

## Fragen zu Saitendrähten und ihren Stimmwirbeln

In den letzten Jahren sind von verschiedenen Instrumentenbauern, vom Hackbrett bis zum Klavierbau, immer wieder Fragen zu Problemen in Zusammenhang von Wirbeln und Saiten an uns herangetragen worden. Zum Beispiel die Beobachtung:

- Der zur Zeit verwendete Messing-Saitendraht verfärbt sich im Bereich der Stegstifte oder direkt am Stimmnagel blau bis schwarz und reisst nach einiger Zeit auch ohne, dass der Stimmnagel gedreht wird.
- Der zur Zeit verwendete Bronze-Saitendraht hat die Tendenz mit der Zeit aus den Löchern der Stimmnägel zu gleiten (herauszuwandern) oder direkt am Stimmnagel zu Reißen.
- Der zur Zeit verwendete Klavier-Saitenstahldraht hat die Tendenz mit der Zeit aus den Löchern der Stimmnägel zu gleiten (herauszuwandern), was zu Problemen in Produktion und Service führt.

Obwohl es sich um drei unterschiedliche Materialien handelt, haben sie ähnliche Rahmenbedingungen:

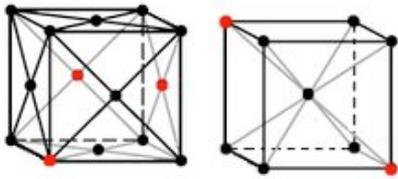
es sind Drähte, die an einem Punkt angehängt, über Stege mit den richtungswinkeländernden Stiften in ein Loch eines Stahlnagels laufen, der, wenn er gedreht wird, nicht nur die Dehnung der Drähte ändert, sondern auch deren kristalline Struktur je nach Durchmesser Verhältnis von Draht und Wirbel verformt. Es handelt sich also nicht nur um eine longitudinale elastische/plastische Veränderung sondern auch noch um arkische Streckungen und Stauchungen, die zu erheblichen Veränderungen im Saitenmaterial führen.

Um sich eine Vorstellung zu machen hier einige Zitate aus „Metallographie“ der MPA Stuttgart<sup>mpa</sup> und Zeichnungen/Bilder aus wikipedia<sup>wiki</sup>, sowie Informationen, die im Rahmen einer Betrieblichen Weiterbildung mit Prof. Reinhard, Dresden, gesammelt wurden.

„Gefüge der Metalle und Legierungen sind aus einer Vielzahl kleinster Körner, sogenannter Kristallite, aufgebaut. Die Metalle sind polykristallin, d.h. aus vielen Kristallen bestehend. Benachbarte Kristallite stoßen längs der Berührungsflächen (Korngrenzen), jedoch unter verschiedenen Netzebenenwinkeln, zusammen, woraus eine Störung des ansonsten geregelten Gitteraufbaus im Bereich der Korngrenzen resultiert. Das Verhältnis von geregeltem (ungestörtem) Gitter im Korninnern zum unregelmäßigen Korngrenzenbereich hängt von der Größe der Kristallite ab und ist von erheblicher Bedeutung für zahlreiche technisch- physikalische Eigenschaften der Metalle, insbesondere Zähigkeit. Die im Schliff erkennbaren Korngrenzen geben keine Aussage über die Korngrößen, da die Schnittfläche nur einen ebenen Schnitt durch das Kornkonglomerat darstellt, beispielsweise Kugelhaufen. Bei einem Schnitt wird nicht jede Kugel an ihrem Äquator geschnitten. Theoretisch sind alle ebenen Korngrößen zwischen null und dem Äquator zu erwarten. Wegen dieser Schwierigkeit begnügt man sich mit einer Durchschnittsgröße, entweder dem mittleren Flächeninhalt oder dem mittleren Durchmesser der Kristallite“<sup>mpa</sup>.

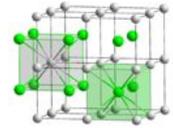
Beispiel Messing CuZn:

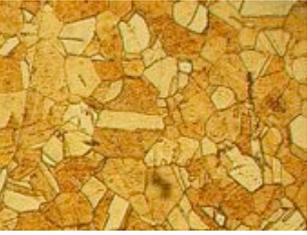
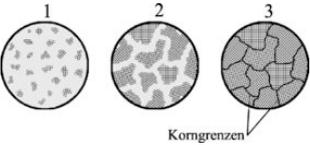
„Zink (Zn) ist in Kupfer (Cu) aufgrund der unterschiedlichen Kristallsysteme nur begrenzt löslich. Technisch verwendbare Messinge enthalten zwischen 5 bis maximal 45 Prozent Zink. Es löst sich ohne Änderung der Struktur in festem Kupfer bis zu einem maximalen Anteil von 32,5 % und bildet einen **kubisch-flächenzentrierten** (kfz) Substitutionsmischkristall, der als  $\alpha$ -Messing bezeichnet wird. Die Soliduslinie sinkt im Bereich der reinen  $\alpha$ -Phase von 1083,62 °C (0 % Zn) bis



902 °C (32,5 % Zn) Im Bereich zwischen 32,5 % und 36,8 % Zink entsteht neben der  $\alpha$ -Phase auch eine  $\beta$ -Phase, die im **kubisch-raumzentrierten** (krz) Gitter erstarrt. Bis etwa 37 % Zink wandelt sich die  $\beta$ -Phase bei tieferen Temperaturen allerdings wieder in die  $\alpha$ -Phase um. Legierungen mit etwa 50 % Kupfer und 50 % Zink kristallisieren entweder in der  $\beta$ -Phase oder der  $\beta'$ -Phase: Bei Temperaturen unter 468 °C ist die

$\beta'$ -Phase stabil, bei der 8 Kupferatome jeweils 8 Zinkatome umgeben und dabei die Caesiumchlorid-Struktur einnehmen. Oberhalb 468 °C, in der  $\beta$ -Phase, verteilen sich die Atome statistisch auf Gitterplätze eines kubisch raumzentrierten Gitters.



 <p>Gefügeschliffbild von gewalztem und geglühtem Messing <a href="http://de.wikipedia">de.wikipedia</a></p>		 <p>Vereinfachtes Schaubild für eine nichtdendritische Erstarrung: Bildung von (1) Kristallisationskeimen, (2) Wachsen der Kristalle, (3) Fertiges Gefüge (Original uploader was <a href="#">Ra'ike</a> at <a href="#">de.wikipedia</a>)“</p>	
---	--	---	--

Kaltverformung (schmieden, pressen, ziehen) ist eine plastische Deformation unterhalb der Rekristallisationstemperatur. Durch Kaltverformung erhöht sich die Härte, Streckgrenze und die Festigkeit; andererseits verringern sich in Folge der Kaltverformung die Elastizitätsparameter Dehnfähigkeit, Einschnürung (Schmiedbarkeit) und Kerbschlagzähigkeit. Die Temperatur der Kristallerholung liegt tiefer als die Rekristallisationstemperatur. Im Schliffbild ist die Kristallerholung nicht zu erkennen, weil die bei Verformung gestreckten Kristalle erhalten bleiben. Wenn ein völlig neues ganz entspanntes Gefüge gebildet wird, liegt eine Rekristallisation vor. Ein kaltverformtes durch das Ziehen verdichtetes Metall befindet sich in einem „Zwangszustand“, der sich mit steigender Temperatur (Zwischenglühen) vermindern und die Folgen der Kaltverformung auch ganz aufheben kann. Eine *weitgehende* Beseitigung dieses Zwangszustandes ohne Neubildung des Gefüges und ohne Verschiebung der Korngrenzen wird Kristallerholung genannt.“<sup>wiki</sup>

Beim Aufziehen und Stimmen der Saiten sind zwei kritische Bereiche zu beobachten:

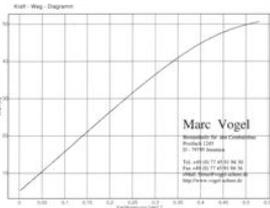
1. die Streckung der Saite an sich mit der Friktion (Reibung) durch die Umlenkung der Saiten an den Stegstiften oder Sillie
2. die Ösen der Anhängung und die Dehnung des Drahtes an der Aussenseite und gleichzeitigen Stauchung an der Innenseite beim Wickeln um den Wirbel

Zu 1. : Dehnung und Spannung

Um eine Mensur optimal gestalten zu können, bedarf es sowohl Kenntnis des Materialverhaltens wie auch der Kennwerte der Drahtmaterialien, die verwendet werden sollen. Dazu einige Anmerkungen:

Prüf - Bericht

VORGABEN:	RESULTATE:
Material: Vogel Cu60	Bruchgrenze: 1027,148 N/mm <sup>2</sup>
Stab: Gewicht: 8,81 g/cm <sup>3</sup>	0,2% - Dehngrenze: 1026,439 N/mm <sup>2</sup>
Ø: 0,25 mm	0,2% - Elastizitätsgrenze: 728,524 N/mm <sup>2</sup>
Kraftaufnehmer: 200 N	empfohlene max. Spannung: 842,262 N/mm <sup>2</sup>
Diagrammgenüge: 5 N	Kraft bei Bruch: 50,420 N 100,000 %
Messlänge: 50 mm	Kraft bei Dehngrenze: 20,236 N 99,803 %
Probekörperart: 0248 mm <sup>3</sup>	Kraft bei Elastizitätsgrenze: 35,762 N 75,805 %
	empfohlene max. Kraft: 41,349 N 82,698 %
<b>DOCUMENTATION:</b> Serien-Nr: 2 1_258.PRB Charge: 20024 Prüfer: Carlo Mazzoli Prüfdatum: 05.07.2007 16:04:41	Qualitätsmodul: 10000,000 N/mm <sup>2</sup> Stabtyp: 106,707 N/mm <sup>2</sup> C: 485,032 - R: 415,332 Länge bei Bruch: 344,663 mm Länge bei Dehngrenze: 344,208 mm Länge bei Elastizitätsgrenze: 350,121 mm empfohlene max. Länge: 311,368 mm C: 503,032 - R: 460,032 Länge bei Bruch: 305,139 mm Länge bei Dehngrenze: 304,868 mm Länge bei Elastizitätsgrenze: 311,302 mm empfohlene max. Länge: 294,441 mm



Bei der gemessenen Verlängerung des Drahtes bis zum Reisspunkt, treten verschiedene Arten von Dehnung auf. Man unterscheidet in reversible und irreversible oder wie die Normung formuliert in **elastische** ( $\Delta L_e$ ) und **nicht proportionale** Verlängerung ( $\Delta L_p$ ). Steigt die Belastung über die Elastizitätsgrenze an, bleibt nach Abbau der Kräfte eine bleibende Verformung ( $\Sigma r$ ) zurück.

Die Normgebung definiert die **Elastizitätsgrenze** da, wo die nicht proportionale Verlängerung 0,01% der Prüflänge erreicht. Bei unserer Testanordnung mit einer Prüflänge von 50 mm im Längenextensiometer entspricht das also einer plastischen Verformung von 0,005 mm. Zur Ermittlung der verschiedenen Dehngrenzen auf der Kraft-Weg-Kurve, muss zuerst eine Parallele zum Diagrammbeginn gelegt werden.

Wir definieren den Beginn dieser Parallelen bei 20% und das Ende bei 40% der maximalen Kraft. Man könnte die Grenzen auch tiefer und enger setzen. Bei tiefliegenden Werten können aber schon kleinste Ungenauigkeiten zu starken Schwankungen führen. Ebenso können eng liegende Grenzen bei weichen Materialien zu starken Schwankungen führen. Mit dem von uns bewusst etwas gross und hoch gesetzten Intervall ist es dafür möglich, all die verschiedenen Materialien die bei Cembalo- und Klavierbau vorkommen mit den gleichen Einstellungen zu testen und so eine optimale Vergleichbarkeit der Messergebnisse zu erzielen.

Diese so definierte Parallele zeigt also eine bestimmte Steigung im Kraft-Weg-Diagramm, die zur Berechnung der **Steifigkeit**, auch Federkonstante genannt, gebraucht wird. Führt man diese Parallele weiter bis sich die Probe um 1 mm verlängert hat, erhält man die Federkonstante in N/mm. Da die Kraft jedoch sehr vom Durchmesser der Probe abhängig ist, kann man verschiedene Materialien nur bei gleichem Durchmesser vergleichen. Die Federkonstante fliesst in die Berechnung der **Inharmonizität** ein.

Das **Elastizitätsmodul** ist eine Materialkennzahl, die die Spannung bei einer Verlängerung der Messlänge um 100% bezeichnet (Federkonstante x Messlänge / Probenquerschnitt). Das E-Modul wird in der Mensurberechnung gebraucht. Da es sich um eine Kraft pro Querschnitt (Spannung) handelt, kann man die verschiedenen Durchmesser miteinander vergleichen. Dabei stellt man fest, dass das E-Modul sowohl von der Legierung als auch von der Kaltverformung des Materials abhängig ist.

Zur Definition der 0,01%-Elastizitätsgrenze wird nun diese parallele Linie um 0,005 mm nach rechts verschoben. Der Schnittpunkt ergibt die Elastizitätsgrenze. Genauso definiert man die 0,2%-Dehngrenze ( $R_{p0,2}$ ), nur muss die Parallele um 0,1 mm nach rechts im Diagramm verschoben werden. Da sich die Prozentwerte der nicht proportionalen Dehnung ( $\Sigma p$ ) bei uns auf die Messlänge von 50 mm beziehen, sind dies auf unserem Diagramm die gemessenen Verlängerungen von 0,005 und 0,1 mm. Eine klare **Streckgrenze** mit anschliessendem Fliessbereich haben kaltverformte Saitendrähte nicht. Deshalb kann diese nicht definiert werden. Bei Materialien ohne Streckgrenze wird als Ersatz für diese die **0,2% - Dehngrenze** berechnet. Diese halten wir für den praktischen Einsatz im Cembalo- und Klavierbau für etwas zu grob. Auf der anderen Seite finden wir die Elastizitätsgrenze zu genau. So haben wir eine zusätzliche Grenze ( $R_{r0,03}$ ) ermittelt, die wir bei **0,03% plastischer Dehnung** definieren. Diese bezeichnen wir auf dem Diagramm als empfohlene maximale Spannung.

## Zu 2. : Elastizität und Festigkeit

Die Belastung der Saite ist an beiden Enden am grössten. Bei der Anhängungs-Öse ist durch die extreme Verformung des um den eigenen Durchmesser geschlungenen Drahtes, dem so genannten **Kaltverschweissten**, ein Maximum an Streckung/Stauchung gegeben. Hat die Öse einmal ihre Form, darf sie auf keinen Fall wieder geöffnet werden (zurückdrehen des Drahtes), da sie sonst sofort bricht. Das wird aus den anfangs beschriebenen Kristallgefügen deutlich, die sich nur durch Erwärmung wieder entspannen können. Hinzu kommt, dass ein Material, das schon durch

den Ziehprozess hoch verdichtet („Feder“ - hartgezogen) ist, mit jeder weiteren Verdichtung - Pressung, Streckung, Stauchung- an Steifigkeit zunimmt und an Elastizität verliert. Die Öse ist möglichst eng und doch „spannungsfrei“ (der Draht darf nicht verdreht werden) zu schlingen, damit keine Sollbruchstelle erzeugt wird, aber dennoch nicht öffnet oder rutscht.

Eine weitere Schwierigkeit ist die Legierung des Drahts. Es zeigt sich, dass je homogener die Legierung, je ähnlicher die Grösse der beteiligten Atome und ihre Struktur ist, desto kleiner sind die Probleme mit dem Phänomen der **Spannungsrissebildung**. Bei der Verdichtung im Drahtziehprozess von Legierungen wie z.B. Bronze CuSn mit sehr unterschiedlich grossen Atomen (Cu-Atommasse 63,546 u, fast doppelt so gross: Sn-Atommasse 118,710 u) kommt es zwangsläufig zu Inhomogenitäten im Korngefüge, die unter Zugspannung oder Streckung/Stauchung zu kleinsten Spannungsrisen führt. Weniger gefährdet ist Messing je niedriger es legiert ist ( Cu-Atommasse 63,546 u, nur eine Spur grösser: Zn-Atommasse 65,409 u).

Im Gefolge von Umwelteinflüssen, transportiert durch die Luft, entsteht die **Spannungsrissekorrosion**. Sie ist die transkristalline (durch das Gefügekorn) oder interkristalline (entlang der Korngrenzen des Gefüges) Rissbildung in Saitenlegierungen unter dem gleichzeitigen Einfluss einer rein statischen Zugspannung oder mit überlagerter niederfrequenter Zugschwellspannung und eines spezifischen „Angriffsmittels“. Auch Zugspannungen in Form von Eigenspannungen sind hier wirksam. Bei der Spannungsrissekorrosion (SpRK) treten im allgemeinen keine sichtbaren Korrosionsprodukte (Oxyde) auf - die Trennung ist verformungsarm, der Bruch abrupt. Die blau-schwarzen Verfärbungen bei Messing sind termische Reaktionen (ähnlich dem „anlassen“ oder glühen), die bei Überdehnung der Saiten das baldige Reißen der Saiten ankündigen. Hier handelt es sich nicht um Spannungsrissekorrosion, sondern um plastisch Deformation durch Überbeanspruchung über die Elastizitätsgrenze hinaus.

Gegen Spannungsrissekorrosion sind bestimmte Werkstoffgruppen besonders empfindlich: dazu gehören Kupfer-Zinn-Legierungen (Bronzen), Kupfer-Zink-Legierungen (Messing), manche Aluminium-Knetlegierungen, rost- und säurebeständige Stähle (teilweise) und martensitaushärtbare Stähle. Auch hochfeste Stähle (z. B. für Spannbeton) können unter bestimmten Umständen anfällig gegen wasserstoffinduzierte Spannungsrissekorrosion sein; un- und niedriglegierte Stähle gegen Spannungsrissekorrosion durch Nitrate. Sogar bei niedriglegierten Goldlegierungen (Feingehalt unter 585/-) mit Zinkanteilen oder Legierungen mit Nickelanteilen (hier auch bei Feingehalten über 585/-) treten Schäden bis zur völligen Auflösung des Gefüges auf.

Für das Auftreten von Spannungsrissekorrosion müssen drei Bedingungen erfüllt sein:

- der Werkstoff muss empfindlich gegen Spannungsrissekorrosion sein
- Zugspannungen müssen vorliegen
- ein spezifisches Angriffsmittel muss vorhanden sein

Als spezifische Angriffsmittel wirken bei rost- und säurebeständigen austenitischen Stählen Chloride. Bei **Kupfer-Zink/Zinn-Legierungen** sowie bei Goldlegierungen mit Zinkanteil sind es Ammoniak (Mist, Gülle), Amine, Ammoniumsalze, Schwefeldioxid, Stickoxide (Heizungs/ Autoabgase), Nitrit, Nitrat, Quecksilbersalze etc., bei Aluminium ebenfalls Chloride (Meerwasser). Diese Angriffsmittel wirken schon in sehr geringen Konzentrationen, teils im ppm-Bereich. So können bereits 600ppm H<sub>2</sub>S „tödlich“ sein. Die **Rissinitiierungszeit** und die **Rissfortschrittsgeschwindigkeit** hängen von der Höhe der Zugspannungen, der Konzentration des Angriffsmittels und dem Grad der Kaltverfestigung ab. Als Schwellwert wird bei Messing die sehr niedrige Zugspannung von 10 MPa angegeben [3]. Die Zeit bis zum vollständigen Durchreißen beispielsweise der Saiten, also bis zum Versagen, kann zwischen Minuten und mehreren Jahren liegen [1]. Durch Spannungsrissekorrosion hat es im Architekturbereich einige spektakuläre Unfälle gegeben:

- Die Kongresshalle („Schwangere Auster“) in Berlin ist am 21. Mai 1980 wegen Spannungsrissekorrosion der Spannbeton-Stahlritzen teilweise eingestürzt.
- Am 9. Mai 1985 ist in Folge von Spannungsrissekorrosion durch chloridhaltige Feuchtigkeit in der Luft die Betondecke des Hallenbades in Uster, Schweiz, abgestürzt, die an Ankern aus austenitischem Stahl aufgehängt war (Ereignis:[4,5] ; (Werkstoff-Informationen auch in [2,4]).

Um Spannungsrisskorrosion zu vermeiden, muss mindestens eine der drei Bedingungen vermieden werden. Man kann also entweder das Angriffsmittel fern halten, die Zugspannungen vermeiden oder einen unempfindlichen Werkstoff wählen.

Das Fernhalten des Angriffsmittels ist oft nicht möglich. Bei Kupfer-Zink-Legierungen genügt oft schon die allgemeine Luftverschmutzung [1], ein Bauernhof in der Nähe (Ammoniak aus dem Misthaufen!) oder die Aufbewahrung eines ammoniakhaltigen Haushaltsreinigers in der Nähe des Bauteils. Im Fall "Hallenbad Uster" war die Chloridbelastung kaum zu vermeiden. Auch die Zugspannungen können in einem Saiteninstrument nicht vermieden werden. Oft bleibt nur die Wahl eines Werkstoffs, der gegen Spannungsrisskorrosion weniger empfindlich ist (Messing statt Bronze) oder die Auslastung (Spannung) der Saiten niedriger zu halten - kürzere Mensuren oder niedrigerer Kammerton.

Zu den beschriebenen materialspezifischen Eigenschaften gesellt sich noch das Problem der Federsteifigkeit des Drahtes, mit der er sich - je „härter“ er gezogen ist - gegen die Verformung am Stimmwirbel wehrt. So kann es bei stärkeren Durchmessern bereits bei Messing, noch stärker bei Bronze und Stahl zu einem allmählichen „Herauswandern“ aus dem Stimmnagelloch kommen. Bei gleichbleibendem Draht- $\emptyset$  und Wirbelloch- $\emptyset$  sowie *abnehmendem* Wirbelumfang wächst die Federwirkung des Drahtes mit zunehmender Federkonstante bzw. E-Modul und bewirkt, trotz der Verformung durch den Knick an der Lochkante und Windung um den Wirbel, ein "abheben" des Drahts am Übergang von Lochkante/ Wirbelumfang. Die Reibung des Saitenteils im Loch kann die Federkräfte an der Lochkante nicht kompensieren und auch die stärkere Verformung durch beispielsweise den geringeren Wirbelumfang reicht nicht aus, um das "Herauswandern" zu verhindern.



Bei *zunehmendem* Wirbelumfang müsste ein gegenteiliger Prozess bis zu dem Punkt einsetzen, wo die ideale Saitenverformung an der Loch/Kante (abknicken und gut am Wirbel anliegen) aussetzt. Durch einen kleineren Loch- $\emptyset$  im Wirbel verbessert sich die Situation nur bedingt, weil die etwas stärkere Reibung bzw. klemmen im Loch das "abheben" an der Lochkante nicht komplett kompensieren kann. Eine Verbesserung setzt erst ein, wenn der Draht „vorgebogen“ (gekröpft) wird, wobei es auch hier nur zu einer Verbesserung kommt, nicht aber zu einer optimalen Lösung. Ziel müsste es sein, den Übergang der Saite vom Wirbelloch zum Wirbelumfang so "stressfrei" wie möglich zu gestalten. D. h., die Saite muss bezogen auf ihren  $\emptyset$  so wenig Federwirkung wie möglich entwickeln. Das betrifft auch das Problem von reissenden Saiten: je härter der Draht gezogen ist, desto weniger verträgt er das Knicken - jede kleinste Biegung zurück bedeutet einen Saitenbruch. Das ist ein Problem bei Musikern, die mit grossen Hin- und Herbewegungen am Wirbel stimmen. Gerissene hochfest gezogene Saiten sind so vorprogrammiert.

Aus o.g. Beobachtungen können 3 Schritte abgeleitet werden um das Problem der "wandernden" und brechenden Saiten am Stimmnagel anzugehen:

- den Loch-Ø im Wirbel so nahe wie möglich am Saiten-Ø zu halten sowie die Saiten beim Aufziehen von der Spitze her entsprechend dem Wirbel-Ø zu kröpfen und dann einzufädeln ohne mit der Windung die möglicherweise aus dem Loch ragende Saitenspitze zu überlagern und dadurch herauszudrücken
- weitere Experimente mit der Abstimmung von Wirbelumfang und Steifigkeit des Drahtes anzustellen, um das "Abheben" nach dem Wirbelloch zu vermeiden
- überlegen, wie bei gleichbleibender oder höherer Reissfestigkeit die Federsteifigkeit reduziert werden könnte, um ein besseres Anschmiegen an den Wirbel zu erreichen. Aus dem barocken Clavichordbau sind Beispiele "gezwirbelte" Saiten bekannt. Es wären also Experimente mit Fe-Litzen (mit einer hohen Festigkeit und geringerer Federsteifigkeit) oder dünne Stahlrohre mit Carbonkern (o. ä., wie Seidenseelen mit Umspinnung) auf ihre Festigkeit, Elastizität und klangliche Eignung hin zu untersuchen. Der Hintergedanke ist die "Sandwichtechnik", wie sie bei japanischen Schwertern und Messern verwendet wird, um hohe Festigkeiten bei maximaler Elastizität zu erreichen.

#### Literatur:

- [1] J. Rückert: Spannungsrisskorrosion an Kupferlegierungen *Materials and Corrosion* 47 (1996) S. 71-77.
- [2] "Lexikon der Korrosion" - 2 Bände; Fa. Mannesmannröhren-Werke, 1970.
- [3] M. Weiergräber und A. Gräber: Spannungsrisskorrosion von Tiefziehnapfen Werkstoff und Umformung, Vorträge des 1. Workshop Stuttgart, 9. Juni 1986, Band 90 der Berichte aus dem Institut für Umformtechnik der Universität Stuttgart, Hrsg.: Prof. Dr.-Ing. K. Lange, Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York Tokyo 1986.
- [4] M. Faller und P. Richner: Material selection of safety-relevant components in indoor swimming pools *Materials and Corrosion* 54 (2003) S. 331 - 338.
- [6] "Technisch-wissenschaftliche Grundlagen des Goldschmiedens Teil 2 Werkstoffkunde der Edelmetallverarbeitung" Seite 88-93; BVA, 1999 (ISBN 3-87073-270-9)

Mischa Scheer

2011©Marc Vogel GmbH