

# Untersuchung von Gleitentladungen und deren Modellierung durch Funkengesetze im Vergleich zu Gasentladungen

Dipl.-Ing. Lutz Müller, Prof. Dr.-Ing. Kurt Feser  
Institut für Energieübertragung und Hochspannungstechnik, Universität Stuttgart  
Dr. Wolfgang Hiller, Dipl.-Ing. Edwin Fauser  
Robert Bosch GmbH, Stuttgart

## 1 Einleitung

Durch Materialtrennung, strömende Flüssigkeiten oder elektrische Felder können isolierte Oberflächen schnell beträchtlich aufgeladen werden. Eine Folge davon können dielektrisch behinderte Entladungen sein. Dies sind lokal begrenzte Gasentladungen zwischen Festkörperoberflächen, von denen mindestens eine isolierend ist. Diese impulsförmigen Entladungen lassen sich durch Entladungsvorgänge im Gasraum und durch Oberflächenentladungen (Gleitentladungen) beschreiben.

Um genauere Kenntnis über die Gesetzmäßigkeiten der Entladung zu erlangen, muß untersucht werden, wie sich Ladungen auf dielektrischen Oberflächen unter Einwirkung von elektrischen Feldern verhalten. Hierbei ist die sich an die Zündungsphase anschließende Phase der Entladung von besonderer Bedeutung. Der zuvor sehr hohe Oberflächenwiderstand wird klein und es entsteht für kurze Zeit ein leitfähiger Kanal. Für die Betrachtung der Störenergie bei ESD ist besonders das erste Strommaximum sowie der Verlauf der ersten Halbperiode von Interesse. Dieser Zusammenhang wird für den Gasdurchschlag durch Funkengesetze beschrieben. In diesem Beitrag wird untersucht, wie Gleitentladungen durch Funkengesetze modelliert werden können.

## 2 Versuchsanordnung

Als Testwerkstoff wird Leiterplattenmaterial (FR4) mit einer Dicke von 1,5 mm verwendet. Auf einer Seite der Leiterplatte befinden sich die geätzten Elektroden, die von der Form her einer 2 mm breiten Leiterbahn entsprechen. Die Leiterbahn ist in der Mitte aufgetrennt und stellt das Entladungsgebiet dar. Diese Prüflinge wurden für Abstände von 0,2 mm bis 6 mm realisiert (Bild 1). Die Rückseiten der Prüflinge sind einmal mit Kupfer und einmal ohne Kupfer ausgeführt. Die Ersatzschaltung des Versuchsaufbaus ist im Bild 2 zusehen. Über

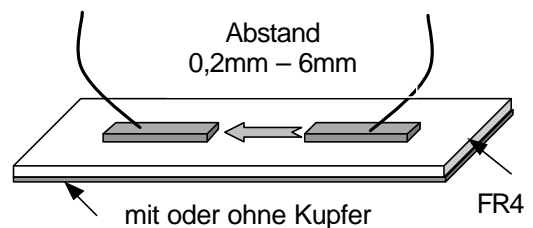


Bild 1: Prüflingsaufbau

Die Rückseiten der Prüflinge sind einmal mit Kupfer und einmal ohne Kupfer ausgeführt. Die Ersatzschaltung des Versuchsaufbaus ist im Bild 2 zusehen. Über

einen hochohmigen Widerstand wird eine Kapazität aufgeladen, die parallel zur Entladungsstecke liegt. Die so an die Elektroden angelegte Spannung wird erhöht, bis es zu Gleitentladungen (Überschlägen) kommt. Im Falle der leitfähigen Rückseite wurde diese mit Masse verbunden.

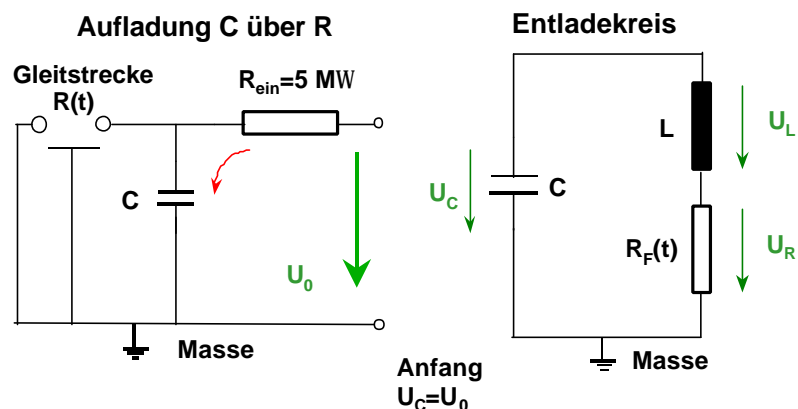


Bild 2: Ersatzschaltung

Nach der Zündphase entlädt sich die Kapazität über den Funkenwiderstand und die Leitungsinduktivität (Bild 2 rechts). Aufgezeichnet wurden der Stromverlauf durch den Funkenwiderstand mit Hilfe einer Stromzange an der masseseitigen Elektrode sowie die Spannung an der Kapazität mit einem Hochspannungstastkopf.

### 3 Betrachtung der Durchbruchspannung

Zur Ermittlung des Verlaufes der Durchbruchspannung bei Gleitentladungen wurden bei jedem Abstand 10 Messungen mit positiver und negativer Polarität aufgenommen. Um gleichmäßige Ausgangsbedingungen zu erreichen, wurde vor jeder Messung die durch die Entladung aufgeladene Oberfläche entladen. Mit einem elektrostatischen Voltmeter wurde dies kontrolliert. Weiterhin ist zwischen leitfähiger Rückseite, an Masse gelegt, und nichtleitfähiger Rückseite unterschieden worden.

Die 10 Messungen wurden gemittelt. Die so entstehenden Kurven sind im Bild 3a für negative und im Bild 3b für positive Spannungen zu sehen. Die Darstellung der Minimumkurve sowie der Maximumkurve zeigt die Streuung der Meßwerte, die bei negativer Spannung kleiner ist. Als Vergleich zum Gasdurchschlag im homogenen Feld ist die Durchbruchspannung nach Paschen mit dargestellt.

Ein Vergleich der Kurven von positiver und negativer Spannung zeigt keine signifikanten Unterschiede (Bild 4a). In Bild 4b sind die Kurven für Prüflinge mit und ohne leitfähiger Rückseite gegenübergestellt. Dem geringen Unterschied bei positiver Spannung steht nahezu kein Unterschied bei negativer Spannung (nicht dargestellt) entgegen. Die gewählte verhältnismäßig große Dicke des Dielektrikums (1,5 mm) kann ein Grund sein, weshalb sich beide Fälle kaum unterscheiden. Um eine Aussage machen zu können, sind Messungen bei anderen Dicken nötig.

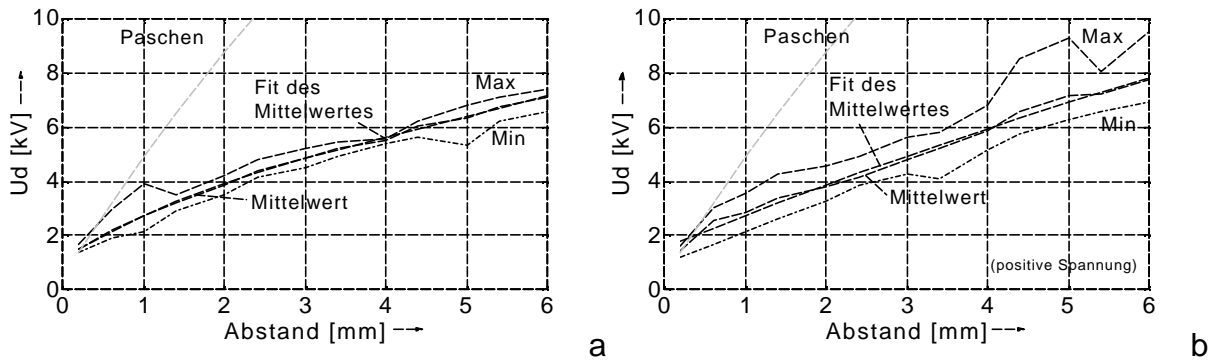


Bild 3: Durchbruchspannung für Prüflinge mit leitfähiger Rückseite  
a für negative b für positive Spannung

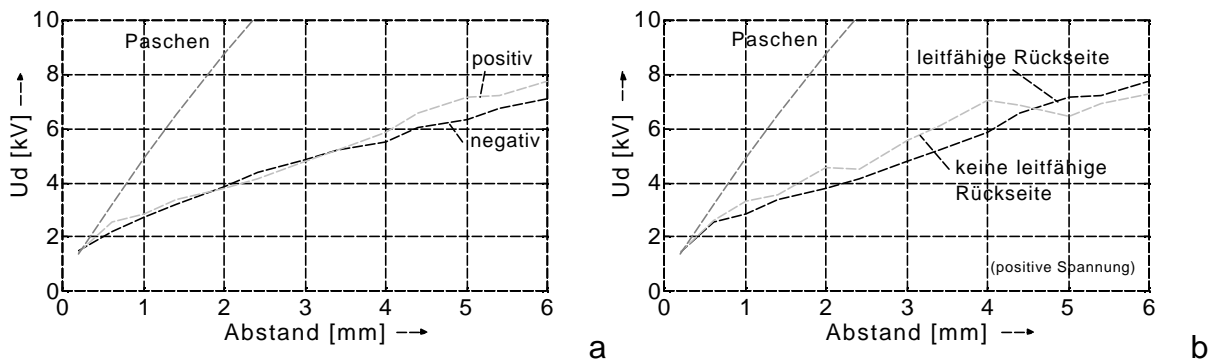


Bild 4: a Vergleich der Kurven für positive und negative Polarität  
b Vergleich der Kurven für Prüflinge mit und ohne leitfähiger Rückseite

## 4 Modellierung des Stromverlaufes

### 4.1 Normierung

Zur übersichtlicheren Beurteilung der Meßdaten werden alle den Entladungsvorgang beschreibenden Größen normiert. Die Zündspannung  $U_0$  am Kondensator ist Bezugsgröße für alle Spannungen. Der Strom wird auf den virtuellen Stromscheitelwert bezogen (vgl. [1]), sowie die Zeit auf die Periodendauer, die durch die am Entladeschwingkreis (Bild 2) beteiligten Elemente hervorgerufen wird.

$$y = \frac{i(t)}{U_0 \cdot \sqrt{C/L}} \quad (1)$$

$$\tau = \frac{t}{2\pi \cdot \sqrt{LC}} \quad (2)$$

## 4.2 Modellierung mit PSpice

Im einfachsten Fall kann die in Bild 2 dargestellte Ersatzschaltung mit dem Schaltungssimulationsprogramm PSpice berechnet werden. Für den veränderlichen Widerstand wird in PSpice das Element "switch tclose" verwendet. Dieses Element besitzt die Eigenschaft, den Widerstand  $R_{open}$  zum Zeitpunkt  $t_{close}$  mit einer Übergangszeit  $t_{trans}$  in den Widerstand  $R_{closed}$  zu überführen (Bild 5). Dies entspricht dem zusammenbrechenden Widerstand des Funkenkanales. Über die Variation der Eigenschaften  $t_{trans}$  und  $R_{close}$  kann die Anpassung an den gemessenen Stromverlauf erreicht werden. Als weitere Kenngrößen müssen  $L$  und  $C$  sowie die Spannung  $U_0$  bekannt sein.

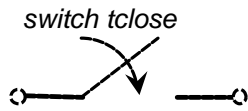


Bild 5: PSpice-Element switch tclose

Außerdem sind in diese Berechnung recht einfach zusätzliche, im Idealfall vernachlässigte, Eigenschaften der Meßanordnung mit einzubinden, wie z.B. die Ersatzschaltung des Tastkopfes oder die Kapazität der Prüflingelektroden gegen Masse. Im Bild 6 ist an einem Beispiel die Simulation eines Stromverlaufes im Vergleich zu den gemessenen Werten zu sehen.

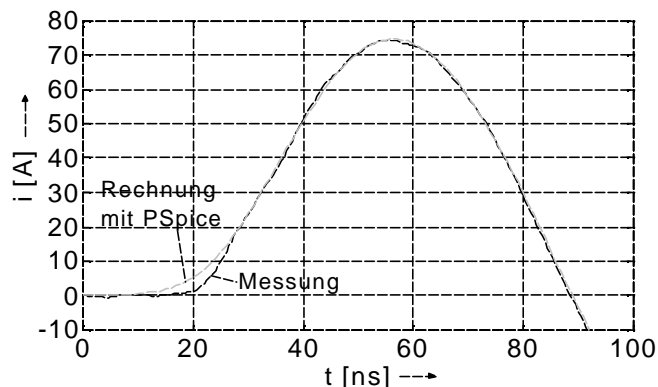


Bild 6: Vergleich PSpice-Berechnung und Messung am Beispiel Abstand 3 mm  
 $U_0=4,480\text{kV}$ ,  $C=410\text{pF}$ , positive Spannung

Mit dem PSpice-Element switch tclose gibt es eine einfache Möglichkeit, den Verlauf des Entladestromes bei Gleitentladungen zu simulieren bzw. in eine äußere Beschaltung einzubeziehen.

## 4.3 Modellierung mit Funkengesetzen

Das Prinzip der Entladungsentwicklung auf einer dielektrischen Oberfläche ist ähnlich der Streamerentwicklung im Gasraum [2]. Aus diesem Grund wird untersucht,

ob mit den bekannten Funkengesetzen für Gase nach Toepler, Rompe und Weizel sowie Braginskii (Gleichung 3-5) auch Gleitentladungen zu beschreiben sind.

### Toepler

### Rompe und Weizel

### Braginskii

$$R_F(t) = k \cdot s / \int_0^t i(t) dt \quad (3) \quad R_F(t) = s / \sqrt{2a \cdot \int_0^t i(t)^2 dt} \quad (4) \quad R_F(t) = s / \pi b^2 \kappa \cdot \int_0^t i(t)^{\frac{2}{3}} dt \quad (5)$$

Aus der Spannungsgleichung des Entladeschaltkreises nach Bild 2 ergibt sich folgender Funkenwiderstand.

$$R_F(t) = \left( U_0 - 1/C \cdot \int_0^t i(t) \cdot dt - L \cdot di(t)/dt \right) / i(t) \quad (6)$$

Nach [1] ist der Vergleich von Funkengesetzen bei der Lösung der Differentialgleichung des Entladeschaltkreises in der Form "Strom als Funktion der Zeit" am besten möglich. Für den Funkenwiderstand  $R_F$  in Gl.(6) wird jeweils das Funkengesetz nach Gl. (3-5) eingesetzt. Die so entstehenden Beziehungen werden mit Gl. (1) und (2) normiert und ergeben folgende Beziehungen.

Gesetz von Toepler:

$$dy/d\tau = 2\pi - 4\pi^2 \cdot \int_0^t y \cdot d\tau - \alpha \cdot y / \int_0^t y \cdot d\tau \quad \text{mit} \quad \alpha = \frac{s}{U_0} \cdot k / \sqrt{LC} \quad (7)$$

Gesetz von Rompe und Weizel:

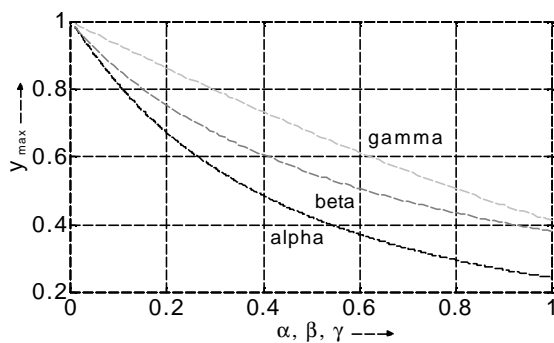
$$dy/d\tau = 2\pi - 4\pi^2 \cdot \int_0^t y \cdot d\tau - \beta \cdot y / \sqrt{\int_0^t y^2 \cdot d\tau} \quad \text{mit} \quad \beta = \frac{s}{U_0} \cdot \sqrt{2\pi} / \sqrt{2a \cdot \sqrt{LC}} \quad (8)$$

Gesetz von Braginskii:

$$dy/d\tau = 2\pi - 4\pi^2 \cdot \int_0^t y \cdot d\tau - \gamma \cdot y / \int_0^t y^{\frac{2}{3}} \cdot d\tau \quad \text{mit} \quad \gamma = \frac{s}{U_0} \cdot (U_0 \cdot \sqrt{C/L})^{\frac{1}{3}} / (\pi b^2 \kappa \cdot \sqrt{LC}) \quad (9)$$

Hierbei stellen  $\alpha$ ,  $\beta$  und  $\gamma$  die modifizierten Funkenkonstanten dar (vgl. [1]), die neben der Funkenkonstanten selbst noch  $L$ ,  $C$  sowie  $s/U_0=1/E_0$  enthalten. Die obigen Differentialgleichungen werden numerisch gelöst. Die Gleichungen sind nicht für den Anfangsbereich der Entladung lösbar, da die Funkengesetze für diesen nicht gelten. Deshalb müssen Anfangswerte für die DGL's anderweitig bestimmt werden [1]. Hier erfolgt dies durch einen Polynomfit des gemessenen Anfangstromes. Als Ergebnis erhält man den normierten zeitlichen Stromverlauf in Abhängigkeit von den

Kreisparametern C und L, der mittleren Zündfeldstärke sowie der normierten Funkenkonstante.



In Abhängigkeit von den normierten Funkenkonstanten wird der Stromverlauf berechnet, und das Maximum des Stromes über den normierten Funkenkonstanten aufgetragen. Mit dieser Funktion kann für jede gemessene Stromkurve eine normierte Funkenkonstante ermittelt werden, die das Maximum des Stromes nachbildet.

Bild 7: Normierter maximaler Strom  $y_{\max}$  in Abhängigkeit von den Funkenkonstanten

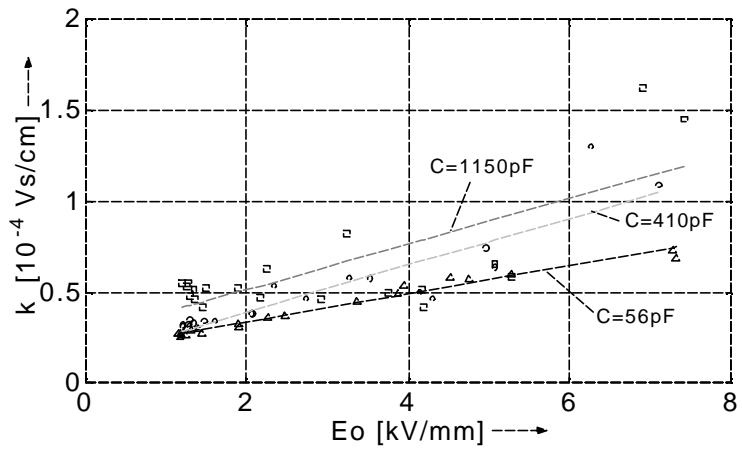
Um den Stromverlauf zu erhalten, muß die DGL mit den ermittelten Funkenkonstanten berechnet werden. Durch Variation des Übergangzeitpunktes von Anfangsstromfit zu funkengesetzbeschreibender DGL wird die berechnete Kurve solange zeitlich verschoben, bis der Zeitpunkt des gemessenen und berechneten Strommaximums übereinstimmt. Damit ist auch der Gültigkeitsbeginn des jeweiligen Funkengesetzes gegeben.

## 5 Auswertung und Ergebnisse

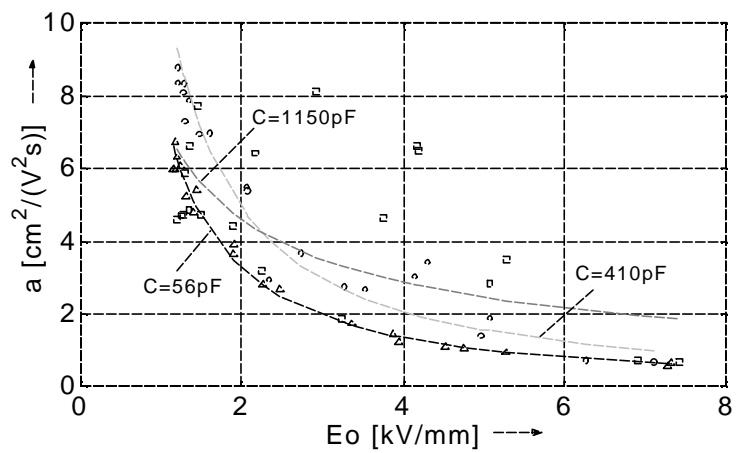
Die Messungen zur Ermittlung der Stromverlaufes wurden für drei Kapazitäten (56pF, 410pF und 1150pF) durchgeführt. Dabei ergaben sich Eigenfrequenzen von 5 bis 22 MHz. Die Änderung des Abstandes führte zu mittleren Zündfeldstärken von 1,1 kV bis 7,5 kV. Der maximale Entladestrom bewegt sich zwischen wenigen A und 250 A.

In Anlehnung an [1] werden die sich ergebenden Funkenkonstanten über der mittleren Zündfeldstärke aufgetragen (Bild 8). Bei allen drei Funkengesetzen ist eine Abhängigkeit von der Kapazität zu erkennen. Die Streuung der Meßwerte ist bei  $C=56\text{pF}$  am kleinsten. Dabei muß bemerkt werden, daß die größeren Kapazitäten niedrigere Resonanzfrequenzen aufweisen, und somit keine idealen Kapazitäten darstellen.

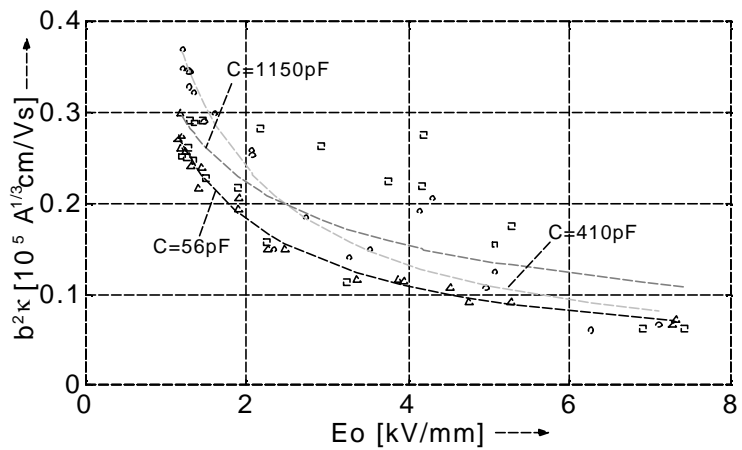
Im Vergleich zu [1] (Darstellung der Funkenkonstanten beim Gasdurchschlag) ist die Tendenz der Funkenkonstanten über der mittleren Zündfeldstärke ähnlich. Beim Toeplerschen Gesetz sind die absoluten Werte etwa gleich (beim Gasdurchschlag ca.  $0,45$  bis  $0,7 \cdot 10^{-4}$  Vs/cm bei  $1,4$  bis  $3,2$  kV/mm). Die Werte der Funkenkonstanten sind beim Gesetz von Rompe und Weizel größer und beim Gesetz von Braginskii kleiner.



a) Toepler



b) Rompe und Weizel



c) Braginskii

Bild 8: Abhängigkeit der Funkenkonstanten von der mittleren Zündfeldstärke  
 gemittelte Meßwerte :  $\Delta$   $C=56$  pF,  $\circ$   $C=410$  pF,  $\ddot{y}$   $C=1150$  pF  
 Trendlinien : durchgezogene Kurven

Wie auch beim Gasdurchschlag wird der zeitliche Verlauf des Stromes bei Gleitentladung neben der Zündfeldstärke durch die Eigenfrequenz des Entladekreises bestimmt. Hierbei ist die Kapazität mit ihren nicht idealen Eigenschaften von wesentlicher Bedeutung.

Wie unter 4.3. beschrieben, kann der Stromverlauf durch die Funkengesetze durch Variation des Gültigkeitsbeginns angenähert werden. Bild 9 zeigt dies an einem Beispiel für verschiedene Gültigkeitsgrenzen  $y_g$ .

a) Toepler

b) Rompe Weizel

c) Braginskii

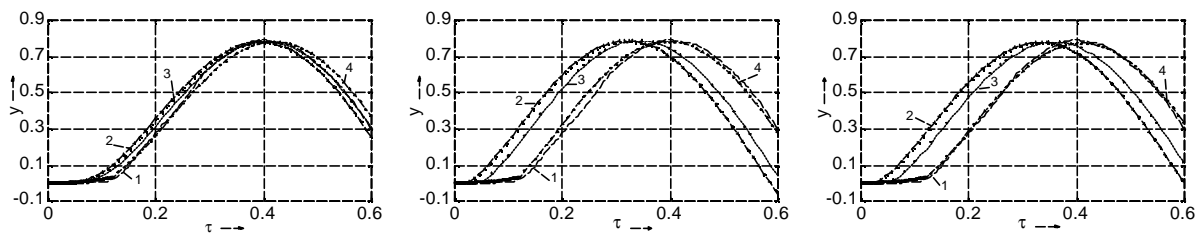


Bild 9: Vergleich von einem gemessenen und berechneten Stromverlauf einiger Gültigkeitsgrenzen 1 Messung; 2  $y_g=0.015$ ; 3  $y_g=0.05$ ; 4  $y_g=0.12$

## 6 Zusammenfassung

Die Durchbruchspannung bei Gleitentladungen wurde untersucht. Dabei ergaben sich bei der gewählten Anordnung keine signifikanten Unterschiede zwischen positiver und negativer Spannung, sowie mit und ohne leitfähiger Rückseite der Leiterplatte.

Ein einfacher Weg zur Modellierung der Entladungsströme ist mit PSpice gegeben. Sucht man eine Gesetzmäßigkeit, so ist die Beschreibung mit Funkengesetzen möglich. Die ersten Messungen zeigen eine ähnliche Tendenz der Feldstärkeabhängigkeit der Funkenkonstanten wie beim Gasdurchschlag. Die Werte der Funkenkonstanten sind bei Toepler etwa gleich groß, bei Rompe und Weizel größer und bei Braginskii kleiner.

Der Stromverlauf kann mit allen drei Gesetzen gut nachgebildet werden.

## 7 Literaturverzeichnis

- [1] K.Möller: *Ein Beitrag zur experimentellen Überprüfung der Funkengesetze von Toepler, Rompe-Weizel und Braginskii*. ETZ-A Band 92 (1971) Heft 1.
- [2] Roland Richter: *Zum Verhalten von Oberflächenentladungen bei der Ozonerzeugung*. Dissertation TH Aachen 1996