

Airtech Stickstoff GmbH  
Daimlerstraße 34 – 36  
32312 Lübbecke

**Entwicklung eines energieeffizienten Membranverdichters  
zur simultanen Hoch- und Niederdruck-Entnahme  
verdichteter technischer Gas**

Abschlussbericht über ein Entwicklungsprojekt,  
gefördert unter dem Az: 28431 von der  
Deutschen Bundesstiftung Umwelt

von

Ralf Hacker & Dipl.- Ing. Manfred Nagel

Dezember 2012

**Dieser Abschlussbericht kann bezogen werden von:**

Airtech Stickstoff GmbH  
Daimlerstrasse 34 - 36  
D-32312 Lübbecke  
Germany  
Telefon +49 (0) 57 41 / 80 99 622  
Telefax +49 (0) 57 41 / 80 99 623  
Email: [info@stickstoffgenerator.de](mailto:info@stickstoffgenerator.de)  
Email: [info@hacker-anlagenbau.de](mailto:info@hacker-anlagenbau.de)  
Web: [www.stickstoffgenerator.de](http://www.stickstoffgenerator.de)  
Steuernr.: 331/5700/2306  
Ust.-Ident-Nr.: DE 256 136 091  
Kto.-Nr.: 241 392 273  
Sparkasse Herford  
BLZ: 494 501 20  
SWIFT-BIC: WLAHDE44XXX  
IBAN: DE54494501200241392273  
Handelsregisternummer:  
Amtsgericht Bad Oeynhausen HRB 12799

|   |              |  |   |                 |   |
|---|--------------|--|---|-----------------|---|
| <b>Projektkennblatt</b><br>der<br><b>Deutschen Bundesstiftung Umwelt</b>  |              |  |  |                 |   |
| Az  | <b>28431</b> | Referat  | <b>21/0</b>   | Fördersumme     |   |
| <b>Projekttitle</b>   |              | <b>Entwicklung eines energieeffizienten Membranverdichters zur simultanen Hoch- und Niederdruck-Entnahme verdichteter technischer Gase</b> |   |                 |   |
| <b>Kurztitel</b>  |              | <b>Dual High effective Membrane Compressor (DHMC)</b>  |   |                 |   |
| <b>Stichworte</b>   |              | Verfahren<br>Energie   |   |                 |   |
| Laufzeit  | <b>24</b>    | Projektbeginn  | <b>05.08.2010</b>   | Projektende     | <b>05.08.2012</b>                         |
|   |              |  |   | Projektphase(n) | <b>11</b>                                 |
| Zwischenberichte  |              |  |   |                 |   |
| <b>Bewilligungsempfänger</b>  |              | Ralf Hacker Edelstahl, jetzt Airtech Stickstoff GmbH<br>Daimlerstr. 34 - 36<br>32312 Lübbecke  |   |                 | Tel.: 05741/8099622<br>Fax: 05741/8099623 |
|   |              |  |   |                 | Projektleitung<br>Ralf Hacker             |
|   |              |  |   |                 | Bearbeiter<br>Manfred Nagel               |
| <b>Kooperationspartner</b>  |              | Keine  |   |                 |   |
| <p><b>Zielsetzung und Anlass des Vorhabens</b></p> <p>Die Versorgung mit technischen Gasen, speziell mit Stickstoff ist in Deutschland zwar ohne Probleme möglich, jedoch mit großen Aufwendungen und - wegen der großen Distanz zwischen Herstellung und Nutzung – oft mit einer starken Belastung für die Umwelt verbunden. Die dezentrale und bedarfsgerechte Versorgung mit dem Inertgas ist deshalb aus monetären wie ökologischen Aspekten wünschenswert.</p> |              |  |   |                 |   |

Das Ziel dieses Forschungsvorhabens ist die Entwicklung eines energieeffizienten Membranverdichters, der in zwei Stufen den kontinuierlichen Stickstoffstrom aus einem Stickstoffgenerator komprimiert. Dabei wird das vorverdichtete Gas nach der 1. Stufe (30 – 40 bar<sub>i</sub>) über einen Pufferspeicher direkt zum Verbraucher geführt. Der überschüssig produzierte Stickstoff bei vermindertem Verbrauch oder in Bearbeitungspausen wird der 2. Stufe zugeführt, hier weiterverdichtet und in Flaschenbündeln zwischengespeichert. Aus diesen kann er in Bedarfsspitzen über Druckminderer wieder entnommen werden.

### ***Darstellung der Arbeitsschritte und der angewandten Methoden***

Zu Beginn des Projektes werden die betriebsinternen Schnittstellen definiert damit die DHMC- Einheit gemeinsam mit dem vorgelagerten Stickstoffgenerator und der nachgeschalteten Laserschneidanlage zusammen arbeitet.

Danach wird die allgemeine Anlagenkonzeption festgelegt. Dabei spielt vor allem die Auslegung des Verdichterkopfes und des Kompressionsraumes eine Schlüsselrolle. Gleichzeitig wird der Einsatz verschiedener Membranen erforscht.

Anschließend wird ein Steuerkonzeptes erarbeitet, damit die zweite Verdichterstufe nur in Ruhezeiten / Produktionspausen und zur Bereitstellung von Puffervolumen Energie aufnimmt. Neben einer entsprechenden Messtechnik sind hier vor allem Hard- und Software-Komponenten zu dimensionieren und zu charakterisieren.

Parallel dazu wird die mechanische Auslegung Kopplung erarbeitet.

Es folgt die Auslegung eines geeigneten Kurbeltriebes, die Dimensionierung der Kolben-Zylinder-Kombinationen der Führungs- und Druckstufen und die Auslegung des Schmierkreislaufes

Nachdem diese konzeptionellen Aspekte gelöst und in technischen Zeichnungen und Modellen umgesetzt wurden, soll ein Prototyp gebaut, getestet und optimiert werden.

Diese Phase des Projektes wird die längste Zeit der Projektdauer in Anspruch nehmen und sich begleitend durch die meisten Projektphasen hindurch ziehen.

# Inhaltsverzeichnis

|   |    |
|---|----|
| <u>Projektkennblatt</u> .....   | 3  |
| <u>Inhaltsverzeichnis</u> .....   | 5  |
| <b>1 <u>Zusammenfassung</u></b> .....   | 7  |
| <b>2 <u>Verzeichnis von Begriffen, Abkürzungen und Definitionen</u></b> ..... | 8  |
| <b>3 <u>Einleitung</u></b> .....  | 9  |
| <b>4 <u>Hauptteil</u></b> .....   | 10 |
| <b>4.1</b> Schnittstellendefinition.....                                      | 11 |
| <b>4.2</b> Allgemeine Anlagenkonzeption.....                                  | 13 |
| <b>4.2.1</b> Grundgestell .....   | 13 |
| <b>4.2.2</b> Antrieb .....  | 14 |
| <b>4.2.3</b> Kurbelgehäuse .....  | 14 |
| <b>4.2.4</b> Kurbelwelle .....  | 16 |
| <b>4.2.5</b> Führungskolben, Pleuel und Zylinder .....                        | 17 |
| <b>4.2.6</b> Verdichterkolben der 2.Stufe .....                               | 18 |
| <b>4.2.7</b> Kompensationspumpe und Überströmventil .....                     | 19 |
| <b>4.2.8</b> Ölpumpe und Schmierung .....                                     | 20 |
| <b>4.3</b> Auslegung des Verdichterkopfes .....                               | 20 |
| <b>4.4</b> Auslegung des Kompressionsraumes .....                             | 21 |
| <b>4.5</b> Untersuchung verschiedener Membranen .....                         | 22 |
| <b>4.6</b> Erarbeitung des Steuerungskonzeptes .....                          | 23 |
| <b>4.6.1</b> Elektrische Steuerung .....                                      | 24 |
| <b>4.6.2</b> Sicherheitseinrichtungen.....                                    | 25 |
| <b>4.7</b> Auslegung der Kupplung .....                                       | 25 |
| <b>4.7.1</b> Magnetkupplung mit Elektromagneten .....                         | 25 |
| <b>4.7.2</b> Einscheibenkupplung .....  | 25 |

|       |   |    |
|-------|---|----|
| 4.7.3 | Drehmomentwandler.....  | 26 |
| 4.7.4 | Elektrisches Entlastungsventil.....   | 26 |
| 4.8   | Bau des Prototypen.....   | 27 |
| 5     | <b>Fazit</b> .....  | 27 |
| 6     | <b>Literaturverzeichnis</b> .....   | 28 |
| 7     | <b>Anhang</b> .....   | 29 |
| 7.1   | A1 Nicht-lineare Spannungsanalyse zur Berechnung der<br>Membranverformung ..... | 29 |
| 7.2   | A2 Datenblätter Membranwerkstoff .....  | 43 |
| 7.3   | A3 Abbildungen.....   | 49 |

## 1. Zusammenfassung

In dem vorliegenden Projekt wird ein 2-stufiger Membrankompressor zur Verdichtung von Inertgasen bis 300 bar(ü) und einem Volumenstrom von bis zu 100 Nm<sup>3</sup>/h entwickelt. Dabei kann das Gas nach der 1.Stufe, nach der 2.Stufe oder gleichzeitig nach beiden Stufen bis zur maximalen Fördermenge vom Verbraucher entnommen werden. Das zu verdichtende Gas - hier Stickstoff - wird von einem schon vorhandenen Stickstoffgenerator nach dem PSA-Prinzip produziert und steht in ausreichender Menge zur Verfügung.

Der Membrankompressor besteht in seinen zentralen Komponenten aus einem horizontal geteilten 2-teiligen Kurbelgehäuse, einer 3-fach gelagerten Kurbelwelle, zwei Zylindern mit Kolben die in 90° V-Form auf dem oberen Kurbelgehäusedeckel angeordnet sind und zwei 2-teiligen Verdichterköpfen mit eingelegten Edelmetallmembranen. Der Antrieb der Kurbelwelle erfolgt über einen Elektromotor mit 30kW Antriebsleistung und angeflanschem Untersetzungsgetriebe, das direkt auf der Kurbelwelle des Membrankompressors montiert ist.

Das Gas wird mit einem Vordruck von 5 bar(ü) in die erste Verdichterstufe geführt und dort auf einen Betriebsdruck von 40 bar(ü) verdichtet. Hinter der ersten Stufe befindet sich ein Gaskühler, gefolgt von einem 100 Liter Puffertank als Pulsationsdämpfer und zur Entnahme des Gases zum Verbraucher. Danach wird das Gas in der zweiten Stufe auf bis zu 300 bar(ü) verdichtet und nach Abkühlung in einem zweiten Kühler in Flaschenbündeln gespeichert.

Ziel ist es, möglichst lange das gesamte Gas hinter der 1. Stufe zu entnehmen und in dieser Zeit die 2. Stufe vom Antrieb abzukoppeln. Dies führt je nach Druckverhältnissen zu einer Energieeinsparung von bis zu 40%. Daher wurde für Verbrauchsspitzen zusätzlich noch ein 1000 Liter / 40bar(ü)-Puffertank installiert. Kann nicht das gesamte Gas nach der 1.Stufe entnommen werden, wird die 2.Stufe zugeschaltet und verdichtet den überschüssigen Anteil in 300 bar(ü)-Flaschenbündel

Um die Produktionskosten zu reduzieren ist das Design so ausgelegt, dass die Einzelteile ohne Sondermaschinen und einfach zu fertigen sind. Weiterhin werden für viele Komponenten Serienprodukte z.B. aus dem Automobile Sektor eingesetzt.

Die Wartungskosten und Wartungsintervalle werden durch großzügige Dimensionierung verschleißanfälliger Komponenten, den Direktantrieb und die geringe Antriebsdrehzahl von 300 U/min minimiert. Es werden Wartungsintervalle > 8000 Betriebsstunden anvisiert.

Die Stickstoffherzeugung selbst kann mit dem bereits vorhandenen Stickstoffgenerator nach eigenen Messungen mit 0,7 kW/ Nm<sup>3</sup><sub>N<sub>2</sub></sub> bewerkstelligt werden und kostet mit Industriestromtarifen ca. 6 bis 8 ct/ Nm<sup>3</sup><sub>N<sub>2</sub></sub>. Dieser Energieeintrag liegt noch unterhalb des Energieaufwandes der beim kryogenen Verfahren eingesetzt wird. Jedoch muss durch den Transport und die Logistik mit einem Aufpreis zwischen 13 und 26 ct/ Nm<sup>3</sup><sub>N<sub>2</sub></sub> gerechnet werden. Diese Kosten fallen bei dem hier gewählten Ansatz des DHMC nicht an. Der erwartete Energieaufwand für Verdichtung und Speicherung wird je nach Entnahmemenge nach der ersten Stufe auf 0,2 – 0,4 kW/ Nm<sup>3</sup><sub>N<sub>2</sub></sub> geschätzt da nur ein Teil des Gases hochverdichtet wird.

## 2. Verzeichnis von Begriffen, Abkürzungen und Definitionen

| Abkürzung      | Symbol            | Bezeichnung                 | Einheit   | Definition  |
|----------------|-------------------|-----------------------------|-----------|---|
| l              | m                 | Länge                       | Meter     | SI - Einheiten  |
| m              | kg                | Masse                       | Kilogramm |   |
| t              | s                 | Zeit                        | Sekunde   |   |
| I              | A                 | Stromstärke                 | Ampere    |   |
| T              | K                 | Thermodynamische Temperatur | Kelvin    |   |
| n              | mol               | Stoffmenge                  | Mol       |   |
| I <sub>v</sub> | cd                | Lichtstärke                 | Candela   |   |
| A              | m <sup>2</sup>    | Fläche                      |           |   |
| b              | m                 | Breite                      |           |   |
| D              | m                 | Durchmesser                 |           |   |
| DHMC           |                   |                             |           | Dual High effective Membrane Compressor                           |
| E              | N/mm <sup>2</sup> | Elastizitätsmodul           |           |   |
| FEM            |                   |                             |           | Finite Element Method   |
| f              | 1/s               | Frequenz                    | Hertz     |   |
| P              | W                 | Leistung                    | Watt      | $W = J/s = m^2 \text{ kg}/s^3$                                    |
| p              | bar               | Druck                       | Bar       | $1 \text{ bar} = 10^5 \text{ Pa} = 10^5 \text{ kg}/m \text{ s}^2$ |
| p <sub>ü</sub> | bar(ü)            | Druck                       |           | Druck über dem atmosphärischen Druck                              |
| Δp             | bar               | Druckdifferenz              | Bar       | $1 \text{ bar} = 10^5 \text{ Pa} = 10^5 \text{ kg}/m \text{ s}^2$ |
| PSA            |                   |                             |           | Pressure Swing Adsorption, Druckwechseladsorption                 |
| R              | m                 | Radius                      |           |   |
| V              | m <sup>3</sup>    | Volumen                     |           |   |

### 3. Einleitung

Die Versorgung mit technischen Gasen, speziell mit Stickstoff, ist in Deutschland ohne Probleme möglich, jedoch mit großen Aufwendungen und - wegen der großen Distanz zwischen Herstellung und Nutzung – oft mit einer starken Belastung für die Umwelt verbunden. Die dezentrale und bedarfsgerechte Versorgung mit dem Inertgas ist deshalb aus finanziellen wie ökologischen Aspekten wünschenswert. Das Forschungsvorhaben beschäftigt sich mit der Entwicklung eines energieeffizienten, gesteuerten 2-stufigen Membran-Hochdruckverdichters (Dual High effective Membrane Compressor, **DHMC**), bei dem vorverdichteter Stickstoff sowohl niederdruckseitig (nach der 1. Stufe) zur sofortigen Entnahme als auch hochdruckseitig (nach der 2. Stufe) zur Speicherung entnommen werden kann. Das Verhältnis der Entnahmemenge Niederdruck / Hochdruck ist dabei beliebig. Es können ebenso andere Inertgase eingesetzt werden. Ziel ist die unterbrechungsfreie und effiziente Selbstversorgung mit Stickstoff als Inertgas von Laserschneidanlagen mit ausreichender Pufferung. Mit der Realisierung dieses Vorhabens und der intensiven Verbreitung der neu entwickelten Technologie wird es möglich sein, ambitionierten ökologischen und ökonomischen Zielen zu folgen. Der Wegfall bzw. die starke Reduzierung des bislang obligatorischen Transportes technischer Gase vom zentralen Herstellungsort zu den zahlreichen Nutzern vermindert das LKW-Aufkommen erheblich und trägt dazu bei, die damit verbundenen Emissionen von CO<sub>2</sub>, Feinstaub, Lärm, NO<sub>x</sub>, etc. deutlich zu verringern und den Straßenverkehr sicherer zu gestalten.

In Deutschland gibt es derzeit ca. 8000 Produktionsstandorte, an denen meist mehrere Laserschneidanlagen mit einem mittleren bis hohen Stickstoffverbrauch (40 m<sup>3</sup>/h bis 60 m<sup>3</sup>/h) betrieben werden. Hinzu kommen ca. 1000 Lötanlagen und zahlreiche Betriebe, in denen (Laser-) Schweißanlagen und andere Metall- und stahlverarbeitende Maschinen zum Einsatz kommen. Auch Gießanlagen (z. B. für Aluminium) und Spritzgussverfahren in der Kunststoffindustrie, wie zum Beispiel das zur PET-Verarbeitung, verwenden inzwischen große Mengen des Inertgases N<sub>2</sub>. Außerdem wird Stickstoff in der Lebensmittelindustrie eingesetzt. Die in diesem Bereich durchgesetzte Menge ist in den letzten Jahren deutlich gestiegen. Allein in Deutschland wird die Zahl der Lebensmittelbetriebe mit Stickstoffverbrauch inzwischen auf mehrere tausend geschätzt. Dabei wird das Gas in erster Linie seiner inerten Wirkung wegen zum Konservieren von Obst und bei Verpackungs- und Produktionsprozessen von Lebensmitteln eingesetzt. Denn lange Haltbarkeit ist in Zeiten einer globalisierten Lebensmittelindustrie mit weltumspannenden Transportwegen und hohen Anforderungen an die Qualität der Waren unerlässlich.

Laserschneidanlagen benötigen Gasdrücke von ca. 30 bar(ü). Wird das Gas mit Hilfe von konventionellen ölgeschmierten Verdichtern in diesen Zustand gebracht, befindet sich in der Regel ein gewisser Anteil Öl oder Kohlenwasserstoffe C<sub>x</sub>H<sub>y</sub> im Gas, was zur Kontamination und damit zum Versagen der Schneidanlage führen kann. Ölfreie Kolbenkompressoren scheiden meist wegen ihrer hohen Kosten und der kurzen Wartungsintervalle aus. Aus diesem Grunde lassen sich die meisten

Betriebe, die mit diesem Problem konfrontiert sind, vorverdichteten oder flüssigen Stickstoff in Form von Bündeln oder Flüssiggastanks liefern. Bei Bündeln ist die Entspannung von den dabei vorliegenden 200 - 300 bar energetisch nicht sinnvoll, aber erforderlich. Bei Flüssiggastanks entstehen Stickstoff- und damit Energieverluste durch Abblasen von Flüssiggastanks in Produktionspausen (durch Erwärmung steigt der Tankinnendruck und muss durch Abblasen reduziert werden), ebenso wie Transportkosten mit erheblichem Energieverbrauch und Emissionen durch Schwerlastverkehr, weil Flüssiggastanks in der Regel 1-2 mal pro Woche durch Tanklastzüge befüllt werden müssen. Da es nur ca. 8 Luftzerlegungsanlagen in Deutschland gibt, kann der Anfahrtsweg zum Verbraucher mit durchschnittlich 100 km angenommen werden. Bei einem mittleren Diesel-Verbrauch von 40 l/100 km eines voll beladenen Tanklastzuges lässt sich der CO<sub>2</sub> Ausstoß pro Befüllungsfahrt mit über 211 kg CO<sub>2</sub> beziffern! Hochgerechnet auf alle Produktionsstandorte in Deutschland, die einmal wöchentlich beliefert werden müssen, ergibt das einen Ausstoß des klimaschädlichen Kohlendioxids (2,65 kg CO<sub>2</sub>/ Liter Diesel) von über 85.000 t/a. Darin inbegriffen ist noch nicht das CO<sub>2</sub> Äquivalent, das berechnet werden muss, um die Verdichtung des Stickstoffs vorzunehmen. Ebenso wenig wird in dieser Überschlagsrechnung die Emission an gesundheitsschädlichen Partikeln und Abgasen sowie andere Emissionen berücksichtigt, die ebenfalls CO<sub>2</sub> Äquivalente besitzen. Dennoch ist ersichtlich, dass das Einsparpotential allein hier in Deutschland enorm wäre.

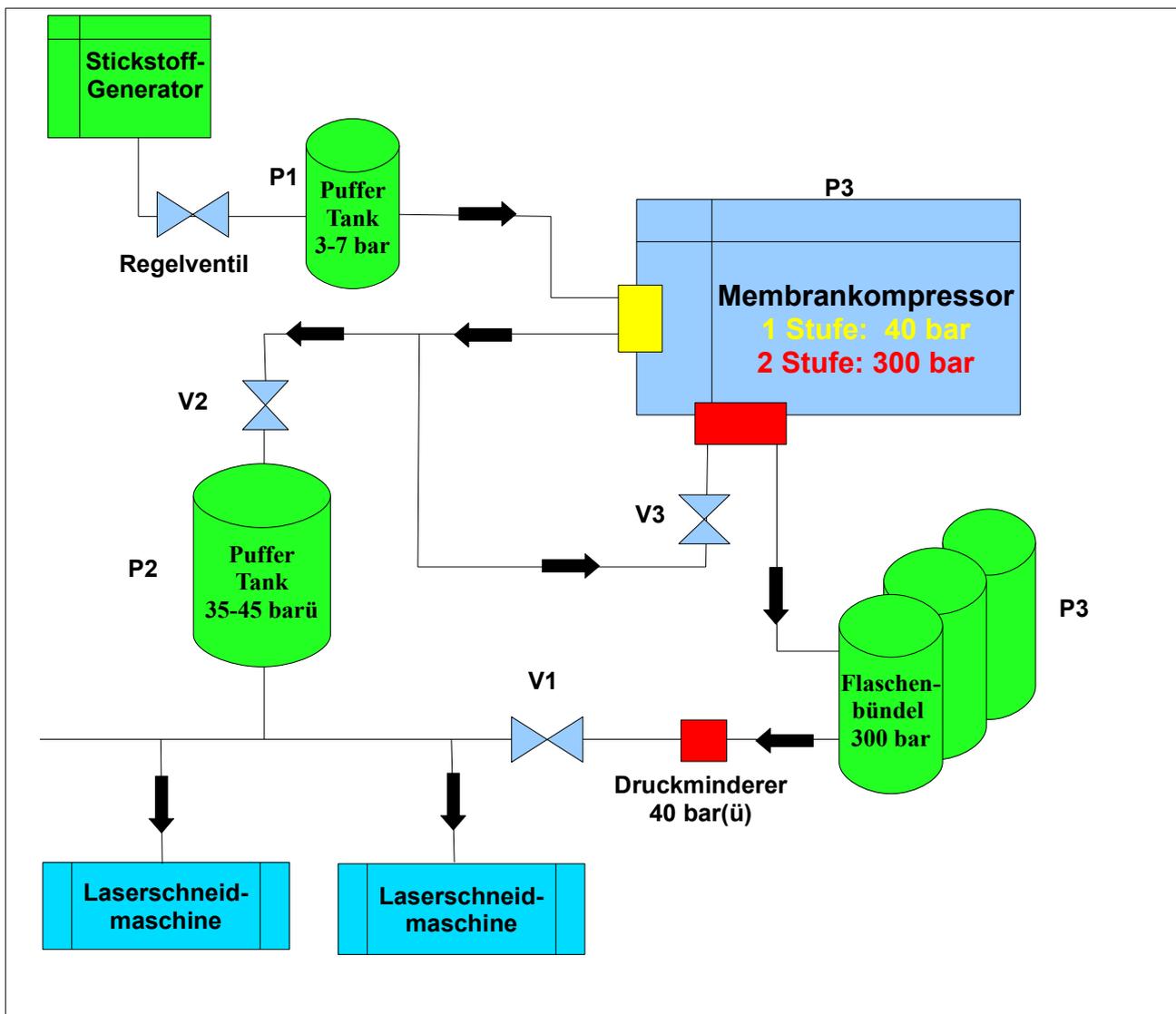
Industriell hergestellt wird Stickstoff durch kryogene Verfahren, also Luftverflüssigung (Linde-Verfahren). Dabei werden bei tiefen Temperaturen nach und nach die einzelnen Bestandteile der Luft entsprechend Ihrer Siedetemperatur auskondensiert (fraktionierende Destillation). Dafür muss eine Leistung von 0,65- 0,75 kW/Nm<sup>3</sup>N<sub>2</sub> aufgewendet werden. Der Transport und die Lagerung dieser Gase erfolgt in Bündeln bei 200 – 300 bar oder in flüssigem Zustand in Tankzügen bei Temperaturen von < -200°C. Damit erspart man sich große Tankvolumina.

Alternativ kann Stickstoff auch über die sog. „On-Site Erzeugung“ am Verbrauchsort hergestellt werden. Anlagenkonzepte, die sich in diesem Zusammenhang durchgesetzt haben, sind entweder Membranverfahren oder Anlagen, die auf Druckwechsel-Adsorption (Pressure Swing Adsorption) basieren. In einem unserer Vorläuferprojekte wurde eine solche PSA-Anlage realisiert. Die erforderliche Leistung ist mit der beim Linde-Verfahren benötigten vergleichbar, nämlich zwischen 0,65 und 0,75 kW/Nm<sup>3</sup>N<sub>2</sub>. Der gewonnene Stickstoff liegt bei diesem Ansatz auf einem Niederdruckniveau vor und muss zum Einsatz an Laserschneidanlagen noch verdichtet werden. Um eine Kontamination des Inertgases durch den Kompressionsvorgang zu verhindern, werden bevorzugt ölfreie Kolbenkompressoren oder Membrankompressoren eingesetzt, da hierbei eine absolute physikalische Trennung von Verdichtemedium und Kompressionshilfsstoffen gewährleistet werden kann. Vorteil bei dieser Erzeugungsart sind der komplette Wegfall des langen Transportes und den damit verbundenen Lärm- und Abgasemissionen sowie einer bedarfsgerechteren Belieferung.

## 4. Hauptteil

### 4.1 Schnittstellendefinition

Das Blockschaltbild zeigt die Einbindung des Membrankompressors in das Gesamtsystem. Wie der schematischen Darstellung zu entnehmen ist, wird mit einem Nennvordruck von 5 bar(ü) +/- 2bar gearbeitet. Vorteil dieses Lösungsweges ist die Verarbeitung schwankender Produktions- und Liefermengen des Stickstoffgenerators bei konstanter Kompressordrehzahl. Der erzeugte Stickstoff kann direkt in das hauseigene 40 bar-Stickstoffleitungsnetz eingespeist werden oder mit einem Druck von bis zu 300 bar zur Füllung von Flaschenbündeln genutzt werden.



### Zustände der Ventile V1 bis V3 und des Membrankompressors in Abhängigkeit von den Druckverhältnissen

P1: Membrankompressor **EIN** wenn  $3 \text{ bar(ü)} < P1 < 7 \text{ bar(ü)}$   
und wenn  $P3 < 250 \text{ bar(ü)}$  oder wenn  $P2 < 42 \text{ bar(ü)}$

P2: Wenn der Druck im Puffertank  $P2 < 38 \text{ bar(ü)}$  beträgt wird  
V1 geöffnet  
V2 geöffnet  
V3 geschlossen

Note: Die 2 Stufe des Membrankompressor ist inaktiv

P2: Wenn  $38 \text{ bar(ü)} < P2 < 42 \text{ bar(ü)}$  wird  
V1 geschlossen  
V2 geöffnet  
V3 geschlossen

Note: Die 2 Stufe des Membrankompressor ist inaktiv

P2: Wenn  $42 \text{ bar(ü)} < P2 < 45 \text{ bar(ü)}$  wird  
V1 geschlossen  
V2 geöffnet  
V3 geöffnet

Note: Die 2. Stufe des Membrankompressor wird gestartet

P2: Wenn der Druck im Puffertank  $P2 > 45 \text{ bar(ü)}$  beträgt wird  
V1 geschlossen  
V2 geschlossen  
V3 geöffnet

Note: Die 2. Stufe des Membrankompressor wird gestartet

P3: Wenn der Druck im Flaschenbündel  $P3 > 300 \text{ bar(ü)}$  beträgt wird  
V3 geschlossen

wenn zusätzlich  $P2 > 45 \text{ bar(ü)}$ : Antrieb Membrankompressor **AUS**

P3: Wenn der Druck im Flaschenbündel  $P3 < 250 \text{ bar(ü)}$  beträgt wird  
V3 geöffnet und: Antrieb Membrankompressor **EIN**

## 4.2 Allgemeine Anlagenkonzeption

Der Membrankompressor besteht in seinen zentralen Komponenten aus einem horizontal geteilten 2-teiligen Kurbelgehäuse, einer 3-fach gelagerten Kurbelwelle, zwei Zylindern mit Kolben die in 90° V-Form auf dem oberen Kurbelgehäusedeckel angeordnet sind und zwei 2-teiligen Verdichterköpfen mit eingelegten Edelstahlmembranen. Die Membrane werden mittels Hydrauliköl von den beiden Verdichterkolben unterschiedlichen Durchmessers von der Unterseite her bewegt und komprimieren auf der Oberseite das zu verdichtende Inertgas.

Die 2. Stufe wird als Kreuzkopf ausgelegt. Dabei ist der kleinere Verdichterkolben nicht direkt mit der Kurbelwelle verbunden sondern ist über eine Schubstange mit einem Führungskolben verschraubt um Kippmomente zu minimieren. In der 1. Stufe dient der Führungskolben gleichzeitig als Verdichterkolben. Plattenventile in den Zylinderköpfen sorgen für den Gasfluss. Am Ausgang jeder Stufe sind Nachkühler und Pulsationsdämpfer eingebaut.

Um den Verschleiß gering zu halten und um lange Wartungsintervalle zu erreichen wird der Kompressor als Langsamläufer mit einer Drehzahl von 300 U/min ausgelegt. Der Antrieb der Kurbelwelle erfolgt über einen Elektromotor mit 30kW Antriebsleistung und angeflanschem Untersetzungsgetriebe, das direkt auf der Kurbelwelle des Membrankompressors montiert ist. Die gesamte Anordnung wird auf einem selbsttragenden fundamentfreien Grundgestell montiert.

Die Steuerung ist in einem separaten Schaltschrank untergebracht.

### 4.2.1 Grundgestell

Der Kompressor mit allen elektrischen und mechanischen Anbauteilen soll auf einem einzigen "gabelstaplertauglichen" Grundgestell montiert werden, das selbsttragend ist und keine weiteren Befestigungen oder Fundamente benötigt. Dafür wird eine quaderförmige Konstruktion aus zusammengeschweißten 6mm-Stahlblechen gewählt.

Die Bleche werden auf der Lasermaschine mit den erforderlichen Durchbrüchen und Bohrungen zugeschnitten. Laschen und entsprechende Aussparungen an den umlaufenden Seiten der Einzelbleche ermöglichen in der Vormontage ein passgenaues Zusammenstecken des gesamten Gestells vor dem Schweißen. Es sind danach keine weiteren Richtarbeiten oder Einspannungen erforderlich, und das Gestell kann in einem Zuge abgeschweißt werden.

Eine in das Gestell integrierte Ölwanne ist in der Lage im Fehlerfall das gesamte Ölvolumen aufzunehmen. Ein seitlich angeordneter zentraler Schaltschrank nimmt sämtliche elektrischen Komponenten auf. Die finalen Abmessungen sind:

- 2300mm x 1200mm x 300mm
- Gewicht 415 kg

#### 4.2.2 Antrieb

Als Antrieb wird ein luftgekühlter 3-Phasen-Asynchronmotor mit angeflanschem, schrägverzahnten Untersetzungsgetriebe verwendet. Die Getriebeausgangswelle ist dabei als Hohlwelle ausgeführt und wird direkt unter Verwendung einer Paßfeder auf die Kurbelwelle geschoben. Verschleißanfällige Keil- oder Zahnriemen mit entsprechenden Spannvorrichtungen entfallen damit.

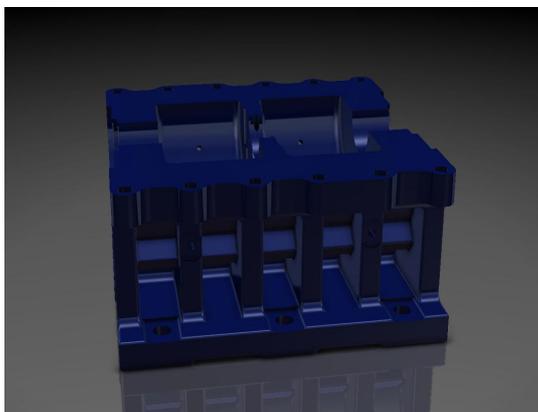
Da der vorgeschaltete Stickstoffgenerator systembedingt einen Ausgangsdruck von 3–7 bar(ü) liefert kann der Kompressor auf Vordruckbetrieb ausgelegt werden. Das hat zum einen den Vorteil, dass insbesondere die Baugröße der 1. Stufe erheblich reduziert wird, zum anderen kann der Kompressor auch unterschiedliche Liefermengen ohne Drehzahlregelung verarbeiten, d.h. auf teure Frequenzumformer kann verzichtet werden.

Zum Start ist aufgrund der großen rotierenden Massen lediglich ein Sanftanlaufgerät erforderlich, das aber gleichzeitig die sonst erforderlichen Schütze ersetzt. Als Antriebsleistung wird rechnerisch eine zu installierende Motorleistung von 30 kW bestimmt.

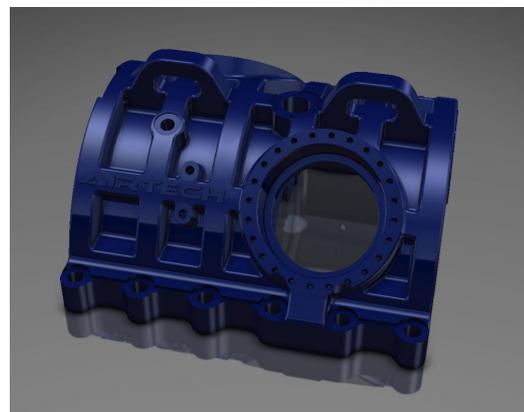
#### 4.2.3 Kurbelgehäuse

Das Kurbelgehäuse wird als Gußteil aus Grauguß GJL 250 hergestellt [Kon03] . Es ist horizontal in der Mitte der Kurbelwellenhauptlager in Ober- und Unterschale geteilt, was die Montage der Kurbelwelle mit Lagern erleichtert und gleichzeitig die ölseitige Abdichtung vereinfacht. Die Abdichtung erfolgt über eine in die Nut der Dichtfläche eingelegten Viton-Dichtschnur.

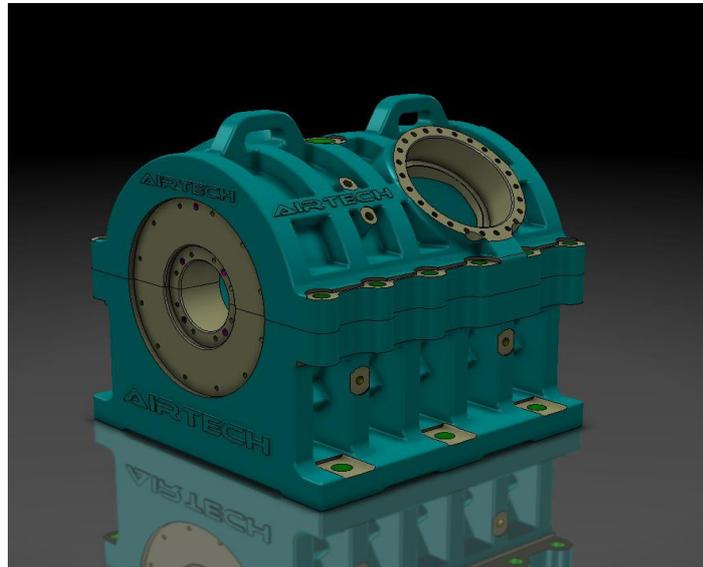
Die Unterschale besitzt angegossene Befestigungslaschen zur Montage auf dem Grundgestell sowie diverse Angüße zur Befestigung von Zusatzaggregaten, wie Ölpumpe, Ölrücklaufleitungen, Schaugläsern etc. Auf der Oberschale können die beiden Zylinder mit Flanschringen V-förmig angeschraubt werden. Auch hier sind diverse Angüße für Transporthaken, Kurbelgehäuseentlüftung, Ölleitungen usw. vorhanden (*Bild 1,2,3*).



*Bild 1*

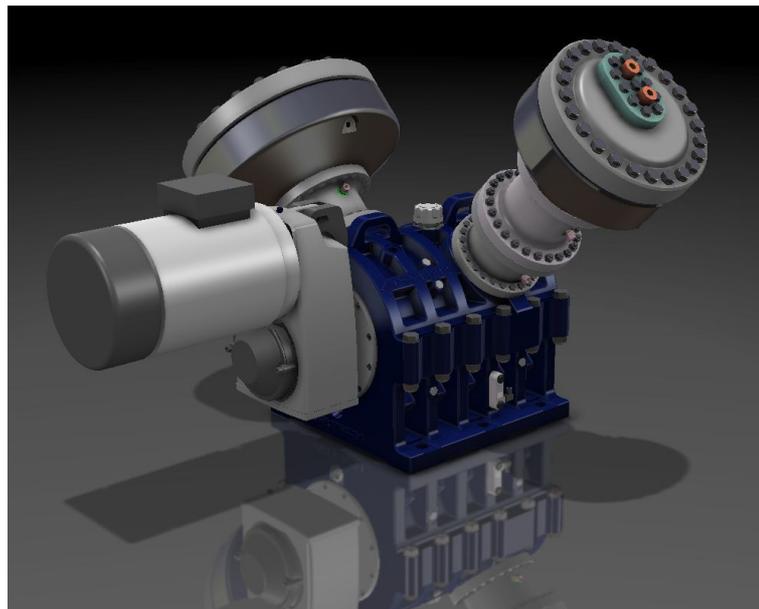


*Bild 2*



*Bild 3*

In den Bereichen in denen hohe Kräfte aufgenommen werden müssen, wie an den Hauptlagern und den Zylinderanflansungen sind zusätzliche Rippen und Verstrebenungen vorhanden. Mit den angegossenen Fußlaschen kann das Gehäuse über Silentblöcke als Schwingungsdämpfer und zur Geräusch- und Vibrationsreduzierung mit dem Untergestell verschraubt werden. Stirnseitig kann an das zusammengeschaubte Gehäuse der Antriebsmotor mit Getriebe geflanscht werden (*Bild 4*). Eine angegossene Drehmomentstütze nimmt dabei die Kräfte des Elektroantriebs auf.



*Bild 4*

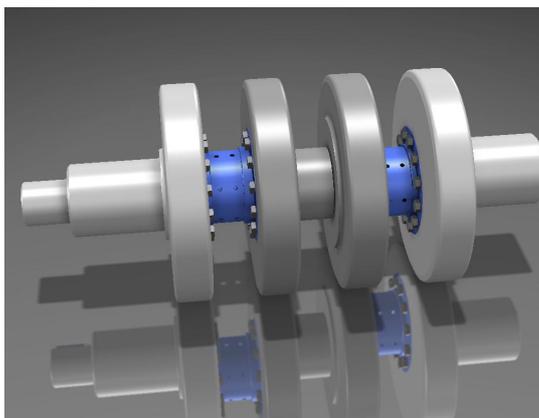
#### 4.2.4 Kurbelwelle

Die gewählte Kurbelwelle besteht aus zwei Kurbelwangenpaaren mit Hubzapfen und drei Hauptlagern. Aus Kosten- und fertigungstechnischen Gründen wird hier keine einteilige Schmiedewelle wie bei herkömmlichen Kurbeltrieben eingesetzt, sondern es werden die Hub- und Hauptlagerzapfen mit angedrehten Flanschringen versehen und an die Kurbelwangen geschraubt (*Bild 5*). Großzügig dimensionierte Paßstifte übernehmen hier die Drehmomentübertragung.

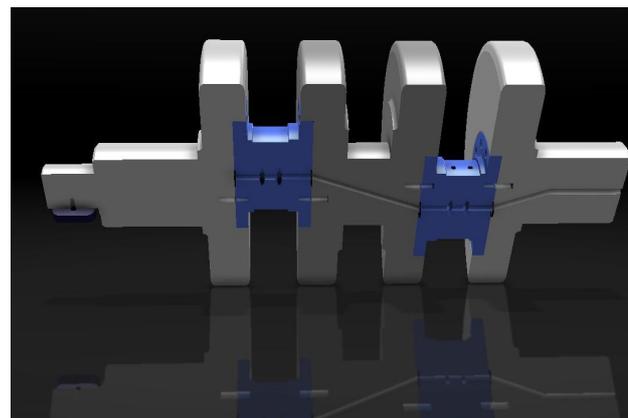
Die Kurbelwangen sind dabei so dimensioniert, dass sie gleichzeitig die Funktion einer Schwungscheibe übernehmen und somit auf zusätzliche Schwungmassen verzichtet werden kann. Bohrungen in den Kurbelwangen die gegenüber den exzentrisch angeordneten Hubzapfen liegen, sorgen dafür, dass der Massenschwerpunkt des Gesamtsystems Kurbelwelle – Pleuel – Kolben – Kolbenbolzen in der Achse der Hauptlager liegt. Ausgewuchtet wird das System statisch mit Hilfe eines Aufnahmeständers in dem die Welle an beiden Enden auf zwei Kugellagern liegt und sich schwerpunktmäßig auspendeln kann. Ein dynamisches Wuchten ist bei den geringen Drehzahlen nicht erforderlich.

Als Werkstoff wird für die Zapfen 42CrMo4 und für die Wangen 34CrMo4 gewählt (*DEW11*). Die Zapfen werden oberflächengehärtet und geschliffen. Als Lager werden zweiteilige Gleitlagerschalen für Kurbelwellen aus dem Nutzfahrzeugbau verwendet, da diese eine gute Verfügbarkeit und ein ausgezeichnetes Preis/Leistungsverhältnis haben.

Die Kurbelwelle ist in den Zapfen und Wangen hohlgebohrt um die Lagerstellen über eine Ölpumpe mit Öl zu versorgen (*Bild 6*). Zuführt wird das Öl über eine Nut im hinteren Hauptlagerzapfen der im Kurbelgehäuse eine Ölbohrung gegenüberliegt an die die Öldruckleitung angeschlossen ist.



*Bild 5*



*Bild 6*

#### 4.2.5 Führungskolben, Pleuel und Zylinder

Auf dem oberen Kurbelgehäusedeckel werden zwei Zylinderrohre aus S355J2G3 mit andrehbaren Flanschringen angeschraubt. Diese Rohre dienen zur Aufnahme der Gußlaufbuchsen in denen die Führungskolben gleiten. Die Führungskolben mit Kolbenbolzen sind über zweiteilige Pleuel direkt mit der Kurbelwelle verbunden.

Für Laufbuchsen, Kolben, Kolbenringe, Kolbenbolzen, Pleuel und unteres Pleuellager wird hier ein kompletter Komponentensatz aus dem Automotive Nutzfahrzeugbereich verwendet, da die Materialkombinationen erprobt und ausgereift sind, und es sich um ein sehr preiswertes Serienprodukt handelt. Weiterhin ist die mechanische Belastung der Komponenten in einem Dieselmotor bei Verbrennungsdrücken  $> 100\text{bar}$  deutlich höher als bei diesem Einsatz.

Da der Raum über dem Kolbenboden der Führungskolben mit Öl gefüllt ist, wird der normalerweise vorhandene Ölabstreifring durch einen zusätzlichen Kolbenring ersetzt. Das untere Pleuellage in das auch die Mehrstoff-Lagerschalen eingelegt werden ist zur Montage zweigeteilt. (Bild 7). Die Gußlaufbuchsen werden von oben in die Zylinderrohre bis zu ihrem oberen Bund eingesetzt und später über die Verdichterköpfe axial fixiert. Mit handelsüblichen Dichtungen aus Messingblech unterschiedlicher Stärke kann der erforderliche Laufbuchsenüberstand eingestellt und damit eine zuverlässige Abdichtung gewährleistet werden. Zwischen Laufbuchse und Zylinderrohr ist im mittleren Teil ein umlaufender Abstand von 10mm vorgesehen. Dieser Bereich wird über eingeschraubte Normanschlüsse mit in den Ölkreislauf eingebunden und dient zur Kühlung der Buchsen (Bild 7).

In der 1. Stufe wirkt der Führungskolben direkt auf das Hydrauliköl.



Bild 7

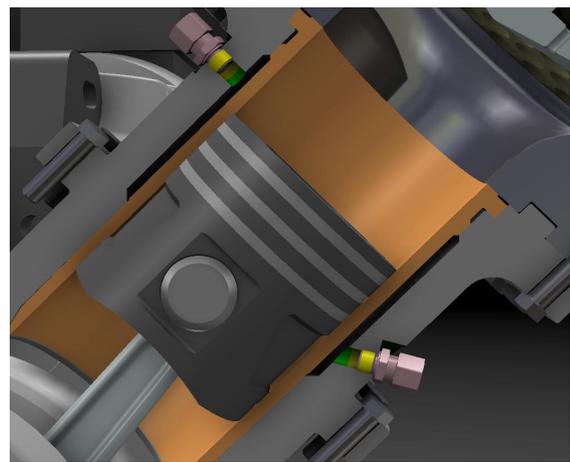


Bild 8

#### 4.2.6 Verdichterkolben der 2. Stufe

Die 2. Verdichterstufe ist in Kreuzkopfausführung konstruiert, d.h. der Führungskolben dient dabei lediglich zur Umsetzung der Drehbewegung der Kurbelwelle in eine Auf- und Abwärtsbewegung und ist über eine Koppelstange mit dem eigentlichen Verdichterkolben verbunden. Eine direkte Lösung wie in der 1. Stufe ist bei dem geringen Kolbendurchmesser sowohl aus Platzgründen als auch wegen der auftretenden Kippmomente nicht möglich. Für das Material des Verdichterkolbens wird 42CrMo4S gewählt [Kur06].

Um den maximalen Kompressionsdruck zuverlässig abzudichten, werden auf dem Kolben 6 Kolbenringe aufgebracht. Auch hier werden Standardringe aus dem Automobilbau verwendet, wobei der Ringstoß etwas breiter gewählt wird. Dies erhöht zwar ein wenig den Ölverlust, sorgt dafür aber für ein annähernd lineares Druckgefälle zwischen dem ersten und letzten Ring und damit für eine gleichverteilte Belastung der einzelnen Ringe.

Der Anschluss an den Führungskolben erfolgt direkt mittels zweier konkaver Scheiben die eine Kugel umschließen (Bild 9).. Dadurch bleibt der Verdichterkolben beweglich und Verspannungen der Kolben in den jeweiligen Zylindern durch Fertigungstoleranzen und unterschiedliche Laufspiele werden minimiert.

Der Verdichterkolben bewegt sich wie der Führungskolben in einer Laufbuchse, diesmal der höheren Belastung wegen aus Grauguß GJL 350, die in einem Zylinderrohr mit beidseitigen Befestigungsflanschen steckt. Auch hier wird die äußere Laufbuchsenoberfläche zur Kühlung in den Hydraulikölkreislauf eingebunden. Die Gesamtanordnung zeigt Bild 10. [Deh12].

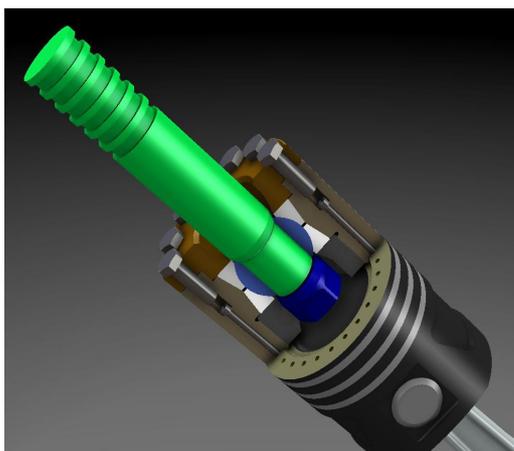


Bild 9

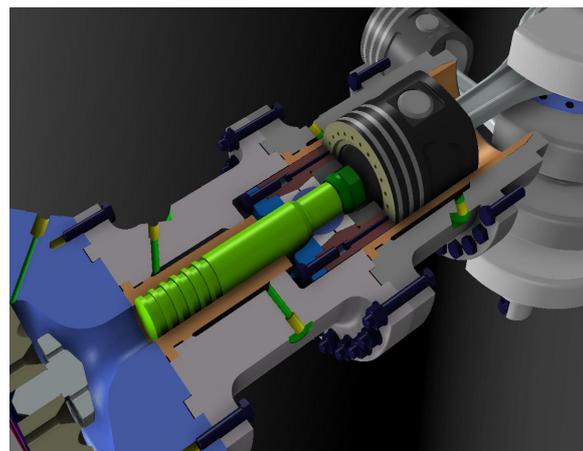


Bild 10

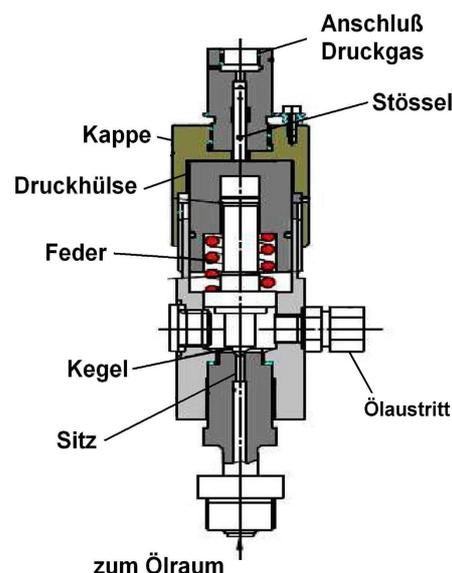
#### 4.2.7 Kompensationspumpe und Überströmventil

Da bei jedem Druckhub des Kolbens eine geringe Menge Hydrauliköl an den Kolbenringen vorbei zurück in das Kurbelgehäuse gelangt, wird dieser Ölverlust durch eine Kompensationspumpe kontinuierlich ergänzt da ansonsten Luft in das System gesaugt würde. Weil der genaue Ölverlust nicht bekannt ist und auch durch fortschreitenden Verschleiß an Kolbenringen und Laufbuchse im Laufe der Zeit steigt, muss die zugeführte Ölmenge den Verlust übersteigen und den Ölraum überfüllen. Dies geschieht durch eine einfache Kolbenpumpe, die über einen auf der Kurbelwelle angebrachten Nocken angesteuert wird.

Dabei wird der Nocken so auf der Welle platziert, dass der Überschussanteil während der Abwärtsbewegung des Verdichterkolbens eingespritzt wird. Als Überschussmenge wird hier anfangs ca. 8% des Hubvolumens gewählt. Eine Volumenstrommessung der zugeführten Ölmenge und der, über das Überströmventile rückgeführten Ölmenge lässt Rückschlüsse auf den Verschleiß der Kolbenringe zu.

Um das zu viel eingespritzte Öl aus dem System zu entfernen, befindet sich am höchsten Punkt des Ölraumes unterhalb der Membran eine Bohrung, die zu einem Überströmventil führt. Kurz bevor der Verdichterkolben seinen oberen Totpunkt erreicht wird steigt der Öldruck durch das überschüssige Öl schlagartig an und das Überströmventil öffnet.

Um den maximalen Öldruck unterhalb der Membran dem stetig steigenden oder fallenden Gasdruck im Pufferbehälter anzupassen und um die Belastung der Membran zu reduzieren wird hier ein gasdruckgesteuertes Überströmventil eingesetzt. Der momentane Gasdruck des Pufferbehälters wird hier innerhalb des Ventils über einen Stößel auf einen Kolben gegeben, der die Ventilfeeder des Überströmventils vorspannt. Ein Beispiel für ein solches Ventil zeigt *Bild 11* [Deh12].



*Bild 11*

#### **4.2.8 Ölpumpe und Schmierung**

Durch geeignete Auswahl kann für das Ansteuern der Membran, für die Schmierung aller Lager- und Gleitstellen und für die gesamte Wärmeabfuhr das gleiche Hydrauliköl eingesetzt werden. Es ist somit nur ein Schmier- / Kühlkreislauf vorhanden und eine Trennung von Kurbelgehäuse, unterem Verdichterraum und einem Kühlkanälen ist nicht erforderlich .

Als Ölpumpe wird eine elektrisch angetriebene Zahnradpumpe eingesetzt, die somit schon vor dem Anlaufen des Kurbeltriebes Öldruck aufbauen kann. Die Pumpe versorgt über die gebohrte Kurbelwelle die Hauptlager sowie über die hohlgebohrten Pleuel den oberen Kolbenbolzen mit einem Öldruck von 8 bar(ü). Die weiteren Lagerstellen werden über Anschlussleitungen mit Verschraubung mit Öl versorgt. Dadurch kann eine Trockensumpfschmierung zum Einsatz kommen, die mit erheblich geringeren Ölmengen auskommt.

In den Ölkreislauf sind ein Ölfilter und ein Ölkühler mit thermostatgesteuertem Bypass und elektrischem Lüftermotor eingefügt. Alle Komponenten stammen aus dem kostengünstigen Automotive-Sektor. Für die Schmierung des Führungskolbens der 1. Stufe und des Verdichterkolbens der 2. Stufe sorgt das darüber befindliche Öl, der Führungskolben der 2. Stufe wird vom Überschussanteil der Kompensationspumpe versorgt. Die äußeren Zylinderwände sind ebenfalls von Öl umgeben und zur Wärmeabfuhr in den Ölkreislauf eingebunden. Weiterhin wird die Kompensationspumpe mit Öl versorgt.

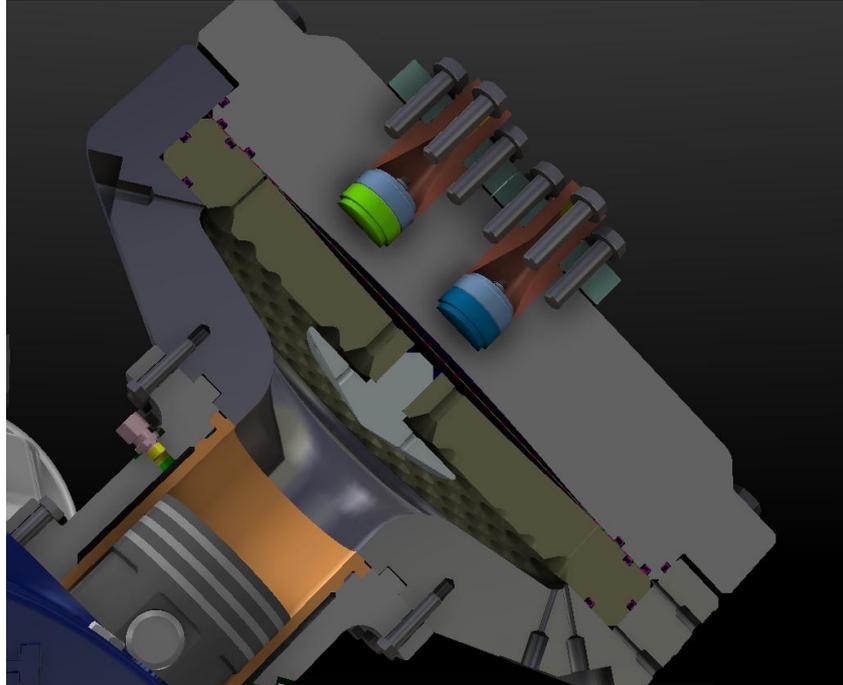
### **4.3 Auslegung des Verdichterkopfes**

Der Verdichterkopf besteht aus einem rotationssymmetrischen Ober- und Unterteil die miteinander verschraubt werden. Das Unterteil wird mit dem Flansch des Zylinderrohres verschraubt und ist innen so ausgedreht, dass es eine Lochplatte aufnehmen kann die als unterer Anschlag für die Edelstahlmembran dient. Die innere Form des Unterteils ist dabei strömungstechnisch so gestaltet, dass das Hydrauliköl während der Kolbenbewegung möglichst wirbelfrei und gleichmäßig strömt.

Am höchsten und tiefsten Punkt des montierten unteren Verdichterkopfes befindet sich jeweils eine Bohrung mit Gewindeanschluß. Erstere führt zum Überströmventil, letztere zur Kompensationspumpe.

Das Oberteil nimmt die beiden Ein- und Auslassventile auf, die zur Reduzierung von Toträumen möglichst tief eingelassen sind, und die mit entsprechenden geschraubten Druckstücken von oben fixiert werden. Dies erleichtert den Ausbau der Ventile für Servicezwecke.

Die Abdichtung erfolgt über Dichtungen die in Nuten der Lochplatte und des Oberteils eingelassen sind (*Bild 12*). Zwischen Lochplatte und Oberteil wird die Membran eingelegt.



*Bild 12*

Die Wandstärken von Ober- und Unterteil sowie der Lochplatte werden mit der 3D-CAD-Konstruktionssoftware "Solid Works Simulation" simuliert und bestimmt. Als Material wird für das Oberteil aus Korrosions- und Festigkeitsgründen Edelstahl 1.4571 und für das Kopfunterteil und die Lochplatte 34CrMo4 gewählt. Alle Bauteile sowie die Anzahl und Abmessungen der Kopfschrauben wurden auf Dauerdruckwechselfestigkeit berechnet und ausgelegt.

#### **4.4 Auslegung des Kompressionsraumes**

Der Kompressionsraum wird von der inneren Form des Oberteils des Verdichterkopfes und der oberen Form der im Kopfunterteil eingelegten Lochplatte gebildet. Die Membran wird dabei zwischen den Kontaktflächen dieser beiden Komponenten eingespannt. Die Form dieses Kompressionsraumes sowie der maximale Hub der Membran, der durch die Höhe des Kompressionsraumes festgelegt wird, sind die entscheidenden Kriterien für deren Lebensdauer.

Die Membran wird aus ihrer Ruhestellung in der Mitte des Kompressionsraumes symmetrisch in beide Richtungen bis zum Anschlagen an den oberen Kopf bzw. die Lochplatte ausgelenkt

und dabei gedehnt. Ziel ist es die Kopf-/Lochplattenform so zu gestalten, dass bei möglichst großem Hub die Spannung innerhalb des Membranbleches in radialer Richtung möglichst gleich ist und die Grenzwerte des Elastizitätsmoduls nicht überschritten werden. Hierzu werden die Spannungen unterschiedlicher Kopfformen mit Hilfe der 3D-CAD-Konstruktionssoftware "Solid Works Simulation" berechnet. Eine Beispielrechnung und der zugehörige Rechenweg findet sich im Anhang A1 „Nicht-lineare Spannungsanalyse zur Berechnung der Membranverformung“.

Eine Vielzahl von Versuchen mit unterschiedlichen Formen zeigt, dass zur Erzielung einer möglichst gleichmäßigen Spannungsverteilung innerhalb der Membran als Näherung eine Kopfform gewählt werden kann, die aus zwei Radien R1, R2 besteht. Die Form beginnt von der Einspannung der Membran aus mit R1 und der Steigung 0, geht dann mit gleicher Steigung in den Radius R2 über und endet in Kopfmitte wieder mit der Steigung 0 (Bild 13). Dabei gilt:  $R1 = 2 \times R2$ .

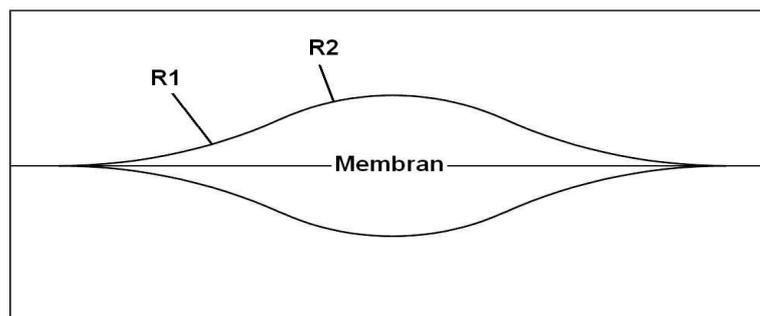


Bild 13

Um eine Blasenbildung zwischen Membran und oberem Kopf zu vermeiden, werden in den Kopf vier Nuten 1x1mm vom Rand bis zum Auslassventil eingebracht über die eventuell entstehende Luftblasen abgeführt werden. Es wird erwogen diese Nuten in einem weiteren Versuch durch Kugelstrahlen der Kopfinnenfläche zu ersetzen.

Eine weitere Maßnahme zur Blasenvermeidung wird bei der Ausführung der Lochplatte angewendet. Diese ist mit Bohrungen in konzentrischen Kreisen bis zum Mittelpunkt versehen. Dabei wird der Bohrungsdurchmesser von außen zur Mitte hin verringert, damit sich die Membran beim Durchströmen des Öls in Richtung Membran von außen her an den oberen Kopf anlegt und dadurch das Gas zielgerichtet zum Auslassventil gedrückt wird.

Die Öffnungen zum Ausgangskanal werden hinsichtlich geringst möglichem Totraum und Strömungsgeschwindigkeit optimiert.

## 4.5 Untersuchung verschiedener Membranen

Der zweiteilige Verdichterkopf wurde mit Hilfe der 3D-CAD-Konstruktionssoftware "Solid Works Simulation" berechnet und hinsichtlich Spannungsverteilung und Membranhub optimiert. Der Kompressionsraum ist somit festgelegt und es kann nunmehr mit verschiedenen Membranwerkstoffen deren Dauerbiegefestigkeit und Lebensdauer ermittelt werden. Als einsetzbare Materialien mit Aussicht auf eine lange Lebensdauer werden gewählt:

- Edelstahl 1.4310
- Edelstahl 1.4310.4
- Edelstahl 1.4571
- Kupfer-Beryllium 2.1247
- Titanium 3.7025

Zugehörige Datenblätter befinden sich im Anhang A2. Um Schäden durch Korrosion zu vermeiden, können ausschließlich nichtrostende Materialien verwendet werden.

Um Folgeschäden bei einem Membranbruch zu verhindern, werden drei gleichgroße Membranbleche mit einer Stärke von 0,3 mm übereinandergelegt, wobei das mittlere mit 6 konzentrisch angeordneten Schlitzen bis zum Rand versehen ist. Beim Bruch der oberen Membran wird dann das komprimierte Gas, beim Bruch der unteren Membran das Hydrauliköl über die Schlitze nach außen hin zu einem Drucksensor abgeführt, der für eine sofortige Abschaltung des Antriebsmotors sorgt (s.a. *Bild 12*).

Problematisch ist die Beschaffung des Vormaterials für die Membrane. Bei den geforderten Abmessungen werden insbesondere die Bleche aus den Werkstoffen 2.1247 und 3.7025 meist nur auftragsbezogen gewalzt, sodass deren Einsatz aus Kostengründen nur in der Serienfertigung in Frage kommt. Daher wird für den Prototypen Edelstahl 1.4310 verwendet, das in Walzbreiten bis 800mm verfügbar ist. Das Ausschneiden der Membranform und das Einbringen der Schlitze geschieht auf der Laserschneidmaschine.

## 4.6 Erarbeitung des Steuerungskonzeptes

Die Ansteuerung aller Schalt-, Steuer- und Sensorelemente erfolgt aus einem zentralen Schaltschrank heraus. Bedienung und Visualisierung erfolgt über ein 19"-Touch-Display. Kernstück ist dabei ein handelsüblicher Industrie-PC auf dem eine selbst entwickelte und speziell zugeschnittene Software installiert wird, die bereits vorher schon in der Lage war, den vorgeschalteten Stickstoffgenerator zu steuern. Mit dieser Software ist es möglich, alle erforderlichen Schalt- und Steuerungsvorgänge für den Membrankompressor allein oder auch im Zusammenspiel mit dem Stickstoffgenerator auszuführen. Die Software ist dabei so universell gestaltet, dass nahezu alle Parameter frei konfigurierbar sind. In den PC ist eine analoge PCI-I/O-Karte mit 64 A/D-Eingängen und 4 D/A-Ausgängen mit 12-bit und eine

digitale I/O-Karte mit 64 TTL-Ein- und Ausgängen eingebaut. Die Signalkonditionierung erfolgt analog über handelsübliche Normsignalwandler und digital über Optokoppler mit leistungsstarken SSR-Schaltausgängen. Die Zustände aller Ein- und Ausgänge werden aufgezeichnet und zur einfachen Auswertung in zeitlich terminierten und gestaffelten Excel-Tabellen abgelegt

#### **4.6.1 Elektrische Steuerung**

Die elektrische Steuerung übernimmt die folgenden Steuerungs- und Überwachungsvorgänge:

- Motorüberwachung in Bezug auf die max. zulässigen Werte (Motorwicklungstemperatur, Anlaufstrom und Stromaufnahme im Betrieb über Stromwandler, Drehzahl)
- Überwachung von Eingangs-, Zwischen- und Ausgangsdruck
- Öldrucküberwachung unterhalb der Membran in beiden Stufen
- Volumen des zu- und rückgeführten Öl-Überschussanteils
- Überwachung der Gasaustrittstemperatur beider Stufen
- Temperaturüberwachung der Zylinderköpfe im Bereich der Auslassventile
- Öltemperaturüberwachung
- Ölstandüberwachung
- Öldruck der Lagerschmierung
- Drucküberwachung von Puffertanks und Flaschenbündeln
- Überwachung der Vibrationen des Kurbelgehäuses
- Überwachung der Pausenzeit zwischen zwei aufeinanderfolgenden Anläufen
- Differenzdrucküberwachung der Filter
- Ausgabe von Warn- und Störmeldungen
- Ein- und Ausschalten des Antriebsmotors
- Schalten der elektrischen Ölpumpe
- Schalten der elektromagnetischen Entlüftungsventile vor, zwischen und hinter den Verdichterstufen
- Schalten des Ölraum-Entlastungsventils
- Schalten des Lüftermotors am Ölkühler

Alle analogen Signale besitzen frei parametrierbare obere und untere Grenzwerte für Warn- und Störmeldungen sowie für eine Notabschaltung.

### **4.6.2 Sicherheitseinrichtungen**

Sicherheitsventile vor und hinter den einzelnen Stufen sowie an den verwendeten Pufferbehältern und Flaschenbündeln schützen das System beim Ausfall von elektrischen Komponenten. An den ölseitigen Verdichterräumen sind Berstscheiben vorgesehen um den Antrieb bei Versagen des Überströmventils zu schützen. Der Antrieb kann beim Erreichen voreinstellbarer Grenzwerte sofort abgeschaltet und Druckleitungen über die elektromagnetischen Entlüftungsventile entlastet werden. Letzteres gilt auch bei Stromausfall. Die gesamte Einheit befindet sich mit Ausnahme des Schaltschranks unter einer Abdeckhaube die Schutz bei Leitungsbruch bietet. Eine Auffangwanne unterhalb des Grundgestells ist in der Lage das gesamte Ölvolumen aufzunehmen. Über Not-Aus-Taster kann das gesamte System spannungsfrei geschaltet werden

## **4.7 Auslegung der Kupplung**

Wenn im laufenden Betrieb die gesamte verdichtete Gasmenge am Ausgang der 1. Verdichterstufe vom Verbraucher abgenommen werden kann, soll aus energetischen und verschleißtechnischen Gründen die mechanisch zumeist höher belastete 2. Stufe außer Betrieb gesetzt werden. Dazu soll zwischen 1. und 2. Stufe eine Kupplung eingefügt werden, die von der Steuerung bedarfsbezogen ein- und ausgeschaltet wird. Um den Kompressor zum Einkuppeln der 2. Stufe nicht jedes mal anhalten zu müssen, scheiden formschlüssige Kupplungssysteme aus. Intensive Rechercharbeiten führten dabei zu folgenden Lösungsansätzen:

### **4.7.1 Magnetkupplung mit Elektromagneten**

Die Kupplung besteht hier aus einem äußeren und inneren Antrieb die sich beide nicht berühren. Das Drehmoment wird lediglich über die magnetischen Kräfte übertragen, wobei auch ein geringer Wellenversatz ausgeglichen werden kann. Die Kupplung unterliegt daher keinerlei Verschleiß und ist vollkommen wartungsfrei. Sie kann direkt als Nassläufer im Hydrauliköl eingesetzt werden und dient zusätzlich als Sicherungselement da sie bei Überschreiten eines maximalen Drehmomentes, das über den Strom des Elektromagneten einstellbar ist, durchrutscht. Nachteilig ist der sehr hohe Preis der bei dem zu übertragenden Drehmoment für ein solches System entsteht.

### **4.7.2 Einscheibenkupplung**

Einscheibentrockenkupplungen sind als Großserienprodukt im Automotive- Bereich sehr verbreitet und daher kostengünstig zu haben. Es existieren Bauformen die auch große

Drehmomente zuverlässig übertragen können und sowohl mechanisch, hydraulisch oder elektrisch betätigt werden. Nachteil ist, daß sie als Naßläufer nicht einsetzbar sind und daher das Kurbelgehäuse zwischen 1. und 2. Stufe getrennt und abgedichtet werden muß, was zu erheblich höheren Produktionskosten führt.

#### **4.7.3 Drehmomentwandler**

Auch Drehmomentwandler sind als Großserienprodukt im Automotive- Bereich sehr verbreitet und kostengünstig. Die Kraftübertragung erfolgt hydrodynamisch, unterliegt kaum Verschleiß und ist praktisch wartungsfrei. Aus dem Stillstand heraus ist das Abgangsdrehmoment erheblich höher als das Eingangsdrehmoment und führt so zu einem guten Anlaufverhalten. Bei dieser hydrodynamischen Kraftübertragung kann das gleiche Hydrauliköl wie für den Verdichter eingesetzt werden, so daß sich der Wandler einfach in das Kurbelgehäuse integrieren lässt. Nachteilig ist jedoch Baugröße, die durch die geringe Kompressordrehzahl erforderlich ist. Die führt wiederum zu einer kostensteigernden Vergrößerung des Kurbelgehäuses.

#### **4.7.4 Elektrisches Ödraum- Entlastungsventil**

Die Kupplung zwischen den beiden Stufen erfordert zudem in allen Fällen ein viertes Kurbelwellenhauptlager. Das Anfertigen unterschiedlicher Entwürfe die anschließend kostenmäßig hinterfragt wurden, führt zu dem Ergebnis, dass eine mechanische Entkopplung der beiden Verdichterstufen eine unzulässige Kostensteigerung verursacht.

Um die 2. Stufe im o.a. Betriebsfall trotzdem zu entlasten wird sich für die folgende erheblich einfachere Lösung entschieden:

Parallel zum Entlastungsventil der 2. Stufe wird ein ausreichend dimensioniertes Magnetventil geschaltet das wieder in das Kurbelgehäuse führt. Bei Bedarf kann nun das Hydrauliköl oberhalb des Verdichterkolbens vollständig entlastet werden und die oberhalb liegende Membran kommt zum Stillstand. Die 2. Stufe bewegt sich nun im Leerlauf und es müssen lediglich die Reibungsverluste für die Kolben / Pleuelkombination aufgewendet werden. Nach dem Schließen des Magnetventils wird der Hubraum oberhalb des Kolbens über das gasgesteuerte Überströmventil aus Kap. 4.2.5 entlüftet und die 2. Stufe ist wieder im Einsatz.

## 4.8 Bau des Prototypen

Für den Bau des Prototypen werden umfangreiche Zeichnungen mit Solid Works erstellt. Auszüge befinden sich im Anhang A3. Simulationen der Spannungsverteilung erleichtern dabei das Festlegen von Wand- und Materialstärken und das Einfügen von Rippen und Verstrebungen. Dabei wird auf eine einfache fertigungsgerechte Konstruktion geachtet.

Des Weiteren wird bereits intensiver Kontakt zu dem Lieferanten der Gusskörper gepflegt und die Konstruktionszeichnungen für das Modell mit dessen Konstruktionsabteilung abgesprochen. Weitere mechanische Bauteile wie die Membrane, Kolben, Pleuel, Lager, Laufbuchsen etc. sind bereits beschafft. Das Rohmaterial für die Kurbelwelle ist ebenfalls bestellt und sollte zeitnah für den Bau der Kurbelwelle zur Verfügung stehen.

Da die Projektlaufzeit zu diesem Zeitpunkt leider abgelaufen ist, muss das Projekt hier vorerst unterbrochen werden.

## 5. Fazit

Es hat sich gezeigt, dass der Bau eines kostengünstigen und energieeffizienten Membranverdichters, der insbesondere für die unter Kap.3 genannten Anwendungsfälle unter Einsatz der beschriebenen Maßnahmen möglich ist. Insbesondere eine Serienfertigung könnte hier erhebliche ökologische und ökonomische Vorteile bringen und helfen Ressourcen einzusparen. Amortisationszeiten deutlich unter 2 Jahren sind bei entsprechenden Laufzeiten problemlos zu erreichen. Auch zeigen alle gesammelten Daten, Berechnungen und Simulationen, dass das Ziel von Wartungsintervallen  $>8000$  Betriebsstunden durchaus erreicht werden kann. Das verschleißanfälligste Teil ist dabei eindeutig die Membran wobei hier noch Fortschritte durch den Einsatz anderer Materialien erreicht werden können.

Die Materialbeschaffung und Lieferzeit für Kleinmengen zu akzeptablen Preisen hat sich für den Prototypenbau als nicht zu unterschätzendes Problem erwiesen und zu erheblichen Verzögerungen geführt. Insbesondere die Verfügbarkeit des Membranmaterials hat hier anfangs Schwierigkeiten bereitet. Bei größeren Abnahmemengen ist hier ein reibungsloser Ablauf zu erwarten.

Sämtliche Komponenten des Kompressors sind überdimensioniert und hinsichtlich ihrer Belastbarkeit mit erheblichen Sicherheitszuschlägen versehen. Hier kann nach entsprechenden Dauertestläufen noch material- und kostenmäßig optimiert werden.

Nach einer ausreichend langen Erprobungszeit kann auch die Überwachungssensorik um einige Komponenten reduziert werden, so dass sich langfristig der Einsatz einer Mikrocontroller-Steuerung, beispielsweise auf Basis eines ATmega32, anbietet, der die

Kosten um einiges reduzieren würde.

Da das Hydrauliköl das einzige Medium ist, das zur Kühlung eingesetzt wird ist hier über den Einsatz eines Wärmetauschers ein einfaches Nutzen der Abwärme möglich.

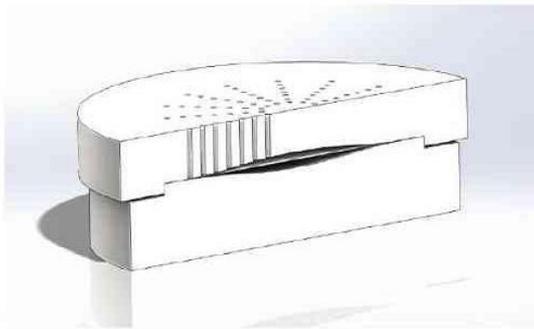
Zusammenfassend kann gesagt werden, dass durch die Vorarbeit und die damit gewonnenen Erkenntnisse das Projekt wirtschaftlich und ökologisch so interessant bleibt, dass es vom Bewilligungsempfänger in jedem Falle zum Abschluss geführt wird. Mit einer Fertigstellung und ersten Testläufen ist Ende 2013 zu rechnen.

## 6. Literaturverzeichnis

- [Kon03] KONSTRUIEREN + GIESSEN: *Anforderungen und Auswahlkriterien für Kurbelgehäuse aus Gusseisenwerkstoffen*. Zentrale für Gussverwendung-ZGV (28)2003, H 3, S. 5-11.
- [DEW11] DEUTSCHE EDELSTAHLWERKE: *Werkstoffdatenblätter 1.7225/27*. DEW 08.2011.
- [Kur06] KUREK, R.: *Nutzfahrzeug-Dieselmotoren*. Carl Hanser Verlag, München Wien. 2006.
- [Deh12] DEHNEN; M.: *Membranverdichter*. Hofer Hochdrucktechnik GmbH, Mühlheim. 2012

## 7. Anhang

### 7.1 A1 Nicht-lineare Spannungsanalyse zur Berechnung der Membranverformung



#### Beschreibung

Nicht-lineare Spannungsanalyse der Baugruppe "Zylinderbaugruppe-BG-D 300" zur Berechnung der Verformung an der Membran.

#### Simulation von Zylinderkopf-BG-D300

Analyseart: Nicht-linear - Statisch 2D-Vereinfachung

#### Inhalt

|                                |    |
|--------------------------------|----|
| Beschreibung .....             | 1  |
| Annahmen .....                 | 2  |
| Modellinformationen .....      | 3  |
| Studieneigenschaften .....     | 4  |
| Einheiten .....                | 5  |
| Materialeigenschaften .....    | 6  |
| Lasten und Einspannungen ..... | 7  |
| Kontaktinformationen .....     | 8  |
| Vernetzungsinformationen ..... | 10 |
| Resultierende Kräfte .....     | 12 |
| Studienergebnisse .....        | 13 |
| Schlussfolgerung .....         | 14 |



SOLIDWORKS

Analysiert mit SolidWorks Simulation

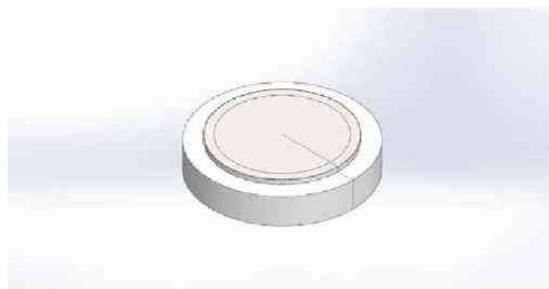
Simulation von Zylinderkopf-BG-D300 1

## Annahmen

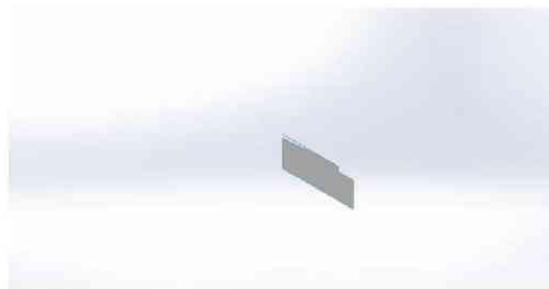
Die Baugruppenkomponente „Zylinderk\_5\_vrper-D300-DK3“ wird aus der Analyse ausgeschlossen, da sie weder für die Definition der Randbedingungen, noch für die zu erwartende Verformung notwendig ist. Um die Berechnungsdauer zu verkürzen und die Vernetzung zu vereinfachen wurde die Option 2D Vereinfachung für diese Studie verwendet. Dabei wird bei rotationssymmetrischen Modellen/Randbedingungen statt des kompletten Volumenkörpers ein Querschnitt berechnet, wie im Bild unten dargestellt.

Da das ursprünglich verwendete Material sich durch einen fehlendes Elastizitätsmodul als ungeeignet für die Analyse herausgestellt hat, wurde als Material für die Membran ein in der SolidWorks Materialdatenbank vorhandener Legierter Stahl verwendet. Die Materialkennndaten können gegebenenfalls über die SolidWorks Materialdatenbank nachgepflegt werden.

Weitere Informationen zu Annahmen und Einstellungen finden sich im Verlauf des Berichts.



Originalmodell



Modell analysiert



SOLIDWORKS

Analysiert mit SolidWorks Simulation

Simulation von Zylinderkopf-BG-D300

2

## Modellinformationen



Modellname: Zylinderkopf-BG-D300  
Aktuelle Konfiguration: Standard

| 2D-Körper                 |                  |                             |   |
|---------------------------|------------------|-----------------------------|---|
| Dokumentname und Referenz | Studientyp       | Volumetrische Eigenschaften | Dokumentpfad/Datum der Änderung   |
| Volumenk\S\vrper1         | Axialsymmetrisch | NA                          | D:\Demodaten\Ralf Hacker<br>Edelstahl\Zylinderkopf-BG-D300.SLDASM<br>Feb 21 09:58:25 2012 |
| Volumenk\S\vrper3         | Axialsymmetrisch | NA                          | D:\Demodaten\Ralf Hacker<br>Edelstahl\Zylinderkopf-BG-D300.SLDASM<br>Feb 21 09:58:25 2012 |


**SOLIDWORKS**

Analysiert mit SolidWorks Simulation

Simulation von Zylinderkopf-BG-D300

3

### Studieneigenschaften

|   |  |
|---|--|
| Studienname                                       | Studie 2   |
| Analyseart  | Nicht-linear - Statisch 2D-Vereinfachung                 |
| Vernetzungstyp                                    | Planares 2D-Netz   |
| Startzeit   | 0 Sekunden   |
| Endzeit   | 1 Sekunden   |
| Zeitinkrement                                     | Automatische Schritte                                    |
| Große Verschiebungsformel:                        | Ein  |
| Richtung der Last mit Durchbiegung aktualisieren: | Aus  |
| Große Dehnungsformel:                             | Aus  |
| Daten für Neustart der Analyse speichern          | Aus  |
| Thermische Auswirkung:                            | Ein  |
| Wärmeoption                                       | Temperaturbelastung berücksichtigen                      |
| Temperatur bei Nulldehnung                        | 298 Kelvin   |
| Solver-Typ  | Direct Sparse Solver                                     |
| Inkompatible Verbindungsoptionen                  | Genauer (langsamer)                                      |
| Steuerungsmethode:                                | Kraft  |
| Iteratives Verfahren:                             | NR (Newton-Raphson)                                      |
| Integrationsmethode                               | Newmark  |
| Ergebnisordner                                    | SolidWorks Dokument (D:\Demodaten\Ralf Hacker Edelstahl) |


**SOLIDWORKS**

Analysiert mit SolidWorks Simulation

Simulation von Zylinderkopf-BG-D300

4

---

### Einheiten

|                       |                  |
|-----------------------|------------------|
| Einheitensystem:      | SI (MKS)         |
| Länge/Verschiebung    | mm               |
| Temperatur            | Kelvin           |
| Winkelgeschwindigkeit | rad/s            |
| Druck/Spannung        | N/m <sup>2</sup> |



SOLIDWORKS

Analysiert mit SolidWorks Simulation

Simulation von Zylinderkopf-BG-D300

5

### Matereialeigenschaften

| Modellreferenz  | Eigenschaften  | Komponenten  |
|---|--|--|
|    | Name: Legierter Stahl<br>Modelltyp: Linear Elastisch<br>Isotrop<br>Standardversagenskriterium: Max. von-Mises-Spannung<br>Fließgrenze: 6.20422e+008 N/m <sup>2</sup><br>Zugfestigkeit: 7.23826e+008 N/m <sup>2</sup><br>Elastizitätsmodul: 2.1e+011 N/m <sup>2</sup><br>Poissonsche Zahl: 0.28<br>Massendichte: 7700 kg/m <sup>3</sup><br>Schubmodul: 7.9e+010 N/m <sup>2</sup><br>Wärmeausdehnungskoeffizient: 1.3e-005 /Kelvin     | Oberflächenkörper<br>1(Volumenk\S\vrper1)(Membran-D300-gerade-1)     |
| Kurvendaten:N/A   |  |  |
|  | Name: AISI Typ 316L<br>Edelstahl<br>Modelltyp: Linear Elastisch<br>Isotrop<br>Standardversagenskriterium: Max. von-Mises-Spannung<br>Fließgrenze: 1.7e+008 N/m <sup>2</sup><br>Zugfestigkeit: 4.85e+008 N/m <sup>2</sup><br>Elastizitätsmodul: 2e+011 N/m <sup>2</sup><br>Poissonsche Zahl: 0.265<br>Massendichte: 8027 kg/m <sup>3</sup><br>Schubmodul: 8.2e+010 N/m <sup>2</sup><br>Wärmeausdehnungskoeffizient: 1.65e-005 /Kelvin | Oberflächenkörper<br>1(Volumenk\S\vrper3)(Zylinderdeckel-D300-DK3-1) |
| Kurvendaten:N/A   |  |  |

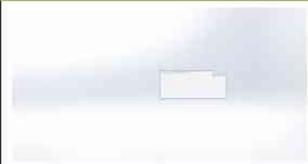

**SOLIDWORKS**

Analysiert mit SolidWorks Simulation

Simulation von Zylinderkopf-BG-D300

6

## Lasten und Einspannungen

| Einspannungsname     | Einspannungsbild  | Einspannungsdetails                             |   |              |
|----------------------|---|---|---|--------------|
| Fixiert-1            |  | Elemente: 1 Kante(n)<br>Typ: Fixierte Geometrie |   |              |
| Resultierende Kräfte |   |   |   |              |
| Komponenten          | X   | Y   | Z | Resultierend |
| Reaktionskraft(N)    | 15193.6   | 398.196   | 0 | 15198.8      |
| Reaktionsmoment(N-m) | 0   | 0   | 0 | 1e-033       |

| Lastname | Lastbild  | Lastdetails  |
|----------|---|--|
| Druck-1  |  | Elemente: 1 Kante(n)<br>Typ: Normal auf ausgewählte Fläche<br>Wert: 30<br>Einheiten: N/mm <sup>2</sup> (MPa) |

Als Lager wird die untere Fläche des Teils „Zylinderdeckel-D300-DK3“ angenommen. Die Fläche wird fixiert, d. h. sowohl rotatorische als auch translatorische Freiheitsgrade werden entfernt.

Als Last wird ein Druck von 30 N/mm<sup>2</sup> auf die obere Fläche der Membran angenommen.



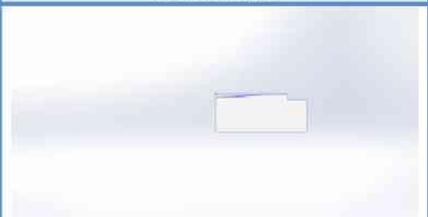
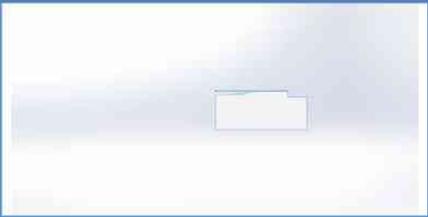
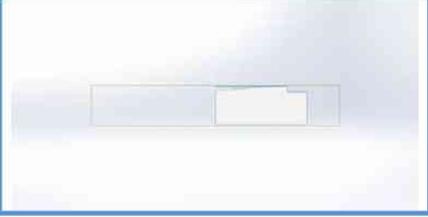
SOLIDWORKS

Analysiert mit SolidWorks Simulation

Simulation von Zylinderkopf-BG-D300

7

### Kontaktinformationen

| Kontakt                       | Kontaktbild   | Kontakteigenschaften  |   |              |
|-------------------------------|---|---|---|--------------|
| Kontaktsatz-1                 |    | Typ: Kontaktpaar<br>Keine Penetration<br>Einheiten: 3 Kante(n)<br>Erweitert: Oberfläche zu Oberfläche |   |              |
| <b>Kontakt/Reibungskräfte</b> |   |   |   |              |
| Komponenten                   | X   | Y   | Z | Resultierend |
| Kontaktkraft(N)               | 2.1748E-010   | -7.4214E-009  | 0 | 7.4246E-009  |
| Kontaktsatz-2                 |   | Typ: Verbundenes Kontaktpaar<br>Einheiten: 2 Kante(n)   |   |              |
| <b>Kontakt/Reibungskräfte</b> |   |   |   |              |
| Komponenten                   | X   | Y   | Z | Resultierend |
| Kontaktkraft(N)               | -0.015733   | 9.9056  | 0 | 9.9056       |
| Globaler Kontakt              |  | Typ: Knoten zu Knoten<br>Komponenten: 1 Komponente(n)   |   |              |

Die Kontakte werden wie folgt bestimmt:

---

Kontaktsatz 1: entspricht den Flächen der Membran und des Zylinderdeckels, die im Verlauf der Analyse miteinander in Kontakt kommen werden. Um hier eine Interferenz der Körper zu verhindern, wird die Kontaktart „Keine Penetration“ verwendet.

Kontaktsatz 2: entspricht den Flächen der Membran und des Zylinderdeckels, die während der Analyse miteinander in Kontakt bleiben. Dies entspricht der Klemmung der Membran durch die beiden Hälften des Zylinders.

Globaler Kontakt: wird definiert, um eventuell nicht berücksichtigte Kontakte zwischen Flächen zu beschreiben. Da in dieser Analyse alle Flächen bereits mit Kontaktbedingungen beschrieben sind, wird dieser Kontakt als „Frei“ definiert.



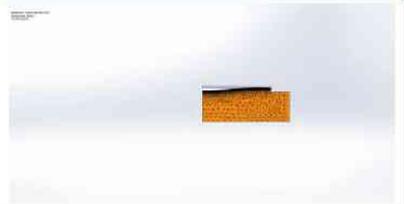
### Vernetzungsinformationen

|                             |                        |
|-----------------------------|------------------------|
| Vernetzungstyp              | Planares 2D-Netz       |
| Verwendeter Vernetzungstyp: | Kurvengestütztes Netz  |
| Maximale Elementgröße       | 10 mm                  |
| Minimale Elementgröße       | 1 mm                   |
| Vernetzungsqualität         | Entwurfsqualitäts-Netz |

### Vernetzungsinformationen - Details

|   |           |
|---|-----------|
| Gesamtknotenanzahl                                  | 41409     |
| Gesamtelementanzahl                                 | 76092     |
| Dauer bis zur Beendigung der Vernetzung (hh:mm:ss): | 00:00:10  |
| Computer-Name:                                      | DPS-10773 |

### Vernetzungssteuerungsinformationen:

| Vernetzungssteuerungsname | Vernetzungssteuerungsbild   | Vernetzungssteuerungsdetails  |
|---------------------------|---|---|
| Steuerung-1               |  | Elemente: 5 Kante(n)<br>Einheiten: mm<br>Größe: 0.05<br>Verhältnis: 1.5 |

Um eine möglichst genaue Beschreibung der Modellreaktionen zu erhalten, wird eine Vernetzungsteuerung auf alle Kontaktflächen angewandt.

### Darstellungen der Vernetzungsqualität

| Name                 | Typ  | Min. | Max. |
|----------------------|------|------|------|
| Vernetzungsqualität1 | Netz | -    | -    |

Modellname: Zylinderkopf-BG-D300  
Studienname: Studie 2  
Darstellungstyp: Netz Vernetzungsqualität1



Zylinderkopf-BG-D300-Studie 2-Vernetzungsqualität-Vernetzungsqualität1

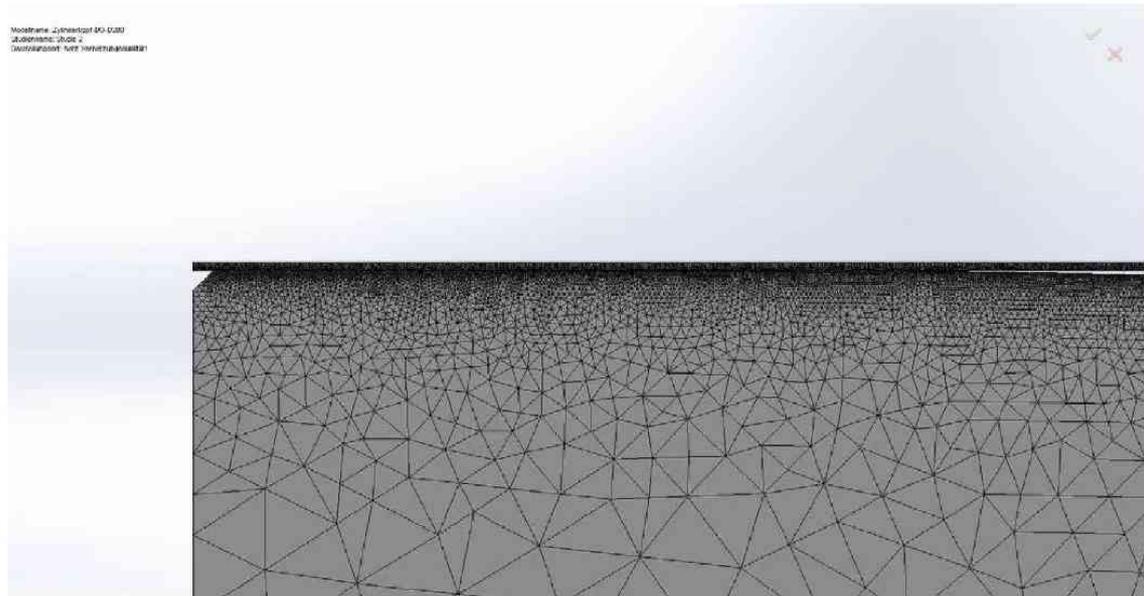


**SOLIDWORKS**

Analysiert mit SolidWorks Simulation

Simulation von Zylinderkopf-BG-D300

11



Vernetzung Detail

## Resultierende Kräfte

### Reaktionskräfte

| Auswahlsatz     | Einheiten | Summe X | Summe Y | Summe Z | Resultierend |
|-----------------|-----------|---------|---------|---------|--------------|
| Gesamtes Modell | N         | 15193.6 | 398.196 | 0       | 15198.8      |

### Reaktionsmomente

| Auswahlsatz     | Einheiten | Summe X | Summe Y | Summe Z | Resultierend |
|-----------------|-----------|---------|---------|---------|--------------|
| Gesamtes Modell | N-m       | 0       | 0       | 0       | 1e-033       |



SOLIDWORKS

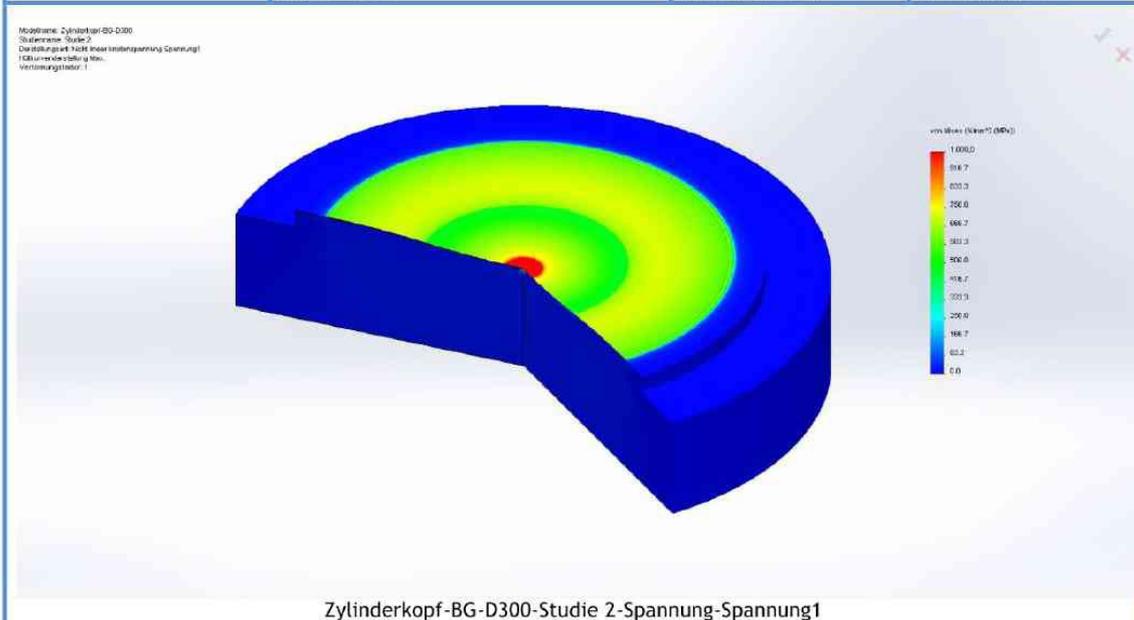
Analysiert mit SolidWorks Simulation

Simulation von Zylinderkopf-BG-D300

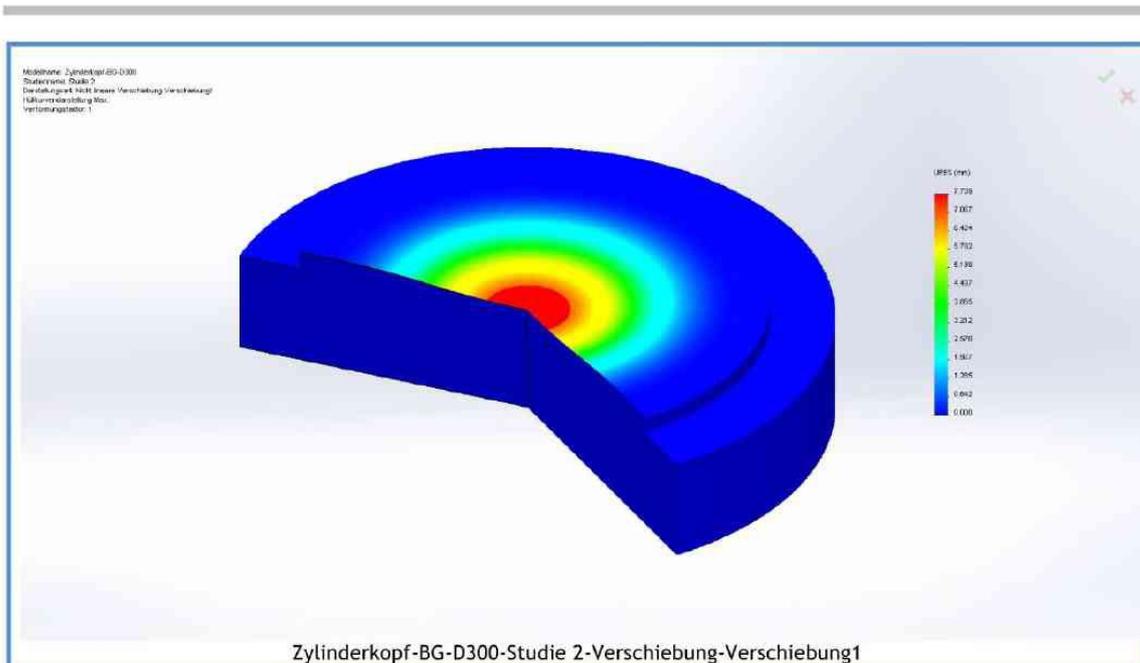
12

## Studienergebnisse

| Name      | Typ  | Min.  | Max.  |
|-----------|--|---|---|
| Spannung1 | VON: Von-Mises-Spannung von Hüllkurvendarstellung - Maximum über alle Schritte | 0.762377 N/mm <sup>2</sup> (MPa)<br>Knoten: 13784 | 875.936 N/mm <sup>2</sup> (MPa)<br>Knoten: 2250 |



| Name          | Typ   | Min.                  | Max.                    |
|---------------|---|-----------------------|-------------------------|
| Verschiebung1 | URES: Resultierende Verschiebung von Hüllkurvendarstellung - Maximum über alle Schritte | 0 mm<br>Knoten: 13778 | 7.70915 mm<br>Knoten: 2 |



### Schlussfolgerung

Die nicht-lineare Berechnung der Membranverformung ist innerhalb von ca. 20 Minuten abgeschlossen. Die Ergebnisse zeigen das exakte Anlegen der Membran an den Zylinderdeckel.



**SOLIDWORKS**

Analysiert mit SolidWorks Simulation

Simulation von Zylinderkopf-BG-D300

14

## 7.2 A2 Datenblätter Membranwerkstoff



Ausgabe 3.01 - 2006/08

### Stahl 1.4310.4

Page 1/3

| Bezeichnung        | EN     | UNS | AISI | LMSA |
|--------------------|--------|-----|------|------|
| <b>X10CrNi18-8</b> | 1.4310 | -   | 301  | D101 |

#### Chemische Zusammensetzung (Gewicht %)

| Fe   | C           | Cr          | Ni      | Si    | Mn    | P       | S       | Mo     | N       |
|------|-------------|-------------|---------|-------|-------|---------|---------|--------|---------|
| Rest | 0.05 - 0.15 | 16.0 - 19.0 | 6.0-9.5 | ≤ 2.0 | ≤ 2.0 | ≤ 0.045 | ≤ 0.015 | ≤ 0.80 | ≤ 0.110 |

Im Interesse der Homogenität und der konstanten Verarbeitungsqualität liegen die Herstellungstoleranzen in wesentlich engeren Bereichen als durch die angegebenen Normen vorgegeben.

#### Typische chemische Zusammensetzung der Lamineries MATTHEY SA 1.4310.4 (Gewicht %)

| Fe   | C    | Cr   | Ni  | Si  | Mn  |
|------|------|------|-----|-----|-----|
| Rest | 0.10 | 17.0 | 6.5 | 1.0 | 1.0 |

#### Technische Hauptmerkmale

Rostfreie austenitische Stähle haben allgemein eine eher durchschnittliche Festigkeit, die bei bestimmten Sorten durch Walzen erheblich erhöht werden kann. Der Werkstoff 1.4310, X10CrNi18-8, gehört zu diesen Sorten und ist der für Federteile am meisten verwendete rostfreier Stahl. Er kann durch Kaltverformung sehr hohe Festigkeiten erreichen. Seine austenitische Struktur ist eher instabil und die Korrosionsbeständigkeit ist geringer als z. Bsp. der 1.4435, X2CrNiMo18-14-3, 316L oder der 1.4301, X5CrNi18-10. Die mechanische Festigkeit des Stahls 1.4310, X10CrNi18-8, kann durch eine Anlassbehandlung zwischen 280 und 420 °C markant erhöht werden und kann bei höheren Kaltverformungsgraden um mehr als 250 N/mm<sup>2</sup> zunehmen. Diese Anlassbehandlung erhöht interessanterweise auch die Dauerfestigkeit.

Mit dem Werkstoff 1.4310.4 bieten die Lamineries MATTHEY SA eine Spezialausführung dessen chemische Zusammensetzung angepasst wurde um die Reaktivität beim Walzen zu erhöhen (eingeeengter Ni Gehalt zwischen 6.4 und 6.6%). Auch der Fertigungsprozess ist optimiert um allfällige Materialeinschlüsse zu vermeiden. Die austenitische Struktur ist instabil und die Erhöhung der Festigkeit erfolgt schon bei einer wesentlich schwächeren Verformung als beim normalen 1.4310. Die Legierung 1.4310.4 bietet ausserdem eine verbesserte Dauerfestigkeit sowie einen grösseren Festigkeitssprung beim Anlassen gegenüber der Standardausführung. Auf Grund dieser Sondereigenschaften wird dieses Material für anspruchsvolle Federteile wie z. Bsp. Schnappscheiben bevorzugt.

#### Übliches Sortiment

|                     |   | Dicke (mm)    | Breite (mm)  | Länge (mm) |
|---------------------|---|---------------|--------------|------------|
| <b>Walzprodukte</b> | Bänder in Rollen <sup>1)</sup>                      | 0.015 – 0.400 | 1.5 - 200.0  | -          |
|                     | Streifen, Folien in definierter Länge <sup>1)</sup> | 0.015 – 0.400 | 10.0 - 200.0 | 100 – 3000 |

1) Diese Tabelle zeigt unsere generellen Fertigungsmöglichkeiten. Andere Abmessungen verfügbar auf Anfrage. Gewisse Kombinationen von Breite und Dicke sind nicht realisierbar.

#### Mechanische Eigenschaften der Bänder

| Zustand             |            | R <sub>p0.2</sub><br>(N/mm <sup>2</sup> ) | R <sub>m</sub><br>(N/mm <sup>2</sup> ) | Härte<br>HV |
|---------------------|------------|---|--|-------------|
| C700 <sup>1)</sup>  | weich      | -   | 700 - 1000                             | 170 - 250   |
| C1000 <sup>1)</sup> | ¼ hart     | -   | 1000 - 1300                            | 310 - 410   |
| C1300 <sup>1)</sup> | ½ hart     | ≥200                                      | 1300 - 1500                            | 390 - 480   |
| C1500 <sup>1)</sup> | hart       | ≥370                                      | 1500 - 1800                            | 410 - 520   |
| C1700 <sup>1)</sup> | extra hart | ≥490                                      | 1700 - 2000                            | 450 - 630   |
| C1700 <sup>1)</sup> | Federhart  | ≥550                                      | ≥1900                                  | ≥ 580       |

1) Diese Zustände entsprechen nicht exakt der Norm EN 10151 und sollen als Richtwerte gelten.

| Bezeichnung        | EN     | UNS | AISI | LMSA |
|--------------------|--------|-----|------|------|
| <b>X10CrNi18-8</b> | 1.4310 | -   | 301  | D101 |

### Physikalische Eigenschaften

|  |                      |  |
|--|----------------------|--|
| Elastizitätsmodul, E                         | kN/mm <sup>2</sup>   | 195 <sup>1</sup>                             |
| Poisson-Konstante                            |                      | 0.29   |
| Dichte (spezifisches Gewicht)                | kg/dm <sup>3</sup>   | 7.90   |
| Schmelzpunkt / Schmelzbereich                | °C                   | 1410   |
| Wärme-Ausdehnungskoeffizient lin. (20-300°C) | 10 <sup>-6</sup> /°C | 16.8   |
| Wärmeleitfähigkeit bei 20°C                  | W/m °K               | 14.7   |
| Spezifischer elektrischer Widerstand         | μΩcm                 | 70   |
| Spezifische elektrische Leitfähigkeit        | MS/m                 | 1.5  |
| Spezifische Wärme bei 20°C                   | J/(kg K)             | 460  |
| Magnetische Eigenschaften                    |                      | Im weichen Zustand unmagnetisch <sup>2</sup> |
| Permeabilität                                |                      | μ = 1.002 - 1.004                            |

- <sup>1</sup> Der Elastizitätsmodul der Legierung 1.4310.4 hängt leicht vom Kaltverformungsgrad und daher vom Lieferzustand sowie von der Messrichtung, parallel oder quer zur Walzrichtung, ab. Parallel zur Walzrichtung gemessen, sinkt der Modul von 205 kN/mm<sup>2</sup> im weichen Zustand auf ca. 185 kN/mm<sup>2</sup> nach 40% Kaltreduktion ( $R_m$  ca. 1400-1600 N/mm<sup>2</sup>), und steigt dann wieder mit zunehmendem Verformungsgrad. Eine Entspannungsglühung wird immer zu einer Erhöhung des Elastizitätsmoduls und zu kleineren Schwankungen des Moduls in Abhängigkeit des Kaltverformungsgrades führen.
- <sup>2</sup> Die magnetische Permeabilität nimmt sehr rasch mit dem Kaltverformungsgrad und mit der Festigkeit zu. Bei der Legierung 1.4310.4, wandelt sich, wegen der hohen austenitischen Instabilität, einen wesentlichen Anteil sehr schnell zu einer α-martensitischen Struktur und die Legierung wird ferro-magnetisch ( $\mu$ , erreicht einen Wert von 6 bei einem Kaltverformungsgrad von 50%,  $R_m$  = ca. 1600 N/mm<sup>2</sup>).

### Anwendungsbeispiele

Der rostfreie Stahl 1.4310.4 wird oft für Federteile und anspruchsvolle Produkte die eine hohe Ermüdungsgrenze verlangen eingesetzt wie z. Bsp. Schnappscheiben, Schalterwippen, Uhrenteile, usw.

|                                | EN     | UNS | AISI | LMSA |
|--------------------------------|--------|-----|------|------|
| <b>Bezeichnung</b> X10CrNi18-8 | 1.4310 | -   | 301  | D101 |

**Abmessungstoleranzen**

| Dicke | Dicke (mm) |       | Lamineries MATTHEY SA |                |             |
|-------|------------|-------|-----------------------|----------------|-------------|
|       | ≥          | <     | LMSA Normal           | LMSA Präzision | LMSA Extrem |
|       |            | 0.025 | -                     | -              | -           |
|       | 0.025      | 0.050 | ± 0.003               | ± 0.002        | ± 0.0015    |
|       | 0.050      | 0.065 | ± 0.004               | ± 0.003        | ± 0.002     |
|       | 0.065      | 0.100 | ± 0.006               | ± 0.004        | ± 0.003     |
|       | 0.100      | 0.125 | ± 0.008               | ± 0.006        | ± 0.003     |
|       | 0.125      | 0.150 | ± 0.008               | ± 0.006        | ± 0.004     |
|       | 0.150      | 0.250 | ± 0.010               | ± 0.008        | ± 0.004     |
|       | 0.250      | 0.300 | ± 0.012               | ± 0.008        | ± 0.005     |
|       | 0.300      | 0.400 | ± 0.012               | ± 0.009        | ± 0.005     |
|       | 0.400      | 0.500 | ± 0.015               | ± 0.010        | ± 0.006     |
|       | 0.500      | 0.600 | ± 0.020               | ± 0.012        | ± 0.007     |
|       | 0.600      | 0.800 | ± 0.020               | ± 0.014        | ± 0.007     |
|       | 0.800      | 1.000 | ± 0.025               | ± 0.015        | ± 0.009     |
|       | 1.000      | 1.200 | ± 0.025               | ± 0.018        | ± 0.012     |
|       | 1.200      | 1.250 | ± 0.030               | ± 0.020        | ± 0.012     |
|       | 1.250      | 1.500 | ± 0.035               | ± 0.025        | ± 0.014     |

Unsere Toleranz "Normal" entspricht den am engsten vorgegebenen Abmessungen (Präzisionsabmassen) der europäischen Normen.

Unsere Toleranz "Präzision" und "Extrem" sind auf Anfrage erhältlich.

**Breite** Unsere Standardbreitentoleranz ist + 0.2 -0.0 (oder ± 0.1 mm auf Anfrage) und gilt für alle längsgeteilten Bänder mit Breiten < 125 mm und Dicken < 1.00 mm. Spezielle Toleranzen erhältlich auf Anfrage.

| Säbelförmigkeit   | Breite (mm) |     | maximale Säbelförmigkeit (mm/m) |          |             |          |
|---|-------------|-----|---------------------------------|----------|-------------|----------|
|   | >           | ≤   | LMSA Normal                     |          | LMSA Extrem |          |
|   |             |     | ≤ 0.5 mm                        | > 0.5 mm | ≤ 0.5 mm    | > 0.5 mm |
| Unsere Toleranz "normal" entspricht der EN Norm 1654 (Messlänge von 1000 mm). Andere spezifische Toleranzen erhältlich auf Anfrage. | 3           | 6   | 12                              | -        | 6           | -        |
|   | 6           | 10  | 8                               | 10       | 4           | 5        |
|   | 10          | 20  | 4                               | 6        | 2           | 3        |
|   | 20          | 250 | 2                               | 3        | 1           | 1.5      |

**Oberfläche** Besondere Oberflächengüten erhältlich auf Anfrage.

**Planheit** Besondere Planheitsanforderungen auf Anfrage.

| Bezeichnung  | DIN    | EN Nr. | UNS (ASTM) | AISI | LMSA      |
|--------------|--------|--------|------------|------|-----------|
| <b>CuBe2</b> | 2.1247 | CW101C | C17200     | -    | A100 G200 |

**Chemische Zusammensetzung (Gewicht %)**

| Cu*  | Be          | Co + Ni   | Co + Ni + Fe | Pb         |
|------|-------------|-----------|--------------|------------|
| Rest | 1.80 - 2.00 | 0.2% min. | 0.6% max.    | 0.02% max. |

\* Andere Spurenelemente sind möglicherweise vorhanden. Cu + Be + Co + Ni + Fe > 99.5%

Im Interesse der Homogenität und der konstanten Verarbeitungsqualität liegen die Herstellungstoleranzen in wesentlich engeren Bereichen als jene der hier angegebenen Norm.

**Technische Hauptmerkmale**

Die Legierung Brush 25 erreicht die höchste Festigkeit und Härte aller gängigen Kupferlegierungen nach dem Aushärten und findet daher breite Verwendung. Brush 25 ist im lösungsgeglühten oder im lösungsgeglühten und kaltverformten Zustand lieferbar. In den Zuständen A, ¼H und ½H ist sie gut verformbar. Nach der Aushärtung der Teile erreicht die Härte Werte von über 430 HV ( $R_m > 1400 \text{ N/mm}^2$ ). Die Legierung Brush 25 bietet auch eine sehr hohe Ermüdungsgrenze, eine gute thermische Relaxationsbeständigkeit und eine einmalige Kombination von mechanischen Eigenschaften und Leitfähigkeit.

**Übliches Sortiment**

|                     |  | Dicke (mm)    | Breite (mm)  | Länge (mm) |
|---------------------|--|---------------|--------------|------------|
| <b>Walzprodukte</b> | Bänder in Rollen <sup>1)</sup>                         | 0.005 - 2.000 | 1.5 - 200.0  | -          |
|                     | Streifen und Folien in definierter Länge <sup>1)</sup> | 0.015 - 1.500 | 10.0 - 200.0 | 100 - 3000 |
| <b>Ziehprodukte</b> | Stangen und Drähte <sup>2)</sup>                       | auf Anfrage   |              |            |

1) Diese Tabelle zeigt unsere generellen Fertigungsmöglichkeiten. Andere Abmessungen verfügbar auf Anfrage. Gewisse Kombinationen von Breite und Dicke sind nicht realisierbar.

2) Die Legierung Brush 25 ist nicht für Anwendungen die eine hohe Bearbeitbarkeit erfordern bestimmt. Für die Herstellung von Drehteilen wird die bleihaltige Legierung M25, CuBe2Pb, empfohlen.

**Mechanische Eigenschaften der Bänder**

| Zustand         |      |      |                | Wärmebehandlung | Rp <sub>0.2%</sub> (N/mm <sup>2</sup> ) | Rm (N/mm <sup>2</sup> ) | A <sub>50mm</sub> (%) | HV      | R/t (90°) T/L <sup>2)</sup> |
|-----------------|------|------|----------------|-----------------|---|-------------------------|-----------------------|---------|-----------------------------|
| A               | R410 | H090 | Weich          | -/-             | 190-380                                 | 410-540                 | 35-60                 | 90-150  | 0.0/0.0                     |
| A <sup>1)</sup> | R430 | H100 | leicht gewalzt | -/-             | 210-380                                 | 430-560                 | 35-60                 | 100-150 | 0.0/0.0                     |
| ¼ H             | R510 | H130 | ¼ hart         | -/-             | 420-560                                 | 510-610                 | 15-35                 | 120-180 | 0.0/0.0                     |
| ½ H             | R580 | H180 | ½ hart         | -/-             | 530-660                                 | 580-690                 | 8-25                  | 180-215 | 0.5/1.0                     |
| H               | R680 | H215 | hart           | -/-             | 650-800                                 | 680-830                 | 2-8                   | 215-250 | 1.0/2.9                     |
| H+              | R800 | H240 | Federhart      | -/-             | ≥ 750                                   | ≥ 800                   | -/-                   | ≥240    | -/-                         |

Nach dem Aushärten (beim Kunden)

|      |       |      |                     |            |           |           |      |         |     |
|------|-------|------|---------------------|------------|-----------|-----------|------|---------|-----|
| AT   | R1130 | H350 | weich + ausgehärtet | 3h / 315°C | 960-1210  | 1130-1350 | 10-3 | 350-410 | -/- |
| ¼ HT | R1190 | H360 | ¼ hart + ausgehärt. | 2h / 315°C | 1050-1300 | 1190-1420 | 6-3  | 360-430 | -/- |
| ½ HT | R1270 | H370 | ½ hart + ausgehärt. | 2h / 315°C | 1100-1350 | 1270-1490 | 5-1  | 370-440 | -/- |
| HT   | R1310 | H380 | hart + ausgehärtet  | 2h / 315°C | 1150-1420 | 1310-1520 | 3-1  | 380-450 | -/- |

1) Der Zustand "leicht gewalzt" ist in der EN-Norm nicht definiert. Dieser Zustand entspricht weich gegläht und leicht nachgewalzt, und bietet eine verbesserte Oberflächenqualität.

2) Minimale Biegebarkeit für 90° Biegung. R = Biegeradius, t = Banddicke, T = Biegung quer zur Walzrichtung, "Good Way" und L = Biegung parallel zur Walzrichtung, "Bad Way".

Bezeichnung **CuBe2** 2.1247 CW101C C17200 - A100 G200

### Mechanische Eigenschaften der Stangen und Drähte

| Stangen         | Zustand |      |              | Wärme-<br>behandlung | Rp <sub>0,2</sub><br>(N/mm <sup>2</sup> ) | Rm<br>(N/mm <sup>2</sup> ) | A <sub>50mm</sub><br>(%) | Hv<br>(N/mm <sup>2</sup> ) |
|-----------------|---------|------|--------------|----------------------|---|----------------------------|--------------------------|----------------------------|
| A <sup>1)</sup> | R420    | H090 | weich        | -                    | 140-210                                   | 420-600                    | ≥ 35                     | 90-180                     |
| H <sup>1)</sup> | R600    | H200 | hart gezogen | -                    | 500-750                                   | 600-800                    | ≥ 10                     | 200-250                    |

Nach dem Aushärten (beim Kunden)

|                  |       |      |                     |            |           |           |   |         |
|------------------|-------|------|---------------------|------------|-----------|-----------|---|---------|
| AT <sup>1)</sup> | R1150 | H360 | weich + ausgehärtet | 3h / 325°C | 1000-1250 | 1150-1350 | 3 | 360-390 |
| HT <sup>1)</sup> | R1300 | H390 | hart + ausgehärtet  | 2h / 325°C | 1150-1400 | 1300-1500 | 2 | 390-430 |

1) Diese Werte entsprechen nicht exakt der EN-Norm.  
Die Angaben gelten für Durchmesser < 25 mm

| Drähte           | Zustand |      |        | Wärme-<br>behandlung | Rp <sub>0,2</sub><br>(N/mm <sup>2</sup> ) | Rm<br>(N/mm <sup>2</sup> ) | A <sub>50mm</sub><br>(%) | Hv<br>(N/mm <sup>2</sup> ) |
|------------------|---------|------|--------|----------------------|---|----------------------------|--------------------------|----------------------------|
| A <sup>1)</sup>  | R400    | H090 | weich  | -                    | 130-210                                   | 400-540                    | ≥ 30                     | 90-170                     |
| ¼H <sup>1)</sup> | R620    | H200 | ¼ hart | -                    | 510-730                                   | 620-800                    | ≥ 3                      | 200-250                    |
| ½H <sup>1)</sup> | R750    | H230 | ½ hart | -                    | 620-870                                   | 750-940                    | ≥ 2                      | 230-300                    |
| ¾H <sup>1)</sup> | R890    | H270 | ¾ hart | -                    | 790-1040                                  | 890-1070                   | ≥ 2                      | 270-340                    |
| H <sup>1)</sup>  | R960    | H300 | hart   | -                    | 890-1110                                  | 960-1140                   | ≥ 1                      | 300-360                    |

Nach dem Aushärten (beim Kunden)

|                   |       |      |                     |            |           |           |     |         |
|-------------------|-------|------|---------------------|------------|-----------|-----------|-----|---------|
| AT <sup>1)</sup>  | R1100 | H340 | weich + ausgehärtet | 3h / 325°C | 990-1250  | 1100-1380 | ≥ 3 | 340-430 |
| ¼HT <sup>1)</sup> | R1200 | H370 | ¼ hart + ausgehärt. | 2h / 325°C | 1130-1380 | 1200-1450 | ≥ 2 | 370-460 |
| ½HT <sup>1)</sup> | R1270 | H390 | ½ hart + ausgehärt. | 2h / 325°C | 1170-1450 | 1270-1490 | ≥ 2 | 390-470 |
| ¾HT <sup>1)</sup> | R1310 | H410 | ¾ hart + ausgehärt. | 2h / 325°C | 1200-1520 | 1310-1590 | ≥ 2 | 410-500 |
| HT <sup>1)</sup>  | R1340 | H420 | hart + ausgehärtet  | 2h / 325°C | 1240-1520 | 1340-1590 | ≥ 1 | 420-500 |

1) Diese Werte entsprechen nicht exakt der EN-Norm, folgen aber der Norm ASTM 197M.

### Physikalische Eigenschaften

|  |                      |   |
|--|----------------------|---|
| Elastizitätsmodul, E                         | kN/mm <sup>2</sup>   | 125 - 131 (beziehungsweise vor oder nach Aushärtung)    |
| Poisson-Konstante                            |                      | 0.285   |
| Dichte (spezifisches Gewicht)                | kg/dm <sup>3</sup>   | 8.25 - 8.36 (beziehungsweise vor oder nach Aushärtung)  |
| Schmelzpunkt / Schmelzbereich                | °C                   | 875 - 985   |
| Wärme-Ausdehnungskoeffizient lin. (20-300°C) | 10 <sup>-6</sup> /°C | 17  |
| Wärmeleitfähigkeit bei 20°C                  | W/m °K               | 110   |
| Spezifischer elektrischer Widerstand         | μΩcm                 | 11-9, 8-6 (beziehungsweise vor oder nach Aushärtung)    |
| Spezifische elektrische Leitfähigkeit        | MS/m                 | 9-11, 13-16 (beziehungsweise vor oder nach Aushärtung)  |
| Spezifische elektrische Leitfähigkeit        | % IACS               | 15-19, 22-28 (beziehungsweise vor oder nach Aushärtung) |
| Magnetische Eigenschaften                    |                      | unmagnetisch (in der Regel leicht paramagnetisch)       |
| Permeabilität                                |                      | μ = 1.0006  |

### Anwendungsbeispiele

Federkontakte für Steckverbinder, Clips und Schalter, Membrane, Bälge, Anschlussklemmen, verschiedene Teile für die Uhrenindustrie wie: Uhrzeiger, Räder, Unruhen, usw.

| Bezeichnung  | DIN    | EN Nr. | UNS (ASTM) | AISI | LMSA      |
|--------------|--------|--------|------------|------|-----------|
| <b>CuBe2</b> | 2.1247 | CW101C | C17200     | -    | A100 G200 |

**Abmessungstoleranzen der Bänder**

| Dicke   | Dicke (mm) |         | EN Norm            |                    | Lamineries MATTHEY SA |                   |                |
|---|------------|---------|--------------------|--------------------|-----------------------|-------------------|----------------|
|   | ≥          | <       | 10140<br>Präzision | 10258<br>Präzision | LMSA<br>Normal        | LMSA<br>Präzision | LMSA<br>Extrem |
| Unsere Toleranz "LMSA Normal" entspricht der in den europäischen Normen vorgegebenen engsten Toleranzklasse (Präzisionsabmassen).<br><br>Unsere Toleranzen "LMSA Präzision" und "LMSA Extrem" sind auf Anfrage erhältlich.. | 0.025      | 0.025   | -                  | -                  | -                     | -                 | ± 0.001        |
|   | 0.025      | 0.050   | -                  | -                  | ± 0.003               | ± 0.002           | ± 0.0015       |
|   | 0.050      | 0.065   | -                  | ± 0.003            | ± 0.003               | ± 0.0025          | ± 0.002        |
|   | 0.065      | 0.100   | -                  | ± 0.004            | ± 0.004               | ± 0.0035          | ± 0.003        |
|   | 0.100      | 0.125   | ± 0.005            | ± 0.006            | ± 0.005               | ± 0.004           | ± 0.003        |
|   | 0.125      | 0.150   | ± 0.005            | ± 0.006            | ± 0.005               | ± 0.005           | ± 0.004        |
|   | 0.150      | 0.250   | ± 0.010            | ± 0.008            | ± 0.008               | ± 0.006           | ± 0.004        |
|   | 0.250      | 0.300   | ± 0.010            | ± 0.009            | ± 0.009               | ± 0.007           | ± 0.005        |
|   | 0.300      | 0.400   | ± 0.010            | ± 0.010            | ± 0.010               | ± 0.007           | ± 0.005        |
|   | 0.400      | 0.500   | ± 0.015            | ± 0.012            | ± 0.012               | ± 0.008           | ± 0.006        |
|   | 0.500      | 0.600   | ± 0.015            | ± 0.014            | ± 0.014               | ± 0.010           | ± 0.007        |
|   | 0.600      | 0.800   | ± 0.015            | ± 0.015            | ± 0.015               | ± 0.010           | ± 0.007        |
|   | 0.800      | 1.000   | ± 0.015            | ± 0.018            | ± 0.018               | ± 0.012           | ± 0.009        |
|   | 1.000      | 1.200   | ± 0.020            | ± 0.020            | ± 0.020               | ± 0.015           | ± 0.0012       |
| 1.200   | 1.250      | ± 0.020 | ± 0.020            | ± 0.020            | ± 0.015               | ± 0.0012          |                |
| 1.250   | 1.500      | ± 0.020 | ± 0.020            | ± 0.020            | ± 0.015               | ± 0.0014          |                |

**Breite** Unsere Standardbreitentoleranz ist + 0.2 -0.0 (oder ± 0.1 mm auf Anfrage) und gilt für alle längsgeteilten Bänder mit Breiten < 125 mm und Dicken < 1.00 mm. Spezielle Toleranzen erhältlich auf Anfrage.

| Säbelförmigkeit  | Breite (mm) |     | maximale Säbelförmigkeit (mm/m) |          |             |          |
|--|-------------|-----|---------------------------------|----------|-------------|----------|
|  | >           | ≤   | LMSA Normal                     |          | LMSA Extrem |          |
|  |             |     | ≤ 0.5 mm                        | > 0.5 mm | ≤ 0.5 mm    | > 0.5 mm |
| Unsere Toleranz "LMSA Normal" entspricht der EN Norm 1654 (Messlänge von 1000 mm). Andere spezifische Toleranzen erhältlich auf Anfrage. | 3           | 6   | 12                              | -        | 6           | -        |
|  | 6           | 10  | 8                               | 10       | 4           | 5        |
|  | 10          | 20  | 4                               | 6        | 2           | 3        |
|  | 20          | 250 | 2                               | 3        | 1           | 1.5      |

**Oberfläche** Besondere Oberflächengüten erhältlich auf Anfrage.

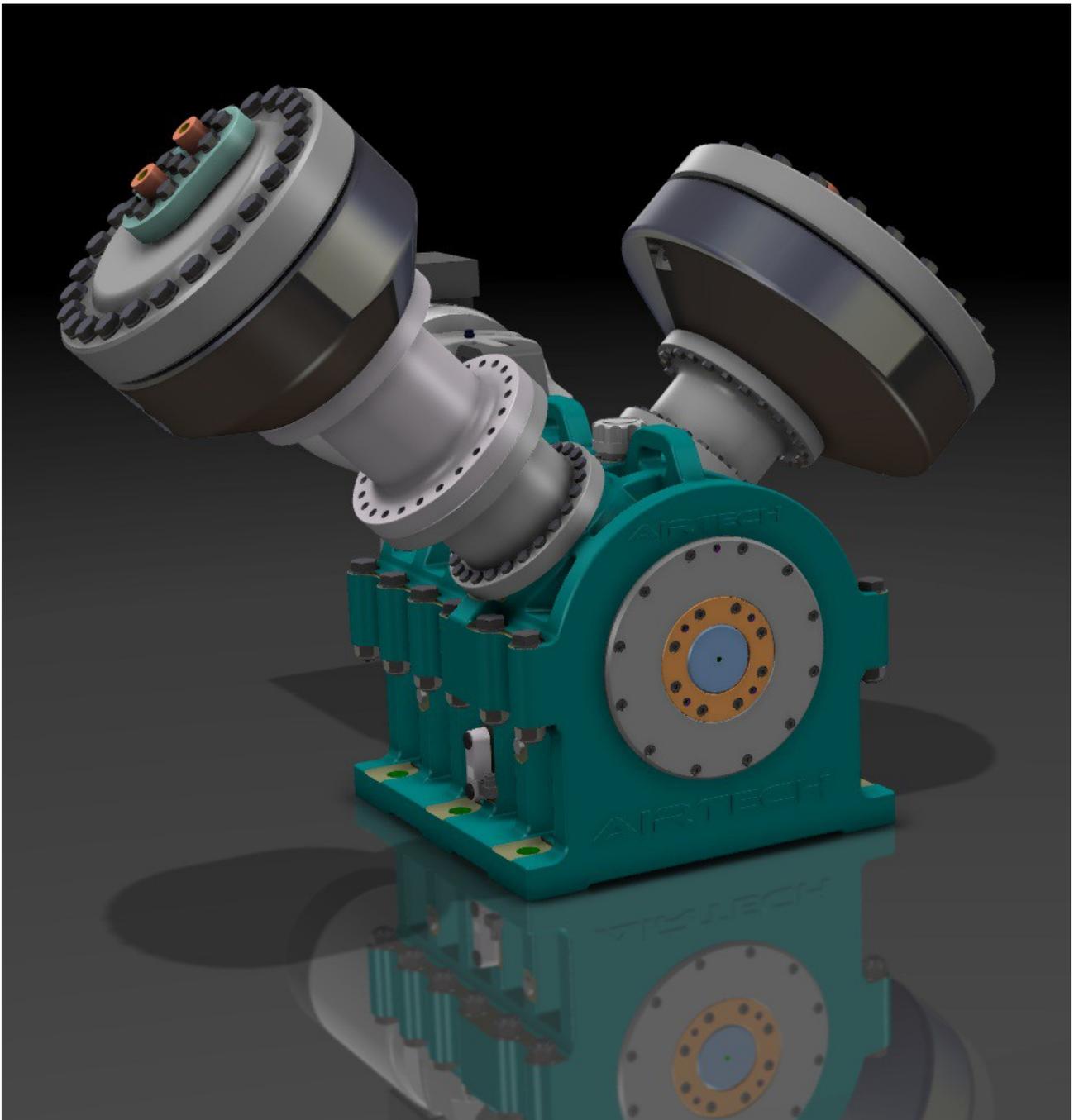
**Planheit** Besondere Planheitsanforderungen auf Anfrage.

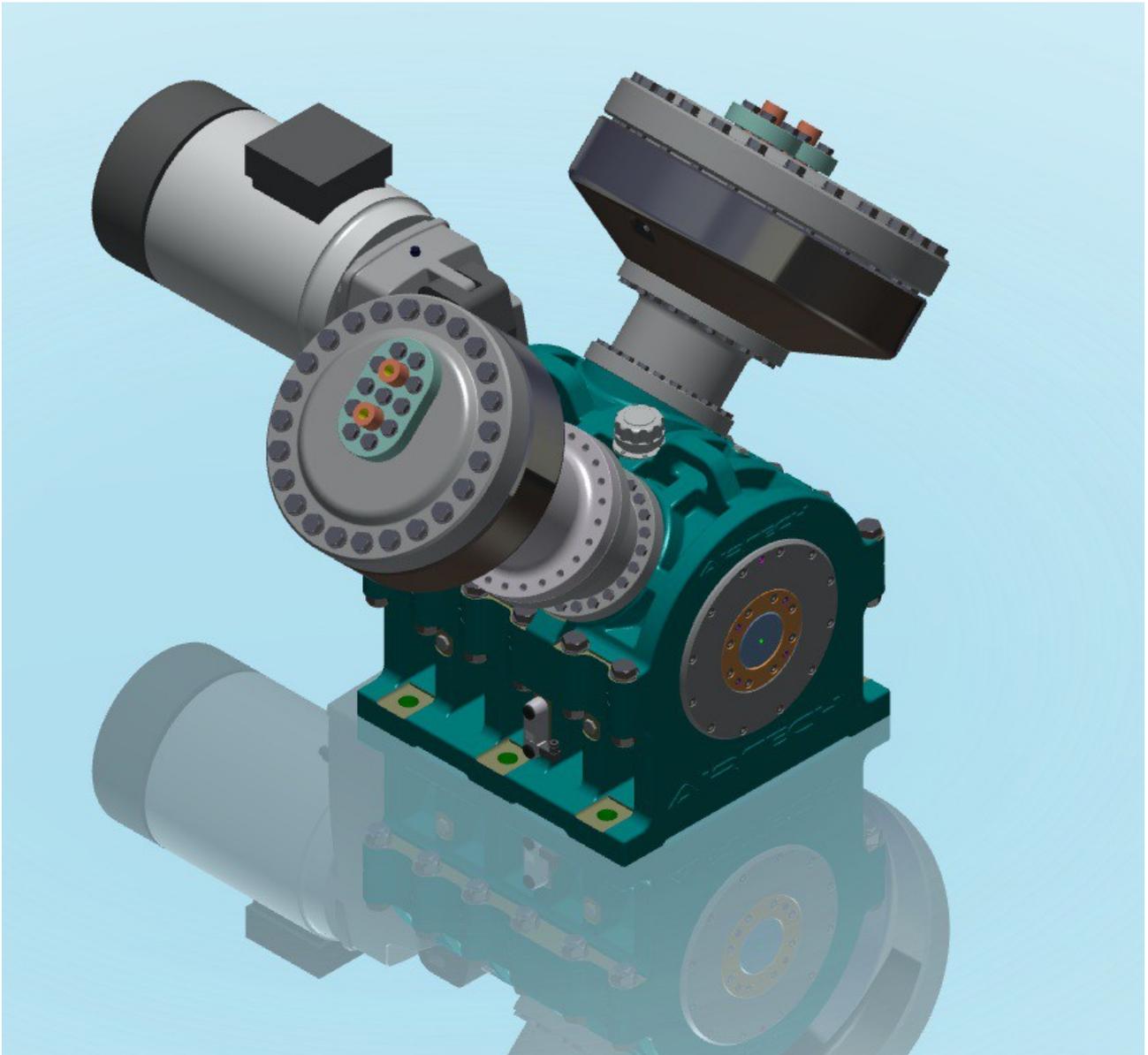
**Abmessungstoleranzen der Stangen und Drähte**

| Durchmesser   | Normale Toleranzen  |    |               | Spezifische Toleranzen  |
|---|---|----|---------------|---|
|   |   |    |               |   |
| <b>Durchmesser</b><br><br>Ungeschliffene, werkstoffvergütete Stangen werden mit h9 oder h10 Toleranzen geliefert (je nach Durchmesser). | ≤ 3.0mm   | h8 | + 0 / - 14 µm | Auf Anfrage sind geschliffene Stangen und speziell gezogene Drähte mit geringeren Toleranzen verfügbar. |
|   | > 3.0 et ≤ 6.0mm  | h8 | + 0 / - 18 µm |   |
|   | > 10.0 et ≤ 10.5mm  | h8 | + 0 / - 22 µm |   |
|   | > 10.5 et ≤ 18.0mm  | h9 | + 0 / - 43 µm |   |
|   | > 18.0 et ≤ 30.0mm  | h9 | + 0 / - 52 µm |   |
| <b>Ovalisierung</b>   | Maximum die Hälfte der Durchmesser-toleranz.. Wir stehen unseren Kunden zur Verfügung, um die Machbarkeit spezieller Toleranzen zu untersuchen. |    |               |   |
| <b>Länge</b>  | Im Allgemeinen liefern wir 3-Meter Stangen. Diese können angespitzt und angefast bestellt werden.   |    |               |   |

## 7.2

## A3 Abbildungen

*Bild 14*



*Bild 15*

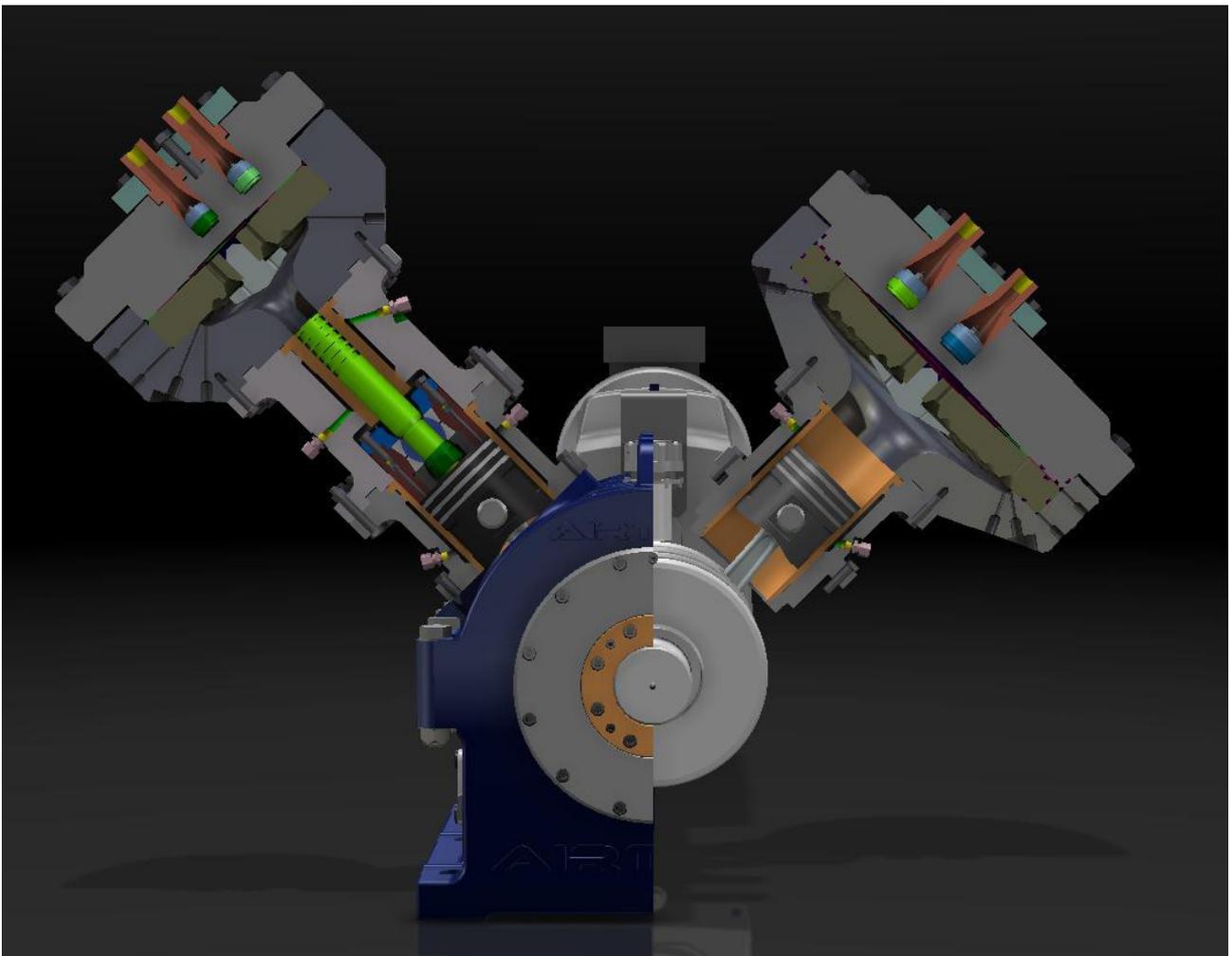


Bild 16

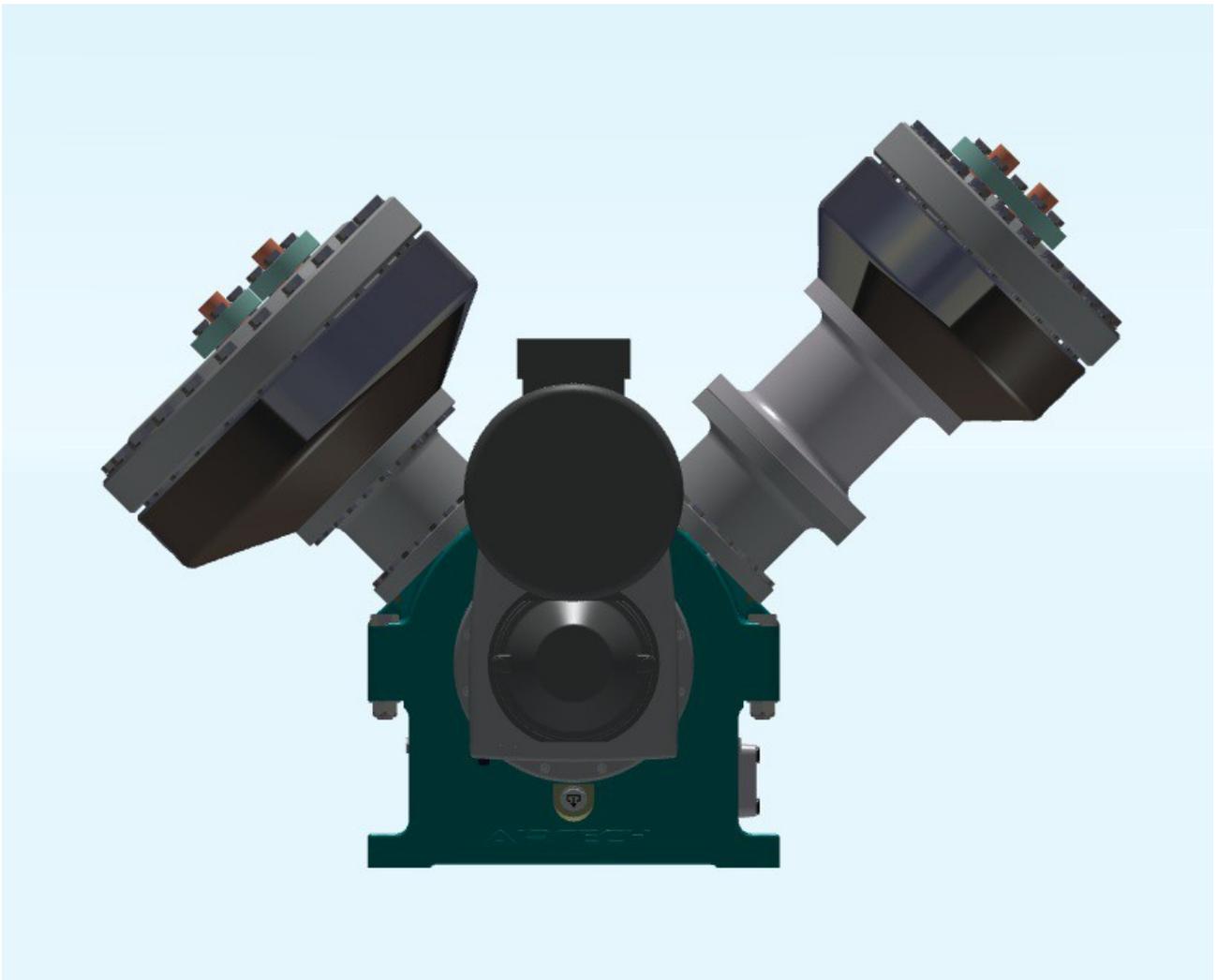


Bild 17

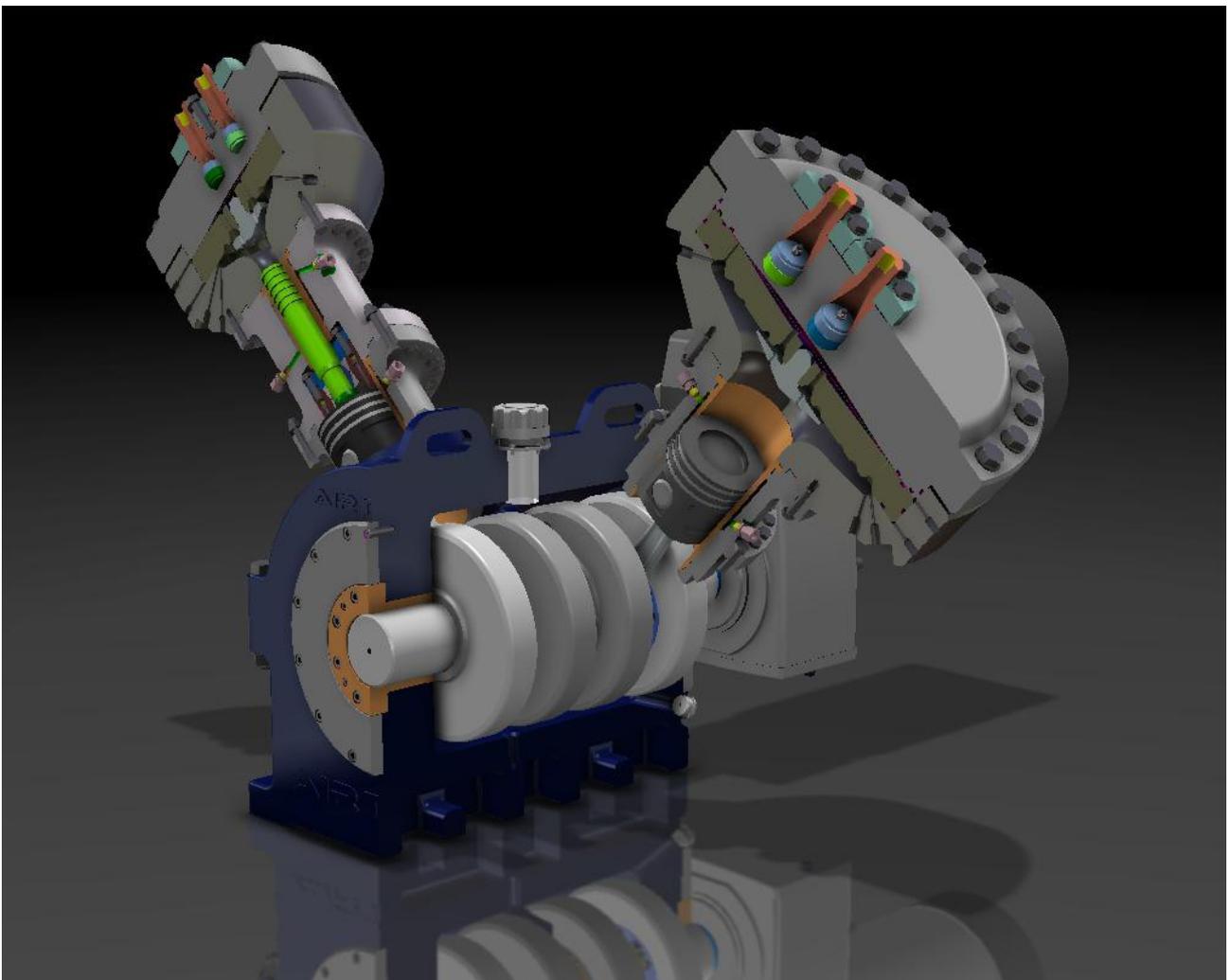


Bild 18

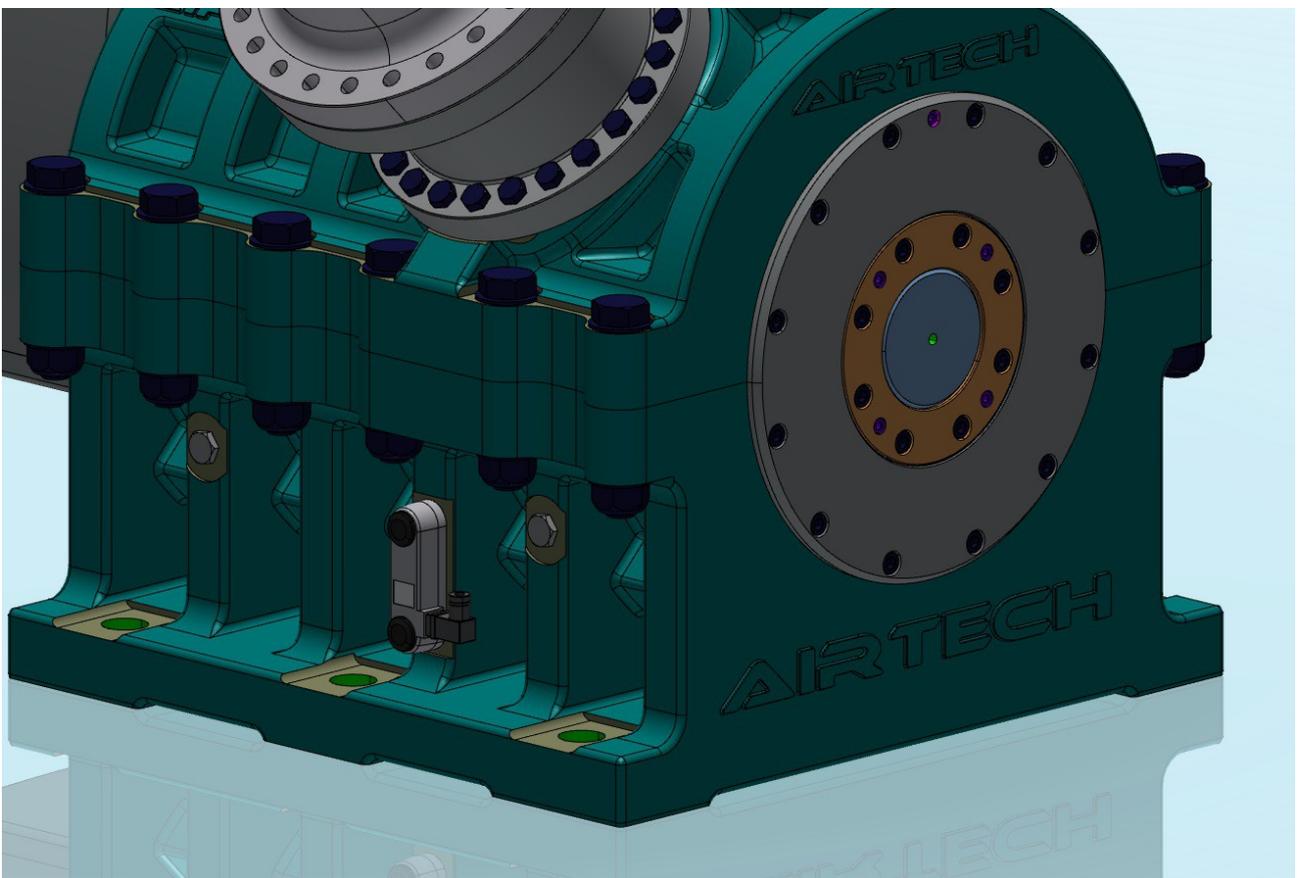


Bild 19