

Wirkungsweise der Unterbrecherzündung

Ziel der folgenden Ausführungen ist, die Wirkungsweise der herkömmlichen Batteriezündung mit Unterbrecherkontakt anhand von simulierten Strom- und Spannungsverläufen anschaulich darzustellen.

Die unbedingt nötigen Elemente für diese Betrachtungen sind im **Bild 1** dargestellt (vgl. auch „MZ-Elektrik“ Bild A.4-4 „Minimalzündung“). Im einzelnen sind dies:

Der **Zünd-Kondensator** C1 parallel zum **Unterbrecherkontakt**, er weist üblicherweise eine Kapazität von $0,22\ \mu\text{F}$ auf.

Die **Zündspule** hat in der 6-V-Ausführung von Klemme (15) nach (1) einen Wicklungswiderstand R1 von etwa $1,5\ \Omega$ in Reihe mit der Primärinduktivität L1 von $4\ \text{mH}$. Sekundärseitig haben wir zwischen Klemme (15) und dem Zündkabelanschluss (6) einen Wicklungswiderstand R2 von $7,5\ \text{k}\Omega$ in Reihe mit der Sekundärinduktivität L2 von $22\ \text{H}$. Die Werte für die Zündspule wurden aus Messungen an verschiedenen Exemplaren gemittelt. Beide Wicklungen in der Zündspule sind durch einen Eisenkern magnetisch miteinander verkoppelt (Transformator).

Das angeschlossene **Zündkabel** wird durch die kleine Kapazität C2, deren Wert für unsere Betrachtung zum Verhalten im Primärkreis kaum Einfluss hat, nachgebildet.

Die **Batterie** hat im Fahrbetrieb eine Spannung von 7V und einen für Bleiakkus realistischen Innenwiderstand von $50\ \text{m}\Omega$.

Das Schaltungsmodell wird im Folgenden mit dem **Netzwerk-Analyse-Programm PSPICE** simuliert.

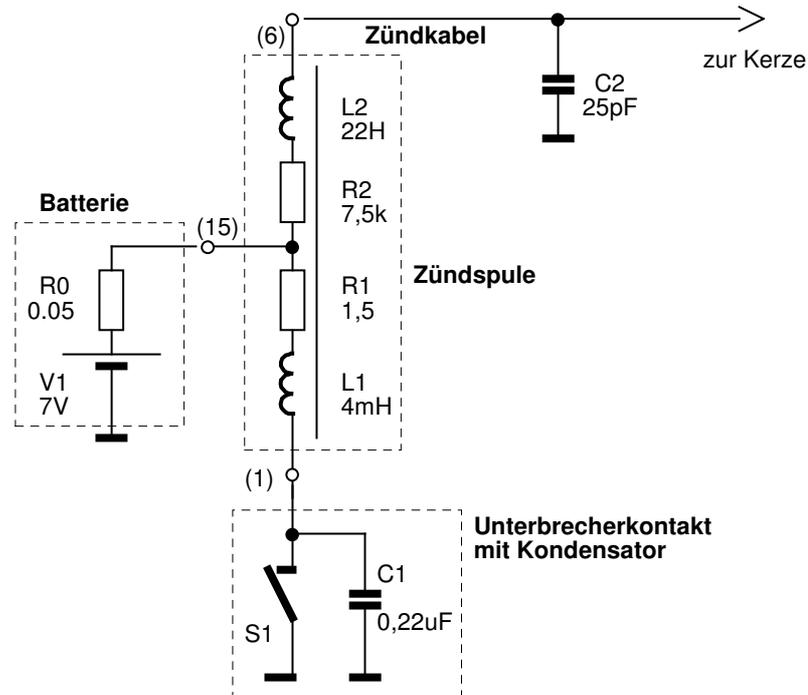


Bild 1: Minimal erforderliche Elemente für Batterie-Zündsystem mit Unterbrecherkontakt

Magnetische Aufladung der Zündspule

Erreicht der Kolben den unteren Totpunkt (UT), wird der Unterbrecherkontakt geschlossen. Über der Primärwicklung L1/R1 der Zündspule liegt zwischen den Klemmen (15) und (1) Batteriespannung an.

Die Induktivität L1 verzögert jedoch den Anstieg des Stromflusses, wie im **Bild 2** zu erkennen ist. Erst nach einer Zeitdauer von über 10ms wird der maximal mögliche Primärstrom $I_{L1} = 7V / 1,55 \Omega = 4,5 A$ annähernd erreicht. Mit anwachsendem Stromfluss entsteht im Eisenkern der Zündspule ein Magnetfeld, das solange erhalten bleibt, wie der Strom I_{L1} fließt. Man bezeichnet diese Phase daher auch als „magnetische Aufladung“ der Zündspule.

Da für die magnetische Aufladung nur eine halbe KW-Umdrehung an Zeit zur Verfügung steht (entspricht einem Kontakt-Schließwinkel von 180°), darf eine KW-Umdrehung nicht kürzer als $2 \times 5,8 \text{ ms}$ dauern, um wenigstens 90 % der vollen Aufladung zu erreichen. Das ergibt eine KW- Drehzahl von höchstens 5200 min^{-1} .

Bei 7000 min^{-1} dauert eine KW-Umdrehung $8,6 \text{ ms}$, damit werden in $4,3 \text{ ms}$ nur 80% der maximalen Aufladung erreicht, was aber erfahrungsgemäß zur sicheren Funktion der Zündung ausreicht.

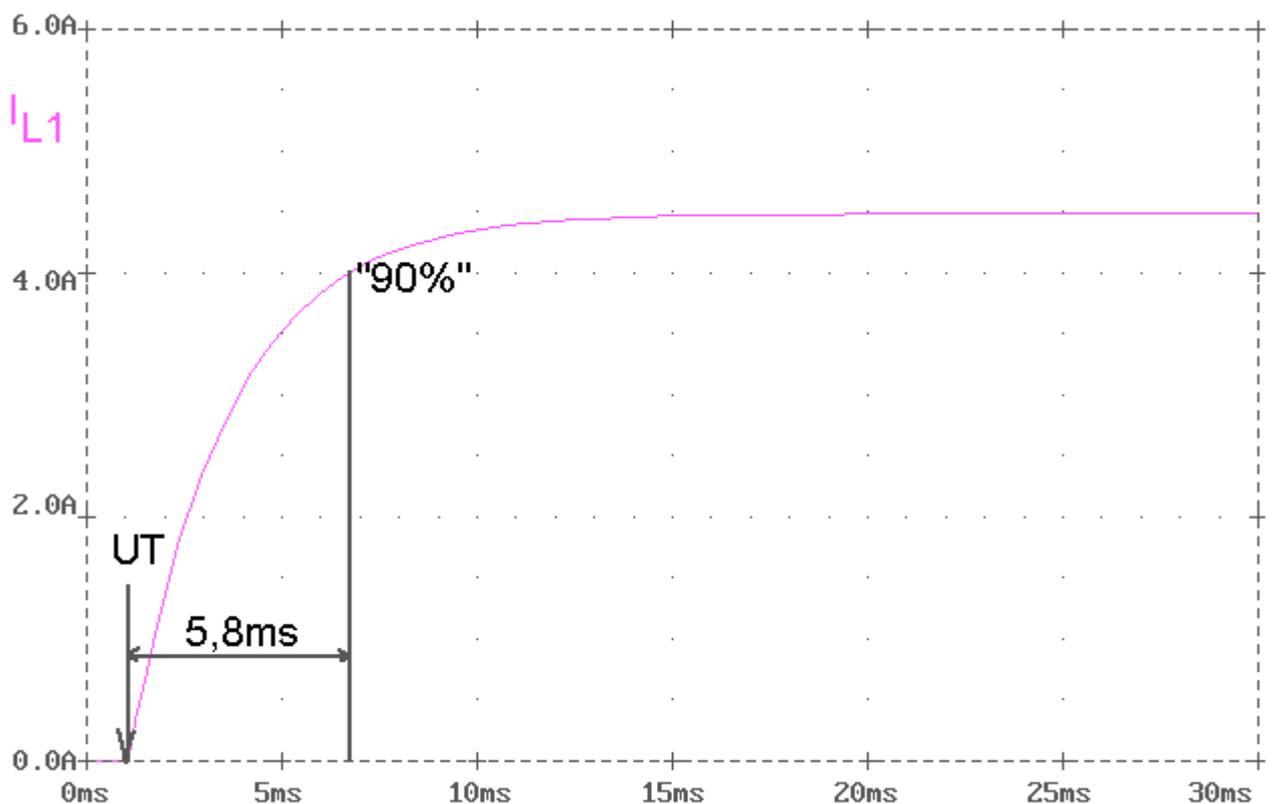


Bild 2: Strom durch die Primärwicklung L1/R1 nach Schließen des Unterbrecher-Kontaktes

Interessant ist, dass beim Schließen des Kontaktes im UT eine kurze positive Spannungsspitze von etwa 500 V am Zündkabelanschluss (6) erzeugt wird, die jedoch keinesfalls ausreicht, um einen Funken an der Kerze zu bewirken. Der zeitliche Spannungsverlauf am Anschluss (6) ist im **Bild 3** dargestellt.

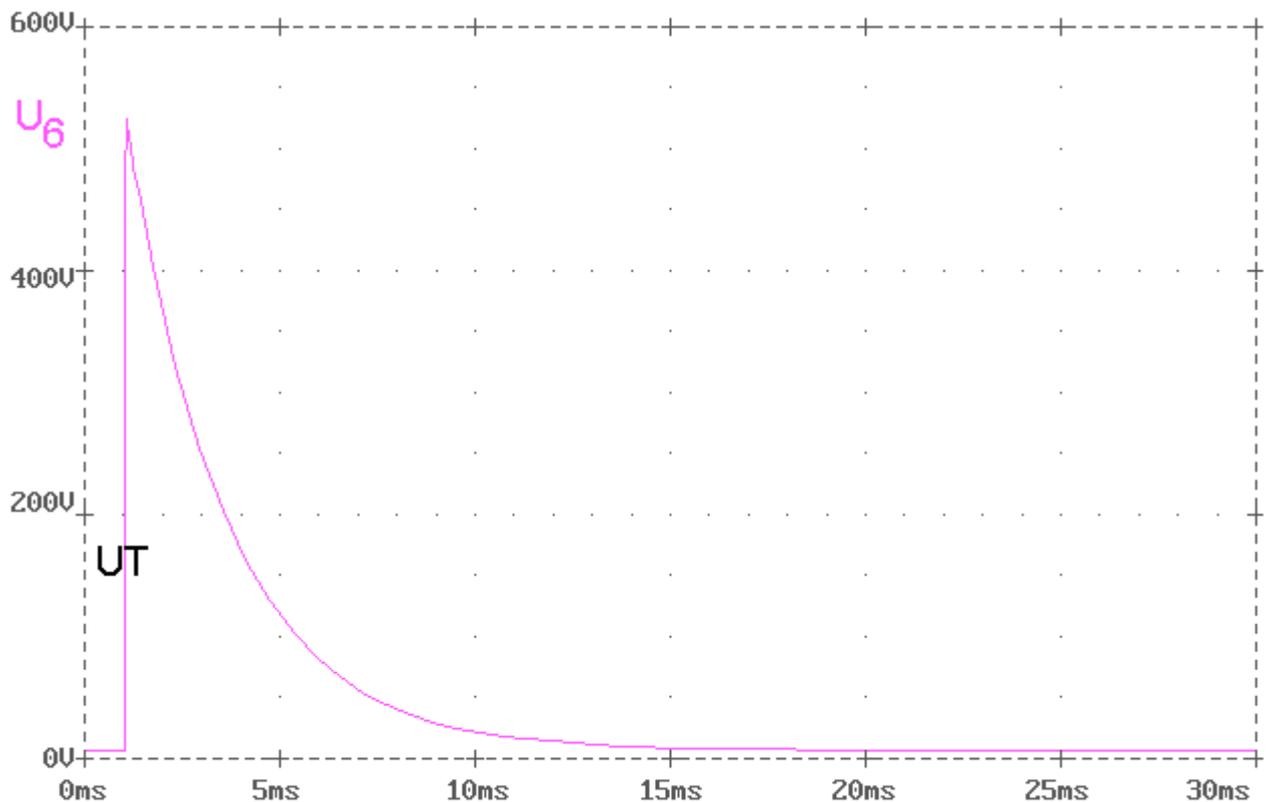


Bild 3: Positive Spannungsspitze beim Schließen des Kontaktes am Zündkabelanschluss (6)

Verhalten zum Zündzeitpunkt

Kurz vor dem oberem Totpunkt (OT) öffnet der Unterbrecherkontakt. Im **Bild 4** entspricht dies dem Zeitpunkt bei 1 μ s. Der Strom durch die Induktivität der Primärwicklung (magenta-farben), welcher anfangs durch den U-Kontakt nach Masse abfloss, darf sich auf Grund physikalischer Gesetze nicht sprunghaft ändern. Er wird nach Kontaktöffnung vom Kondensator aufgenommen (Magenta und Türkis ergeben in der identischen Überdeckung im Simulationsdiagramm eine blaue Kurve)

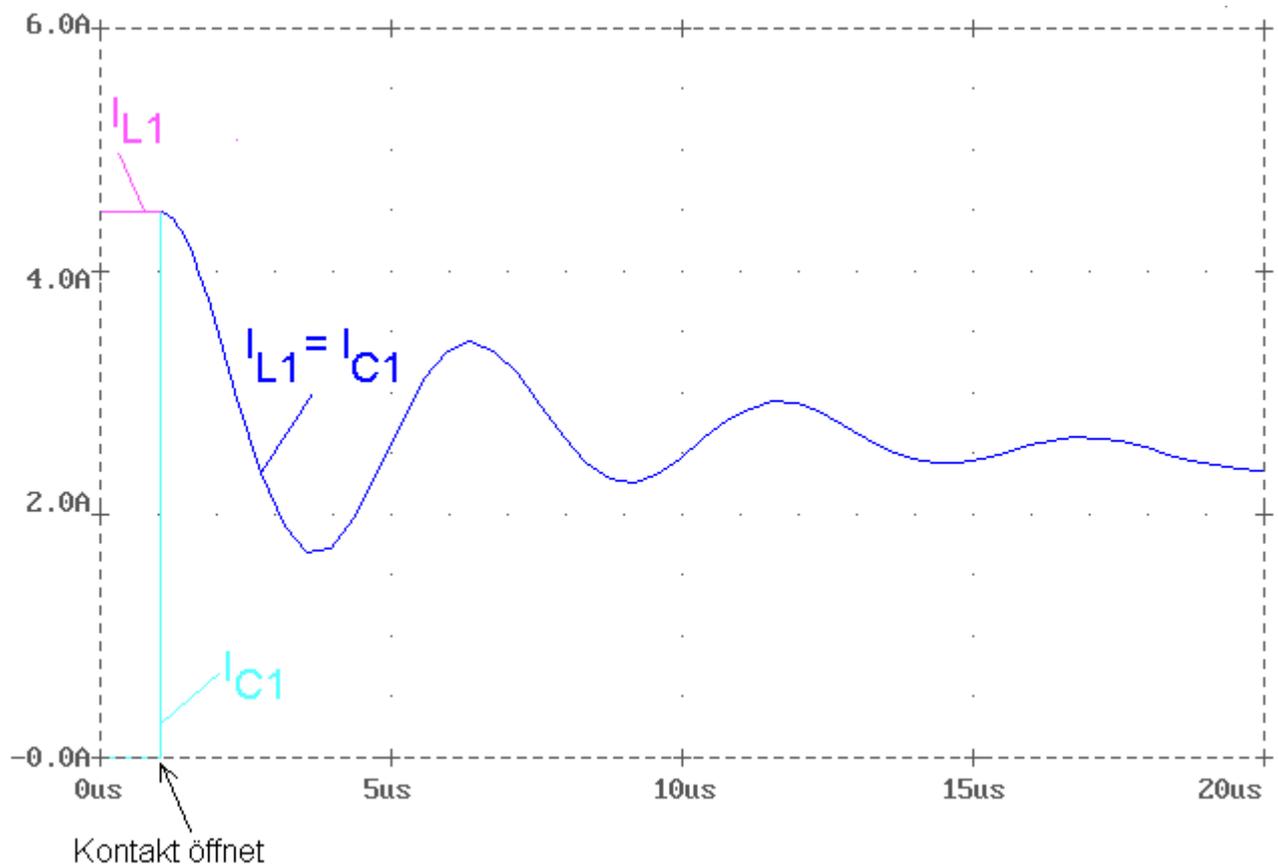


Bild 4: Ströme durch Primärwicklung L1 (magenta) und Kondensator C1 (türkis) beim Öffnen des U-Kontaktes (Überdeckung beider Kurven: blau)

Dass der Strom gedämpft oszilliert, verwundert nicht, da das Zündsystem aus Induktivitäten und Kapazitäten besteht, die zusammen ein schwingfähiges System bilden.

Indem der Strom aus der Primärwicklung der Zündspule jetzt vom Kondensator C1 aufgenommen wird, lädt sich dieser dabei auf. Die ansteigende Spannung über C1 ist im **Bild 5** dargestellt.

Für die Geschwindigkeit des Spannungsanstieges liest man etwa $12 \text{ V}/\mu\text{s}$ ab. Würde man für C1 einen Kondensator wählen, der nur die halbe Kapazität aufwiese, würde die Spannung doppelt so schnell ansteigen; umgekehrt bei doppelter Kapazität nur halb so schnell.

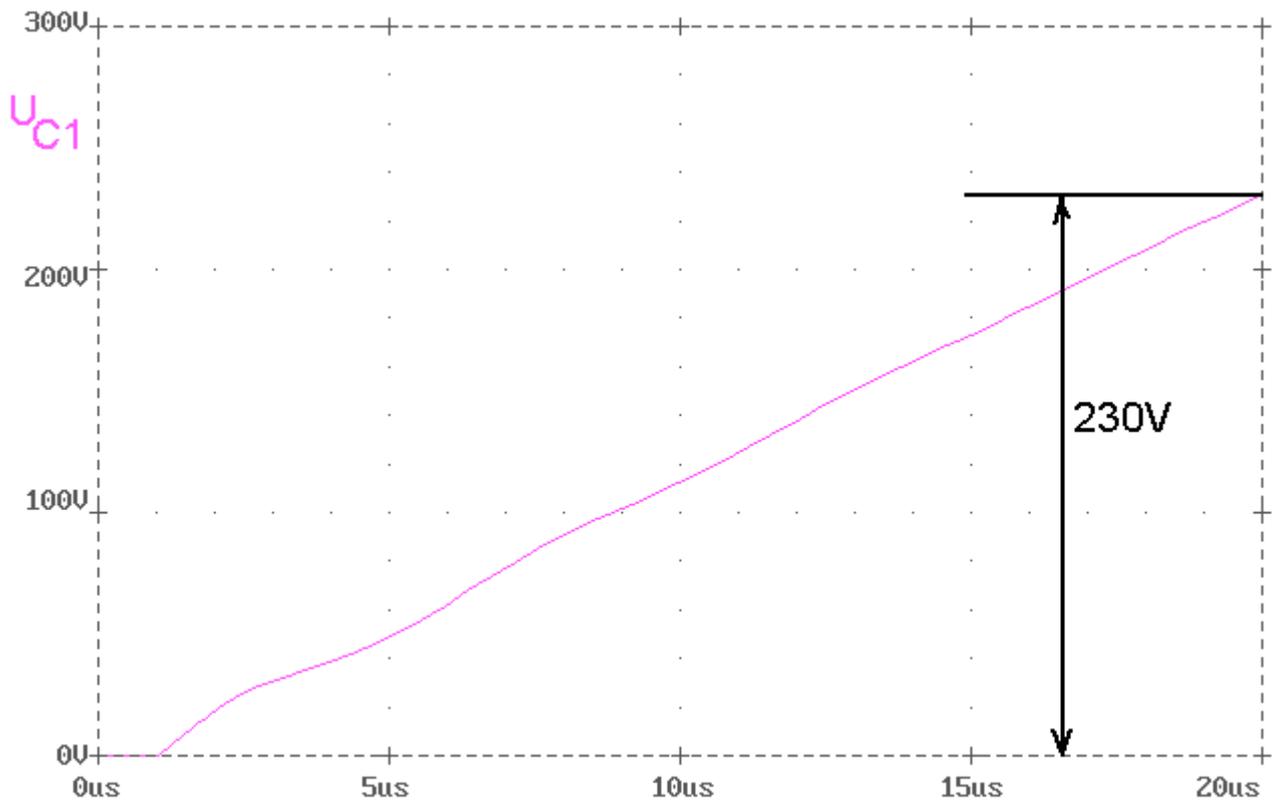


Bild 5: Spannung über dem U-Kondensator nach Öffnen des U-Kontaktes

Da U-Kontakt und Kondensator parallel verbunden sind, liegt die Spannung über dem Kondensator in gleicher Größe auch über den sich öffnenden Unterbrecher-Kontakten. Für die Durchschlags-Grenzfeldstärke in Luft werden 3300 V/mm angegeben. Bei einem Spannungsanstieg von 12 V/μs müssen sich die Unterbrecherkontakte demnach mit einer Geschwindigkeit von mindestens 3,6 μm/μs auseinander bewegen, um einen Durchschlag über die länger werdende Luftbrücke zu vermeiden.

Fehlt der Kondensator, so dass nur noch eine verschwindend geringe, durch die Kontakte gebildete Restkapazität verbleibt, steigt die Spannung – wie weiter oben erläutert – sehr viel schneller über den Kontakten an, so dass es zu andauernden Durchschlägen kommt, welche als sogenanntes Kontaktfeuer in Erscheinung treten. Kontaktfeuer führt zu einem übermäßigem Verschleiß der Kontakte durch Elektro-Erosion und muss vermieden werden. Allerdings nimmt die Geschwindigkeit der Kontaktöffnung mit geringer werdender Drehzahl des Nockens zwangsläufig auch ab, so dass gerade bei minimalen Drehzahlen (Standgas) Kontaktfeuer nicht völlig zu vermeiden ist.

Die Spannung über dem Kondensator C1 ist gleich der, die an der Primärklemme (1) der Zündspule anliegt. Die Zündspule wirkt wie ein Transformator, dessen Spannungsübersetzungsverhältnis sich aus dem Verhältnis von Primär- und Sekundärinduktivität errechnet und bei der im Beispiel verwendeten 6-V-Zündspule mit

$$\ddot{u} = \sqrt{\frac{L_2}{L_1}} = \sqrt{\frac{22\text{H}}{0,004\text{H}}} \quad \text{einen Wert von etwa 75 ergibt.}$$

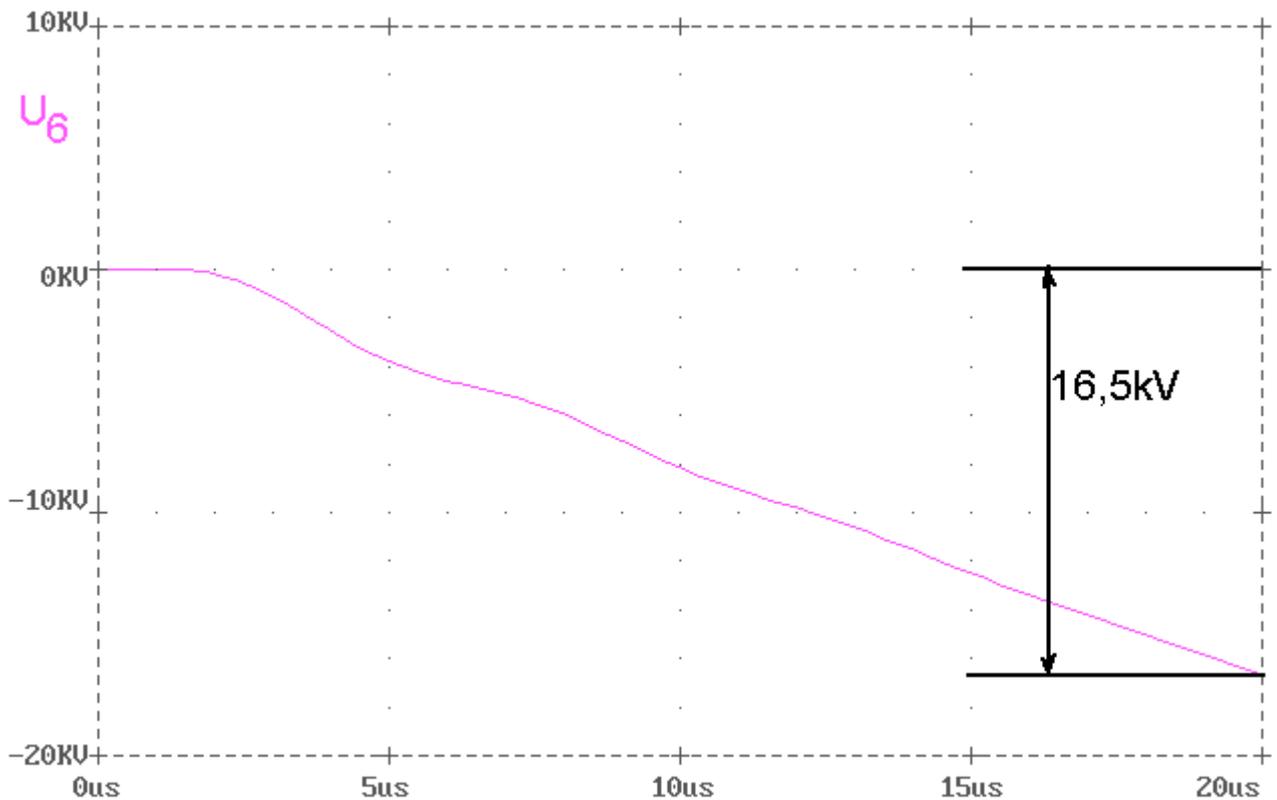


Bild 6: Simulierter Spannungsverlauf am Zündkabelanschluss (6)

Im **Bild 6** ist im selben Zeitmaßstab wie im Bild 4 und 5 der Anstieg der Spannung am Zündkabelanschluss (6) dargestellt. Der Vergleich der Spannungswerte auf der Primär- und Sekundärseite zum Zeitpunkt $20 \mu\text{s}$ ($16,5 \text{ kV} / 230 \text{ V}$) bestätigt recht gut das abgeschätzte Spannungsübersetzungsverhältnis.

Auf Grund des Wicklungssinns von Primär- und Sekundärspule ist die Polarität der Hochspannung an Klemme (6) negativ, was für die Entstehung eines Zündfunken an der Kerze ohne Bedeutung ist.

Kommt es bereits bei niedrigeren Spannungen zum Funkenüberschlag an der Kerze, würde die Spannungskurve in diesem Zeitpunkt abrupt gegen Null gehen, wie dies bei der oszillografischen Messung am Fahrzeug in **Bild 7** sichtbar ist.

Der Spannungsanstieg im Oszillogramm beträgt etwa $250 \text{ V}/\mu\text{s}$. Das ist nur ein Viertel dessen, was in der Simulation mit idealen Elementen entsprechend Bild 6 abzulesen ist. Ursachen für diese Abweichung sind in der grob tolerierten Kapazität des Kondensators, des nicht prell- und abrissfunkenfreien Unterbrecherkontaktes und der bei der Messung vorhandenen realen Belastung mit Kerzenstecker und Kerze zu suchen.

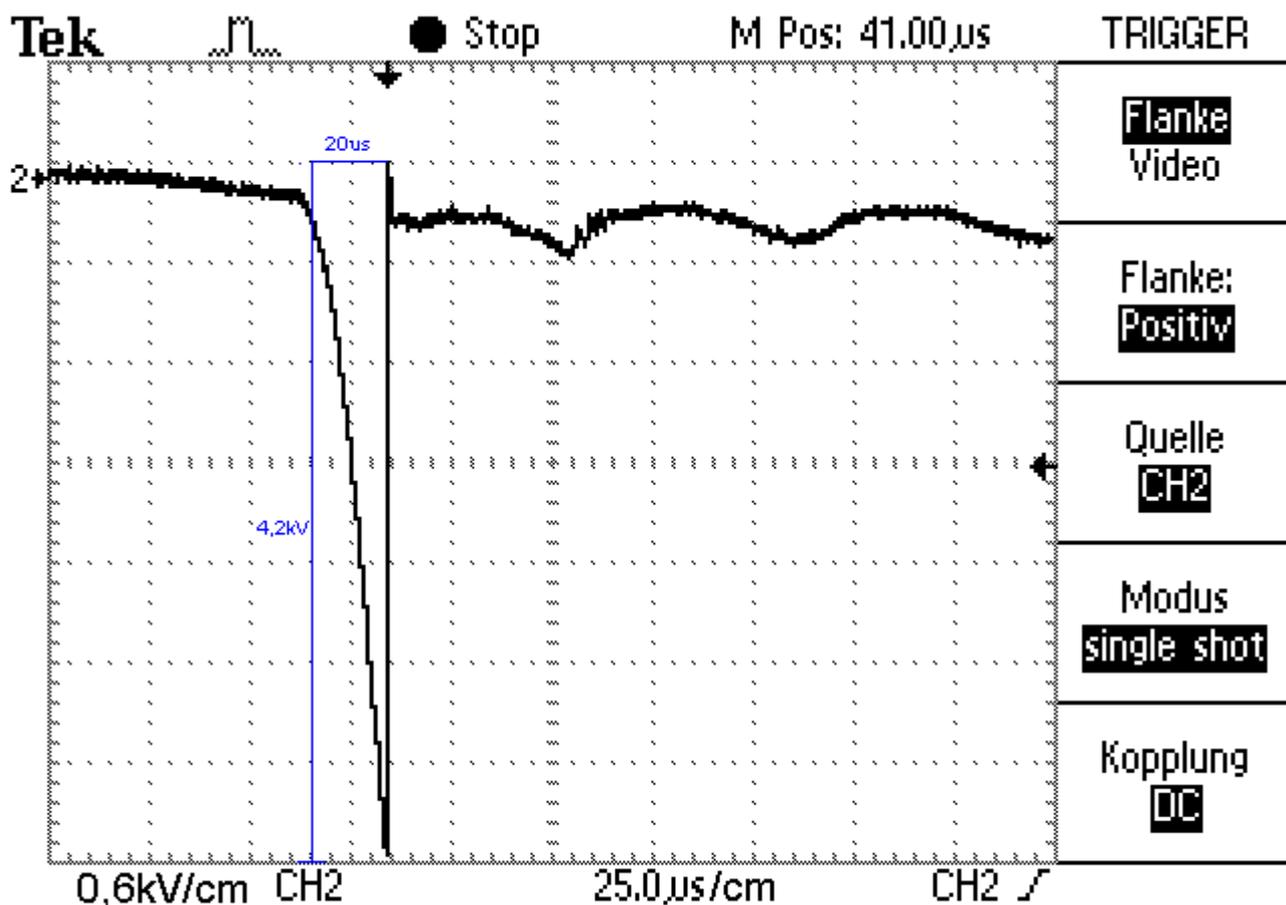


Bild 7: Gemessener Spannungsverlauf am Zündkabel

Die Entstehung des Zündfunkens

Bei Normaldruck und Luftumgebung kommt es bei einem üblichen Kerzen-Elektrodenabstand von 0,6 mm bereits ab 2 kV zu einer Durchbruchsentladung. Für höhere Drücke, die bei der Verdichtung eines zündfähigen Gemisches auftreten, steigt die erforderliche Durchbruchsspannung auf ein Vielfaches an. In dem aus [1] übernommenen **Bild 8** sind Spannungs- und Stromverlauf unmittelbar am vorderen Teil der Kerzenelektroden dargestellt.

Der Zündfunke besteht demnach aus drei zeitlich nacheinander ablaufenden Phasen. Zuerst kommt es auf Grund der hohen Spannung von ca. 10 kV an den Elektroden zu einer schlagartigen Ionisation des Gases, dem Durchbruch. Im entstandenen leitfähigen Plasma zwischen den Elektroden tritt ein sehr hoher Strom bis zu 100 A auf, der allein aus der Entladung der von den Kerzenelektroden gebildeten Kapazität gespeist wird. Die Lichterscheinung des Durchbruchfunken ist blass-bläulich und von sehr geringer Intensität.

Daran schließt sich die Bogenentladung über einen mehr als 100fach längeren Zeitraum an. Die Brennspannung liegt bei 100 V und die Zeitdauer bei 100 ns. Der Strom von etwa 1 A wird aus der Entladung der Kapazität von Kerze, Kerzenstecker und Kabel sowie der Sekundärwicklung der Zündspule nachgeliefert. Der Lichtbogen ist grell weiß und damit gut sichtbar. Bei CDI-Zündungen (**C**apacitor **D**ischarge **I**gnition) ist die Bogenentladungsphase deutlich kürzer, so dass der Funke mehr zur blass-bläulichen Lichterscheinung der Durchbruchsentladung tendiert.

Die letzte Phase wird als Glimmentladung bezeichnet und dauert etwa 1 ms bei einer wieder auf 300 V angestiegenen Spannung und einigen Zehn mA Strom.

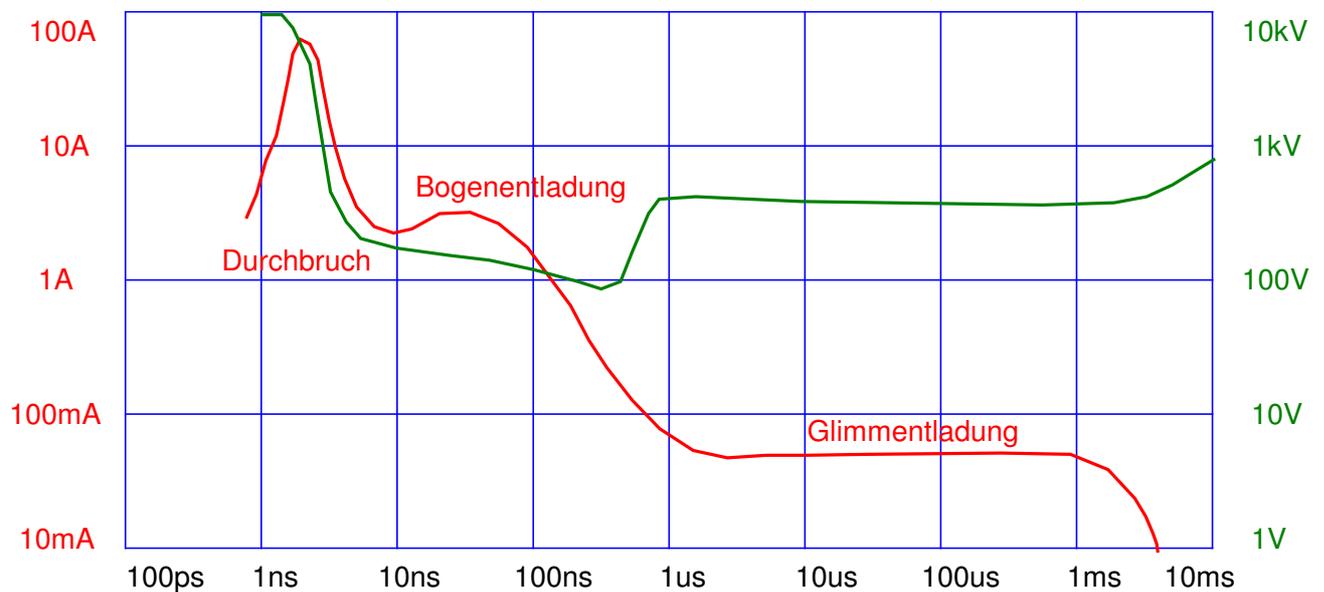


Bild 8: Strom und Spannungsverlauf an den Elektroden einer Zündkerze [1]

Jede der drei Phasen trägt Wärmeenergie zur Entflammung in das zündfähige Gemisch ein. Dabei spielt jedoch der Mechanismus des Wärmeüberganges vom Funken ins Gas eine wichtige Rolle. Bogen- und Glimmentladung haben dabei einen deutlich schlechteren Wirkungsgrad gegenüber dem Durchbruch [1].

Zusammenfassend kann man feststellen, dass der extrem kurze Durchbruchsfunken entscheidend für die Entflammung des zündfähigen Gemisches ist. Der Durchbruchsfunke wird jedoch – wie bereits oben erwähnt – allein von der schlagartigen Entladung der Kapazität gespeist, die die Elektrodenspitzen im Kerzengesicht bilden. Weiter „hinten“ – in Richtung Zündspule - liegende Elemente spielen in den wenigen ersten Nanosekunden des Durchschlags keine Rolle.

Dies ist auch der Grund, weshalb Entstörwiderstände (1 ... 30 kΩ), die in der Kerze und/oder dem Kerzenstecker angeordnet sind, **keinen wesentlichen Einfluss** auf das Funktionieren der Zündung haben, da sie nicht im Stromkreis der initialen Durchbruchsentladung liegen.

Lothar
Mai, 2013

[1] Saggau, B.: Kalorimetrie der drei Entladungsformen des elektrischen Zündfunkens, Archiv für Elektrotechnik 64 (1981), S.230 ff., Springer- Verlag