

# Energieeinsparung bei Pumpen und Kompressoren durch elektromechanische Differentialantriebe

Durch den Einsatz von effizienten Antriebssystemen für Pumpen und Kompressoren können Energie und Kosten reduziert werden. Dies stellt nicht nur ein interessantes Ziel für Unternehmen dar, sondern ist auch in der EU-Ökodesign-Richtlinie verankert. Zweck der Ökodesign-Richtlinie ist die Reduzierung des Energieverbrauchs und anderer umweltschädlicher Einflüsse. Bis zum Jahr 2020 soll eine Verringerung von 12 % des 2007 benötigten Energieverbrauchs erreicht werden, was einer Gesamteinsparung von 341 TWh (Terawatt-Stunden) entspricht.

## CHRISTOPH ALFRED PILGRAM

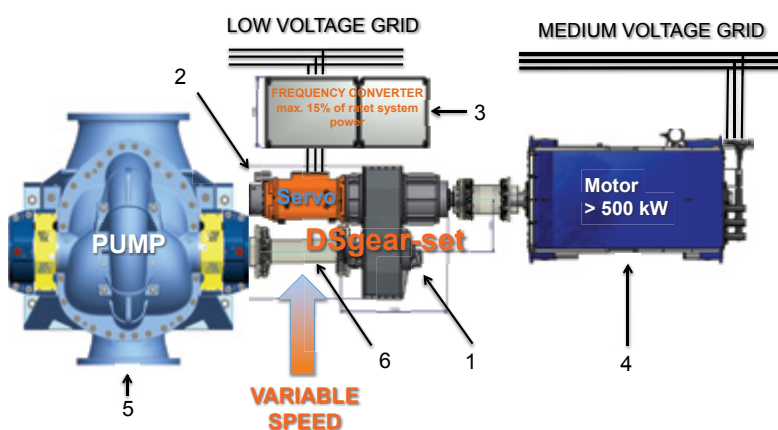
Energieeffizienz steht im Mittelpunkt der Kampagne „Energieeffiziente Systeme in Industrie und Gewerbe“. Mehr als 30 Prozent des gesamten Stromverbrauchs entfallen auf Antriebsmotoren für Pumpen, 10 Prozent auf Kompressoren, beide zusammen stellen damit den größten industriellen Stromverbraucher dar. Die Pumpenfachleute der genannten Unternehmen analysieren die Anlagen in Industrie und Gewerbe und schlagen effizientere Lösungen vor, die meist große Einsparungspotenziale ergeben – auch unter Verwendung neuer

Technologien, wie zum Beispiel Frequenzumformer oder moderne Leit- und Diagnosetechnik. Die Verbesserung industrieller Antriebssysteme könnte in Europa bis etwa 200 TWh Energie pro Jahr respektive 100 Millionen Tonnen CO<sub>2</sub> einsparen. Aus dieser Initiative ergeben sich weitere Anreize zur Entwicklung effizienterer Pumpen und Kompressorsysteme – ein wichtiges strategisches Geschäftsfeld der Zukunft.

## EIN WEG DORTHIN: DREHZAHLVARIABILITÄT

Natürlich ist eine Betrachtung des Gesamtsystems erforderlich, doch ein entscheidender Faktor besteht darin, festzulegen, ob in dem Pumpensystem genügend Variationsmöglichkeiten in der Fördermenge bestehen, um den Einsatz einer Drehzahlregelung zu rechtfertigen. In einigen Anlagen kann dies zu großen Einsparungen (bis zu 75 Prozent) führen. Der Einsatz einer Drehzahlregelung ist sinnvoll, da nach den Vorgaben der EU-Kommission ein IE2-Motor mit Drehzahlregelung auch nach 2015 noch verkauft werden darf.

Was bei anderen Anwendungen selbstverständlich ist, nämlich die aufgewandte Leistung dem tatsächlichen Bedarf anzupassen, ist in vielen Bereichen der Industrie noch immer kein Standard. Da Pumpen in der Regel elektrische Asynchronmotoren als Antrieb nutzen, stehen heute für Mittelspannungsmotoren teure Lösungen zur Drehzahländerung mit Frequenzumrichtern zur Ver-



**Bild 1:** Systemaufbau des dynamischen elektromechanischen Differentialsystems

fügung. Durch einen flächendeckenden Einsatz von Regelsystemen könnte man nach einer europäischen Studie 20 Prozent des für Pumpen verbrauchten Stromes einsparen. Das zeigt, welche enorme wirtschaftliche Bedeutung die Nachrüstung von bestehenden Altanlagen hat. Das schreiben auch die Experten des VDMA (Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbau e.V.) in ihren Jahresberichten.

Dieser Herausforderung hat sich das Technologieunternehmen SET GmbH mit Sitz in Klagenfurt/Österreich gestellt. Mit mehr als 25 Jahren Erfahrung in der Windenergiebranche bietet die Firma SET Differentialsystementwicklungen auf höchstem Niveau. Das Unternehmen hat sich auf die Entwicklung und Fertigung von hocheffizienten elektromechanischen Differentialantrieben spezialisiert. Ein aus 25 Mitarbeitern bestehendes Ingenieurs-Team entwickelt, fertigt und testet elektromechanische Differentialantriebe, um kundenspezifische Lösungen für drehzahlvariable Großantriebe anzubieten. Diese finden Anwendung in den Antriebssträngen von Anlagen zur Erzeugung erneuerbarer Energie in den Sektoren Wind- und Wasserkraft, sowie in drehzahlvariablen industriellen Großantrieben für Pumpen und Kompressoren mit mehr als 500 kW Leistung.

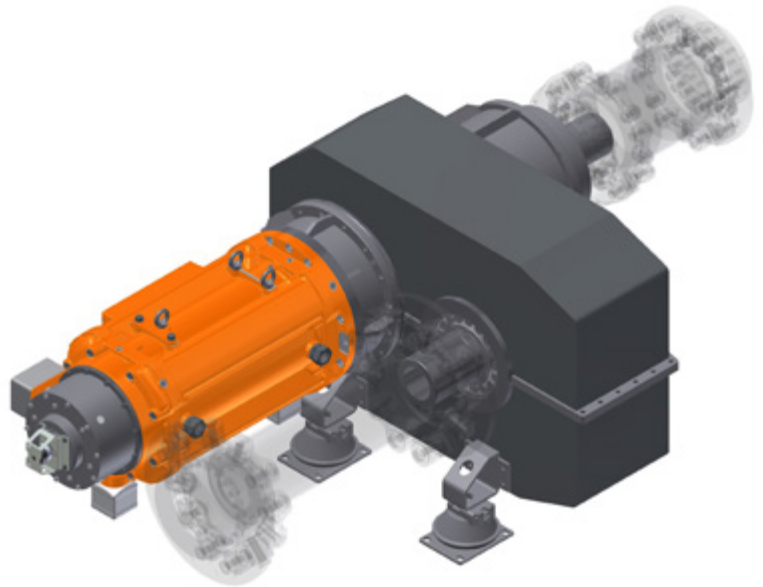
Aktueller Stand der Technik ist der Einsatz von Frequenzumrichtern, die hauptsächlich für kleine Antriebsleistungen und im Niederspannungsbereich ihren Einsatz finden. Im Mittelspannungsbereich und bei großen Leistungen wird der Einsatz von Mittelspannungsfrequenzumrichtern, meist aus Gründen einer hohen Investition, selten als eine Option gesehen. Hier überwiegen aufgrund der hohen Anfangsinvestitionen Anwendungen ohne Drehzahlregelungen, obwohl hier ein enormes Einsparungspotential brach liegt. Allein bei einer möglichen Reduktion der durchschnittlichen Durchflussmenge einer Pumpe von 10 Prozent reduziert sich die Leistungsaufnahme des Antriebs um ca. 28 Prozent.

Die für die variable Drehzahl notwendigen Mittelspannungsfrequenzumrichter sind sehr leistungsstark und stellen daher eine Quelle für Wirkungsgradverluste dar.

Diese Wirkungsgradverluste können durch den Einsatz von Differentialgetrieben, die durch Veränderung des Übersetzungsverhältnisses bei konstanter Motordrehzahl, eine variable Drehzahl der Antriebswelle an der Pumpe oder des Kompressors generieren, reduziert werden.

Die Nachteile bekannter, am Markt verfügbarer Ausführungen von Differenzialsystemen sind einerseits hohe Verluste im Differential-Antrieb und andererseits bei Konzepten, die dieses Problem lösen, komplexe Mechanik und damit hohe Kosten.

Um diese Herausforderungen zu lösen, setzt die Firma SET auf den Einsatz eines hochdynamischen, elektromechanischen Differenzialsystems, DSgear-set®, zur Realisierung der für zum Beispiel Pumpen notwendigen variablen Antriebswellendrehzahl.



**Bild 2:** DSgear-set®



**Bild 3:** 3.0 MW DSgear-set® am Prüfstand in Klagenfurt

## SYSTEMAUFBAU UND FUNKTIONSWEISE

**Bild 1** zeigt das Prinzip eines elektromechanischen Differenzialsystems bestehend aus Differenzial-Getriebestufe inklusive Vorstufe (DSgear-set®)(1), einem Differenzial-Antrieb (Servo) (2), dem Niederspannungs-Umrichter (3) für den Differenzial-Antrieb, den Mittelspannungshauptantrieb (4), der Pumpe oder Kompressor (5) sowie die drehzahlvariable Ausgangswelle mit Kupplung zur Pumpenwelle (6).

Zwischen Pumpenwelle (6) und Hauptantrieb (4) befindet sich die Differenzialstufe einschließlich Vor-

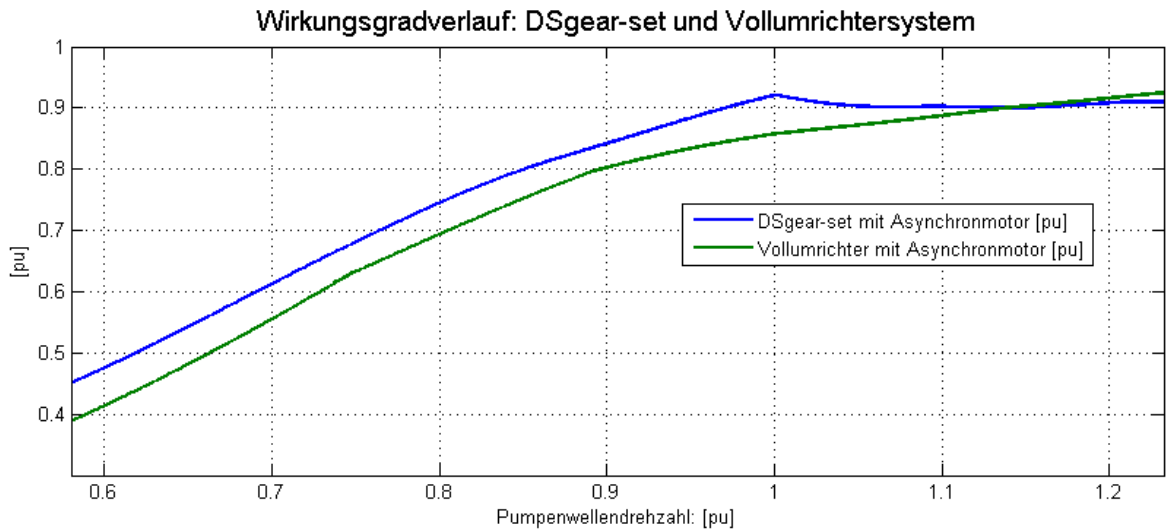


Bild 4: Wirkungsgradverlauf DSgear-set® und Vollumrichtersystem

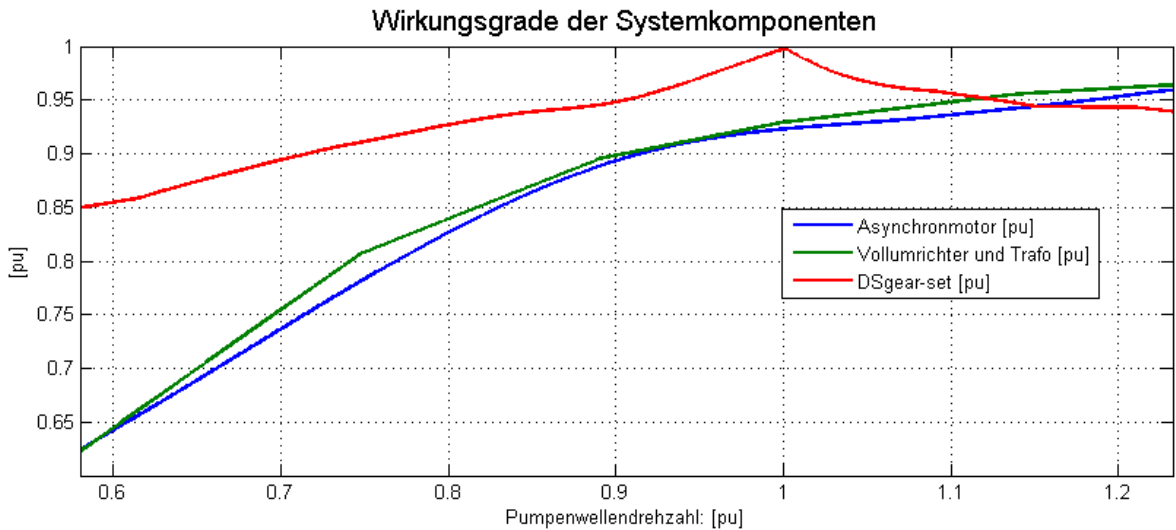


Bild 5: Wirkungsgrade der einzelnen Systemkomponenten

stufe (1). Der Pumpen-Hauptantrieb (4) vorzugsweise ein 4- bis 6-poliger Mittelspannungs-Motor treibt das Hohlrad in der Differenzial-Getriebestufe (1) an. Das Hohlrad treibt wiederum Planetenräder an, die auf einem Planetenträger gelagert sind. Der Planetenträger ist mit der Pumpenwelle verbunden und überträgt via Getriebevorstufe die Drehzahlvariabilität auf die Pumpenwelle (6). Das Sonnenrad der Differenzialstufe ist mit dem Differenzial-Antrieb (Servo) (2) verbunden. Die Drehzahl des Differenzial-Antriebes (2) wird geregelt, um bei konstanter Drehzahl des Hauptantriebs (4) eine variable Drehzahl der Pumpenwelle (6) zu gewährleisten und andererseits das Drehmoment im kompletten Triebstrang der Pumpe zu regeln. Der Differenzial-Antrieb ist eine Niederspannungs-Drehstrommaschine, die über Frequenzumrichter (3) an das Niederspannungs-Netz angeschlossen wird. **Bild 2** zeigt ein DSgear-set® für Pumpen- oder Kompressoranwendungen, **Bild 3** zeigt ein 3,0 MW

Differenzialsystem einschließlich Leistungselektronik (Niederspannungsumrichter und Controller) für eine Windkraftanlage am SET Prüfstand in Klagenfurt.

### TECHNISCHER HINTERGRUND

Die Drehzahlgleichung für das Differenzialsystem lautet:

$$\text{Drehzahl}_{\text{Motor}} = x \cdot \text{Drehzahl}_{\text{Pumpenwelle}} + y \cdot \text{Drehzahl}_{\text{Differenzial-Antrieb}}$$

wobei die Motordrehzahl konstant ist und die Faktoren x und y sich von den Übersetzungsverhältnissen der Getriebevorstufe und des Differenzialgetriebes ableiten lassen.

Das Drehmoment an der Pumpenwelle wird durch die anstehende Förderhöhe und Fördermenge bestimmt. Das Verhältnis zwischen dem Drehmoment an der Pumpenwelle und dem am Differenzial-Antrieb ist konstant, wodurch sich das Drehmoment im Triebstrang durch

den Differenzial-Antrieb regeln lässt. Die Drehmomentgleichung für den Differenzial-Antrieb lautet:

$$\text{Drehmoment}_{\text{Differenzial-Antrieb}} = \text{Drehmoment}_{\text{Pumpenwelle}} \cdot \gamma / x$$

wobei der Größenfaktor  $\gamma/x$  ein Maß für das notwendige Auslegungs-Drehmoment des Differenzial-Antriebs ist.

Die Leistung des Differenzial-Antriebs ist im Wesentlichen proportional dem Produkt aus prozentueller Abweichung der Pumpendrehzahl von dessen Grunddrehzahl  $x$  Wellenleistung. Dementsprechend erfordert ein großer Drehzahlbereich grundsätzlich eine entsprechend große Dimensionierung des Differenzial-Antriebs.

### DREHZAHLBEREICH UND WIRKUNGSGRAD

Ein wesentlicher Vorteil des DSgear-set® ist die konstruktive Einfachheit des Differenzialgetriebes und der dadurch hohe Wirkungsgrad der Differenzialstufe.

**Bild 4** zeigt als Beispiel die Pumpenwellendrehzahl bzw. Leistungsverhältnisse für ein Differenzialsystem und deren Wirkungsgrade verglichen mit einem Vollumrichtersystem. Die Drehzahl des Motors ist durch den Anschluss an das frequenzfeste Netz konstant. Um den Differenzial-Antrieb entsprechend gut ausnutzen zu können, wird dieser Antrieb im Bereich kleiner der Grunddrehzahl generatorisch (+) und im Bereich größer der Grunddrehzahl motorisch (-) betrieben. Das führt dazu, dass im motorischen Bereich Leistung in die Differenzialstufe eingespeist wird und im generatorischen Bereich Leistung der Differenzialstufe entnommen wird. Diese Leistung wird im Falle eines elektrischen Differenzial-Antriebs vorzugsweise dem Netz entnommen bzw. in dieses eingespeist. Die Summe aus Motorleistung und Leistung Differenzial-Antrieb ergibt die für einen elektrischen Differenzial-Antrieb an die Pumpenwelle abgegebene Gesamtleistung.

**Bild 5** zeigt die Wirkungsgrade der einzelnen Systemkomponenten. Die Darstellung berücksichtigt alle Verluste der einzelnen Systems zwischen dem Abgang auf die Antriebswelle und der Mittelspannungs-Anbindung des Motors.

Durch den Einsatz einer integrierten Vorstufe kann jede gewünschte Drehzahl erreicht werden und so kann bei Übersetzungen ins „Langsame“ der Einsatz von hochpoligen Antriebsmotoren entfallen.

Darüber hinaus kann das Differenzialgetriebe je nach Bedarf in den Hauptantrieb integriert (siehe **Bild 3**) oder als separate Baugruppe (siehe **Bild 2**) gefertigt und unabhängig vom Hauptantrieb als sogenannte „Stand-alone“-Variante implementiert und gewartet werden.

So logisch das Konzept auch klingt, erfordert es doch höchstes Know-how bei der Realisierung. Daher hat die SET in den Jahren 2009 bis 2010 sehr erfahrene Entwicklungsingenieure aus den Bereichen Windenergie, Getriebebau, Steuerungstechnik und Software sowie Elektronik

um sich gereiht, um das Projekt DSgear-set® zu realisieren. Unter der Verwendung modernster Berechnungs- und Designtools wurde der erste 3,0 MW-Getriebeprototyp entwickelt. Parallel dazu wurde der firmeneigene 3,0 MW-Prüfstand aufgebaut, auf dem seit Ende 2010 die Prototypen genauestens vermessen und getestet werden. Die dabei gewonnenen Resultate fließen direkt in die Weiterentwicklung und ermöglichen eine umfangreiche Echtlauf-Simulation unter Berücksichtigung verschiedenster Parameter. Somit wird bei der Entwicklung nichts dem Zufall überlassen. Es wird zum Beispiel die Festigkeit der Maschinenelemente mit der Finite-Elemente-Methode berechnet und die Verzahnungsgeometrie der Differenzialstufe mit modernsten Methoden ausgelegt. Störende Schwingungen werden mittels Mehrkörper-Simulation vorherberechnet, und es können rechtzeitig konstruktive Gegenmaßnahmen getroffen werden. Einflüsse, die von außen kommen, wie starke Drehzahländerungen bei Betriebszuständen oder über den Motor auf das Getriebe einwirkende Netzfehler, werden mittels numerischer Simulation (Matlab/Simulink) untersucht und dienen sowohl zur Auslegung des Differenzialsystems als auch zur Entwicklung regelungstechnischer Maßnahmen.

Sobald ein neuer Prototyp am Prüfstand ist, werden die Berechnungen validiert, um die Entwicklung weiter voranzutreiben. Zur Unterstützung in Schnittstellenbereichen kann die SET auf Entwicklungspartnerschaften bei der Entwicklung des Servomotors und zugehöriger Leistungselektronik zurückgreifen.

In einem Zeitraum von nur zwei Jahren konnten unterschiedliche Differenzialsysteme für den Einsatz in den Leistungsklassen von 2,0 bis 3,0 MW entwickelt, gebaut und umfangreich getestet werden. Als nächster Schritt erfolgt nun der Einbau in eine 2,0-MW-Windenergieanlage und in Hydro- sowie Industrieanwendungen, wodurch das von der SET entwickelte System als ernstzunehmende Alternative zu Mittelspannungs-Frequenzumrichtern am Weltmarkt auftritt.

## AUTOR



### ING. MAG. CHRISTOPH ALFRED PILGRAM

SET Sustainable Energy Technologies GmbH  
9020 Klagenfurt, Österreich  
Tel +43 508988-245  
christoph.pilgram@set-solutions.net