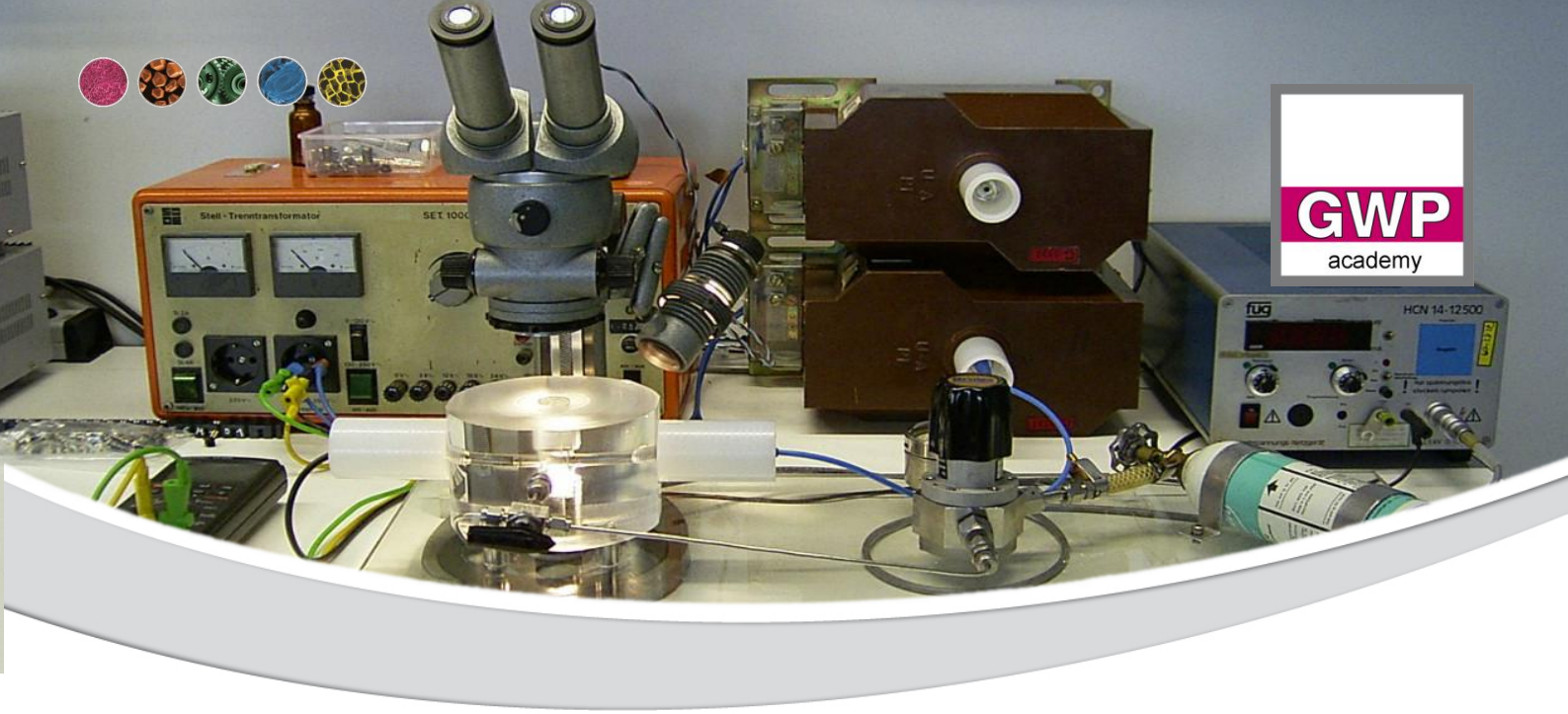


› Wissen schafft Fortschritt®

» Airbag-Anzünder: Lebensdauerprüfung von Brückendrähten bei Wechselbelastung

› Technische Mitteilung 20060617

› Dr. Julius Nickl
CEO GWP mbH
Senior Expert Industrial Processes and Products
julius.nickl@gwp.eu

GWP Gesellschaft für Werkstoffprüfung mbH
Georg-Wimmer-Ring 25 ☎ +49 (0)8106 994 110 info@gwp.eu
D-85604 Zorneding/München 🖷 +49 (0)8106 994 111 www.gwp.eu

© GWP mbH 2016 SO technische Mitteilung REV09
X:\Organisation\Marketing\technische Mitteilungen\Airb 20160617 Airbag-Glühbrückenwechseltest\GWP Technische Mitteilung 20060617 Airbag-Anzünder Lebensdauerprüfung REV03.docx

1. Zusammenfassung

Die Ausfälle durch gebrochene Zünddrähte bei Airbaganzündern gaben Anlass zur Entwicklung einer Methode zur Bestimmung der mechanischen Belastbarkeit von freiliegenden Zünddrähten. Als Untersuchungsgegenstand wurden die gefügten, aber pyrotechnikfreien Anzünder gewählt um an diesen Bauteilen Dauerschwingversuche durchführen zu können.

Drei Methoden zur Wechselbelastung der dünnen Drähte wurden auf ihre Umsetzbarkeit hin experimentell überprüft. Die Kraftübertragung erfolgte mittels:

- Magnetischer Felder im Stromdurchgang
- Elektrische Wechselfelder (Hochspannung)
- Fluiden: strömende Flüssigkeit bzw. Luft

In dieser 5-monatigen Studie wurden Konzepte und deren experimentelle Umsetzung erprobt. Erst mit Anströmungen konnten Brüche zuverlässig erzeugt werden, deshalb sollten weitere Arbeiten - mit mehr Ressourcen - mit strömenden Fluiden fortgesetzt werden.

08332GWP_Demo-Bericht_____01(Word2000) b
X:\Organisation\Marketing\technische Mitteilungen\Airb 20160617 Airbag-Glühbrückenwechseltest\GWP Technische Mitteilung 20060617 Airbag-Anzünder Lebensdauerprüfung REV03.docx

Inhalt

1. Zusammenfassung ... 2
2. Aufgabenstellung ... 5
3. Stand der Technik ... 5
3.1. Dünne Drähte in der Industrie ... 5
3.1.1. Anwender ... 5
3.1.2. Materialien ... 5
3.1.3. Herstellung ... 5
3.2. Fügeverfahren für dünne Drähte ... 6
3.2.1. Bonden ... 6
3.2.2. Löten (Schweißen) ... 6
3.2.3. Eutektische Verbindungen ... 6
3.2.4. Klemmen ... 6
3.2.5. Kleben ... 6
3.3. Testmethoden ... 6
3.3.1. Optisch ... 6
3.3.2. Zugversuch ... 7
3.3.3. Scherversuch ... 7
3.4. Dauerfestigkeit von Anzündern ... 7
3.4.1. Diffusion ... 7
3.4.2. Korrosion ... 7
4. Betrachtung der Belastungen des Drahtes ... 8
4.1. Dauerschwingversuch ... 8
4.2. Belastungen am Draht ... 8
4.2.1. Auslenkung durch Längenänderung ... 9
4.2.2. Auslenkung durch Biegung ... 11
4.2.3. Auslenkung durch Torsion ... 12
1) Maximale Auslenkung ... 12
Die Definition der Torsionsspannung gilt analog zur Zugspannung. ... 12
4.2.4. Dämpfung ... 14
5. Experimentelle Umsetzung ... 14
5.1. Magnet Versuchsaufbau ... 14
5.1.1. Theorie ... 14
5.1.2. Apparatebau ... 15
5.1.3. Fazit ... 16
5.2. Elektrostatische Umsetzung ... 16
5.2.1. Grundlagen ... 16
5.2.2. Aufbau ... 18
5.3. Anströmen ... 20
5.3.1. Strömungskanal mit Fluid ... 21
5.3.2. Luft ... 21
6. Schlussgedanke ... 22
7. Literaturverzeichnis ... 23

8. Bildanhang 24

08332GWP_Demo-Bericht_____01(Word2000) b
X:\Organisation\Marketing\technische Mitteilungen\Airb 20160617 Airbag-Glühbrückenwechseltest\GWP Technische Mitteilung 20060617 Airbag-Anzünder Lebensdauerprüfung REV03.docx

2. Aufgabenstellung

Schwellende Belastungen an Bauteilen sind ein großes Problem in der Technik.
Gerade bei kleinen Strukturen, wie hier im Bereich feinster Drähte (wenige µm Durchmesser), ist es schwer Aussagen über die Haltbarkeit der verarbeiteten Produkte zu machen (auch in der Elektronikindustrie). Als kritischer Punkt zeigt sich die Verbindung eines ganz oder teilweise beweglichen Drahtes mit einem starren Untergrund.
Temperaturänderungen und Erschütterungen erzeugen hier hohe Spannungen an den Fügestellen, die zur Ermüdung und schließlich zur Zerstörung des Bauteils führen können.
Gerade in Automobilbranche machte man sich schon sehr früh Gedanken über die Haltbarkeit/Lebensdauer der sicherheitsrelevanten Produkte. So gab die Frage nach der Zuverlässigkeit der Zündvorrichtungen in Airbags den Anlass zum Entwurf einer Testvorrichtung.

3. Stand der Technik

3.1. Dünne Drähte in der Industrie

3.1.1. Anwender

Der weitaus größte Abnehmer ist die Elektronikindustrie, die Drahtleiter in Form von Brücken (durch Isolator oder frei) verwendet. Ein weiterer wichtiger Einsatzbereich sind Zünddrähte für die Pyrotechnik. Bei der Mikro-Drahterosion werden kleinste Bauteile vorwiegend für medizinische Anwendungen hergestellt. Sie finden ebenfalls Verwendung in der Messtechnik als Wärmesensoren, oder auch als Sprungfedern.
Viele dieser Anwendungsmöglichkeiten befinden sich noch in der Entwicklung oder ihre Anwendbarkeit für die Industrie wird zurzeit erst erforscht. Aber der Markt für diese Produkte wächst.

3.1.2. Materialien

In der Elektronik werden, wegen ihrer guten Leitfähigkeit, vorwiegend Kupfer, Aluminium und Gold verwendet. Mit einem großen Abstand folgen Nickel-Chrom, und verschiedene Platinlegierungen, diese vor allem in der Messtechnik. Daneben finden sich heute auch Materialien wie Konstantan, Messing, Palladium und Wolfram im Angebot der Hersteller.

3.1.3. Herstellung

Die Anforderungen an das Material sind,

1. Günstige mechanische Eigenschaften bei kleinen Querschnitten
2. Gutes metallurgisches Verhalten
3. Definierte elektrische Leitfähigkeit
4. Fügbarkeit

Der Draht wird aus einem Gussstück in bis zu 50 Schritten auf den gewünschten Querschnitt gebracht. Um Kaltverfestigung zu vermeiden wird der Draht zwischen den Ziehprozessen wärmebehandelt. Ein weiteres Verfahren ist das hydrostatische Extrudieren. Dadurch werden große Querschnittsreduktionen bei homogener Struktur des Drahtes erreicht. Durch kombinierte Wärme/Ziehbehandlung lässt sich die Korngröße einstellen, und somit auch das mechanische und bedingt auch das elektrische Verhalten beeinflussen.

08332GWP_Demo-Bericht_____01(Word2000) b
X:\Organisation\Marketing\technische Mitteilungen\Airb 20160617 Airbag-Glühbrückenwechseltest\GWP Technische Mitteilung 20060617 Airbag-Anzünder Lebensdauerprüfung REV03.docx

3.2. Fügeverfahren für dünne Drähte

Die Verbindungen müssen verschiedenen Anforderungen genügen, so gibt es je nach späterem Einsatzzweck verschiedene Verfahren.

3.2.1. Bonden

Eine der am häufigsten verwendeten Fügetechniken. Das Ultraschall Bonden (US-Schweißen) wird, wegen des meist keilförmigen Bondwerkzeugs oft auch Wedge-Bonden genannt. Das Bondwerkzeug schwingt parallel zur Oberfläche und bringt den Draht unter Druck auf. Durch die Reibung werden störende Oberflächenschichten aufgerissen und die Rauhigkeit abgebaut. Hierdurch nähern sich Draht und Fügefläche bis auf atomaren Abstand an und verbinden sich.
Beim Thermokompressionsverfahren werden die Fügepartner unter Wärme aufeinandergepreßt. Die Verbindung entsteht durch atomare Bindungskräfte und Diffusion. Es entsteht keine schmelzflüssige Phase.
Das Thermosonicverfahren ist eine Mischung aus Thermokompressions- und Ultraschall Bonden.

3.2.2. Löten (Schweißen)

Lötstellen besitzen eine gute Leitfähigkeit, bergen aber die Gefahr der Versprödung an der Fügestelle wegen Gefügeveränderungen. Die Prozesstemperaturen sind gut einstellbar und bewegen sich je nach Lot von 50 bis 350°C.

3.2.3. Eutektische Verbindungen

Die eutektische Verbindung ist einer Lötstelle ähnlich. Bei einer definierten Zusammensetzung der zu verbindenden Stoffe entsteht eine niedrigschmelzende, eutektische Legierung. Es werden keine, unter Umständen störende Verbindungswerkstoffe benötigt. Beim Verbinden werden hohe Prozesstemperaturen erreicht. Die Fügestelle ist mechanisch stabil und gut elektrisch leitend.

3.2.4. Klemmen

Es entsteht eine großflächige Verbindung mit dem Draht, daher weist die Verbindung eine gute Leitfähigkeit auf. Es besteht die Gefahr den Draht beim Klemmen zu verletzen und so die mechanische Belastbarkeit herabzusetzen.

3.2.5. Kleben

Das Kleben gleicht Spannungsdifferenzen zwischen Substrat und aufgeklebtem Material aus. Kann auch elektrisch leitend sein, wenn auch nicht so gut wie metallische Verbindungen. Hierzu werden Klebstoffe mit bis zu 70% Silberanteil verwendet. Das Fügen kann bei niedrigen Temperaturen stattfinden. Die Einsatztemperaturen hängen vom verwendeten Polymer ab, sind aber meist niedriger als die der anderen Fügemethoden.

3.3. Testmethoden

3.3.1. Optisch

Unter dem Mikroskop können Risse, Drahtbrüche und unbeabsichtigte Verformungen, zum Beispiel Knicke, festgestellt werden. Aufgrund der Form der Fügestelle kann eine Aussage über die Güte der Bondverbindung gemacht werden. Risse und Brüche müssen breiter sein

08332GWP_Demo-Bericht_____01(Word2000) b
X:\Organisation\Marketing\technische Mitteilungen\Airb 20160617 Airbag-Glühbrückenwechseltest\GWP Technische Mitteilung 20060617 Airbag-Anzünder Lebensdauerprüfung REV03.docx

als die Auflösungsgrenze des Mikroskops. Es werden leicht Fehler übersehen, da man in der richtigen Richtung auf den richtigen Ort blicken muss.

3.3.2. Zugversuch

Bei der mechanischen Zugprüfung wird ein Haken am Draht eingehängt und mit konstanter Geschwindigkeit nach oben gezogen, um so die Bruchkraft zu ermitteln. Für die Auswertung ist der Ort des Bruches wichtig (Im Draht, Übergang zur Schweißstelle oder Schweißstelle selbst). Ist die Verbindungsfläche viel größer als die Querschnittsfläche des Drahts (z.B. Nailhead-Bonden), wird eher die Festigkeit des Drahtes als die der Schweißstelle gemessen.

3.3.3. Scherversuch

Im Scherversuch wird ausschließlich die Fügestelle geprüft. Mit einem Scherwerkzeug wird seitlich eine Last auf die Fügestelle gegeben. Kraft und Ort des Bruches geben Auskunft über die Qualität der Verbindung. Bei einer guten Verbindung wird die Fügestelle abgeschert, bei einer schlechten trennt sie sich vom Untergrund.

3.4. Dauerfestigkeit von Anzündern

3.4.1. Diffusion

Am Übergang zwischen zwei Metallen können Atome diffundieren. Man unterscheidet Volumendiffusion und Korngrenzendiffusion.
Bei der Volumendiffusion wandern Atome, indem sie auf benachbarte Leerstellen im Gitter springen. Als Leerstellenkondensation bezeichnet man den Effekt, dass sich die Leerstellen an Korngrenzen sammeln und Hohlräume erzeugen. Die Geschwindigkeit der Volumendiffusion ist stark temperaturabhängig.
Bei der Korngrenzendiffusion werden Korngrenzen mit hoher Defektdichte als Diffusionswege benutzt. Haben die Metalle verschiedene Diffusionskoeffizienten, so bilden sich im schneller diffundierenden Metall poröse Stellen (Kirkendall Effekt). Dieser Vorgang ist kaum temperaturabhängig und findet bei feinkristalliner Struktur schneller statt.
Diese Poren setzen die Festigkeit im Bereich der Kontaktstellen herab.

3.4.2. Korrosion

Korrosion setzt die Belastbarkeit dramatisch herab. Man unterscheidet die chemische Korrosion, hier findet eine direkte Reaktion mit Sauerstoff statt, die sich bei steigender Temperatur beschleunigt, und die häufigere elektrochemische Korrosion, die das Vorhandensein eines Elektrolyten benötigt. Die elektrochemische Korrosion findet nur bei Metallen verschiedener Elektronegativität statt. Je größer die Differenz, desto schneller schreitet der Prozess voran. Bei einem großen Flächenunterschied der Elektroden entsteht an der kleineren eine große Stromdichte. Besteht die kleinere Elektrode aus dem edleren Material so findet die Korrosion langsam statt, umgekehrt sehr schnell.
Schwingungsrisskorrosion (Korrosionsermüdung) tritt an Bauteilen auf die sowohl dynamisch als auch korrosiv beansprucht werden.

08332GWP_Demo-Bericht_____01(Word2000) b
X:\Organisation\Marketing\technische Mitteilungen\Airb 20160617 Airbag-Glühbrückenwechseltest\GWP Technische Mitteilung 20060617 Airbag-Anzünder Lebensdauerprüfung REV03.docx

4. Betrachtung der Belastungen des Drahtes

4.1. Dauerschwingversuch

Nach DIN 50100 – Dauerschwingversuch (Begriffe, Zeichen, Durchführung, Auswertung).
Der Dauerschwingversuch dient zur Ermittlung von Kennwerten für das mechanische Verhalten von Bauteilen bei dauernder oder häufig wiederholter, schwellender oder wechselnder Belastung.
Die Dauerfestigkeit ist der um eine gegebene Mittelspannung schwingende größte Spannungsausschlag den eine Probe unendlich oft, ohne Bruch und ohne unzulässige Verformung aushält. Es wurde allgemein beobachtet, dass sich die erreichte Schwingspielzahl, bei fallender aufgebrachter Spannung, asymptotisch einem Festwert (Schwingzahl unendlich) nähert. Erfahrungsgemäß ist dieser Wert für Metalle bei 10×10^6 bis 100×10^6 Schwingspielen in guter Näherung erreicht. Um die Prüfdauer zu verkürzen haben sich auch Schwingspielzahlen ab 2×10^6 eingebürgert.

Da die Spannung in direktem Zusammenhang zur Verformung des Werkstoffs steht, aber ohne größere technische Hilfsmittel in diesem Fall nicht berechenbar ist, wird die Angabe der aufgebrachten Belastung vorerst auf die Angabe der Auslenkung beschränkt. Die Anregung des Drahtes soll über Felder realisiert werden, da eine direkte mechanische Anregung kaum zu verwirklichen ist.
Um bei einer Belastungsprüfung ein reproduzierbares Ergebnis zu erhalten, ergibt sich für die Messtechnik die Schwierigkeit, genau definierte Schwingungen auf das Bauteil zu übertragen.

4.2. Belastungen am Draht

Je nach Bauform setzen sich die auftretenden Beanspruchungen aus verschiedenen Anteilen zusammen. Ein gerader Draht wird, ähnlich einer Saite, eben ausgelenkt, wobei Zug- und Biegespannungen entstehen. Während ein Draht mit einem Bogen zusätzlich ein Drehmoment erfährt und somit eine Torsionsspannung erzeugt wird. Zudem teilt sich die Biegespannung in einen ebenen und einen senkrecht dazu stehenden Anteil auf.

Bei den Testmustern handelt es sich um Airbaganzünder aus folgendem Drahtmaterial: CrNi 80-20 (Werkstoff-Nr.: 2.4869)
Mechanische und physikalische Eigenschaften nach Datenblatt Thyssen Krupp VDM

Einspannlänge: $\approx 900 \mu m$
Tatsächliche Länge: $\approx 950 \mu m$
Durchmesser: $25 \mu m$
Überhöhung h: $\approx 130 \mu m$
Länge Torsion l_t : $\approx 175 \mu m$
Zulässiger Dauerstrom, I_{eff} : $0.100 A$
E-Modul: $200 GPa$
Dehngrenze, $\sigma_{0,2}$: $\geq 280 MPa$
Zugfestigkeit, σ_m : $\geq 650 Mpa$

08332GWP_Demo-Bericht_____01(Word2000) b
X:\Organisation\Marketing\technische Mitteilungen\Airb 20160617 Airbag-Glühbrückenwechseltest\GWP Technische Mitteilung 20060617 Airbag-Anzünder Lebensdauerprüfung REV03.docx

Spez. el. Widerstand: $1.12\frac{\Omega mm^2}{m}$

Dichte, ρ: $8.3\cdot 10^3\frac{Kg}{m^3}$

4.2.1. Auslenkung durch Längenänderung

1) Längenänderung

Δl kann bei bekannten Materialeigenschaften und Abmessungen mit Hilfe des Hookschen Gesetzes errechnet werden.

$E=\frac{\sigma}{\varepsilon}$ mit $\varepsilon=\frac{\Delta l}{l_0}$

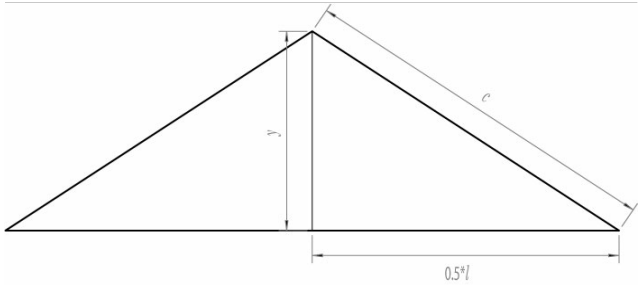
$\Delta l=\frac{\sigma l_0}{E}$

Oft wird auch die zulässige elastische Dehnung ε des Werkstoffes in Prozent angegeben.

l_0 entspricht der tatsächlichen Länge.

2) Näherung der Auslenkung

Als Modell wird ein gerader, spannungsfreier, völlig flexibler Draht der Länge a angenommen, in dessen Mitte eine konstante Kraft F_{mag} angreift. (Näherung für sehr kleine Auslenkungen).



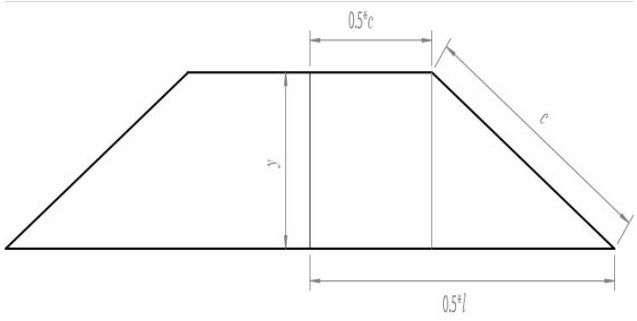
Die maximale Auslenkung:

$$y^2=c^2-\left(\frac{l^2}{2}\right)$$

mit $c=\frac{l+\Delta l}{2}$ folgt:

$$y=\sqrt{\frac{(l+\Delta l)^2-l^2}{4}}=\frac{1}{2}\cdot\sqrt{2l\Delta l+\Delta l^2}\cong\sqrt{\frac{1}{2}l\Delta l}$$

08332GWP_Demo-Bericht_____01(Word2000) b
X:\Organisation\Marketing\technische Mitteilungen\Airb 20160617 Airbag-Glühbrückenwechseltest\GWP Technische Mitteilung 20060617 Airbag-Anzünder Lebensdauerprüfung REV03.docx



3) Näherung der Auslenkung

$$y^2 = c^2 - \left(\frac{l-c}{2}\right)^2$$

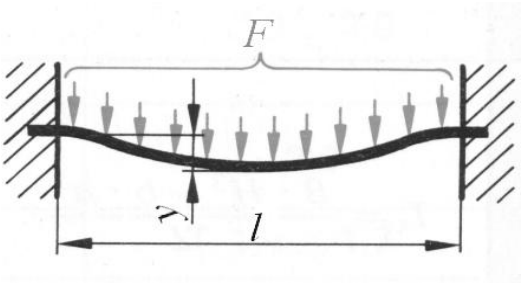
mit $c = \frac{l+\Delta l}{3}$ vereinfacht zu

$$y = \sqrt{\frac{1}{3}\left(l\Delta l + \frac{1}{4}\Delta l^2\right)} \cong \sqrt{\frac{1}{3} l\Delta l}$$

Durch diese Näherung verringert sich die Auslenkung um über 18%.

4) Zusammenhang Auslenkung und Kraft

Auslenkung eines mit gleichmäßiger Streckenlast w belasteten und beidseitig fest eingespannten Balkens.



$$y = \frac{wl^4}{384EI}$$

mit dem Flächenmoment $I = \frac{\pi d^4}{64}$

und der Streckenlast $w = \frac{F}{l}$

$$F = \frac{6E\pi d^4}{l^3} \cdot y$$

5) Resonanzfrequenz

Die Resonanzfrequenz ist nur von der Geometrie und dem E-Modul abhängig.
Für einen beidseitig fest eingespannten Balken, in der 0. Eigenmode (Knoten an den Einspannung), ohne Zugspannung.

08332GWP_Demo-Bericht_____01(Word2000) b
X:\Organisation\Marketing\technische Mitteilungen\Airb 20160617 Airbag-Glühbrückenwechseltest\GWP Technische Mitteilung 20060617 Airbag-Anzünder Lebensdauerprüfung REV03.docx

$$f_{res} = \frac{22.4}{2\pi} \cdot \sqrt{\frac{EIg}{wl^4}}$$

Durch Umformung mit $w = \frac{mg}{l} = \frac{\rho \pi d^2 g}{4}$

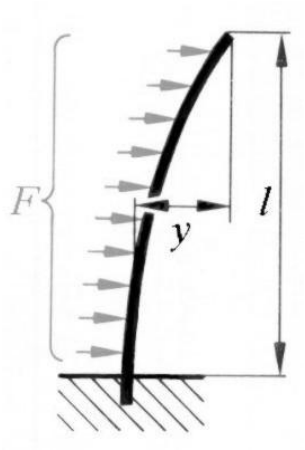
$$f_{res} = \frac{22.4}{2\pi} \cdot \sqrt{\frac{Ed^2}{16\rho l^4}}$$

Mit Zugspannung.

$$f_{RS} = \frac{1}{2} \cdot \sqrt{\frac{Tg}{wl^4}}$$

4.2.2. Auslenkung durch Biegung

Auf einen gebogen verbauten Draht wirkt ein Biegemoment auf den überhöhten Anteil des Drahtes.



1) Maximal zulässige Biegebelastung

$$\sigma = \frac{M}{W}$$

Mit dem axialen Widerstandsmoment $W = \frac{I}{r} = \frac{\pi d^3}{32}$

und dem Drehmoment $M = \frac{1}{2} F_b h = \frac{1}{2} w$ ergibt sich

$$F_b = \frac{\sigma \pi d^3}{16h}$$

2) Auslenkung durch Biegespannung

$$y = \frac{w_b h^4}{8EI}$$

Durch Umformung :

$$F_b = \frac{E \pi d^4}{8h^3} \cdot y$$

08332GWP_Demo-Bericht_____01(Word2000) b
X:\Organisation\Marketing\technische Mitteilungen\Airb 20160617 Airbag-Glühbrückenwechseltest\GWP Technische Mitteilung 20060617 Airbag-Anzünder Lebensdauerprüfung REV03.docx

$$w_b = w_l \frac{h}{l}$$

$$F = \frac{E\pi d^4 l}{8h^4} \cdot y$$

3) Resonanzfrequenz

$$f_{res} = \frac{3.52}{2\pi}\sqrt{\frac{EIg}{wl^4}}$$

mit $w = \frac{mg}{l} = \frac{\rho\pi d^2 g}{4}$ und $I = \frac{\pi d^4}{64}$ folgt

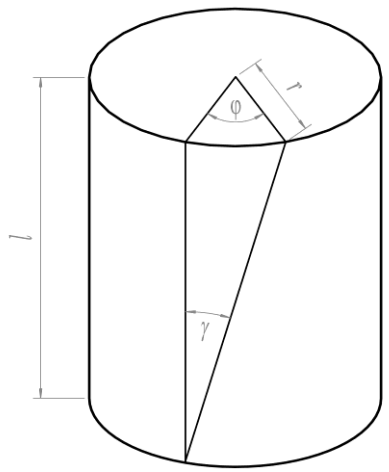
$$f_{res} = \frac{3.52}{2\pi} \cdot \sqrt{\frac{Ed^2}{16\rho l^4}}$$

Der Anteil der Biegung an der Gesamtauslenkung ist, bei den üblichen Bauformen, so gering, daß er in der Überschlagsrechnung unberücksichtigt bleiben kann.

4.2.3. Auslenkung durch Torsion

Die Zünddrähte werden nicht als gerade Balken, sondern gebogen verbaut. Somit entsteht bei angreifender Kraft auch ein Drehmoment. Dieses ist in großem Maße von der Bauform abhängig. Bisweilen ist es schwierig den Anteil des Drahtes zu bestimmen, der verdrillt wird.

1) Maximale Auslenkung



Die Definition der Torsionsspannung gilt analog zur Zugspannung.

Hooksches Gesetz der Torsion:

$$\tau = G\gamma \;;\; G = \frac{\tau}{\gamma}$$

08332GWP_Demo-Bericht_____01(Word2000) b
X:\Organisation\Marketing\technische Mitteilungen\Airb 20160617 Airbag-Glühbrückenwechseltest\GWP Technische Mitteilung 20060617 Airbag-Anzünder Lebensdauerprüfung REV03.docx

mit $r\varphi = b$ und (Kleinwinkelnäherung)
ergibt sich

$$\gamma \cong \frac{r}{l_T}\varphi$$

daraus folgt:

$$\tau \cong G\frac{r}{l_T}\varphi$$

Die Torsionsspannung τ und der Schubmodul G bewegen sich, je nach Material, in den Intervallen

$$\frac{E}{2} < G < \frac{E}{3} \quad \text{und} \quad 0.57 < \sigma < 0.7 \ .$$

Als Faustformeln in der Werkstofftechnik gelten:

$$G = \frac{1}{3}E \quad \text{und} \quad \tau = 0.7\sigma$$

somit lässt sich berechnen bei welchem Winkel die zulässige Torsionsspannung erreicht ist.

$$\varphi = 2.1 \cdot \frac{\sigma\ l_T}{Er}$$

2) Die Kraft als Funktion der Auslenkung

Für das wirkende Drehmoment gilt

$$\tau = \frac{M}{W_P}$$

Der Angriffspunkt der resultierenden Kraft liegt bei einer gleichmäßigen Streckenlast bei

$$s_T = \frac{1}{2}h$$

Setzt man dies in die Hooksche Torsionsgleichung ein, so ergibt sich

$$F_T = \frac{\varphi}{\cos\varphi} \cdot \frac{2 \cdot W_P G r}{h l_T}$$

Im Bereich kleiner Kräfte lässt sich die Funktion linearisieren, da $\cos\varphi \approx 1$ und $\varphi \approx \sin\varphi = y$ ist.

$$F_T \approx \frac{W_p G d}{h l_T} \cdot y$$

Ersetzt man das polare Widerstandsmoment noch durch:

$$W_p = \frac{\pi d^3}{16}$$

so ergibt sich

$$F_T \approx \frac{E\pi d^4}{48 l_T h} \cdot y$$

3) Resonanzfrequenz

Der Draht verhält sich, unterhalb von $\varphi_{0.2}$, als Torsionsfeder.

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{J}{D^*}} \qquad \omega = \sqrt{\frac{D^*}{J}}$$

08332GWP_Demo-Bericht_____01(Word2000) b
X:\Organisation\Marketing\technische Mitteilungen\Airb 20160617 Airbag-Glühbrückenwechseltest\GWP Technische Mitteilung 20060617 Airbag-Anzünder Lebensdauerprüfung REV03.docx

Die Berechnung der Federkonstanten

$$M_T = D^* \cdot \varphi$$

$$F_T = \frac{\varphi D^*}{\cos\varphi \cdot s_T}$$

$$D^* = \frac{\pi E d^4}{96 l_T}$$

Das Trägheitsmoment hingegen läßt sich aufgrund der schwierigen Geometrie kaum angeben.

4.2.4. Dämpfung

Die Dämpfung ist vom Material, der Korngröße und deren Ausrichtung, Elementverteilung im Gefüge, usw. abhängig. Daher werden die Dämpfungseigenschaften am Endprodukt in Versuchen ermittelt. Mögliche Verfahren sind, Bestimmen des logarithmischen Dekrements oder Fourier Transformation (FFT), einer freien abklingenden Schwingung. Denkbar wäre auch das Aufzeichnen der Amplitude beim Durchfahren des in Frage kommenden Frequenzbereichs, Überhöhung und Resonanzfrequenz sind direkt ablesbar.

1) Die einzelnen Belastungsformen überlagern sich und beeinflussen sich gegenseitig. Da aber weder die Torsions- noch die Biegespannung kritische Werte erreichen können, wird die Kraft bei Längenänderung als Referenz verwendet.
   Aus den Herleitungen folgernd, kann für die auslenkende Kraft als Richtwert etwa $15mN$ angenommen werden. Die Resonanzfrequenzen sind stark vom zugrundegelegten Modell abhängig, und bewegen sich zwischen $20kHz$ und $120kHz$.

5. Experimentelle Umsetzung

5.1. Magnet Versuchsaufbau

Als Erstes wurden die Kräfte mittels eines äußeren, magnetischen Feldes erzeugt, wobei durch den Draht ein Strom fließt.

5.1.1. Theorie

Der Draht wird von einem Wechselstrom durchflossen, und befindet sich in einem homogenen Magnetfeld. Der Draht wird durch die Lorentzkraft ausgelenkt. Den Strom stellt ein Frequenzgenerator mit Vorwiderstand zur Verfügung. Das Feld soll durch einen Elektromagneten erzeugt und mit Hilfe eines Jochs zum Messpunkt transportiert werden.

1) Stärke des Magnetfeldes

Kraft auf Leiter im Magnetfeld:

$$F = I \cdot l \cdot B$$

Die Größe I wird vom Hersteller vorgegeben oder kann aus den technischen Daten, Drahtquerschnitt und spezifische Leitfähigkeit, hergeleitet werden.

08332GWP_Demo-Bericht_____01(Word2000) b
X:\Organisation\Marketing\technische Mitteilungen\Airb 20160617 Airbag-Glühbrückenwechseltest\GWP Technische Mitteilung 20060617 Airbag-Anzünder Lebensdauerprüfung REV03.docx

$$B = \frac{6yE\pi d^4}{Il^4}$$

2) Gepulster Teststrom

Bei Wechselströmen sind höhere Stromspitzenwerte $\hat{I}$ möglich, wenn $I_{eff} = \frac{1}{T}\sqrt{\int_{t=0}^{T} i^2(t)dt}$ eingehalten wird.
Aber im Resonanzfall wird das Maximum der eingebrachten Energie in Schwingung umgesetzt. Daher ist keine Erhöhung der Amplitude mittels eines gepulsten Teststroms zu erreichen.

3) Ergebnisse

Bei einem konstanten Stromfluß werden Flußdichten von weit über $100Tesla$ benötigt. Bei anliegendem Wechselstrom kann der Draht in Resonanz gebracht werden, so vervielfacht sich je nach Dämpfungsgrad die Schwingungsamplitude. Wegen dem Zusammenhang $B \sim y$ kann $B_{0.2}$ bei Erhaltung der Amplitude $y_{0.2}$ um diesen Faktor verkleinert werden.

Wirtschaftliche Größenordnung für magnetische Felder beträgt ca. $2Tesla$, ab $4Tesla$ sind Supraleitenden Spulen notwendig. Hier sind zur Zeit 30 Tesla das technisch maximal erreichbare.
Ein Faktor von etwa 100, wie hier benötigt, kommt erfahrungsgemäß nach äußerst selten vor, obwohl kleinste Bauteile im Allgemeinen eine geringe Dämpfung besitzen.

5.1.2. Apparatebau

Der Bau wurde zeitgleich zur Berechnung durchgeführt. Die Beobachtungen waren daher ein guter Beweis für die Ergebnisse der Berechnungen.
Im ersten Versuch wurde ein Joch aus Weicheisen aufgebaut.

1) Dimensionierung

Ist die Stärke des maximal benötigten Flusses B am Messpunkt bekannt, so läßt sich daraus die Geometrie des Joches und des Elektromagneten bestimmen.

$$\Theta = \sum_{k=1}^{n} H_k l_k$$

$$\Theta = I \cdot N$$

Der Magnetkreis besteht aus $n = 3$ Teilen, dem Luftspalt und dem Joch mit konstantem Querschnitt und der Verjüngung.

$$H_{luft} = \frac{B}{\mu_0}$$

$$NI = H_{joch} l_{joch} + H_{verj} l_{verj} + \frac{Bl_{luft}}{\mu_0}$$

Für den Fall eines geschlossenen, unverzweigten Magnetkreises mit Querschnittsveränderung ist das Produkt Flussdichte mal Querschnitt konstant. Da H_{joch} und H_{verj} von B abhängig sind, muß auch bei bekannter Geometrie die erreichbare Flußdichte

08332GWP_Demo-Bericht_____01(Word2000) b
X:\Organisation\Marketing\technische Mitteilungen\Airb 20160617 Airbag-Glühbrückenwechseltest\GWP Technische Mitteilung 20060617 Airbag-Anzünder Lebensdauerprüfung REV03.docx

durch Ausprobieren bestimmt werden.

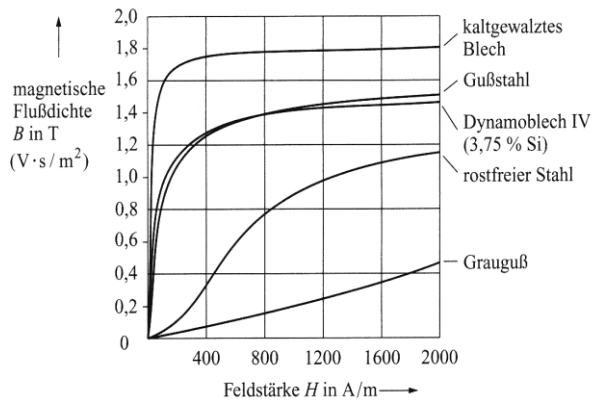


Bild 2.35 Magnetisierungskurven einiger Eisensorten

Hier wurde ein niedrig legiertes Eisen, einem Dynamoblech vergleichbar, verwendet.
Bei genauer Betrachtung fallt auf, daß die Durchflutung fast ausschließlich vom Luftspalt bestimmt wird. Die Glieder des Jochs und der Verjüngung spielen eine untergeordnete Rolle.

$$B \approx \frac{NI\mu_0}{l_{luft}}$$

5.1.3. Fazit

Für:

$$N = 190 \quad I = 15A \quad l_{luft} \cong 15mm$$

Ergibt sich die Flussdichte in der Klammer zu

$$B \approx 350mT$$

Dieser Wert ist etwas höher als der, in der Konstruktion angegebene. Es konnte keine Bewegung des Drahtes beobachtet werden.

5.2. Elektrostatische Umsetzung

5.2.1. Grundlagen

Der Draht soll von einer entgegengesetzt geladenen, vergleichsweise großen Metallplatte angezogen werden.
Es gilt:

$$F = QE$$

$$\frac{F}{A} = \frac{Q}{A} \cdot E = DE$$

mit $D = \varepsilon_0 \varepsilon_r E$ folgt:

$$\frac{F}{A} = \varepsilon_0 \varepsilon_r E^2$$

Die Kraft steigt also quadratisch mit der Feldstärke. Wegen des kleinen Krümmungsradius

08332GWP_Demo-Bericht_____01(Word2000) b
X:\Organisation\Marketing\technische Mitteilungen\Airb 20160617 Airbag-Glühbrückenwechseltest\GWP Technische Mitteilung 20060617 Airbag-Anzünder Lebensdauerprüfung REV03.docx

des Drahtes verdichtet sich das Feld hier sehr stark. Die Wahrscheinlichkeit einer Zündung sinkt bei sehr kleinen Oberfläche. Man vermutet, daß die geringe Zahl der umgebenden Gasmoleküle eine Ionisation unwahrscheinlicher werden lassen.

1) Erreichbare Feldstärken

Es gibt keine eindeutigen Gesetze, es wurden aber empirische Daten, zum Durchschlagsverhalten verschiedenartig geformter Elektroden unter diversen Drücken und Atmosphären, ermittelt.
Der Zusammenhang zwischen Leiterradius und Durchschlagsfestigkeit bei hohen Drücken im Zylinderfeld stellt sich folgendermaßen dar:

$$E_{rz} = A\delta\left(1+\frac{B}{\sqrt{\delta \cdot r}}\right) \quad \text{mit} \quad \delta = \frac{Tatsächlicher_Druck}{Normdruck}$$

Die Untersuchungen, die zu dieser Gesetzmäßigkeit führten, wurden mit Drahtstärken von 0.1 bis 30 cm durchgeführt. Je nach Polung und Umgebungsmedium schwanken die Angaben der Parameter A und B. Sie werden im Mittel mit $A = 30.3$ und $B = 0.3$ angegeben.
Auch die Polarität der Elektroden spielt bei der Festigkeit eine Rolle, so ist bei hohem Druck und kleinem Radius eine höhere Feldstärke bei negativem Draht zu erwarten.
Die maximale Feldstärke ist bei Koronabildung erreicht, ein weiteres Erhöhen der angelegten Spannung führt nur zu einer Vergrößerung der Korona. Da die ionisierte Atmosphäre in der Korona stark reaktiv ist, ist bei der Materialprüfung eine Koronabildung zu vermeiden.

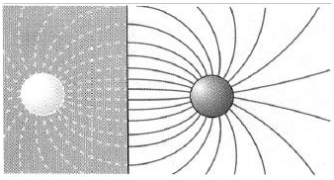
2) Feldstärke am Draht

In Gasatmosphäre mit $\varepsilon_r = 1$

$$E = \sqrt{\frac{F}{A\varepsilon_0}}$$

A ist der Oberflächenanteil des Drahtes, der die anziehende Kraft verursacht.

3) Spannung an den Elektroden



Die Feldlinien zwischen einem zylindrischen Leiter und einer großen ebenen Gegenelektrode besitzen den selben Verlauf wie bei einer zylindrischen Gegenelektrode im doppeltem Abstand. Die ebene Elektrode verhält sich wie ein Spiegel.

Die Feldstärke an der Zylinderoberfläche in Abhängigkeit von der Spannung

$$E = \frac{U\sqrt{\left(\frac{c}{2r}\right)^2 - 1}}{(c-2r)\ln\left[\frac{c}{2r} + \sqrt{\left(\frac{c}{2r}\right)^2 - 1}\right]} \quad \text{mit } c = \text{Achsenabstand}$$

08332GWP_Demo-Bericht_____01(Word2000) b
X:\Organisation\Marketing\technische Mitteilungen\Airb 20160617 Airbag-Glühbrückenwechseltest\GWP Technische Mitteilung 20060617 Airbag-Anzünder Lebensdauerprüfung REV03.docx

Ist der Achsenabstand gegenüber dem Radius sehr groß, geht die Formel über in:

$$E = \frac{U}{2r\ln\left(\frac{c}{r}\right)}$$

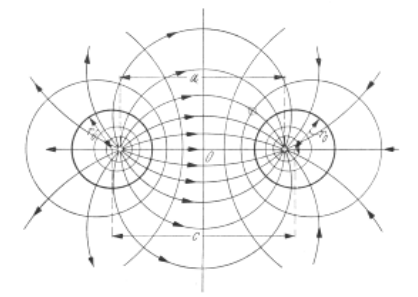


Abb.11.14. Potentiallinien und Verschiebungslinien der parallelen Linienquellen entgegengesetzt gleicher Ladung

Ersetzt man die mittlere Potentialfläche wieder durch eine Elektrode, so ist bei gleicher Ladung des Zylinders und somit auch gleicher Feldstärke die Spannung halb so groß wie zwischen den Zylindern.

$$U = Er\ln\left(\frac{2a}{r}\right)$$

$$2a = c$$

5.2.2. Aufbau

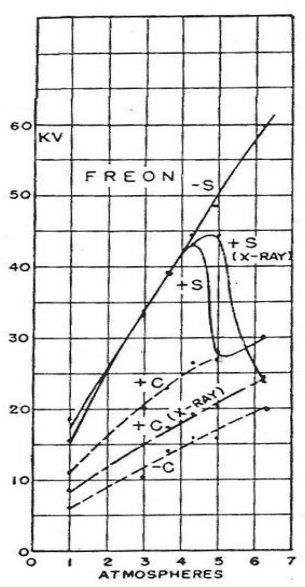
1) Druckbehälter

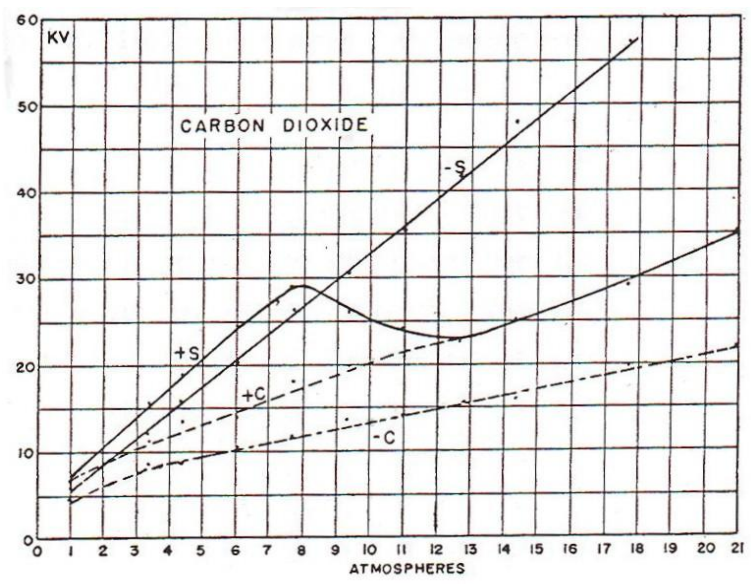
Das Material sollte eine hohe Durchschlagsfestigkeit besitzen und zudem steif sein, um den auftretenden mechanischen Belastungen standzuhalten. Die Wahl fiel auf PMMA (Acrylglas) da es einerseits durchsichtig ist und so eine Beobachtung des Drahtes ermöglicht, andererseits ein sehr steifer Kunststoff ist. Eine Dielektrizitätszahl von 2 bis 3 ist bei Kunststoffen allgemein nicht zu vermeiden, so muss bereits durch das Material mit einer Veränderung des Feldes gerechnet werden. Ein weiterer Störfaktor sind die Zuleitungspins im Zünder und die Spannungszuführung des Zünders.

2) Dimensionierung

Anfangs bestand die Idee den Druckbehälter mit verschiedenen Gasen zu betreiben. Bei Stickstoff oder Kohlendioxid wären, um eine hohe Durchschlagsfestigkeit zu erreichen, Drücke von bis zu $30bar$ notwendig. Es wurde eine vierfache Sicherheit bei der Berechnung miteingeplant. Dies ergab einen Zylinder von min $100mm$ Durchmesser mit Mittelbohrung, von $16mm$ Durchmesser, in die von oben ein Sichtfenster (Dicke $25mm$, ebenfalls aus PMMA) und von unten eine Halterung für den Zünder eingeschraubt wurde. Die Elektroden wurden von den gegenüberliegenden Seiten des Zylinders eingeschraubt, um die Kraft gegebenenfalls auch wechselseitig aufzubringen. Eine außenliegende Dichtung erlaubte es die Geometrie der Elektrode im Inneren beliebig zu gestalten. Es wurden eine großflächige (Durchmesser 8 mm) an den Kanten abgerundete und eine sehr dünne (Kopfdurchmesser etwa 0,5 mm) Elektrode angefertigt. Die Wahl fiel später auf stark elektronegative Gase wie Freon oder Schwefelhexaflourid, da so mit geringem Aufwand hohe Durchschlagsfestigkeiten erreicht werden können. Bei den zum Teil hohen Drücken der anderen Gase wären spezielle Druckventile nötig gewesen.

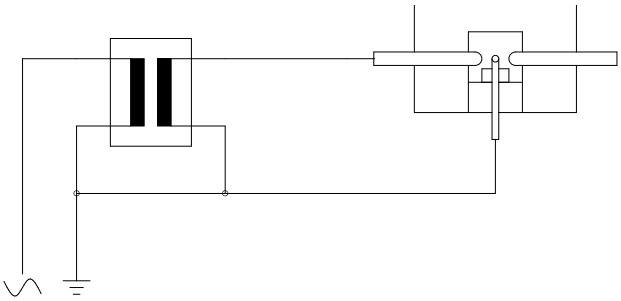
08332GWP_Demo-Bericht_____01(Word2000) b
X:\Organisation\Marketing\technische Mitteilungen\Airb 20160617 Airbag-Glühbrückenwechseltest\GWP Technische Mitteilung 20060617 Airbag-Anzünder Lebensdauerprüfung REV03.docx



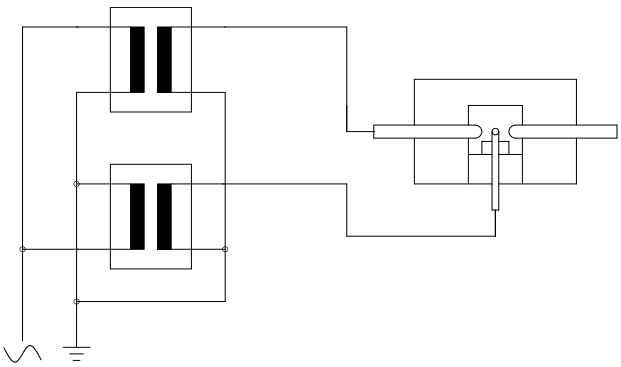


3) Ergebnisse

Der Versuchsaufbau wurde verschieden beschalten. Die Probenkammer wurde Freon befüllt. Ein Druck von $5bar$ hat sich in Vorversuchen als optimal erwiesen. Bei höheren Drücken, bis $6bar$, stieg die Durchschlagsfestigkeit nur mehr unwesentlich, eine Koronabildung war nicht zu beobachten.



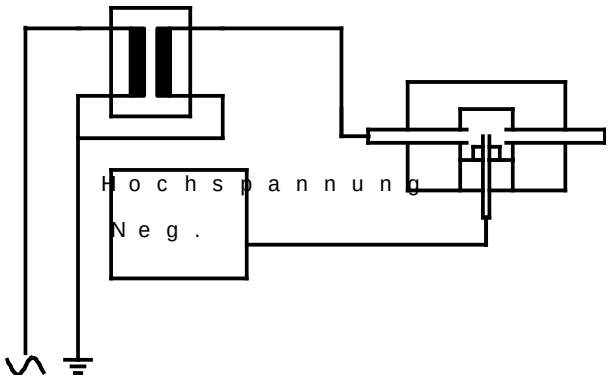
Trafo mit $U = 5{,}7kV_{RMS}$ bei $50Hz$ angeschlossen an eine Elektrode. Bei der großen Elektrode war der Abstand zum Draht circa $2mm$ bei der Dünnen circa $1mm$. Es konnte mit diesem Aufbau weder eine Bewegung des Drahtes noch ein Durchschlag erzeugt werden.
Der zweite Aufbau wurde in der Leistung gesteigert.



Hier arbeiten zwei Trafos, an Draht und großer Elektrode (Abstand $\approx 1mm$), gegenphasig, wodurch die Spitzenspannung auf $U = 11{,}5kV_{RMS}$ erhöht wurde. Es kann bei dieser Beschaltung ohne vorherige Ankündigung, durch Koronabildung, bei $U \approx 9kV_{RMS}$ zur

08332GWP_Demo-Bericht_____01(Word2000) b
X:\Organisation\Marketing\technische Mitteilungen\Airb 20160617 Airbag-Glühbrückenwechseltest\GWP Technische Mitteilung 20060617 Airbag-Anzünder Lebensdauerprüfung REV03.docx

Entladung. Auch hier konnte vor der Entladung keine Bewegung des Drahtes beobachtet werden.
Bedingungen für die dritte Beschaltung waren eine weitere Erhöhung der Durchschlagsfestigkeit und eine bessere Erkennung der Korona.



Die Elektrode wurde am Trafo angeschlossen. Die Elektrode auf negatives Potential gelegt, dass gilt: $\hat{U}_{Trafo} \cong U_{Draht}$.

Die Idee war, daß bei einem System, große Fläche gegen Spitze (Ort hoher Krümmung im Raum), die Entladung bei negativer Spitze zu positiver Fläche erst bei höheren Spannungen auftritt als bei umgekehrter Polarisierung. Da der Draht ebenfalls ein stark gekrümmter Ort ist, konnten so die Spannungen, mit der dünnen Elektrode, bei einem Abstand von $\approx 0{,}5mm$ zum Draht, bis auf $U = 10kV_{RMS}$ gebracht werden. Die Große Elektrode erzeugte keinen Durchbruch mehr. Eine Bewegung des Drahtes konnte immer noch nicht beobachtet werden.

4) Weitere Überlegungen

Bei der kleinen Elektrode kam es stets unvorhersehbar zum Durchbruch, es konnten auch im abgedunkelten Raum keine Leuchterscheinungen beobachtet werden. Mit der großflächigen Elektrode war eine schwache Koronabildung in Form von kleinen Lichtpunkten zu sehen. Die Orte dieser Entladungen lagen an den Aussenkanten der Pins, nicht am Draht. Dies änderte sich bis zum Durchbruch nicht, daher ist anzunehmen, dass der Draht durch die Pins vom elektrischen Feld abgeschirmt wird. Um die Abschirmung zu reduzieren wurde ein 10-fach vergrößertes Modell (die Pins blieben im Verhältnis etwas kleiner). So konnte die Elektrode direkt an den Draht gebracht werden, sozusagen flächig zwischen den Pins. Der Draht konnte problemlos in Schwingung versetzt werden, was das Funktionsprinzip bestätigte. Allerdings schien eine Miniaturisierung auf den Realfall als zu ungewiss und schwer realisierbar

5.3. Anströmen

Nach den Umsetzungsversuchen über Felder, kam nun die Idee auf den Draht doch direkt mechanisch anzuregen. Ein fester Tastfinger schied zur Kraftübertragung aus, da eventuelle Beschädigungen des Drahtes nicht ausgeschlossen werden können. Läßt man den Überträger gedanklich immer weicher werden, so kommt man zu einem Gelee oder einer Flüssigkeit, bei der eine Beschädigung auszuschließen wäre. Die übertragene Kraft kann wegen der komplexen Strömungsdynamik nicht vorherberechnet werden.
Zur Abschätzung wurde eine vollständig Turbulente Strömung hinter dem Draht angenommen. Hier gilt

$$F_w = c_w A_T \frac{\rho}{2} V^2$$

08332GWP_Demo-Bericht_____01(Word2000) b
X:\Organisation\Marketing\technische Mitteilungen\Airb 20160617 Airbag-Glühbrückenwechseltest\GWP Technische Mitteilung 20060617 Airbag-Anzünder Lebensdauerprüfung REV03.docx

Man wäre auf eine dauernde Beobachtung der Verformungen am Draht angewiesen, aus denen sich die inneren Spannungen ableiten lassen.

5.3.1. Strömungskanal mit Fluid

Flüssigkeiten hoher Dichte können bereits bei geringer Fließgeschwindigkeit eine hohe Kraft erzeugen. Die meisten verhalten sich ähnlich wie Newtonsche Flüssigkeiten, daher ist an der Oberfläche die Strömungsgeschwindigkeit gleich Null und nimmt mit der Entfernung abhängig von der Viskosität zu.

Die Geschwindigkeitsverteilung in einem Kanal

$$V_{(R)} = \frac{\Delta p}{4\eta l} \cdot \left(R^2 - r^2\right)$$

R ist der Rohrdurchmesser und r der Beobachtungsort.

Beispiele für Viskositäten:

$\eta_{Wasser} = 1{,}0 \cdot 10^{-3}$ (bei 20°C)

$\eta_{Motoröl} \approx 400 \cdot 10^{-3}$ (je nach Typ)

Häufig sind die Zünddrähte nahe an den Oberflächen verbaut, woraus geringe Fließgeschwindigkeiten und somit auch geringe Kräfte resultieren. Für die Tests wurde, wegen des guten Dichte/Viskositätsverhältnisses, entgastes Wasser verwendet. Öle haben eine geringere Dichte und wegen ihrer höheren Viskosität bei gleichem Druck eine niedrigere Fließgeschwindigkeit, somit eine geringere Wechselwirkung mit dem Draht.

Der Strömungskanal bestand aus einer engen Röhre mit durchsichtigem Deckel, die Querschnittsfläche betrug $10mm^2$. Der Zünder wurde von unten eingeführt, an den Seiten befinden sich die Anschlussklemmen für die Pumpe beziehungsweise den Ausgleichsbehälter.

Für die Bewegung der Flüssigkeit sorgte in der ersten Umsetzung eine Membranpumpe. Die Strömungsgeschwindigkeiten reichten nicht aus, um einen sichtbaren Effekt am Draht zu erzeugen. Da die Pumpe bereits an ihrer Leistungsgrenze arbeitete, kam eine Querschnittsverengung des Kanals nicht in Frage.

Die zweite Umsetzung arbeitete dann mit einem Pneumatikkolben, angetrieben durch eine Exzentnerscheibe. Hierdurch stand nun genügend Arbeitsvolumen und Druck zur Verfügung.

Für die Verbindungen wurden mehrfach stahlummantelte Pneumatikschläuche verwendet, um Druckverluste zu vermeiden.

Trotz der Verwendung von pneumatischen Hochdruckteilen, kamen stets Gasblasen ins Innere des Aufbaus die auch nach dem Abschalten noch blieben, also nicht durch Kavitation verursacht wurden. Vermutlich waren die Grenzen der Dichtungsmaterialien, vermutlich im Kolben, erreicht. Eine weitere Erhöhung der Strömungsgeschwindigkeit war somit nicht mehr möglich.

5.3.2. Luft

Luft könnte man als den Extremfall der Fluidumsetzung, im Bezug auf die Viskosität, ansehen. Luft kann problemlos durch kleine Düsen geleitet werden und so genau an den Zielort geführt werden. Durch eine solch starke Bündelung können hohe Kräfte erzeugt

08332GWP_Demo-Bericht_____01(Word2000) b
X:\Organisation\Marketing\technische Mitteilungen\Airb 20160617 Airbag-Glühbrückenwechseltest\GWP Technische Mitteilung 20060617 Airbag-Anzünder Lebensdauerprüfung REV03.docx

werden. Aber hohe Verwirbelung führt zu unvorhersehbaren höherfrequenten Kräften am Draht.
In der Umsetzung wurden zwei gegenüberliegende, leicht in der Höhe versetzte Düsen an einer beweglichen Platte angebracht. Durch einen Antrieb auf und ab bewegt, traf die Druckluft nun wechselseitig auf den dazwischenliegenden Draht. Die Düsen hatten einen Innendurchmesser von $0{,}5mm$ und einen Abstand vom Draht von jeweils $1-2mm$. Als Druckluftzuführung wurde der Hausanschluss mit konstant $6bar$ genutzt.
Dieser letzte Versuch einer Umsetzung führte zum ersten Mal zu einem, durch aufgebrachte Schwingungen, zerstörtem Zünddraht. Allerdings zeigte sich bei weiteren Durchläufen eine völlig statistische Verteilung der Haltbarkeit. Bei $400U/\min$ und oben genannten Einstellungen lag die Lebensdauer zwischen 30s bis über eine Stunde.

Zünder Nr.:	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Dauer in min:sec	0:50	27:30	1:40	∞	4:40	26:20	∞	15:30	10:30	7:30
Wechsel	700	22000	1400	-	3800	21000	-	12400	8400	6000

Zünder Nr.:	11	12	13	14	15	16	17	18
Dauer in min:sec	∞	0:30	5:40	13:50	3:50	25:20	8:00	18:50
Wechsel	-	400	4500	11000	3100	20000	6400	15000

∞ : bedeutet eine Lebensdauer von mehr als einer Stunde

Eine nähere Untersuchung der Reproduzierbarkeit wurde nicht mehr durchgeführt.

6. Schlussgedanke

Dass bisher zu diesem mikrotechnologischem Thema noch keine Tests entworfen wurden verwundert angesichts der komplexen Probleme nicht. Unter der Maßgabe, das Bauteil aufgrund seiner Empfindlichkeit, möglichst berührungslos zu untersuchen, finden sich kaum Möglichkeiten ausreichende Kräfte wirken zu lassen.

Bei elektrischen und magnetischen Feldern muss das Testobjekt von vornherein elektrisch leitend sein. Dies ist im Hinblick auf eine breitere Anwendung, außerhalb der Testung von Airbagzündern, ein Hindernis. Zudem sind die Wechselwirkungen mit den Feldern bei vertretbarem Aufwand einer Studienarbeit zu gering, um auf dieser Basis ein Testverfahren entwickeln zu können.
Die Umsetzung durch Anströmen des Drahtes führte, unter den realisierten Testbedingungen, zu ersten Ergebnissen. Eine Weiterführung sollte auf dieser Erkenntnis aufgebaut werden.

Zorneding, den 17.06.2006

Dr. Julius A. Nickl

08332GWP_Demo-Bericht_____01(Word2000) b
X:\Organisation\Marketing\technische Mitteilungen\Airb 20160617 Airbag-Glühbrückenwechseltest\GWP Technische Mitteilung 20060617 Airbag-Anzünder Lebensdauerprüfung REV03.docx

7. Literaturverzeichnis

The Effect of Pressure on the Positive Point-to-Plane Discharge in N_2, O_2, CO_2, SO_2, SF_6, CCl_2F_2, Air, He and H_2
H. C. Pollock
F. S. Cooper
Research Laboratory, General Electric Company, New York

Der Elektrische Durchschlag
Berthold Gänger

Gasentladung bei Nieder- und Hochfrequenz
Franz Miseré
Physikalisches Institut der TU Aachen

Grundlagen der Elektrotechnik
Prof. Dr. Klaus Krause
www.weblearn.hs-bremen.de

Roark´s Formulas For Stress And Strain (6. Auflage)
Warren Young
McGraw Hill Book Company

Tabellenbuch Metalle (40. Auflage)
Verlag Europa-Lehrmittel

Taschenbuch der Elektrotechnik und Elektronik (7. Auflage)
Dr. Harry Brauer
Prof. Dr. Constans Lehmann
Carl Hanser Verlag

Dauerschwingversuch (Begriffe, Zeichen, Durchführung, Auswertung)
DIN 50100

Zerstörende Prüfung von Schweißungen
ENISO 14324

8. Bildanhang

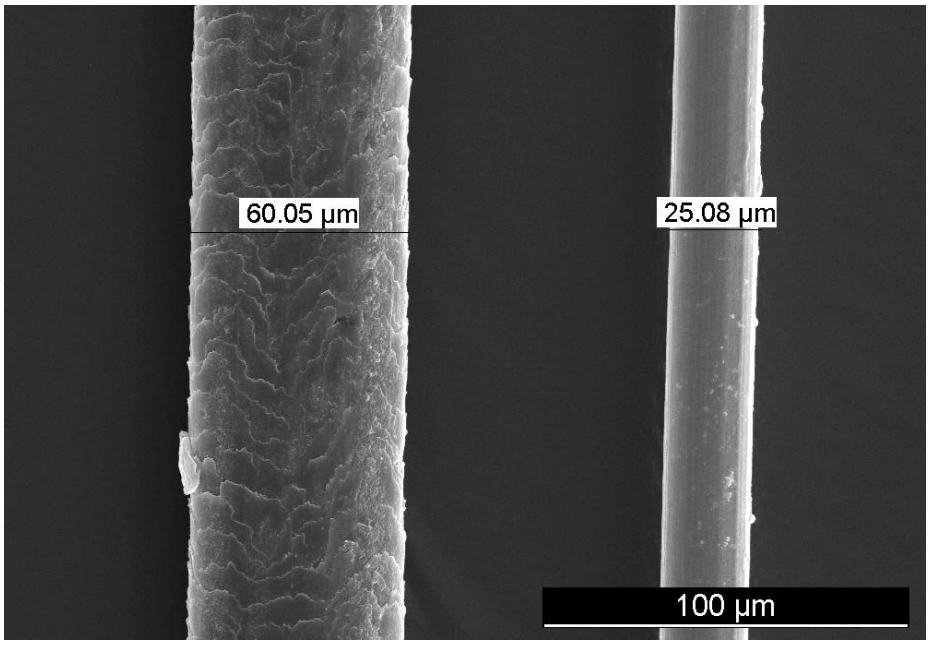


Bild 1: **Fehler! Unbekannter Name für Dokument-Eigenschaft.**

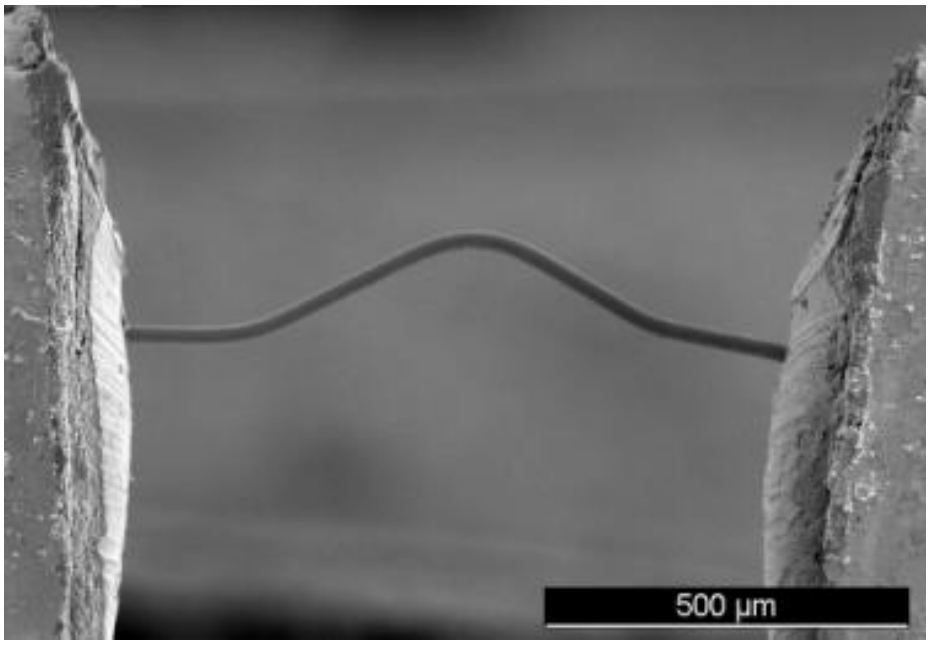


Bild 2: **Zünddraht**

Fehler! Unbekannter Name für Dokument-Eigenschaft.: 100fach

Fehler! Unbekannter Name für Dokument-
Fehler! Unbekannter Name für Dokument-
08332GWP_Demo-Bericht_____01(Word2000) b
X:\Organisation\Marketing\technische Mitteilungen\Airb 20160617 Airbag-Glühbrückenwechseltest\GWP Technische Mitteilung 20060617 Airbag-Anzünder Lebensdauerprüfung REV03.docx

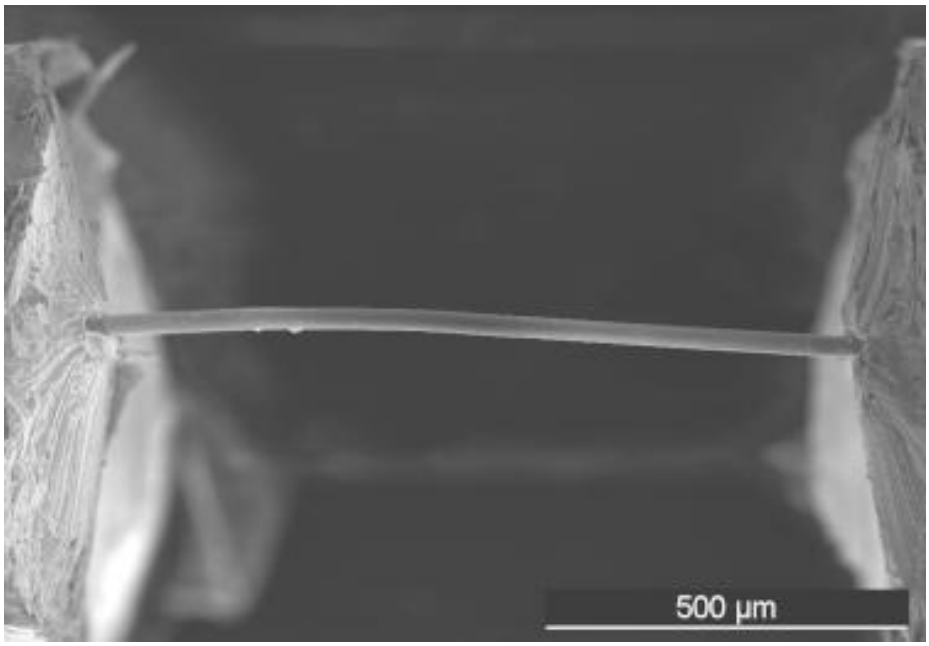


Bild 3: **Zünddraht**

Fehler! Unbekannter Name für Dokument-Eigenschaft.100fach

Fehler! Unbekannter Name für Dokument-

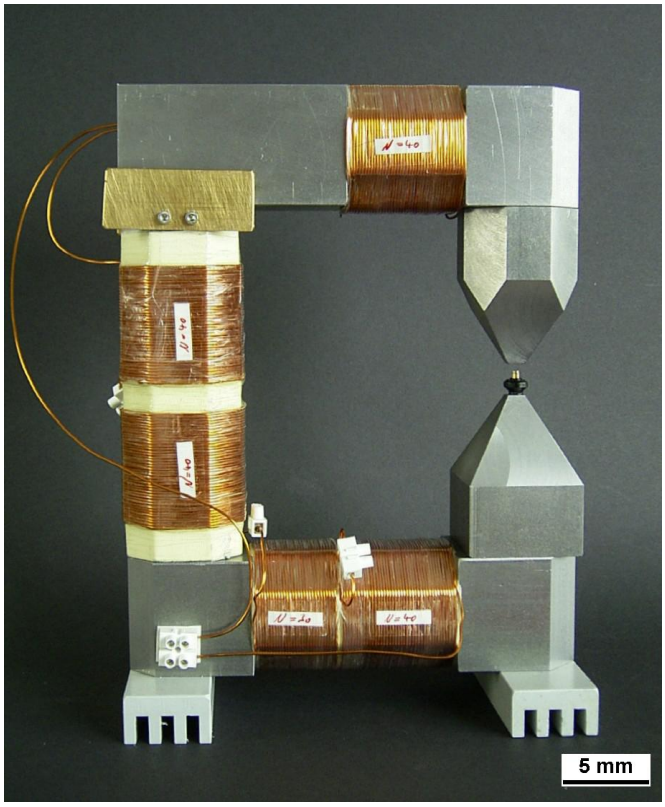


Bild 4: **Fehler! Unbekannter Name für Dokument-Eigenschaft.**

Fehler! Unbekannter Name für Dokument-Eigenschaft.

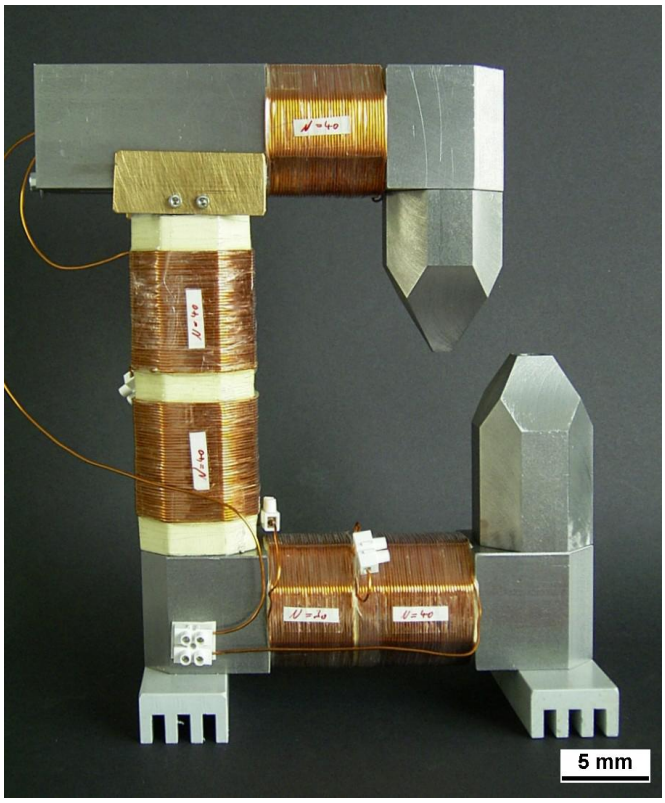


Bild 5: Fehler! Unbekannter Name für Dokument-Eigenschaft.

Fehler! Unbekannter Name für Dokument-Eigenschaft.

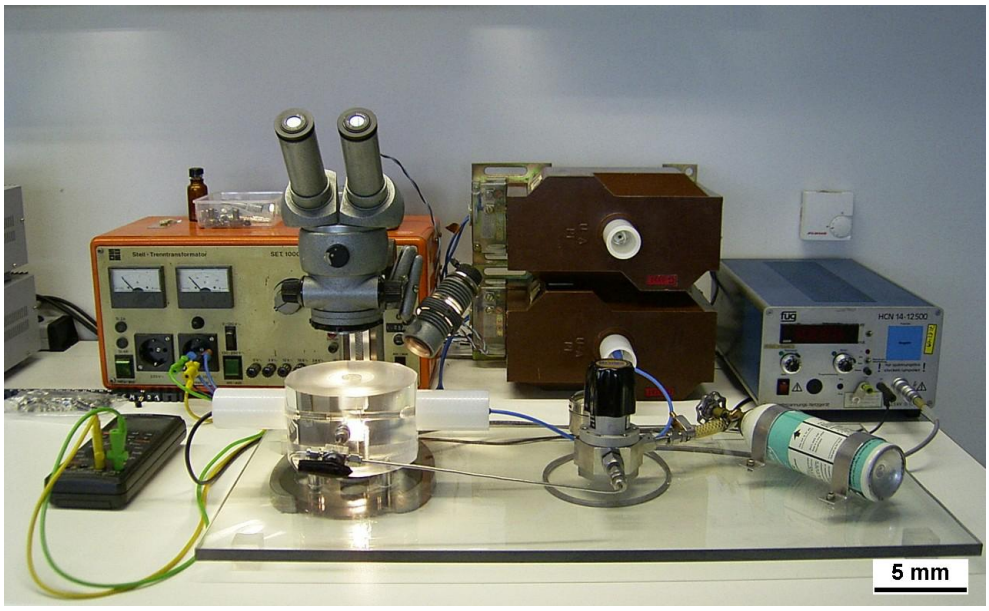


Bild 6: Fehler! Unbekannter Name für Dokument-Eigenschaft.

Fehler! Unbekannter Name für Dokument-Eigenschaft.

Fehler! Unbekannter Name für Dokument-

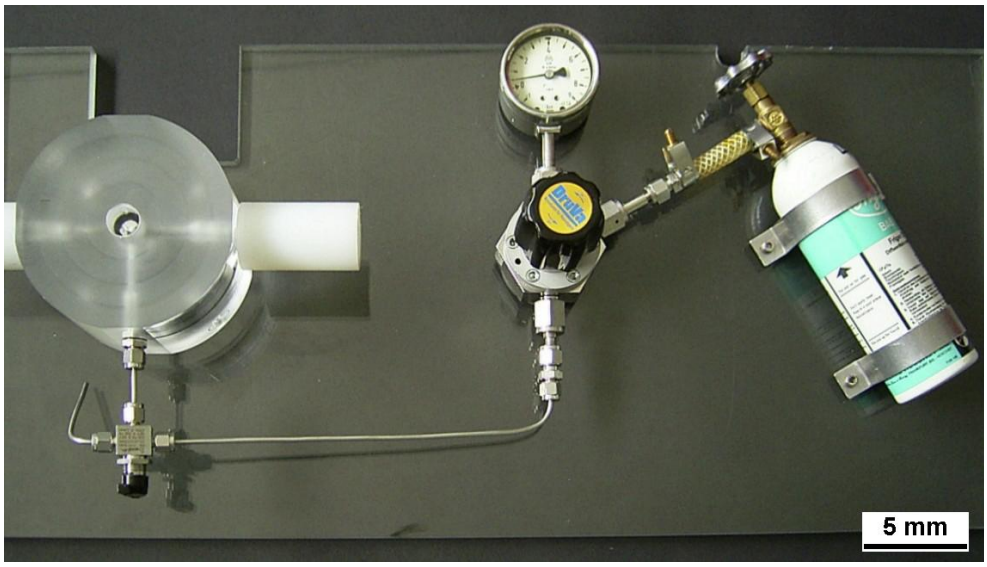


Bild 7: Fehler! Unbekannter Name für Dokument-Eigenschaft.

Fehler! Unbekannter Name für Dokument-Eigenschaft.

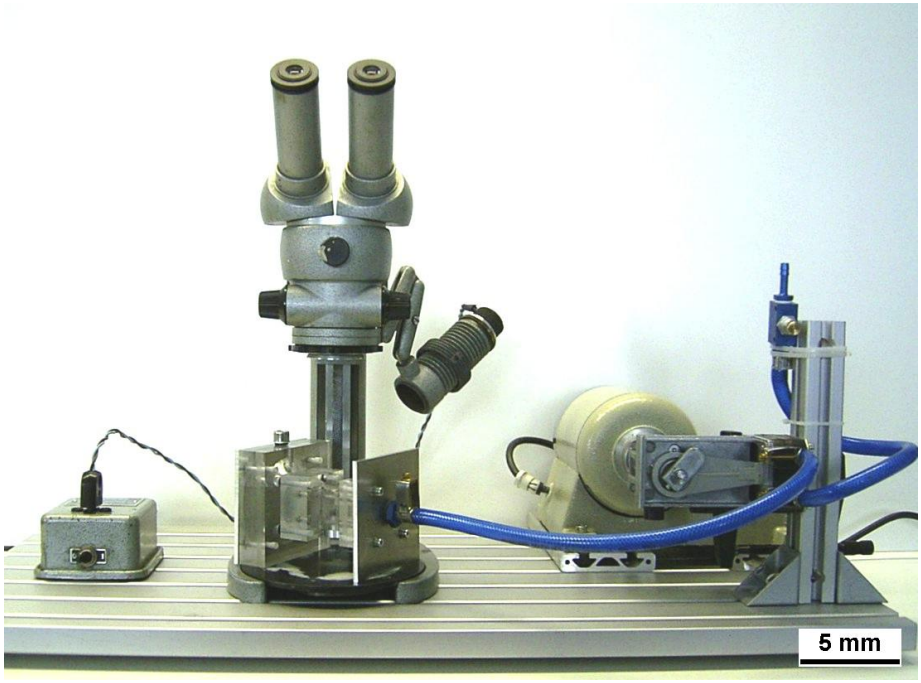


Bild 8: Fehler! Unbekannter Name für Dokument-Eigenschaft.

Fehler! Unbekannter Name für Dokument-Eigenschaft.

Fehler! Unbekannter Name für Dokument-

Fehler! Unbekannter Name für Dokument-

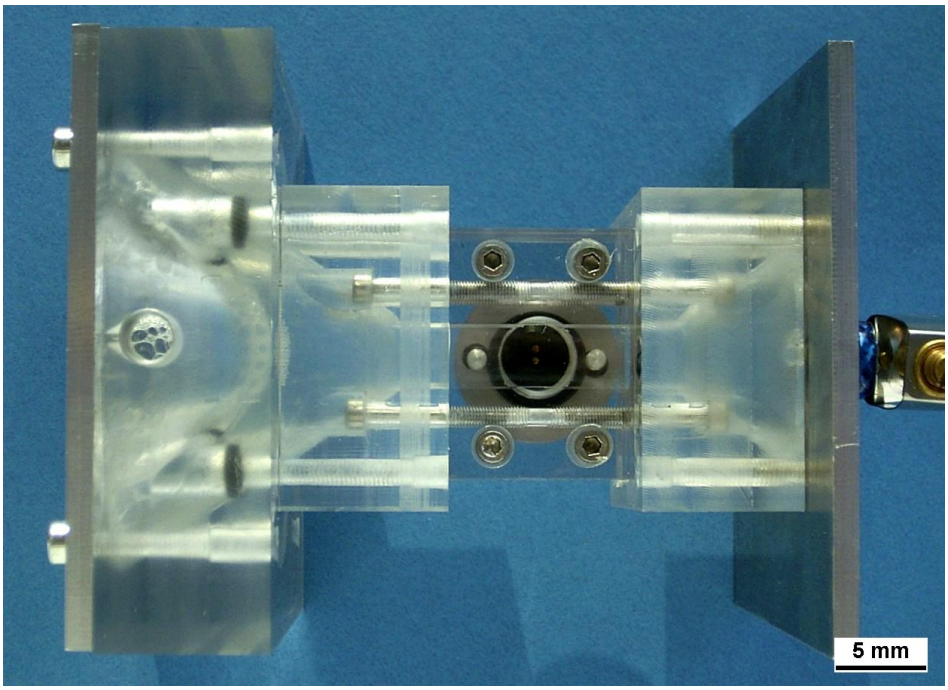


Bild 9: Fehler! Unbekannter Name für Dokument-Eigenschaft.

Fehler! Unbekannter Name für Dokument-Eigenschaft.

Fehler! Unbekannter Name für Dokument-

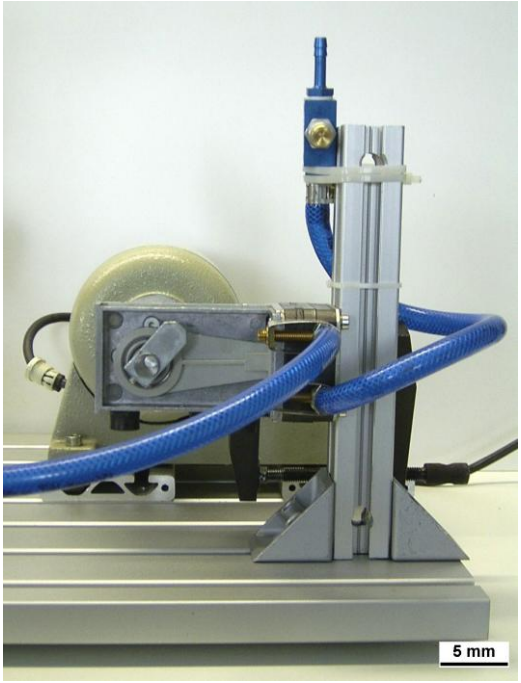


Bild 100: Fehler! Unbekannter Name für Dokument-Eigenschaft.

Fehler! Unbekannter Name für Dokument-Eigenschaft.

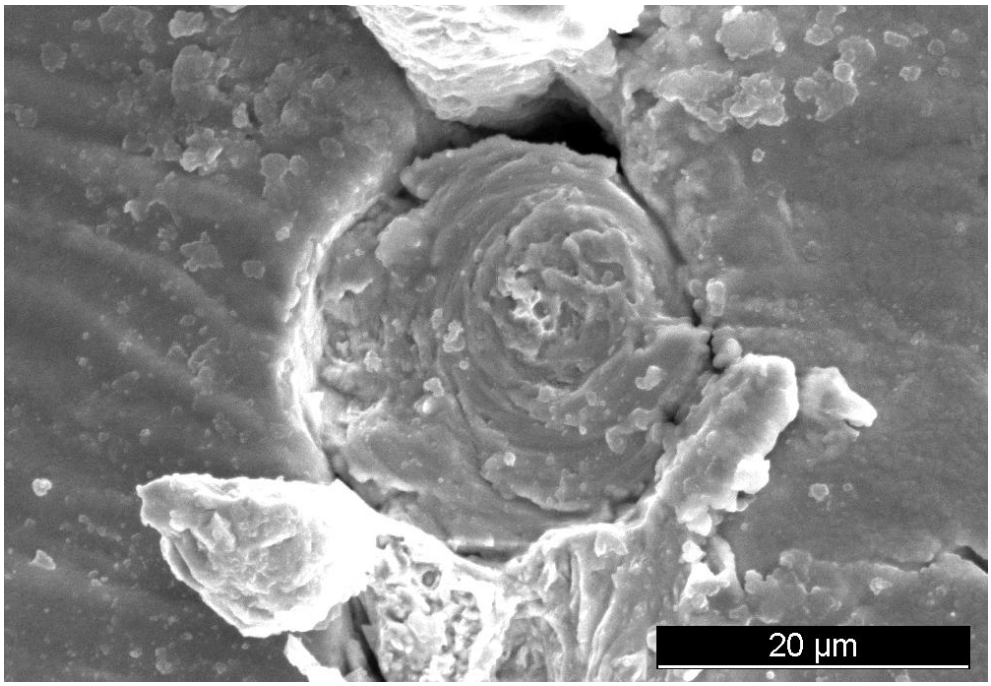


Bild 11: Fehler! Unbekannter Name für Dokument-Eigenschaft.

Fehler! Unbekannter Name für Dokument-Eigenschaft.

Fehler! Unbekannter Name für Dokument-

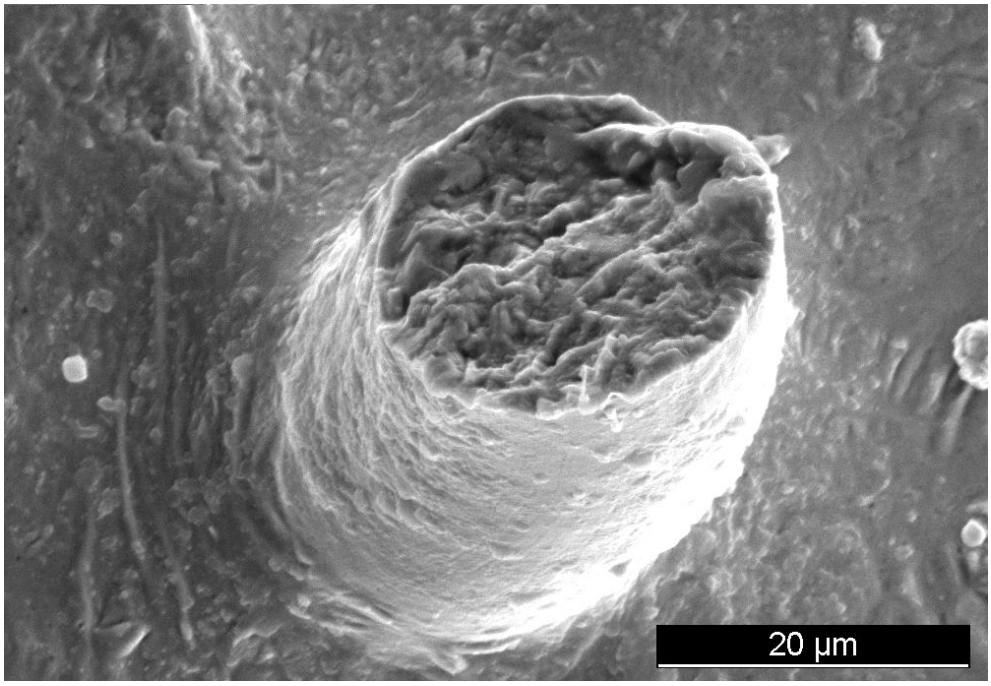


Bild 12: Fehler! Unbekannter Name für Dokument-Eigenschaft.

Fehler! Unbekannter Name für Dokument-Eigenschaft.

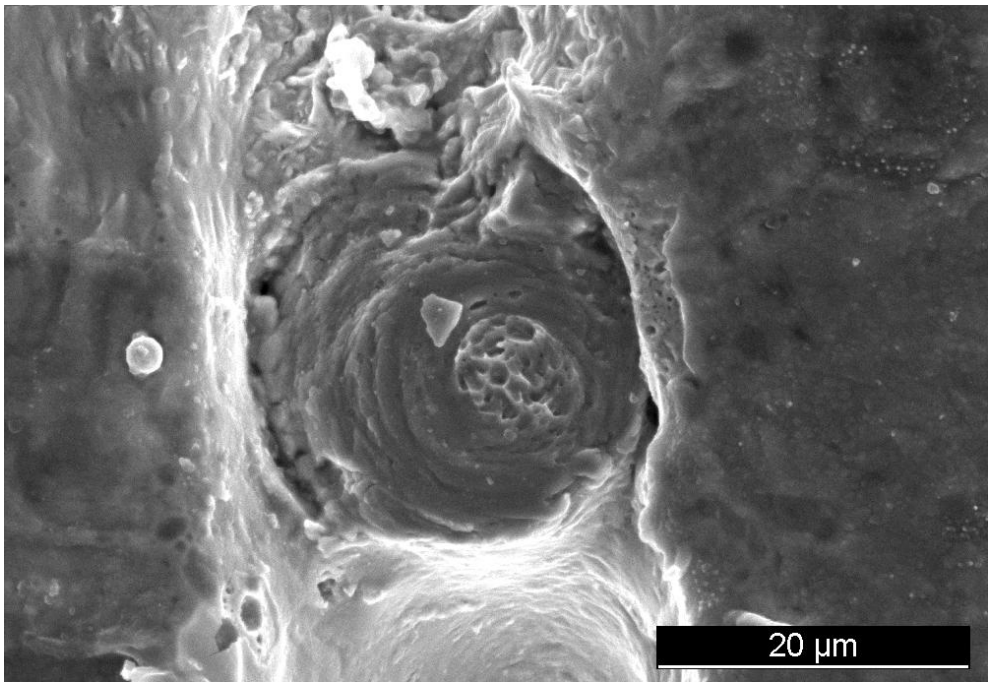


Bild 133: Fehler! Unbekannter Name für Dokument-Eigenschaft.

Fehler! Unbekannter Name für Dokument-Eigenschaft.

Fehler! Unbekannter Name für Dokument-

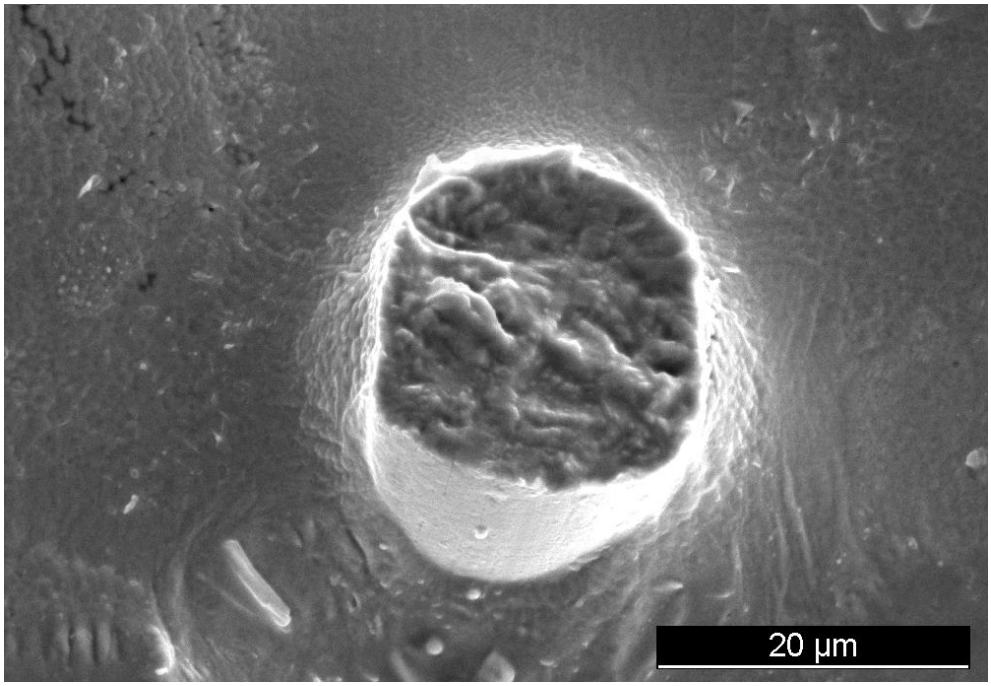


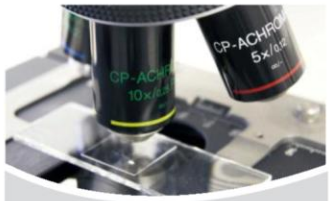
Bild 14: Fehler! Unbekannter Name für Dokument-Eigenschaft.

Fehler! Unbekannter Name für Dokument-Eigenschaft.

» Gesellschaft für Werkstoffprüfung mbH

› Analytik

› Werkstoffprüfung



› Materialografie

› Qualitätssicherung

› Schadensanalyse

› Entwicklung

› Laborservices

› Analytikum
› Chemie & Korrosionslabor
› Elektroniklabor
› Gaslabor
› Kunststofflabor
› Materialografie
› Mikroskopie REM/LIM
› Umweltsimulation
› Werkstatt
› Werkstoffprüfung
› Zerstörungsfreie Werkstoffprüfung

› Schadensanalyse

› Airbag
› Batterien
› Baustoffe
› Fraktographie
› Heterogene Katalyse
› Industrielle Prozesse und Produkte
› Korrosion
› Kunststoffe
› Medizintechnik
› Metallische Gefüge
› Oberflächentechnik
› Zerstörungsfreie Prüfung

› GWP Gesellschaft für Werkstoffprüfung mbH
› Georg-Wimmer-Ring 25, D-85604 Zorneding/München
› Tel. +49 (0) 8106 994 110
› Fax +49 (0) 8106 994 111
› Mail info@gwp.eu
› Web www.gwp.eu

GWP