

**Zeitschrift:** Schweizerische Bauzeitung  
**Herausgeber:** Verlags-AG der akademischen technischen Vereine  
**Band:** 87 (1969)  
**Heft:** 27

**Artikel:** Stand der elektroerosiven Bearbeitung, insbesondere der Funkenerosion: Vortrag  
**Autor:** Hermann, Ferdy  
**DOI:** <https://doi.org/10.5169/seals-70731>

### **Nutzungsbedingungen**

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. 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. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

### **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. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

### **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. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

**Download PDF:** 09.02.2026

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

## Stand der elektroerosiven Bearbeitung, insbesondere der Funkenerosion

DK 621.9.048.4

Von **Ferdy Hermann**, Ing., Luzern.

Vortrag, gehalten in der Vereinigung Schweizerischer Betriebsingenieure in Zürich am 18. September 1968

### Einleitung

Bei den elektroerosiven Bearbeitungsverfahren können allgemein drei Hauptgruppen unterschieden werden:

#### 1. Elektronenstrahlbohren

Es ist dies ein Verfahren, welches die darin gesetzten Erwartungen nicht erfüllt hat. Seine praktische Bedeutung beschränkt sich auf das Elektronenstrahlschweißen. Bei Aufgaben, welche eine Materialabtragung einschliessen, wurde es durch den Laserstrahl verdrängt. In diesem Zusammenhang ist zu erwähnen, dass das Bohren mittels Laserstrahl *nicht* zu den elektroerosiven Verfahren gehört.

#### 2. Elektrochemische Bearbeitung

Die elektrochemische Bearbeitung hat in kurzer Zeit an Bedeutung gewonnen, tritt aber gegenüber der Funkenerosion kaum in Konkurrenz.

Obwohl die erheblichen, mit diesem Verfahren erzielbaren Abtragsleistungen und ein auf Null verminderter Elektrodenverschleiss einen umfassenden Einsatz erwarten lassen könnten, haften ihm doch gegenüber der Funkenerosion wichtige Nachteile an. Es sind dies vor allem die geringe Arbeitsgenauigkeit und die praktisch nur empirisch zu ermittelnde Elektrodenform, welche die Bearbeitung komplizierter Profile ausschliesst. Ferner erfordert das Verfahren hohe Arbeitskräfte und teure Installationen, welche es nur für wenige Spezialprobleme rentabel erscheinen lassen. Die Anwendung liegt in der Entgratung herkömmlich bearbeiteter Teile, der Bearbeitung grösserer Schauffelformen im Dampf- und Gasturbinensektor sowie im sogenannten elektrolytischen Schleifen von Hartmetallwerkzeugen usw.

#### 3. Funkenerosive Bearbeitung

Die prinzipielle Wirkungsweise der Funkenerosion dürfte heute als bekannt vorausgesetzt werden. Die Materialabtragung erfolgt an den beiden Elektroden unter der Einwirkung von Funken, hauptsächlich durch Verdampfung und Schmelzung des Elektrodenmaterials, wobei durch die Polarität der Elektroden und durch die Verschiedenheit der Elektrodenmaterialien die eine Elektrode bevorzugt abgetragen wird.

### Technische Merkmale der heutigen Funkenerosionsmaschinen

#### 1. Funkenerosionsgeneratoren

Sämtliche heute mit Erfolg arbeitenden Funkenerosionsmaschinen beruhen auf dem Prinzip der Impulseneratoren. Früher waren dagegen die Schwingkreis- oder Relaxations-Generatoren besser bekannt. Bild 1 zeigt die hauptsächlichen Unterschiede zwischen einem Impulsgenerator und einem Schwingkreisgenerator. Beim Impulsgenerator sind Beginn und Ende einer Funkenentladung sowie die Frequenz dieser Entladung durch einen Schalter in der Entladungsstrecke aufgezwungen, im Gegensatz zum Schwingkreisgenerator, wo Beginn und Ende der Entladung durch die Funkenstrecke selbst sowie durch die Impedanz des Generators bestimmt werden. Die Ausbildung des erwähnten Schalters beim Impulsgenerator ist im Prinzip bedeutungslos. Heute sind Impulseneratoren bekannt, welche auf rotierenden Umformern, auf Röhrengeneratoren, Transduktoren, Halbleitern usw. beruhen. Die bevorzugte Verbreitung der Impulseneratoren begann aber erst vor etwa 4 bis 5 Jahren, als Halbleiterelemente mit den nötigen Eigenschaften auf den Markt kamen. Diese mussten den hohen Anforderungen genügen, die ihnen beim Einsatz in Funkenerosionsgeneratoren gestellt werden, nämlich grosse Leistungen bei relativ hohen Schaltfrequenzen, gute Kurzschlussicherheit usw.

Eine erschöpfende technische Erklärung aller Vorteile des Impulsenerators, die zu dessen Erfolg beigetragen haben, ist kaum möglich. Es treten beim Entladungsvorgang mehrere physikalische Vorgänge gleichzeitig oder unmittelbar hintereinander auf. Die einzelnen Abläufe und Vorgänge zu isolieren und die dafür massgebenden Parameter zu bestimmen, ist bisher nicht gelungen. Man kennt wohl einige entscheidende Einflussgrössen, wie z. B. die Frontsteilheit des Entladungsimpulses, die Polarität der Entladung, das Arbeitspausenverhältnis usw.; bei der Konstruktion von Erosionsgeneratoren ist man aber noch immer gezwungen, empirisch vorzugehen und den Einfluss der elektrischen Grössen als Summe der Teilvorgänge zu betrachten. Allerdings sind auch hier Fortschritte zu verzeichnen, und die meisten Impulseneratoren, vor allem die direkt durch Halbleiter gesteuerten Ausführungen, erlauben dem Konstrukteur, die elektrischen Charak-

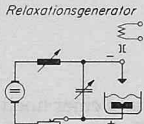
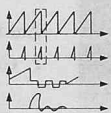
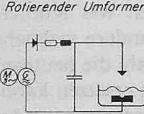
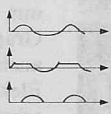
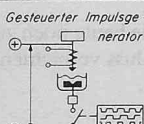
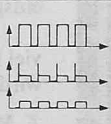
Generatorart	Speisung	Wahl der Energie $W_i$ pro Entladung	Art der Entladung	Oszillogramm der Entladung	Praktisches Anwendungsgebiet	Verfeinerung des Verfahrens	Vorteile	Nachteile
 Relaxationsgenerator	Gleichspannungsquelle. Einstellbare Stromstärke zur Ladung des Kondensators.	$W_i = \frac{CU_c^2}{2}$ Wahl von $C$ und $U_c$ $W_i = 10 \mu J$ bis $1 J$	Kondensatoren-Entladung über die Induktivität der Entladungsleitung. Schwingung hoher Eigenfrequenz.		Schruppen: Abtragsleistung bis 500 mm/min Schichten: Rauhtiefe $\geq R_f = 1 \mu m, R_a = 0,2 \mu m$	Drosselspule in der Stromquelle oder transistorisierte Stromregelung	Einfaches Prinzip und Bedienung Unempfindliche Einheit	Begrenzte Schruppenleistung Grosser Elektrodenverschleiss. Lange, vom Entladungsverlauf nicht kontrollierbare Pausen
 Rotierender Umformer	Motor-Generator Pulsierende Gleichspannung fester Frequenz.	$W_i = U_a \int_0^{t_i} i dt$ Wahl von $i$ $W_i = 1$ bis $50 J$	Gleichstromimpuls		Schruppen: Abtragsleistung bis 10000 mm/min und mehr Halbschichten: Rauhtiefe $\geq R_f = 100 \mu m$ $\geq R_a = 20 \mu m$ CLA			Auf Schruppen begrenzter Anwendungsbereich. Starke Geräusentwicklung. Entladungsverlauf nicht kontrollierbar.
 Gesteuerter Impuls-generator	Gleichspannungsquelle Elektronisch gesteuerter Unterbrecher $S$ .	$W_i = U_a \int_0^{t_i} i dt$ Wahl von $i$ und $t_i$ $W_i = 100 \mu J$ bis $50 J$	Gleichstromimpuls		Schruppen: Abtragsleistung bis 10000 mm/min und mehr Schichten: Rauhtiefe $\geq R_f = 5 \mu m$ $\geq R_a = 1 \mu m$ CLA	Gesteuerter Generator, voll transistorisiert ohne Speicherglieder "Agiepuls"	Alle Parameter unabhängig wählbar Bestmögliche Anpassungsfähigkeit an jedes Bearbeitungsproblem.	Keine bekannt

Bild 1. Vergleich zwischen den verschiedenen Arten von Funkenerosions-Generatoren

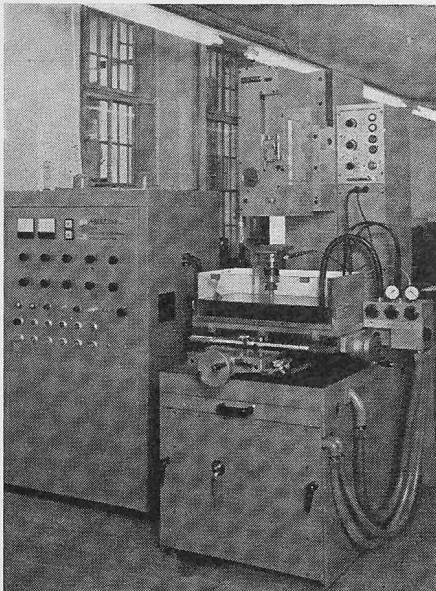


Bild 2 (links). Im Baukastensystem aufgebaute Maschine mit dem zugehörigen Impulsgenerator von maximal 45 A Elektrodenstrom

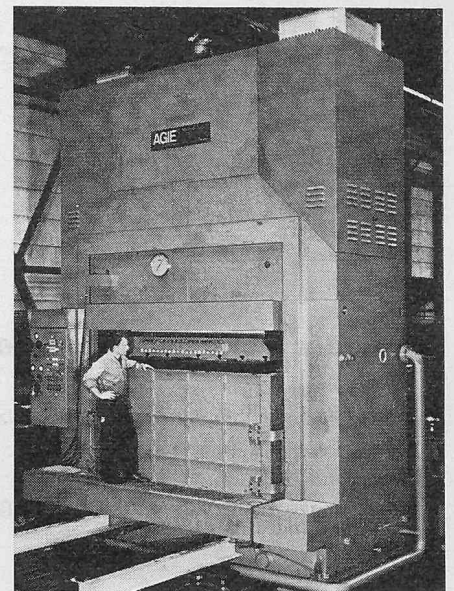


Bild 3 (rechts). Grosserosionsmaschine für die Bearbeitung von Karosseriegesenken. Tischfläche 1600×2700 mm; Leistung 12 cm<sup>3</sup>/min; Anschlusswert 125 kVA

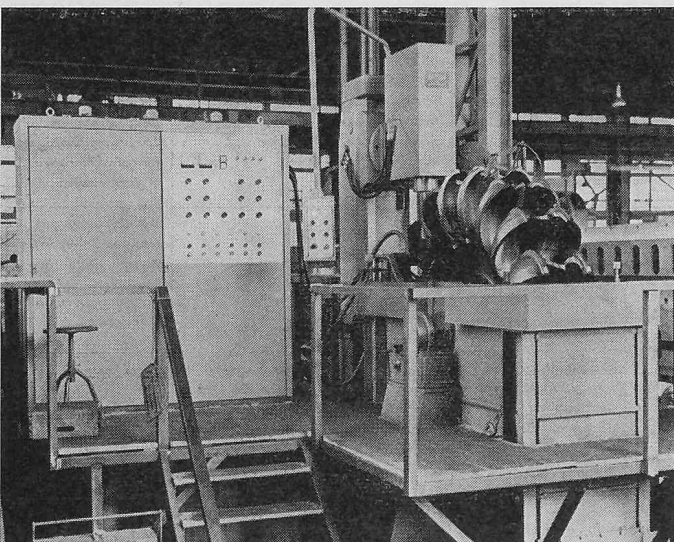
teristiken viel freier zu wählen und damit erosionsfreundliche Eigenschaften zu betonen und andere zu unterdrücken. Es würde den Rahmen dieses Beitrages sprengen, tiefer in diese Einzelheiten einzugehen; es seien aber die praktischen Auswirkungen der genannten Eigenschaften in bezug auf die Anwendung der Impulsgeneratoren erwähnt:

- verminderter Verschleiss an den Elektroden
- erhöhte spezifische Nutzarbeit pro Funken
- höhere Gesamtleistung, also Möglichkeit zum Bau grosser und grösster Einheiten
- weitgehende Freiheit bei der Wahl des Elektrodenmaterials
- genaue Kontrolle der Funkenenergie; daraus ergibt sich eine genauere Einhaltung des Funkenspaltes und eine regelmässige Bearbeitungsfläche.

## 2. Mechanischer Teil der Funkenerosionsmaschine

Die Funkenerosion ist schon einige Jahre vom Stand der Ausbrennapparate entfernt. Aus diesen Geräten sind die heutigen Präzisions-Erosionsmaschinen entstanden. Je mehr sich dieses Verfahren von der Generatorseite her entwickelt, um so höhere Ansprüche dürfen an die Präzision, an die Starrheit usw. der eigentlichen Maschine gestellt werden. Konstruktionen, die dieser Tatsache nicht Rechnung tragen, werden früher oder später ein Misserfolg. Das Feld der Anwendungsmöglichkeiten der Funkenerosion ist bereits so gross und vielfältig, dass der Hersteller von solchen Maschinen gezwungen ist, auf das Baukastensystem zurückzugreifen, um ihnen zu genügen. Als

Bild 4. Grosserosionsmaschine für die Bearbeitung von Laufrädern für Peltonturbinen. Raddurchmesser bis 4500 mm; Radbreite bis 1000 mm



Beispiel sei die in Bild 2 gezeigte Funkenerosionsmaschine mit dem zugehörigen Impulsgenerator von 45 A Elektrodenstrom erwähnt.

Die Entwicklung der Erosionsmaschinen läuft zur Zeit in zwei Richtungen:

- Erosionsmaschinen allerhöchster Genauigkeit für den Präzisions-Werkzeugbau und gewisse Sonderanwendungen. Ein typischer Vertreter dieser Richtung ist die von der Société d'Instruments de Physique zusammen mit der AG für Industrielle Elektronik entwickelte Erosionsmaschine.
- Erosionsmaschinen mittlerer Genauigkeit für die bevorzugte Anwendung in der Produktion.

Zwischen diesen beiden Richtungen sind natürlich viele Lösungen möglich.

Ein wichtiger Bestandteil der Erosionsmaschine ist der Vorschubmechanismus. Man kennt bei der Funkenerosion keinen zwingenden Vorschub, sondern dieser muss sich automatisch nach den Erosionsbedingungen richten. Der Vorschubmechanismus muss daher laufend von der Funkenstrecke aus über den eigentlichen Stand der Erosionsarbeit unterrichtet werden. Der Vorschub verlangsamt sich bei ungünstigen Bedingungen, er kann sogar negativ, also rücklaufend werden, wenn abgetragenes Material das Vorwärtsarbeiten der Elektrode behindert.

Die Bedingungen für die Regelung des Vorschubes bei Erosionsmaschinen sind sehr streng; eine gute Regelung muss auf Bruchteile eines hundertstel Millimeters ansprechen können. Zurzeit werden die meisten Erosionsmaschinen hydraulisch geregelt, wohl vor allem deshalb, weil der grosse Bereich zwischen Kriechgang und Schnellrückzug oder Vorschub damit relativ einfach und mit geringem Aufwand bestrichen werden kann. Es sind aber auch elektromechanische oder pneumatische Regelsysteme denkbar, die den Anforderungen genügen. Das Problem liegt hier eher bei der richtigen Konstruktion und beim Kostenaufwand.

## Zukünftige Entwicklung der Funkenerosion

### 1. Generatoren

Auf diesem Gebiete führt die Entwicklung in Richtung einer nochmaligen Verminderung des Elektrodenverschleisses. Dabei sei nicht nur an die heute meist üblichen Elektrodenmaterialien wie Kupfer, Graphit, Aluminium, Wolframkupfer usw. gedacht, sondern vielmehr auch an neue Materialien, vor allem an Stahl. Dass Stahl die heutigen Elektrodenmaterialien in einer grossen Zahl aller Fälle ersetzen kann, scheint eine reine Frage der Zeit, die bis zur weiteren Verbesserung der entsprechenden Generatoreigenschaften benötigt wird.

Auch der Wirkungsgrad der Impulsgeneratoren, die heute noch zu viel Energie zum Schutze der Halbleiter gegen Kurzschluss vernichten, wird in Zukunft nochmals eine Verbesserung erfahren.

### 2. Mechanischer Teil

Bei der Entwicklung des maschinellen Teils zeichnen sich drei Richtungen ab:



- a) Bau von Grossmaschinen. Dem steht nichts mehr im Wege, da der Grösse der Generatoren praktisch keine Grenzen mehr gesetzt sind. Ein typisches Beispiel dieser Tendenz zeigt Bild 3. Die abgebildete Maschine weist einen Arbeitstisch von  $1600 \times 2700$  mm und eine Leistung von  $12 \text{ cm}^3/\text{min}$  bei Normalpolarität bzw.  $18 \text{ cm}^3/\text{min}$  bei umgekehrter Polarität auf. Der gesamte Anschlusswert beträgt rund 125 kVA. Auch die Sondermaschine für die Bearbeitung von Peltonrädern, Bild 4, ist ein Vertreter dieser Entwicklungstendenz.
- b) Maschinen für den Produktionseinsatz. Bei entsprechender Weiterentwicklung zeichnen sich auf diesem Gebiete grosse Möglichkeiten für die Funkenerosion ab. Es müssen Maschinen konstruiert werden, die selbst in Transferstrassen eingegliedert werden können.
- c) Eine Wandlung im Werkzeugbau durch das Funkenerosionsverfahren dürfte durch die «Drahtschneidemaschine» entstehen. Es handelt sich hierbei um eine Elektroerosionsmaschine, die nicht nur eine gegebene Elektrodenform abbildet, sondern eine Form erzeugt. Dies geschieht dadurch, dass eine Elektrode, in diesem Falle ein mehr oder weniger feiner Draht, durch eine geeignete Steuerung die Form abfährt. An der Weltausstellung in Montreal wurden zwei russische Lösungen gezeigt: eine handbetätigte mit Kopierkurvensteuerung und eine magnetbandgesteuerte Maschine. Letztere wurde im Jahre 1968 auch in der Schweiz vorgeführt, dürfte aber für die Ansprüche eines schweizerischen Werkzeugbauers kaum je in Frage kommen. Auf diesem Gebiete sind noch viele, schwerwiegende Probleme zu lösen, darunter die vorerst noch unvermeidbare Durchbiegung des Drahtes bei der Bearbeitung.

Auch in der Schweiz wurde bereits in mehrjähriger Arbeit eine Draht-Funkenerosions-Maschine entwickelt, welche demnächst der Öffentlichkeit vorgeführt wird. Die *Agiecut DEM 15*, Bild 5, erodiert mit einem kontinuierlich ablaufenden Draht und wird nach Lochstreifen-Programm zweidimensional gesteuert.

Die Maschine eignet sich zur Herstellung zylindrischer Durchbrüche oder prismatischer Werkstücke mit komplizierten Umrissformen. Das Einsatzgebiet reicht von der Anfertigung schwieriger Formteile für Versuchsmuster, Prototypen und Kleinserien bis zur Präzisionsbearbeitung an schneidenden und umformenden Werkzeugen zum Stanzen, Feinschneiden, Extrudieren, Strangpressen usw., Bild 6. Ebenso können Block- oder Scheibenelektroden mit den erforderlichen Untermassen für das erosive Senkbearbeiten damit hergestellt werden. Sie ermöglicht durch einen dünnen, von Rolle zu Rolle laufenden Draht eine völlig berührungslose Formgebung ohne mechanische Beeinflussung und unabhängig von der Härte des Materials. Das Werkzeug ist ein handelsüblicher Draht aus Kupfer, Messing oder Wolfram.

Die Werkstücke werden zur Bearbeitung auf einem rollengelagerten Kreuzschlitten gespannt, von Schrittmotoren angetrieben und nach einer auf 8-Kanal-Lochstreifen programmierten Bahn gesteuert. Als Dielektrikum eignet sich entionisiertes Wasser, das der Bearbeitungsstelle zugeführt wird. Die Entladeimpulse werden von einem transistorisierten Erosionsgenerator geliefert.

Die numerische Bahnsteuerung wurde speziell für das Erodieren mit ablaufendem Draht im Institut für elektrische Anlagen und Steuerungstechnik an der Technischen Universität Hannover unter Leitung von Prof. Dr. H. Weissmann in Zusammenarbeit mit der

AGIE entwickelt und mit integrierten Schaltkreisen sowie linearem und zirkularem Inneninterpolator aufgebaut. Die Programmierung erfolgt absolut von 000,00 bis 150,00 mm bei einer kleinsten Einheit von 0,01 mm. Ein Rücklaufspeicher gewährleistet Rückkehr auf der Kurvenbahn bei Störungen im Arbeitsspalt und anschliessenden Vorlauf aus dem selben Speicher. Bahnkorrekturen können in Schritten von  $1 \mu\text{m}$  bis  $999 \mu\text{m}$  von Hand vorgewählt werden. Der Massstab einer programmierten Bahnkurve kann für Vergrösserungen oder Verkleinerungen verändert werden. Zur spiegelbildlichen Steuerung um die X- und Y-Achsen lassen sich durch Umschalten die programmierten Werte vertauschen.

#### Arbeitsvorbereitung

Bedauerlicherweise muss immer wieder festgestellt werden, dass der Durchschnitt der Benutzer dieses Verfahrens in der Anwendung der Funkenerosion weit hinter der Entwicklung derselben zurücksteht. In gleicher Weise, wie man von giess-, schweis- oder bearbeitungsgerechten Konstruieren spricht, darf und soll man von einem erosionsgerechten Konstruieren sprechen. In einem modernen Betrieb sollte die Funkenerosion nicht nur dazu dienen, den Retter in letzter Not zu spielen, sondern von Anfang an systematisch eingeplant werden im Hinblick auf die bestmögliche Auswertung ihrer Vorteile.

Durch eine zielbewusste Miteinbeziehung der Möglichkeiten, welche die Funkenerosion bietet, gelingt es, sowohl die Herstellung von Werkzeugen und Fertigungsteilen zu vereinfachen als auch die Lagerhaltung zu vermindern. Um aber dieses Ziel zu erreichen, bedarf es der Zusammenarbeit von Konstruktion, Arbeitsvorbereitung, Normenbüro und Werkstatt.

Der Benutzer von Funkenerosionsmaschinen wird mit einem gewissen Recht nach den Unterlagen für die Arbeitsvorbereitung fragen. Nach wie vor ist aber das Verfahren zu jung, um mit der gleichen Sicherheit Datenblätter veröffentlichen zu können, wie dies bei den klassischen Bearbeitungsverfahren der Fall ist. Trotzdem stehen heute bereits Tabellen und Unterlagen zur Verfügung, die die Ermittlung einer Vorgabezeit für Funkenerosionsarbeiten erlauben, deren Genauigkeit bei etwa  $\pm 10\%$  liegt. Allerdings fehlt es noch an geschultem Fachpersonal für die Arbeitsvorbereitung auf diesem Gebiete.

Es wäre sowohl für die Benutzer als auch für die Hersteller von Erosionsmaschinen wünschenswert, dass in Gewerbeschulen, technischen Lehranstalten usw. mehr über dieses Verfahren vorgetragen würde. Gewisse Ansätze dazu sind bereits vorhanden, doch ist es bedauerlich, sagen zu müssen, dass vor Jahren an eine Gewerbeschule in Nepal eine Erosionsmaschine zur Ausbildung von Schülern geliefert wurde, bevor eine einzige Schule der selben Art in der Schweiz über eine entsprechende Maschine verfügte.

#### Elektroden und ihre Fertigung

Das Kernproblem der Funkenerosion liegt in der Fabrikation der Elektroden. Es sei an dieser Stelle eindringlich betont, dass beim heutigen Stand der Funkenerosion allein die Genauigkeit und Güte der Elektrode die erzielbare Genauigkeit und Güte der Erosionsarbeit bestimmt. Es ist ausgeschlossen, mit einer schlecht oder ungenau hergestellten Elektrode ein gutes und genaues Ergebnis zu erhalten. Dies kann nicht genügend betont werden. Selbstverständlich kann durch eine falsche Einstellung an der Maschine ein Ergebnis schlecht aus-

Bild 5. Draht-Erosionsmaschine «Agiecut DEM 15». Links die numerische Bahnsteuerung «Agiemeric NBY 15», rechts der Impulsgenerator

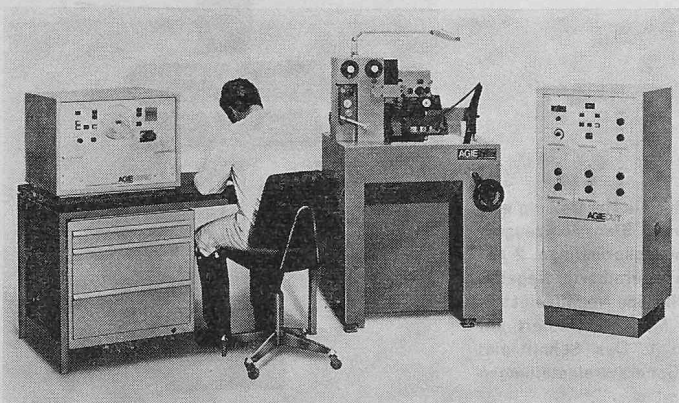
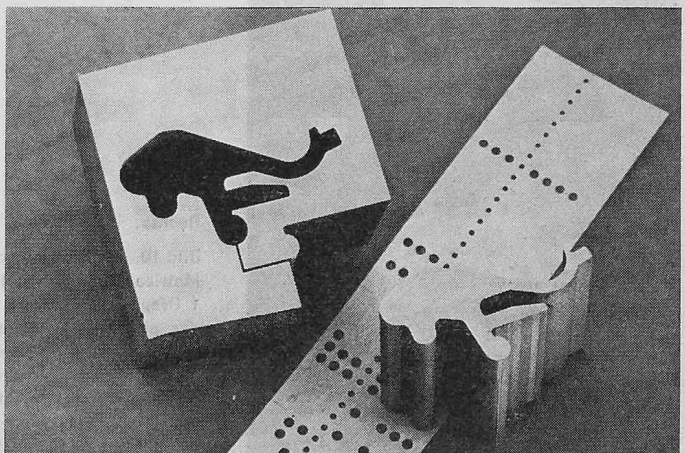


Bild 6. Nach Programm erodierter Stempel aus gehärtetem Stahl. Bearbeitungszeit rund 7 Stunden





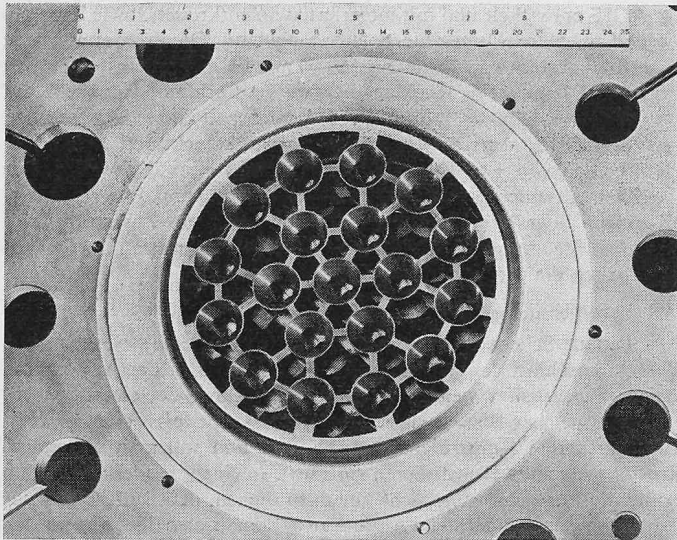


Bild 7. Heizstabträger aus Kupfer für einen Versuchsreaktor. Die benötigte Elektrode aus Graphit wurde aus drei konzentrischen Ringen hergestellt und diese danach ineinander geschoben. Die Form wurde dann in einem Arbeitsgang erodiert

fallen, doch sind dies Zufälle, die auch an einer herkömmlichen Maschine geschehen können.

Wie bereits erwähnt bilden Kupfer, Graphit, Aluminium und Wolframkupfer die heute hauptsächlich verwendeten Elektrodenmaterialien. Diese können je nach ihrem Verwendungszweck, dem Anwendungsgebiet, der Bearbeitungsmöglichkeit usw. auf verschiedene Art ihre Gestalt erhalten. Sie können vorerst in herkömmlicher Weise spanabhebend bearbeitet werden, wobei Verwendungszweck, Form und Genauigkeit die zu wählende Bearbeitungsmethode bestimmen. Ferner können Kupfer und Aluminium kalt gepresst werden, Graphit und Wolframkupfer lassen sich bei Bedarf und innerhalb gewisser Genauigkeitsgrenzen auch formsintern. Kupfer kann galvanisch niedergeschlagen werden. Sowohl Kupfer als auch Graphit werden heute sehr oft funkenerosiv bearbeitet. Eine allgemein gültige Regel für die Wahl der Methode kann ohne Kenntnis der Betriebseinrichtung und des angestrebten Ergebnisses nicht aufgestellt werden.

Beim heutigen Stand der Funkenerosion, der eine erhebliche Verminderung des Elektrodenverschleisses gebracht hat, kann man mit wesentlich weniger Elektrodenmaterial auskommen; bei Durchbrüchen kann mit kürzeren Elektroden gearbeitet werden, bei Raumformen mit einer kleineren Anzahl. Es ist wichtig zu wissen, dass kompliziertere Formen aus einfacheren Teilelektroden zusammengesetzt werden können. Dazu kann man die einzelnen Teilformen nacheinander bearbeiten oder die Teilelektroden erst zusammensetzen und

die Gesamtform dann gleichzeitig erodieren, Bild 7. Die Wahl der Herstellungsmethode hängt von den betrieblichen Möglichkeiten und von den Genauigkeitsansprüchen ab. Entscheidend ist auch die Stückzahl der zu erodierenden Teile. Bei grossflächigen Raumformen, wie zum Beispiel für Karosserieteile, werden die Elektroden meistens galvanisch, auf der Grundlage eines Kunstharznegativs, hergestellt. Eine Elektrode von 5 mm Dicke, entsprechend versteift, genügt, um ein vorgegossenes Gesenk zu erodieren.

Für die Erosion von Schmiedegesenken, die nur einmal herzustellen sind, werden überwiegend kopiergefräste Elektroden aus Graphit verwendet. Um ein Kurbelwellen- oder ein Pleuelegesenk herzustellen, werden, je nach Güte, 1 bis 2 Elektroden benötigt, Bild 8. Wiederholt sich die Herstellung der gleichen Form, kann zwischen formgesinterten Graphitelektroden oder warmgeschlagenen und bei Bedarf kalt nachkalibrierten Kupferelektroden gewählt werden. An die Genauigkeit und an die Oberflächengüte von Kunststoffspritzformen werden hohe Ansprüche gestellt. Daher werden für die Herstellung solcher Formen kopiergefräste oder galvanisch hergestellte Elektroden nötig sein. Auch wird allgemein mit zwei bis drei Elektroden pro Form zu rechnen sein. Es ist dies ein Gebiet, auf welchem die Funkenerosion viel verwendet wird.

Für die Herstellung von Schnittwerkzeugen werden vorwiegend geschliffene Elektroden verwendet. Diese bieten Gewähr für eine hohe Genauigkeit der erodierten Matrize. Bei Stahlmatrizen hat

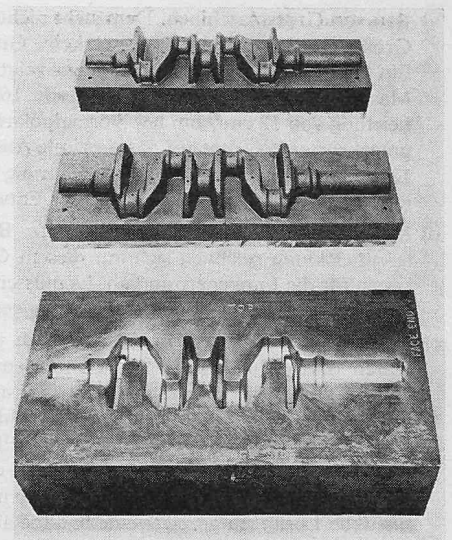
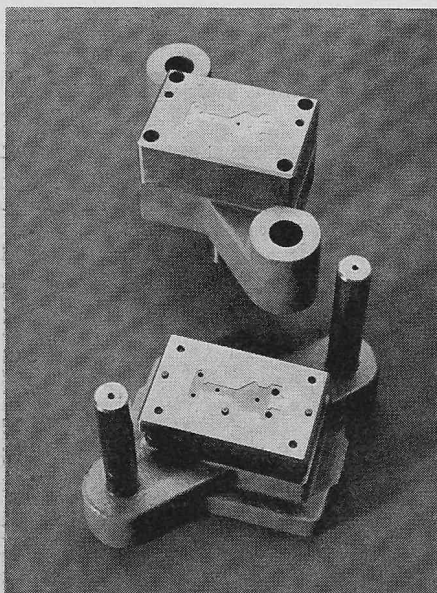


Bild 8. Aus dem Vollen erodiertes Schmiedegesenk für Kurbelwelle. Die Bearbeitung erfolgte mit zwei kopiergefrästen Graphitelektroden. Die gesamte Bearbeitungszeit einschliesslich Elektrodenfertigung liegt wesentlich unter jener für die Herstellung durch herkömmliche Mittel

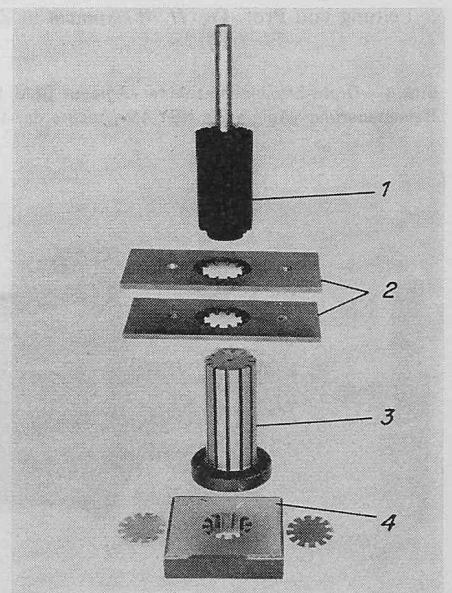


Links:

Bild 9. Blockschnitt, hergestellt unter Verwendung einer Schlichtelektrode. Die beiden Matrizen wurden bis auf 0,2 bis 0,3 mm Übermass vorgesägt

Rechts:

Bild 10. Umkehrmethode für die Herstellung von Matrize und Stempel eines Stanzwerkzeuges. 1 Graphitelektrode als Ausgangsgrundlage, 2 mit der oberen Graphitelektrode erodierte Negative-Kupferelektroden, 3 mit Hilfe der Negativelektroden erodierte Stempel, 4 Matrize, erodiert mit Hilfe der Graphitelektrode 1. Das Schnittspiel wird durch verschiedene Generatoreinstellungen bei der Erosion erzielt





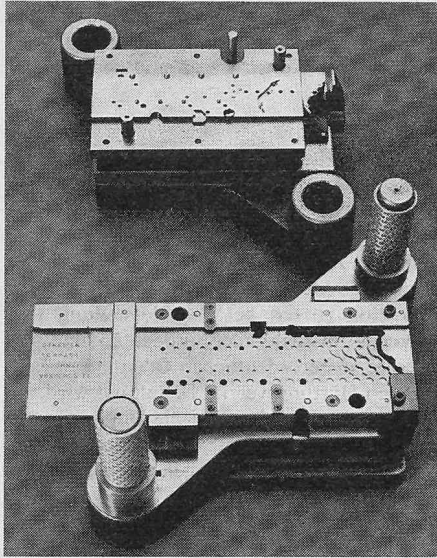
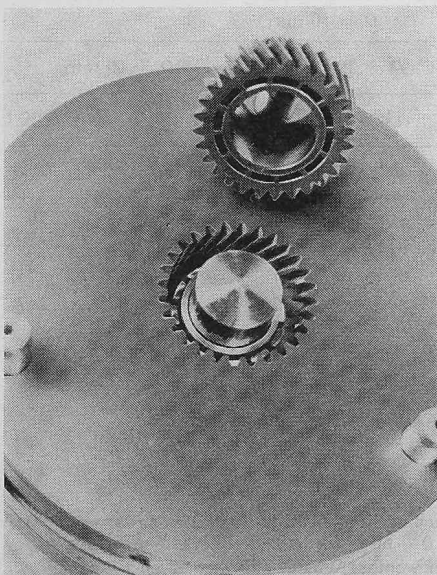


Bild 11. Folgeschnitt aus einzelnen Segmenten, hergestellt durch Funkenerosion. Die genaue Lage der einzelnen Teilformen kann auf der Erosionsmaschine direkt eingestellt werden

es sich bewährt, diese im weichen Zustande bis auf 0,2 bis 0,5 mm Übermass vorzusägen, zu härten und dann mit nur einer Elektrode auf das Fertigmass zu erodieren, Bild 9.

Bei Hartmetallmatrizen ist es dagegen nicht empfehlenswert, vorgesinterte Matrizen zu wählen, sondern diese aus dem Vollen zu erodieren. Dabei ist selbstverständlich mit einem entsprechend grösseren Elektrodenaufwand zu rechnen.

Vor allem für die Herstellung von Komplettschnitten wurde eine Methode entwickelt, die zunehmend an Verbreitung gewinnt. Dabei werden eine oder meistens zwei Elektroden in bekannter Weise hergestellt und damit die Schnittplatte und gegebenenfalls die Stempelführung erodiert. Die Elektrode besteht aus Kupfer oder Graphit. Mit der gleichen Elektrode erodiert man nachträglich eine Negativelektrode (aus Graphit, wenn die erste aus Kupfer bestand, oder umgekehrt). Diese Negativelektrode wird nun benutzt, um den vorgearbeiteten Stempel, gegebenenfalls auch den Auswerfer, zu erodieren, Bild 10. Mit dieser Methode besteht die Gewähr, dass Stempel und Matrize einwandfrei zusammenpassen bei bestmöglicher Verteilung des Schnittspiels. Sind Matrize, Stempelführung, Stempel, Positiv- und Negativelektroden sowie Stanzblock und Elektrodenaufnahme zueinander genau verstiftet, so ist der Zusammenbau des Werkzeuges ohne langes Richten des Schnittspiels gewährleistet und kann einer wenig geübten Kraft überlassen werden. Dies ist ein eindruckliches Beispiel von Zusammenarbeit zwischen Konstruktion, Arbeitsvorbereitung, Normierung und Erosion.



Links:

Bild 13. Presswerkzeug für ein schräg verzahntes Zahnrad aus Kunstharz

Rechts:

Bild 14. Presswerkzeug für ein Kunstharzteile in der Elektroindustrie

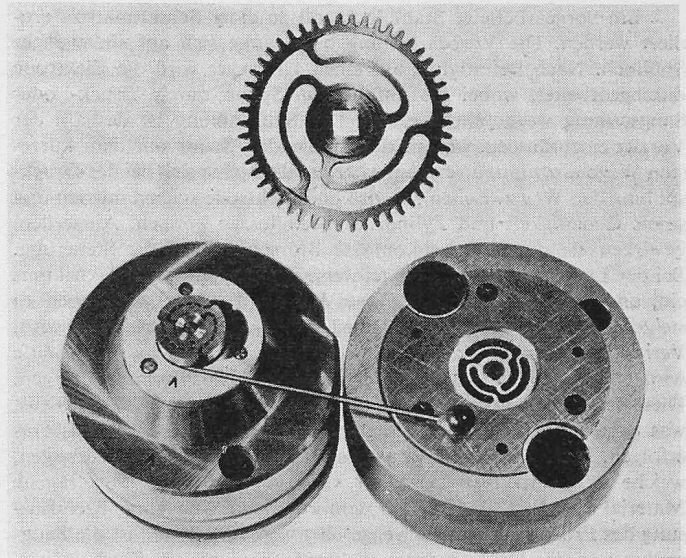
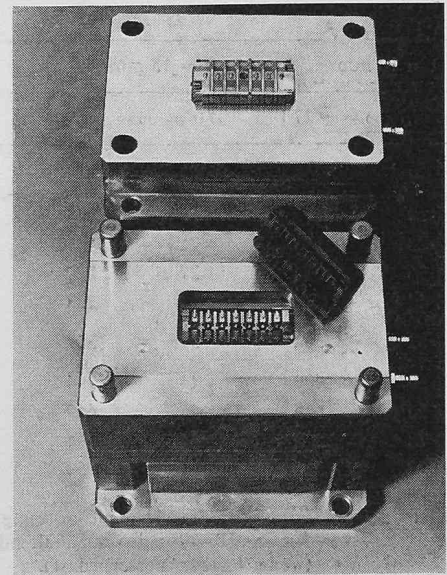


Bild 12. Stanzwerkzeug für ein gefedertes Zahnrad, hergestellt mittels Funkenerosion. Als Grössenvergleich dient die darüberliegende Stecknadel

Es wurde oft behauptet, Folgeschnitte und gewisse bruchanfällige Komplettschnitte seien ungeeignet für die Funkenerosion, da sie wegen der Bruchgefahr geteilt ausgeführt werden müssten. Es dürfte aber in der Literatur über Funkenerosion kaum je ein Abschnitt zu lesen sein, der es verbieten würde, geteilte Matrizen zu erodieren, Bild 11. Man wird sich fragen, ob dann noch ein Vorteil gegenüber z. B. geschliffenen Matrizen zu erwarten sei. Diese Frage ist eindeutig zu bejahen, denn erst bei der erodierten Matrize kann dort geteilt werden, wo wegen der Beanspruchung die Teilung liegen muss und nicht dort, wo es nötig ist, um das gewünschte Profil überhaupt herstellen zu können.

#### Spülung des Erosionsspalt

Es ist unerlässlich, noch auf einen der wichtigsten Punkte beim Funkenerosionsverfahren hinzuweisen, nämlich auf die Spülung im Erosionsspalt. Jedem Betriebsmann ist es eine Selbstverständlichkeit, dass ein Bohrer spiralenförmige Nuten aufweisen muss, um die Späne wegzuführen. Über die Ausbildung von Spannuten an Drehstäben und Fräsern wurden Bücher geschrieben. Diese Erkenntnisse scheinen aber bei der Funkenerosion oftmals vergessen. Viele Benützer von Erosionsmaschinen glauben, ohne oder mit schlecht ausgebildeter Spülung auszukommen. Dabei ist vor allem eine wirksame Spülung, neben der eigentlichen Elektrodenauflage, derjenige Faktor, der die Genauigkeit und die Bearbeitungszeit am meisten beeinflusst. Das nachstehende Beispiel soll dies veranschaulichen:



Ein vorgearbeiteter Stahlblock soll zu einer Schnittmatrize erodiert werden. Die Vorbearbeitung beschränke sich auf ein einziges Spülloch. Nach Befestigung auf einen Untersatz wird die Elektrode durchgearbeitet, wobei die anfallenden Späne durch Druck- oder Saugspülung weggeführt werden. Der Saugspülung ist deshalb der Vorzug einzuräumen, weil sie die anfallenden Späne auf dem kürzesten Wege abzuführen vermag, wogegen die Späne sich bei der Druckspülung den Weg zwischen Matrize und Elektrode suchen müssen und somit Genauigkeit und Zylindrität beeinflussen können. Ausserdem bewirken sie durch Falschkontakte Störsignale auf die Steuerung. Bei der Erosion tritt aber eine teilweise Zersetzung des Dielektrikums ein, und es bildet sich Gas. Dieses hat die Tendenz, nach oben zu steigen, was durch die Anwesenheit der Elektrode verhindert wird. Vermehrte Störsignale auf die Steuerung sind die Folge. Als Abhilfe wird oft die Saugwirkung verstärkt, um die Gasblasen wegzubringen. Diese dehnen sich aber unter der Wirkung des grösseren Vakuums aus, was dazu führen kann, dass die Funkenüberschläge durch das Gas erfolgen. Das Ergebnis sind stationäre Entladungen, also Lichtbögen, welche das Werkstück zerstören können. Damit das abgetragene Material und die Gasblasen auf dem kürzesten Weg ohne Beeinflussung des Erosionsvorganges weggeführt werden können, ist die Saugspülung an der Unterseite der Elektrode auszubilden. Solche Über-

legungen sind bei Raumformen noch wichtiger, und man sollte sie nicht dem Zufall und der Geschicklichkeit des Bedienungsmannes überlassen, sondern sie bereits bei der Konstruktion und der Arbeitsvorbereitung anstellen.

#### Schlussbemerkung

Wie sehr sich beim richtigen Einsatz der Funkenerosion Bearbeitungsmöglichkeiten erschliessen lassen und sich damit vorteilhafte Werkzeugkonstruktionen ergeben, veranschaulichen die abschliessenden Beispiele. So wäre beim Zahnrad, Bild 12, eine Herstellung der Matrize und des Stempels in den Abmessungen und in der entsprechenden Form durch herkömmliche Methoden kaum möglich. Grosse Vorteile bringt die Funkenerosion zurzeit bei der Herstellung von Formen für die Fertigung von Kunstharzteilen, Bilder 13 und 14. Solche Formen können mit einer ausserordentlichen Genauigkeit hergestellt werden, die durch keinen Härtingungsverzug beeinflusst wird.

Täglich werden neue Anwendungsgebiete für die funkenerosive Bearbeitung gefunden, so dass die Benützer dieser Arbeitstechnik immer mehr in der Lage sind, die hohen Anforderungen zu erfüllen, die an die heutigen technischen Produkte gestellt werden.

Adresse des Verfassers: *Ferdj Hermann*, Ing., Leiter der AGIE Verkauf Schweiz AG, 6000 Luzern, Bundesstrasse 13.

## Zementdosierung und Grösstkorn des Kiessandes

Von *Arthur Nyffeler*, dipl. Bau-Ing. EPUL, SIA, Bern

DK 666.972.11

Dieser Beitrag ist einem demnächst bei Hallwag AG, Bern, erscheinenden Buch entnommen

Wird, verglichen mit der Normal-Körnung 0-30 mm eines Kiessandes, das Grösstkorn verkleinert bzw. vergrössert, so kann, gleiche Betonkonsistenz vorausgesetzt, die Zementdosierung erhöht bzw. vermindert werden, um die gleiche Druckfestigkeit zu erhalten. Dieser Änderung der Zementdosierung ist auch die Menge des Anmachwassers anzupassen.

Die *SIA-Norm 166, Artikel 3*, Absatz 2-4, erläutert die zu treffenden Massnahmen wie folgt: «Bei einer maximalen Korngrösse unter 30 mm  $\varnothing$  ist die Zementdosierung entsprechend der grösseren Kornoberfläche angemessen zu erhöhen. Andererseits erlaubt ein grösserer maximaler Korndurchmesser im allgemeinen eine Verminderung der Zementdosierung. In der Regel verursacht eine Herabsetzung des grössten Korndurchmessers auf die Hälfte bei gleicher Betonkonsistenz eine Erhöhung der Anmachwassermenge von rund 20 l. Einer Einbusse an Betondruckfestigkeit kann durch entsprechende Erhöhung der Zementdosierung von rund 20 P/W begegnet werden. Eine lineare Inter- oder Extrapolation dieser Angaben erlaubt auch, die Auswirkung anderer Korngrössenverhältnisse abzuschätzen. Das heisst also umgekehrt auch, dass zum Beispiel bei Verdoppelung des grössten Korndurchmessers bei gleicher Betonkonsistenz eine Verkleinerung

der Anmachwassermenge von 20 l pro m<sup>3</sup> Beton angenommen werden kann. Die Zementdosierung könnte in diesem Fall um angenähert 20 P/W kg vermindert werden.»

Auf Grund dieser Angaben können allgemeine Formeln aufgestellt werden, die für jedes sich gegenüber dem normalen Kieskorn 0-30 mm unterscheidende Grösstkorn anwenden lassen, wobei folgende Bezeichnungen eingeführt werden.

$D$	= Grösstkorn des zuzugebenden Kiessandes, in mm
$W$	= Anmachwassermenge pro m <sup>3</sup> Fertigbeton, in l
$\Delta W_{D < 30}$	= Mehr-Anmachwassermenge pro m <sup>3</sup> Fertigbeton, in l
$\Delta W_{D > 30}$	= Minder-Anmachwassermenge pro m <sup>3</sup> Fertigbeton, in l
$P$	= Zementmenge pro m <sup>3</sup> Fertigbeton (Zementdosierung), in kg
$\Delta P_{D < 30}$	= Mehr-Zementmenge pro m <sup>3</sup> Fertigbeton, in kg
$\Delta P_{D > 30}$	= Minder-Zementmenge pro m <sup>3</sup> Fertigbeton, in kg

Zu unterscheiden ist zwischen einer Verkleinerung ( $D < 30$ ) und einer Vergrösserung des Grösstkorns ( $D > 30$ ) gegenüber dem normalen Kiessand 0-30 mm ( $D 30$ ).

Tabelle 1. Änderung der Anmachwassermenge und der Zementdosierung in Abhängigkeit des Grösstkorns des Kiessandes

$D < 30$ mm						$D = 30$ mm		$D > 30$ mm					
$D = 10$ mm		$D = 15$ mm		$D = 20$ mm				$D = 40$ mm		$D = 50$ mm		$D = 60$ mm	
$\Delta W_{D < 30} = + 27$ l		$\Delta W_{D < 30} = + 20$ l		$\Delta W_{D < 30} = + 13$ l				$\Delta W_{D > 30} = - 7$ l		$\Delta W_{D > 30} = - 13$ l		$\Delta W_{D > 30} = - 20$ l	
$\Delta P_{D < 30}$ kg	P kg	$\Delta P_{D < 30}$ kg	P kg	$\Delta P_{D < 30}$ kg	P kg	P kg		$\Delta P_{D > 30}$ kg	P kg	$\Delta P_{D > 30}$ kg	P kg	$\Delta P_{D > 30}$ kg	P kg
+19	119	+14	114	+10	110	100		— 5	95	—10	90	—14	86
+28	178	+21	171	+14	164	150		— 7	143	—14	136	—21	129
+36	236	+27	227	+18	218	200		— 9	191	—18	182	—27	173
+44	294	+33	283	+22	272	250		—11	239	—22	228	—33	217
+52	352	+39	339	+26	326	300		—13	287	—26	274	—39	261
+59	409	+44	394	+30	380	350		—15	335	—30	320	—44	306
+66	466	+49	449	+33	433	400		—16	384	—33	367	—49	351
+72	522	+54	504	+36	486	450		—18	432	—36	414	—54	396
+78	578	+59	559	+39	539	500		—20	480	—39	461	—59	441

Erstes Beispiel: vorgeschriebene Zementdosierung P 300; zu verwendender Kiessand 0-20; also einzuhaltende Zementdosierung P 326 (weil grösserer Wasserbedarf).

Zweites Beispiel: vorgeschriebene Zementdosierung P 300; zu verwendender Kiessand 0-60; also einzuhaltende Zementdosierung P 261 (aber weniger Wasser begeben!).