

Mehrweggetriebe
Die neue Generation

Während die aktuelle Generation von Turbogetrieben ihre Leistungsgrenzen erreicht, bietet ein innovatives neues Design neue Möglichkeiten und das Potenzial, Antriebsstränge von ihren Fesseln zu befreien.

Bei immer weiter steigenden Leistungen und Leistungsdichten von rotierenden Maschinen gelangen Turbogetriebe an die Grenzen eines sicheren und zuverlässigen Betriebs. Wenn Maschinenstränge zukünftig nicht von der Leistungsfähigkeit ihrer Getriebe begrenzt sein sollen, muss das Design dieser Getriebe radikal neu gedacht werden.

Getriebe werden häufig verwendet, um die Drehzahl von Primärantrieben zu erhöhen oder zu senken, um sie an die Abtriebsseinheiten anzupassen. Besonders im kritischen Betrieb, wenn keine Redundanzen verbaut sind, ist das Getriebe ebenso wichtig für die Zuverlässigkeit und Sicherheit der Anlage wie jedes andere Element im Antriebsstrang.

Dennoch interessieren sich zahlreiche Ingenieure – vielleicht wenig überraschend – mehr für den Antrieb oder die Abtriebsmaschinen (Gasturbinen, Elektromotoren, Verdichter oder Pumpen) als für das Getriebe, das häufig als Massenartikel gesehen wird.

Schon dies unterstreicht die Zuverlässigkeit von Standard-Turbogetrieben, die unter anspruchsvollen Bedingungen (mechanische Spannung, Schlag- und Verschleißbeanspruchung) arbeiten. Doch auch Getriebeexperten können keine Wunder bewirken, und das Turbogetriebe, wie wir es heute kennen, steuert unaufhaltsam auf seine Leistungsgrenzen zu. Es ist an der Zeit für etwas Neues.

Grenzen herkömmlicher Entwürfe

Herkömmliche Getriebe für Strömungsmaschinen lassen sich in zwei Typen aufteilen: Stirnrad- und Planetengetriebe.

Stirnradgetriebe haben zwei Achsen mit je einem einzigen Zahnrad. Sie sind mit Nennleistungen bis zu 140 MW für kleine Übersetzungsverhältnisse ($< 1:6$) erhältlich, zum Beispiel für die Installation zwischen einer Gasturbine und einem Generator. Wie ihre englische Bezeichnung „parallel shaft gearbox“ nahe legt, liegen An- und Abtriebswelle nicht auf einer gemeinsamen Achse.

Planetengetriebe teilen die Leistung zwischen mehreren Planetenrädern auf, die ein zentrales Sonnenrad umkreisen und gleichzeitig in ein äußeres Hohlrad greifen. Planetengetriebe sind kompakt, An- und Abtriebswelle liegen auf einer gemeinsamen Achse, aber die Nennleistung ist bei Übersetzungsverhältnissen von mehr als 1:6 auf 45 MW begrenzt.

Um die das Getriebedesign begrenzenden Faktoren verstehen zu können, müssen die externen Betriebscharakteristika – Leistung und Drehzahl – in getriebespezifische Designparameter übersetzt werden. Die Hauptfaktoren für die Grenzen von Leistung und Drehzahl sind:

- die Teilkreisgeschwindigkeit („pitchline velocity“, PLV),
- die elastische Verformung durch Dreh- und Biegemomente an allen Teilen des Getriebes, insbesondere dem Ritzel (das ist das schmalere der beiden Zahnräder eines Stirnradgetriebes),
- die benötigte An- und Abtriebsdrehzahl,
- die Betriebsgrenzen der Lager (Belastung und Umfangsgeschwindigkeit),
- und die für die jeweilige Anwendung gewählte Sicherheitsreserve.

Die Aufgabe des Getriebedesigners besteht darin, die beste Balance zwischen diesen begrenzenden Faktoren zu finden, die miteinander in Konflikt zueinander stehen. So führt zum Beispiel die Auslegung für eine höhere Drehzahl eines Hochleistungslagers zu einer höheren Teilkreisgeschwindigkeit, die wiederum sowohl die Umfangskräfte in den Zahnrädern sowie die Tendenz zum Abriss des Schmierölfilms erhöht. In einem Stirnradgetriebe besteht die Lösung darin, den Wellenabstand (und damit die Gesamtgröße des Getriebes) zu vergrößern, um eine größere Hebelwirkung zu erzielen.

Heutzutage liegt die physikalisch maximal mögliche Teilkreisgeschwindigkeit bei 200 m/s, die maximale Lagerumfangsgeschwindigkeit bei 100 m/s. Die maximale Belastung der Lager liegt laut API 613 (Absatz 2.7.2.4) bei 3,45 MPa. API 613 ist die für Turbogetriebe in der Öl- und Gasindustrie geltende Norm.

Diese Grenzen führen in manchen Fällen dazu, dass das Getriebe das Nadelöhr im Antriebsstrang ist. Turboverdichter zum Beispiel sind gegenwärtig durch ihre Getriebe auf etwa 35 MW begrenzt (in gewissem Umfang abhängig von den benötigten An- und Abtriebsdrehzahlen).

Neue Wege beschreiten

Durch kleine, schrittweise Verbesserungen des Designs, etwa die Verwendung von hochwertigen Stählen, die hohen Teilkreisgeschwindigkeiten widerstehen, oder verbesserter Lager für höhere Lagerumfangsgeschwindigkeiten, werden die Möglichkeiten herkömmlicher Getriebe erweitert. Die sich ergebenden Verbesserungen sind jedoch klein, und die optimierten Getriebe arbeiten noch immer im Grenzbereich. Außerdem ist es natürlich keine sehr gute

Idee, Getriebe, die im Wesentlichen nichts anderes als Prototypen sind, in unerprobten Bereichen des Drehzahl-/Leistungsverhältnisses zu betreiben.

Eine Alternative zu inkrementellen Verbesserungen in den Materialwissenschaften ist die Verwendung eines alternativen Getriebedesigns mit Leistungsverzweigung. Bei dieser Herangehensweise werden die durch Zähne und Lager bei herkömmlichen Getriebearten gesetzten Beschränkungen umgangen. Aus dem Blickwinkel des Anlagenkonstruktors noch wichtiger ist jedoch, dass die Leistungsgrenzen, die Strömungsmaschinensträngen von herkömmlichen Getriebedesigns gesetzt werden, überwunden werden können.

Durch die Verzweigung der Leistung kann die Drehzahlgrenze bei einem Mehrweggetriebe (PDG) erhöht werden, um die gewünschte Leistung übertragen zu können und das Lagerproblem deutlich abzuschwächen. Beim Mehrweggetriebe ist eher die Verzahnung der begrenzende Faktor – konkret die Geschwindigkeit, mit der die Zähne ineinander greifen, sowie die hauptsächlich durch die Verdichtung des Öl-Luftgemisches erzeugte Wärme. Mehrweggetriebe können heute mit Nennleistungen von bis zu 170 MW, Abtriebsdrehzahlen von bis zu 100.000 min⁻¹ und Übersetzungsverhältnissen von bis zu 1:10 hergestellt werden.

Design und Funktion von Mehrweggetrieben

Das Mehrweggetriebe vereint den einfachen und robusten Aufbau von Stirnradgetrieben mit der Möglichkeit zur Leistungsverzweigung des Planetengetriebes (Abb. 1). Das Ergebnis ist ein Getriebe mit höherer Nennleistung und Drehzahl sowie einem höheren Übersetzungsverhältnis, das aber stets deutlich innerhalb der technischen Leistungs- und Belastungsgrenzen arbeitet und somit eine großzügige Sicherheitsreserve bietet.

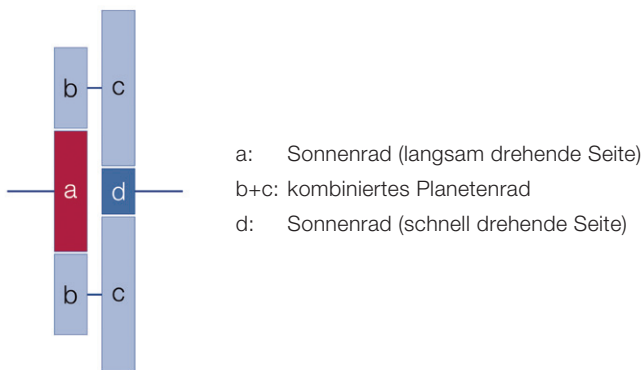


Abbildung 1: Das Mehrweggetriebe (PDG) verwendet eine Planeten-/Sonnenradanordnung, um die Leistung der Antriebswelle zu verzweigen. Mit den kombinierten Planetenrädern wird die periphere Geschwindigkeit weiter erhöht. Eine zweite Planeten-/Sonnenradgruppe bildet den Abtrieb. Das Ergebnis ist ein Getriebe, das mehr Leistung bei höheren Drehzahlen übertragen kann als herkömmliche Planeten- oder Stirnradgetriebe.

Das Mehrweggetriebe besteht aus drei oder mehr Planetenrädern, die ein zentrales Sonnenrad umkreisen. Jedes Planetenrad ist seinerseits mit je einem zweiten Planetenrad verbunden, das jeweils in ein zweites, auf einer separaten Welle angeordnetes Sonnenrad eingreift (Abb. 2).

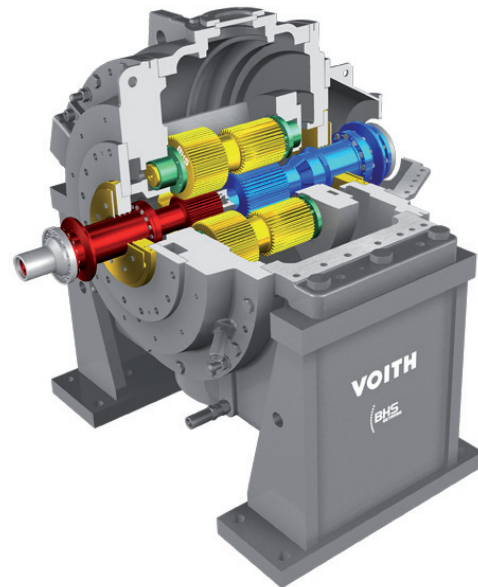


Abbildung 2: Da die beiden Sonnenräder von den Planetenrädern gehalten werden, benötigen die Haupt- und -abtriebswelle des Mehrweggetriebes keine Lager.

Die gesamte Anordnung arbeitet wie ein zweistufiges Stirnradgetriebe, hat aber weitere Vorteile:

- die Aufteilung der Leistung auf mehrere Planetenräder reduziert die Belastung der Zähne,
- wie beim Planetengetriebe wird jedes Sonnenrad von seinen Planetenrädern gehalten, sodass weder auf der schnell-, noch auf der langsamlaufenden Seite Lager benötigt werden,
- die drei Planetenräder werden von sechs hydrodynamischen Lagern gehalten (statt nur von vier wie bei Stirnradgetrieben),
- An- und Abtriebswelle liegen auf einer gemeinsamen Achse,
- kompakte Bauform, da im Gegensatz zum Planetengetriebe kein Hohlräder erforderlich ist.

Integrierte Doppelmembrankupplungen an der An- und Abtriebswelle des Mehrweggetriebes erlauben axialen, radialen und angularen Versatz und damit eine optimale Leistungsübertragung und Rotordynamik. Die geringe axiale Ausdehnung dieser Kupplungen reduziert den Abstand zwischen den Wellenenden (DBSE) von Antrieb und angetriebener Maschine.

Einsatz in kritischen Anwendungen

Das Beispiel eines typischen von einer Gasturbine angetriebenen Verdichters zeigt, wie das Mehrweggetriebe einem Stirnradgetriebe bei Anwendungen mit hohen Leistungsdichten überlegen ist. Für die Drehzahl der Gasturbine wird ein Wert von 5.000 min^{-1} angenommen, die Kompressordrehzahl beträgt 12.500 min^{-1} .

Teilkreisgeschwindigkeit

Abb. 3 zeigt die maximale Teilkreisgeschwindigkeit als Funktion der übertragenen Leistung für die vorgegebenen An- und Abtriebsdrehzahlen.

Ein Stirnradgetriebe erreicht seine maximale sichere Teilkreisgeschwindigkeit von 190 m/s bei einer Leistung von 26 MW . Die Kurve des Mehrweggetriebes steigt langsamer, und bei 26 MW liegt die Teilkreisgeschwindigkeit mit 132 m/s um 58 m/s (30%) niedriger als beim Stirnradgetriebe. Selbst bei Leistungen um

65 MW liegt die Teilkreisgeschwindigkeit beim Mehrweggetriebe immer noch unterhalb von 180 m/s .

Der Grund für diese verbesserten Leistungswerte ist der geringere Durchmesser der Planetenräder des Mehrweggetriebes gegenüber dem Ritzel des Stirnradgetriebes. Dadurch wird die Sicherheitsreserve für die proportional zum Quadrat des Quotienten aus Geschwindigkeit und Durchmesser steigenden Zentrifugalkräfte erhöht.

Beispiel: Verdichter angetrieben durch Gasturbine

Eingangsdrehzahl: 5.000 min^{-1} Ausgangsdrehzahl: 12.500 min^{-1}

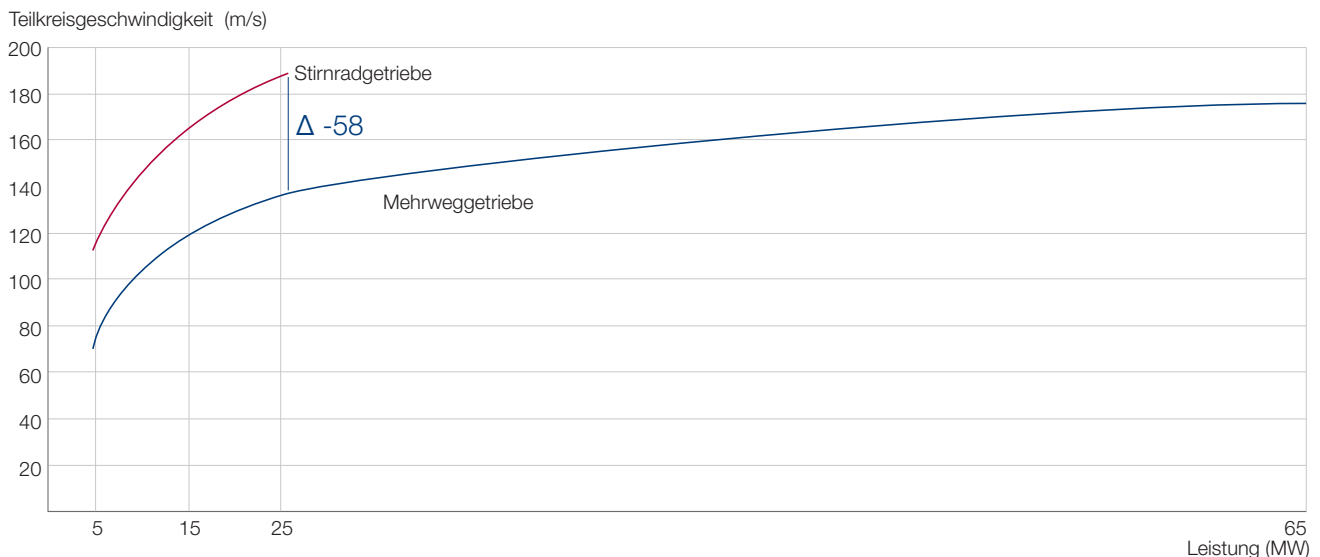


Abbildung 3: Die Teilkreisgeschwindigkeit bleibt im Mehrweggetriebe bei Leistungen von 65 MW und darüber hinaus unterhalb der Sicherheitsgrenze von 200 m/s . Beim Stirnradgetriebe hingegen ist bei 26 MW Schluss.

Lagerumfangsgeschwindigkeit

Die Kurve in Abb. 4 stellt die Lagerumfangsgeschwindigkeit im Verhältnis zur übertragenen Leistung dar. Sie ist der oben erläuterten Kurve (Teilkreisgeschwindigkeit im Verhältnis zur übertragenen Leistung) recht ähnlich. Das Stirnradgetriebe überträgt nicht mehr als 26 MW, wenn die Lagerumfangsgeschwindigkeit den noch sicheren Maximalwert von etwa 100 m/s erreicht. Bei dieser Leistung beträgt die Lagerumfangsgeschwindigkeit beim Mehrweggetriebe hingegen lediglich 50 m/s, also nur 50 % des sicheren Maximalwerts. Selbst

bei 65 MW liegt die Lagerumfangsgeschwindigkeit mit 65 m/s immer noch deutlich unterhalb der Sicherheitsgrenze.

Die niedrigeren Lagerumfangsgeschwindigkeiten rühren daher, dass der Durchmesser der Planetenradachsen des Mehrweggetriebes kleiner als der der Radiallager des Ritzels in einem Stirnradgetriebe ist.

Beispiel: Verdichter angetrieben durch Gasturbine

Eingangsdrehzahl: 5 000 m⁻¹ Ausgangsdrehzahl: 12 500 m⁻¹

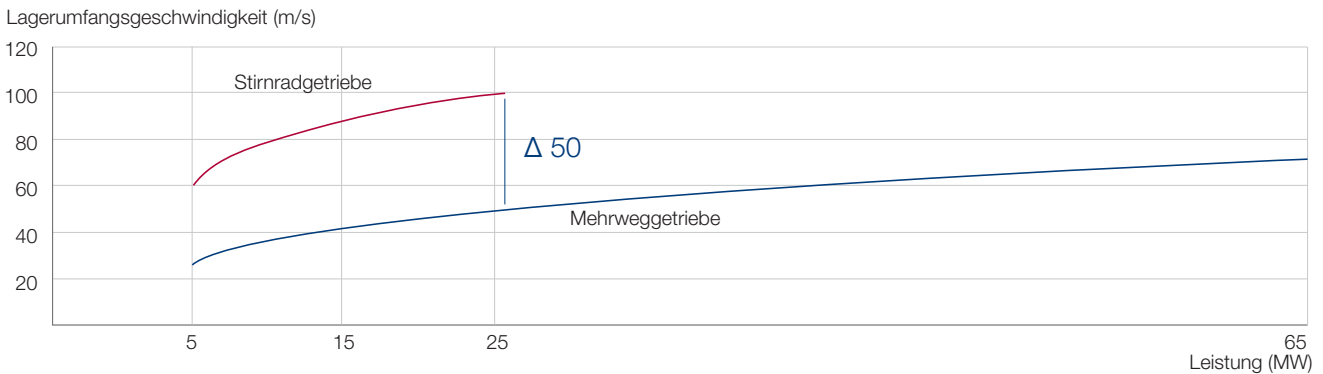


Abbildung 4: Bei den Lagerumfangsgeschwindigkeiten sind die Verhältnisse ähnlich: Während Stirnradgetriebe in dieser Anwendung auf 26 MW begrenzt sind, sind die Lagerumfangsgeschwindigkeiten beim Mehrweggetriebe bis 65 MW und darüber hinaus unproblematisch.

Belastung der Lager

Neben der Teilkreis- und der Lagerumfangsgeschwindigkeit ist die mechanische Belastung der Lager der dritte Hauptfaktor, der die Leistungsfähigkeit eines Getriebes begrenzt. Abb. 5 zeigt zeigt identische Lagerbelastungen für beide Getriebedesigns im obigen Beispiel einer Verdichteranlage.

Bereich des von der API 613 gesetzten Maximums von 3,45 N/mm². Diese Achsen fungieren als Festsegmentlager und haben sich in mehr als 8.000 von Voith gelieferten BHS-Planetengetrieben bewährt. Die Belastung der Lager reduziert sich weiter, da das Mehrweggetriebe sechs Lager (zwei für jede Planetenradachse) anstatt vier (wie beim Stirnradgetriebe) hat.

Selbst bei hohen Leistungen bleibt bei einer Erhöhung des Durchmessers der Planetenradachsen das Mehrweggetriebe im

Gasturbine @ 5 000 m⁻¹ auf Radialverdichter @ 12 500 m⁻¹

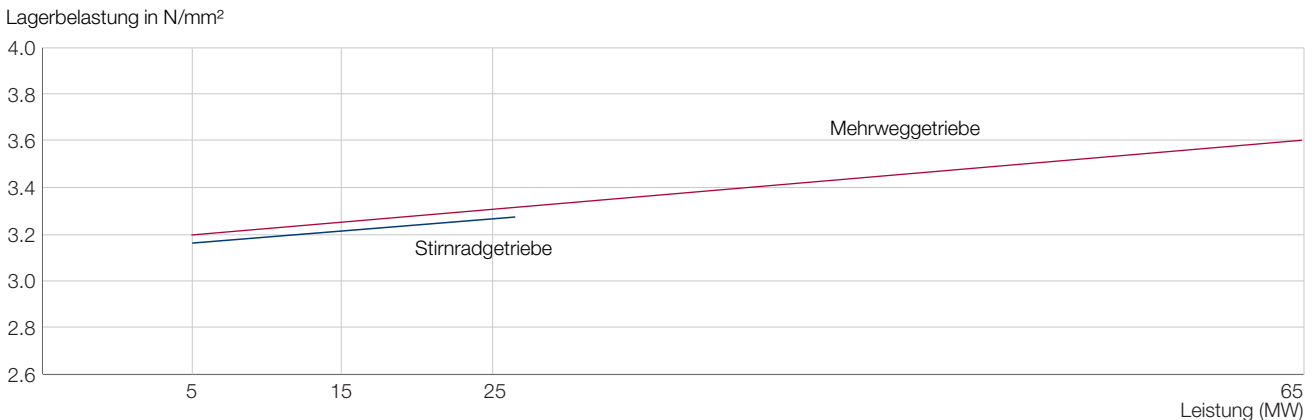


Abbildung 5: Bei korrekt gewähltem Achsendurchmesser der Planetenräder bleiben die Lagerbelastungen im Mehrweggetriebe selbst bei hohen Leistungen unterhalb der von der API gesetzten Grenzen.

Wirkungsgrad

Besonders in der Öl- und Gasindustrie sind Zuverlässigkeit, Sicherheit und Verfügbarkeit von Maschinen zu Recht die für den Betrieb wichtigsten Faktoren. Anlagenbetreiber haben jedoch immer mehr auch die Energiekosten und die CO₂-Emissionen im Blick. Deshalb nimmt auch der Wirkungsgrad eine immer wichtigere Rolle ein. Wie bei anderen Eigenschaften auch ist das Mehrweggetriebe dem Stirnradgetriebe auch hier überlegen (Abb. 6).

Wenn sich das Stirnradgetriebe seiner Leistungsgrenze von 26 MW nähert, nehmen die Verluste deutlich zu. Bei 26 MW ist der Wirkungsgrad des Mehrweggetriebes um 0,7 Prozentpunkte höher. Noch wichtiger jedoch: Der Wirkungsgrad des Mehrweggetriebes bleibt selbst bis zu einer übertragenen Leistung von 65 MW konstant bei nahezu 99 %.

Gasturbine @ 5 000 m⁻¹ auf Radialverdichter @ 12 500 m⁻¹

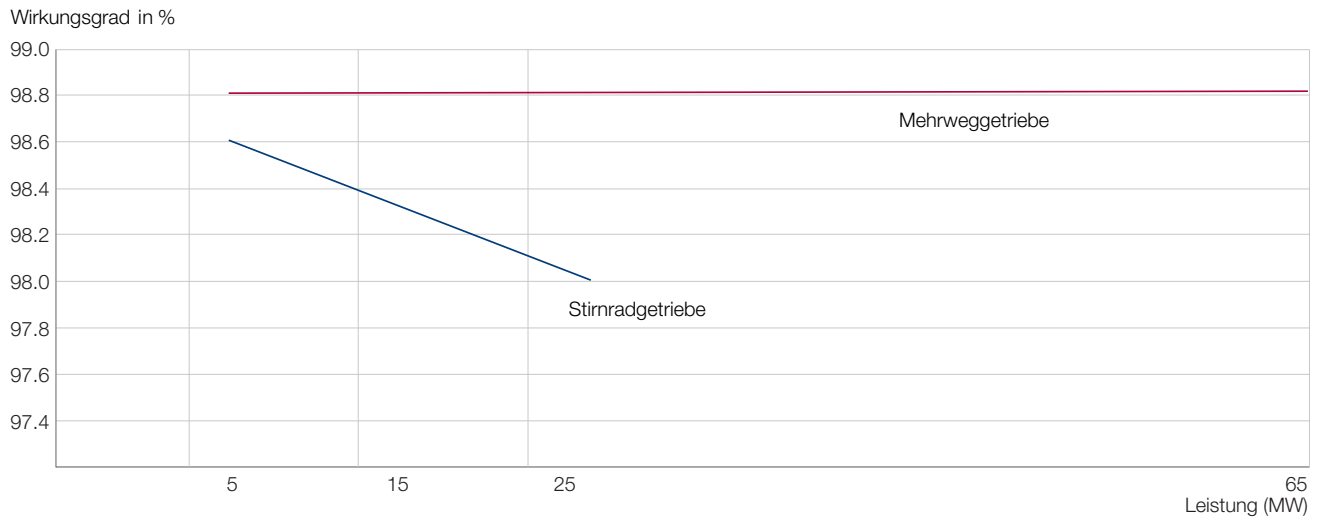


Abbildung 6: Bei Annäherung an die Maximalleistung nimmt der Wirkungsgrad des Stirnradgetriebes ab. Der Wirkungsgrad des Mehrweggetriebes hingegen bleibt selbst bis zu 65 MW hoch.

Ölverbrauch

Auch der Vergleich des Ölverbrauchs der beiden Getriebearten ist interessant, da dieser sich auf die Kapitalkosten des Schmiersystems auswirkt. Bei seiner Leistungsgrenze von 26 MW braucht das Stirnradgetriebe aufgrund der hohen Teilkreisgeschwindigkeit und insbesondere der höheren Lagerumfangsgeschwindigkeit mehr Öl als das Mehrweggetriebe (Abb. 7). Obwohl das Stirnrad-

getriebe weniger Lager braucht als das Mehrweggetriebe, liegt ein Grund für seinen niedrigeren Wirkungsgrad in den höheren Temperaturen in den Schnellauflagern der Ritzelwelle, die mehr Öl zum Kühlen benötigen.

Gasturbine @ 5 000 m⁻¹ auf Radialverdichter @ 12 500 m⁻¹

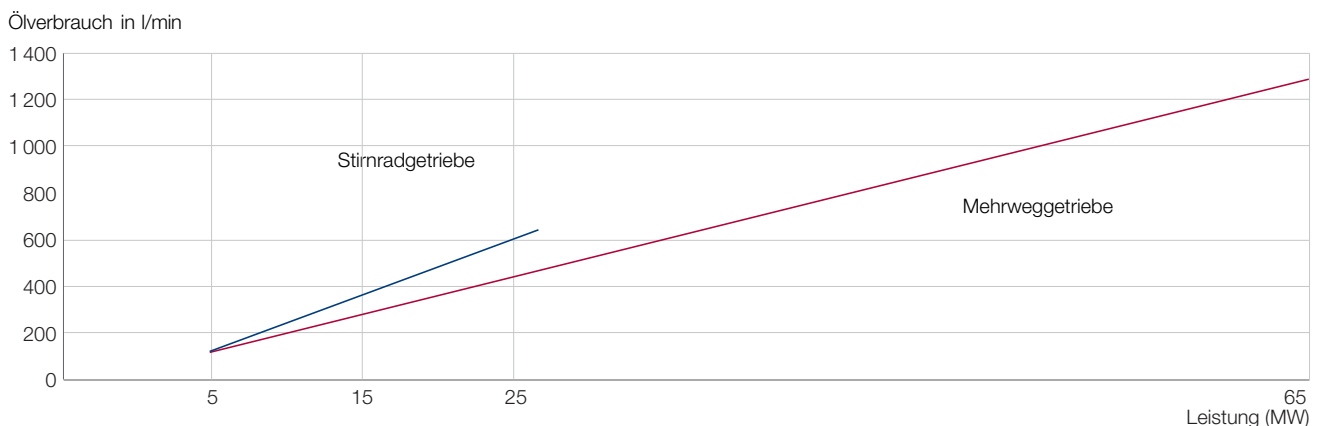


Abbildung 7: Das Mehrweggetriebe benötigt etwas weniger Öl als das Stirnradgetriebe, und der Ölverbrauch nimmt linear mit der Leistung zu.

Wann werden Mehrweggetriebe eingesetzt?

Wie gezeigt verschafft die Leistungsverzweigung im Mehrweggetriebe mehr Spielraum in allen drei Parametern, die die Leistungsübertragung in herkömmlichen Stirnradgetrieben begrenzen: Teilkreisgeschwindigkeit, Lagerumfangsgeschwindigkeit und Belastung der Lager. Geringere Beanspruchungen und niedrigere Temperaturen machen das Mehrweggetriebe zuverlässiger. Gleichzeitig bleibt ihr Wirkungsgrad hoch.

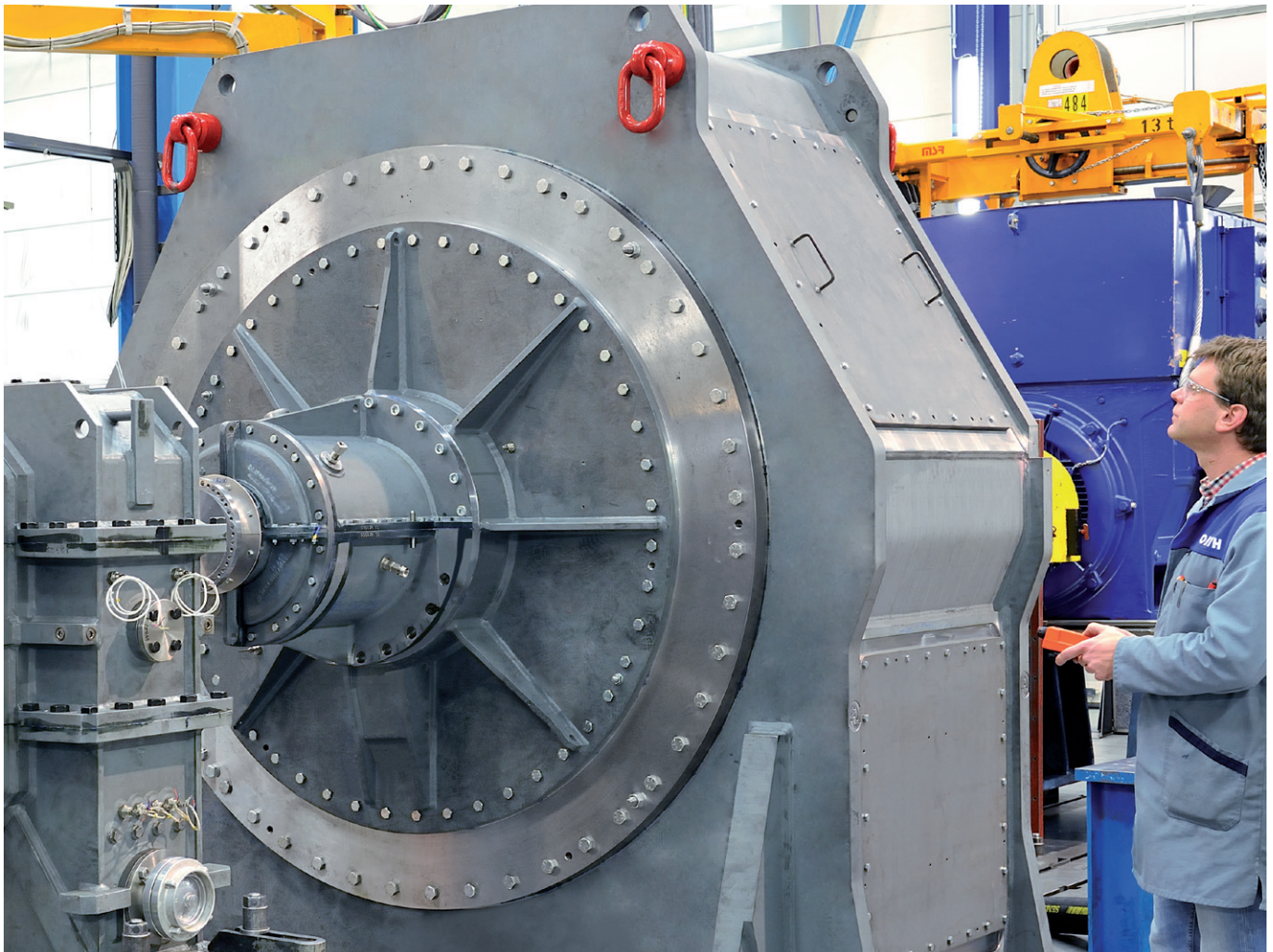
Die gegenüber dem Stirnradgetriebe größere Komplexität des Mehrweggetriebes macht es jedoch erforderlich, bestimmte Designaspekte sehr sorgfältig zu bedenken.

Um zum Beispiel eine ausreichende Schmierung der Zähne zu gewährleisten, müssen die Planetenräder mit internen Ölkanälen ausgestattet und zusätzlich extern geschmiert werden. Die von den rotierenden Sonnen- und Planetenrädern erzeugte relativ starke Bewegung der Luft im Getriebe, die mindestens proportio-

nal zum Quadrat der Umlaufgeschwindigkeit ist, kann ebenfalls die externe Schmierung behindern und dazu führen, dass das Sonnenrad nicht ausreichend mit Schmieröl versorgt wird. Um dieses Problem zu lösen, werden spezielle Leitbleche eingesetzt, aber es besteht noch weiterer Verbesserungsbedarf.

Im Ergebnis ist das Mehrweggetriebe am besten geeignet für Anwendungen mit hoher Leistungsdichte, bei denen herkömmliche Getriebe an ihre Grenzen stoßen. In solchen Fällen bietet das Mehrweggetriebe überzeugende Vorteile.

Insbesondere bietet dieses neue Getriebedesign die Möglichkeit, Antriebsstränge, in denen bisher das Getriebe der limitierende Faktor war, von ihren Fesseln zu befreien. Gasturbinengetriebene Verdichterstränge können damit zum Beispiel mit größeren Verdichtern und Gasturbinen gebaut werden, die bisher im Wesentlichen nur für die Energieerzeugung genutzt wurden.





Voith Turbo BHS Getriebe GmbH
Hans-Böckler-Str. 7
87527 Sonthofen, Deutschland
Telefon: +49 8321 802 -0
Fax: +49 8321 802 -689
sales.bhs@voith.com
voith.com/bhs-pdg

