

Energieeffiziente Spalttopfwerkstoffe bei metallischen Magnetpumpen

Dipl.-Ing. (FH) Jürgen Konrad

Dickow-Pumpen KG, Waldkraiburg

1. Einleitung

Das in der Bevölkerung immer größer werdende Umweltbewußtsein führt dazu, das verfahrenstechnische Anlagen nach strengen Gesundheits- und Sicherheitsvorschriften betrachtet werden. Die EU bzw. die nationale Gesetzgebung hat darauf reagiert und durch die IPPC-Directive 96/61/EC, dem Bundes-Immissionsschutzgesetz und der TA-Luft 2002 die Anforderungen an die Luftreinhaltung verschärft. Unter die geforderten technisch dichten Pumpen fallen auch Magnetkuppelungspumpen.

Die Energieeffizienz von Pumpen und Pumpensysteme beschäftigt seit längerem die deutsche und europäische Pumpenindustrie und ist das zentrale Thema der nächsten Jahre. Laut einer EU-Studie sind Pumpen mit etwa 20% am Energieverbrauch motorbetriebener Systeme beteiligt. Dies entspricht einem jährlichen Energieverbrauch von ca. 160TWh. Nach Hochrechnung der Deutschen Energie-Agentur könnten durch die Optimierung von Pumpensysteme über 10 Milliarden KWh pro Jahr eingespart werden.

Werden die Kosten über den gesamten Lebenszyklus z.B. wasserführender Pumpensysteme betrachtet, ergibt sich folgendes Bild:

- Anschaffungskosten ca. 8%
- Wartungs-, Instandhaltungs- und sonstige Kosten ca. 10%
- Energiekosten ca. 82%

In diesem Zusammenhang rücken Magnetkuppelungspumpen mit metallischen Spalttöpfen verstärkt in den Fokus der Betrachtung.

Durch die Verlustleistung metallischer Spalttöpfe wird der Wirkungsgrad der Pumpen, in Abhängigkeit zur Größe der Übertragungsleistung der Magnetkupplung mehr oder weniger stark negativ beeinflusst. Hier kann mit energieeffizienten, modernen Spalttopfwerkstoffen gegengesteuert werden.

2. Grundlagen Magnetkupplung

Bild 1 zeigt den prinzipiellen Aufbau einer Magnetkupplung. Das Fördermedium wird durch den Spalttopf hermetisch gegen die Atmosphäre abgedichtet, es ist keine Wellendurchführung nach außen vorhanden.

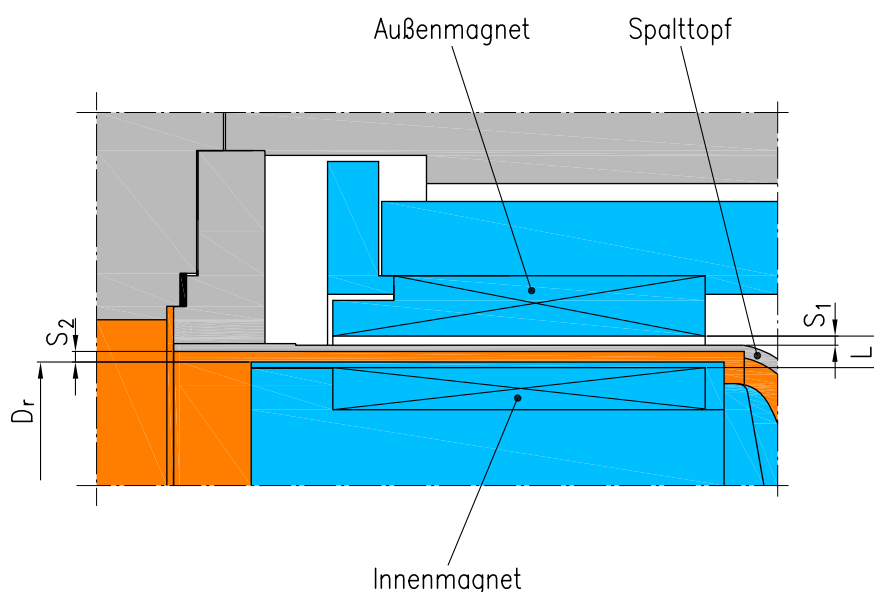


Bild 1: Aufbau einer Magnetkupplung

Die erforderliche Antriebsleistung wird vom Motor über die Außenmagnete auf die innere Magnetkupplung und damit auf das Laufrad übertragen. Die inneren und äußeren Magnete sind durch Feldlinien kraftschlüssig verbunden und laufen synchron zueinander. Es ist kein Schlupf vorhanden, die Motordrehzahl entspricht der Kupplungsdrehzahl. Dadurch, dass die magnetischen Feldlinien den üblicherweise metallischen Spalttopf schneiden, entstehen durch die elektrische Leitfähigkeit des Werkstoffes Wirbelstromverluste, die sich in Wärme umsetzen und zu einem Anstieg der Spalttopftemperatur führt. Diese Temperaturerhöhung muss durch einen geführten Zirkulationsstrom abgeführt werden

Die Übertragungsleistung P bzw. das Drehmoment M der Magnetkupplung wird stark beeinflusst durch den Spalt L zwischen Innen- und Außenmagnet beziehungsweise vom Verhältnis L/D_R gemäß Bild 2.

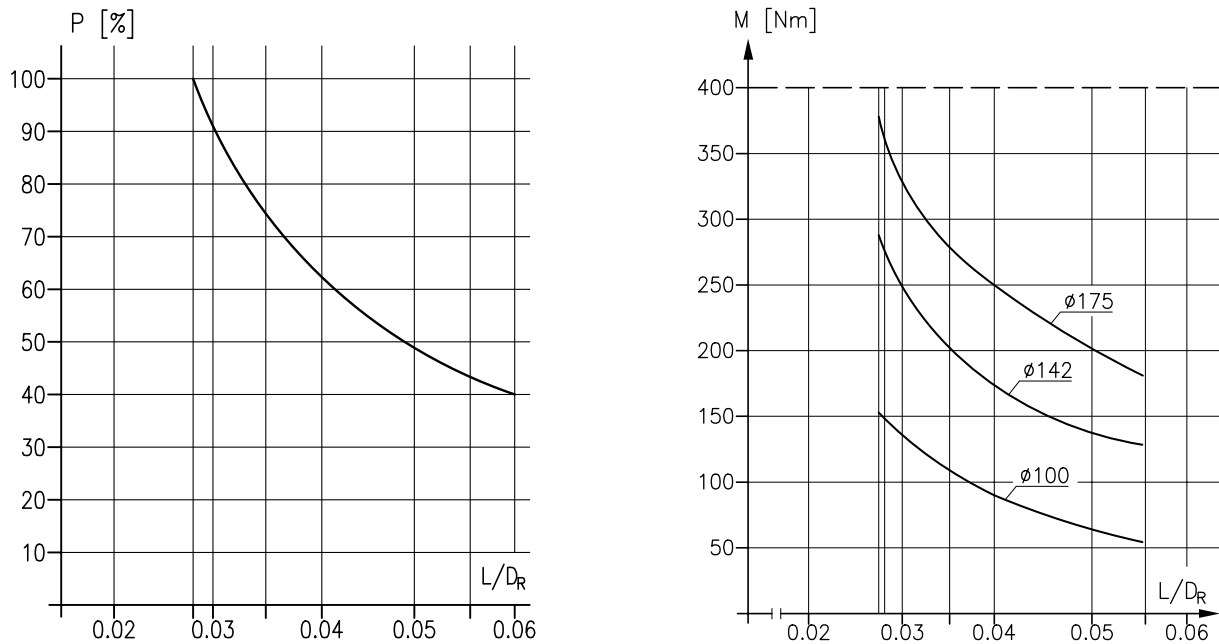


Bild 2: Übertragungsleistung Magnetkupplung

Je kleiner der Spalt zwischen den Magneten, desto größer ist das übertragbare Drehmoment bei gleichbleibendem Rotordurchmesser D_R , während die Kosten für das Magnetmaterial annähernd gleich bleiben. Der Reduktion des Abstandes L sind jedoch aus sicherheitstechnischen Betrachtungen Grenzen gesetzt. Die Spalte s_1 und s_2 sind so zu wählen, daß unter allen Betriebsbedingungen und notwendigen Spalttopfwandstärken ein sicherer Betrieb ohne Anlaufen der Magnetkupplung an den Spalttopf gewährleistet ist.

Die Akzeptanz energieeffizienter Spalttopfwerkstoffe wird stark davon abhängig sein, ob sich die Standardkonstruktion der umliegenden Bauteile ändert. Nur wenn die Mehrkosten und der Mehraufwand in einem vertretbaren Rahmen bleiben, ist betreiberseitig auch die Bereitschaft da, einen Austausch vorhandener metallischer Spalttöpfe vorzunehmen. Ideal wäre die Vorgehensweise:

Alter Spalttopf raus – Neuer Spalttopf rein

Im nachfolgenden Teil werden unterschiedliche energieeffiziente Spalttopflösungen vorgestellt, mit denen ein einfacher Austausch möglich ist.

3. Keramikspalttopf

Als idealer Werkstoff hat sich ein mit MgO teilstabilisiertes Zirkoniumdioxid (ZrO_2), umgangssprachlich Zirkonoxid, aus der Gruppe der Oxidkeramiken durchgesetzt. ZrO_2 hauptsächlich wegen seiner hohen Bruchzähigkeit, Verschleißfestigkeit und Korrosionsbeständigkeit, seiner niedrigen Wärme-

leitfähigkeit und guten Temperaturwechselbeständigkeit, der dem Gusseisen ähnlichen Wärme-
dehnung und dem günstigen E-Modul.

Durch den sehr hohen spezifischen Widerstand von $10^{10} \Omega\text{mm}^2/\text{m}$ werden keine Wirbelstromver-
luste induziert. Der Spalttopf besitzt keine Verlustleistung.

Seit 1987 wird der Keramikspalttopf in Pumpen der Fa. Dickow eingebaut. Ursprünglich mit einer
Wandstärke von 3,5 mm, was einen größeren Magnetabstand gegenüber der Standardkonstruktio-
n mit einer um 30% niedrigeren Übertragungsleistung bedeutete. Mit Hilfe einer numerischen Be-
anspruchungsermittlung an verschiedenen Konstruktionsvarianten unter vorgegebenen Last- und
Randbedingungen konnten die idealen Abmessungen ermittelt und umgesetzt werden. Dabei stell-
te sich heraus, dass zwar die Wandstärke des zylindrischen Teils des Spalttopfes in die max.
Druckbelastung mit einfließt, aber nicht ausschlaggebend ist. Viel wichtiger sind die konstruktiven
Ausführungen der Übergänge zum Klöpperboden und Flanschansatz. Dadurch konnte eine Redu-
zierung der Wandstärke auf 1,9 mm, bei gleichbleibender Druckbeständigkeit, umgesetzt werden.
Damit ist wiederum eine vollständige Austauschbarkeit gewährleistet.

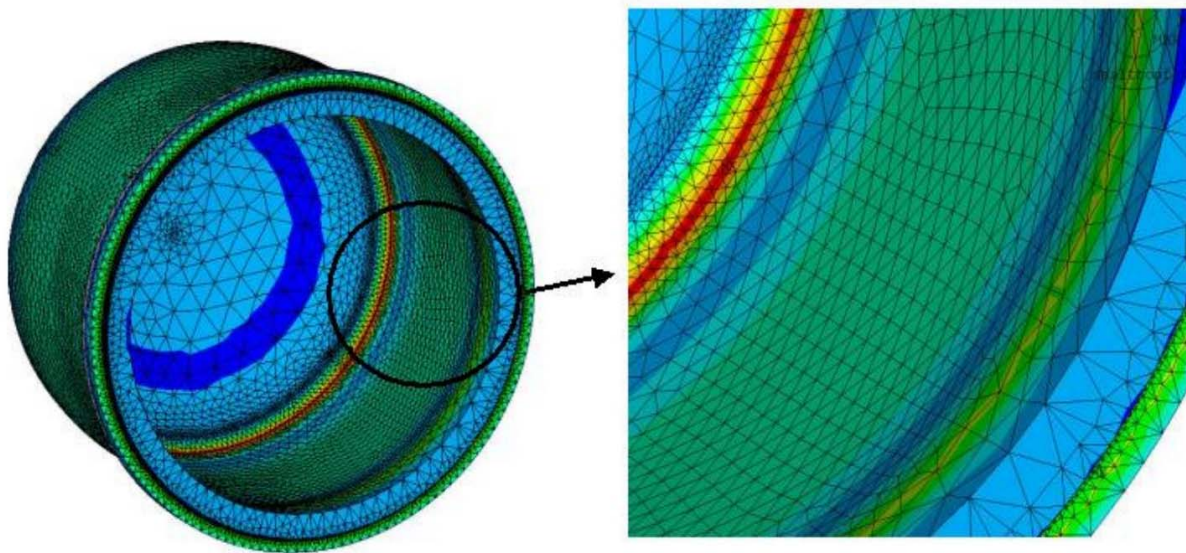


Bild 3: Numerische Beanspruchungsermittlung eines Keramikspalttopfes [1]

Eine praktische Überprüfung der rechnerisch ermittelten Daten wurde durch eine Druckprüfung mit
und ohne Temperatureinfluss von Raumtemperatur bis 250°C und durch Beaufschlagung unter-
schiedlich hoher Druckstöße durchgeführt. Der Bestdruck lag bei allen Versuchen oberhalb von 40
bar.

Keramische Bauteile setzen keramikgerecht konstruierte Verbindungsstellen voraus. Nur dann las-
sen sich die Vorteile komplett ausnutzen und eine lange Lebensdauer ist gewährleistet. Dazu ge-
hören gemäß Bild 4 mindestens

- dass die Montagevorspannkkräfte der Schrauben über eine indirekte Kräfteinleitung in den
Keramikspalttopf übertragen werden,
- dass Stoß- und Schlagbeanspruchungen während der Montage und Demontage der Lager-
trägereinheit vermieden werden; gewährleistet durch die Führungsbolzen ($s_4 < s_1$),
- große Kontaktflächen ohne spitze Kanten und schroffe Querschnittsübergänge; um die
Kerbwirkung möglichst niedrig zu halten,
- der Ausgleich der unterschiedlichen fertigungsbedingten Oberflächenrauigkeiten durch
elastische Zwischenlagen und
- ein Klöpperbodendesign.

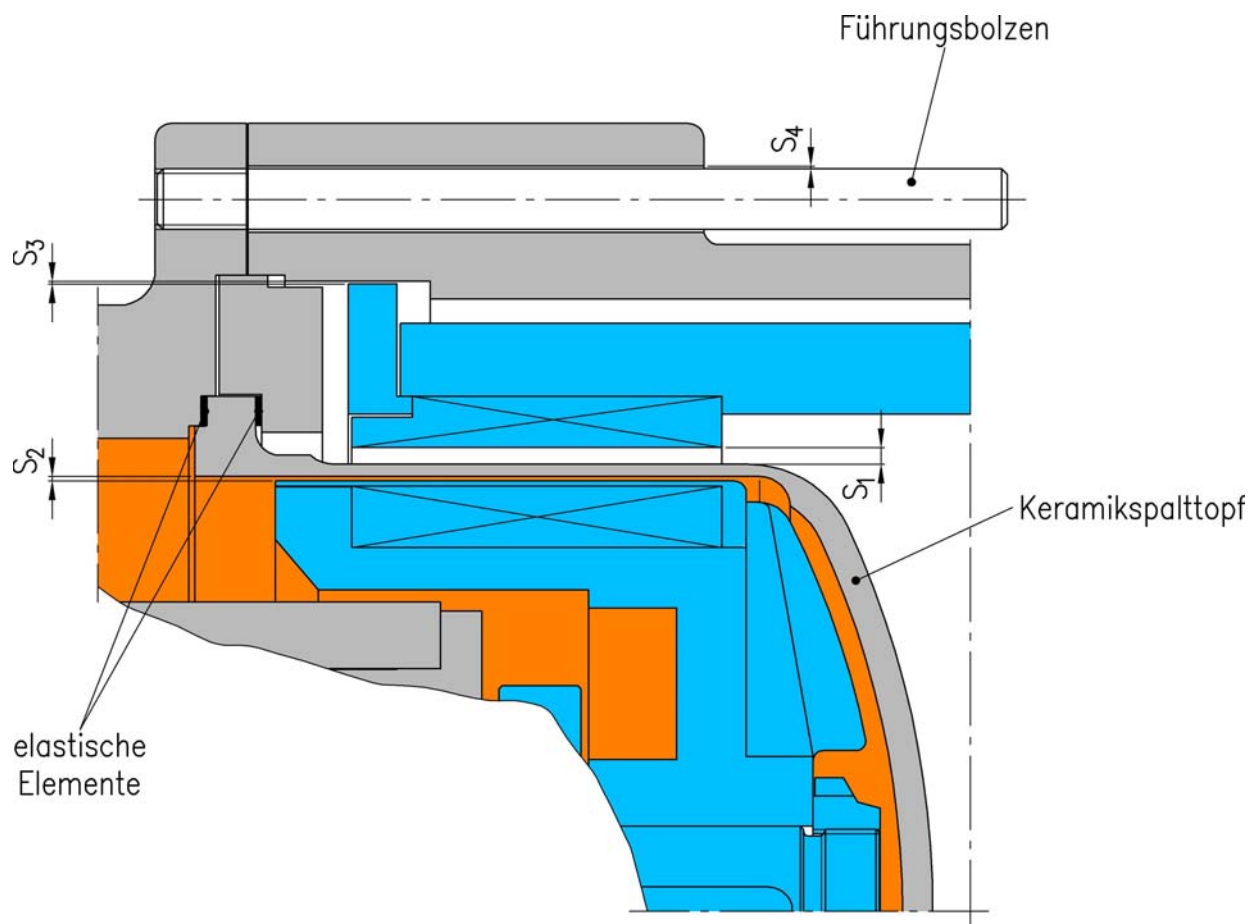


Bild 4: keramikgerechte Spalttopfkonstruktion: $s_2 > 0,5\text{mm}$; $s_3 \ll s_1$; $s_4 < s_1$

Auch hinsichtlich der Explosionsschutzrichtlinie 94/9/EG gibt es keine Einschränkungen, den Keramikspalttopf in ein Gerät der Gruppe II, Kategorie 2 für den Einsatz in Zone 1 einzubauen. Der E-Modul von $2 \cdot 10^5 \text{ N/mm}^2$ bewirkt, dass eine gewisse Elastizität vorhanden ist. Das durch eine ausgeschlagene Wälzlagerung der Außenmagnet am Keramikspalttopf anläuft, wird durch den Anlaufring und der Spaltgeometrie $s_3 \ll s_1$ verhindert.

Aufgrund des hohen Oberflächenwiderstandes R_o von $2,5 \cdot 10^{15} \Omega$ sind jedoch Maßnahmen zur Vermeidung von Zündgefahren infolge elektrostatischer Aufladung notwendig. Weiterhin wird das Flächenkriterium nach EN 13463-1 nicht erfüllt.

Gemäß BGR 132 (neu: CLC/TR 50404) ist ein Gegenstand ableitfähig, wenn der Oberflächenwiderstand kleiner als $10^{11} \Omega$ ist, bei 23°C und 30% relativer Luftfeuchte.

Zusammen mit der PTB in Braunschweig wurden umfangreiche Messungen zur Bestimmung der elektrischen Ableitfähigkeit nach IEC 60093 und IEC 60167 durchgeführt. Letztendlich konnte nur eine zusätzliche Außenbeschichtung die Grenzwerte zum Oberflächenwiderstand und Erdableitwiderstand ($R_A < 10^6 \Omega$) deutlich unterschreiten. Damit ist ein modifizierter Keramikspalttopf in allen brennbaren Medien und in jeglicher explosionsfähigen Atmosphäre einsetzbar.

Zirkonoxid ist ein Sinterwerkstoff, durch den Herstellungsprozeß besteht die Gefahr eines Einschlusses in der Keramik. Solche Einschlüsse lassen sich nur mit aufwendiger Meßmethodik analysieren. Es kann deshalb durchaus die Vermutung angestellt werden, daß ein Keramikspalttopf durch eine Vibrationsanregung so in Schwingungen versetzt wird, dass ein Extremwert in den Bereich der Resonanzfrequenz fällt. Diese Anregung könnte dann im Bereich der Einschlüsse zu einem Bruch des Spalttopfes führen.

Mit der Methode der experimentellen Modalanalyse wurde das Schwingverhalten des Keramikspalttopfes im frei aufgehängten und eingespannten Zustand untersucht.

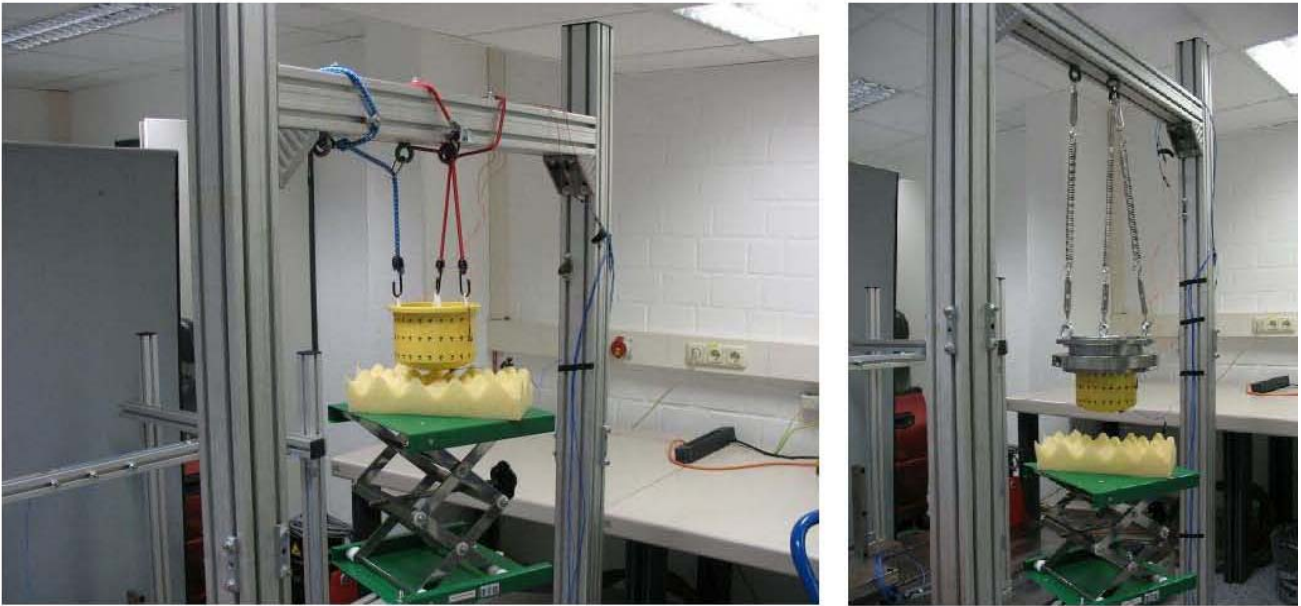


Bild 5: frei und eingespannt aufgehängter Keramikspalttopf [5]

Das Ergebnis zeigt, dass die erste freie Resonanzfrequenz des Keramikspalttopfes mit 1200 Hz sehr hoch liegt und durch die Einspannung noch weiter auf ca. 2300 Hz angehoben wird. Eine Anregung dieser Schwingform durch den Betrieb einer Pumpe ist in rotatorisch arbeitenden Maschinen eher unwahrscheinlich.

In einem zweiten Schritt wurde abgeklärt, ob die ermittelten Anregungsfrequenzen während des Betriebes auftreten können. Dazu wurden die Betriebsbeschleunigungen während eines Dauerlaufes bei fester Drehzahl ($1450 \text{ 1/min} = 25 \text{ Hz}$) erfaßt und mit der Methode der Betriebsschwingungsanalyse untersucht. Zusätzlich wurden die Betriebschwingungen am Keramikspalttopf mit Dehnungsmeßstreifen erfaßt. Die Bilder 6 und 7 zeigen den entsprechenden Versuchsaufbau für die einzelnen Messungen.

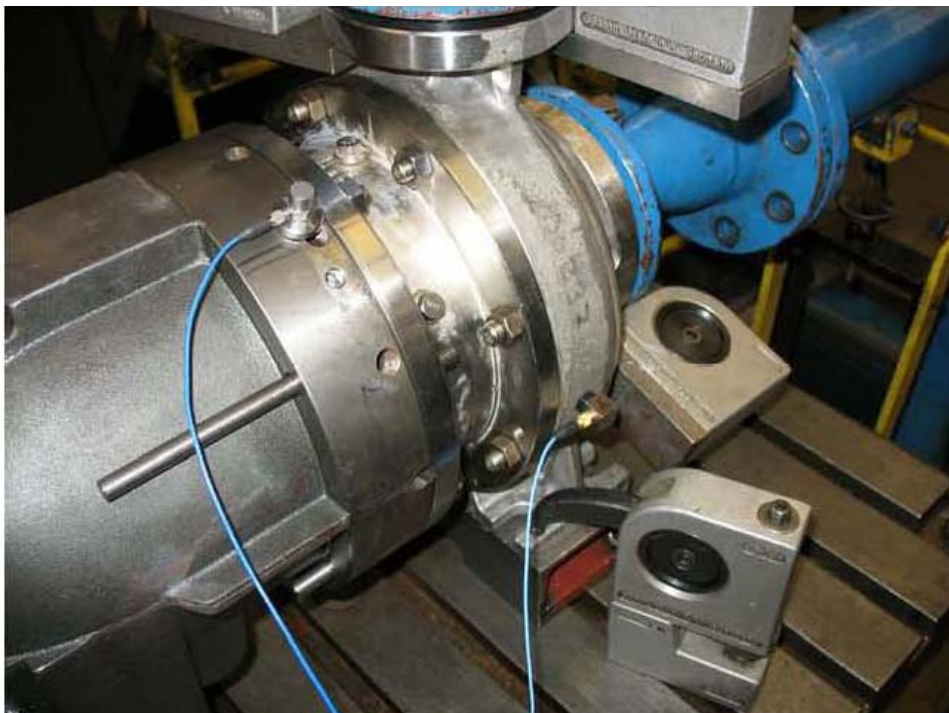


Bild 6: Versuchsaufbau zur Messung der Betriebsschwingungen [6]

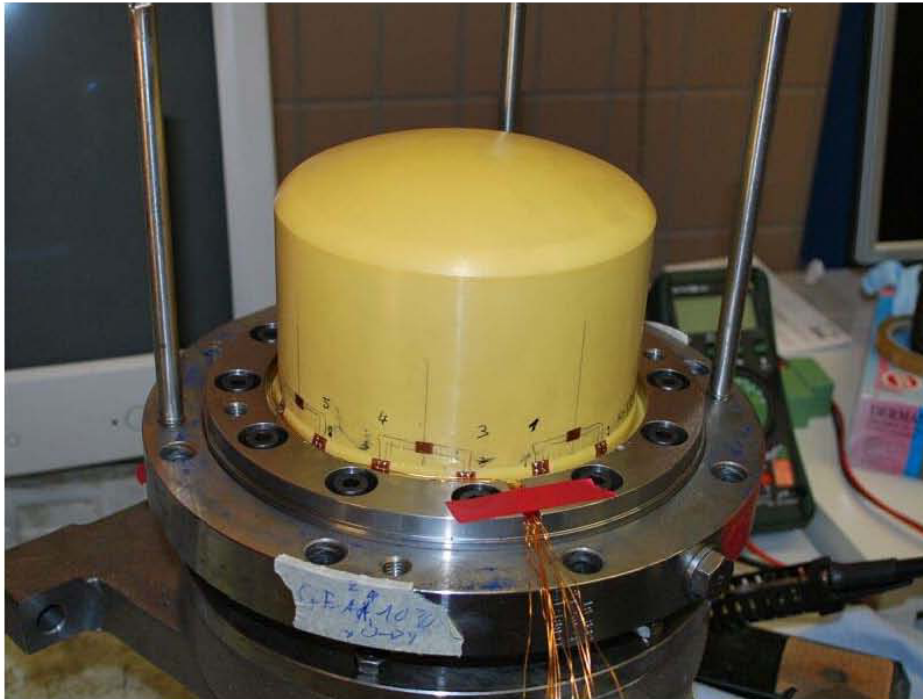


Bild 7: Platzierung Dehnungsmeßstreifen [6]

Mit den so durchgeführten Messungen wurde aufgezeigt, dass bis in den hohen Frequenzbereich, durch mit der Drehzahl in Zusammenhang stehende Effekte, Dehnungen in den Spalttopf eingeleitet werden. Allerdings treten keinerlei Resonanzfrequenzen so stark hervor, dass man ihnen eine stark schädigende Wirkung zuordnen könnte. [6]

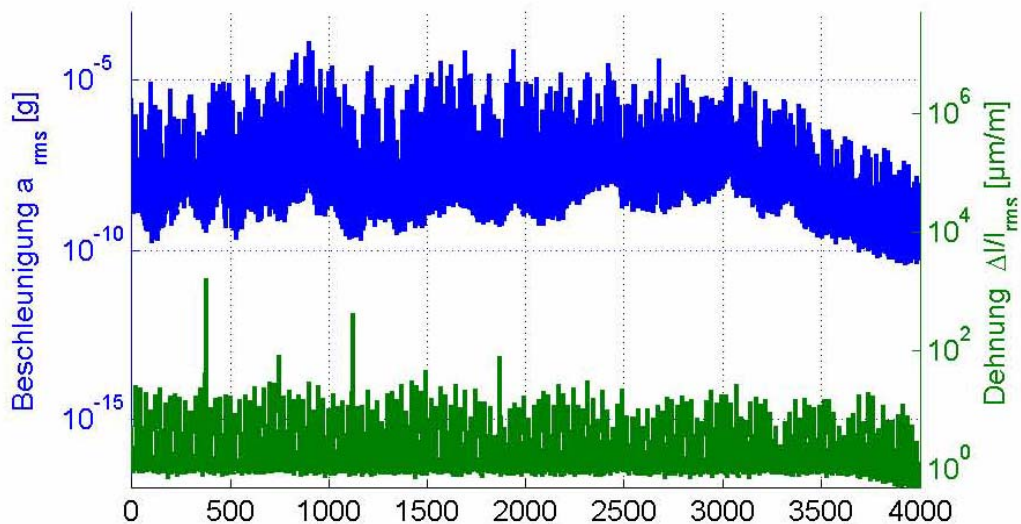


Bild 8: Meßergebnisse für Dehnung und Beschleunigung bei 6 bar Innendruck [6]

Bild 8 zeigt den Vergleich der während des Betriebes bei 6 bar Innendruck gemessenen Spektren der Beschleunigung und der Dehnung, wobei die bei der Dehnung auftretenden Spektrenwerte (max. 2250 $\mu\text{m/m}$) nicht die tatsächlichen Dehnungen darstellen, sondern auf durch das Magnetfeld (15 Polpaare * 25 Hz Anregungsfrequenz = 375 Hz) in die Signalleitungen induzierte Ströme zurückzuführen sind.

Ihren großen Vorteil spielt der keramische Spalttopf bei Wärmeträgerumwälzpumpen in Blockausführung (Bild 9) aus.

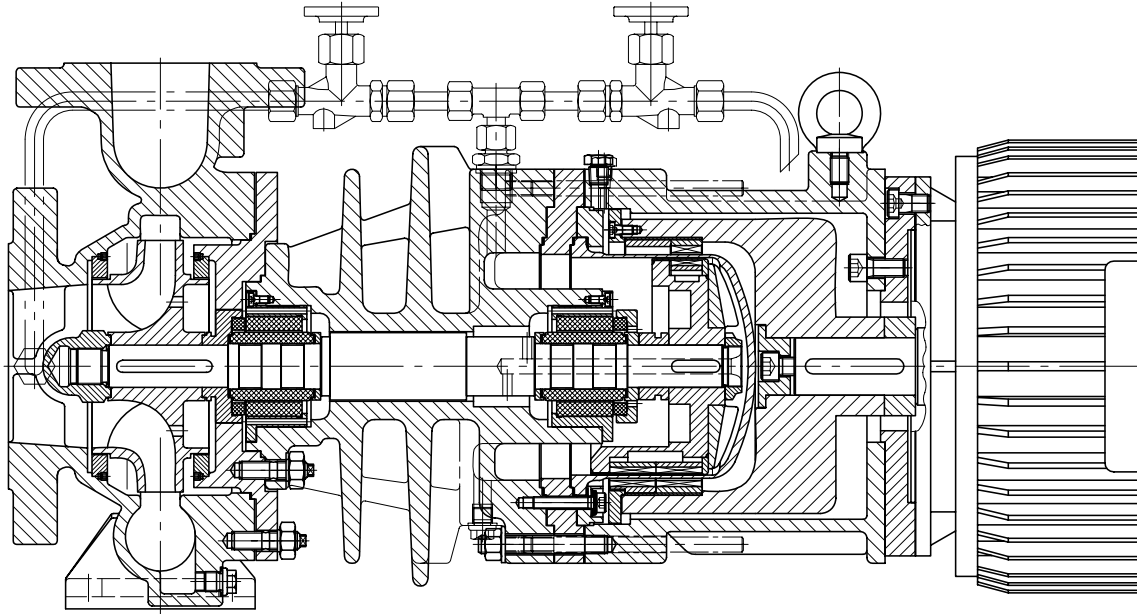


Bild 9: Wärmeträgerumwälzpumpe in Blockausführung mit Magnetkupplung

Zwischen dem Spiralgehäuse und der Magnetkupplung ist ein Kühlstück angeordnet, das durch Wärmeabstrahlung an die Umgebung dafür sorgt, dass die Temperatur im Spalttopfbereich unterhalb von 250°C liegt. Durch die fehlende interne Zirkulation können auch keine Feststoffe aus dem Rohrleitungssystem, z.B. Zunder oder Schweißperlen, in den Magnetraum gelangen. Wie weiter oben schon erklärt, muss die beim Einsatz von metallischen Spalttöpfen entstehende Temperaturerhöhung abgeführt werden. Bei kleineren magnetischen Verlustleistungen reicht die Abstrahlung an die Atmosphäre aus, ansonsten muss diese durch eine geführte Zirkulation, über einen extern angeordneten Etagenkühler, abgeführt werden. Die Anordnung des Etagenkühlers ist bei Pumpen in Blockausführung, wegen der beengten Platzverhältnisse, nur mit großem Aufwand möglich. Der Einsatz eines Keramikspalttopfes schöpft alle Vorteile der Blockausführung im Thermalölbereich kostengünstig und montagefreundlich für den Betreiber aus.

Ein weiterer großer Vorteil des Keramikspalttopfes ist seine Verschleißbeständigkeit. Nach zweijähriger Betriebszeit wurden mehrere Pumpen zur Revision ins Werk geschickt. Fördermedium war 110°C heißes Öl mit ca. 5% Bleicherdeanteil. Sämtliche strömungsführenden Bauteile, internen Zirkulationskanäle und enge Spalte waren mehr oder weniger ausgespült oder ausgeschliffen. Am Keramikspalttopf konnten keinerlei Verschleißspuren festgestellt werden. Er konnte in die instandgesetzte Pumpe wieder eingebaut werden.

Die Einsatzgrenze des Keramikspalttopfes ist mit 16 bar festgelegt, der Prüfdruck beträgt 24 bar. Die max. Betriebstemperatur beträgt 250°C. Durch die Verringerung des E-Moduls ist bei dieser Temperatur mit einem Festigkeitsverlust von ca. 10% zu rechnen. Die tiefste Einsatztemperatur liegt bei -60°C. Ab dieser Temperatur wird die Keramik angegriffen und innerlich zersetzt. Sie verliert damit ihre Elastizität.

Die max. zur Verfügung stehende Kupplungsnennleistung beträgt zur Zeit ca. 100 kW.

4. PEEK/Composite-Spalttopf

PEEK ist ein Derivat der aromatischen Polyaryletherketone (PAEK). Die weitere Bezeichnung dieser teilkristallinen Polymere erfolgt entsprechend der Zahl und Anordnung der verschiedenen Gruppen. Zwei Ether- und eine Ketongruppe bilden das Polyetheretherketon PEEK. Durch die hohe Glasübergangs- oder Erweichungstemperatur von ca. 140°C und einer Schmelztemperatur von annähernd 340°C sind gute Hochtemperatureigenschaften gewährleistet.

Seit 2005 arbeitet die Fa. Dickow zusammen mit der Fa. GreeneTweed an der Entwicklung eines PEEK/Composite-Spalttopfes.

Als Faserwerkstoff werden mehrlagige Kohlenstofffasermatten verwendet, deren Ausrichtung in drei Richtungen ($\pm 30/90$) erfolgt; die Fasern dieses quasiisotropen Verbundes schneiden sich in einem Winkel von 60° .

Durch ein von der Fa. GreeneTweed entwickeltes innovatives Fertigungsverfahren Techna3™ läßt sich diese PEEK-Matrix mit dem quasiisotropen Faserverbund mit Hilfe eines dreiteiligen Werkzeuges zu einem Spalttopf pressen. Die Temperaturen liegen dabei oberhalb der Schmelztemperatur der PEEK-Matrix. Durch einen allseitig gleichbleibenden Druck auf das Material und dem hohen Faseranteil von ca. 50% findet nur ein minimaler Materialfluß statt. Damit bleibt die Festigkeit nahezu konstant und berechenbar. Die Prozeßparameter wurden mit einem anschließend durchgeführten Helium-Lecktest optimiert.

Die Festigkeit dieses Werkstoffes ist bei einem Preßteil als Platte 440 ± 46 MPa (ASTM D3039), die Steifigkeit beträgt 47 ± 1 GPa (ASTM D3039). Die Festigkeit und Steifigkeit ist in alle Richtungen gleich.



Bild 10: PEEK/Composite-Spalttopf

Ein solcher Spalttopf wurde erstmals von der Fa. Dickow Pumpen nach mehrjähriger Entwicklungszeit auf der AICHEMA 2009 präsentiert. Umfangreiche Versuche vor der Serienfreigabe wie

- Druckprüfungen
- Druckstoßsimulation
- Dauerlauf bei unterschiedlichen Temperaturen
- Messung der elektrischen Ableitfähigkeit
- Dauerdruck- und Temperaturbelastung

ergaben mit einer Wandstärke von 1,9 mm einen zulässigen Betriebsdruck von 24 bar bei einer maximalen Einsatztemperatur von 150°C. Dabei sind allerdings die im Bild 11 dargestellten Längen- und Durchmesseränderung zu berücksichtigen. Die Pumpenkonstruktion ist so zu gestalten, dass diese maßlichen Änderungen sicher beherrscht werden und es nicht zu einem Anlaufen der außenliegenden rotierenden Bauteile kommt.

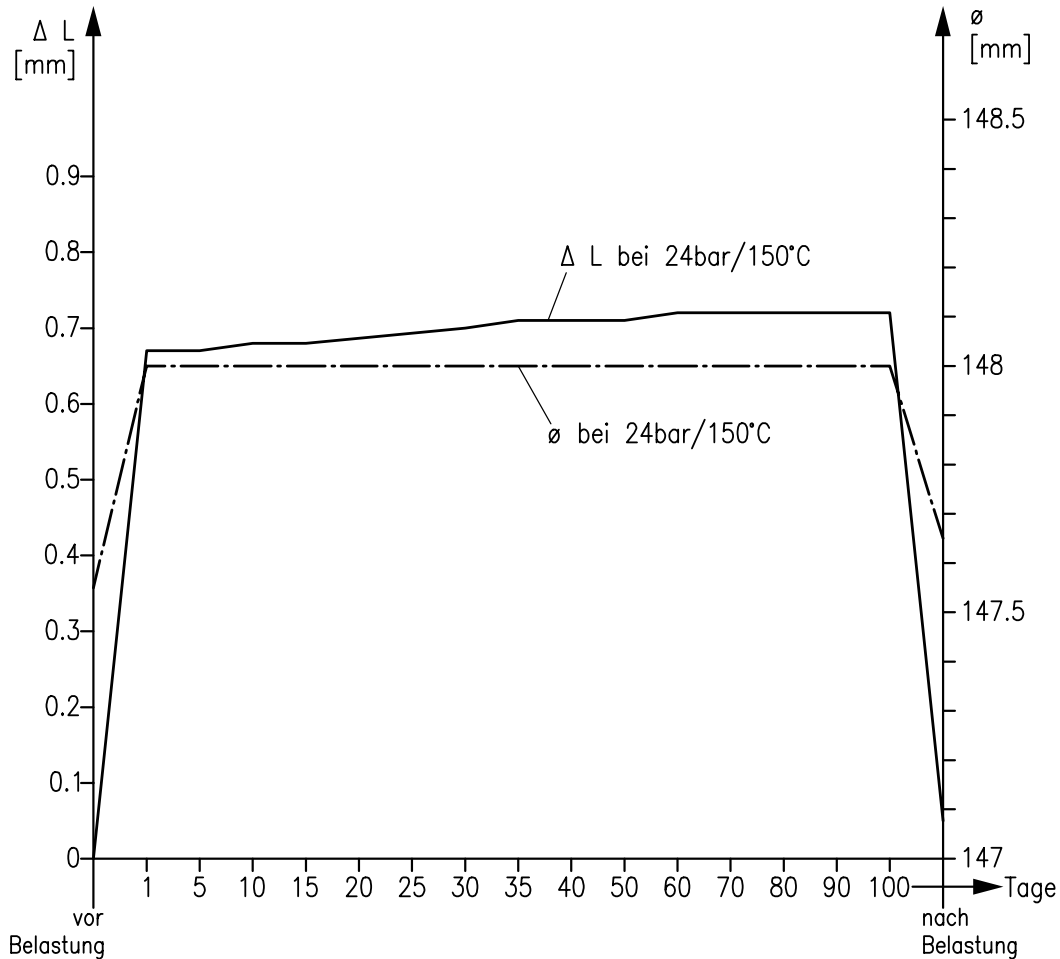


Bild 11: Durchmesser- und Längenänderung unter Temperatureinfluß

Trotz des relativ niedrigen spezifischen Widerstandes von 160 $\Omega\text{mm}^2/\text{m}$ entstehen keine Wirbelstromverluste. Dies ist auf die quasiisotrope Ausrichtung der Kohlenstoffasern zurückzuführen. Auch hinsichtlich der Explosionsschutzrichtlinie 94/9/EG gibt es keinerlei Einschränkungen, diesen PEEK-Composite-Spalttopf in einem Gerät der Gruppe II, Kategorie 2 für den Einsatz in Zone 1 einzubauen. Der Oberflächenwiderstand R_o ist deutlich kleiner als $10^{11}\Omega$. Gemäß BGR132 besteht demzufolge keine Zündgefahr.

Die maximal zur Verfügung stehende Kupplungsnennleistung beträgt zur Zeit ca. 50 kW.

5. Titanspalttopf

Titan ist ein Leichtmetall mit hoher Festigkeit und geringer Dichte, seine Legierungen sind härter als Stahl und hitzebeständiger als Aluminium. Die chemische Beständigkeit von Titan beruht auf seiner hohen Sauerstoffaffinität. Die dünne porenfreie Oxidschicht erneuert sich selbst bei geringem Sauerstoffgehalt in der Umgebung sehr schnell. Unbeständig ist Titan bei Fluorverbindungen, trockenem Chlorgas, rauchender Salpetersäure und reduzierenden Bedingungen.

Titan als Spalttopfwerkstoff ist schon seit längerem bekannt und wird mit Erfolg eingesetzt, jedoch in tiefgezogener bzw. geschweißter Ausführung. Dieses Herstellungsverfahren ist sehr kostenin-

tensiv, da der für dieses Verfahren einzuhaltende Temperaturbereich durch die Gefügeausbildung, die Neigung zur Rissbildung und den Umformwiderstand begrenzt wird. Üblich ist ebenfalls ein Vorwärmen der Werkzeuge. Große Umformgrade müssen deshalb bei sehr hohen Temperaturen durchgeführt werden.

Weiterhin ist die Verfügbarkeit des Werkstoffes zu beachten. Nicht jede Titanlegierung ist in jeder Dicke handelsüblich.

Aus diesen genannten Gründen konnte sich der Werkstoff Titan mit seinen Vorteilen bisher nicht durchsetzen. Aber durch die Verwendung der gießbaren Titanlegierung Titan Grade 5 lassen sich die hervorragenden mechanischen Eigenschaften und die gute Korrosionsbeständigkeit zu einem konkurrenzfähigen Preis umsetzen.

Um die durch den Gießprozeß entstehenden Mikrolunker zu beseitigen, wird die Molekularstruktur im halbzähen Zustand nochmals verändert. Dies geschieht durch ein heißisostatisches Preßverfahren: bei Temperaturen nahe dem Transitpunkt – bei Titan je nach Legierung um die 900°C – werden die Spalttöpfe unter Schutzgas – in diesem Fall Argon – über mehrere Stunden hohen Drücken ausgesetzt und gezielt über mehrere Stunden wieder abgekühlt.

Je nach Größenordnung und erforderlicher Wandstärke des Spalttopfes wird dieser mit unterschiedlichen Gießverfahren hergestellt, entweder als Feingußbauteil oder mit dem Verfahren des Grafitgusses. Bild 12 zeigt einen Spalttopf als Feingußbauteil mit einer Wandstärke von 1,5 mm im Anlieferungszustand. Der Spalttopfflansch ist integriert und die Bohrungen für die Verschraubung sind mitgegossen. Damit wird die mechanische Bearbeitung auf ein Minimum reduziert. Mit dieser Wandstärke sind Betriebsdrücke bis zu 60 bar realisierbar.



Bild 12: gegossener Titanspalttopf

Besonderer Augenmerk muß dem Übergang vom Boden zum zylindrischen Teil des Spalttopfes gewidmet werden. Weiterhin ist die Längenänderung des Spalttopfes bei hohen Drücken zu ermitteln. Aufgrund des niedrigen Elastizitätsmoduls von 110000 N/mm^2 ergibt sich eine größere Längenänderung als bei metallischen Spalttöpfen. Über eine FEM-Berechnung läßt sich diese im Vor-

feld ermitteln.

Die Berechnung erfolgte mit ANSYS V12.0 DesignModeler mit einer aus überwiegend quadratischen Hexaeder-Elementen und einer teilweise mit quadratischen Tetraeder-Elementen bestehenden Vernetzung. Die gesamte Elementanzahl betrug ca. 84000 Elemente, die Anzahl der Freiheitsgrade lag bei ca. 1,2 Millionen.

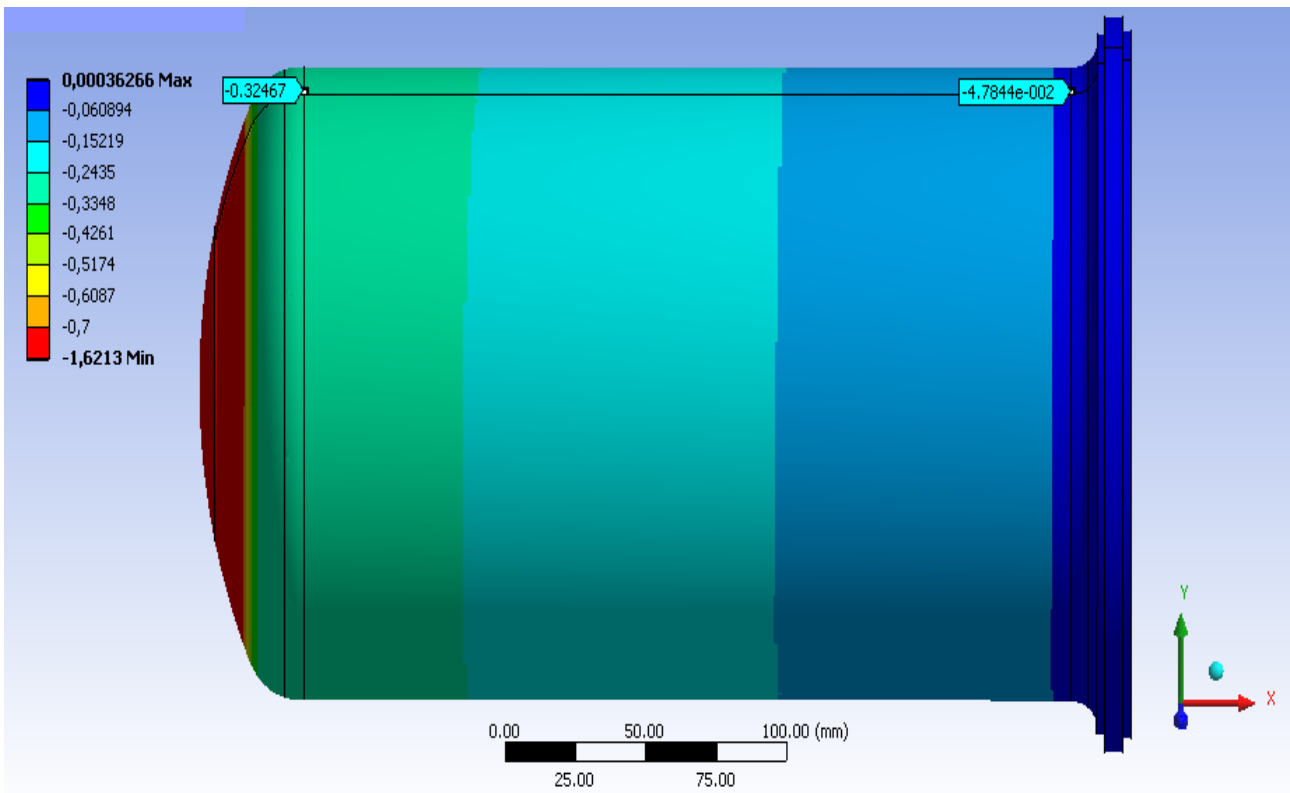


Bild 13: Längenänderung Titanspalttopf

Das Bild 13 zeigt die gesamte Längenänderung bei einer Innendruckbeaufschlagung von 60 bar und einer Spalttopfwandstärke von 1,0 mm. Es zeigt sich eindeutig, dass der größte Teil der Längenänderung in dem Bodenbereich erzeugt wird. Der Gestaltung dieser Form muß deshalb besondere Aufmerksamkeit geschenkt werden. Die Durchmesseränderung ist jedoch vernachlässigbar. Bild 14 zeigt hier einen maximalen Wert von ca. 0,4 mm, unter gleichen Bedingungen. Beide Werte konnten durch praktische Versuche bestätigt werden.

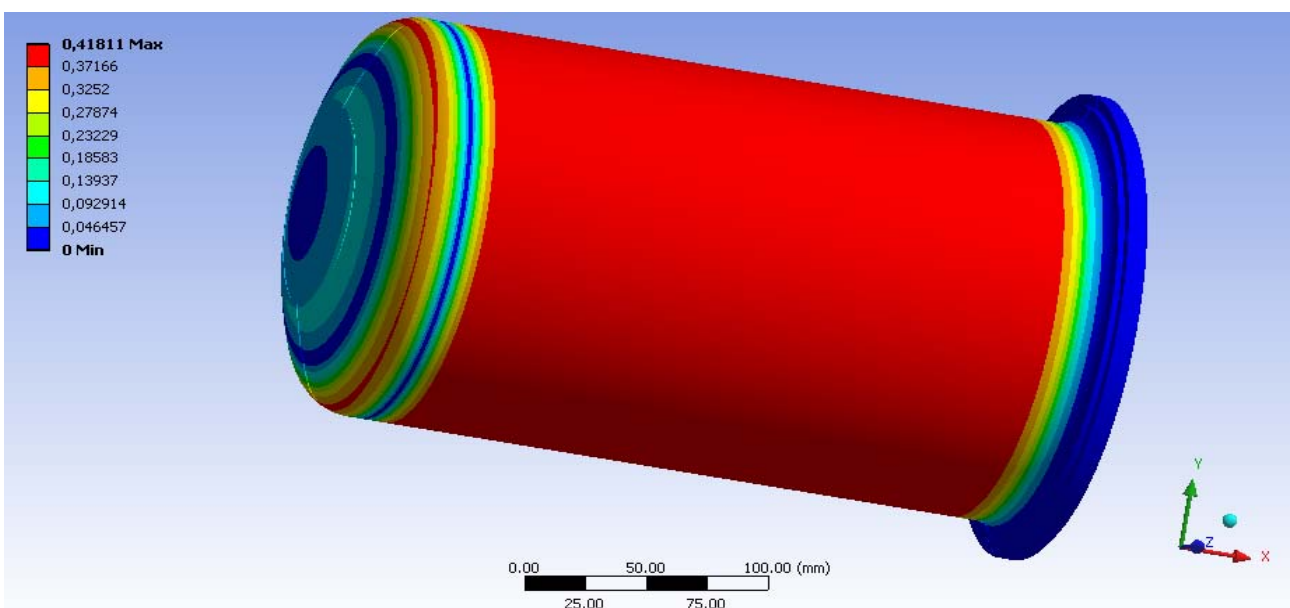


Bild 14: Durchmesseränderung Titanspalttopf

Die im Bild 15 gezeigte Vergleichsspannung zeigt eindeutig, dass der Übergang vom Boden zum zylindrischen Teil der wichtigste Bereich hinsichtlich Festigkeitsauslegung ist. Durch konstruktive Maßnahmen ist die Belastung an diesem Übergang wesentlich zu reduzieren.

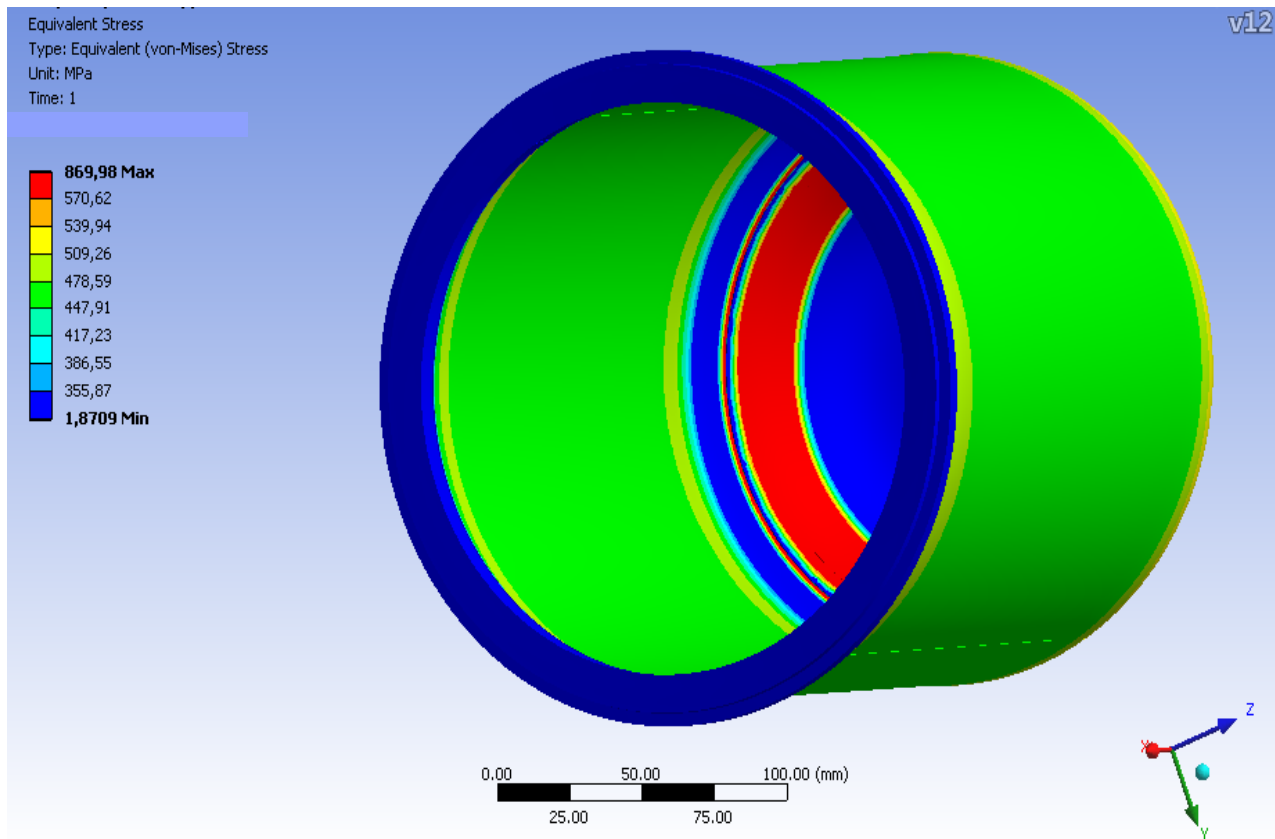


Bild 15: Vergleichsspannung Titanspalttopf

Durch den spezifischen elektrischen Widerstand der gegossenen Legierung Grade 5 von $1,62 \Omega\text{mm}^2/\text{m}$ werden die Wirbelstromverluste im Vergleich zu einem Hastelloy-Spalttopf um ca. 30-50% reduziert. Zum Vergleich: Hastelloy hat einen spezifischen Widerstand von $1,25 \Omega\text{mm}^2/\text{m}$, 1.4571 einen spezifischen Widerstand von $0,75 \Omega\text{mm}^2/\text{m}$.

Auch hinsichtlich der Explosionsschutzrichtlinie 94/9/EG gibt es keinerlei Einschränkung, einen Titanspalttopf in einem Gerät der Gruppe II, Kategorie 2 für den Einsatz in Zone 1 einzubauen. Gemäß EN 13463-1 ist bei Einsatz von Leichtmetallen nur der Legierungsbestandteil von Magnesium auf max. 7,5% beschränkt.

Die max. zur Verfügung stehende Kupplungsnennleistung beträgt zur Zeit ca. 200 kW.

6. Nova-Magnetics-Spalttopf

Seit Anfang der 90er-Jahre wird in den Pumpen der Fa. Dickow auch der Nova-Magnetics-Spalttopf eingebaut.

Wie in Bild 16 dargestellt besteht dieser Spalttopf im Gegensatz zu der sonst üblichen einwandigen Ausführung aus zwei Hüllen. Die innere Hülle, welche die radialen Belastungen aufnimmt, wird aus mehreren zentrierten Ringen gebildet, die durch nichtleitende Dichtelemente gegeneinander isoliert sind. Die äußere Hülle besteht aus einem geschlitzten Rohr, welches die axialen Belastungen aufnimmt. An diesem Rohr sind der flache Boden und der Befestigungsflansch angeschweißt. Die innere Hülle ist durch eine Wellenfederkonstruktion mit einer Belastung von 40 MPa gespannt. Diese Belastung wirkt indirekt auch auf die äußere Hülle mit ihrer Lamellenstruktur.

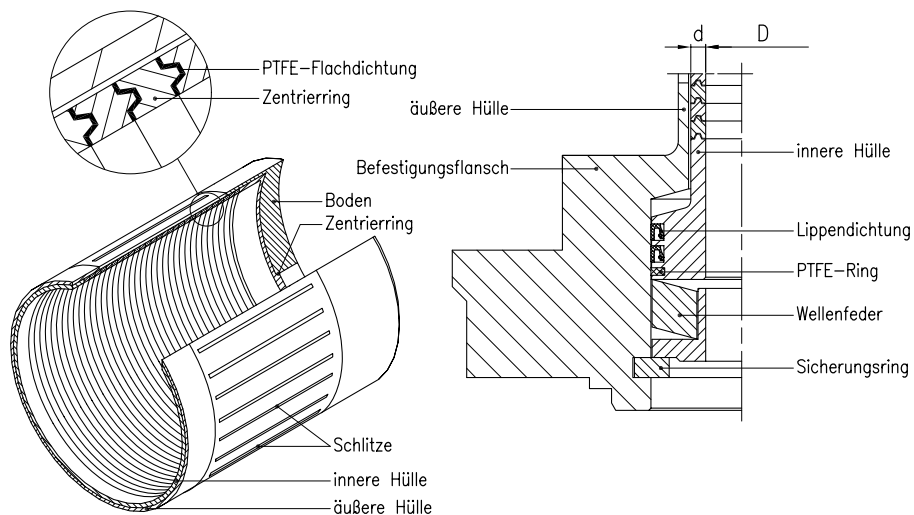


Bild 16: Nova-Magnetic-Spalttopf

Diese patentierte Konstruktion mit der speziellen Magnetreihenanzordnung reduziert die Verlustleistung gegenüber Hastelloy-Spalttöpfen um bis zu 80%. Bild 17 zeigt den Kupplungswirkungsgrad beider Konstruktionen in Abhängigkeit zur Umfangsgeschwindigkeit des innenliegenden Magnetrotors. Die Kurve 1 bezieht sich auf Hastelloy-Spalttöpfe mit einer Wandstärke von 1,0 mm und Rotordurchmesser zwischen 100 und 175 mm. Kurve 2 zeigt den bei der Fa. Dickow im Einsatz befindlichen Nova-Magnetic-Spalttopf, Werkstoff SS316, 7,5 mm Wandstärke und einem Rotordurchmesser von 200 mm.

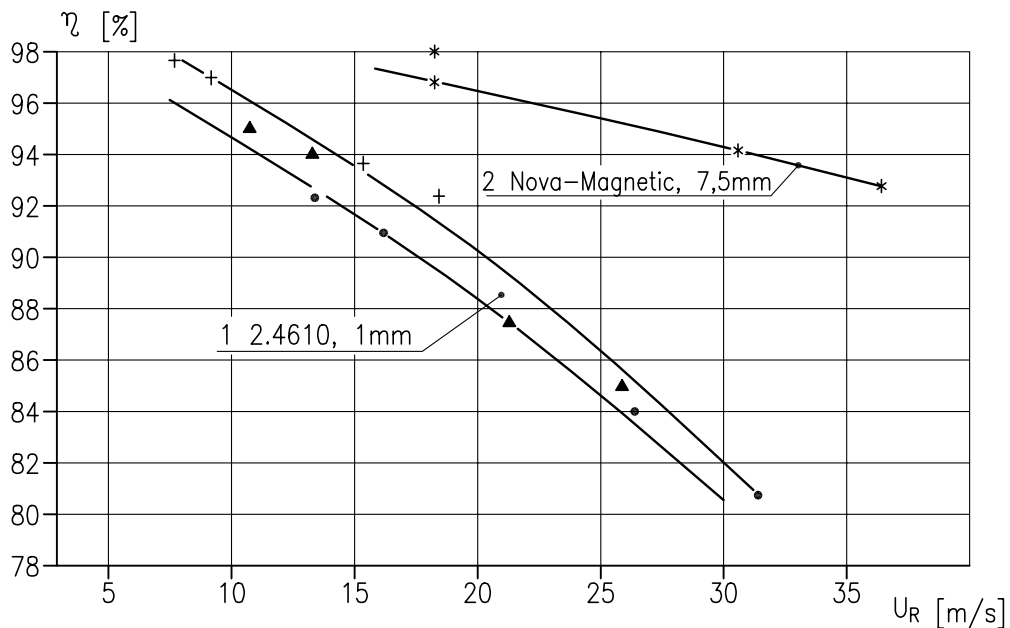


Bild 17: Kupplungswirkungsgrad im Verhältnis zur Umfangsgeschwindigkeit

Das Diagramm zeigt eindeutig den großen Vorteil dieser Spalttopfkonstruktion bei hohen Umfangsgeschwindigkeiten des Rotors, sprich: Drehzahlen 2900 und 3500 min⁻¹. Dies ist im Regelfall bei Motorleistungen oberhalb von 90 kW der Fall.

Nachfolgende Tabelle zeigt als Vergleich eine Kupplungsauslegung für einen Nova-Magnetics- und Hastelloy-Spalttopf, jeweils für einen zulässigen Betriebsdruck von 30 bar bei 250°C.

Nova-Magnetic-Spalttopf 1 / 7,5 / 160					
P_{Cpig} [kW]		P_v [kW]		η [%]	
2900 min ⁻¹	3500 min ⁻¹	2900 min ⁻¹	3500 min ⁻¹	2900 min ⁻¹	3500 min ⁻¹
162	195	7,5	11,8	95,5	94

Hastelloy-Spalttopf 2 / 1,5 / 186					
P_{Cpig} [kW]		P_v [kW]		η [%]	
2900 min ⁻¹	3500 min ⁻¹	2900 min ⁻¹	3500 min ⁻¹	2900 min ⁻¹	3500 min ⁻¹
167	202	29,7	43	82	79

Aufgrund der Spalttopfwandstärke von 7,5 mm ist jedoch ein Austausch in vorhandene Standardpumpen nur mit großem Mehraufwand möglich. Der zulässige Betriebsdruck beträgt für die eingesetzte Konstruktion 39 bar bei 250°C.

Vorsicht ist geboten, wenn Pumpen mit Nova-Magnetics-Spaltöpfen im drehzahlgeregelten Betrieb mit Frequenzumrichter eingesetzt werden sollen. Aufgrund der Belastung der äußeren Lamellen durch die Vorspannung der inneren Hülle, des anliegenden Systemdruckes sowie des rotierenden Magnetfeldes und dessen Anregungsfrequenz durch die Polpaarzahl der Magnete kann der Spalttopf im Eigenfrequenzbereich betrieben werden. Dies führt zum Bruch der Lamellen und einer Zerstörung der äußeren Magnetkupplung.

Die kritische Drehzahl berechnet sich wie folgt:

$$n_{\text{krit}} = f \cdot \frac{60}{P}$$

P = Polpaarzahl der Magnetkupplung

f = Eigenfrequenz

Es ist zu beachten, daß die Eigenfrequenz abhängig ist von der Druckbelastung des Spalttopfes. Es hat sich herausgestellt, dass die rechnerisch ermittelten Eigenfrequenzwerte von den praktisch, durch Anschlagversuche ermittelten Werte abweichen.

Für den sicheren Betrieb dieser Pumpen ist es deshalb unerlässlich, die Eigenfrequenz mit dem min. und max. Systemdruck durch Anschlagversuche zu ermitteln und so den zulässigen Drehzahlbereich des Aggregates festzulegen. Bild 18 zeigt, wie so ein Meßaufbau mit den zu messenden Punkten aussehen könnte.

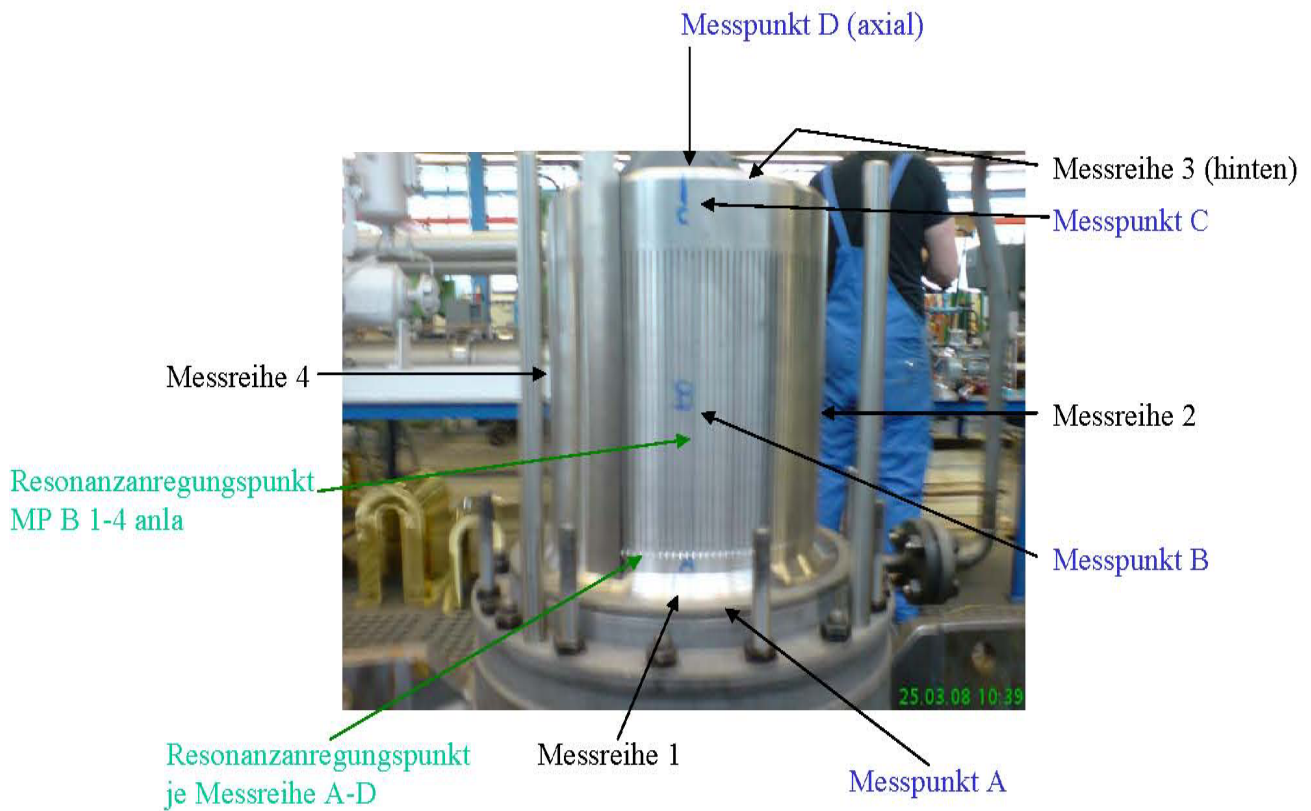


Bild 18: Meßstellenplan am Nova-Magnetics-Spalttopf

Durch eine konstruktive Maßnahme läßt sich die Resonanzerrgung des Spalttopfes deutlich mindern. Ein Vergleich ist in Bild 19 dargestellt. Am auffälligsten sind in den gezeigten beiden Spektren die Amplituden bei 264 Hz. Die Meßgröße der Amplitude ist als Bewertungsmaßstab nicht heranzuziehen, da diese abhängig ist von der Schlagkraft der Anregung.

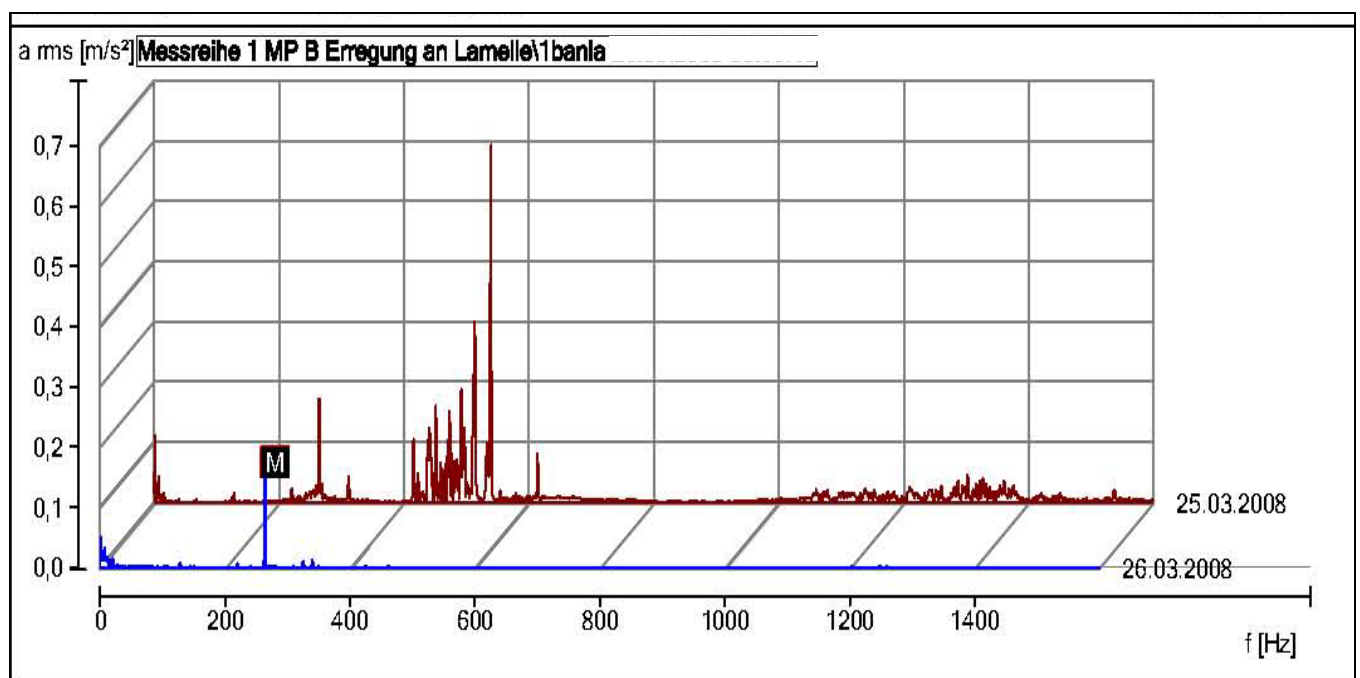


Bild 19: Vergleichsmessung mit und ohne konstruktive Abänderung

Eine weitere konstruktive Maßnahme ist meßtechnisch noch nicht erfaßt, wird aber die Resonanz-erregung des Spalttopfes noch weiter verbessern.

7. Zusammenfassung

Zusammenfassend sind die zur Zeit verfügbaren energieeffizienten Spalttopfwerkstoffe mit ihren technischen Daten gegenübergestellt. Mit diesen Varianten ist ein problemloser Austausch in vorhandenen Konstruktionen möglich. Somit können dem Betreiber sichere und dem aktuellen Stand der Technik entsprechende Alternativen zu den bisher üblichen metallischen Spalttopfwerkstoffen angeboten werden. Es obliegt dem Betreiber, ob er von diesem Mehrwert an Energieeinsparungen profitieren möchte, denn schon nach relativ kurzer Zeit amortisiert sich der Mehrpreis dieser modernen Werkstoffe.

	Zirkonoxid	PEEK/Composite	Titan Grade 5 gegossen	Nova-Magnetic
Spez. elektrischer Widerstand [$\Omega\text{mm}^2/\text{m}$]	10 ¹⁰	157	1,62	
Wandstärke [mm]	1,9	2,0	1,0	7,5
max. Betriebsdruck bei 20°C [bar]	16	24	60	39
Max. Betriebstemperatur [°C]	250	150	250	250
Max. Kupplungsnennleistung [kW]	100	50	200	300
Wirbelstromverluste	0	0	0,5-0,7 x HC4	0,2-0,5 x HC4

8. Literaturverzeichnis

- [1] Prüfbericht Nr. 190454: Numerische Beanspruchungsermittlung an Spalttopfvarianten
Fraunhofer-Institut für Betriebsfestigkeit und Systemzuverlässigkeit LBF, Darmstadt
- [2] Horst-Dieter Tietz: Technische Keramik: Aufbau, Eigenschaft, Herstellung, Bearbeitung, Prüfung
VDI-Verlag Düsseldorf 1994
- [3] Harry Schommer: Sealless magnetic driven centrifugal- and side channel pumps
Verlag und Bildarchiv W.F. Faragallah, Sulzbach 2004
- [4] BGR 132: Vermeidung von Zündgefahren infolge elektrostatischer Aufladungen
aktualisierte Fassung Juli 2004
- [5] Prüfbericht Nr. 161128: Experimentelle Untersuchung der Schädigungsmechanismen an der keramischen Dichtglocke einer Pumpe – Phase 1: experimentelle Modalanalyse
Fraunhofer-Institut für Betriebsfestigkeit und Systemzuverlässigkeit LBF, Darmstadt
- [6] Prüfbericht Nr. 161276: Experimentelle Untersuchung der Schädigungsmechanismen an der keramischen Dichtglocke einer Pumpe – Phase 2: Betriebsmessungen
Fraunhofer-Institut für Betriebsfestigkeit und Systemzuverlässigkeit LBF, Darmstadt
- [7] Elvira Moeller: Handbuch Konstruktionswerkstoffe
Hanser Verlag München 2008