



## EINFLUß ZU DEN EINSTELLPARAMETERN DER EDM-MASCHINENREGELUNG AUF DIE BOHRUNGSGEOMETRIE VON EINSPRITZDÜSEN

Autor: Alexandre de Souza,  
AS INGPEED (Development in Engineering, <http://www.asingpeed.xpg.com.br/>)  
Blumenau-SC, Brazil

### Abstract:

This paper describes a series of experimental analyses made to verify the influence of the adjusting conditions of the control system of the EDM-machine on the geometry of microholes for injection nozzles produced with electrical discharge machining. The EDM-machining process of such holes with diameters smaller as 0,15 mm is extremely sensitive against variations of the parameters related to the closed-loop control of the tool-machine. The article also explains the operating principle of this system. The experiments' results has been obtained through the modification of two different parameters of the closed-loop control system of an EDM-machine model AGIE Quadraton, in dependence on the machining depth of the tool-electrode in the hole being machined.

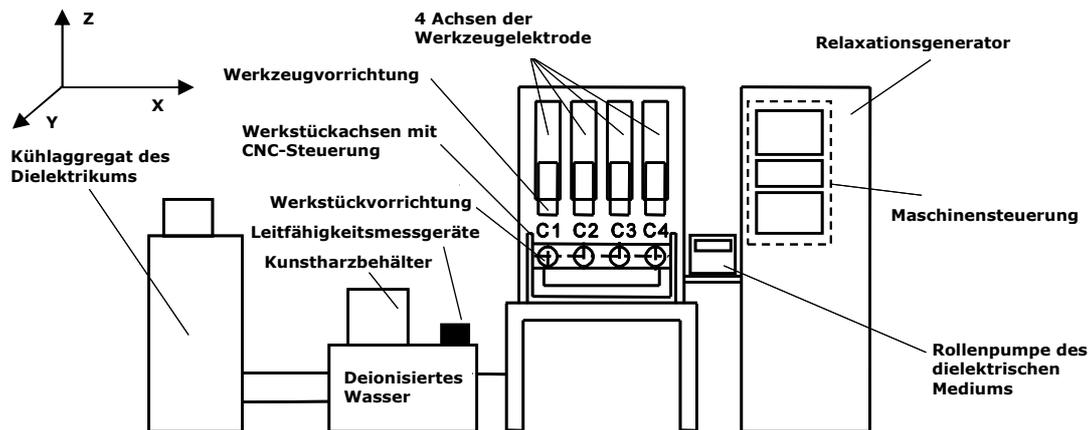
**Keywords:** EDM, electro discharge Machining, closed-loop control, tool-electrode, injection nozzles

### 1. Einführung

Die geometrische Präzision von Einspritzbohrungen, die durch die Funkerosion (*EDM-Electro Discharge Machining*) in Einspritzdüsen von hochmodernen Einspritzsystemen (z. B. Common Rail System) bearbeitet werden, ist extrem entscheidend für die Einhaltung eines maximalen Niveaus der Gasemissionen von Dieselmotoren im Betrieb [1]. Die Geometrie dieser Bohrungen übt eine wichtige Funktion von Kontrolle der Mischungsbedingungen von Kraftstoff in der Verbrennungskammer des Motors aus. Der funkenerosive Herstellungsprozess einer Einspritzbohrung (normalerweise mit Durchmesser zwischen 90 bis 400  $\mu\text{m}$ ) in den Fertigungslinien der Automobilindustrie ist sicherlich sehr komplex und hängt in hohem Maße von den elektronischen und mechanischen technologischen Charakteristiken der EDM-Werkzeugmaschine dieses Bearbeitungsprozesses und von einer enormen Quantität von wichtigen Prozessparametern ab. Beispielsweise hat die Einstellung von Parametern der Regelungstechnik dieser Maschine eine unmittelbare Konsequenz auf die endgültige Dimension (zum Beispiel, Bohrungsdurchmesser und –konizität) eines bearbeitenden Einspritzloches. Sogar können noch einige Oberflächenmerkmale der produzierten Bohrungen (vor allem „oberflächliche Rauheit“) [2] durch die Funktionsweise des Regelungs-

systems der EDM-Maschine beeinflusst werden, wodurch eine große Auswirkung auf den Einspritzvorgang des Kraftstoffes einer Einspritzdüse und dadurch auf den Emissionsgrad eines Dieselmotors provoziert wird.

In diesem Fachartikel wird eine Serie von interessanten experimentellen Untersuchungen für die Verifizierung des Einflusses der Regelungstechnologie der Erodiermaschine (Modell Agie Quadraton) auf die Durchmessergröße von Einspritzlöchern präsentiert. In diesen Experimenten realisiert man vor allem eine experimentell kontrollierte Variation von zwei Einstellparametern der Maschinenregelung, die eine signifikante Auswirkung auf den Bohrungsdurchmesser ausüben. Generell bearbeitet man in dieser Situation Einspritzlöcher mit Durchmessern kleiner als 0,15 mm mittels der funkenerosiven Bearbeitungstechnik mit einer durch ein programmierbares Regelungssystem elektronisch gesteuerten Werkzeugbewegung. Die erreichbare Messgenauigkeit von Bohrungsdurchmessern wird mittels der Einsetzung einer optischen Messmethode mit einer äußerst kleinen Messunsicherheit vergewissert. Außer einem Durchmesser wird die geometrische Position vom in einer Einspritzdüse bearbeiteten Einspritzloch durch unterschiedliche Positionswinkel charakterisiert.



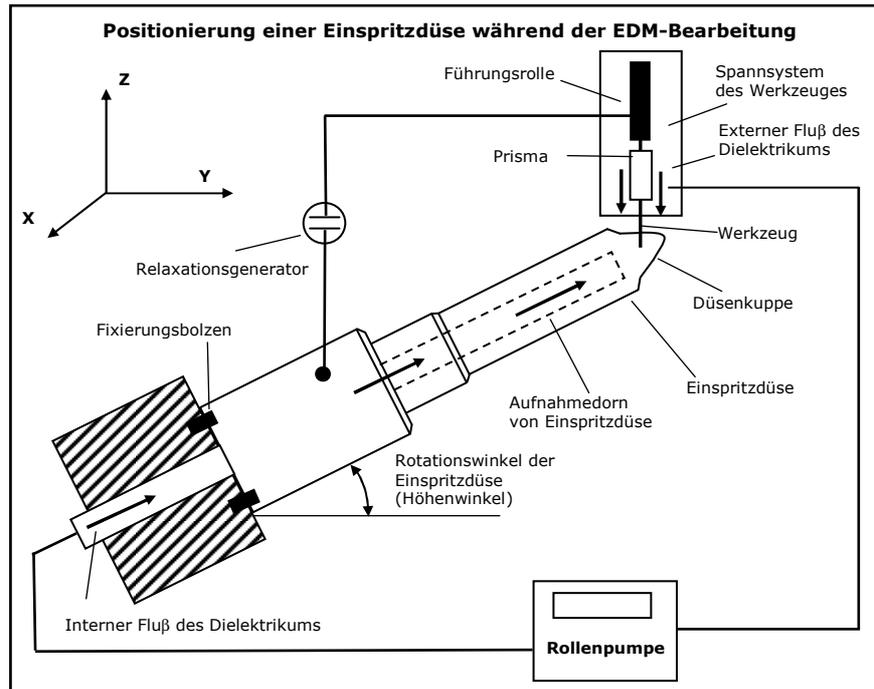
**Bild 1:** Schematische Darstellung der Erodiermaschine AGIE Quadraton

## 2. EDM-Werkzeugmaschine der Experimente

Die Versuchsergebnisse dieses Fachartikels wurden durch die Variation von Einstellparametern der Regelungstechnik einer Erodiermaschine „AGIE Quadraton I“ aus der schweizerischen Firma AGIE Charmilles (**Bild 1**) erzeugt. Mit dieser Maschine ist möglich dann die Realisierung des Bearbeitungsprozesses eines Einspritzloches in einer Einspritzdüse. Vier Einspritzdüsen mit derselben Geometrie können gleichzeitig erodiert werden, da diese AGIE-Maschine über 4 Maschinenachsen von Werkzeugelektroden (C1,C2,C3,C4), mit dergleichen mechanischen und elektronischen Charakteristiken, verfügt. Jede eine dieser Achsen arbeitet mit einem einzelnen Relaxationsgenerator und Regelungssystem für die Durchführung des Materialabtrages mittels der Funkerosion. Dieser Generator kontrolliert unter anderem die Totalintensität der elektrischen Entladung der funkerosiven Bearbeitung, wobei die Maschinenregelung die technische Funktion von Überwachung und Kontrolle des Bearbeitungsvorganges für die Verbesserung der Bearbeitungsbedingungen ausübt. Die totale Vermeidung elektrischer Kurzschlüsse zwischen dem Werkzeug und bearbeitender Einspritzbohrung ist auch eine der Hauptaufgaben der Regelungstechnologie der EDM-Maschine. Die Einstellparameter des Relaxationsgenerators und Regelungssystems werden durch eine moderne Maschinensteuerung eingegeben und können normalerweise nur in Abhängigkeit einer bestimmten Geometrie von zu bearbeitendem Einspritzloch mithilfe aufwendiger experimenteller Untersuchungen optimiert

werden. Die korrekte Funktionsweise dieser zwei elektronischen Systeme der EDM-Werkzeugmaschine hängt in großem Teil von der Intensität elektrischer Leitfähigkeit des dielektrischen Mediums (hierbei, deionisiertes Wasser), die üblicherweise für die gute Qualität des Funkerosionsprozesses kleiner als  $0,5 \text{ m S/cm}$  eingestellt werden soll, ab. Dieser extrem kleine Leitfähigkeitswert bei einer spezifischen Temperatur des entsprechenden Arbeitsmediums ( $15 \pm 5 \text{ °C}$ ) wird durch einen Kunstharz-Ionenaustauscher erzeugt. Kunstharzbehälter (mit Kühlaggregat des Dielektrikums) und Rollenpumpe sind wichtige Einheiten der Werkzeugmaschine jeweils für die Aufbereitung und Zuführung des deionisierten Wassers des EDM-Prozesses.

**Bild 2** zeigt in Details den Bearbeitungsprozess einer Einspritzbohrung mit der Maschine AGIE Quadraton I. Die hochpräzise Positionierung des Werkzeuges in der Z-Maschinenachse wird mittels einer Keramikführung (Prisma) mit hohen Charakteristiken von Reibungswiderstand vergewissert. Oberhalb dieses Teiles aus Keramik befindet sich eine Führungsrolle aus Kupfer in Kontakt mit dem Material der Werkzeugelektrode und mit der Aufgabe des Transports von elektrischem Strom des Relaxationsgenerators für den Bearbeitungsprozess. Im Verlauf des Bearbeitungsprozesses befindet sich die Einspritzdüse in spezifischen Bearbeitungspositionen. Diese Positionen (z. B. Höhenwinkel) werden durch die Maschinensteuerung eingegeben und hängen noch von den konstruktiven Merkmalen dieser Düse ab.



**Bild 2:** Funkerosionsprozess einer Mikrobohrung in Einspritzdüse

Nr.	W	U	I	U-I	T	Sbox	P	Com	Gain	ACO
[-]	[mm]	[+/-]	[-]	[-]	[-]	[nF]	[-]	[%]	[%]	[-]
1	-0,2	+	1	9	1	30	9	30	8	0
2	-1,3	-	1	21	1	44	9	30	8	65
3	-1,6	-	1	21	1	44	9	30	8	65
4	-2,2	-	1	21	1	44	9	30	8	65
5	-2,55	-	1	21	1	44	9	30	8	65

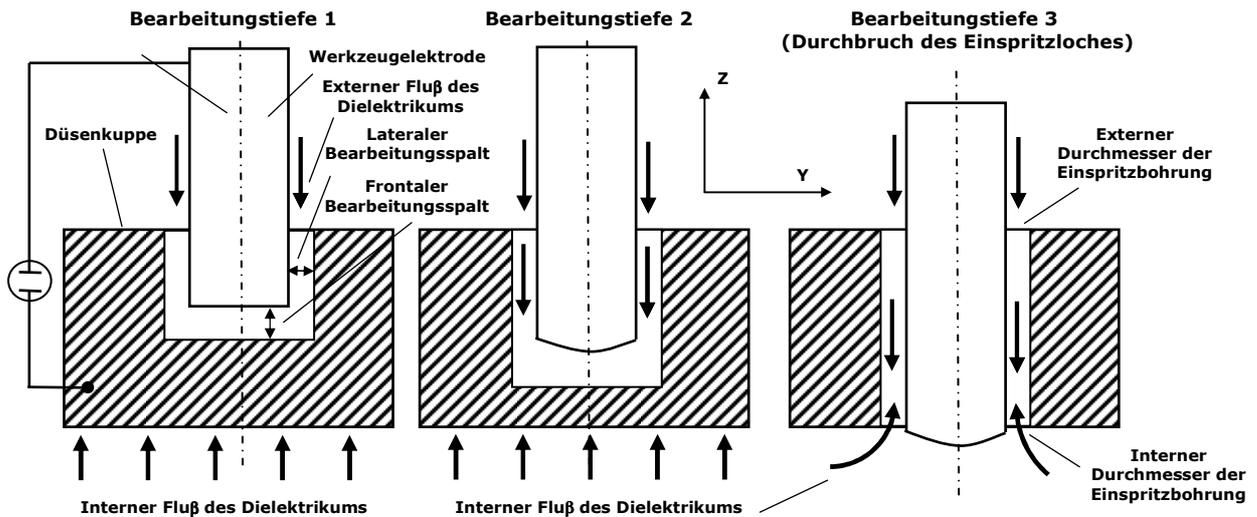
**Tabelle 1:** Einstellparameter des Relaxationsgenerators und der Regelungstechnik der Maschine AGIE Quadraton I

Bei einer Visualisierung des **Bildes 3** beschreibt man noch hier zwei Hauptmöglichkeiten von Verwendung des Arbeitsmediums für die Bearbeitung einer Bohrung: interner und externer Fluß des Dielektrikums durch die Einstellung der Rollenpumpe. Der externe Dielektrikumfluß wird an der lateralen Oberfläche der Werkzeugelektrode während des Bearbeitungsvorganges zugeführt und hat hier die technische Aufgabe der Eliminierung von Abtragsprodukten aus dem Bearbeitungsspalt, sodass elektrische Kurzschlüsse zwischen Elektroden vermieden werden können. Diese ungewünschte Prozessbedingung verursacht konstante Nachstellbewegungen des Werkzeuges unter Kontrolle der Regelungstechnologie, was in hohem Maße zu einer Steigerung der Bearbeitungszeit und dadurch zur Minimierung von der

funkerosiven Materialabtragsrate führt. Außerdem wird der interne Fluß des Dielektrikums durch die Einspritzdüse bis zur Düsenkuppe gefördert. Dieses Dielektrikumsvolumen wirkt im Bearbeitungsprozess nur beim Zeitpunkt des „Durchbruches“ des bearbeitenden Einspritzloches (**Bild 3**) und übt so eine wichtige Auswirkung auf die Dimension des internen Bohrungsdurchmessers aus. Das Volumen von internem Dielektrikum fließt immer gegen den externen Dielektrikumsfluß an der Werkzeuoberfläche.

**Tabelle 1** zeigt die Einstellparameter des Relaxationsgenerators und der Regelungstechnik der AGIE Quadraton I, die im Folgenden beschrieben werden:

- **Nr.:** Hierbei handelt sich es um eine maximale Gesamtanzahl von Gruppen von Prozessparametern, die



**Bild 3:** Detail des internen und externen Dielektrikumflusses beim EDM-Bearbeitungsprozess einer Einspritzbohrung

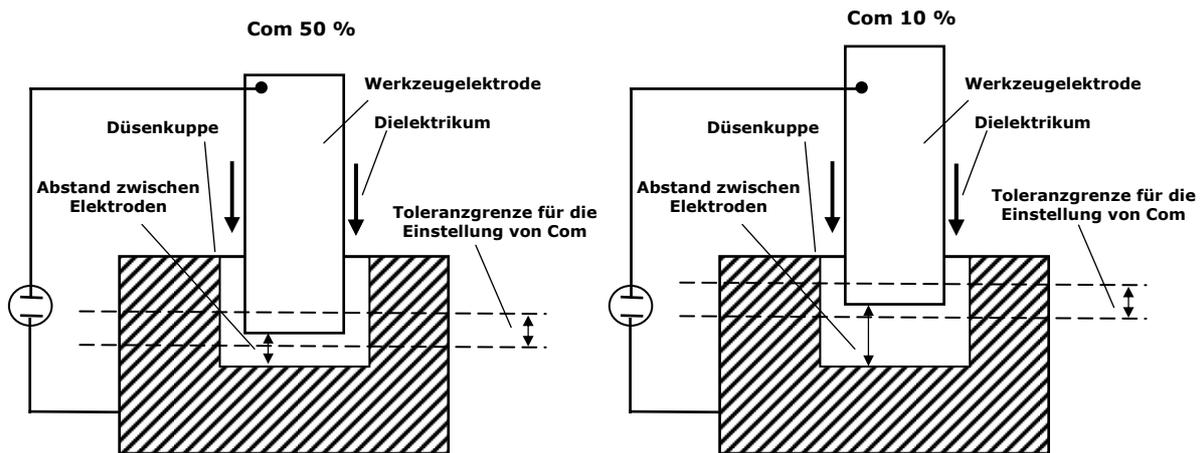
für Realisierung des Materialabtrages einer Mikrobohrung verwendet werden kann. Man modifiziert die Bearbeitungsparameter des Generators in Abhängigkeit einer bestimmten Bearbeitungstiefe der Werkzeugelektrode (in Funktion der Einstellung des Parameters „W“ in mm), sodass dadurch perfekte Optimierungen des Bearbeitungsprozesses einer Bohrung unter der Verbesserung der Prozessstabilität (z. B. durch eine Reduzierung elektrischer Kurzschlüsse) erzeugt werden können.

• **U (Polarität):** Dieser Parameter definiert die elektrische Polarität des Werkzeuges während des Bearbeitungsvorganges. Bei der Maschine AGIE Quadraton I arbeitet man normalerweise mit der positiven Werkzeugpolarität nur am Anfang der Bohrungsbearbeitung bis einer Bearbeitungstiefe von -0,2 mm, wobei dadurch ein „Abrichtprozess“ der Werkzeugspitze realisiert werden kann. Infolgedessen eliminiert man viele geometrische Ungenauigkeiten der Spitze der Werkzeugelektrode, die eine extrem negative Auswirkung auf die Bohrungsgeometrie ausüben können. Nach der elektronisch vorprogrammierbaren Beendigung dieses Abrichtprozesses gibt es automatisch eine hochschnelle Polaritätsinversion des Bearbeitungswerkzeuges, um die Bearbeitung der mikrometrischen Bohrung zu vervollständigen. Das Bearbeitungswerkzeug bewegt sich anschließend innerhalb des bearbeitenden Werkstückmaterials bis -2,55 mm mit Einsetzung von unterschiedlichen Parameter-

gruppen des Relaxationsgenerators, wodurch noch in großem Teil die Charakteristiken des Werkzeugverschleißes und die Materialabtragsrate des Werkstückes determiniert werden.

• **I (Strom des Kondensators):** Dieser Prozessparameter kontrolliert den totalen Aufladestrom des Kondensators des Relaxationsgenerators. Die Position 1, die in der **Tabelle 1** eingegeben wird, deutet darauf hin, dass die Generator Kondensatoren mit einer Kapazität in  $\mu\text{F}$  unter einem Totalstrom von 0,8 A (in einer bestimmten Zeitperiode) aufgeladen werden. Mit der Erhöhung dieses Totalstromes (bis zu einem Maximumwert von ca. 5,6 A) steigert man den energetischen Inhalt der elektrischen Entladung, was tendenziell in ganz spezifischen Prozesssituationen zu einem sehr hohem Werkzeugverschleiß und Materialabtrag führen kann. Die maximale Zeit des Aufladungsprozesses von einem Kondensator wird mittels des Generatorparameters „T“ (siehe hier **Tabelle 1**) festgelegt. Der Wert „1“ dieses Parameters bedeutet, dass dieser Aufladungsprozess in 0,4  $\mu\text{sec}$  stattfindet. Die Generatorparameter T und I sind verantwortlich für die Definition der Totalenergie einer Funkentladung, wobei folglich die technologische Fähigkeit von Werkstoffabtrag des Bearbeitungsprozesses kontrolliert wird.

• **P (Zeit zwischen elektrischen Entladungen):** Die Einstellung einer Zeitperiode zwischen



**Bild 4:** Funktionsweise der Werkzeugposition bei einer Reduzierung des Parameters Com

zwei Funkentladungen üblicherweise von wenigen Mikrosekunden ( $P$ ) ist fundamental für die Erreichung der korrekten Stabilität der Bohrungsbearbeitung als Folge der Generierung einer kleinen Anzahl von elektrischen Kurzschlüssen. Zu hohen Werten von  $P$  verschlechtert die Bearbeitungsstabilität infolge einer großen Kurzschlussmenge. Große Einstellwerte dieses Prozessparameters provozieren in den meisten Fällen die Heraufsetzung der Bearbeitungszeit für die komplette Bearbeitung eines Bohrloches. Dies hat als Konsequenz die Herabsetzung der Abtragsrate des EDM-Prozesses. Außerdem ändert man auch mit der Variation von  $P$  die Frequenz elektrischer Entladungen und infolgedessen die totale Rauheit der bearbeiteten Oberfläche einer Bohrung. Einstellungswert von  $P$  gleich „9“ entspricht einer Totalzeit von 13  $\mu\text{sec}$ , was dann eine jeweilige Frequenz elektrischer Entladungen des funkenerosiven Prozesses definiert.

• **Sbox (Kapazität des Kondensators):** Durch diese Einstellparameter kann eine Erhöhung oder die Reduzierung der elektrischen Kapazität einer Gruppen von Kondensatoren des Relaxationsgenerators erreicht werden. Hohe Werte von Sbox ermöglichen in der Praxis, dass in den Generatorkondensatoren eine sehr große Menge elektrischer Ladungen gespeichert werden kann. Die technische Möglichkeit einer kompletten Kondensatoraufladung bei einer spezifischen Kondensatorkapazität hängt noch von der gesamten Energie, die durch die Parameter „I“ und „T“ eingestellt werden kann, ab. Bei den Einstellungen von zu großen Kapazitätswerten in  $\mu\text{F}$

und kleinen Intensitäten von I und T existieren so Chancen von einem unkompletten Aufladungsprozess dieser elektronischen Komponenten, was bestimmte Effekte auf den Bearbeitungsvorgang einer Bohrung aufgrund von Änderungen der Totalenergie einer Funkentladung hervorgerufen werden kann. Ein Kondensator mit hoher akkumulierter Quantität von Elektrizität verursacht bei guten Bedingungen von hydraulischem Fluß des Arbeitsmediums im Bearbeitungsspalt die Steigerung der Materialabtragsrate des Werkstückes.

• **Com, Gain, ACO:** Diese Einstellvariablen der Regelungstechnologie der EDM-Werkzeugmaschine haben die Funktion von Einhaltung einer stabilen Prozessbedingung zwischen der Werkzeugelektrode und dem Werkstück im Verlauf des Bearbeitungsvorganges durch die Vermeidung von elektrischen Kurzschlüssen. Die technologisch exakte Optimierung von diesen Prozessvariablen hängt sicherlich von der jeweiligen Einstellbedingung der anderen Parameter des Relaxationsgenerators ab. Die Einstellvariable ACO (*Adaptive Control Optimization*) übt hier die Aufgabe einer Verbesserung der Funktionsweise einiger elektronischer Funktionen des Maschinengenerators bei einer entsprechenden Einstellung von Com und Gain aus. Durch den Generatorparameter „Com“ wird möglich eine präzise Justierung des Abstandes zwischen Werkstück- und Werkzeugelektrode, wodurch eine Erhöhung des Wertes dieses Parameters (beispielsweise von Com 10 % auf Com 50%) normalerweise eine Reduzierung von Elektrodenspalt bedeutet (**Bild 4**). Bei besonderen Situationen der EDM-

Bearbeitung erfolgen kleine ungewünschte Positionsabweichungen zwischen Elektroden außerhalb der mittels des Einstellparameters Com festgelegten Grenzen. Hier existiert so der Bedarf von einer hochschnellen Korrektur der Werkzeugposition, sodass Bearbeitungsinstabilitäten (vor allem Kurzschlussentstehung) eliminiert werden können. Die Geschwindigkeit dieses erforderlichen Korrekturprozesses wird durch die Einstellungscharakteristiken des Bearbeitungsparameters „Gain“ realisiert. Hohe Einstellwerten von Gain ermöglicht dem Werkzeug gemäß den technologischen Charakteristiken der Maschinenregelung eine rasche Bewegungsgeschwindigkeit, um dessen entsprechende Präzisionspositionierung relativ zur Werkstückoberfläche erneut einzuhalten.

### 3. Experimentelle Ergebnisse

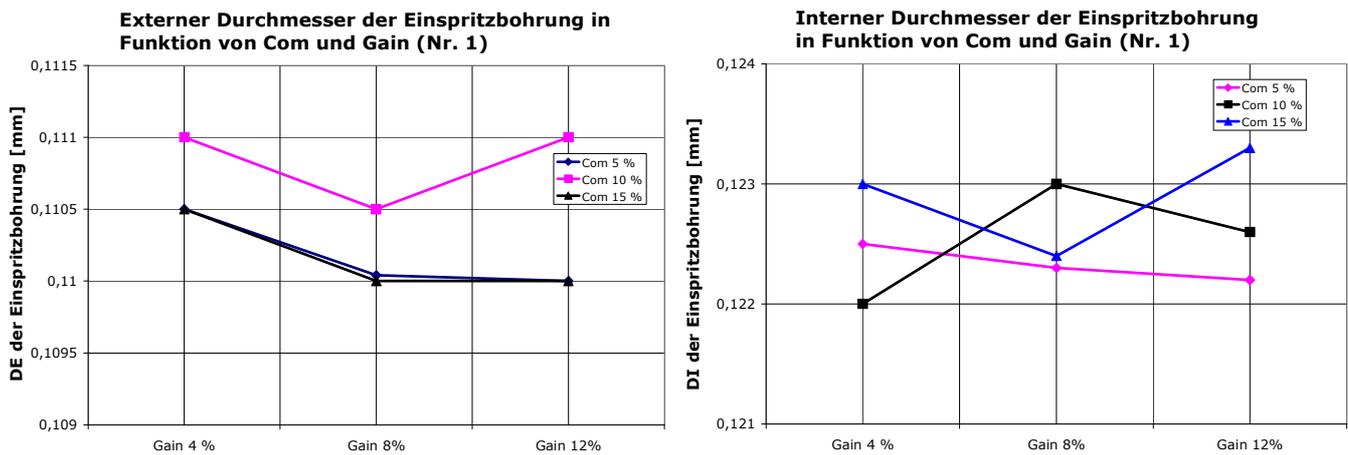
In der Sequenz dieses Artikels zeigt man wichtige Versuchsergebnisse, die unter der Variation der Parameter Com und Gain erzeugt wurden. Diese Parametervariation wurde bei der ersten und zweiten Linie von Parametern (jeweils Nr.1 und Nr.2, gemäß **Tabelle 1**) des Relaxationsgenerators der Maschine AGIE Quadraton I vorgenommen, wobei hierbei eine Analyse des externen (DE) und internen (DI) Durchmessers der bearbeitenden Einspritzbohrung (siehe auch **Bild 3** für die Identifizierung von diesen Bohrungsdurchmessern) durchgeführt wurde. In der ersten Versuchsgruppe (Nr. 1) erfolgte dann eine kontrollierte Modifizierung von Com in 5%, 10 % und 15 %, wobei der Versuchsparameter Gain in 4 %, 8% und 12 % variiert wurde (**Bild 5**). Für die Realisierung dieser Experimente verwendete man noch eine stabförmige Werkzeugelektrode mit Totdurchmesser von 0,085 mm aus Wolfram. Diverse Messungen dieses Durchmesserwertes mit der Einsetzung eines präzisen Lasermessgerätes bei der ganzen Werkzeuglänge (300 mm) vergewisserte so die Werkzeugqualität und infolgedessen eine hohe Zuverlässigkeit von Versuchsergebnissen. Dieser experimentelle Zuverlässigkeitsgrad wird noch durch die Benutzung einer optischen Messmaschine aus dem Hersteller „Mycrona“ für den Messprozess von Einspritzlöchern, die mittels der funkenerosiven Technologie hergestellt wurden, determiniert. Die Qualität dieses Messprozesses hängt

von der Nicht-Anwesenheit von irgendwelchen Verschmutzungen in der produzierten Einspritzbohrung ab. Eine ungeeignete Sauberkeit der Bohrungsoberfläche nach dem EDM-Bearbeitungsvorgang generiert starke optische Verzerrungen der Geometrie der messenden Bohrung, was folglich zu einer hohen Ungenauigkeit der Messwerte von Bohrungsdurchmessern führt. Die mathematische Differenz zwischen internem und externem Durchmesser eines Einspritzloches wird automatisch durch die Software der Mycrona-Maschine berechnet und als Bohrungskonizität definiert.

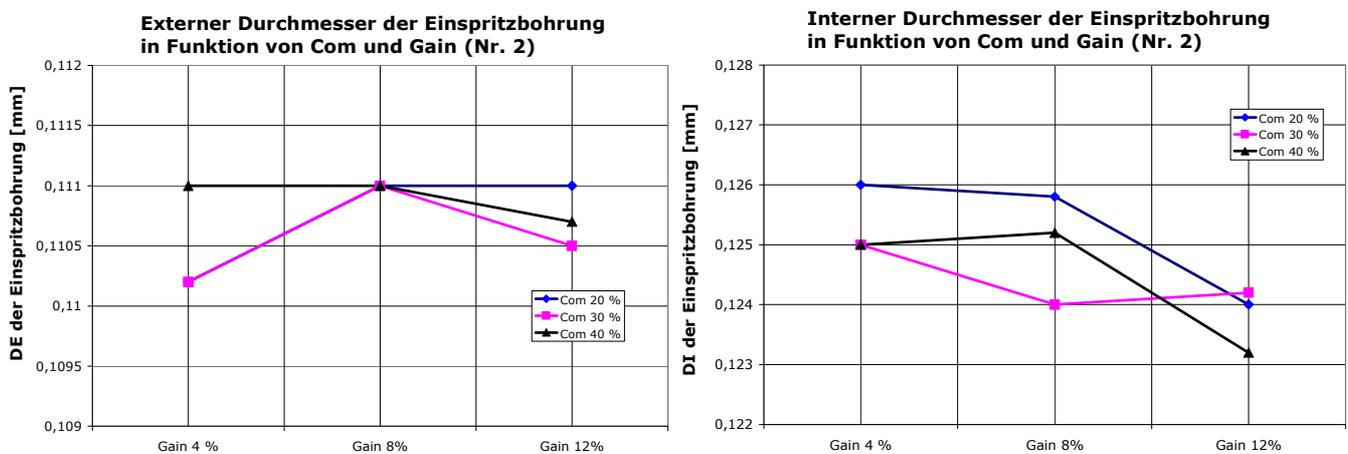
Die Resultate des **Bildes 5** zeigen eine signifikante Korrelation zwischen den Parametern Com und Gain bezüglich des Durchmessers der Einspritzbohrung. Beide Grafiken deuten darauf hin, dass für die Erreichung eines spezifischen internen und externen Bohrungsdurchmessers die Notwendigkeit einer Einstellung von Gain und Com in Kombination existiert. Sicherlich verursacht größere Werte von Gain in Wechselwirkung mit höheren Einstellwerten von Com eine Tendenz zur Generierung von Werkzeugvibrationen, wodurch eine merkliche Destabilisierung des EDM-Bearbeitungsprozesses eines Einspritzloches provoziert wird. Bei dieser Prozessbedingung kann häufiger mechanische Kontakte zwischen Werkzeugelektrode und Werkstück passieren, sodass viele elektrische Kurzschlüsse während des Bearbeitungsverlaufes entstehen können. Dies generiert dann konstante Nachstellbewegungen des Werkzeuges in der Z-Achse der Werkzeugmaschine, was folglich kleine Änderungen der Geometrie der bearbeitenden Bohrung

hervorrufen. Weiterhin erzeugen Modifizierungen der Einstellungen dieser Variablen der Maschinenregelung bestimmte Änderungen der Geometrie des Werkzeugverschleisses und infolgedessen Effekte auf die geometrischen Charakteristiken der bearbeitenden Bohrungsform, hauptsächlich infolge der reduzierten Dimension des Werkzeugdurchmessers der experimentellen Untersuchungen.

**Bild 6** zeigt erneut die starke Auswirkung der Variation von Gain und Com auf die Geometrie der internen und externen Durchmesserwerte von



**Bild 5:** Einfluß der Variation von Com und Gain auf den Durchmesser von Einspritzlöchern (Nr. 1)



**Bild 6:** Einfluß der Variation von Com und Gain auf den Durchmesser von Einspritzlöchern (Nr. 2)

von Einspritzbohrungen. Hierbei kann klar identifiziert werden, dass die Differenz zwischen diesen Durchmessern in ungefähr 15  $\mu\text{m}$  (Bohrungskonizität) sich befindet. In anderen Worten erzeugt man mit einer Werkzeugelektrode aus Wolfram mit Durchmesser von 85  $\mu\text{m}$  eine Totalkonizität von Einspritzbohrung größer als 10  $\mu\text{m}$ . Dieser Konizitätswert wird durch die Änderungen der Parameter Gain und Com innerhalb des experimentellen Variationsfeldes modifiziert. Für besondere konstruktive Projekte von Einspritzdüsen ist diese Konizitätssintensität total gewünscht, da sie spezielle Einflüsse auf den Einspritzvorgang von Kraftstoff in dem Motorzylinder ausübt. So ist extrem wichtig mittels des Versuchsergebnisses der **Bilder 5** und **6** die Identifizierung einer Parametereinstellung (von Com und Gain), die einen Produktionsprozess von Einspritzlöchern mit hoher Wiederholungsgenauigkeit zur Bohrungskonizität ermöglicht. Diese Genauigkeit vergewissert in einer Ferti-

gungslinie, dass eine sehr große Anzahl von Einspritzbohrungen mit dergleichen Geometrien infolge einer genauen Justierung von Gain und Com der EDM-Maschine AGIE Quadraton I hergestellt werden kann.

#### 4. Schlussfolgerungen

Die Informationen dieses Artikels deutete darauf hin, dass die Regelungstechnik der EDM-Maschine eine hohe Wichtigkeit bei der Durchmessergröße von funkenrodierten Bohrungen für Einspritzdüse ausübt. Eine ganz optimale Einstellung der Regelungsparameter für die Bearbeitung solcher Bohrlöcher kann nur durch intensive experimentelle Untersuchungen ermittelt werden, da normalerweise die hochkomplexe Funktionsweise der Maschinenregelung eine herstellereinspezifische Technologie ist. Die Reaktionsfähigkeit des Regulationssystems bei einer Prozessabweichung innerhalb des Bearbeitungsspaltes ist entscheidend für die Restabilizie-

rung von guten Bearbeitungsbedingungen zwischen Werkzeug und Werkstück, um eventuelle geometrische Ungenauigkeiten der bearbeitenden Bohrungsgeometrie oder sogar Veränderungen von oberflächlicher Bohrungsqualität zu vermeiden. Eine der großen Herausforderungen des Entwicklungsprozesses einer neuen Regelungstechnologie für die Herstellung von Mikrobohrungen für die Einspritztechnik ist die Möglichkeit von Realisierung eines Bearbeitungsprozess mit einer erheblichen Bearbeitungsstabilität. Aus diesem Grund erhöht man die Produktionsqualität von Einspritzdüsen, wodurch folglich ein hoher Prozessfähigkeit-Index ( $c_p$  und  $c_{pk}$ ) in einer Fertigungslinie erreicht werden kann.

Die Experimente dieser Arbeit identifizieren Grenzen bezüglich der Herstellungstechnologie von mikrometrischen Bohrungen durch die Funkerosion, vor allem infolge der kleinen Dimensionen der Werkzeug-elektrode. Die Schwierigkeit für die korrekte Handhabung und Positionierungseinstellung eines Werkzeuges mit einem Durchmesser von  $85\ \mu\text{m}$  im mechanischen Fixierungssystem der EDM-Werkzeugmaschine definiert hohe technische Barriere zur Möglichkeit der Produktion in Serie von Einspritzlöchern mit Durchmessern kleiner als  $100\ \mu\text{m}$ . Die optimale Einsatzbereich des EDM-Verfahrens für Einspritzdüse befindet sich für Bohrungsdurchmesser zwischen  $100$  bis  $500\ \mu\text{m}$ . Der Bearbeitungsprozess von Einspritzbohrungen mit Totaldurchmessern größer als  $500\ \mu\text{m}$  führt zu hohen Prozesszeiten, was in allen Fällen eine unerwünschte Erhöhung der Fertigungskosten in der Produktionslinie einer Industrie verursacht.

### **Literatur**

- [1] Vicente, M. de C. El motor diesel en el automovil. Ediciones ceac. Barcelona, 1987.
- [2] Kreith, F. Mechanical Engineering Handbook. CRC Press LLC, 1999.
- [3] Souza, A. Otimização do processo de microfuração por eletroerosão de bicos injetores. Master of Science Dissertation, Universidade Federal de Santa Catarina, Brasilien, 2000