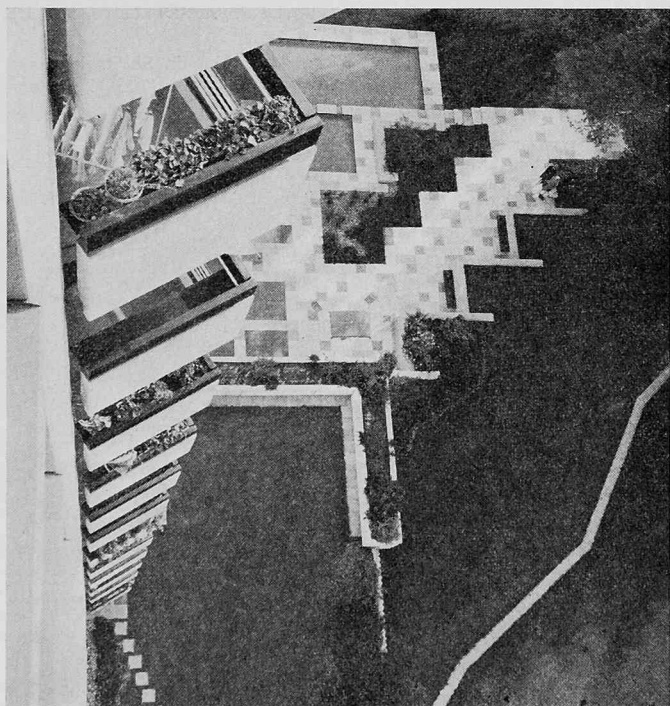
DK 725.56

Hierzu Tafeln 13 und 14



Lageplan 1:2000

Blick auf die Gartenanlage des Hochhauses



Die Bürgergemeinde Luzern machte als Bauherrin zur Bedingung, das Areal Eichhof mit seinem prachtvollen Baumbestand für die Alterssiedlung zu erhalten. Dies führte den Architekten dazu, als Wohnform für diese grössere Alterssiedlung ein turmartiges Hochhaus zu 16 Geschossen mit 82 Einzimmerwohnungen (d. h. 6 Wohnungen pro Geschoss) vorzuschlagen, zusammen mit drei zweigeschossigen Laubenganghäusern zu je 8 Zweizimmerwohnungen. Die Siedlung befindet sich in städtebaulich exponierter Lage bei der Abzweigung der Autobahn am westlichen Stadte. Inmitten eines öffentlich zugänglichen Grünraumes, ins umfassendere Quartier eingegliedert, stehen die Alterswohnungen in nahem Kontakt mit dem pulsierenden Leben der Stadt. Die günstige Verteilung der Wohnungen auf die einzelnen Geschosse vermeidet den Eindruck einer Kollektivierung und ermöglicht es, Haus- bzw. Stockwerkgemeinschaften zu bilden.

Dem *Innen*ausbau der Alterswohnungen wurde ganz besondere Beachtung geschenkt. Wohnschlafraum und Essküche sind auf die spezifischen Bedürfnisse der betagten Mieter ausgerichtet, angefangen bei der vom Wohnraum tagsüber abtrennbaren Schlafnische und der Verwendungsmöglichkeit des Fenstersimsbrettes auch als Arbeitsplatz und Schreibtisch, bis zum separaten Einbau von Kühlschrank und Backofen auf bequemer Höhe und dem Leuchtschalter bei eingeschalteter Elektroherdplatte. Die Wohnräume erfahren ausserdem eine Erweiterung durch grosse windgeschützte Balkone, welche den Bewohnern den wünschenswerten Kontakt zur nähere Umgebung erlauben, den sie im Hochhaus sonst mit zunehmender Höhe vermissen. Sämtliche Wohnungen werden durch natürlich belichtete Vorräume erschlossen. Einem Drittel der Wohnungen sind eigene Bäder (Sitzbadewannen), allen ausserdem auf entsprechender Geschosshöhe zusätzliche Effektenräume sowie Wohnungskeller in den Untergeschossen zugeordnet. Zu dem allgemeinen, wohl anspruchsvollen, aber keineswegs luxuriösen Innenausbau gehören auch Einrichtungen in Garderobenischen, Toiletteneinbaukasten in WC bzw. Bädern, securisierte Ganzglastüren in Küchen für eine natürliche Belichtung der Garderobe (Vorräume), Kunststoffrolläden bei den Wohnraumfenstern, sowie Sonnenstoren auf den Wohnbalkonen. Ausserdem werden den Mietern in grosszügiger Weise kostenlos gewisse besondere Einrichtungen zur Verfügung gestellt, wie Wäscheständer für Kleinwäsche, Kleideraufhängevorrichtungen auf den Wohnbalkonen, diverse zusätzliche Kücheneinrichtungen (u. a. besondere Kehrrichteimer, Gewürzschubladen), Obststürden für die Wohnungskeller. Bauseits gelieferte Vorhänge an den exponierten Fensterfronten sollen einen sauberen, einheitlichen Fassadeneindruck vermitteln.

Im Hinblick auf die relativ hohe Anzahl gleicher Wohnungen wurde vor Baubeginn eine vollständig ausgerüstete «Musterwohnung» erstellt. Dies erlaubte eine sorgfältige Abklärung aller Details bezüglich Form, Grösse, Konstruktion, Material und Farbgebung und bot den Mietinteressenten die willkommene Gelegenheit, lange vor Vertragsabschluss sich eine Vorstellung von der gewünschten fertigen Wohnung zu machen. Darüber hinaus war die ideale Möglichkeit gegeben, durch eine einfache aber zweckmässige Möblierung dieser Musterwohnung bei den zukünftigen Mietern erzieherisch, das heisst helfend auf die fast in jedem Falle auftretenden wohntechnischen Probleme hinzuweisen, die sich beim Umzug von einer Mehrzimmerwohnung in einen Wohnschlafraum zwangsläufig ergeben.

Bei dieser, wenigstens für schweizerische Verhältnisse bisher ungewohnten Siedlungs-Wohnform, war der Architekt bestrebt, den zahlreichen speziellen Problemen eines Wohnhochhauses seine be-