

# Stirling-Kühler für kryoelektronische Bauelemente

## Ideal zur Kühlung der neuen Supraleiter/Von Christoph Heiden

Bauelemente der Halbleiterelektronik wie z. B. Feldeffekt-Transistoren oder Photodioden können in ihren elektrischen Daten durch Kühlung zum Teil drastisch verbessert werden. Bauelemente der Supraleiterelektronik besitzen exzeptionelle Eigenschaften. So können auf der Basis des Josephsoneffekts Sensoren mit der höchsten Empfindlichkeit für elektromagnetische Signale hergestellt werden. Auch sie benötigen für ihren Betrieb die Abkühlung auf hinreichend niedrigere Temperaturen. Zur Kühlung derartiger kryoelektronischer Bauelemente und Sensoren wurde eine Stirling-Gaskältemaschine kleiner Leistung entwickelt. Besonderes Gewicht wurde dabei auf gute Langlaufeigenschaften sowie einen geringen Eigenstörpegel gelegt. Die mit dem Kleinkühler erzielbaren Temperaturen hinab bis zu  $-250\text{ }^{\circ}\text{C}$  reichen aus, um ihn für empfindliche Sensoren wie z. B. Supraleitende Quanten Interferenz Detektoren (SQUIDs) aus den neuen oxidkeramischen Supraleitern interessant zu machen.

### Kryoelektronische Bauteile und ihre Kühlung

Die normale Halbleiterelektronik, wie sie heute üblich ist, wird in einem Temperaturbereich eingesetzt, der sich von ca.  $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$  bis über  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$  erstreckt. Die untere Temperaturgrenze ist dabei u. a. durch die Forderung gegeben, daß bei üblichen Flughöhen von Jets Außentemperaturen um  $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$  herrschen, und elektrische Schalteinheiten bei diesen Temperaturen noch funktionieren müssen. Von Kryoelektronik spricht man nicht ganz ohne Willkür, wenn die entsprechenden Bauelemente bei Temperaturen unterhalb etwa 100 Kelvin (K), d. h.  $-173\text{ }^{\circ}\text{C}$  eingesetzt werden. Das sind Temperaturen, bei denen Gase wie Stickstoff, Sauerstoff oder Argon in den flüssigen Zustand übergeführt und somit als Kühlmittel (Kryogen) verwendet werden können. Noch tiefer siedende Kryogene sind Neon (Siedepunkt bei 27,1 K), Wasserstoff (20,4 K) und Helium (4,2 K).

Kryoelektronische Bauelemente umfassen u. a. Halbleiterdetektoren für elektromagnetische Strahlung (Röntgenstrahlung bis Infrarot-, d. h. Wärmestrahlung), gekühlte Transistoren zur Reduktion des Eigenrauschens, sowie Bauelemente der Supraleiter-Elektronik. Bei letzterem sind vor allem höchstempfindliche Sensoren auf der Basis des Josephsoneffekts zu nennen, wobei die SQUIDs (Supraleitende Quanten-Interferenz-Detektoren) als die Sensoren mit der derzeit höchsten Empfindlichkeit für magnetische Signale eine besondere Rolle spielen. Genannt seien in diesem Zusammenhang auch die sog. SIS-Mischer, welche extrem rauscharm hochfrequente Signale empfangen können und heute bereits in der Radioastronomie eingesetzt werden.

Die Kühlung solcher höchstempfindlichen Bauelemente muß naturgemäß in einer Weise erfolgen, bei der der Kühlprozeß keine störenden Nebensignale erzeugt. Eine bewährte Methode ist dabei die Verwendung von Kryostatens mit geeigneten Kryogenen wie flüssigem Stickstoff oder flüssigem Helium.

Ein Nachteil entsteht hierbei durch die Notwendigkeit, das verdampfende Kryogen immer wieder zu ersetzen, was insbesondere bei den niedrigsiedenden Gasen wie Helium und Wasserstoff durchaus noch eine Barriere für einen weiterverbreiteten Einsatz darstellt. Es bestand daher schon seit längerem der Wunsch, ohne verflüssigte Gase auszukommen. Das geht im Prinzip mit geeigneten Kältemaschinen. Geeignet heißt: Diese Maschinen müssen „ruhig“ sein, d. h. einen nur geringen elektromagnetischen und mechanischen Eigenstörpegel aufweisen, und sie müssen „wirtschaftlich“ sein, d. h. sie sollten bei geringer Verlustleistung eine lange Lebensdauer besitzen, dabei wartungsarm sowie einfach zu bedienen sein. Die Kühlleistung kann wegen der in der Regel sehr niedrigen Wärmeentwicklung der kryoelektronischen Bauelemente niedrig sein.

### Gaskältemaschinen

Kältemaschinen werden seit langem auf der Basis von sog. thermodynamischen Kreisprozessen realisiert. Dabei wird ein geeignetes Gas von einem Kompressor komprimiert, gelangt dann über einen Wärmetauscher in einen Expansionsraum, in dem es sich ausdehnen kann. Dabei kühlt es sich ab und entzieht seiner Umgebung Wärme ( $-Q$ ). Beim Rückströmen des Gases in den Kompressor wird diese Wärme mitgenommen und nach außen abgegeben, d. h. aus dem sich abkühlenden Expansionsvolumen wird die Wärme in wärmere Zonen befördert (Wärmepumpe), wofür die Kompressorleistung  $W$  benötigt wird. Der Wärmetauscher dient nur der thermischen Isolierung zwischen kaltem Expansionsraum und warmem Kompressor. Er ist ein Zwischenspeicher, der dem komprimierten warmen

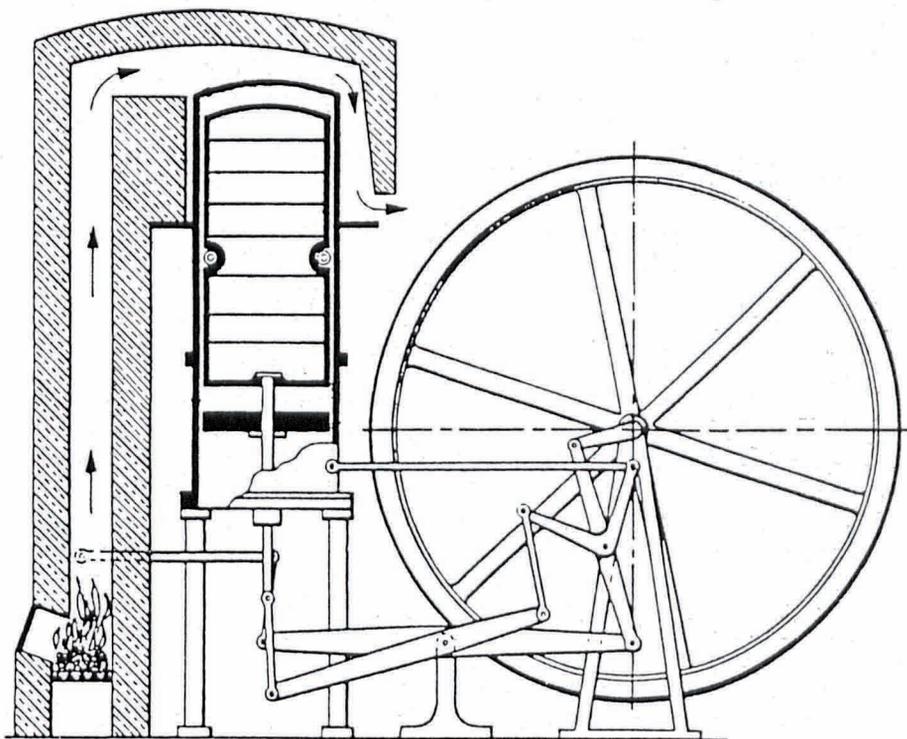


Abb. 2: Zeichnung der ersten Stirlingmaschine. Sie wurde als Wärmekraftmaschine (Motor) von Robert Stirling bereits im Jahre 1816 erfunden. Kühlung erfolgt, wenn eine derartige Maschine im umgekehrten Drehsinn angetrieben wird.

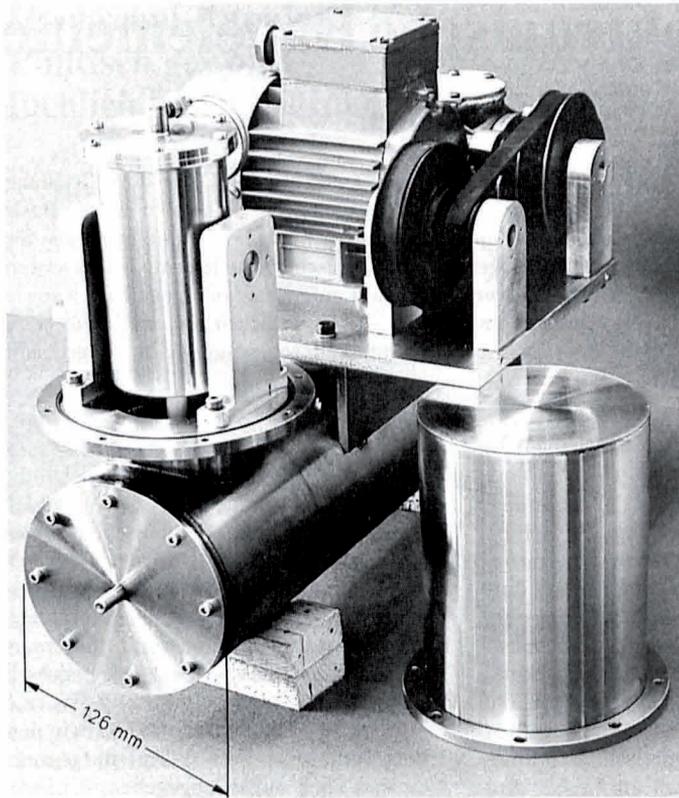


Abb. 4: Ansicht des Kompressors mit abgenommenem „Dom“ des Kompressorgehäuses.

Gas Wärme entzieht und wieder an dieses abgibt, wenn es nach der Expansion zum Kompressor zurückströmt. Auf diese Weise wird trotz vergleichsweise hohem Gasdurchsatz vermieden, daß durch das in den Kaltraum einströmende Gas zuviel Wärme zurücktransportiert wird (Abb. 1).

Es gibt eine ganze Reihe von thermodynamischen Zyklen, die bei solchen Maschinen eingesetzt werden können. Hinsichtlich eines Potentials für zuverlässige Konstruktion (u. a. werden keine Ventile benötigt, die in der Regel Verschleißteile darstellen) zeichnet sich besonders der „Stirling“-Prozeß aus.

Er wurde bereits 1816 von Robert Stirling, einem Geistlichen der Kirche von Schottland, erfunden, allerdings als Wärmekraftmaschine, d. h. als Motor (Abb. 2). Die Verwendung dieses Prozesses in die umgekehrte Richtung als Kältemaschine geschah dann erstmals 1874 durch Alexander Kirk, einem Schottischen Ingenieur.

Beim Stirlingprozeß wird das Gas im Idealfall „isotherm“, d. h. bei konstanter Temperatur, komprimiert, durchläuft sodann einen „isochoren“ Prozeß, bei dem es unter konstantem Volumen vom Kompressor in den Kraftraum gelangt, wird dann isotherm expandiert und kommt anschließend wieder isochor zurück in den Kompressor. Danach wiederholt sich der Zyklus. Die isochoren Teilprozesse werden mittels eines „Verdrängers“ realisiert. Das ist ein Kolben, mit

dem das Gas von einem Teilvolumen des Systems in ein zweites befördert wird, wobei das Gesamtvolumen konstant bleibt. Dieser Verdränger kann gleichzeitig als Wärmetauscher ausgelegt werden. In der Praxis kann das ein Kolben sein, der sich in einem Zylinder hin- und herbewegt. Das Gas strömt dabei unter Wärmeaustausch durch den dünnen radialen Spalt zwischen Kolben und Zylinder. Das eine, warme Ende des Zylinders ist mit dem Kompressor verbunden, das andere stellt den „Kaltteil“ dar. Kolben und Zylinder sollten dabei aus Materialien hergestellt werden, die einerseits eine geringe Wärmeleitfähigkeit be-

sitzen, andererseits aber eine für den Wärmeaustausch mit dem Gas hinreichend große Wärmekapazität aufweisen.

#### Der Gießener Stirling-Kühler

Basierend auf diesen Überlegungen und auf wichtigen Vorarbeiten von J. Zimmerman [1] wurde nun im Laufe der letzten Jahre eine Stirling-Kleinkältemaschine entwickelt, die folgende Besonderheiten aufweist (s. Schema Abb. 3):

- Kompressorkolben und Zylinder bestehen aus Aluminiumoxidkeramik (Abb. 4), einem Material mit hoher Abriebfestigkeit. Es wird keine zusätzliche „Schmierung“ verwendet. Kolben und Zylinder laufen „trocken“ mit einem radialen Spalt von nur 5 µm ineinander. Als Schmierung dient allein ein dünner Gasfilm in diesem Spalt, der vom Arbeitsgas Helium erzeugt wird.

- Der Kaltteil (äußerer Zylinder und Verdränger) ist weitgehend aus glasfaserverstärktem Kunststoff gefertigt (Abb. 5), einem Werkstoff, der den o. g. Anforderungen entgegenkommt. Insgesamt besteht er aus drei in Serie liegenden Expansionsstufen mit jeweils kleinerem Volumen. Dadurch entsteht die Möglichkeit der Zwischenkühlung von zwei Strahlungsschilden,

die Wärmestrahlung von der letzten, kältesten Stufe fernhalten sollen. Diese Stufe dient dann für die Kühlung des kryoelektronischen Bauelements. Eine elektrische Heizwicklung, die ebenfalls an dieser Stufe angebracht ist, kann zum kontrollierten Gegenheizen verwendet werden, so daß konstante Temperaturen auch oberhalb der tiefsten, vom Kühler erreichbaren Temperatur, eingestellt werden können.

- Das ganze System ist hermetisch abgeschlossen. Die Kraftübertragung erfolgt dabei mittels eines Hebels von der Kurbelwelle auf den Kompressorkolben, der durch ei-

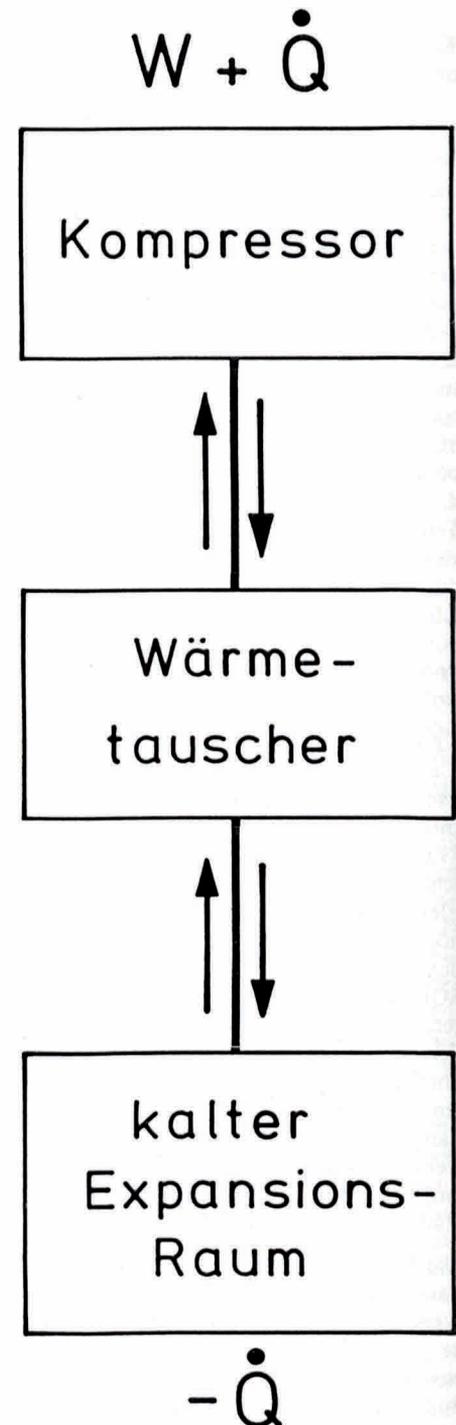


Abb. 1: Erläuterungen siehe Text.

1) J. E. Zimmermann und D. B. Sullivan, A Study of Design Principles for Low-Power Cryoelectronic Devices, NBS Technical Note 1049, U.S. Government Printing Office, Washington, 1982

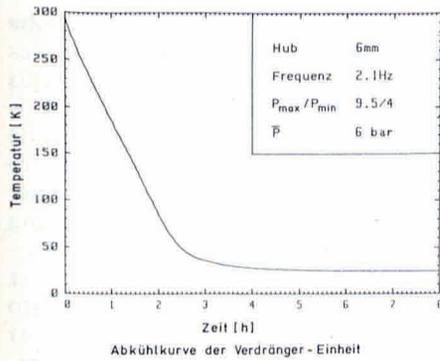


Abb. 6: Abkühlverhalten der Kältemaschine bei den angegebenen Betriebsdaten. Bis zu etwa  $-220^{\circ}\text{C}$  erfolgt die Abkühlung mit ca.  $100^{\circ}\text{C}$  pro Stunde.

nen Edelstahlwellbalgen abgedichtet ist. Dasselbe Dichtungsprinzip wird auch beim Kaltteil verwendet. Bei diesem wird das Gewicht des Verdrängerkolbens über einen Hebel durch ein Gegengewicht ausbalanciert.

Der Kaltteil ist nur über die Gasleitung mit dem Kompressor verbunden. Die Bewegung des Verdrängers wird dabei durch den Gasstrom mit richtiger Phasenlage bewirkt, es handelt sich also um einen sogenannten „Split-Stirling-Kühler“. Diese mechanische Entkopplung bietet den Vorteil, den Kaltteil mehrere Meter entfernt von der Kompressoreinheit aufzustellen. Dadurch werden Störsignale, wie sie etwa vom Antriebsmotor des Kompressors erzeugt werden, am Ort des zu kühlenden Sensors stark reduziert.

### Typische Betriebsdaten einer derartigen Kühleinheit

Mittlerer Druck des Arbeitsgases (Helium):  $p=6$  bar  
 Druckverhältnis = Maximaldruck/Minimaldruck während eines Zyklus: 2,4  
 Verdrängerhub: 6 mm  
 Hubfrequenz: 2 Hz  
 Kühlleistung bei 77 K: ca. 0,6 W  
 Kühlleistung bei 30 K: ca. 40 mW  
 Abkühlgeschwindigkeit: 100 K/h (Abb. 6)  
 Beim Betrieb mit einer Kolbenhubfrequenz von 2 Hz wird eine Temperatur von 30 Kelvin ( $-243^{\circ}\text{C}$ ) in ca.  $3\frac{1}{2}$  Stunden erreicht, die Endtemperatur liegt bei ca. 25 K. Sowohl bei der Kompressoreinheit wie auch im Kaltteil ist über eine Gesamtbetriebszeit von bisher mehr als 9 500 Stunden ein nennenswerter Verschleiß nicht aufgetreten. Wesentlich ist in diesem Zusammenhang auch die hermetische Abdichtung des Systems, wodurch Verlust und Verunreinigung des Arbeitsgases wirkungsvoll unterbunden werden. Beides würde zu einer Verschlechterung des Kühlverhaltens führen. Die räumliche Trennung von Kompressor und Kaltteil wirkt sich nicht nur vorteilhaft im Hinblick auf die Verminderung des Eigenstörpegels aus, sie gibt auch einen zusätzlichen Freiheitsgrad für die flexible Aufstellung des Kühlers. Die bisher erreichten Daten machen den Kühler attraktiv für den o.g. Einsatzbereich. Er eignet sich insbesondere auch für SQUIDS und andere kryoelektronische Bauelemente aus den neuen oxydkera-

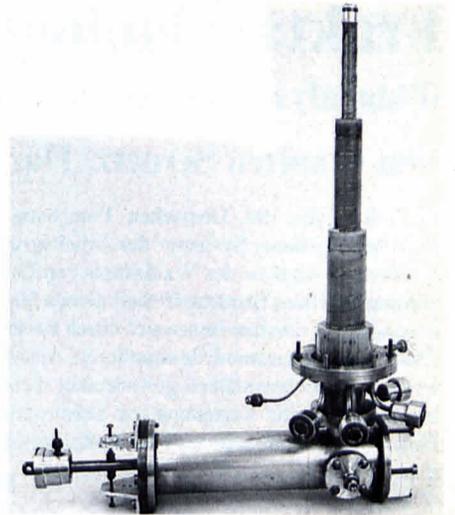


Abb. 5: Ansicht des Kaltteils mit abgenommenen Strahlungsschildern und ohne Vakuum-Mantel.

mischen Supraleitermaterialien wie  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ , von denen Prototypen bereits existieren. Die Entwicklung mit der hier beschriebenen Anordnung von Stirling-Kleinkältemaschinen ist nicht abgeschlossen. So ist derzeit eine weitere Variante in Erprobung, bei der das zweite oder zur Verfügung stehende Kompressionsvolumen der Kompressoreinheit mit einer weiteren Verdrängereinheit verbunden ist, die mit der ersten in einem Kaltteil vereinigt ist. Hierbei ergeben sich konstruktive Vorteile, u. a. der Wegfall der Wellbalgendichtung im Kaltteil.

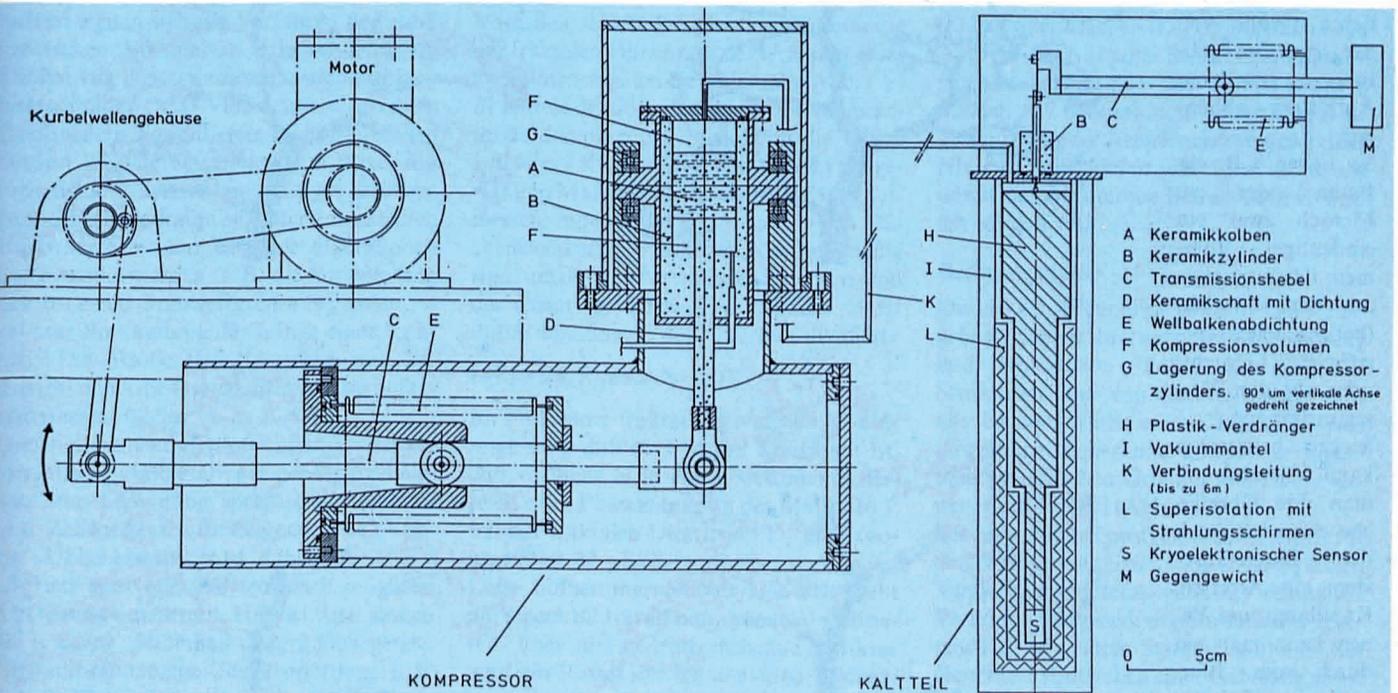


Abb. 3: Konstruktive Details der Gießener Stirling-Kleinkältemaschine. Wesentliche Komponenten sind in der Kompressoreinheit die Keramikausführung von Kompressionszylinder und Kolben, deren Gasschmierung sowie die hermetische Abdichtung mittels eines auf geringe Biegung beanspruchten Edelstahlwellbalgens. Der Kaltteil zeichnet sich durch einen balancierten Verdränger, der Verwendung von Glasfaser-Epoxy-Verbundwerkstoff sowie ebenfalls einer hermetischen Wellbalgendichtung aus.