

Einfluß optischer Größen beim Zünden  
von Funkenstrecken durch Laserlicht

Effects of Optical Components on  
the Triggering of Spark Gaps by  
a Laser Beam

M. Pillsticker

IPP 4/102

November 1972

**MAX-PLANCK-INSTITUT FÜR PLASMAPHYSIK**

**GARCHING BEI MÜNCHEN**

# MAX-PLANCK-INSTITUT FÜR PLASMAPHYSIK

GARCHING BEI MÜNCHEN

Einfluß optischer Größen beim Zünden  
von Funkenstrecken durch Laserlicht

Effects of Optical Components on  
the Triggering of Spark Gaps by  
a Laser Beam

M. Pillsticker

IPP 4/102

November 1972

The report describes the experimental conditions observed when a spark gap was triggered by a laser beam. The optical laser parameters are discussed in this point of view. Furthermore, the influence of certain factors is pointed out. The most optimized values of several parameters as far as technical application is concerned.

*Die nachstehende Arbeit wurde im Rahmen des Vertrages zwischen dem Max-Planck-Institut für Plasmaphysik und der Europäischen Atomgemeinschaft über die Zusammenarbeit auf dem Gebiete der Plasmaphysik durchgeführt.*

M. Pillsticker

Einfluß optischer Größen  
beim Zünden von Funken-  
strecken durch Laserlicht

IPP 4/102

November 1972

Abstract

Der Bericht gibt einen Überblick über die verschiedenen Zündanfangsbedingungen, die bei der Zündung von Hochspannungs-Zweielektroden-Funkenstrecken mit Laserlicht bei  $10600 \text{ \AA}$  beobachtet wurden. Messungen an optischen Laserparametern werden unter diesem Gesichtspunkt diskutiert. Ferner wird auf die technische Brauchbarkeit bestimmter Anordnungen hingewiesen. Die vorgelegten Ergebnisse ermöglichen für ein gewünschtes Schaltverhalten einer Funkenstrecke die für einen technischen Einsatz notwendige Optimierung der optischen Parameter.

The report surveys the different initial triggering conditions observed by investigations of high voltage spark gap triggering with laser light of  $10600 \text{ \AA}$ . Measurements on optical laser parameters are discussed from this point of view. Furthermore, the technical usefulness of certain devices is pointed out. The given results render the necessary optimized values for optical parameters as far as a technical application is desired.

## Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung
2. Versuchsaufbau
3. Durchschlagsvorgang bei optischer Längszündung
4. Parameteruntersuchungen an optischen Komponenten
  - 4.1. Verhältnis der Linsenapertur zur Laserstrahlstärke
  - 4.2. Linsenbrennweite
  - 4.3. Linsenfehler- und -form
  - 4.4. Abblendeffekte - Laserstrahlstärke - Divergenz
  - 4.5. Bohrungseinfluß
  - 4.6. Fokuslage
- Zusammenfassung
- Benutzte Formelzeichen
- Literaturverzeichnis
- Bild 1 bis Bild 16

## 1. Einleitung

Bisherige Untersuchungen an Zweielektroden-Funkenstrecken mit Zündung durch Laserlicht galten der Klärung des Zündverhaltens bei unterschiedlicher Anordnung der Elektroden hinsichtlich der Einstrahlung des Laserlichtes und der Optimierung für die Zündung wichtiger Parameter /1-5/. Damit bei erträglichem Aufwand an Laserenergie Funkenstrecken innerhalb eines möglichst großen Spannungsbereiches unterhalb der Durchschlagsgleichspannung bei kleinen Schaltverzögerungszeiten und kleinen Streuungen dieser Zeiten gezündet werden können, wurden Einflüsse des Gasdruckes, der Gasart im Entladungsraum, der Laserlichtfrequenz, der Laserlichtimpulsdauer und der Laserlichtleistung in ihrer Auswirkung auf den gezündeten Durchschlag meßtechnisch bestimmt /2-5/.

Nicht systematisch untersucht wurde bisher der Einfluß optischer Größen auf das Durchschlagsverhalten. Im Hinblick auf eine technische Anwendung war es daher erforderlich, die Beeinflussung des Durchschlages durch die Laserstrahlstruktur, die optischen Komponenten zur Strahlführung und Fokussierung sowie die Optik beeinflussende Geometrie der Funkenstrecke zu erforschen.

## 2. Versuchsaufbau

Die Untersuchungen wurden an einer Kugelfunkenstrecke (Bild 1) durchgeführt, die einen gedämpften Hochspannungsschwingkreis einschaltete. Die Einstrahlung des Lichtes erfolgte in Richtung der elektrischen Feldstärke (Längszündung), sodaß eine Elektrode zum Eintritt des Lichtes aufgebohrt werden mußte.

Zur Erzeugung des Lichtes wurde ein YAG- und ein  $\text{Nd}^{3+}:\text{POCl}_3:\text{ZrCl}_4$  Flüssigkeits-Laser ( $1,06 \mu\text{m}$ ) benutzt. Im aktiven Q-switch-Betrieb konnten Lichtimpulse von 8-16 bzw. 22 ns Dauer und von 3-10 bzw. 60 MW Leistung erzeugt werden. Die Strahldivergenzen betragen 1,5-2 und 8 mr. Etwa 1 % der Gesamtenergie wurde für Meßzwecke ausgeblendet. Gemessen wurden die Laserleistung mit einer Diode (ITT Typ F4000S1) und die Laserenergie mit einer Diode und nachgeschaltetem Integrator.

In zeitlicher Zuordnung zum Verlauf der Laserleistung wurde der Stromverlauf während der Entladung des Schwingkreises registriert. Somit läßt sich die Zündverzugszeit  $t_v$ , die eine wichtige Aussage über das Durchschlagsverhalten und die technische Verwendbarkeit einer Funkenstrecke macht, per Definition bestimmen.\* Desweiteren geben Schmierbildaufnahmen (Zeitauflösung 100 ns/cm) sowie zeitintegrierte Beobachtungen mit einem Fernsehsystem Auskunft über das Durchschlagsverhalten.

---

\*Die Zündverzugszeit  $t_v$  zählt vom Beginn des Anstieges der Laserleistung bis zum Beginn des Stromflusses im Schwingkreis (Bild 2).

### 3. Durchschlagsvorgang bei optischer Längszündung

Die optische Längszündung weist eine günstigere Zündcharakteristik (Zündverzugszeit über der Elektrodenspannung) als auf die Querzündung /1/. Deswegen wurden noch ausstehende genaue Untersuchungen an optischen Größen nur mit längsgezündeten Funkenstrecken vorgenommen.

Den Durchschlag beeinflussen viele Parameter, die teilweise einzeln und teilweise nur gemeinsam veränderbar sind. Zu den Laserparametern zählen: Laserlichtfrequenz, Laserlichtleistung, Laserlichtimpulsdauer, Laserstrahlstärke, Divergenz des Strahles und Laserleistungsprofil. Als Parameter der Strahlführung gelten: Linsenbrennweite, Linsenform, Fokusslage im Bereich der Schlagweite (Fokuseinstellung) und Bohrung des Loches zum Laserlichteintritt in einer Elektrode. Die wichtigsten Funkenstreckenparameter sind: Schlagweite, Elektrodenform, Gasart und Gasdruck.

Funkenstrecken für Längszündung kann man klassifizieren nach der Länge der Schlagweite und den Zündanfangsbedingungen.

Die Schlagweite einer Funkenstrecke darf nur begrenzt verändert werden, falls ein gewünschter Durchschlagsvorgang angestrebt wird. Extreme Änderungen erfordern die Anpassung der Parameter der Strahlführung. Man kann zwischen zwei Schlagweitenbereichen unterscheiden. Die Schlagweite ist a) wesentlich größer und b) kleiner oder geringfügig größer als der Wirkungsbereich, in dem durch lasererzeugtes Plasma Ionisation stattfindet /5/.

Bei großen Schlagweiten (Bereich a) können auch nur große Linsenbrennweiten benutzt werden. Dadurch bedingte Selbstfokussierung führt zu perlförmig angeordneten Plasmakugeln in der Achse des Laserstrahles. Der Durchschlagskanal wird vorgezeichnet. Die Zündverzugszeiten können bei sehr

langen Schlagweiten relativ groß sein und stark streuen. Der Spannungsbereich unterhalb der Durchschlagsgleichspannung mit reproduzierbaren Durchschlägen ist klein. Grund hierfür ist, daß die lasererzeugten Plasmakugeln in ihrer räumlichen Anordnung nicht reproduzierbar sind und der Abstand zwischen den Plasmakugeln groß sein kann.

Bei kleinen Schlagweiten (Bereich b) sind kurzbrennweitige Linsen verwendbar. Extrem günstige Schalteigenschaften einer durch Laserlicht gezündeten Funkenstrecke über einen großen Spannungsbereich lassen sich nur in diesem Schlagweitenbereich realisieren.

Zur Untersuchung der Laserparameter und der Strahlführung war es zweckmäßig, Funkenstreckenparameter nicht zu verändern. Mit  $s = 6$  mm war die Schlagweite so gewählt, daß beim erforderlichen Druck  $p_s = 20$  atü des Argons die Durchschlagsgleichspannung  $U_{DS} = 50$  kV betrug und auch der Durchschlagsvorgang sich unter sehr günstigen Bedingungen entwickeln konnte /5/ ( $s \leq$  doppelter Wirkungsbereich eines Fokusplasmas).

Die Parameter des Lasers und der Strahlführung bestimmen die Zündanfangsbedingungen. Es muß unterschieden werden zwischen Zündung mit und ohne lasererzeugtem Plasma im Bereich der Durchschlagsstrecke. Plasma kann durch den Laserstrahl sowohl im Gas als auch auf der Elektrodenoberfläche erzeugt werden. Formale sind damit 6 brauchbare Möglichkeiten als Ausgangsphase für eine Zündung gegeben:

1. Zündung ohne lasererzeugtes Plasma;
2. Zündung mit lasererzeugtem Plasma auf der Metalloberfläche der nicht durchbohrten Elektrode (Metallplasma);
3. Zündung mit lasererzeugtem Plasma im Gas zwischen den Elektroden ohne wirksame Selbstfokussierung im Laserstrahl (Gasplasma I);
4. Zündung mit lasererzeugtem Plasma im Gas zwischen den Elektroden und auf der Metalloberfläche der nicht durchbohrten Elektrode (Gasplasma I und Metallplasma);



5. Zündung mit lasererzeugtem Plasma im Gas zwischen den Elektroden und auf den Metalloberflächen beider Elektroden (Gasplasma und zwei Metallplasmen);
6. Zündung bei wirksamer Selbstfokussierung im Laserstrahl (Gasplasma II).

#### Zu 1. Zündung ohne lasererzeugtes Plasma

In diesem Fall ist Zündung nur möglich, wenn die Laserleistungsdichte im Brennpunkt des fokussierten Strahles nicht wesentlich unterhalb des Schwellwertes für lasererzeugtes Plasma liegt. Durch Laserstrahlung erregte Multiphotonenionisation in Verbindung mit Kaskadenionisation liefert Primärladungsträger im Laserstrahlfokus sowie in dessen näherer Umgebung. Der Einfluß des angelegten elektrischen Feldes führt zu Raumladungen, wodurch sich örtlich hohe elektrische Feldstärken ergeben, die Voraussetzung für eine schnelle Streamerentwicklung oder zumindest für eine langsame Townsendentladung sein können. Daher ist nur in einem kleinen Spannungsbereich unterhalb der Durchschlagsgleichspannung Zündung möglich. Die Zündverzugszeiten sind groß und nehmen mit sinkender Spannung schnell zu ( $\mu$ s-Bereich).

#### Zu 2. Zündung mit Metallplasma

Wird Plasma auf der Oberfläche der nicht durchbohrten Elektrode erzeugt, so werden die Zündbedingungen gegenüber 1) verbessert, da eine höhere Laserleistungsdichte und damit eine bessere Ionisierung im fokussierten Laserstrahl vorliegt sowie eine zusätzliche Ionisationsquelle durch das Plasma geschaffen wird. Im Fokuskegel des Laserstrahles liegen so gute Ionisationsbedingungen vor, daß der Funkenkanal zwischen den Elektroden im Zentrum des Laserstrahles verläuft, und erst unmittelbar vor der durchbohrten Elektrode zum Rand der Bohrung abbiegt /2/. Das Zündverhalten entspricht etwa dem von elektrisch gezündeten Funkenstrecken mit den günstigsten bekannten

Ergebnissen. In einem Spannungsbereich unterhalb der Durchschlagsgleichspannung  $\Delta U > 0,5 U_{DS}$  ergeben sich Zündverzugszeiten von nur wenigen ns.

### Zu 3. Zündung mit Gasplasma I

Die hier angesprochenen Zündbedingungen setzen voraus, daß ein leicht ionisierbares Gas, z.B. Argon, bei hohem Druck und Linsen mit sehr kurzer Brennweite benutzt werden. Am günstigsten wählt man eine Fokuslage mit geringem Abstand zur nicht durchbohrten Elektrode. Ist das Angebot an Laserleistung nur wenig oberhalb des Schwellwertes für Fokurdurchbruch, kann gegenüber dem unter 2 beschriebenen Durchschlagsverhalten schon eine geringfügige Verbesserung erreicht werden. Die Ionisierungsbedingungen im Gas sind günstiger und die effektive Durchschlagsstrecke wird um den Abstand vermindert, der sich aus der räumlichen Ausdehnung des Plasmas und dem Abstand der Fokuslage von der nicht durchbohrten Elektrode ergibt.

Bei Vergrößerung der Laserleistung wächst das Plasmavolumen zur Linse hin, weil das zeitlich zuerst erzeugte Plasma im Fokus lichtundurchlässig ist und die Laserstrahlung nicht mehr auf der dem Laser abgewandten Seite wirksam werden kann. Ferner werden in der restlichen Durchschlagsstrecke ohne Plasmabildung durch Laserstrahlung bessere Ionisierungsbedingungen geschaffen. Im Extremfall kann der gesamte Durchschlagbereich mit lasererzeugtem Plasma ausgefüllt sein. Der Spannungsbereich  $\Delta U$ , in dem Zündverzugszeiten von wenigen ns auftreten ist von der Laserleistung abhängig und schwankt zwischen  $\Delta U = 0,6 U_{DS}$  bis  $0,95 U_{DS}$ .

### Zu 4. Zündung mit Metallplasma und Gasplasma I

Es entwickelt sich lasererzeugtes Plasma auf der nicht durchbohrten Elektrode und zwar zeitlich gesehen vor dem Fokusplasma. Somit kann die Fokuslage weiter von der nicht durchbohrten Elektrode entfernt werden. In der verkürzten restlichen Durchschlagsstrecke ergeben sich

bessere Ionisierungsbedingungen infolge größerer Leistungsdichte bei gleichem Leistungsaufwand wie unter 3), oder man kann mit weniger Laserleistung gleich gute wie unter 3) beschriebene Zündbedingungen schaffen. Die Schlagweite kann etwas größer gewählt werden, wobei noch gutes Durchschlagsverhalten vorliegt. Die angesprochenen Zündbedingungen lassen sich erreichen bei hinreichend großer Brennweite der Linse und unterhalb eines kritischen Druckwertes des Gases in der Funkenstrecke.

#### Zu 5. Zündung mit Gasplasma I und zwei Metallplasmen

Wenn der Laserstrahl die Bohrung der Elektrode streift, kann bei hohen Laserleistungen zusätzlich Metallplasma am Bohrungsrand erzeugt werden. Dieses Plasma entwickelt sich gleichzeitig oder nach dem Gasplasma, so daß eine Beschleunigung des Kanalaufbaues gegenüber 4. nicht zu erwarten ist.

#### Zu 6. Zündung bei wirksamer Selbstfokussierung (Gasplasma II)

Die Selbstfokussierung eines Laserstrahles ist ein nicht-linearer Effekt, der durch Elektrostriktion und Kerr-effekt verursacht wird und beim Überschreiten eines Grenzwertes der Leistungsdichte, die sehr hoch ist, im Laserstrahl oder in hinreichender Länge im Fokuskonus auftritt. Bisherige Untersuchungen zeigten, daß sehr langbrennweitige Linsen (dm-Bereich) für die Erzeugung perlfförmig angeordneter Plasmakugeln als Folge der Selbstfokussierung benutzt werden mußten und daß hohe Laserleistungen aufgewandt wurden. Eigene Untersuchungen ergaben, daß bei sehr kleinen Divergenzen ( $< 1,8$  mr) und kleinen Brennweiten ( $< 7$  cm) wirksame Selbstfokussierung in Argon bei 20 atü erzeugt werden kann, so daß dieses Zündprinzip auch schon bei den hier betrachteten kurzen Durchschlagsstrecken beachtet werden muß.

#### 4. Parameteruntersuchungen an optischen Komponenten

##### 4.1. Verhältnis Linsenapertur zu Laserstrahlstärke

Damit bei der Fokussierung eines Laserstrahles die zur Verfügung stehende Energie gut ausgenutzt wird, darf ein bestimmtes Verhältnis Linsendurchmesser zu Laserstrahldurchmesser nicht unterschritten werden. Bei einer Gauß-Verteilung der Leistungsdichte im Strahlquerschnitt ergibt sich für das Verhältnis der Laserleistung im Fokus zur Gesamtlaserleistung vor der Linse

$$\frac{P_{L \text{ Fokus}}}{P_{L \text{ ges.}}} = 1 - e^{-\left(\frac{R_{\text{Linse}}}{R_{\text{Laser}}}\right)^2}$$

bei vernachlässigten Reflexionsverlusten an der Linse /6/. Als Radius des Laserstrahls  $R_{\text{Laser}}$  gilt definitionsgemäß der Abstand vom Strahlzentrum (maximale Leistungsdichte) bis zum Punkt, wo die Leistungsdichte auf den  $1/e$ -fachen Wert abgesunken ist.

Die gemessene Leistungsverteilung am YAG-Laser zeigt Bild 3 und 4. Bei einem Linsendurchmesser von über 10 mm kann man im vorliegenden Falle erwarten (YAG-Strahldurchmesser  $\sim 6,5$  mm), daß mehr als 99,9 % der Gesamtleistung fokussiert werden.

##### 4.2. Linsenbrennweite

Eine günstige Brennweite liegt vor, wenn die im Fokus notwendige Leistungsdichte bei einem Minimum an Laserleistung erreicht werden kann. Bei idealer Betrachtungsweise der Linse und des Laserstrahles sowie Vernachlässigung von Selbstfokussierungseffekten läßt sich eine optimale Linsenbrennweite berechnen. Aus der Laserleistung (Bild 5)

$$P_{\text{Laser}} = I_m(t, x) \left[ (x-z_1) \frac{b-\theta f}{f} + \theta f \right]^2 \pi \quad (2)$$

wird das Optimum für die Brennweite bestimmt zu:

$$f_{\text{op}} = \sqrt{\frac{(x-z_1)b}{\theta}} \quad (3)$$

Hierzu ist  $x$  als die Koordinate einzusetzen, für die Gasdurchbruch erwünscht ist. Nach Gl. 3 läßt sich die obere Grenze der Brennweite abschätzen. Diese lautet:

$$f = \sqrt{\frac{sb}{\theta}}$$

Diese Betrachtungsweise zeigt, daß der Leistungsschwellwert für Durchbruch im Fokus nicht ein absolutes Qualitätsmerkmal für das Durchschlagsverhalten sein kann. Man muß Messungen als Grundlage der Betrachtungen über die Linsenbrennweite heranziehen.

Bild 6 zeigt Zusammenhänge zwischen Brennweite und Leistungsschwellwerten für Fokusdurchbruch und Plasmaerzeugung auf der Oberfläche der nicht gebohrten Elektrode. Entsprechend der Gl. 2 war dieses Verhalten für Fokusdurchbruch erwartet. Auch Kurve 5 verläuft erwartungsgemäß. Der Verlauf der Kurve 6 wird verständlich, wenn bekannt ist, daß an der Sprungstelle der Grenzwert für Selbstfokussierung erreicht wird, sodaß an der Elektrode auch hohe Leistungsdichten auftreten, obwohl der Brennpunkt bei  $z = \frac{s}{2}$  liegt. Ohne den Einfluß der Selbstfokussierung muß die Kurve 6 theoretisch Sättigungsverhalten zeigen und in Kurve 5

## 4. Parameteruntersuchungen an optischen Komponenten

### 4.1. Verhältnis Linsenapertur zu Laserstrahlstärke

Damit bei der Fokussierung eines Laserstrahles die zur Verfügung stehende Energie gut ausgenutzt wird, darf ein bestimmtes Verhältnis Linsendurchmesser zu Laserstrahldurchmesser nicht unterschritten werden. Bei einer Gauß-Verteilung der Leistungsdichte im Strahlquerschnitt ergibt sich für das Verhältnis der Laserleistung im Fokus zur Gesamtlaserleistung vor der Linse

$$\frac{P_{L \text{ Fokus}}}{P_{L \text{ ges.}}} = 1 - e^{-\left(\frac{R_{\text{Linse}}}{R_{\text{Laser}}}\right)^2}$$

bei vernachlässigten Reflexionsverlusten an der Linse /6/. Als Radius des Laserstrahls  $R_{\text{Laser}}$  gilt definitionsgemäß der Abstand vom Strahlzentrum (maximale Leistungsdichte) bis zum Punkt, wo die Leistungsdichte auf den  $1/e$ -fachen Wert abgesunken ist.

Die gemessene Leistungsverteilung am YAG-Laser zeigt Bild 3 und 4. Bei einem Linsendurchmesser von über 10 mm kann man im vorliegenden Falle erwarten (YAG-Stabdurchmesser  $\sim 6,5$  mm), daß mehr als 99,9 % der Gesamtleistung fokussiert werden.

### 4.2. Linsenbrennweite

Eine günstige Brennweite liegt vor, wenn die im Fokus notwendige Leistungsdichte bei einem Minimum an Laserleistung erreicht werden kann. Bei idealer Betrachtungsweise der Linse und des Laserstrahles sowie Vernachlässigung von Selbstfokussierungseffekten läßt sich eine optimale Linsenbrennweite berechnen. Aus der Laserleistung (Bild 5)

$$P_{\text{Laser}} = I_m(t, x) \left[ (x-z_1) \frac{b-\theta f}{f} + \theta f \right]^2 \pi \quad (2)$$

wird das Optimum für die Brennweite bestimmt zu:

$$f_{\text{op}} = \sqrt{\frac{(x-z_1)b}{\theta}} \quad (3)$$

Hierzu ist  $x$  als die Koordinate einzusetzen, für die Gasdurchbruch erwünscht ist. Nach Gl. 3 läßt sich die obere Grenze der Brennweite abschätzen. Diese lautet:

$$f = \sqrt{\frac{sb}{\theta}}$$

Diese Betrachtungsweise zeigt, daß der Leistungsschwellwert für Durchbruch im Fokus nicht ein absolutes Qualitätsmerkmal für das Durchschlagsverhalten sein kann. Man muß Messungen als Grundlage der Betrachtungen über die Linsenbrennweite heranziehen.

Bild 6 zeigt Zusammenhänge zwischen Brennweite und Leistungsschwellwerten für Fokusdurchbruch und Plasmaerzeugung auf der Oberfläche der nicht gebohrten Elektrode. Entsprechend der Gl. 2 war dieses Verhalten für Fokusdurchbruch erwartet. Auch Kurve 5 verläuft erwartungsgemäß. Der Verlauf der Kurve 6 wird verständlich, wenn bekannt ist, daß an der Sprungstelle der Grenzwert für Selbstfokussierung erreicht wird, sodaß an der Elektrode auch hohe Leistungsdichten auftreten, obwohl der Brennpunkt bei  $z = \frac{s}{2}$  liegt. Ohne den Einfluß der Selbstfokussierung muß die Kurve 6 theoretisch Sättigungsverhalten zeigen und in Kurve 5

einmünden. Bei Erreichen der Leistungsschwelle bildet sich dann perlfförmig angeordnetes Plasma (Bild 7).

Bild 8 stellt Meßergebnisse über den Einfluß der Brennweite auf das zeitliche Durchschlagsverhalten dar. Mit zunehmender Brennweite läßt sich die Zündverzugszeit  $t_v$  verringern und der Spannungs-Arbeits-Bereich  $\Delta u$  vergrößern, wobei der Laserleistungsbedarf auch etwas erhöht werden muß. Da alle Kurven für das jeweils optimale  $Z_{op}$  gelten, und entsprechend Bild 9  $Z_{op}$  eine Funktion der Brennweite und auch der Laserleistung ist, ergibt sich bei größeren Brennweiten eine kürzere Strecke im Durchschlagsbereich, die nicht mit lasererzeugtem Plasma angefüllt ist. Zudem ist in der verbleibenden Reststrecke der Ionisierungsgrad sehr hoch, so daß nur geringe elektrische Feldstärken auf Grund der Elektrodenspannung zum Durchschlag führen. Das erklärt den zeitlich schnelleren Aufbau des Entladungskanals und den größeren Arbeitsbereich. Bei einer technischen Anwendung ist zu entscheiden, ob extrem geringer Laserleistungsbedarf bei kurzen Brennweiten oder besseres Durchschlagsverhalten bei etwas größeren Brennweiten anzustreben ist.

Eine weitere Vergrößerung der Linsenbrennweite ist unzweckmäßig, da eine Verbesserung des Durchschlagsverhaltens als Folge der Selbstfokussierung nicht möglich ist und gleiche Ergebnisse größere Laserleistungen erfordern.

#### 4.3. Linsenfehler und -form

Bei der Fokussierung des Laserlichtes braucht wegen der weitgehend parallelen Einstrahlung zur optischen Achse und der Monochromasie des Laserlichtes lediglich die sphärische Aberration als wirksamer Linsenfehler beachtet werden. Genauere Untersuchungen zeigen, daß plankonvexe Linsen nur eine geringfügig höhere Aberration als die Linsen mit der besten Form besitzen. Für die benutzte



Linsengröße wird bei  $\lambda = 1,06 \mu\text{m}$  ein um 6% höherer Wert berechnet. Hingegen wird bei bikonvexen Linsen ein um 60% höherer Wert als für die Linse mit bester Form ermittelt.

Bild 6 zeigt bei den Linsen mit kleiner Brennweite den Einfluß der Form. Die aufgewendete Leistung kann bei Verwendung von plankonvexen an Stelle bikonvexer 25 mm Linsen um etwa 50 % verringert werden, damit im Fokus gleiche Leistungsdichten vorliegen. Der einheitliche Verlauf bei größeren Brennweiten ( $f > 80 \text{ mm}$ ) kann durch Selbstfokussierung, auf den die Linsenform einen geringen Einfluß hat, erklärt werden. Bild 10 gibt Auskunft über den Einfluß auf das Durchschlagsverhalten. Bei plankonvexen Linsen zeigt sich bei sonst unveränderten Daten eine geringe aber merkbliche Vergrößerung des Spannungs-Arbeits-Bereiches und bei kleinen Laserleistungen eine zusätzliche Verringerung der Zündverzugszeit gegenüber den Werten von bikonvexen Linsen.

Eine weitere Verbesserung könnte erreicht werden beim Einsatz nicht sphärischer Linsen mit vernachlässigbarem Aberrationsfehler. Die Herstellung solcher teureren Linsen ist für die Zündung von Funkenstrecken nicht erforderlich und auch nicht gerechtfertigt, wie die vorliegenden Meßergebnissen zeigen.

#### 4.4. Abblendeffekte - Laserstrahlstärke - Divergenz

Eine von Maslowski /6/ angegebene Gleichung zeigt, daß durch Abblenden des Laserstrahles eine Erhöhung der Leistungsdichte am Ort der Maximalintensität erreicht werden kann. Je größer die sphärische Aberration ist, um so kleiner ist der Blendenradius zu wählen, bei dem die maximale Leistungsdichte vorliegt. Dies ist physikalisch verständlich, da durch Verkleinern der Linsenapertur das Licht der Randzone fortfällt und am Ort der Maximalintensität nicht mit dem Licht aus dem

Strahlzentrum interferieren kann. In /6/ angegebene Rechenergebnisse zeigen, daß bei optimalen optischen Größen, gaußscher Leistungsdichteverteilung und spärlichen Linsen die Beziehungen

$$a = 1,76 R_{\text{Laser}}$$

und

$$11,6 = \frac{\Delta f \cdot R_{\text{Laser}}^2}{f^2}$$

bestehen.  $\Delta f$ , als Abstand zwischen paraxialem und marginalem Fokus, ist eine Funktion von  $a$ , dem Brechungsindex und dem Linsenkrümmungsradius. Danach gibt es einen günstigen Öffnungswinkel  $R_{\text{Laser}}/f$ . Bild 11 zeigt den Zusammenhang zwischen  $f$  und  $R_{\text{Laser}}$  bei optimalen Bedingungen und Neodymlichtfrequenz.

Auf praktische Anwendungen lassen sich diese Ergebnisse nicht unmittelbar übertragen, da Laserstrahlen nicht in beliebigen Stärken zur Verfügung stehen und Riesenimpulslaser nur sehr selten eine gaußförmige Leistungsdichteverteilung aufweisen (Bild 4). Man ist versucht, durch Blendenänderung Verbesserungen zu erzielen.

Einige Untersuchungsergebnisse über den Einfluß der Abblendung zeigt Bild 12. Im Verlauf der Kurve tritt bei  $D_{\text{BL}} \sim 5 \text{ mm}$  ein Knick auf und die Leistung nimmt verstärkt zu, obwohl die Leistungsdichte (Fokusdurchbruch) nicht geändert wird. Der flache Verlauf für Werte  $D_{\text{BL}} < 5 \text{ mm}$  ist auf Verkleinerung der Divergenz des abgeblendeten Laserstrahlen und die geringere sphärische Aberration der Linse für Strahlen kleinen Durchmessers zurückzuführen. Für  $D_{\text{BL}} > 5 \text{ mm}$  überlagert sich diesem der oben beschriebene Interferenzeffekt, sodaß ein vermehrter Leistungsbedarf auftritt, um eine konstante Leistungsdichte zu erzielen.

Bei gleicher Leistung erzielt man bei abgeblendeten Strahlen größere Arbeitsbereiche und teilweise auch kleinere Zündverzugszeiten, insbesondere bei Werten kurz oberhalb der Fokaldurchbruchleistung, als bei nicht abgeblendeten Laserstrahlen (Bild 13). Dies ist auf den geringeren Aberrationsfehler, die kleinere Divergenz und das mehr rechteckförmige Leistungsdichteprofil abgeblendeter Strahlen zurückführbar, wodurch sich ein längeres Plasmavolumen bildet. Diese Erkenntnisse scheinen von geringer praktischer Bedeutung, weil die vom Laser gelieferte Leistung (fokussierte Leistung + abgeblendete Leistung) einen so großen Leistungswert ergibt, daß dabei gleich gute oder sogar bessere Ergebnisse erzielt werden würden.

Für die Entwicklung von Lasern sollten soweit möglich diese Untersuchungen beachtet werden. Der erzeugte Strahl sollte möglichst kleine Divergenz bei kleiner Strahlstärke in Verbindung mit großer Leistungsdichte aufweisen.

#### 4.5. Bohrungseinfluß

Der Einfluß der Bohrung war qualitativ bekannt durch Vorversuche /2 u. 5/. Durch die im fokussierten Strahl geschaffenen guten Ionisierungsbedingungen ist der Weg des Entladungskanals vorgezeichnet. Je nach Größe der Laserleistung biegt er in mehr oder weniger kurzer Entfernung vor der Bohrung zu dieser ab. Der Abstand vom Strahlknickpunkt zur Bohrungskante ist ein Gebiet geringer Laserleistungsdichte und daher mit geringer Vorionisierung, so daß diese Entfernung das zeitliche Verhalten des Durchschlages maßgeblich beeinflußt. Diese Strecke wird auf Grund der elektrischen Feldstärke der Elektrodenspannung durchschlagen.

Bild 14 zeigt Zündkennlinien mit unterschiedlichen Elektrodenbohrungen bei sonst unveränderten Daten. Mit steigendem Bohrungsdurchmesser wird der Spannungs-Arbeits-

Bereich verkleinert und die Zündverzugszeiten vergrößert. Bei Linsen mit kleinen Brennweiten ohne wirksame Selbstfokussierung wird bei großem Laserleistungsangebot für kleine Bohrungen kein wesentlicher Unterschied des Spannungs-Arbeits-Bereiches und der Zündverzugszeit beobachtet. Linsen mit langen Brennweiten und wirksamer Selbstfokussierung zeigen bei entsprechender Laserleistung und kleinen Bohrungen deutliche Unterschiede in den Werten der Arbeitsbereiche und der Zündverzugszeiten. Lange Brennweiten verursachen lange dünne Schläuche hoher Laserleistungsdichte, die im Bohrbereich vorliegen, so daß Verkleinerungen der Bohrung bis 1 mm noch ansprechen. Bei kleinen Brennweiten ist die Energiedichte im Bohrbereich bereits so gering, daß Änderungen bei kleinen Bohrungen kaum ansprechen. Gleichzeitig erklärt dies auch die kleineren Zündverzugszeiten und die größeren Arbeitsbereiche bei langen Brennweiten und hinreichend hoher Laserleistungsdichte (Bild 15).

#### 4.6. Fokuslage

Bisherige Schilderungen beschränken sich immer auf die optimale Fokuslage. Im Bild 16 sind Spannungsschwellwerte für mögliche Zündung über der Fokuslage angegeben. Umfangreiche Untersuchungen zeigen, daß im Minimum des Kurvenverlaufes - identisch mit größtem Arbeitsbereich - auch die kleinsten Zündverzugszeiten erzielbar sind.

Bei kleinen Brennweiten ohne wirksame Selbstfokussierung ergeben sich unterhalb des Laserleistungsschwellwertes für Fokusburchbruch ausgeprägte Extrema, die eine exakte Fokussierung  $Z_{op}$  erfordern. Bei Laserleistungen oberhalb dieser Schwelle sind nur noch sehr flache Extrema registriert. Für Laserleistungen, die nur Metallplasmen erzeugen können, befindet sich die optimale Fokuslage auf der Elektrodenoberfläche. Oberhalb der Schwelle für Fokusburchbruch liegt der optimale Fokus vor der Elektrode. Bei größeren Brenn-

weiten mit wirksamer Selbstfokussierung konnte keine Verlagerung des optimalen Fokuspunktes in Abhängigkeit von der Leistung beobachtet werden. Als optimaler Wert wurde  $Z_{op}/s = 0,7$  ermittelt.

### Zusammenfassung

Der Bericht gibt eine Übersicht der verschiedenen Zündanfangsbedingungen, die bei Laserlichtzündung möglich sind. Die Messungen an den Laserparametern werden unter diesem Gesichtspunkt gewertet und im Hinblick auf ihre praktische Brauchbarkeit untersucht. Die Darstellungen geben die Möglichkeit für gewünschtes Schaltverhalten bei einem technischen Einsatz die optischen Parameter zu optimieren.

## Literaturverzeichnis

- /1/ H. Baumhacker, F. Hofmeister, K. Maischberger, K.H. Schmitter; Invest. on Triggering of Two Electrode Spark Gaps by the Focused Beam of a High Power Ruby Laser; 5th Symposium Fusion Techn. 1968.
- /2/ M. Pillsticker, K.H. Schmitter, H. Wedler; Proceedings 6th Symp. Fusion Techn. 1970, 259-264.
- /3/ J.R. Bettis, A.H. Guenther; IEEE Jour. Quantum Electronics, Vol QE-6, 1970, 483-491; and Proceedings of IEEE, Vol 59, 1971, 689-697.
- /4/ S.H. Khan; Radio a. Electronic Engineer, Vol. 41, 1971, 475-480.
- /5/ M. Pillsticker; Scient. Contr. Symp. High Voltage Techn. 1972, München, 619-626.
- /6/ S. Maslowski; Fokussierung von Laserlicht mit nichtidealen Linsen; Dissertation T.H. Karlsruhe, 1969.

## Benutzte Formelzeichen

a	Linsenradius
b	Laserstrahlradius (idealisierte Annahme, Bild 5)
B	Elektrodenbohrung
D	Elektrodenradius
$D_{BL}$	Blendendurchmesser
$D_L$	Laserstabdurchmesser
f	Linsenbrennweite
$f_{op}$	optimale Linsenbrennweite
$\Delta f$	Abstand zwischen paraxialem und marginalem Fokus
$I_m(t, x)$	Laserleistungsintensität im Strahlzentrum
$P_L$	Laserleistung
$P_{LFokus}$	Laserleistung im Fokus
$P_{Lges}$	Laserleistung vor der Fokussierungslinse
$P_{LF}$	Laserleistungsschwelle für Fokusdurchbruch
$P_{LM}$	Laserleistungsschwelle für Plasmaerzeugung auf Metalloberfläche der Elektrode
$P_s$	Druck in der Funkenkammer
$R_{Laser}$	Laserstrahlradius (Definition Seite 8)
$R_{Linse}$	Linsenradius
S	Schlagweite
t	Zeit
$T_A$	Anstiegszeit des Laserimpulses (Bild 2)
$T_M$	Halbwertszeit des Laserimpulses (Bild 2)
$t_v$	Zündverzugszeit (Bild 2)
$U_{DS}$	Durchschlagsgleichspannung
$U_s$	Elektrodenspannung
$U_{sth}$	Spannungsschwellwert für mögliche Zündung
$\Delta U$	Arbeitsbereich ( $U_{DS} - U_s(t_v=40 \text{ ns})$ )
XY	Koordinate in Strahlrichtung
Z	Abstand zwischen Fokus und gebohrter Elektrode
$Z_1$	Abstand zwischen Fokus und nicht gebohrter Elektrode
$Z_{op}$	optimaler Wert für Z
$\theta$	Laserstrahldivergenz
$\lambda$	Wellenlänge des Laserlichtes

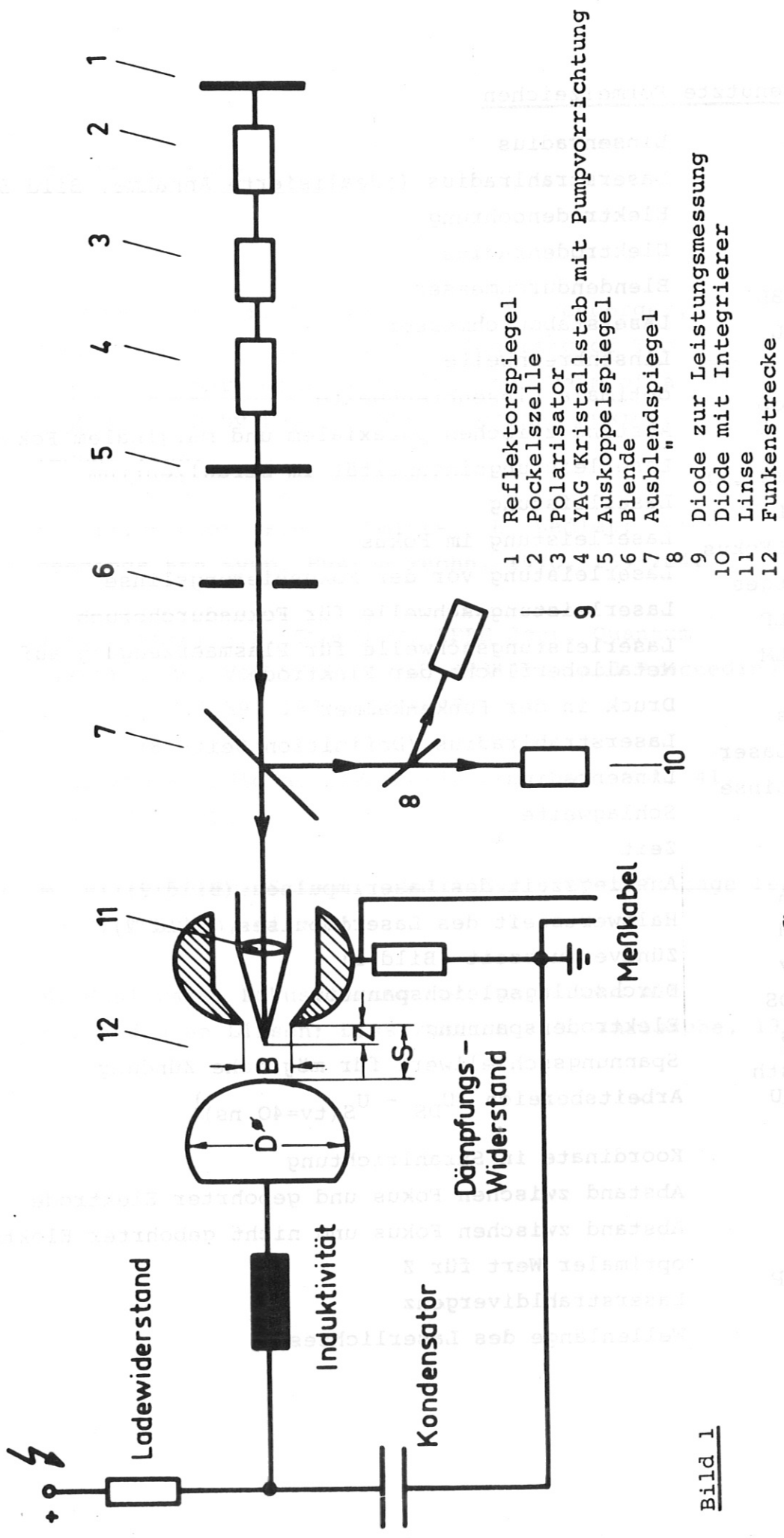


Bild 1

Schaltkreis mit Funkenstrecke und Laseraufbau



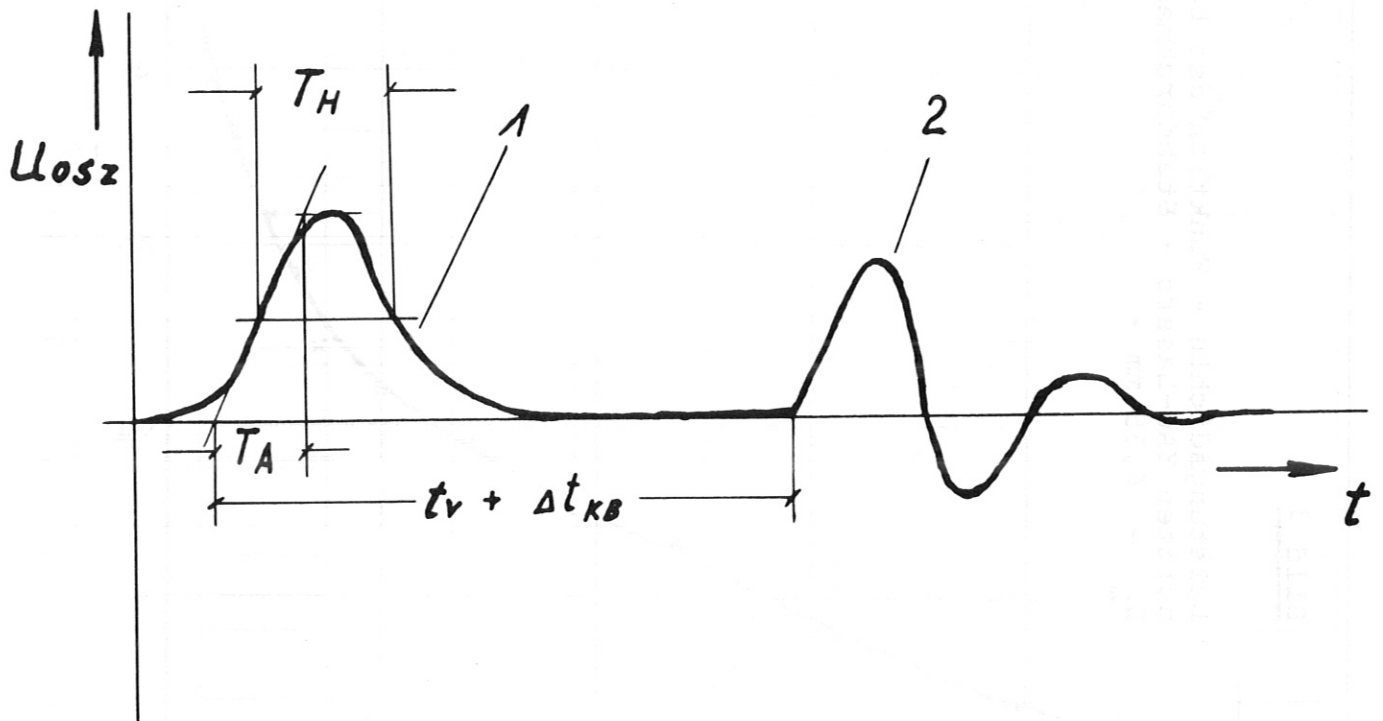


Bild 2

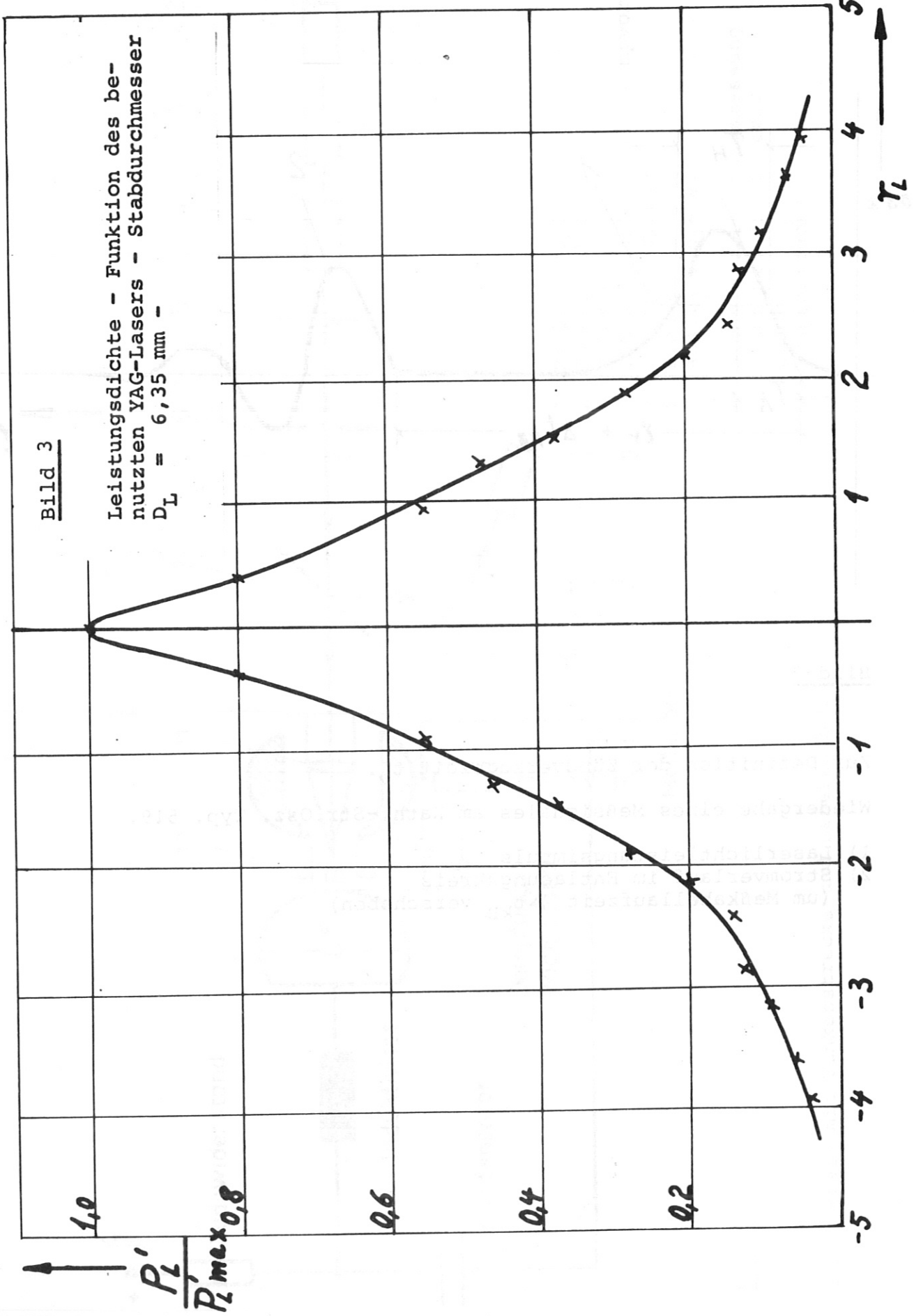
Zur Definition der Zündverzugszeit  $t_v$ .

Wiedergabe eines Meßsignales am Kath.-Str.Osz. Typ. 519.

- 1) Laserlichtleistungsimpuls
- 2) Stromverlauf im Entladungskreis  
(um Meßkabellaufzeit  $\Delta t_{kB}$  verschoben)

Bild 3

Leistungsdichte - Funktion des benutzten YAG-Lasers - Stabdurchmesser  $D_L = 6,35 \text{ mm}$



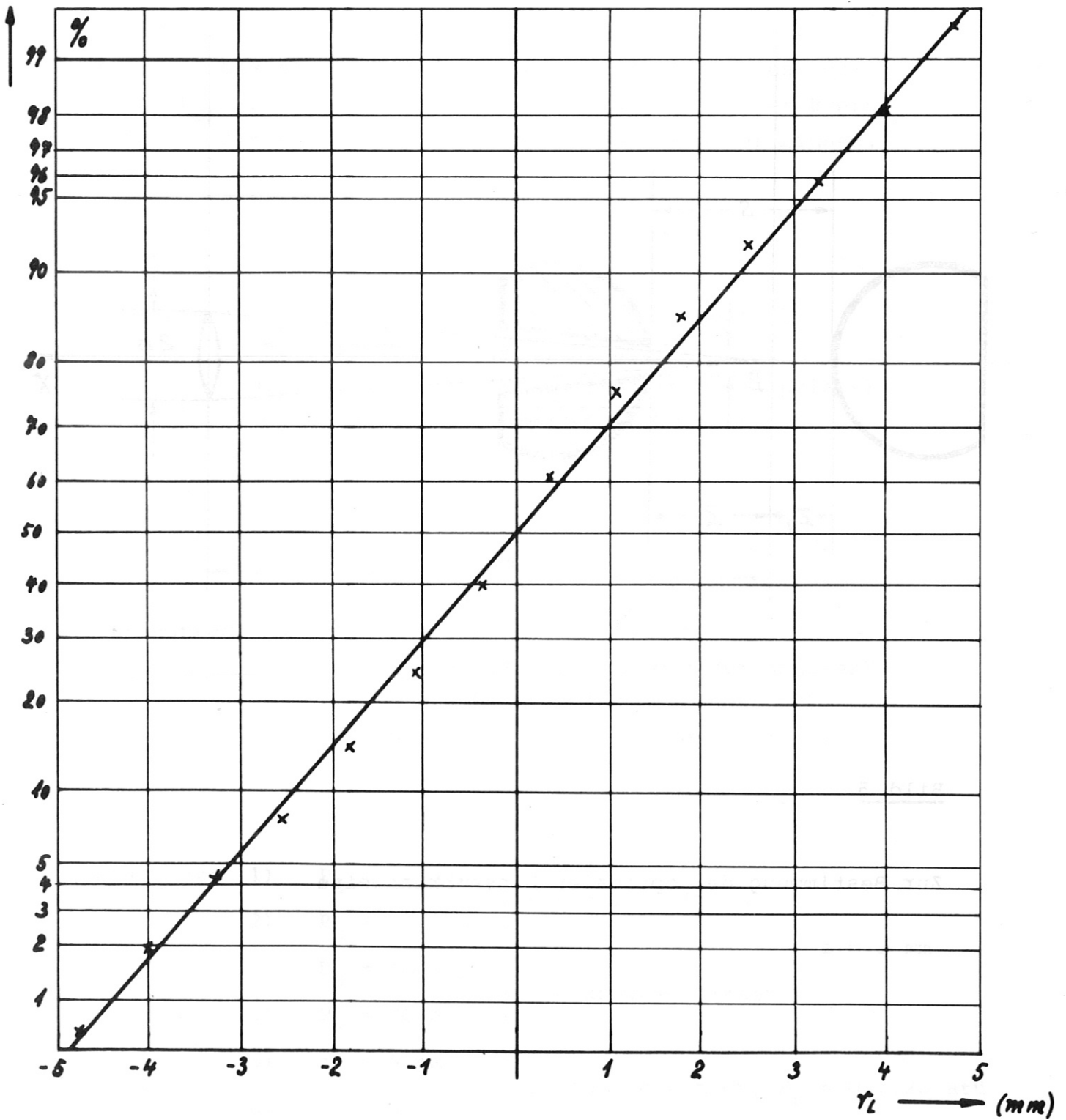


Bild 4

Leistungsdichte - Verteilungs-Funktion des benutzten YAG-Lasers.  
 - Stabdurchmesser  $D_L = 6,35 \text{ mm}$  -

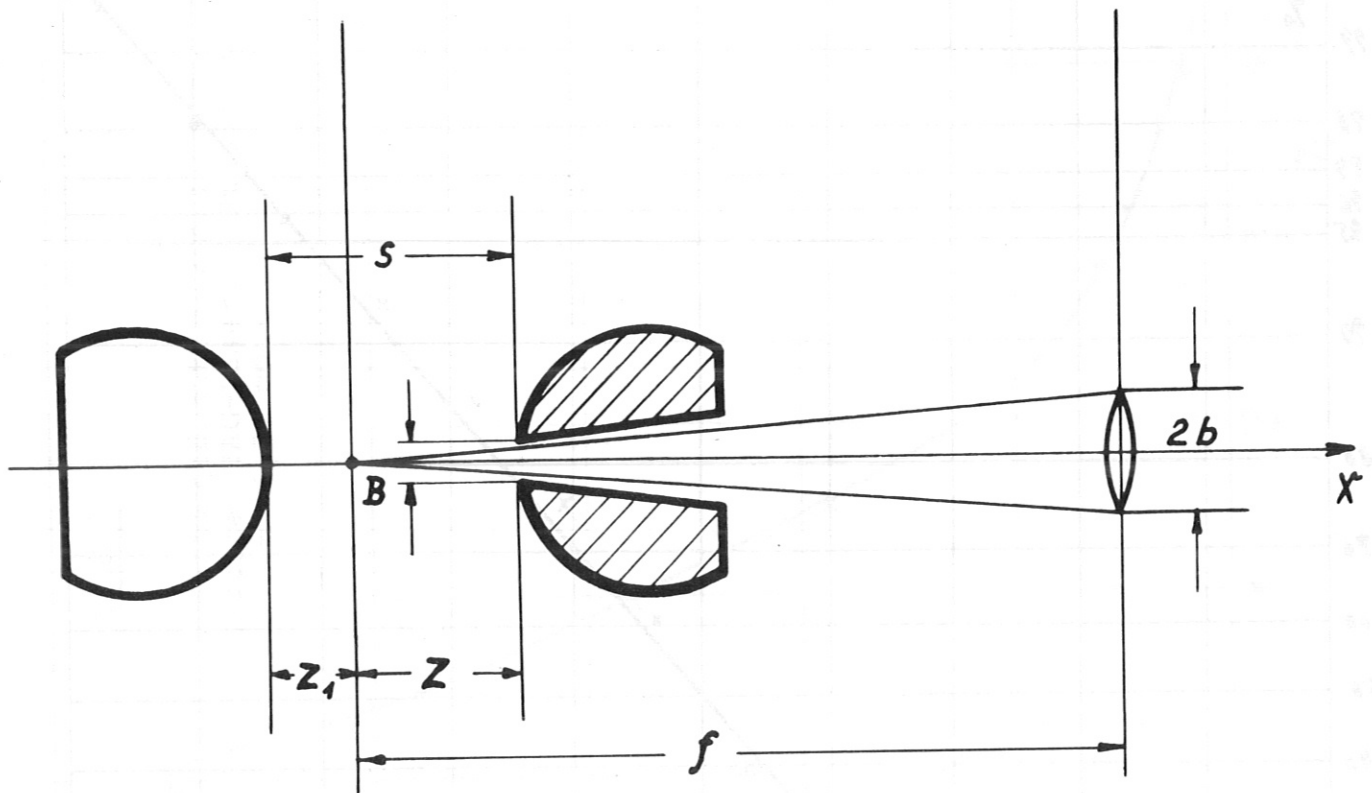


Bild 5

Zur Bestimmung der optimalen Linsenbrennweite

## Bild 6

Leistungsschwellwerte für Fokusdurchbruch in Argon  $P_{LF}$   
(Kurven 1 bis 4) und Plasmaerzeugung auf Elektrodenober-  
fläche  $P_{LM}$  (Kurven 5 und 6) in Abhängigkeit von der Brenn-  
weite  $f$  bikonvexer und plankonvexer sphärischer Linsen.

Laserdaten:  $D_L = 6,5 \text{ mm } \varnothing$ . (Laserstabdurchmesser)  
 $\lambda = 10600 \text{ \AA}$  (Wellenlänge)  
 $T_H = 11 \text{ ns}$  (Halbwertszeit des Impulses)  
 $D_{Bl} = \infty$  (Blendendurchmesser)

Funkenstreckendaten:  $s = 6 \text{ mm}$  (Schlagweite)  
 $D = 60 \text{ mm } \varnothing$  (Elektrorendurchmesser)  
 $B = 2 \text{ mm}$  (Elektrodenbohrung)  
 $u_s = 0$  (Elektrodenspannung)

Parameter: 1)  $P_s = 10 \text{ atü}$  )  
                  ) bikonvexe Linsen )  
2)  $P_s = 20 \text{ atü}$  )  
  )  $z = 3 \text{ mm}$   
3)  $P_s = 10 \text{ atü}$  )  
                  ) plankonvexe Linsen )  
4)  $P_s = 20 \text{ atü}$  )  
5)  $z = 6 \text{ mm}$  )  
                  ) bikonvexe Linsen;  $P_s = 0 \dots 20 \text{ atü}$   
6)  $z = 3 \text{ mm}$  )

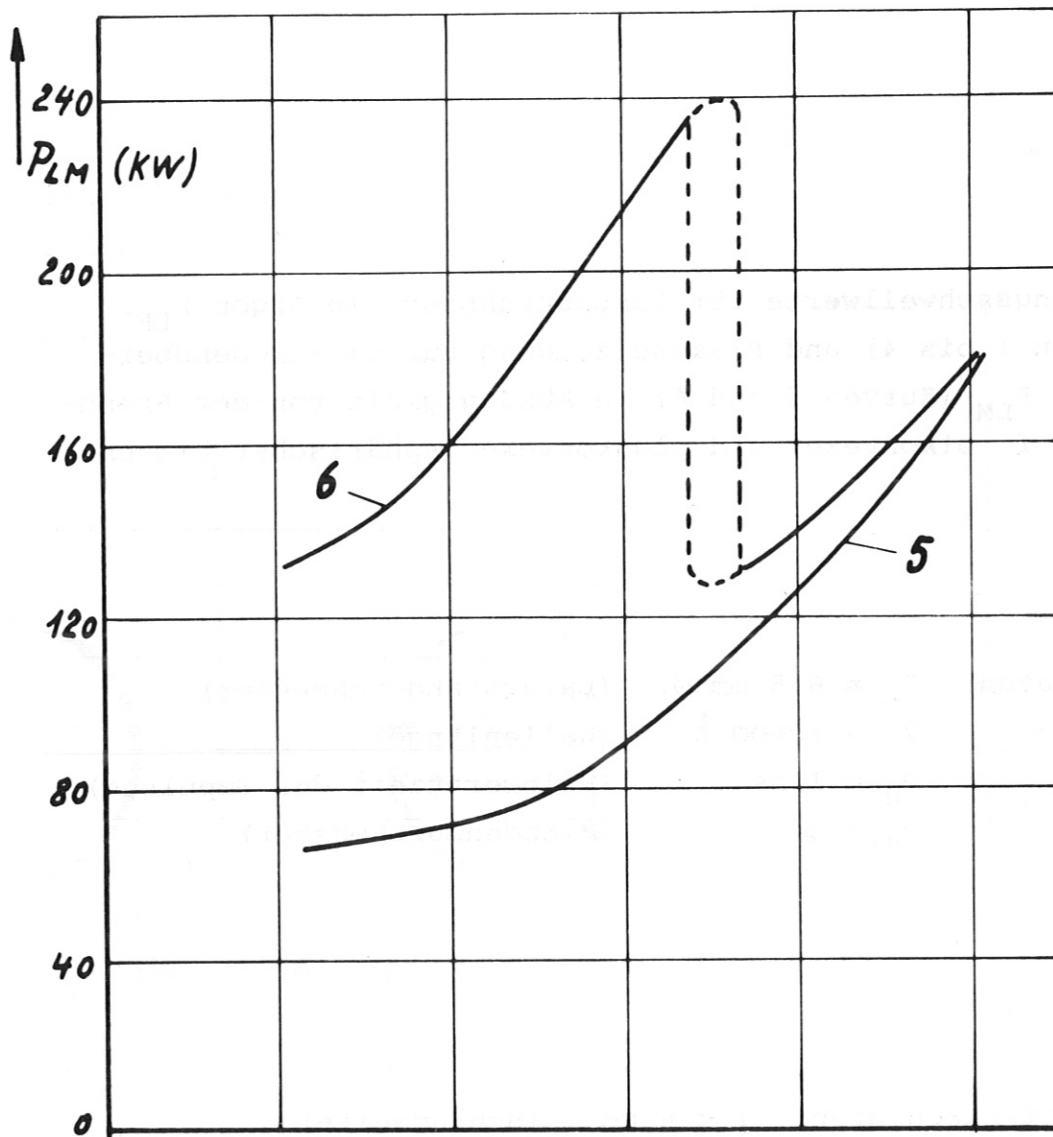
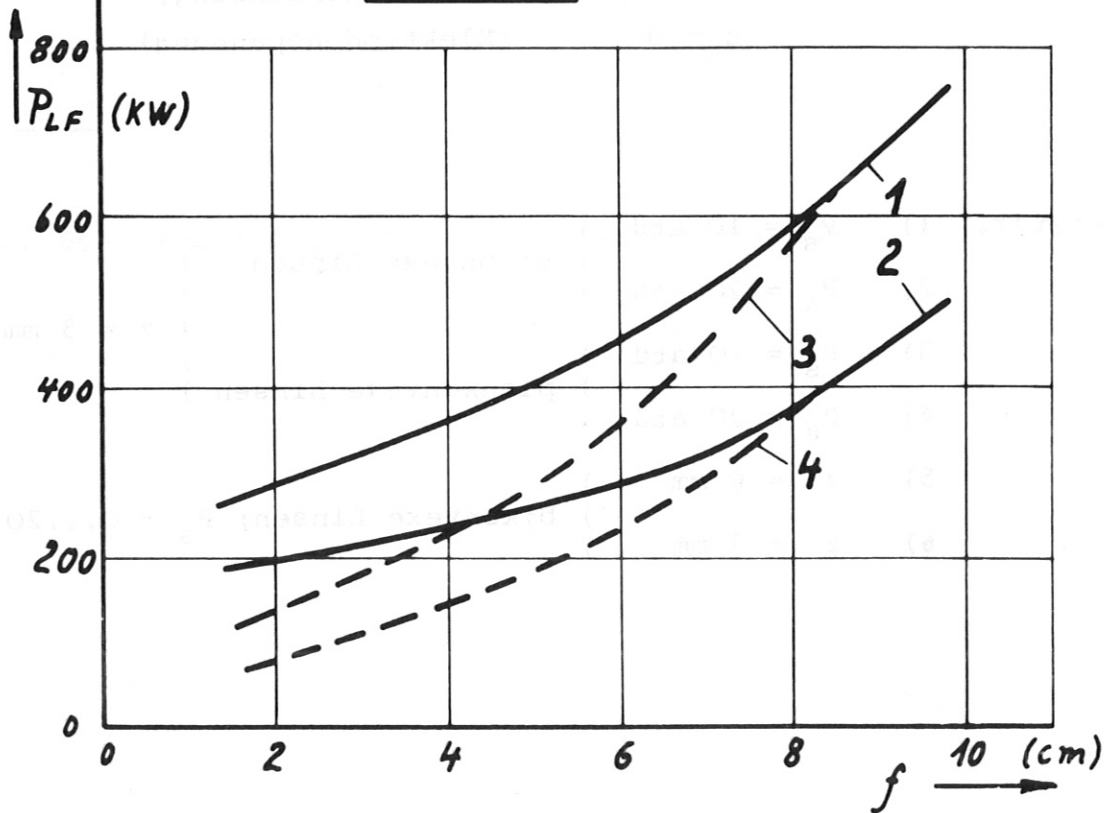


Bild 6



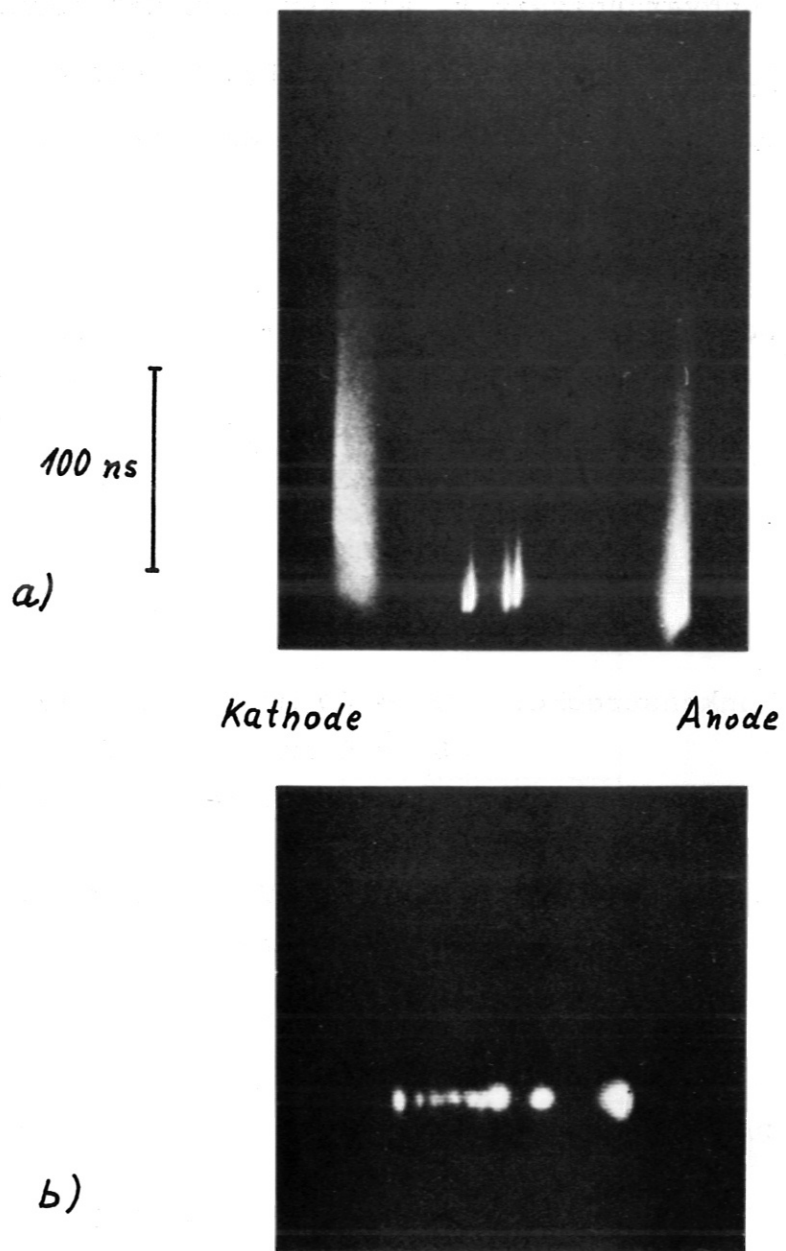


Bild 7

Lasererzeugter Gasdurchbruch zwischen zwei Elektroden in Argon.

Elektroden­spannung:  $U_S = 0$

Lin­sen­brennweite:  $f = 8,6 \text{ cm}$  (bikonvex)

Laserlicht­frequenz:  $\lambda = 10600 \text{ \AA}$

Laser­stab­st­arke:  $D_L = 6,5 \text{ mm } \varnothing$

Divergenz:  $\theta = 2 \text{ mr}$

Laser­leistung:  $P_L = 600 \text{ KW}$

a) Bild­wand­ler­auf­nah­me

b) Zeit­int­eg­rierte Kamera­auf­nah­me

## Bild 8

Zündverzugszeit  $t_v$  als Funktion der normierten Spannung  $U_s/U_{DS}$  bei verschiedenen Laserlichtleistungen  $P_L$  und Brennweiten bikonvexer, sphärischer Linsen  $f$ .

Laser:  $D_L = 6,5 \text{ mm}$  (Stabdurchmesser)  
 $\vartheta = 2 \text{ mr}$  (Divergenz)  
 $\lambda = 1,06 \text{ } \mu\text{m}$  (Wellenlänge)  
 $D_{BL} = \infty$  (Blende)

Funkenstrecke:  $D = 60 \text{ mm } \varnothing$  (Elektrodendurchmesser)  
 $S = 6 \text{ mm}$  (Schlagweite)  
 $z \rightarrow$  optimale Einstellung (Bild 9)  
 $B = 1 \text{ mm}$  (Elektrodenbohrung)  
 $U_{DS} = 52 \text{ kV}$  (Durchschlagsgleichspannung)  
 $P_s = 20 \text{ atü}$  (Argondruck)

Parameter:

1 )		$f = 8,6 \text{ cm}$
2 )	) $\frac{P_L}{P_{LF}} = 1,3$	$f = 5,5 \text{ cm}$
3 )		$f = 3,3 \text{ cm}$
4 )		$f = 2,7 \text{ cm}$
5 )		$f = 8,6 \text{ cm}$
6 )	) $\frac{P_L}{P_{LF}} = 10$	$f = 5,5 \text{ cm}$
7 )		$f = 3,3 \text{ cm}$
8 )		$f = 2,7 \text{ cm}$
9 )		$f = 8,6 \text{ cm}$
10 )	) $\frac{P_L}{P_{LF}} = 0,36$	$f = 5,5 \text{ cm}$
11 )		$f = 3,3 \text{ cm}$
12 )		$f = 2,7 \text{ cm}$



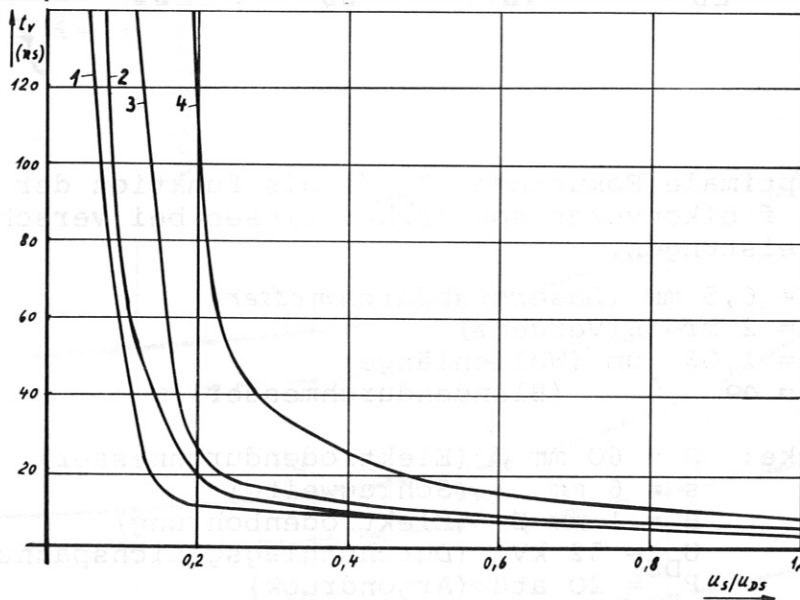
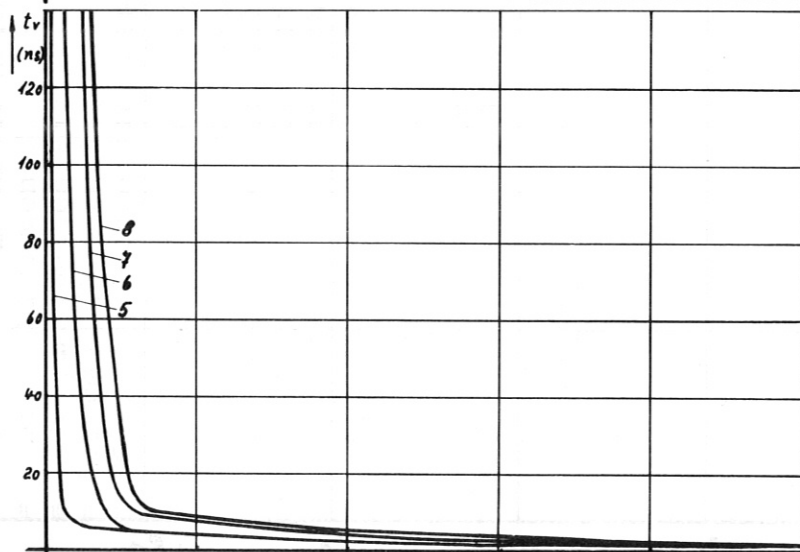
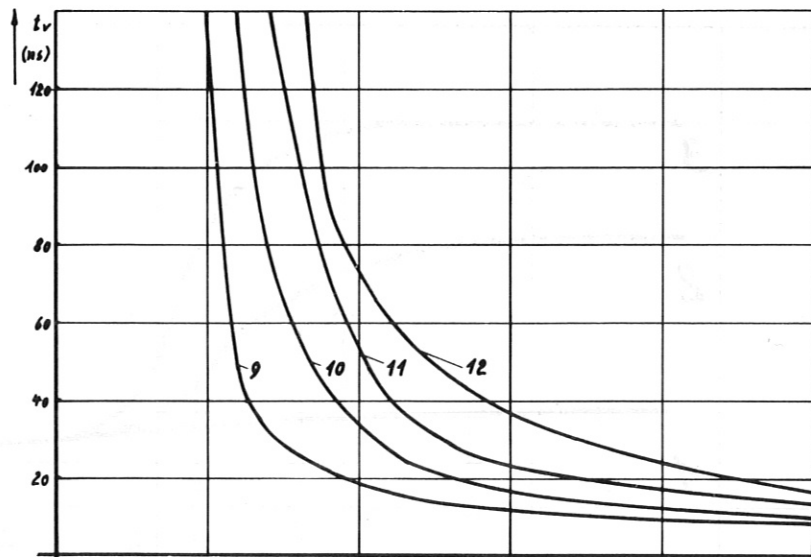


Bild 8

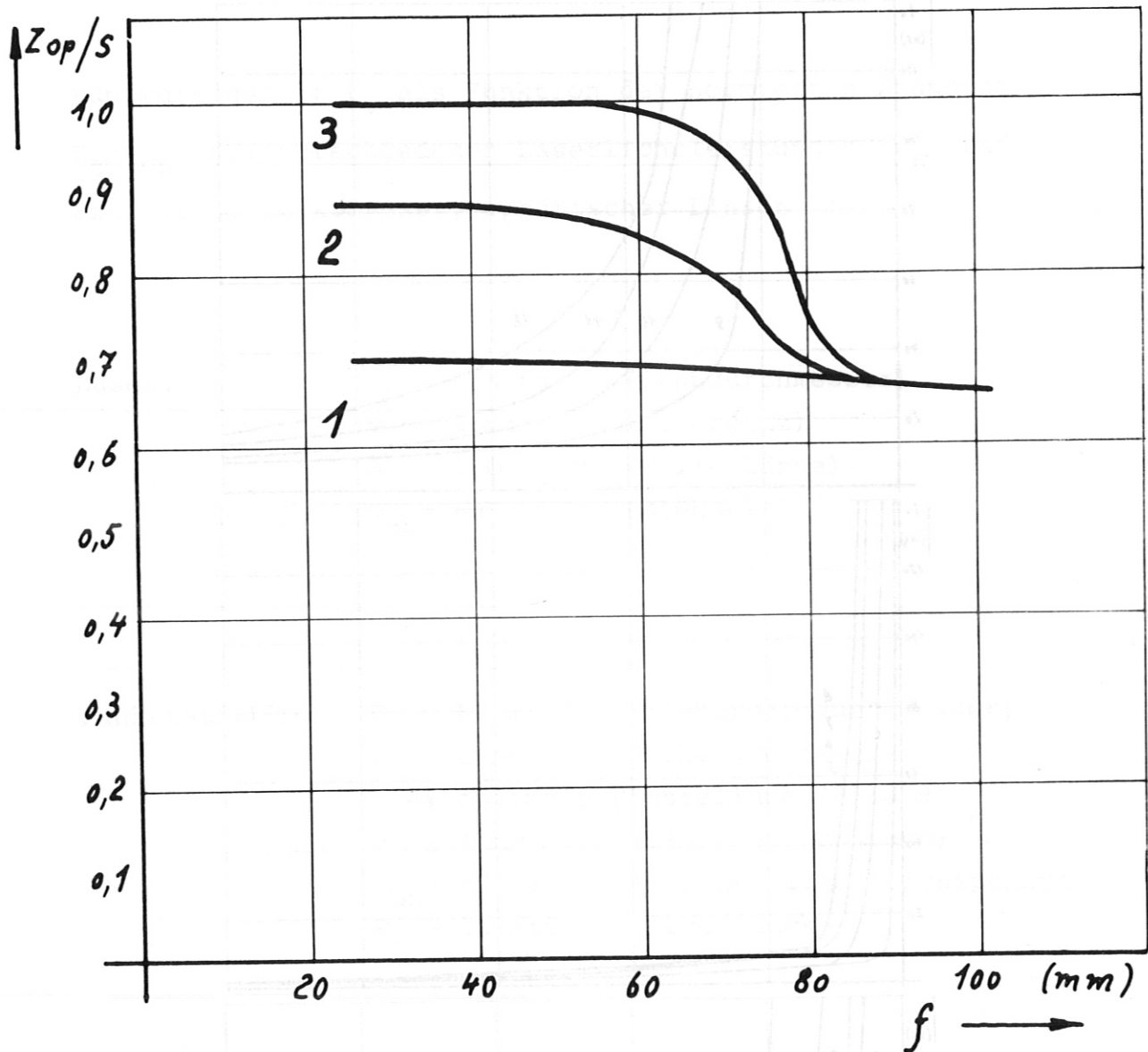


Bild 9

Normierte optimale Fokusslage  $Z_{op}/s$  als Funktion der Linsenbrennweite  $f$  bikonvexer spärlicher Linsen bei verschiedenen Laserlichtleistungen.

Laser:  $D_L = 6,5$  mm (Laserstabdurchmesser)  
 $\theta^L = 2$  mr (Divergenz)  
 $\lambda = 1,06$   $\mu$ m (Wellenlänge)  
 $D_{BL} = \infty$  (Blendendurchmesser)

Funkenstrecke:  $D = 60$  mm  $\varnothing$  (Elektroden Durchmesser)  
 $s = 6$  mm (Schlagweite)  
 $B = 1$  mm  $\varnothing$  (Elektrodenbohrung)  
 $U_{DS} = 52$  kV (Durchschlagsgleichspannung)  
 $P_s = 20$  atü (Argondruck)

Parameter:

- 1)  $P_L = 4,5$  MW
- 2)  $P_L = 250$  KW
- 3)  $P_L = 50$  KW

Bild 10

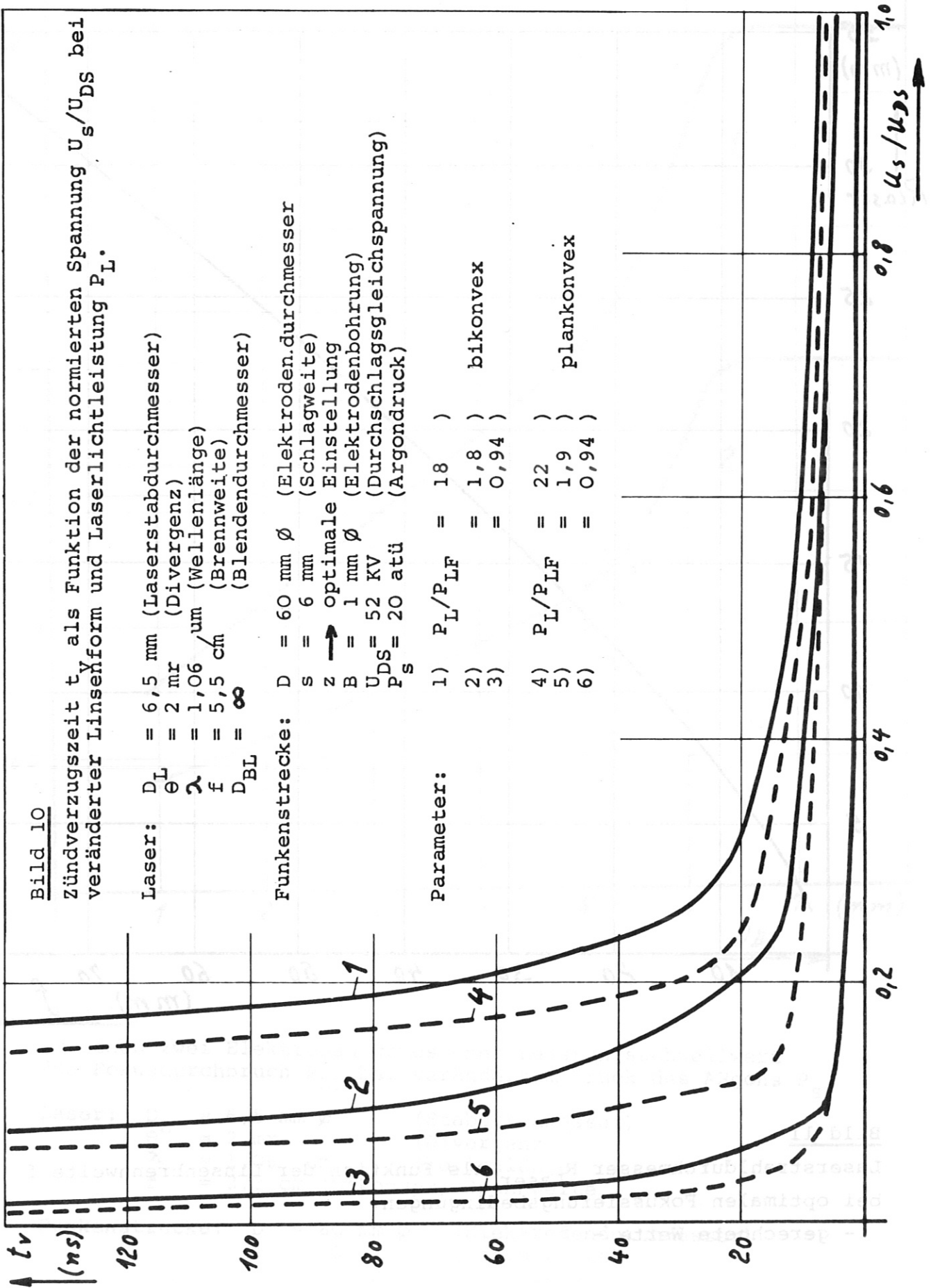
Zündverzugszeit  $t_v$  als Funktion der normierten Spannung  $U_s/U_{DS}$  bei veränderter Linseform und Laserlichtleistung  $P_L$ .

Laser:  $D_L = 6,5$  mm (Laserstabdurchmesser)  
 $\theta_L = 2$  mr (Divergenz)  
 $\lambda = 1,06$   $\mu$ m (Wellenlänge)  
 $f = 5,5$  cm (Brennweite)  
 $D_{BL} = \infty$  (Blendendurchmesser)

Funkenstrecke:  $D = 60$  mm  $\varnothing$  (Elektroden.durchmesser)  
 $s = 6$  mm (Schlagweite)  
 $z \rightarrow$  optimale Einstellung  
 $B = 1$  mm  $\varnothing$  (Elektrodenbohrung)  
 $U_{DS} = 52$  KV (Durchschlaggleichspannung)  
 $P_S = 20$  atü (Argondruck)

Parameter:

1) $P_L/P_{LF} = 18$ )	
2) $= 1,8$ )	bikonvex
3) $= 0,94$ )	
4) $P_L/P_{LF} = 22$ )	
5) $= 1,9$ )	plankonvex
6) $= 0,94$ )	



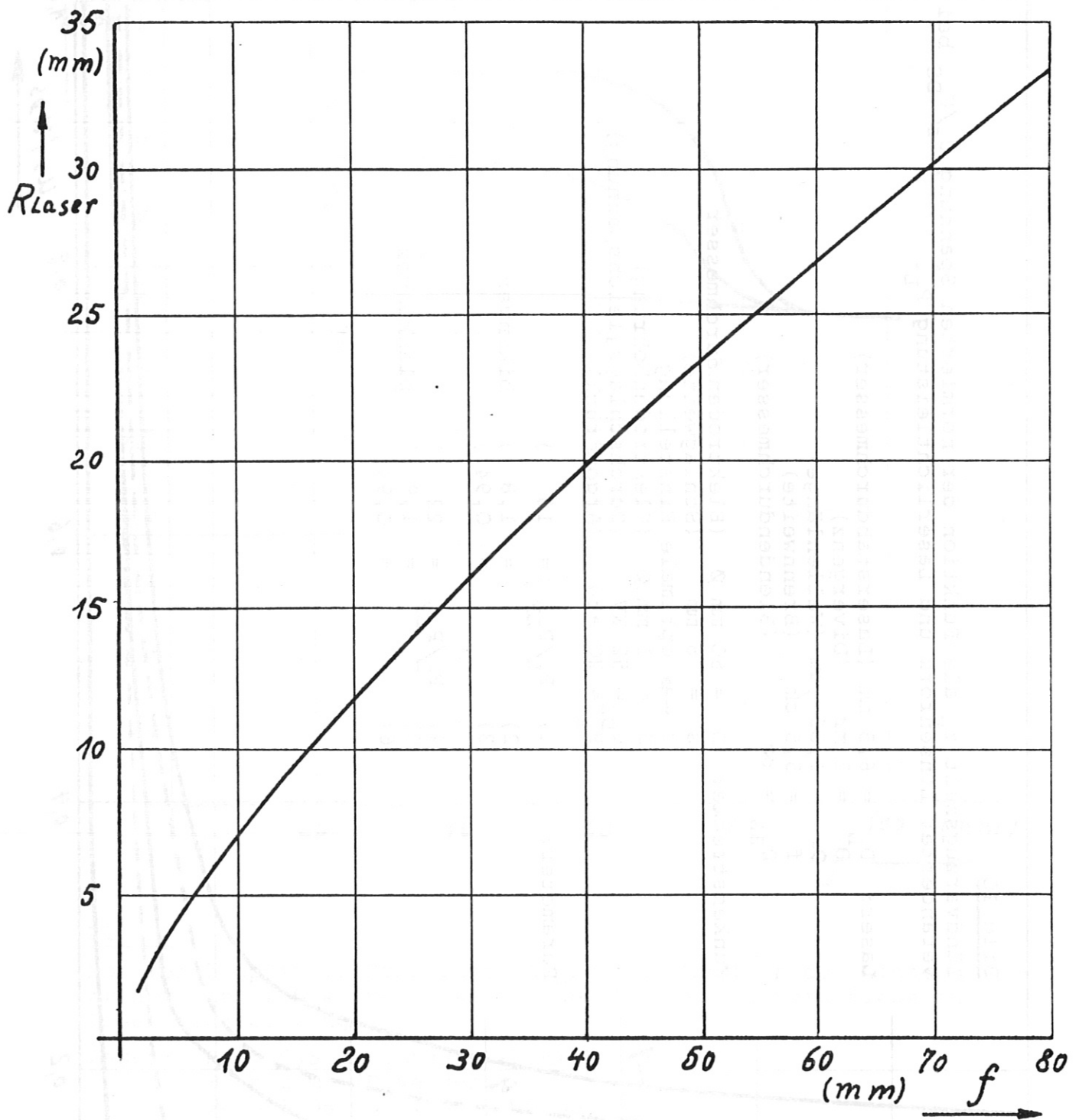


Bild 11

Laserstrahldurchmesser  $R_{\text{Laser}}$  als Funktion der Linsenbrennweite  $f$  bei optimalen Fokussierungsbedingungen.

- gerechnete Werte -

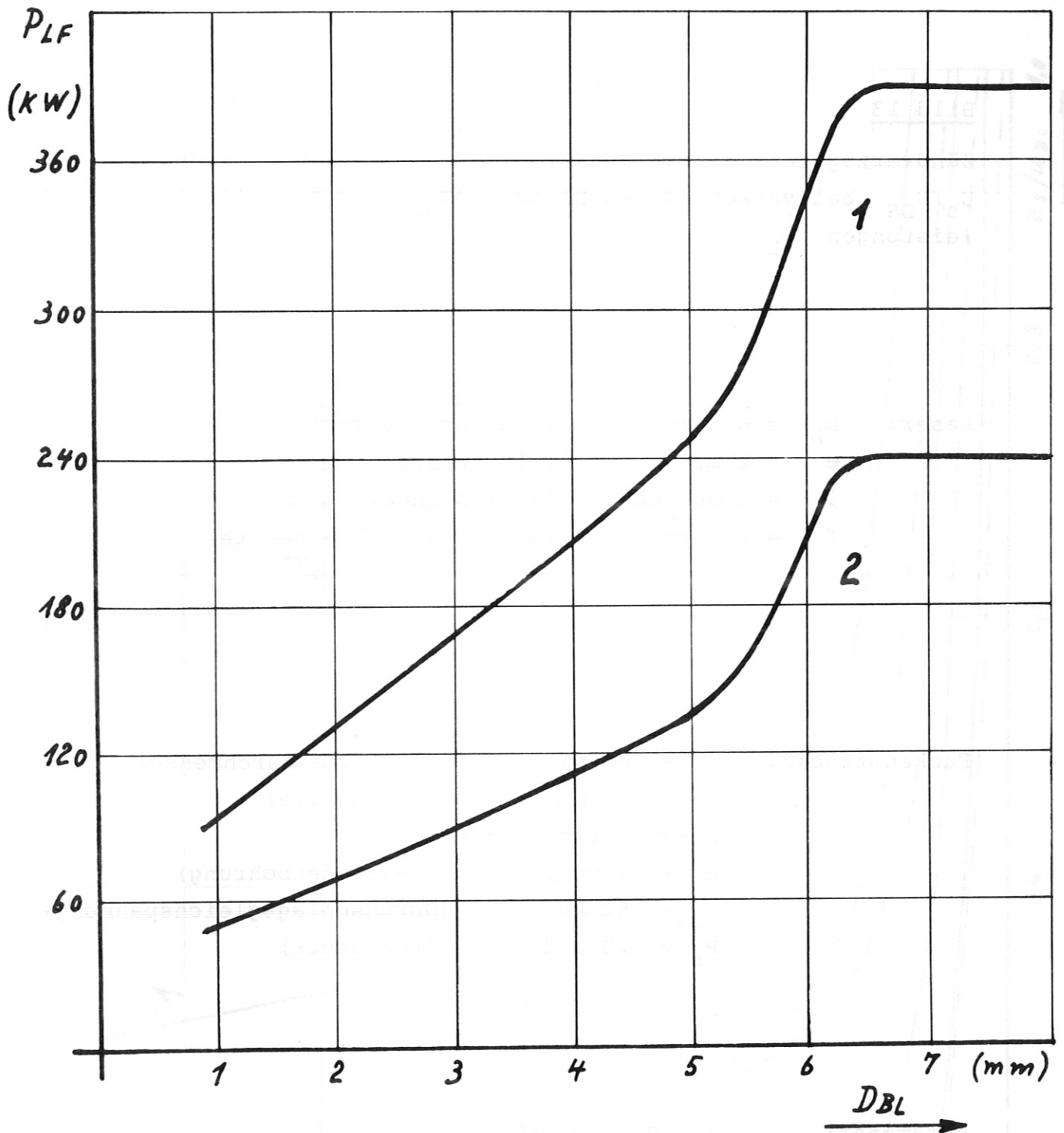


Bild 12

Zwischen zwei Elektroden gemessener Leistungsschwellwert für Fokusburchbruch  $P_{LF}$  bei verändertem Druck des ARGONS  $P_S$ .

Laser:  $D_L = 6,5 \text{ mm } \varnothing$  (Stabdurchmesser)  
 $\theta_L = 2 \text{ mr}$  (Divergenz)  
 $\lambda = 1,06 \text{ } \mu\text{m}$  (Wellenlänge)  
 $f = 3,3 \text{ cm}$  (bikonvex) Brennweite

Funkenstrecke:  $D = 60 \text{ mm } \varnothing$  (Elektroden Durchmesser)  
 $s = 6 \text{ mm}$  (Schlagweite)  
 $z = 3 \text{ mm}$  (Fokuslage)  
 $B = 2 \text{ mm } \varnothing$  (Elektrodenbohrung)  
 $U_S = 0$  (Elektrodenspannung)

Parameter: 1)  $P_S = 6 \text{ atü}$  )  
 2)  $P_S = 20 \text{ atü}$  ) Argon

Bild 13

Zündverzugszeit  $t_v$  als Funktion der normierten Spannung  $U_s/U_{DS}$  bei verschiedenen Blenden  $D_{BL}$  und Laserlichtleistungen  $P_L$ .

Laser:  $D_L = 6,5 \text{ mm}$  (Stabdurchmesser)  
 $\theta = 2 \text{ mr}$  (Divergenz)  
 $\lambda = 1,06 \text{ } \mu\text{m}$  (Wellenlänge)  
 $f = 3,3 \text{ cm}$  (bikonvex) (Brennweite)

Funkenstrecke:  $D = 60 \text{ mm } \varnothing$  (Elektroden Durchmesser)  
 $s = 6 \text{ mm}$  (Schlagweite)  
 $z \rightarrow$  optimale Einstellung  
 $B = 1 \text{ mm } \varnothing$  (Elektrodenbohrung)  
 $U_{DS} = 52 \text{ kV}$  (Durchschlagsgleichspannung)  
 $P_s = 20 \text{ atü}$  (Argondruck)

Parameter:

- 1)  $D_{BL} = \infty$  )
- 2)  $D_{BL} = 3 \text{ mm}$  )  $P_L = 75 \text{ kW}$
- 3)  $D_{BL} = \infty$  )
- 4)  $D_{BL} = 3 \text{ mm}$  )  $P_L = 260 \text{ kW}$
- 5)  $D_{BL} = \infty$  )
- 6)  $D_{BL} = 3 \text{ mm}$  )  $P_L = 1,1 \text{ MW}$

Bild 13

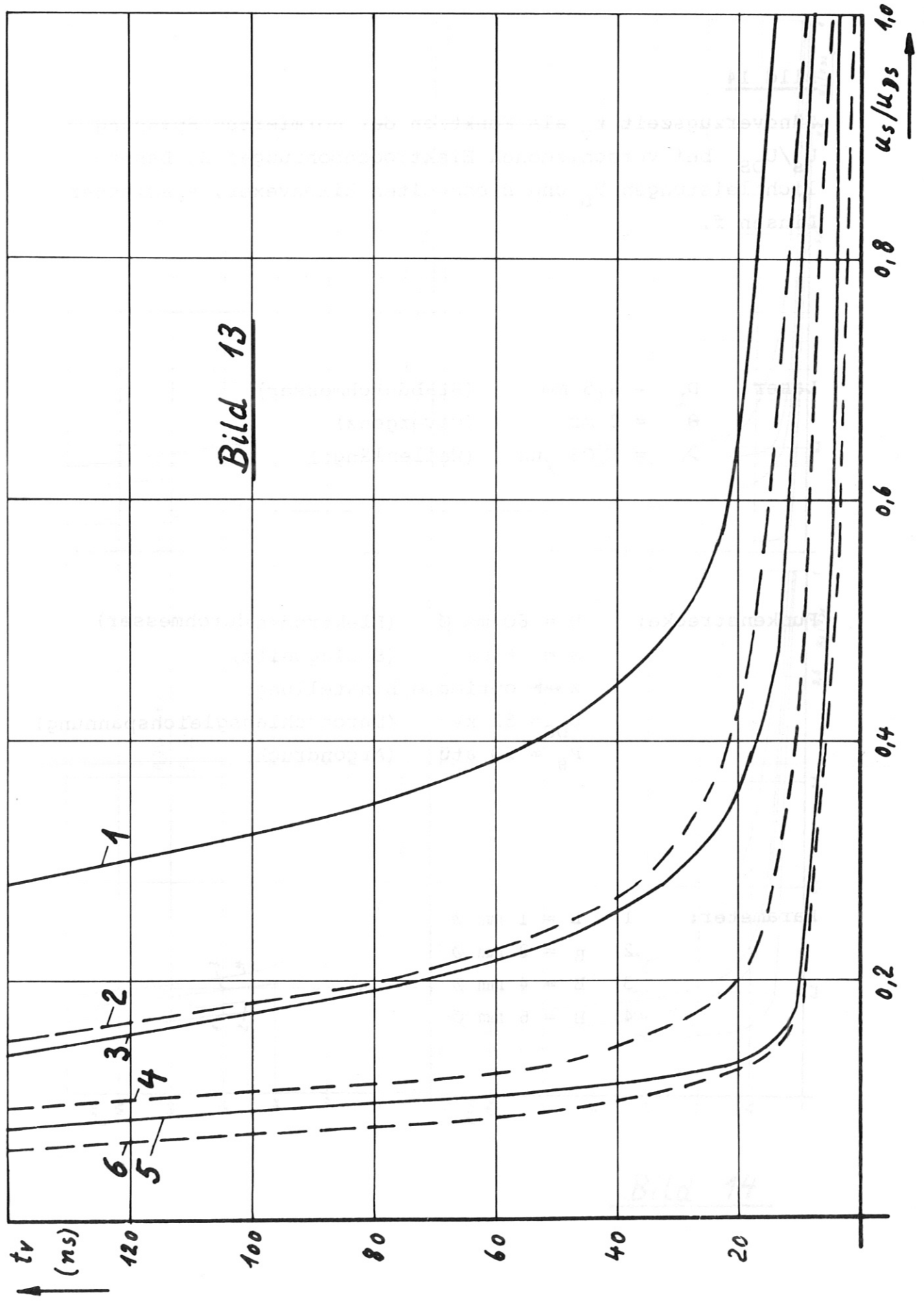


Bild 14

Zündverzugszeit  $t_v$  als Funktion der normierten Spannung  $U_s/U_{DS}$  bei verschiedenen Elektrodenbohrungen  $B$ , Laserlichtleistungen  $P_L$  und Brennweiten bikonvexer, spärischer Linsen  $f$ .

Laser:  $D_L = 6,5 \text{ mm}$  (Stabdurchmesser)  
 $\theta = 2 \text{ mr}$  (Divergenz)  
 $\lambda = 1,06 \text{ } \mu\text{m}$  (Wellenlänge)

Funkenstrecke:  $D = 60 \text{ mm } \varnothing$  (Elektroden.durchmesser)  
 $s = 6 \text{ mm}$  (Schlagweite)  
 $z \rightarrow$  optimale Einstellung)  
 $U_{DS} = 52 \text{ kV}$  (Durchschlagsgleichspannung)  
 $P_s = 20 \text{ atü}$  (Argondruck)

Parameter: 1)  $B = 1 \text{ mm } \varnothing$   
2)  $B = 2 \text{ mm } \varnothing$   
3)  $B = 4 \text{ mm } \varnothing$   
4)  $B = 6 \text{ mm } \varnothing$



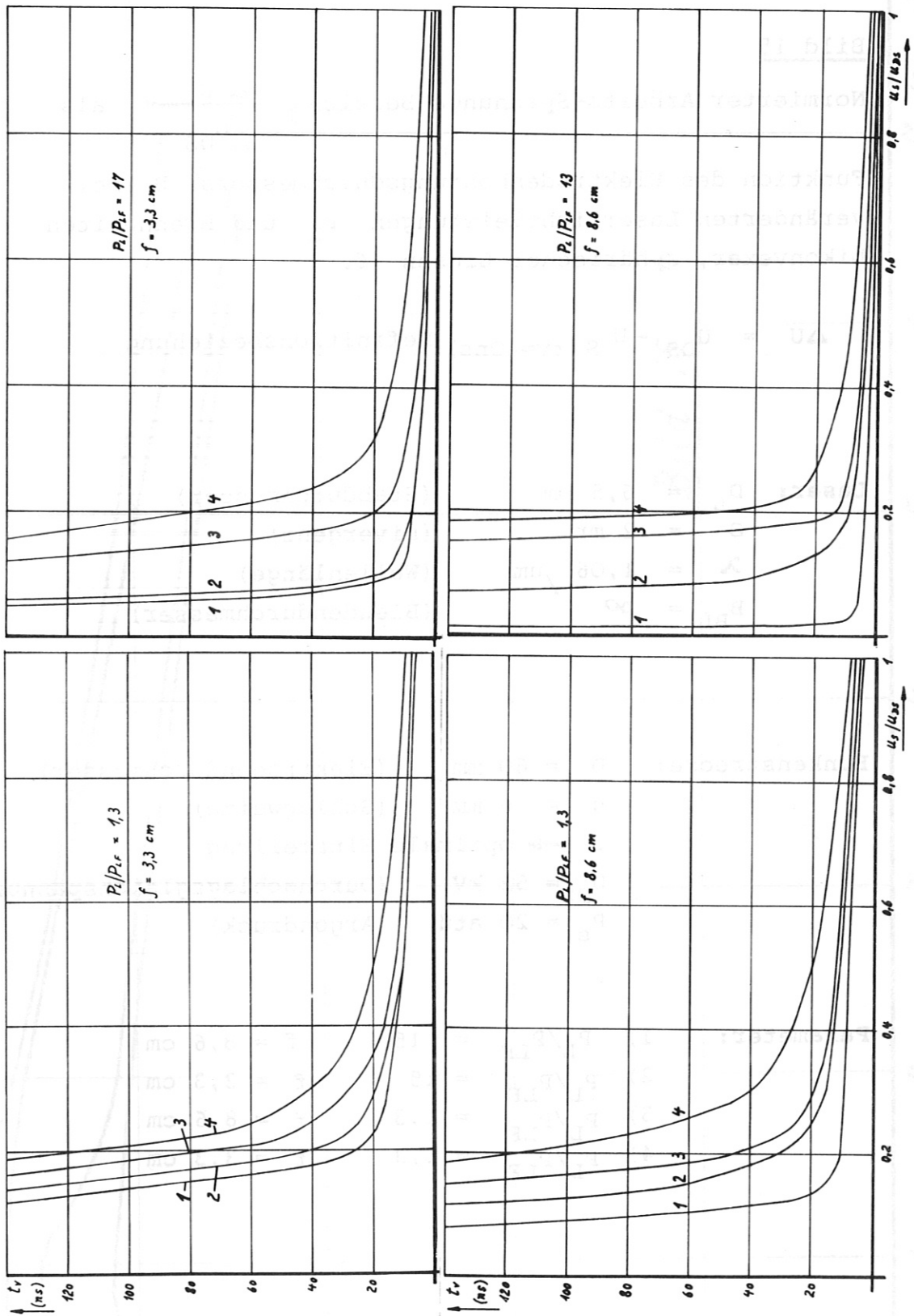


Bild 14

Bild 15

Normierter Arbeits-Spannungs-Bereich  $\frac{\Delta U}{U_{DS}}$  als

Funktion des Elektrodenbohrungsdurchmessers  $B$  bei veränderten Laserlichtleistungen  $P_L$  und Brennweiten bikonvexer, sphärischer Linsen  $f$ .

$$\Delta U = U_{DS} - U_S (tv=40ns) \quad \text{Definitionsbeziehung}$$

Laser:  $D_L = 6,5 \text{ mm}$  (Stabdurchmesser)  
 $\theta = 2 \text{ mr}$  (Divergenz)  
 $\lambda = 1,06 \text{ } \mu\text{m}$  (Wellenlänge)  
 $B_{BL} = \infty$  (Blendendurchmesser)

Funkenstrecke:  $D = 60 \text{ mm}$  (Elektroden Durchmesser)  
 $s = 6 \text{ mm}$  (Schlagweite)  
 $z \rightarrow$  optimale Einstellung  
 $U_{DS} = 52 \text{ kV}$  (Durchschlagsgleichspannung)  
 $P_s = 20 \text{ atü}$  (Argondruck)

Parameter:

1)	$P_L/P_{LF} = 15$	$f = 8,6 \text{ cm}$
2)	$P_L/P_{LF} = 15$	$f = 3,3 \text{ cm}$
3)	$P_L/P_{LF} = 1,3$	$f = 8,6 \text{ cm}$
4)	$P_L/P_{LF} = 1,3$	$f = 3,3 \text{ cm}$

Bild 15

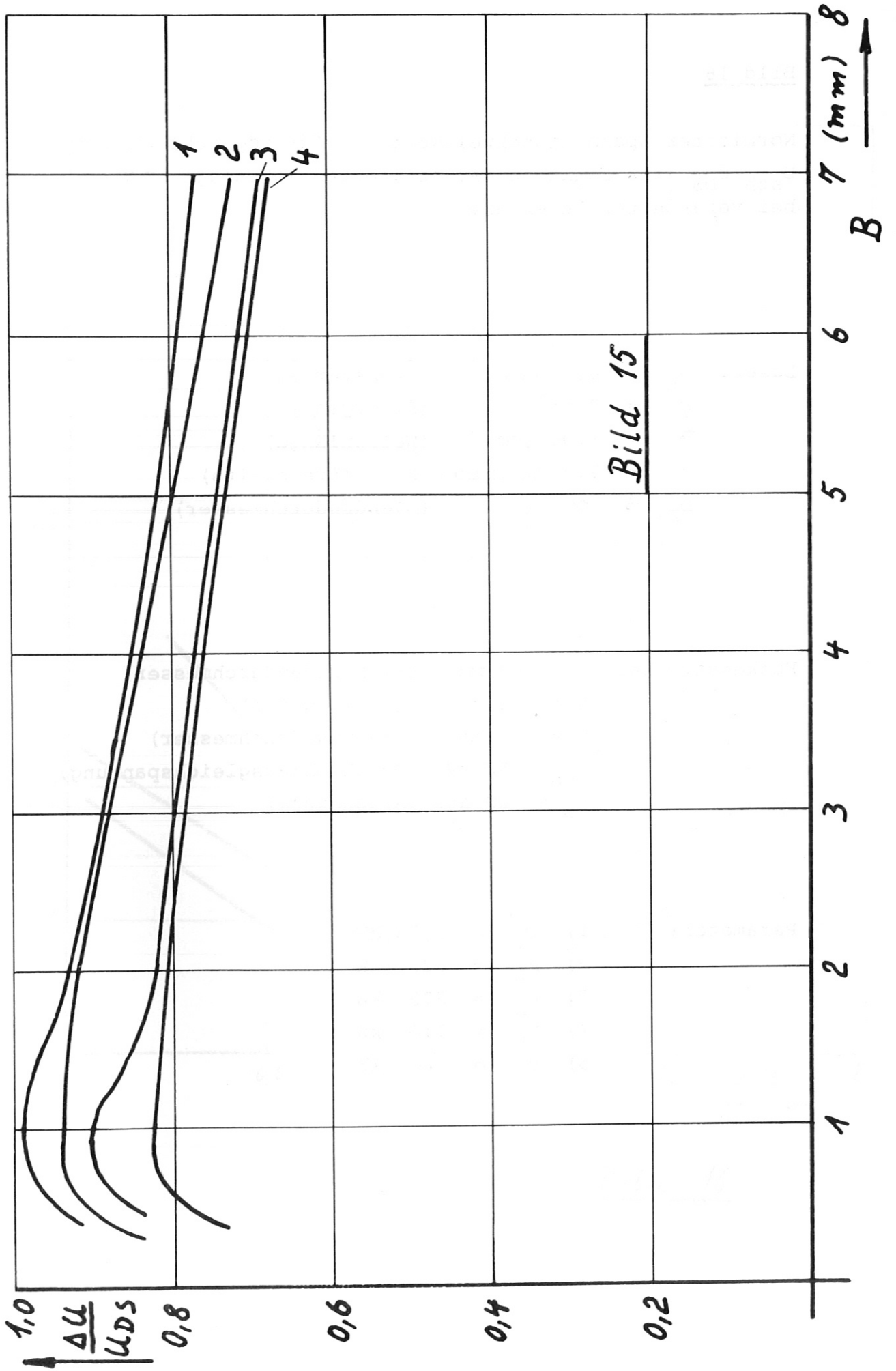


Bild 15

Bild 16

Normierter Spannungsschwellwert für mögliche Zündung  
 $U_{sth}/U_{DS}$  als Funktion der normierten Fokuslage  $Z/S$   
bei veränderter Laserleistung

Laser:  $D_L = 6,5 \text{ mm } \varnothing$  (Stabstärke)  
 $\theta = 2 \text{ mr}$  (Divergenz)  
 $\lambda = 1,06 \text{ } \mu\text{m}$  (Wellenlänge)  
 $f = 3,3 \text{ cm (bikonvex)}$  (Brennweite)  
 $D_{Bl} = \infty$  (Blendendurchmesser)

Funkenstrecke:  $D = 60 \text{ mm}$  (Elektrodendurchmesser)  
 $s = 6 \text{ mm}$  (Schlagweite)  
 $B = 1 \text{ mm}$  (Bohrungsdurchmesser)  
 $U_{DS} = 52 \text{ kV}$  (Durchschlagsgleichspannung)  
 $P_s = 20 \text{ atü}$  (Argondruck)

Parameter:

- 1)  $P_L = 2,73 \text{ MW}$
- 2)  $P_L = 625 \text{ kW}$
- 3)  $P_L = 225 \text{ kW}$
- 4)  $P_L = 110 \text{ kW}$
- 5)  $P_L = 60 \text{ kW}$

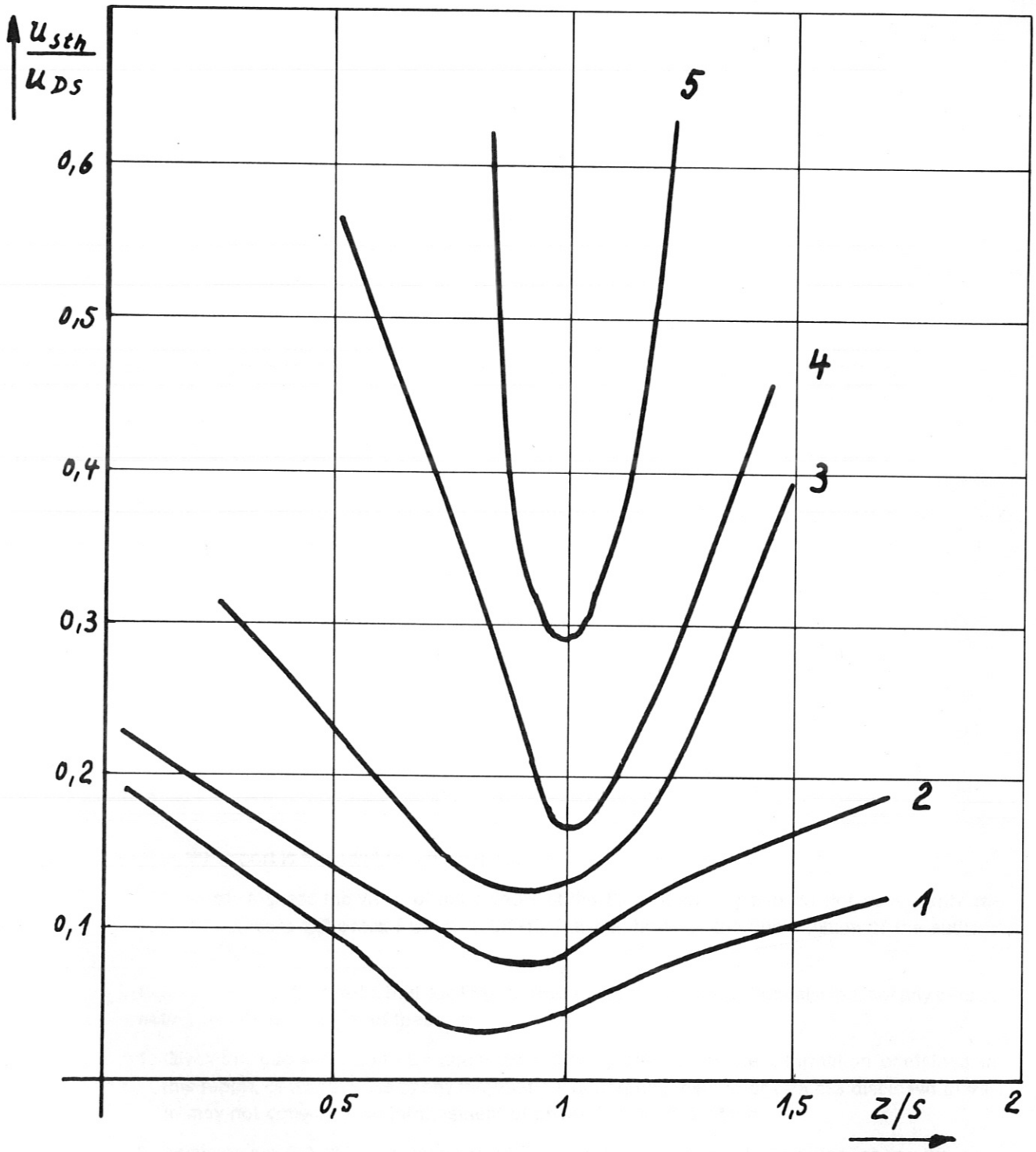


Bild 16