SONDERNUMMER

Turbo Magazine

100 Jahre Turbolader

Herausgeber: ABB Turbo Systems AG

ABB

› INHALT

2 › **Turboaufladung in der Schweiz – Geschichte mit Zukunft**
3 Die Pionierzeit
8 Der Durchbruch der Turboaufladung
16 Der Beginn des modernen Zeitalters
23 Ein Jahrhundert des Fortschritts

Sonderdruck: Auszug aus dem Turbo Magazine 2/2005

Seit 100 Jahren faszinierend

Das Jahr 2005 wird als besonderes Jahr in unsere Firmengeschichte eingehen. Einerseits, weil es zu den erfolgreichsten gehört, die wir bis zu diesem Zeitpunkt erleben durften. Anderseits, weil es uns daran erinnert hat, dass vor 100 Jahren ein wichtiger Grundstein für unseren Erfolg gelegt wurde. Denn 1905 hat ein überaus talentierter Winterthurer Ingenieur namens Alfred Büchi ein Patent hinterlegt, das ihn – zusammen mit weiteren – zum Vater der Turboaufladung macht.

Alfred Büchi suchte schon bald den Kontakt zu BBC, um seine «hochaufgeladene Verbundmaschine» Realität werden zu lassen. Nach anfänglichem Zögern seitens der BBC-Verantwortlichen ist dann glücklicherweise eine Zusammenarbeit zustande gekommen. Denn daraus entwickelte sich schliesslich eine der ganz grossen Erfolgsgeschichten des Industriestandortes Schweiz.

In den vergangenen 100 Jahren hat sich natürlich in jeder Hinsicht viel geändert. Geblieben ist, dass die Aufladung von Motoren unseren Alltag bestimmt. Geblieben ist unsere Faszination an unserem Fachgebiet. Und geblieben ist auch, dass es nach wie vor viel Wissen, Talent und Hartnäckigkeit braucht, um erahnte Fortschritte für unsere Kunden und für uns selbst zu nutzen.

Ich wünsche Ihnen viel Vergnügen bei der Lektüre dieses Artikels zur Geschichte der Aufladung und zu unseren Turboladern. Ich bin überzeugt, dass es Ihnen dabei so gehen wird wie mir: So einiges kommt einem bekannt vor, vieles aber ist immer wieder neu und faszinierend.

Ihr

Daniel Arnet

Turboaufladung in der Schweiz – Geschichte mit Zukunft

Dieser Sonderdruck des *Turbo Magazine* folgt den Spuren des ABB-Turboladers: von seinen Wurzeln im Büchi-Patent (1905), über die ausserordentlich erfolgreichen Jahre der VTR- und RR-Serien bis hin zu den heute aktuellen TPS- und TPL-Generationen.

Der Hightech-Abgasturbolader, den wir heute kennen, hat mit der ersten «hochaufgeladenen Verbundmaschine mit angeschlossener Abgasturbine», die Brown Boveri 1924 versuchsweise für einen 2-Takt-Motor baute, nicht mehr viel zu tun. Und trotzdem bestehen Gemeinsamkeiten. Bereits diese Maschine war ihrer Zeit voraus und ein Produkt früherer Erfindungen. Sie war inspiriert von einer Idee, die ein Schweizer Ingenieur im Jahre 1905 patentieren liess, und welche heute als Ausgangspunkt für Abgasturboaufladung gilt.

Baden – die Heimat des Turboladers.

DIE PIONIERZEIT

Diesel bringt den Stein ins Rollen

Die Geschichte des ABB-Abgasturboladers beginnt in einer Periode von phänomenalem technischem Fortschritt. In den ersten Jahren des 20. Jahrhunderts werden bemerkenswerte technische Durchbrüche erreicht. Ingenieure und Unternehmer sind überaus aktiv im Erfolg versprechenden Gebiet der thermischen Maschinen. 1892 lässt Rudolf Diesel einen nach ihm benannten Motor patentieren, dessen Wirkungsgrad bereits über 30 % liegt. Diesel erwähnt in einem frühen Patentanspruch auch die Möglichkeit der Turboaufladung. Da aber spätere Experimente nicht die erwartete Wirksamkeit zeigen, lässt er die Idee wieder fallen.

Die ersten Diesel-Motoren von MAN (Maschinenfabrik Augsburg-Nürnberg) in Deutschland und B&W (Burmeister & Wain) in Dänemark sowie weiterer Firmen können auf diese Zeit zurückverfolgt werden. Auch die Schweizer Maschinenfabrik Sulzer produziert seit der Jahrhundertwende in ihrer Fabrik in Winterthur Motoren. Und in Baden, weniger als 50 Kilometer entfernt, feiert eine gewisse elektrische Maschinenbau-Fabrik mit dem Namen Brown, Boveri und Cie ihr erstes Geschäftsjahrzehnt. Dabei lanciert sie eine hochinteressante neue Entwicklung: die erste Dampfturbine Kontinentaleuropas. Aus diesem Bereich der Technik wird später der Abgasturbolader entstehen.

Büchis Patent von 1905

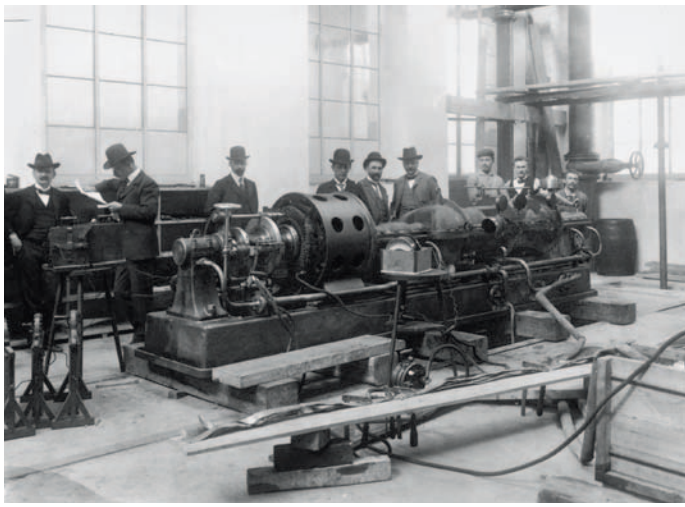
Der Schweizer Ingenieur, dem wir das Patent von 1905 verdanken, heisst Alfred Büchi und arbeitet zu jener Zeit bei Sulzer. In seinem Patent beschreibt er eine «hochaufgeladene Verbundmaschine» mit einem 4-Takt-Dieselmotor, mehrstufigem Axial-Kompressor und mehrstufiger Axial-Turbine, montiert auf einer gemeinsamen Welle. In einem späteren US-Patent geht Büchi dann noch weiter. In einem Unteranspruch beschreibt er ganz allgemein die Serienschaltung der beteiligten Maschinen.

Weitere Arbeiten von Alfred Büchi bei Sulzer führen 1909 zur Veröffentlichung seiner Idee für einen freilaufenden Turbolader und später, 1915, zu seinem wichtigen «Spülpatent». Im selben Jahr nimmt Büchi, auf der Suche nach einem Partner, mit Brown Boveri in Baden Kontakt auf, denn das Unternehmen verfügt zu dieser Zeit bereits über grosse Erfahrung in Design und Bau von Strömungsmaschinen. Die Verantwortlichen prüfen Büchis Vorschlag zur Zusammenarbeit, sehen aber, wie auch 1919 nochmals, davon ab. Man ist überzeugt, dass das Projekt als Ganzes unerwünscht und unwirtschaftlich ist. Unabhängig von dieser Entscheidung gibt es bei BBC Verfechter der Idee der Aufladung. Und es sollte nicht lange dauern, bis sie überzeugende Argumente zu ihren Gunsten finden.

Alfred Büchi

Parallele Entwicklungen

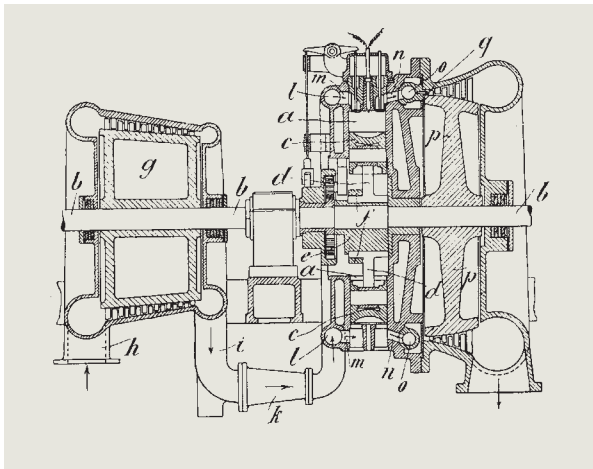
Um dieselbe Zeit werden in Frankreich unter der Leitung von Auguste Rateau und bei General Electric in den Vereinigten Staaten unter der Leitung von Sanford Moss die Arbeiten an turboaufgeladenen Flugzeugmotoren vorangetrieben.



Erste BBC-Dampfturbine. Dieser Bereich des Maschinenbaus sollte später den BBC-Abgasturbolader hervorbringen.

In einem 1916 angemeldeten Patent, das jedoch erst 1921 publiziert wird, beschreibt Rateau, der seit Anfang 1900 mit Brown Boveri in der Entwicklung von Gasturbinen zusammenarbeitet, Möglichkeiten zur Regulierung eines durch eine Abgasturbine angetriebenen Verdichters. Die Realisierung und die Erprobung einer solchen Einrichtung folgen 1917. Erst einige Zeit später anerkennen Alfred Büchi und andere Entwicklungsingenieure und Erfinder, dass Rateau die Ehre zukommt, den ersten Turbolader realisiert zu haben.

Moss ist der erste, der serienreife Turbolader gebaut hat. Interessanterweise hatte der GE-Moss-Turbolader eine handgesteuerte Bypass-Klappe, die es bei gewissen Flugbedingungen möglich machte, die Abgase

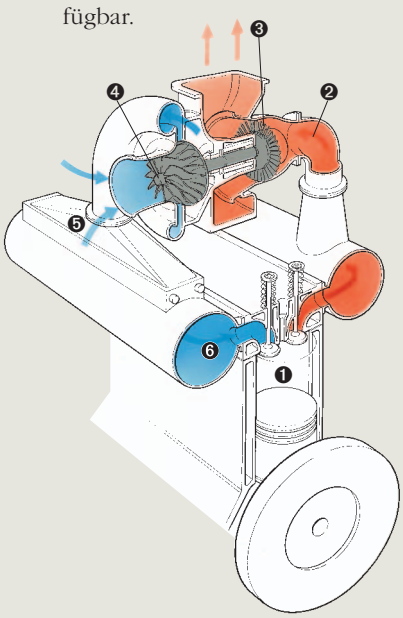


Der Verbundmotor des Büchi-Patentes ist der Ausgangspunkt der Abgasturboaufladung.

Foto: Baden Tourist Office

Wie Turboaufladung funktioniert

Die Leistung eines Verbrennungsmotors hängt einerseits von der Menge Luft und Brennstoffgemisch ab, die in die Zylinder gepresst werden kann ❶, und anderseits von der Drehzahl der Kurbelwelle. Turbolader führen Luft mit hohem Druck zum Motor. Dadurch wird mehr Luft in die Zylinder gepresst und somit für die Verbrennung verfügbar.



Ein Abgasturbolader wird, wie der Name schon sagt, von den Abgasen eines Motors angetrieben ❷. Diese bis gegen 600°C warmen Gase werden mit hoher Geschwindigkeit auf Turbinenschaufeln geleitet ❸, welche wiederum das auf derselben Welle montierte Verdichterrad ❹ antreiben. Während der Rotation saugt das Verdichterrad durch einen Filter-Schalldämpfer Umgebungsluft an. Die Luft wird komprimiert und durch einen Kühler ❺ dem Luftbehälter des Motors ❻ zugeführt und von dort weiter zu den Zylindern geleitet.

Turboaufladung steigert die Motorenleistung um bis das Vierfache. Daher sind 75 % der Motorenleistung auf den Turbolader angewiesen.

unter Umgehung der Gasturbine abzublasen. Solche Klappen bezeichnen wir heute als Wastegate.

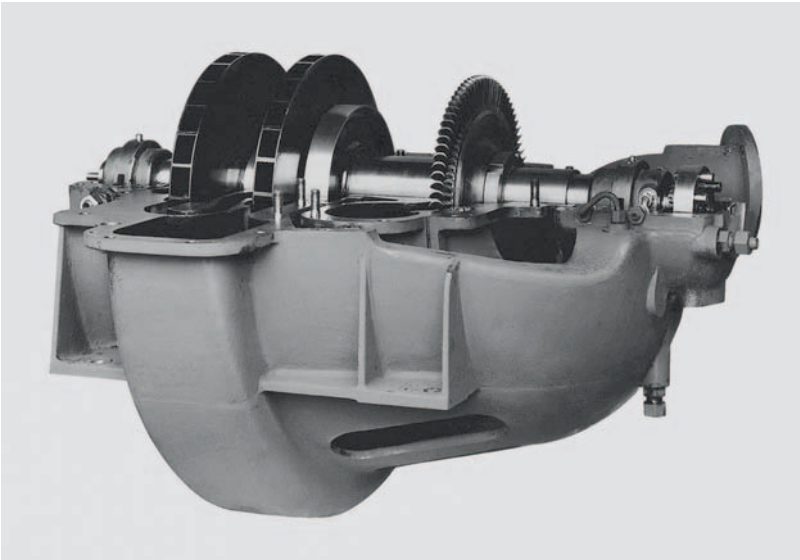
Flugzeuge mit turboaufgeladenen Motoren sind gegen Ende des Ersten Weltkrieges und bis kurz danach im Einsatz. Dann werden die Entwicklungsarbeiten eingestellt.

Das Potenzial der Turboaufladung wird erkannt

1923 ändert BBC ihre Strategie. Denn in Deutschland wird ein Bericht veröffentlicht, der die Niederdruck-Aufladungs-Versuche von MAN an einem 160-rpm-4-Takt-Motor beschreibt. Die Versuche zeigten, dass mit nur 1,35 bar Ladedruck die Motorenleistung um 33 % steigt, und dies nach Abzug der Leistung des elektrisch angetriebenen Gebläses. Die Nutzung der Abgasenergie zum Antrieb des Verdichters versprach eine weitere Leistungssteigerung von 6 bis 8 % sowie eine Einsparung beim Verbrauch. Ausserdem blieben Zünddruck, Verbrennungstemperaturen und Wandwärmebelastung innerhalb der zulässigen Grenzen. BBC entscheidet sich deshalb dafür, ihr Know-how aus dem Turbinen- und Verdichter-Bau für die Entwicklung von Turboladern zu nutzen.

Die ersten Schiffe mit aufgeladenen Motoren

1923 ist auch das Jahr, in welchem die Vulkan-Werft in Stettin den Auftrag erhält, für die Ost-Preussische-Linie zwei grosse Passagierschiffe zu bauen (die *Preussen* und die *Hansestadt Danzig*). Jedes Schiff wird von zwei von MAN in Lizenz gebauten 10-Zylinder-4-Takt-Motoren angetrieben, die von 1750 auf 2500 PS aufgeladen werden. Die Motoren haben eine Abgas-Sammelleitung (oder: Abgas-Receiver) für alle Zylinder, was bedeutet, dass sie unter konstantem Druck arbeiten. Die Turbolader, konstruiert und gebaut unter Aufsicht von Alfred Büchi, werden in den Vulkan-Werken in Hannover hergestellt. BBC Mannheim liefert die entsprechenden Verdichterräder. Nach einer Testphase im Mai 1926 werden sie im darauf folgenden September in den Schiffen installiert. Der *Preussen* und der *Hansestadt Danzig* kommt damit die Ehre zu, die ersten Schiffe in der Marinegeschichte mit turboaufgeladenen Motoren zu sein.



Der weltweit erste Turbolader für einen grossen Dieselmotor wird 1924 ausgeliefert. Er verfügte über aussenliegende Gleitlager und einen zweistufigen Verdichter für ein Druckverhältnis von 1,35.

So wichtig dieses Ereignis aber auch ist: Wollen wir den ersten industriell gefertigten Abgasturbolader finden, müssen wir drei Jahre zurückblenden.

Der weltweit erste Hochleistungs-Abgasturbolader

1923 untersucht die wie Sulzer in Winterthur beheimatete Schweizer Lokomotiven und Maschinen Fabrik (SLM) den möglichen Nutzen der Motorenaufladung. SLM hat in diesem Jahr einen 2-Takt-Versuchsmotor auf dem Prüfstand, der bei weniger Treibstoffverbrauch mehr Leistung produzieren soll. Brown Boveri empfiehlt den Einsatz eines Abgasturboladers, der in das Spülgebläse fördert. SLM bestellt die entsprechende Maschine und im Juni 1924 verlässt der erste Hochleistungs-Abgasturbolader, ein VT 402[1], die Werkstätten in Baden.

Zu dieser Zeit beginnen zudem die Gespräche von BBC mit Büchi über eine Zusammenarbeit.

[1] V steht für Verdichter, T für Turbine; 400 bezeichnet den ungefähren Durchmesser des Verdichterrades in mm; 2 steht für zweistufig.

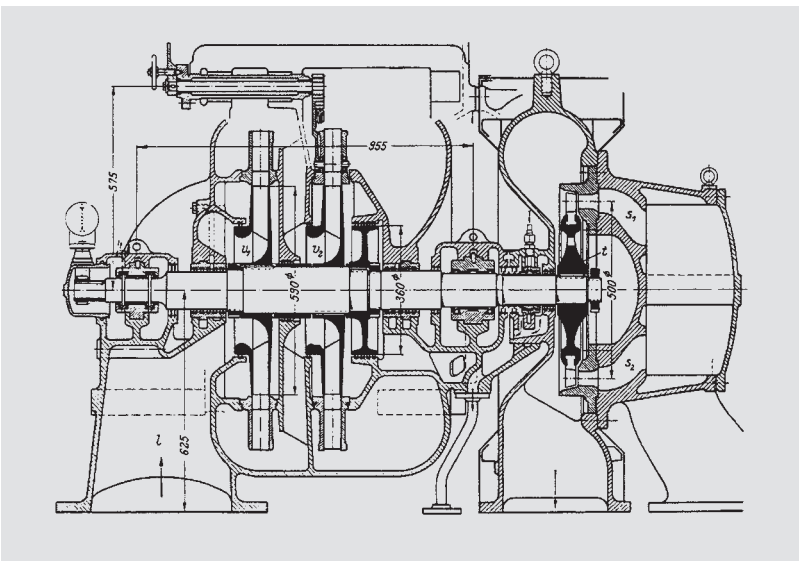
Das «Büchi Syndikat»

Dann geht alles ganz schnell. Ein Jahr später, 1925, bringt Büchi jenes Patent heraus, das ihn weltberühmt macht. Dieses so genannte «Hauptpatent» zeigt die Vorteile der Pulsation für Niederdruck-Aufladung *(siehe Kastentext)*. Das ist der Durchbruch, auf den alle gewartet haben.

Im folgenden Jahr wird unter dem Namen «Büchi Syndikat» eine neue Gesellschaft gegründet mit dem Zweck der Weiterentwicklung der «Verbund-Verbrennungskraftmaschine mit Abgasturbine und Aufladepumpe». Alfred Büchi ist dabei für Konstruktion und Kundenbeziehungen zuständig, BBC kümmert sich um die Produktion und SLM stellt die Diesel-Versuchsmotoren.

Partnerschaft mit Motorenbauern

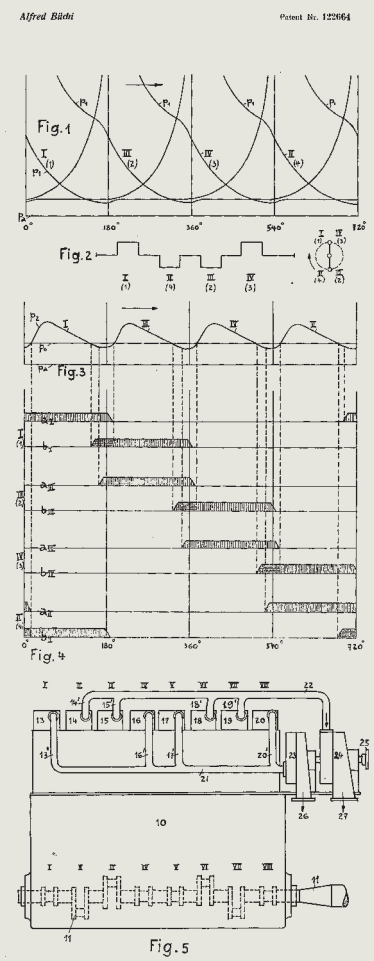
1927 wird ein grösserer und verbesserter Turbolader, der VT 592, als zweiter Versuchslader an SLM geliefert. Die Ergebnisse sind beeindruckend. Das Syndikat trifft Vereinbarungen mit zahlreichen führenden Motorenbauern. Andere An-

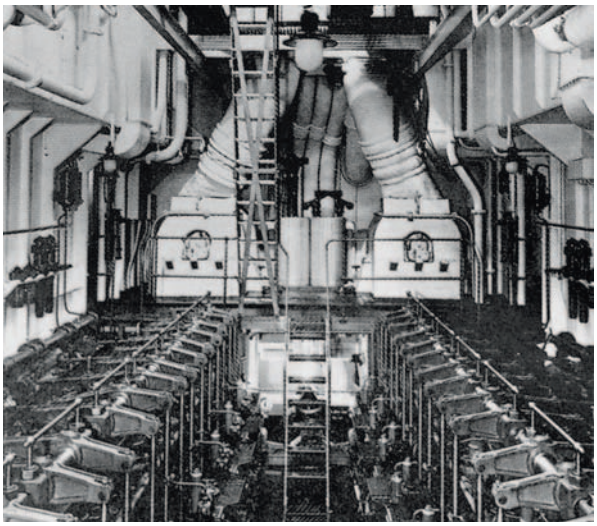


VT 592-Turbolader für den zweiten SLM-Versuchsmotor, 1927 geliefert.

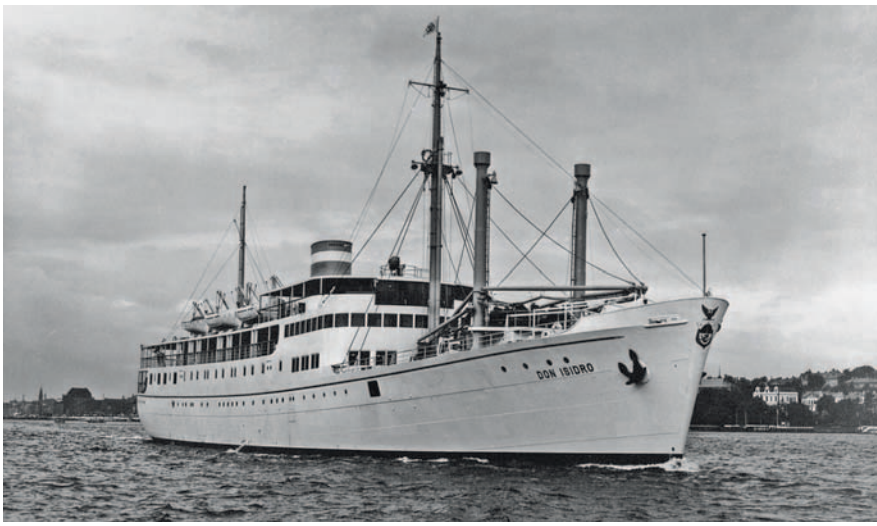
Das Büchi-Hauptpatent

Ein so genanntes «Stosssystem» führt die Abgase eines Motors durch enge Leitungen zu der Turbine des Turboladers und treibt somit den Verdichter an. Die Druckunterschiede in den engen Leitungen ermöglichen ein Überlappen des Einlasses und des Auslasses, was eine Spülung des Komprimierungsbereiches in den Zylindern mit sauberer Luft zulässt. Die Zylinder, welche das gegenseitige Spülverfahren nicht beeinträchtigen, sind mit einer Abgasleitung gemäss der Zündfolge des Motors verbunden. Dieses Büchi-Patent aus dem Jahr 1925 ist die Basis für den zukünftigen Erfolg der Turboaufladung.





Ansicht des Maschinenraums der *MS Don Isidro*. Die VTx590-Turbolader sind auf einer Plattform hinter den Motoren montiert.



Die *MS Don Isidro* war in den späten 1920er Jahren unter der Flagge der «de la Rama S.S. Co.», Manila, unterwegs. Bestückt mit zwei turboaufgeladenen 9-Zylinder-Krupp-Dieselmotoren, mit einer Leistung von je 3500 PS.

wendungsgebiete für Turboaufladung werden evaluiert, so beispielsweise für dieselelektrische Lokomotiven. Und auch für den Einsatz in Dieselkraftwerken drängen sich die Turbolader nachgerade auf.

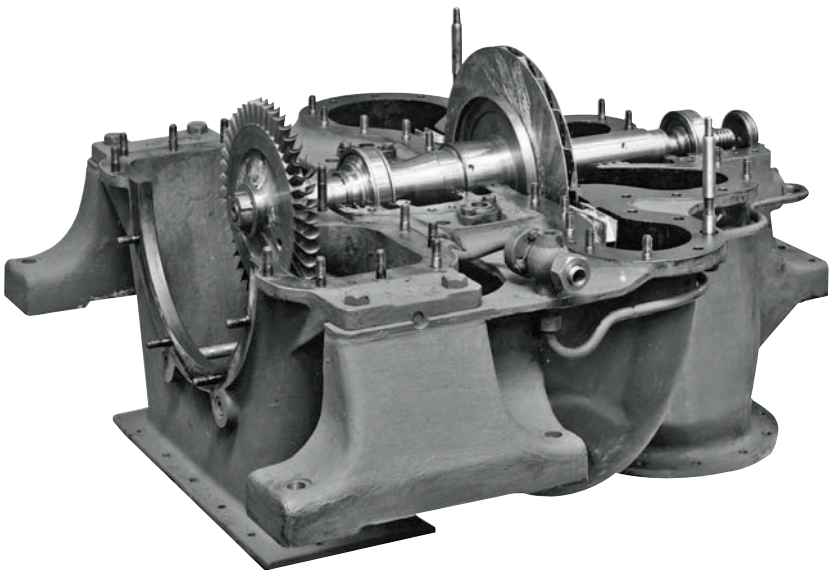
Von 1928 an ist das Handelsmagazin «The Motorship» gefüllt mit Berichten über neue Schiffe mit aufgeladenen Motoren. Fotos aus dieser Zeit zeigen, dass der Turbolader an der Längsseite des Motors stand und über lange, unterteilte Abgasleitungen mit dem 4-Takt-Motor verbunden war. Dies erlaubte natürlich nur einen schwachen Stossbetrieb, was aber für die damaligen langsamlaufenden Motoren ausreichte.

Mit der anhaltenden Entwicklungstätigkeit treten neue Lösungen zu Tage. So werden nach 1930 kompaktere Installationen Wirklichkeit dank Turboladern mit vertikaler Achse, welche direkt auf dem Motor montiert werden können. Und obwohl die Turbolader immer noch horizontal getrennt sind, werden sie mit der Einführung eines einstufigen Verdichters sowie verbesserter Turbinenschaufeln einfacher. Brown Boveri arbeitet nun mit den grossen deutschen Motorenbauern, darunter Daimler Benz, KHD (Kloeckner-Humboldt-Deutz) und MAN. Herausragende Resultate sind die Folge.

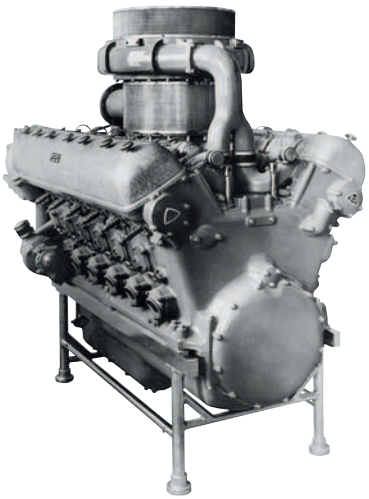
Brown Boveris wachsende Bedeutung manifestiert sich auf besondere Art: Die Gesellschaft berät ihre Kunden bezüglich der Installation von Turboladern, Luft- und Gasleitungen und bei den Steuerzeiten der Ventile. Das Wissen um die Interaktion von Motor und Turbolader wird zum Kernstück des BBC-Erfolges.

Die ersten standardisierten Modelle

1932 fallen bei BBC einige wichtige Konstruktions-Entscheide, die zu technisch optimalen Lösungen führen. Auf dieser Grundlage formulieren die Konstruktionsingenieure die Spezifikationen für eine standardisierte Laderreihe mit neun Grössen von 110 bis 750 (Verdichterdurchmesser). Einheiten mit horizontaler Achse werden VTx genannt. VTy



BBC-Turbolader mit einstufigem Verdichter und fliegend angeordnetem Gasturbinenrad (ca. 1930).



VTy410-Turbolader mit Vertikalachse, montiert auf einem Maybach 12-Zylinder-Viertakt-Bahnmotor.

steht für Einheiten mit vertikaler Achse. Viele ihrer Eigenschaften und Fähigkeiten wie zum Beispiel (selbst schmierende) externe Kugellager, Wasser-Kühlung und die weit gehende Verwendung von Standard-Teilen, sind entstanden, um die Service-Arbeiten einfacher zu machen. Die modulare Bauweise schliesslich bewirkt, dass die Turbolader auf eine enorme Bandbreite von Motoren angepasst werden können.

In der zweiten Hälfte der 1930er-Jahre nehmen die Lieferungen von Turboladern stark zu. Die Zahl der Lizenznehmer steigt und das Geschäft mit Zugwagen boomt. (1938 machten die VTy 410-Turbolader, ein Vertikal-Achsen-Modell für Zugwagen, fast ein Drittel aller Verkäufe aus.) Der US-Markt interessiert sich, der Bestellungseingang aus diesem Raum zieht an. Einer der ersten US-Kunden ist der amerikanische Lokomotivenbauer ALCO (American Locomotive Company).

Herausforderung 2-Takt-Motor

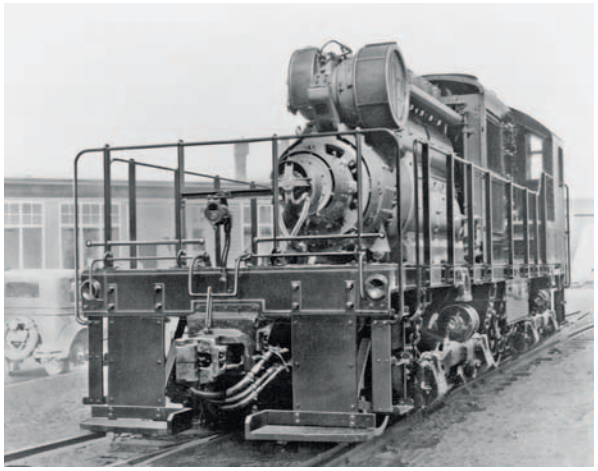
Die sprunghafte Leistungsverbesserung bei den Dieselmotoren in den 1920ern liegt an der direkten Brennstoffeinspritzung und an der Aufladung. Vor allem dank der Aufladung können die 4-Takt-Motoren ihre Position gegenüber den 2-Taktern stärken. Aber auch das 2-Takt-Motorengeschäft steht nicht still. MAN und Sulzer beispielsweise kommen Anfang 1930 bei ihren Experimenten an 2-Takt-Motoren zu interessanten Ergebnissen, wenn auch keiner der beiden Motoren annähernd die Resultate der 4-Takter erreicht.

Entwicklungen in der 2-Takt-Aufladung

Brown Boveri meldet ihr Interesse an der 2-Takt-Turboaufladung mit dem Kauf des «Curtis»-Patents bereits im Jahr 1925 an. Dieses Patent hat die so genannte «Serienanordnung» zum Inhalt. Dabei führt der Turbolader Luft in ein mechanisches Spülgebläse eines 2-Takt-Motors und garantiert somit Start und Betrieb bei niedriger Last. Sobald die Motorenleistung ansteigt, wird das Gebläse automatisch weniger beansprucht.

Eine interne Studie von BBC aus dem Jahr 1934 behandelt die Aufladung eines 5000-PS-Sulzer-2-Takt-Motors. Sie zeigt, dass der Lader fähig sein sollte, mit Ladeluftkühlung und Stossbetrieb unter Volllast genügend Luft anzusaugen. Auch Teillast-Lösungen wie Hilfsgebläse und Zusatzantriebe werden in der Studie erwähnt. Später dann, im Jahr 1940, wird die Aufladung eines 7500-PS-2-Takt-Motors von Sulzer mit einem Prototypen, dem VTx 750 (Radialrad), getestet. Die Resultate sind enttäuschend, weitere Tests werden ausgesetzt.

Somit bleibt die Aufladung mittels Abgasturboladern bis nach dem Zweiten Weltkrieg den 4-Takt-Motoren vorbehalten. Die Aufladung von 2-Taktern mit ihren tiefen Abgas-Temperaturen und ihrer Abhängigkeit von einem Gebläse zum Gasaustausch ist aufgrund der geringen Turbinen- und Verdichter-Effizienz schwierig. Erst als Verdichter und Turbinen mit besseren Wirkungsgraden entwickelt sind, wird die Aufladung auch für die langsamlaufenden 2-Takt-Motoren interessant. Die Verwendung von Abgasturboladern nimmt schnell zu und trägt wesentlich dazu bei, dass sich in der Schiffahrt die 2-Takter schon bald als Hauptantrieb durchsetzen.

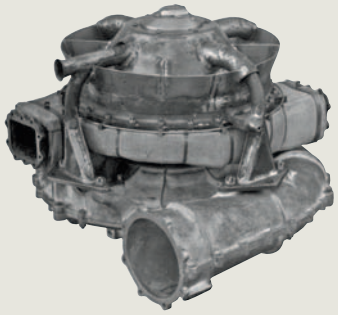


Der ALCO-8-Zylinder-Motor mit 900 PS ist ein typisches Beispiel für den Einsatz von BBC-Turboladern in den späten 1930er-Jahren (in diesem Fall ein VTx 350).

Diese Lokomotive der Schweizerischen Bundesbahnen war über 50 Jahre im Einsatz. Sie wurde 1939 an der Landesausstellung vorgestellt und in den 1990ern ausser Betrieb gesetzt. Die SBB-Lok war ausgestattet mit einem VTx 350-Turbolader und brachte eine Leistung von 1200 PS bei 750 Umdrehungen pro Minute.

Ein kurzer Ausflug in andere Gebiete

Auf der Suche nach neuen Absatzmärkten arbeitet Brown Boveri in den Jahren vor und während des Zweiten Weltkrieges an Turboladern für die Flugzeugindustrie. Dies bringt interessante Herausforderungen mit sich, wie zum Beispiel die Probleme, welche der bei zunehmender Höhe sinkende Luftdruck verursacht. Rückblickend ist dieser Ausflug ins Fluggeschäft indes nicht mehr als eine kurze Episode in der Firmengeschichte.



VTF201 BBC-Flugmotoren-Turbolader mit einem Gewicht von 32 kg.

1940 wendet das Unternehmen seine Aufmerksamkeit auf das besondere Gebiet der Holz-Gas-Aufladung. Flüssige Brennstoffe sind knapp während des Krieges und die Umwandlung von Diesel- in Holz-Verbrennungsmotoren scheint ein gangbarer Weg zu sein, um die Verfügbarkeit von Strassenfahrzeugen zu sichern. Die umgebauten Motoren aber sind sehr schwach und Turboaufladung wird als Lösung des Problems gehandelt. Doch auch dieses Projekt ist von kurzer Dauer. Das Experiment wird fallen gelassen, sobald nach dem Krieg der günstige flüssige Brennstoff wieder ausreichend zur Verfügung steht.

6-Tonnen-Lastwagen mit 100-PS-Dieselmotor, umgerüstet zu einem Holzgas-Generator (rechts, hinter der Türe). Der Eintritt für den VTx 110-Turbolader ist oberhalb des rechten Kotflügels.

DER DURCHBRUCH DER TURBOAUFLADUNG

Der VTR..0 wird lanciert

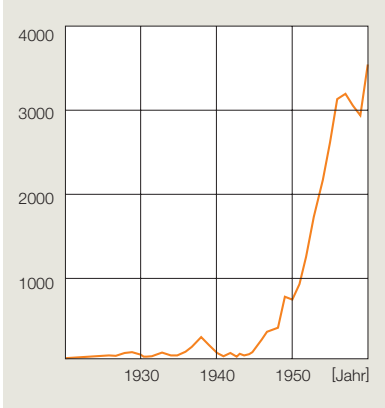
Ab 1940 hat Brown Boveri einen neuen Turbolader in der Entwicklung, den so genannten VTR. Er verfügt über einen offenen Radialverdichter (daher das R) und leichte Rotoren, elastische, flexibel montierbare externe Rollenlager sowie ein Eigenschmier-System. Die Standardisierung seiner Komponenten macht die Massenproduktion möglich, welche wiederum wettbewerbsfähige Preise erlaubt. Die Einführung der VTR..0-Baureihe nach dem Zweiten Weltkrieg ist denn auch ein wichtiger Meilenstein in der Geschichte der BBC-Turbolader. Mit einem Verdichter-Wirkungsgrad von 75 % bei einem Druckverhältnis von 2 markiert der VTR..0 den Beginn einer neuen Ära.

Es ist nun möglich 2-Takt-Motoren mit maschinell angetriebenen Spülpumpen zu laden. Um die Spülpumpen zu umgehen und gleichzeitig den Brennstoffverbrauch zu reduzieren, ist jedoch eine stossartige Turboaufladung gefragt. Es sollten aber noch einige Jahre vergehen, bis dieses System 1951 auf einem B&W Marinemotor erfolgreich eingesetzt wird.

Das Büchi-Syndikat hat sich in der Zwischenzeit aufgelöst. Brown Boveri hat ihre eigene Turbolader-Entwicklungs-Abteilung etabliert und verfügt über ein eigenes Test-Center und eigene Werkstätten. Der entscheidende Schritt weg von der individuellen hin zur industriellen Turbolader-Fertigung ist gemacht und bereits sind erste Anzeichen des weltweiten Service-Netzwerkes zu erkennen.

Der Nach-Kriegs-Boom ...

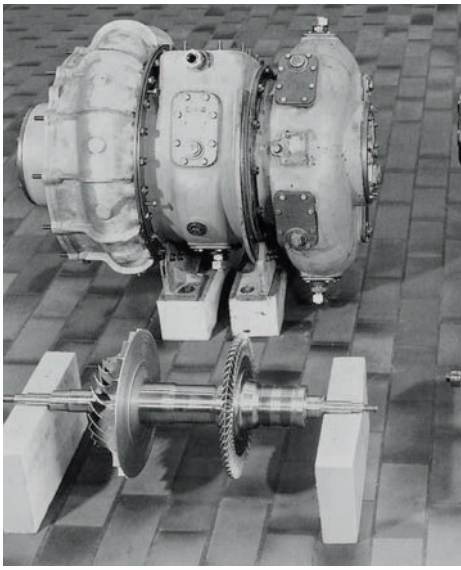
In den Nachkriegsjahren besteht eine ungeheure Nachfrage nach Turboladern. Und eine Entwicklung verleiht ihr besonderen Schub: Öl setzt sich als wichtigste und bevorzugte Energiequelle durch. Während der nächsten Dekade verdoppelt sich die weltweite Handelsflotte, die Tanker-Kapazität legt sogar noch stärker zu. Die bevorzugte Antriebskraft dieser Schiffe ist: der Dieselmotor.



Die Nachfrage nach BBC-Turboladern war in der Nachkriegszeit sehr gross. Anzahl jährlich gelieferter BBC-Turbolader (ohne Lizenznehmer).

... und der definitive Durchbruch

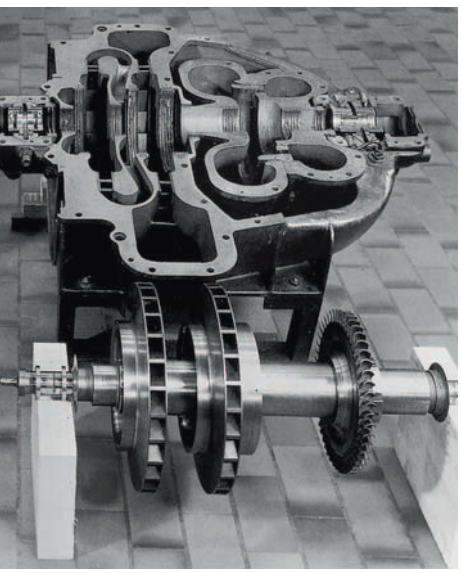
Zwischen 1945 und 1960 setzt sich die Motorenaufladung definitiv durch, zuerst für die 4-Takt-, dann ab 1951 auch für die 2-Takt-Motoren. Der Absatzschwerpunkt liegt vorerst ganz in der Niederdruck-Aufladung



(Druckverhältnis bis 1,5). Die Ladedrücke nehmen langsam und stetig zu. Der ursprüngliche VTR-Turbolader kann entweder mit einem Niederdruck- oder einem Hochdruck-Verdichter ausgerüstet werden, wobei Letzterer beeinträchtigt wird von einer eingeschränkten volumetrischen Durchflussrate. Die Verdichter-Entwicklung der folgenden Jahre merzt dieses Manko aus, das Druckverhältnis bei Volllast kann dann auf bis zu 3 gesteigert werden.

In dieser Periode bestehen verschiedene wichtige Zusammenarbeitsvereinbarungen mit Motorenbauern, von denen einige mit hohen Ladedrücken experimentieren. MAN, zum Beispiel, entwickelt in dieser Zeit einen hochaufgeladenen 4-Takt-Motor mit einem effektiven Gesamtwirkungsgrad von 45% – ein Wert, der für einige Zeit unerreicht bleibt.

Einmal mehr wird klar, wie wichtig die Beziehung von Motorenbauern und Turbolader-Lieferanten ist. Denn die neue Technik will den Verbrennungsmotor-Konstrukteuren zuerst erklärt sein. Sie müssen wissen, wie sie die Auspuffenergie mit Stossbetrieb am besten nutzen können. In vielen Fällen geht es auch darum zu zeigen, wie die Abgasleitungen am besten konstruiert werden.



Strategische Entscheidungen

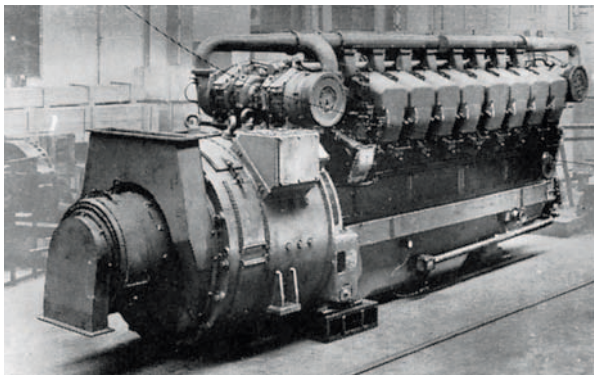
In die Nachkriegszeit fallen einige Entscheidungen, welche die Leitplanken für die kommenden Jahrzehnte setzen und letztendlich eine wichtige Rolle bei der weltweiten Marktakzeptanz der BBC-Turbolader spielen.

Um bereit zu sein und Marktanteile dazuzugewinnen, sobald 1950 der Patentschutz für Alfred Büchis Hauptpatent in den USA auslaufen würde, unternimmt BBC grosse Anstrengungen zur Etablierung der Kontakte mit amerikanischen Motorenbauern. Aber es ist schwierig, mit den in den USA gebauten Niederdruck-Ladern zu konkurrieren. Schnell wird klar, dass sich Brown Boveri auf Hochdruck-Aufladung konzentrieren muss. Dort kann sie mit ihrem technischen Verständnis und ihrer Beratungsleistung den Kaufentscheid zu ihren Gunsten beeinflussen. Als Teil der Langzeit-Strategie für den US-Markt entsteht zudem eine eigene Service-Organisation.

Die Präsenz in den USA hat einen weiteren Vorteil: BBC kann sich dank Bestellungen für stationäre Gasmotoren schon sehr früh Fachkenntnisse und Erfahrungen mit dieser wichtigen Anwendung aneignen.

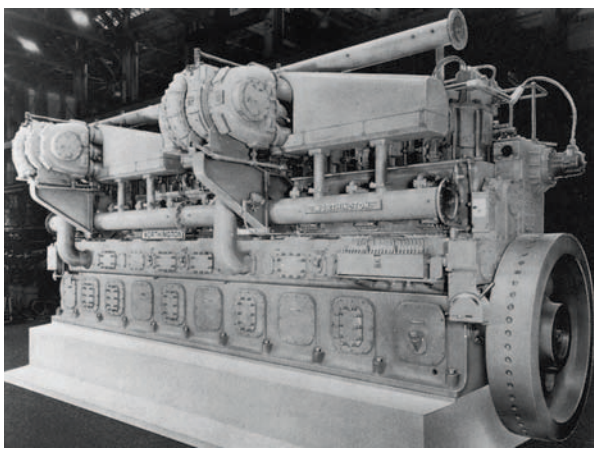
1958 wird eine weitere wichtige strategische Entscheidung gefällt: die Vergabe der Produktionslizenz an Ishikawajima-Harima Heavy Industries (IHI) in Japan. IHI, zu dieser Zeit auch Lizenznehmerin von Sulzer, setzt sich im gesamten asiatischen Raum durch und verschafft so den BBC-Ladern eine dominante Stellung in diesen Märkten. (Die Zusammenarbeit führt 1998 zu Turbo Systems United (TSU), ein Joint Venture von ABB Turbo Systems und IHI.)

Der Fortschritt des Turboladerbaus von 1924 bis 1945: Der kompaktere, für die gleiche Motorengrösse konstruierte VTR 320 (links) erzielt einen viel höheren Ladedruck als der ältere VT 402.



In den Nachkriegsjahren kam es zu verschiedenen wichtigen Zusammenarbeiten mit Motorenbauern, unter anderem mit «English Electric», deren beliebter V16 4-Takt-Motor mit vier VTR 200-Turboladern bestückt war.

Produktion in der neuen Turboladerfabrik (nach 1949).



10-Zylinder-Erdgasmotor in den USA, mit zwei VTR 400-Einheiten.

Die von ABB auch heute noch durchgeführte *Shipowners Conference* und der *ABB Evening* am CIMAC-Kongress sind Kundenveranstaltungen, die in den 1950er-Jahren entstanden sind. Es sind exzellente Gelegenheiten, der Schiff- und Motorenbau-Gemeinschaft die neusten Entwicklungen bei der Aufladung von Motoren näher zu bringen.

Der 18'000-Tonnen-Tanker *Dorthe Maersk* war das erste Schiff mit turboaufgeladenem 2-Takt-Dieselmotor.

Dorthe Maersk

Konstante Verbesserungen bei der Turbolader-Technik bereiten in den frühen 1950er-Jahren den Boden für die nächste Pioniertat. Im Oktober 1952 läuft der 18'000-Tonnen-Tanker *Dorthe Maersk* vom Stapel. Gebaut von der Dänischen Werft A.P. Møller, ist sie das erste Schiff mit einem aufgeladenen 2-Takt-Diesel-Motor (B&W, 6 Zylinder) als Hauptantrieb. Zwei seitlich montierte VTR 630-Turbolader sorgen für eine Leistungssteigerung von 5530 PS auf 8000 PS. Dorthe Maersk steht für den Durchbruch der 2-Takt-Aufladung im Marine-Segment.

Asien im Fokus

Die Jahre zwischen 1955 und 1975 sind eine Zeit des Umbruchs für die Schiffbauindustrie. In dieser Zeit verschieben sich die weltweiten Schiffbauaktivitäten um mehr als die Hälfte nach Japan. Westeuropa verliert im Gegenzug 40 % an Welt-Tonnage.

Und es gibt auch noch andere Zeichen der Veränderung. Mitte der 50er ist es für japanische Lizenz nehmende Firmen nicht unüblich, neue Entwicklungen zuerst auf den Prüfstand zu stellen. Das ist beispielsweise der Fall bei Mitsubishi Heavy Industries (MHI) in Kobe, als das Unternehmen 1955/56 den ersten grossen 2-Takt-Sulzer-Schiffsmotor, einen 7-Zylinder-RSA 76 (706 mm Durchmesser), mit zwei VTR 630-Einheiten testet.

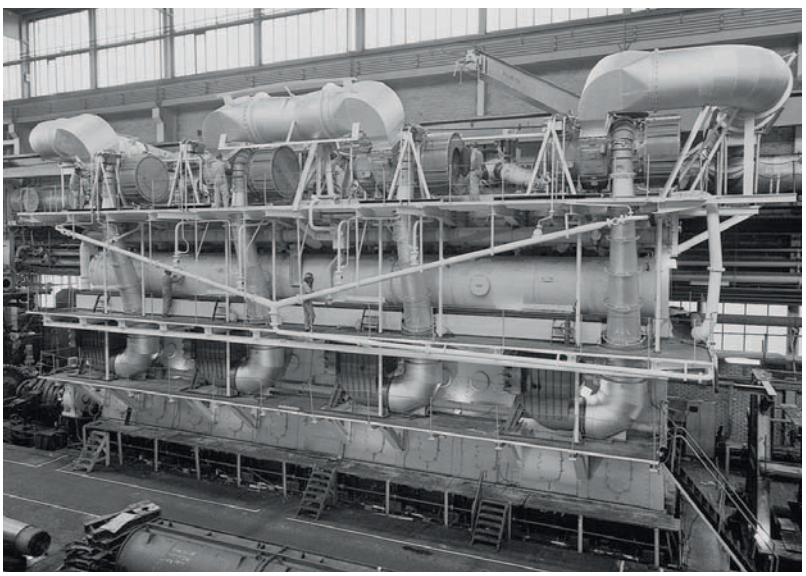
Der Schiffbau boomt

IHI ist natürlich nicht die einzige Firma, die BBC-Turbolader fertigt. Zwischen Mitte 1950er- und Mitte 1970er-Jahre be- und entstehen diverse wichtige Lizenzvereinbarungen, so unter anderen mit Firmen in China, Indien und Südkorea. Die Strategie wird bis in die späten 1970er- und 1980er-Jahre weiterverfolgt. Der Schiffbau ist auf Rekordhöhe, die Schiffe werden grösser und schneller. Die Rohöl-Preise sind tief, die Brennstoff-Kosten vernachlässigbar – die Dieselmotoren-Industrie floriert.

Der VTR..0 ist mit Wirkungsgraden um die 56 % auf seinem Höhepunkt; mit BBC-Turboladern aufgeladene Motoren brechen bezüglich Leistung und Wirkungsgrad einen Rekord nach dem anderen.

2-Takt-Markt-Entwicklungen

An diesem Punkt lohnt es sich, kurz den Hintergrund für die anstehenden grossen Entwicklungen im Bereich

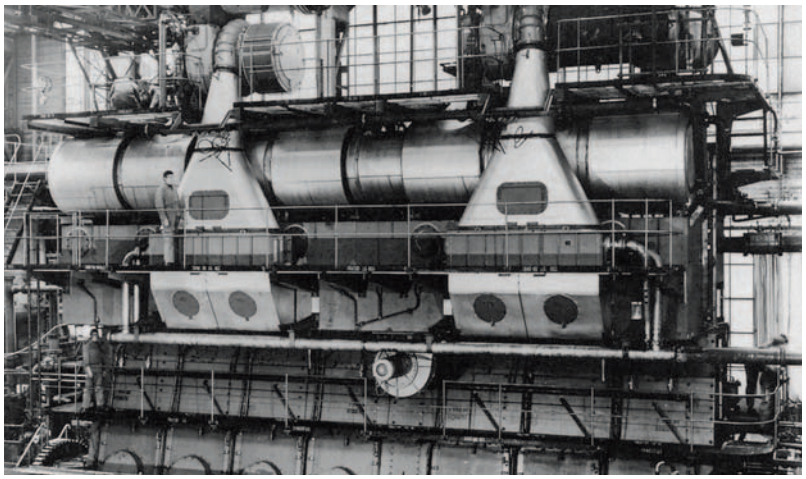


Eriksberg B&W-Motor Typ 10K98FF mit 38'000 PS (27'950 kW), bei 103 Umdrehungen pro Minute, ausgerüstet mit vier VTR 750-Einheiten.

Aufladung von 2-Takt-Motoren auszuleuchten: Das Stosssystem, welches 1951 von B&W eingeführt wird, hat den Vorteil, dass kein mechanisches System benötigt wird, um über den gesamten Lastbereich genügend Luft zuzuführen. Dies ist zum Teil möglich durch die dank der Wälzlager hohe mechanische Effizienz der VTR-Turbolader. Die benötigte Abgasenergie wird mit dem frühen Öffnen der Auslassventile erreicht, obwohl dies den effektiven Expansionshub reduziert.

Ein Motor mit Spülpumpen und gleichmässiger Druckaufladung erlaubt eine viel spätere Öffnung des Auslassventils, was allerdings einen Energieverlust bei der Luftzufuhr von der Kurbelwelle bewirkt. Somit treibt der Motor die eigenen Spülpumpen an, was in etwa dem Brennstoffverbrauch beim B&W-Stosssystem entspricht.

Um den Brennstoffverbrauch zu optimieren, sind eine gleichmässige Turboaufladung und die Elimination der Spülpumpen die offensichtliche Lösung. Dies aber erfordert Turbolader mit höheren Wirkungsgraden, die zu diesem Zeitpunkt noch nicht verfügbar sind.



Sulzer 7 RND 90 2-Takt-Dieselmotor mit zwei VTR 631-Turboladern auf dem Prüfstand (1971).

Der VTR..1 tritt auf

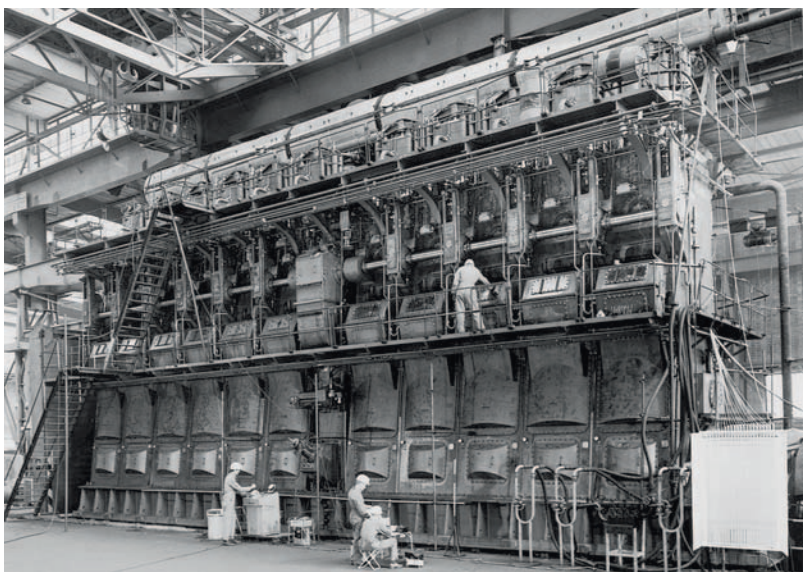
Neue Verdichter mit höheren Wirkungsgraden, Druckverhältnissen und grösseren Durchflüssen werden in den 1950er- und 1960er-Jahren entwickelt. Höhere Druckverhältnisse bedeuten mehr Geschwindigkeit, die sich auf die Axiallast und die Lagerspannung auswirkt. Auch die Aufhängungen müssen verstärkt werden. 1970 werden Verdichter mit einem noch grösseren Durchfluss eingeführt und das Gasaustrittsgehäuse wird vergrössert. Auch der Turbineneintrittstutzen wird überarbeitet.

All diese Verbesserungen werden 1971 in einer neuen Reihe sichtbar: der VTR..1. Brown Boveri kann nun Turbolader mit einem Wirkungsgrad von bis zu 60% anbieten, die einen weiten Bereich von Anwendungen möglich machen. Wenn in der Vergangenheit eine lineare Steigerung der Effizienz vorherrscht, so wird hier nun der erste wirkliche Sprung nach vorne verwirklicht.

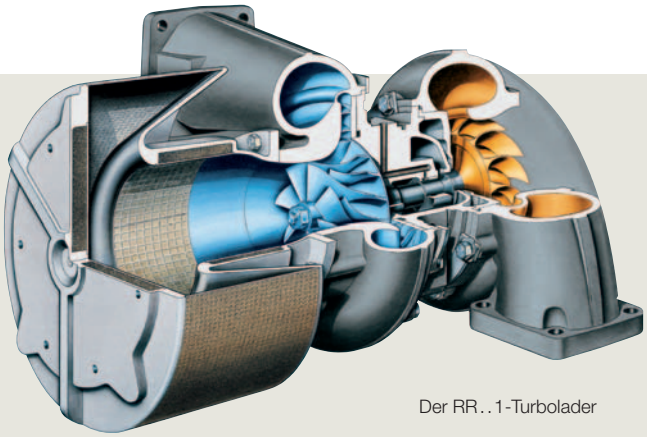
RR stützt das untere Ende

1968, drei Jahre bevor der VTR..1 eingeführt wird, bringt Brown Boveri unter dem Namen RR – er verweist auf die radiale Turbine und den radialen Verdichter – eine Baureihe kleiner Turbolader auf den Markt. Sie sind für Anwendungen am unteren Ende des VTR-Leistungsbereiches gedacht.

Der RR erfüllt ein Marktbedürfnis, das seit geraumer Zeit zunimmt. Bis Mitte der 1960er-Jahre bauen viele Firmen Turbolader, die die VTR-Lader im untersten Leistungsbereich konkurrenzieren. Kleinere, leichtere Turbolader sind gefragt für die zu jener Zeit modernen, schnelllaufenden Dieselmotoren im unteren Leistungsbereich. Konstruiert mit Gleitlagern für hohe Beanspruchungen erreicht der RR 150 Verdichterverhältnisse von bis zu 3,0 bei Volllast.



Drei VTR 630-Turbolader installiert auf einem Götaverken-Motor des Typs VGS11U mit 26'400 PS (19'000 kW) bei 119 Umdrehungen pro Minute.

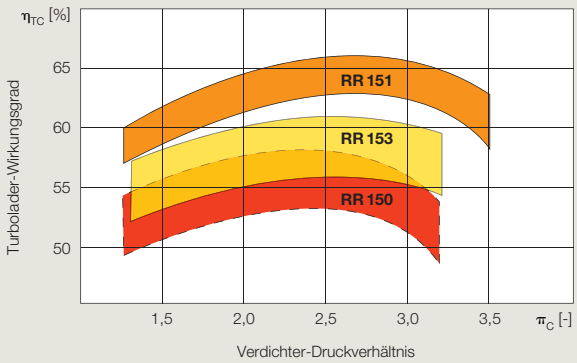


Der RR..1-Turbolader

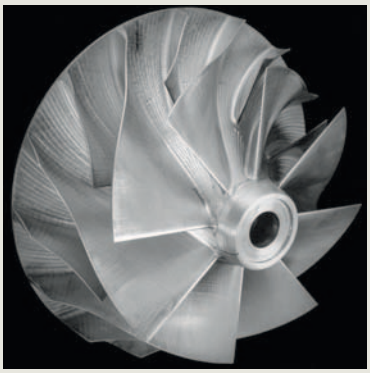
RR-Turbolader

Die RR-Turbolader sind vor allem für den Einsatz auf schnelllaufenden 4-Takt-Motoren vorgesehen. Während der 1970er-Jahre machen diese Motoren gewaltige Fortschritte, was eine Weiterentwicklung der Turbolader verlangt. Entsprechend führt Brown Boveri 1981 den RR 153 ein. Er besteht aus weniger Bauteilen als der RR 150, ist 20 % leichter, hat einen 25 % grösseren Volumenbereich und einen höheren Wirkungsgrad. Die Turbine ist neu mit einem profilierten Düsenring ausgestattet, ansonsten bleibt sie unverändert. Neu am RR 153 ist auch das rückwärts gekrümmte Verdichterrad. Es bedeutet einen enormen Fortschritt.

Die Einführung der RR..1-Generation 1985 markiert einen weiteren Durchbruch. Diese Generation ist komplett neu. Sie setzt, hauptsächlich dank einer innovativen Mixed-Flow-Turbine, neue Richtwerte für den Wirkungsgrad solch kleiner Einheiten. In den kommenden Jahren trägt der RR..1 zur grossen Beliebtheit der schnelllaufenden Motoren bei. Ihre Einsatzgebiete reichen von Notstromaggregaten über Schiffsantrieb bis hin zu schweren Baumaschinen. Konstruiert für Motoren mit 500 bis 1800 kW Leistung, ist es unter anderem auch das Verdienst des RR..1, dass in Europa und in den USA so viele Turbolader auf Gasmotoren zum Einsatz kamen.



Steigerung des RR-Turbolader-Wirkungsgrades.



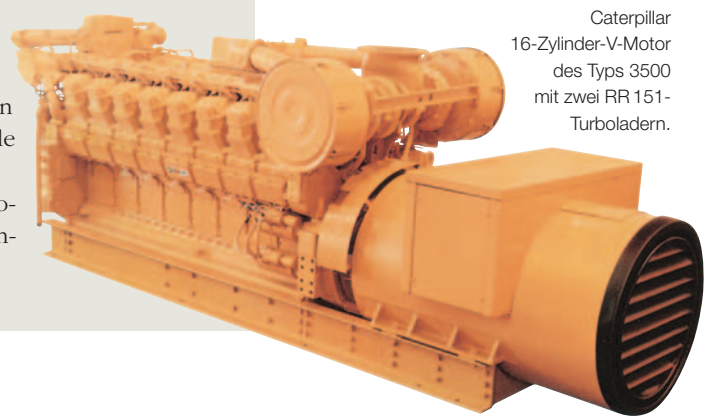
Verdichterrad des RR 153-Turboladers mit rückwärts gekrümmten Schaufeln.

Krise im Schiffbau

Der Boom im Turbolader-Geschäft hält an bis in die frühen 1970er-Jahre, hauptsächlich dank einem starken Markt für Haupt- und Hilfsmotoren im Schiffbau. Dann, 1973, kommt die Ölkrise. Der Preis je Barrel vervierfacht sich. Der Schiffbau kollabiert. Innerhalb kürzester Zeit werden ganze Flotten eingemottet.

Die wirtschaftlichen Prognosen Mitte der 1970er-Jahre sind – gelinde gesagt – spekulativ. Die Ölpreise steigen weiter und die Schwankungen in den internationalen Währungen fordern ihren Tribut. Nichtsdestotrotz scheint sich die Wirtschaft in der westlichen Hemisphäre ab 1980 zu erholen. Da kaum neue Schiffe gebaut worden sind, werden die alten wieder in Betrieb genommen. Die Erholung ist indes nur ein Strohfeuer. Mit dem wirtschaftlichen Abschwung zu Beginn der 1980er-Jahre muss ein «3-Jahres-Wert» an Schiffskapazität aus dem Verkehr gezogen werden.

Japan und verschiedene andere neue Industrienationen wie Südkorea, Singapur und Taiwan schaffen es, den Konjunktureinbruch zu vermeiden, mehr noch, ihre Wirtschaft boomt zu dieser Zeit. Der Anteil von Westeuropa an der weltweiten Schiffbauindustrie geht erneut zurück, während Asien und insbesondere Südkorea gewinnen. Ein kleines Trostpflaster für die europäischen Schiffbauer ist die Tatsache, dass sie als Partner für hochwertige, spezialisierte Schiffe mit stärkeren Motoren gesucht bleiben.



Caterpillar 16-Zylinder-V-Motor des Typs 3500 mit zwei RR 151-Turboladern.

Das Fährschiff der Silja-Line ist typisch für nach Mitte der 1970er-Jahre in Europa gebaute Spezialschiffe. Sie hat vier Wärtsilä-Pielstick 12 PC- und drei Wärtsilä Vasa 6R32-Dieselmotoren mit VTR 321- beziehungsweise VTR 251-Turboladern.

Die Auswirkungen auf den 2-Takt-Markt …

Die Ölkrise bewirkt eine komplett neue Situation im 2-Takt-Markt. Der Anteil der Treibstoffkosten an den Gesamtbetriebskosten steigt auf 30 % (vorher 10 %). Der Gesamtantriebswirkungsgrad wird so wichtig wie der Motorwirkungsgrad. Hochaufgeladene, langsamlaufende 2-Takt-Motoren gelten als die Lösung. Der Markt entscheidet sich gegen umkehrgespülte Motoren und wendet sich längsgespülten zu. Die 2-Takt-Motoren-Leistung steigt dramatisch.

… und auf den 4-Takt-Sektor

Ähnliche Entwicklungen gibt es auch im 4-Takt-Bereich, bei den mittelschnelllaufenden Motoren. Obwohl diese nicht so sehr von einer hohen Turbolader-Effizienz abhängen, bringen hochaufgeladene 4-Takter einige entscheidende wirtschaftliche Vorteile. Ein wichtiger Punkt ist, dass sie nun neu mit Schweröl betrieben werden können. Die Bedeutung der Technologie in diesem Geschäft steigt und bedeutet für Brown Boveri, dass auch die enge Zusammenarbeit mit den 4-Takt-Motorenbauern weitergeführt wird.

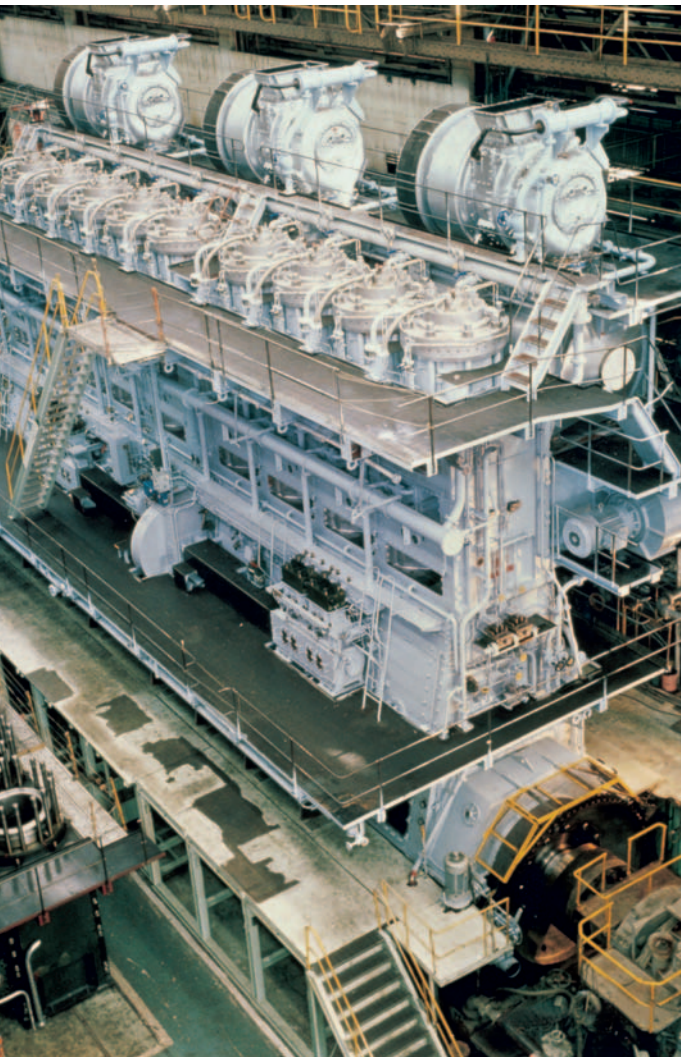
Der VTR/VTC..4

Mitte der 1970er hat der VTR..1 das Originalkonzept des VTR bis an seine Grenzen ausgereizt. Deswegen liegt eine neue Turbolader-Baureihe mit vollständig neu gestalteten Komponenten auf dem Zeichnungstisch. Ohne die Einschränkungen des ersten VTR-Typs steigert der VTR..4 den Wirkungsgrad um 5 % und mehr und vermag das Druckverhältnis auf über 4 zu steigern. Im Anschluss an Prototypen-Tests auf einem Sulzer-4-Takter wird der Lader im November 1978 der Presse vorgestellt und im Folgejahr im Markt lanciert.

NTC-Nutzturbine

In den 1980ern entwickelt ABB die NTC-Nutzturbine, um von den Vorteilen des hohen Wirkungsgrades des VTR..4 zu profitieren. Dabei werden zusätzliche Abgase (ca. 10 %) in die Turbine geleitet, welche wiederum via ein integrales Reduktionsgetriebe mit der Motorenkurbelwelle gekoppelt ist. Sulzer übernimmt die Nutzturbine für ihre RTA-Serien der 2-Takt-Motoren. Etwas später ist SEMT die erste Firma, welche die Nutzturbine auf 4-Takt-Motoren einsetzt (SEMT-Pielstick 4PC4.2).

Ab 1996 wird die Nutzturbine nicht mehr angeboten. Mittlerweile wird die Turboladerleistung innerhalb der Motoren besser genutzt dank eines Anstieges des mittleren Arbeitsdruckes und dank maximalem Zylinderdruck.



Sulzer-32'400-PS-2-Takt-Dieselmotor 9 RLA90 mit drei VTR 714-Turboladern, gebaut von IHI, Japan.

Der VTR..4 ist Impulsgeber für neue Entwicklungen in der Dieselmotorenkonstruktion. Durch die Erhöhung des Gesamtwirkungsgrades der auf 2-Takt-Motoren eingesetzten Turbolader von 60 – 62 % auf 65 – 68 % erreicht man einen spektakulären Anstieg des thermischen Wirkungsgrades grosser Motoren von 38 – 40 % bis zu Höchstwerten von 44 – 46 %.

1980 kommt eine kompakte Version mit vielen VTR..4-Komponenten, jedoch mit Innengleitlagern, auf den Markt. Dieser neue VTC..4 macht den Weg frei für die Zusammenarbeit mit Caterpillar in den USA und lässt ABB Ende 1980 zum Lieferanten für British Rail werden.

1984 wird der Wirkungsgrad der VTR..4-Turbolader erneut gesteigert. Der VTR..4A erreicht Höchstwerte von 70 %, hauptsächlich durch Verbesserungen am Verdichter dank «dreidimensionaler» Konstruktion.

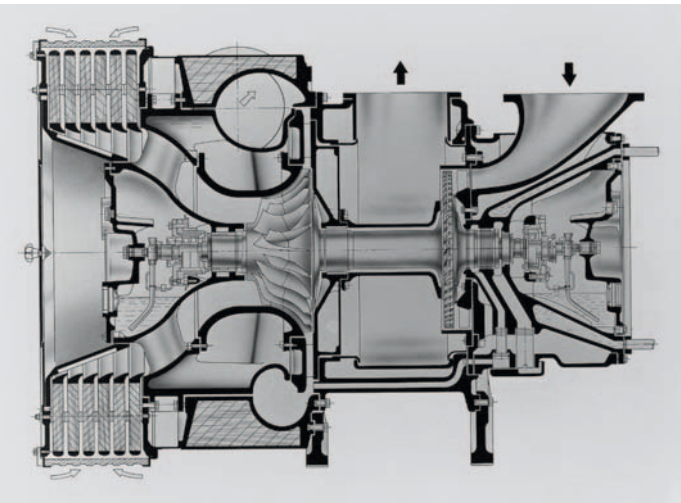
Ungekühlte VTR..4-Turbolader

Der Original-VTR..4 wird mit einem traditionellen wassergekühlten Gasgehäuse konstruiert, denn alle alten Probleme mit der Gehäuse-Korrosion sind in der Zwischenzeit eigentlich gelöst – auch dank der Leistungssteigerung der 2-Takt-Motoren, welche die Abgastemperatur erhöht. Mitte der 1970er-Jahre, während der Ölkrise, reduzieren die Schiffe zwecks Brennstoffeinsparung aber ihre Geschwindigkeit, womit die Abgastemperaturen wieder stark fallen. Damit wird Gehäusekorrosion erneut zum latenten Problem, auch deshalb, weil weniger reine, stark schwefel-

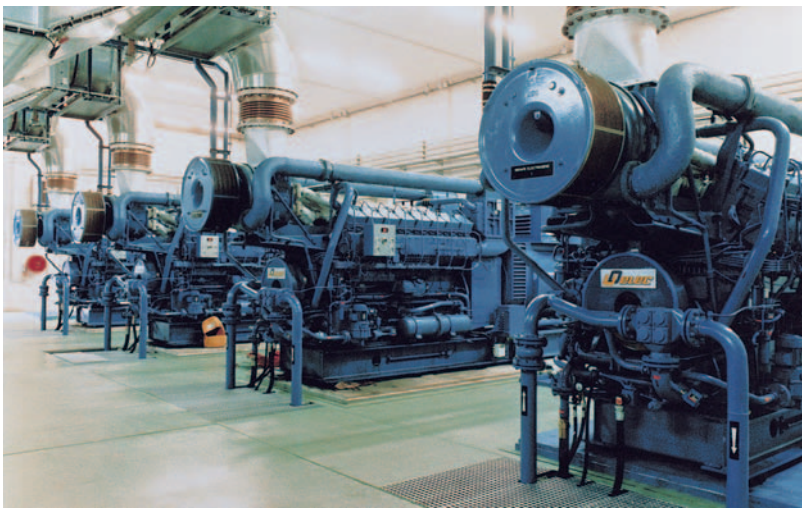
VTC..4-Turbolader

In den 1980er-Jahren werden die VTC..4-Turbolader erfolgreich eingeführt. Der 1985 lancierte VTC 254 wird bald zur Standardausrüstung für Caterpillars damals neue 3600 Diesel- und Gasmotoren.

In der zweiten Hälfte der 1980er-Jahre, nach erfolgreichen Tests des VTC 304 auf einem ALCO 16-Zylinder-Motor, sind VTC-Turbolader auch auf indischen Lokomotiven gefragt. Und noch 2003 bestellt die chinesische Dalian Locomotive and Rolling Stock Works (DLRW) für ihre DF11G Hochgeschwindigkeits-Diesel-Lokomotiven VTC 254-Turbolader.



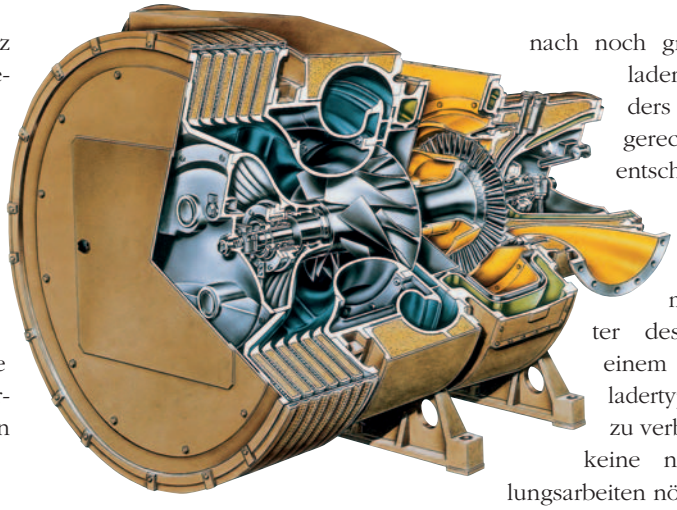
Schnittbild eines ungekühlten VTR..4-Turboladers.



4-Takt-Motoren mit VTC..4-Turboladern in einem Kraftwerk.

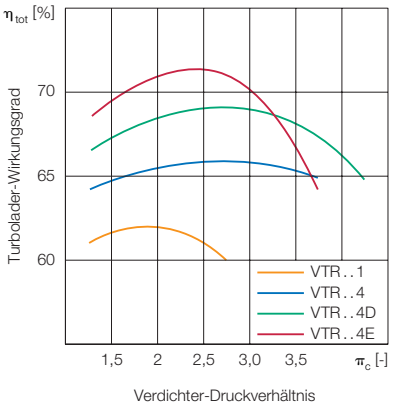
haltige Brennstoffe zum Einsatz kommen. Die Nachfrage nach «ungekühlten» Turboladern steigt.

Brown Boveri nimmt ein entsprechendes Entwicklungsprojekt in Angriff und entwickelt eine saubere Lösung für die Trennung der äusseren, tragenden (und kühl zu bleibenden) Gasgehäuse von den heissen Gaskanälen. Diese Lösung wird auch für spätere Versionen des VTR, zum Beispiel den VTR..4E beibehalten.



Hochleistungs-VTR..4E-Turbolader mit aussen liegenden Lagern.

nach noch grösserer Turboladerleistung, besonders bei MAN B&W, gerecht zu werden, entscheidet sich ABB, die Hochleistungsturbine des VTR..4E mit dem Verdichter des VTR..4P in einem neuen Turboladertyp, dem VTR..4D, zu verbinden. Da dazu keine neuen Entwicklungsarbeiten nötig sind, kommt der VTR..4D bereits 1994/95 in drei Grössen auf den Markt.



Anstieg des Wirkungsgrades der BBC-Turbolader (Spitzenwerte).

dichterrad des VTR..4P werden stark reduziert, worauf Druckverhältnisse von bis zu 4,7 erreicht werden können. Dank des hohen Ladedrucks, den diese beiden Turbolader ermöglichen (4,5 bei Volllast und 5 bei Überlast), können mittelschnelllaufende 4-Takt-Motoren ihr Potenzial für einen höheren Mitteldruck mit einstufiger Turboaufladung besser nutzen.

Anfang 1990 wird klar, dass die Grenzen erreicht sind. Die bestehende Baureihe würde die Marktanforderungen früher oder später nicht mehr erfüllen können. Um der Nachfrage

Turbolader VTR 304P, hier auf einem Ulstein-Bergen-Motor des Typs BR6.

VTR..4E/4P/4D

Der VTR..4-Turbolader wird bis in die 1990er-Jahre mit Erfolg weiterentwickelt. Der VTR..4E, lanciert 1989, erreicht Wirkungsgrade bis zu 75%, beim VTR..4P, der 1991 auf den Markt kommt, sind Druckverhältnisse von mehr als 4 möglich.

In beiden Fällen spielt das Verdichterrad eine Schlüsselrolle bei der verbesserten Leistungsfähigkeit. Das Fünf-Achsen-Fräsen ermöglicht es, grosse Verdichterräder aus Alu-Legierungen in einem Stück zu fertigen und gleichzeitig die 3-D-Form zu verbessern. Die Belastungen im Ver-

Namensänderung

1988 fusionieren ASEA und BBC zu ABB. In Übereinstimmung mit der neuen Firmenpolitik der Dezentralisierung wird im folgenden Jahr ABB Turbo Systems AG gegründet, die sich dem Turboladergeschäft annimmt. Der weltweit gute Ruf der BBC-Turbolader wird nun auf den ABB-Turbolader übertragen und wird schon bald zusätzlich gestärkt. ABB bringt eine komplett neue Serie von Turboladern auf den Markt, zugeschnitten auf die fortgeschrittenen Motoren, die zu dieser Zeit entwickelt werden. Sie verlangen anspruchsvollste Turbolader mit höheren Druckverhältnissen und Volumenbereichen sowie höheren Wirkungsgrad. Zudem steigen die Ansprüche der Endverbraucher im Zusammenhang mit Verlässlichkeit, Verlängerung der Wartungsintervalle, Vereinfachung der Wartungsarbeiten sowie bezüglich Lebensdauer.

DER BEGINN DES MODERNEN ZEITALTERS

Der TPS/TPL-Generationen-Sprung

In den frühen 1990er-Jahren entwickelt ABB eine komplett neue Turbolader-Generation. Sie müssen im Vergleich zu ihren Vorgängern VTR, VTC und RR kompakter und leichter sein bei mindestens gleich hohen Wirkungsgraden. Zwei neue Familien, der TPS für Motoren von 500 bis 3000 KW Leistung, und der TPL für Motoren ab 2500 KW, werden von Grund auf neu konzipiert.

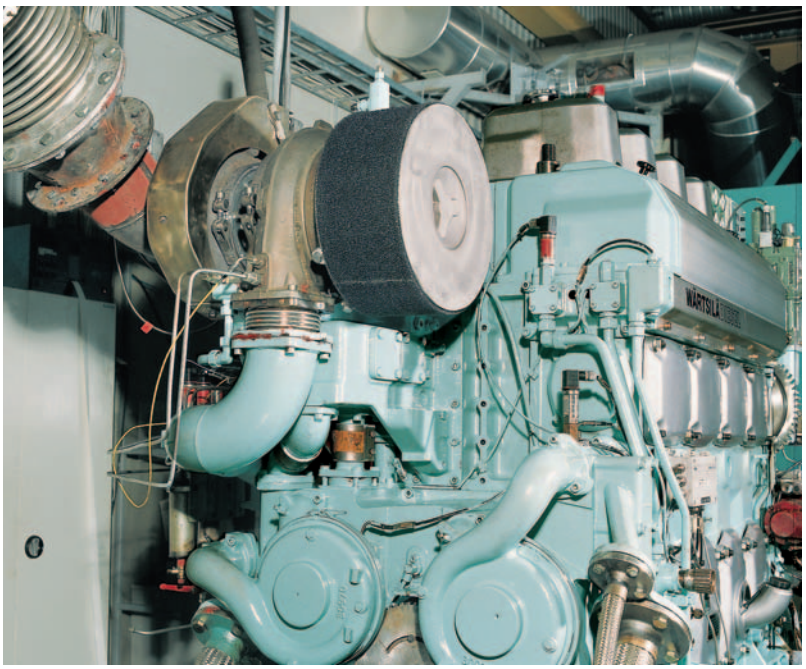
Bereits Mitte der 1980er-Jahre zeigen ausführliche Marktstudien, dass in sämtlichen Marktsegmenten neue Benchmark-Turbolader notwendig werden. Aber auch die Märkte selbst verändern sich. Die Konsolidierung in der Motorenbau-Industrie führt dazu, dass zunehmend weniger, dafür stärkere und innovativere Firmen den Markt bestimmen. Sie entwickeln neue Diesel- und Gas-Motoren, die von den Turboladern neue Standards bezüglich Leistung und Verlässlichkeit verlangen.

Die TPS-Lader

Seit der Markteinführung der ersten RR-Turbolader im Jahre 1968 hat sich der Markt für schnell- und mittelschnelllaufende Diesel- und Gasmotoren rapide verändert. ABB entwickelt deshalb eine komplett neue Generation kleiner Hochleistungsturbolader, welche die vorhersehbaren Bedürfnisse jener Motoren abdecken, die zurzeit noch die kleinen VTR, VTC und RR-Lader nutzen: die TPS-Lader.

TPS..-E-Verdichter und -Turbine

ABB entwickelt für die TPS-Baureihe eine neue Mixed-Flow-Turbine und Düsenringe mit der Möglichkeit für Teil- und Volllast-Optimierung. Das Turbinenkonzept eignet sich für konstante Druckverhältnisse, aber auch für Stossaufladung. Eine speziell beschichtete Variante des Düsenrings ist für Anwendungen erhältlich, bei welchen minderwertiger Brennstoff genutzt wird. Darüber hinaus verfügt er über ein neues, ölgekühltes Lagergehäuse, welches Applikationen mit einer Turbinen-Eintrittstemperatur von bis zu 680 °C bei konstanter Last ermöglicht.



Qualifikationstest eines TPS 48-Turboladers auf einem Wärtsilä 4L20B-Motor.

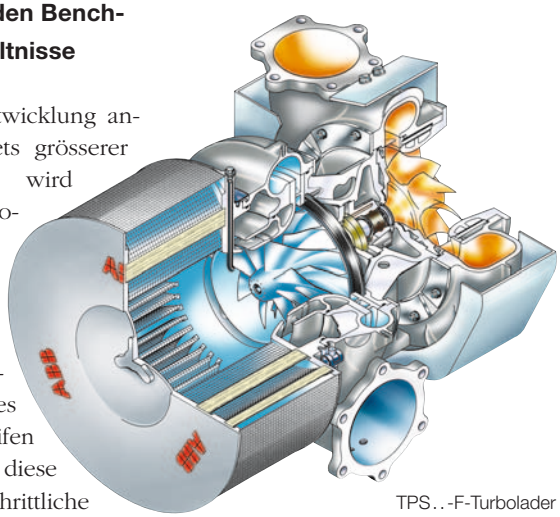
Neue Verdichter, neue Turbine

Mitte der 1990er-Jahre diktieren schnell ändernde Marktbedingungen und das Potenzial in der Verdichterkonstruktion ein schnelles Tempo in der Entwicklungsarbeit. ABB beschliesst, zur Erfüllung der Anforderungen der Motoren zwei verschiedene Verdichter zu entwickeln. Der TPS-Turbolader wird eingeführt mit dem neuen D-Verdichter für Druckverhältnisse von bis zu 4,2 bei maximaler Dauerleistung und dem ebenfalls neuen E-Verdichter für Druckverhältnisse von bis zu 4,5. Beide Verdichter verfügen über Verdichterschaufeln für hohe Luftstromraten und rückwärts gekrümmte Schaufeln am Austritt für ein weites Verdichterkennfeld. Der Verdichterwirkungsgrad erreicht so einen Spitzenwert von über 84 %.

Auf diversen Kunden-Motoren werden Test- und Prototyp-Versuche der TPS-Grössen 48, 52, 57 und 61 durchgeführt. Die Tests des TPS 61D beispielsweise beinhalten im Jahr 1997 Feldversuche auf einem LH41LA-Dieselmotor von Hanshin (3500 PS, 235 Umdrehungen pro Minute). Hanshin konstruierte diesen 6-Zylinder-4-Takt-Motor für den Einsatz auf Feeder-Schiffen der japanischen Handelsmarine. Dort würde er meist mit Schweröl laufen.

Der TPS..-F erhöht den Benchmark für Druckverhältnisse

Der in der Motorenentwicklung anhaltende Trend zu stets grösserer spezifischer Leistung wird begleitet von einer hohen Dringlichkeit bezüglich Emissionsreduktion. Dies hat zu sehr modernen Motoren geführt, die auf verschiedene Versionen des Miller-Motors zurückgreifen *(siehe Kastentext)*. Für diese und für künftige fortschrittliche Motoren hat ABB drei neue Baureihen entwickelt, welche den Bereich von 500 bis 3300 kW abdecken. Die Erste, genannt TPS..-F33, wird Anfang 2000 im Markt lanciert. Zwei Jahre später folgen die TPS..-F32- und schliesslich im Jahre 2004 die TPS..-F31-Baureihe. Basierend auf der TPS..-D/E-Plattform erreichen diese mit einem Aluminium-Legierungs-Verdichter-Rad bei Volllast Druckverhältnisse von bis zu 4,75, 5,0 und 5,2.



TPS..-F-Turbolader

Der neue für die TPS..-F-Reihe entwickelte Verdichter erlaubt eine 15%-Vergrösserung des Volumenstroms, der von der jeweiligen Verdichtergrösse abgedeckt werden kann. Dies ist möglich, weil dieselbe Verdichterkonstruktion übernommen worden ist, wie beim TPL. Statt konventionellem Trimmen, bei dem die Schaufelhöhe auf den gewünschten Volumenstrom angepasst wird, wird hier der Volumenstrombereich bei jedem Turbolader in drei so genannte Design-Bereiche unterteilt. Dann werden für jeden Bereich individuelle Leistungsziele formuliert, um an der Grenze des physikalisch Machbaren die jeweils optimale Verdichterkonstruktion zu ermöglichen.

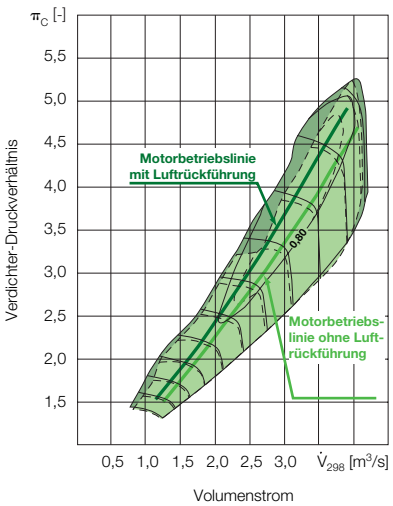
Und: Der TPS..-F war der erste ABB-Turbolader mit Rezirkulations-Technologie. Ein Schlitz rund um die Verdichterschaufeln erhöht dank verbessertem Strömungsfeld den Pumpgrenzabstand. Dieser Schlitz bewirkt eine Vergrösserung der Kennfeldbreite ohne dabei die Leistung des Verdichters zu beeinträchtigen.

Die Emissionen und der Miller-Zyklus

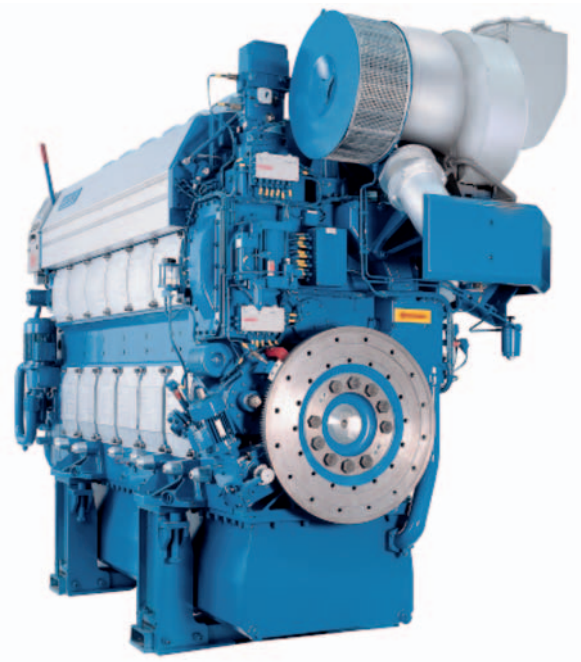
Während der ersten paar Jahre des neuen Jahrtausends haben sich die Entwickler von Dieselmotoren auf einen höheren effektiven Mitteldruck und niedrigeren Brennstoffverbrauch konzentriert. Darüber hinaus müssen Motorenbauer und Endverbraucher auch die Auswirkungen kommender Emissionsgesetze in Betracht ziehen. Um die strengeren Vorschriften erfüllen zu können, braucht es Turbolader mit noch höheren Verdichter-Druckverhältnissen.

Eng verknüpft mit den Anstrengungen zur Verringerung der Abgasemissionen ist der Miller-Zyklus, d.h. frühe (oder späte) Schliessung des Einlassventils. Vorausgesetzt, Leistung und Ladedruck eines Motors sind konstant, wird die Füllung reduziert und Druck und Temperatur in den Zylindern bleiben niedriger. Dies ist eine der wenigen Massnahmen, die bei einem Verbrennungsmotor gleichzeitig NO_x-Emissionen und Brennstoffverbrauch reduziert. Dabei braucht es aber einen beträchtlich höheren Ladedruck, um die Temperatur in den Zylindern niedrig zu halten.

Verdichterrad des TPS..-F33 mit Rezirkulationsschlitz in Einsatzwand.



Verbessertes Verdichterkennfeld dank Luftrückführung.



TPS 57-Turbolader auf einem Wärtsilä W6L26-Dieselmotor.

TPS mit variabler Turbinengeometrie

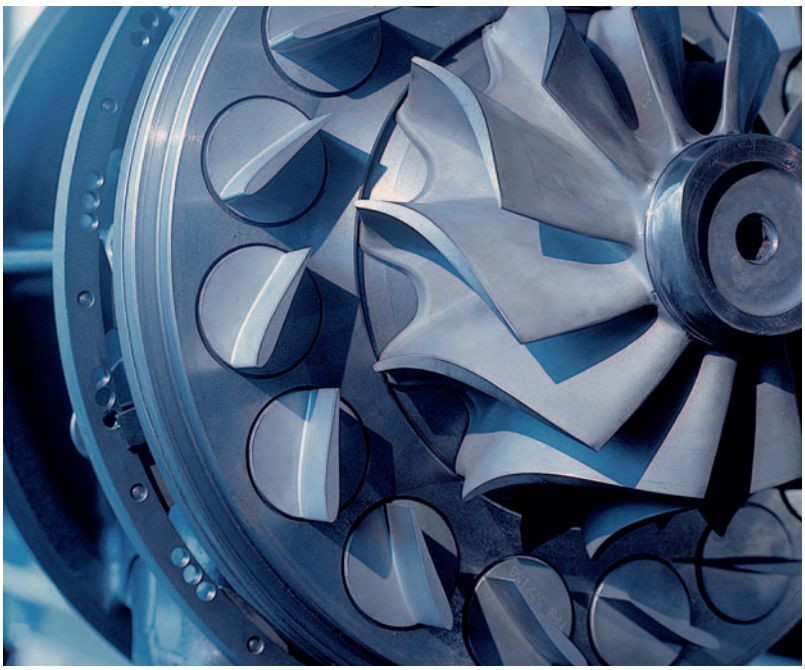
Die Entwicklungen in den Diesel- und Gas-Motoren-Märkten führen Mitte der 1990er-Jahre auch zu einer TPS-Version mit variabler Turbinengeometrie (VTG). Einer der Gründe dafür ist die zunehmende Beliebtheit von Dieselmotoren mit Ein-Rohr-Abgas-Systemen. Bei der Verwendung von konventionellen Turboladern tendieren diese Systeme dazu, den Teillast-Betrieb zu verschlechtern. Langsame Beschleunigung, hohe Rauchentwicklung und Russpartikel-Emission sind die Folge.

Die Gas-Motoren-Anforderungen sind dank erhöhter Leistung und effektivem Mitteldruck (bmep), der Fähigkeit auf grösseren Höhen zu funktionieren sowie kontrollierter Luft-Brennstoff-Verhältnisse beeindruckend gestiegen. Auch hier ist es nicht möglich, mit konventionellen Turboladern zu arbeiten. Verschiedene Lösungen werden ausprobiert, unter anderem die Installation eines genau auf den Turbolader abgestimmten Ladedruckregelventils oder Drosselmechanismus. Aber jede hat ihre Mankos. Im 1000- bis 3000-kW-Segment ist die Nachfrage für einen Turbolader, der das Problem beheben würde, besonders hoch.

Ein «anpassbarer» Turbolader erscheint als ideale Lösung für beide Motortypen. Abgesehen von der Eliminierung der Verluste am Ladedruckregelventil ist ein Turbolader mit VTG flexibler in der Anwendung mit wechselnden Betriebs- oder Umgebungs-Bedingungen. Die präzise Kontrolle des Luft-Brennstoff-Verhältnisses, die so genannte «Lambda-Regulierung», wird mittels eines innovativen Düsenrings erreicht. Dieser macht es möglich, den effektiven Turbinenbereich zu variieren, ohne die Wirkung der Turbine zu verschlechtern. Die Abstände zwischen den beweglichen Düsenschaufeln sind fast auf Null reduziert, dank Federn, die die Schaufeln gegen die gegenüberliegende Gehäusewand drücken.

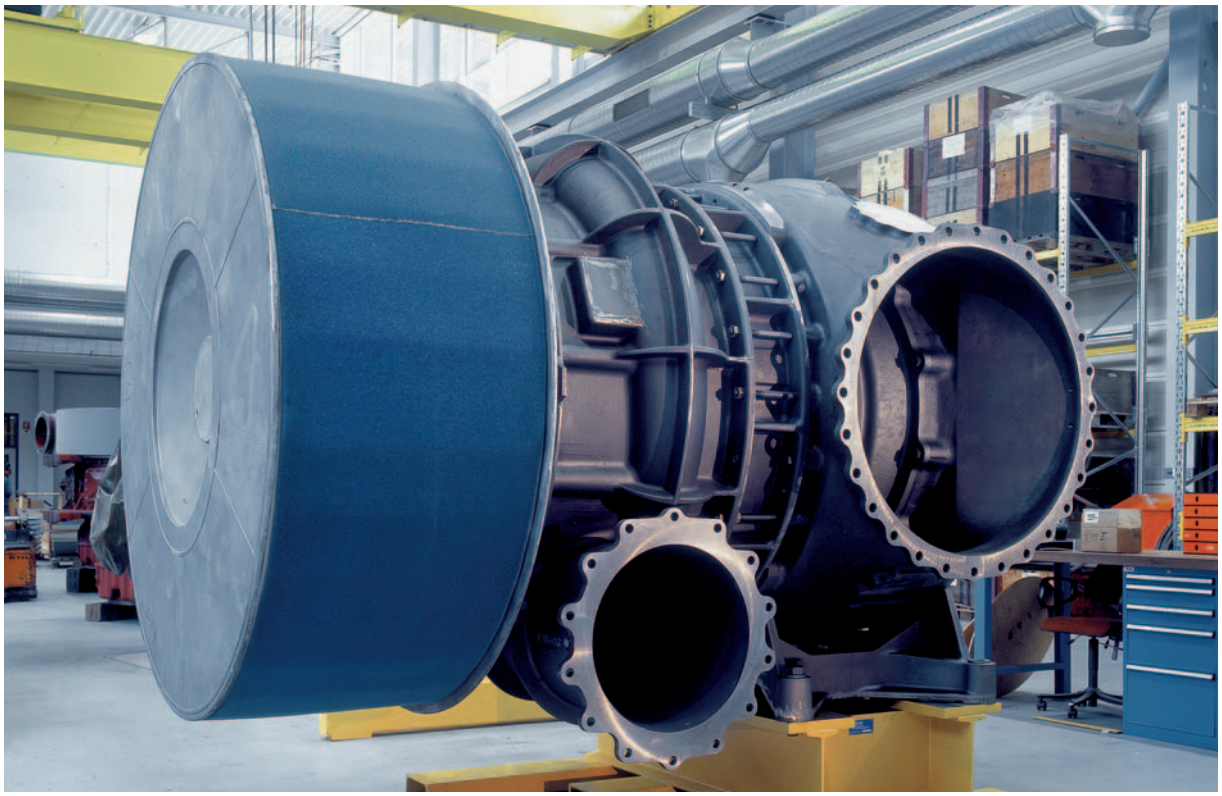
Ein Turbolader mit VTG wird Ende 1996 auf einem 3-Zylinder-Versuchs-Gas-Motor bei Ulstein Bergen in Norwegen erfolgreich getestet. Ein paar Monate später werden die ersten Feldversuche auf einem Gasmotor in einem Kraftwerk durchgeführt. Diese Feldversuche zeigen einen signifikanten Gewinn bei der Motorenleistung. Als Resultat liefert ABB im Jahr 1999 26 TPS 57-VTG-Lader in zwei Kraftwerke in Spanien, die mit 18-Zylinder-Ulstein-Bergen-Motoren bestückt sind.

Variabler Düsenring eines TPS 57-VTG-Turboladers.



Das Debut des TPL

Das TPL-Konzept wird für grosse, moderne Diesel- und Gas-Motoren mit Motorenleistung ab 2500 kW und mehr entwickelt. Für diese konstruieren die ABB-Ingenieure eine neue axiale Turbinen-Familie mit Schaufellängen und Staffelungswinkeln, die den gesamten Volumenstrom-Bereich abdecken. Auch die Lageranordnung ist neu. Das Axialdrucklager verfügt über eine schwimmende Lagerscheibe mit beidseitigen Profilen, die sich mit ca. halber Rotorendrehzahl dreht. Dabei entsteht ein Ölfilm, der gleichzeitig einen hohen Schutz gegen die Abnützung bildet. Die nicht rotierenden Lagerbuchsen befinden sich in einem Quetsch-Öldämpfer.



TPL 80-Turbolader

Dank dieser neuen Technologie verdoppelt sich die Lebensdauer der Lager.

Um die ganze Bandbreite der Druckverhältnisse abzudecken, die es für moderne turboaufgeladene Motoren braucht, werden zwei verschiedene Radialverdichterstufen entwickelt. Sowohl TPL- als auch TPS-Verdichterrad sind aerodynamisch optimiert. Zwischenschaufeln erlauben höhere Luftstromgeschwindigkeiten, rückwärts gekrümmte Schaufeln sorgen am Verdichteraustritt für ein breiteres Verdichterkennfeld. Neue F-Generationen-Verdichterstufen werden entwickelt, die eine beachtliche Steigerung der Leistung, des maximalen Druckverhältnisses sowie des spezifischen Schluckvolumens ermöglichen. Das letztere verzeichnet eine Zunahme von bis zu 15 % bei einem Druckverhältnis von 4,5. Um für alle heute möglichen Einsatzgebiete gerüstet zu sein, wird die Angebotspalette der Turbinengehäuse, inklusive optionaler Wastegate-Verbindungen, erweitert.

Die ersten TPL-Prototypen und Feldversuche

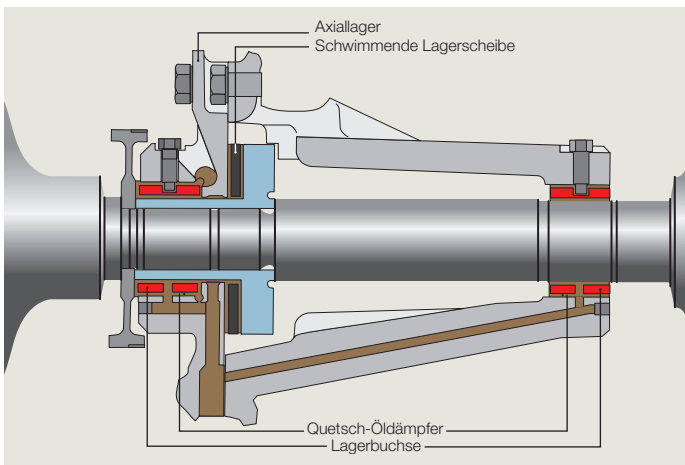
Ein sehr ausführliches Qualifikationsprogramm und thermodynamische Messungen im Labor beweisen die Möglichkeiten des TPL. Zwischen 1996 und 1999 werden TPL-Lader auf verschiedenen Motoren getestet, darunter der Wärtsilä 12V38 und der Caterpillar MaK 16M32. Ein besonderes Highlight ist der Einsatz des ersten TPL 80-A auf dem damals grössten mittelschnelllaufenden 4-Takt-Motor der Welt, dem Wärtsilä 6L64.

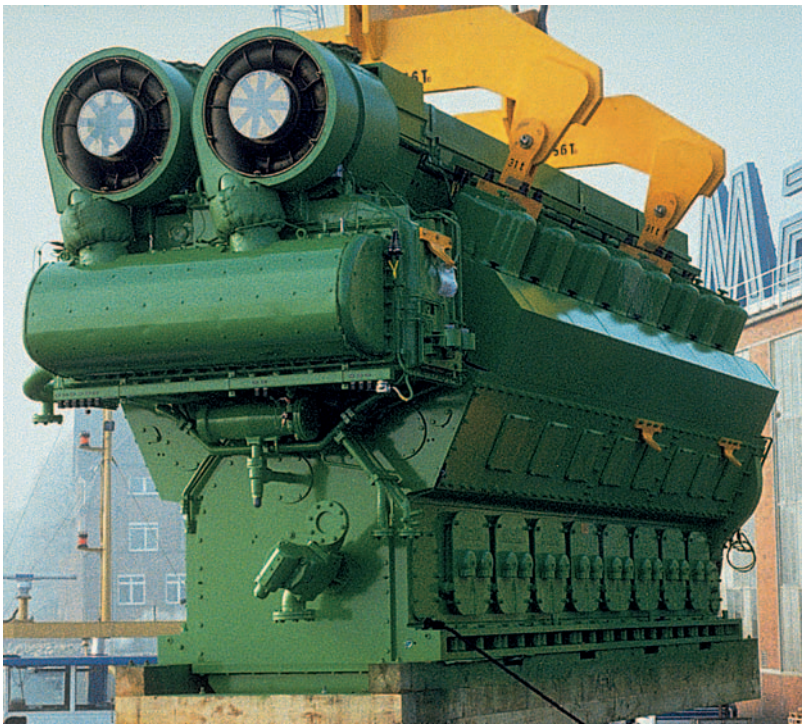
Zusätzlich zu den Motorentests werden gegen Ende 1996 Feldversuche mit dem TPL gestartet. Auf der Fähre *MS Polonia* wird der Original-VTR 354 auf dem Wärtsilä 6L38-Motor durch einen TPL 69 ersetzt, um Langzeitergebnisse sowie statistisches Basismaterial bezüglich Lebensdauer der Komponenten zu erhalten. Weitere Feldversuche finden 1997 und 1998 statt, so auch mit zwei TPL 73 auf einem grossen 4-Takt-Schiffsmotor. Zudem werden diverse Tests auf verschiedenen 2-Takt-Motoren grösserer Baureihen durchgeführt.

Der TPL..-A wird lanciert

Als erster Lader der neuen TPL-Generation kommt der TPL..-A auf den Markt. Diese Serie ist für moderne mittlere bis grosse 4-Takt-Diesel- und Gas-Motoren vorgesehen und wird schon bald nach ihrer Lancie-

Anordnung der TPL-Lager.





Caterpillar MaK 16M32-Dieselmotor mit zwei TPL 65-D-Turboladern.

rung 1996 zum grossen Erfolg. Ob Haupt- und Hilfsmotoren für kleine und grosse Schiffe oder stationäre Diesel- und Gaskraftwerke: Der TPL..-A befriedigt alle Bedürfnisse.

Zwei Verdichter-Familien sind erhältlich. Die eine bietet ein Druckverhältnis von 4,2 mit hohen spezifischen Luftmengen und hohem Wirkungsgrad, die andere ist für Anwendungen mit Druckverhältnissen bis zu 4,5. Damit können Lader-Wirkungsgrade von 68 % oder höher erreicht werden.

Die Schaufeln der TPL..-A-Turbinen sind mit einem Dämpferdraht ausgestattet, um die Vibrationen zu dämpfen, die heute bei der Stossaufladung vieler 4-Takt-Motoren auftreten. Für die kleineren TPL..-A-Grössen entwickelt ABB eine einteilige, präzisionsgegossene Turbine.

Die Schnellfähre *Catalonia* der Buquebus-Linie, mit acht TPL 65-A-Turboladern auf vier Caterpillar 3618-Motoren, brach 1998 den Rekord für die schnellste Atlantiküberquerung.

1999 spielt der TPL..-A eine Schlüsselrolle bei der Entwicklung des Alstom-Motors Mirrlees Blackstone 18-Zylinder MB430M, dem zu jener Zeit grössten je in Grossbritannien gebauten 4-Takt-Motor. Die beiden TPL 77-A30-Einheiten für den Motor sind ebenfalls die grössten TPL-Baugrössen, welche bis dato zum Einsatz kommen. ABB liefert Mirrlees Blackstone für diese Applikation Engineering Support in Form von Simulations-Berechnungen.

Fünf Baugrössen des TPL..-A sind in Serienproduktion. Sie decken die Anforderungen von modernen 4-Takt-Diesel- und Gas-Motoren mit 2500 bis 12'500 kW ab.

Der TPL..-B übernimmt den 2-Takt-Markt

1999 werden die TPL..-B-Turbolader lanciert. Sie sind in erster Linie für grosse, moderne 2-Takt-Schiffsdieselmotoren mit 5000 bis 25'000 kW Leistung pro Turbolader gedacht. Der weltweite Bedarf nach immer grösseren seetauglichen Schiffen ist hoch und neue, stärkere Motoren für solche Schiffe sind in Entwicklung.

Da die Gleichdruck-Aufladesysteme, die auf den 2-Takt-Motoren zur Anwendung kommen, nur schwache Abgasstösse produzieren, sind die Einlassbedingungen für die TPL..-B-Turbine konstant. Entsprechend gibt es keinen Bedarf nach Dämpferdraht. Dies bringt bis zu 3 zusätzliche Prozentpunkte an die bereits hohe Turbinenwirksamkeit. Robustheit ist aber trotzdem gewährleistet durch die Konstruktion der Turbine mit weniger, dafür stärkeren Schaufeln.

Zur weiteren Vergrösserung des Volumenstroms und um eine optimierte Anpassung an die Motoren-Applikationen zu gewährleisten, vergrössern die ABB-Ingenieure den Durchmesser des TPL-B-Verdichters. Dank der Verdichterkonstruktion mit

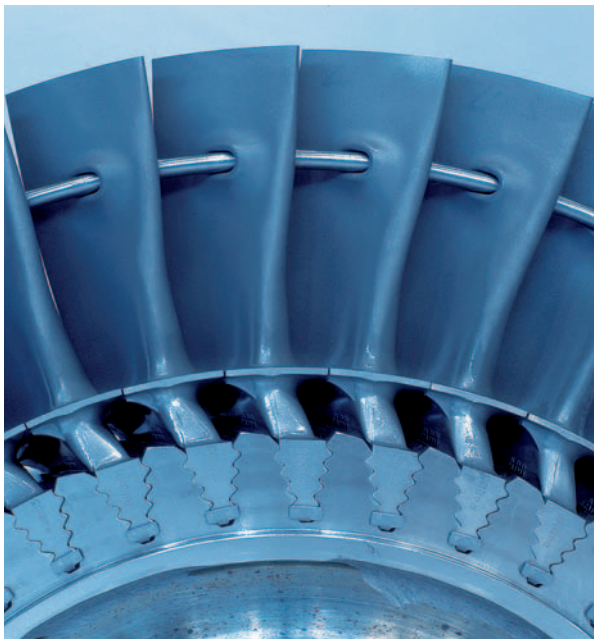
TPR – der neue Eisenbahn-Turbolader

2002 wird der TPR, ein neuer Turbolader für Diesellokomotiven, lanciert. Er erfüllt die Bedürfnisse nach zusätzlicher Leistung und grösserer Robustheit bei besserer Umweltverträglichkeit. Basierend auf dem TPL-Design, ist der TPR ausgestattet mit einer integralen Hochleistungsturbine ohne Dämpferdraht, einem verbesserten Gaseintrittsgehäuse mit einem Eintritt und einzigartiger Befestigung. Der Freigabe des Turboladers gehen 50'000 Stunden Feldtests voran, ausgeführt mit zehn TPR 61 bei den Indischen Eisenbahnen. Die erfolgreichen Tests lösen auch in China grosses Interesse aus.

rückwärts gekrümmten Schaufeln mit Zwischenschaufeln können maximale Wirkungsgrade von über 87 % erreicht werden.

Unterhalt- und Serviceüberlegungen fliessen ebenfalls bereits in die Entwicklungsphase des TPL..-B ein. Ein besonderes Augenmerk liegt dabei auf der Demontage von Lagern, Rotor, Düsenring und Turbinen-Diffusor.

Anfangs sind vier Baugrössen geplant. Das scheint ausreichend zur Befriedigung der mittelfristigen Marktbe-

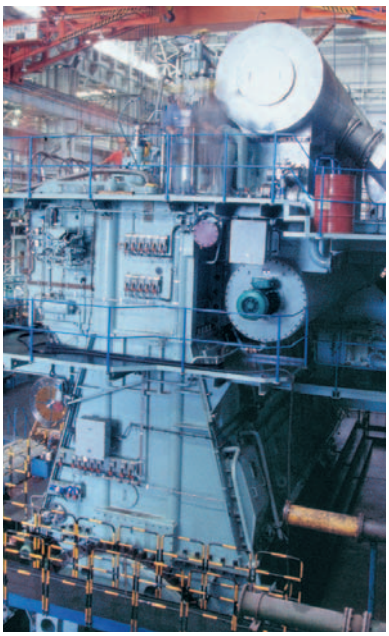


TPL..-A-Turbinenschaufeln mit Dämpferdraht.

TPL..-B-Turbolader wurden hauptsächlich für moderne, starke 2-Takt-Motoren grosser Containerschiffe konstruiert.

TPL 91-B-Turbolader

Versuchsreihe mit einem TPL 85-B-Turbolader auf einem von HHM (Hudong Heavy Machinery Co.), China, unter Lizenz hergestellten MAN B&W 6S70MC-Motor.



dürfnisse. Der Entscheid, einen fünften, noch mächtigeren Turbolader, den TPL 91, zu entwickeln, basiert auf den Plänen der Schiffbauer, gegen Ende des Milleniums Post-Panamax Container-Schiffe zu bauen. Die ABB-Ingenieure sollen also Turbolader konstruieren, die auf Motoren mit einer Nutzleistung von über 100'000 PS zum Einsatz kommen und trotzdem noch kompakt sind. Dieses Ziel wird erreicht mit der Konstruktion eines neuen, kürzeren Rotors sowie einer neuen Gleichdruck-Turbine und Diffusor. Die Montage auf dem Motor wird dank Integration von Öltank und Entlüftung einfacher. Im November 2004 werden drei TPL 91-B12 auf dem weltgrössten elektronisch kontrollierten MAN B&W-Motor 12K98ME bei Hyundai Heavy Industries in Korea für offizielles Testen auf Volllast (93'360 PS Motorenleistung) installiert.

TPL..-C: Ausgerichtet auf künftige 4-Takt-Anwendungen

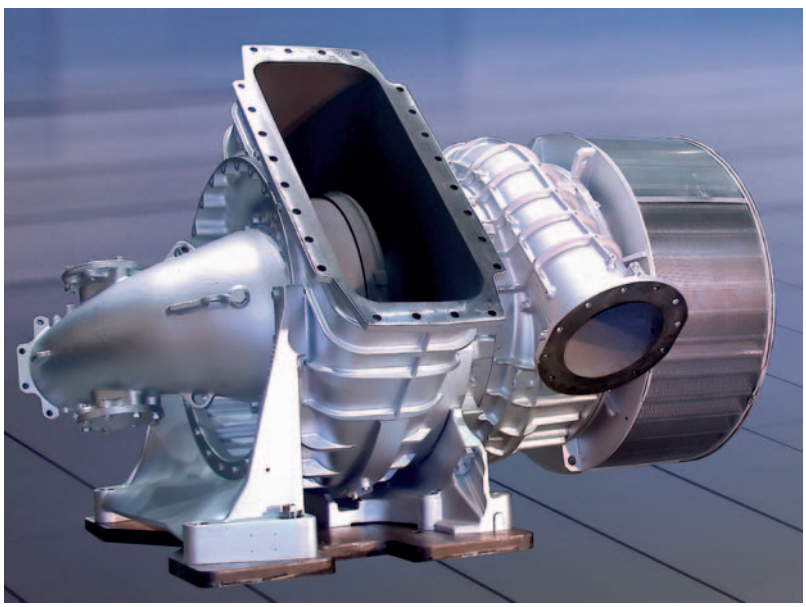
Der 4-Takt-Markt drängt kontinuierlich auf mehr Leistung und weniger Emissionen. Deshalb wird auf Basis der modularen TPL-Plattform eine neue TPL..-C-Serie entwickelt. Sie führt neue Komponenten und innovative Technologien ein, die speziell auf kommende Marktanforderungen ausgerichtet sind. Neben wirtschaftlichen und betriebsbedingten Überlegungen stehen die Anforderungen

bezüglich der verlangten NO_x-Reduktion im Vordergrund. Um die von der International Maritime Organization (IMO) und der Weltbank vorgegebenen Ziele in diesem Zusammenhang zu erreichen, ist eine Verbesserung des Verbrennungsvorgangs und des Aufladesystems entscheidend.

Die Eigenschaften des TPL..-C-Turboladers sind abgestimmt auf die Anforderungen künftiger mittelschnelllaufender 4-Takt-Diesel- und Gasmotoren mit 3000 bis 10'000 kW Leistung pro Turbolader. Die Turbine der beiden kleineren Grössen (TPL 67-C und TPL 71-C) ist für Quasi-Gleichdruck sowie Stossaufladung konstruiert und entsprechend mit einem Dämpferdraht ausgestattet. Die Turbine des TPL 76-C dagegen ist nur für Quasi-Gleichdruck-Systeme vorgesehen und deshalb mit der ABB-«wide chord»-Konstruktion versehen. Die beiden für den TPL..-C-Turbolader erhältlichen Verdichter haben die gleiche Basiskonstruktion wie diejenigen der TPS..-F-Serie, berücksichtigen aber vollumfänglich die Grenzbereiche der verschiedenen TPL-Serien.

Zudem haben TPL..-C-Verdichter und TPS..-F-Verdichter dieselbe Rezirkulationstechnik. Durch Vermeidung von Sekundärströmen wird auch der Verdichterlärm vermindert, besonders bei Teillast. Optionale Verdichterkühlung ist eine weitere Besonderheit. Sie erlaubt die Ausweitung der Anwendungsgebiete für Verdichterräder aus Aluminium-Legierung und ist, sofern höhere Druckverhältnisse gefordert sind, eine wirtschaftlichere Alternative zu den Titanium-Verdichtern.

Der TPL..-C bucht bereits einen ersten Erfolg mit dem Entscheid von Caterpillar im Jahr 2004, den TPL 71-C auf der neuen C-Version des in Deutschland gebauten mittelschnellaufenden MaK M43 6-Zylinder-Langhub-Motors anzubauen. Zudem nimmt Caterpillar den TPL..-C-Turbolader in die Spezifikationen der 7-, 8- und 9-Zylinder-Modelle auf.



TPL 76-C-Turbolader

EIN JAHRHUNDERT DES FORTSCHRITTS

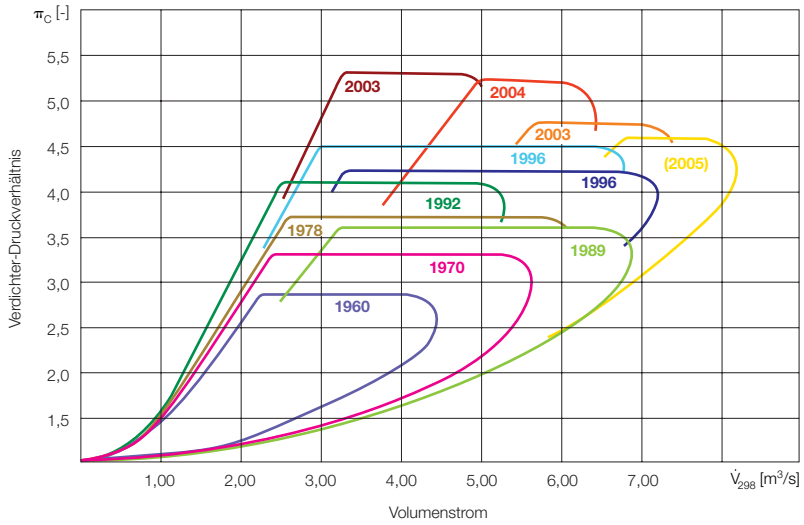
Ein Blick zurück

In den 100 Jahren, die seit der Anmeldung des berühmten Patentes von Alfred Büchi vergangen sind, wird der Abgasturbolader zum unersetzbaren Bestandteil der Diesel- und Gas-Motoren-Industrie. Die über die Jahrzehnte gemachten hohen Investitionen in Forschung und Entwicklung haben Quantensprünge gebracht bezüglich Technologie und Konstruktion. Ingenieure aus verschiedenen Fachgebieten haben ihren erfinderischen Geist kombiniert, um auftretende Probleme anzugehen. Sie fanden immer wieder Lösungen, die die Motoren-Aufladung vorwärts brachten.

ABB Turbo Systems respektive Brown Boveri hatte als Teil des Büchi-Syndikats das Glück, schon früh mit Motorenbauern aus aller Welt in Kontakt zu sein. Dies ermöglichte uns, die Industrie im Ingenieurwesen zu unterstützen und voranzubringen. Dabei war die Lernkurve gegenseitig. Oft brachten die Erfahrungen aus dem Feld unsere Entwicklungsingenieure auf die richtige Spur, wenn es darum ging, Schlüsselkomponenten und -prozesse zu verbessern. Dennoch: Hauptantrieb für uns war immer der Markt. Nichts dokumentiert diese Tatsache besser als der Fortschritt, der über die Jahre in der Turboladerleistung verlangt und auch erreicht wurde. Oder hätte sich Alfred Büchi je einen Wirkungsgrad von über 70% oder Druckverhältnisse von über 5,2 vorstellen können?

Ein Blick nach vorne

Eine stolze Vergangenheit ist nichts wert, wenn sie nicht dazu anregt, noch besser zu werden. Es war das Bekenntnis zum Besser-Sein, das den



Entwicklung der Verdichterkennzahlen der ABB-Turbolader seit 1960 (bei Volllast, mit Aluminium-Verdichter).

ersten VTR..0, dann den VTR..1, den VTR..4 und den RR möglich und letzlich erfolgreich machte. Und es hat die TPS- und TPL-Generationen zu deren würdigen Nachfolgern werden lassen. Seit der erste VT 402 im Jahr 1924 unsere Badener Fabrik verliess, gelten BBC/ABB-Lader als Massstab für den neusten Stand der Technik.

Die konstante Verbesserung der Leistung von Turboladern und Motoren basierte in all den Jahren auf der engen Zusammenarbeit von ABB mit den führenden Motorenbauern. Sie bestimmt bis heute die Entwicklungsziele und definiert, was das Aufladesystem erfüllen muss. Dieser integrierte Ansatz sieht den Turbolader nicht einfach als Komponente, sondern als wichtigen Bestandteil eines Ganzen. Anpassbare Turbolader-Komponenten oder mehrstufige Aufladung sind zwei der verschiedenen Möglichkeiten, die diesen Anspruch erfüllen könnten.

Neue Produkte für einen neuen Zeitabschnitt

ABB Turbo Systems setzt auf die Weiterführung der engen Zusammenarbeit mit den Motorenbauern und darauf, Marktführer zu bleiben: Mit Produkten für den kommenden Markt – wie der TPL 65VA, der erste Turbolader der Welt mit Axialturbine und variabler Turbinengeometrie – oder der nächsten Generation der erfolgreichen TPL..-B-Baureihe. Ebenfalls in Entwicklung sind neue Lader mit sehr hohen Verdichterverhältnissen für die künftigen schnelllaufenden Gasmotoren.

Zurzeit rückt auch der Erdöl-Preis wieder ins Zentrum der Aufmerksamkeit – und damit die traditionelle Rolle des Turboladers als Energie-Sparer. Die Nachfrage nach höheren Ladedrücken und Wirkungsgraden, verbunden mit dem Zwang zur Reduktion der schädlichen Emissionen im Schiffsverkehr, verlangt technologisch fortschrittliche Turbolader. Mit ihren State-of-the-Art-Entwicklungen, Test- und Produktions-Anlagen ist ABB Turbo Systems gut positioniert, um hier Unterstützung bieten zu können. Alfred Büchis Erbe ist in guten Händen.

› *Malcolm Summers*

Bemerkung: Die ersten beiden Teile dieses Artikels – «Das Pionierzeitalter» und «Der Durchbruch der Turboaufladung» – basieren auf dem Buch «Der BBC-Turbolader – Geschichte eines Schweizer Erfolges» von Ernst Jenny. Weitere Quellen waren unter anderen Ausgaben des Turbo Magazine der Jahre 1990 bis 2005, die BBC/ABB Review sowie von CIMAC, ASME und ISME publizierte wissenschaftliche Berichte. Ein besonderer Dank des Autors geht an Esko Laustela, Hansruedi Born und Peter Spengler für die Überprüfung des Manuskriptes.

Foto: MBS

Hauptsitz der ABB Turbo Systems in Baden.

Herausgeber:
ABB Turbo Systems AG

Redaktion:
Malcolm Summers

Adresse:
Postfach
CH-5401 Baden/Schweiz
Telefon: +41 58 585 40 37
Telefax: +41 58 585 51 44
www.abb.com/turbocharging
E-Mail: turbomagazine@ch.abb.com

oyecomm, Zürich:
Deutsche Bearbeitung

Domino Style & Type AG:
Layout und Satz

Katharina Blarer, Zürich:
Korrektorat

Michael Reinhard, Herrliberg, Schweiz:
Titelbild

Nachdruck bei vollständiger
Quellenangabe gestattet.

© 2005 ABB Turbo Systems AG, Baden/Schweiz
Alle Rechte vorbehalten

ABB Turbo Systems AG
Bruggerstrasse 71a
CH-5401 Baden / Schweiz
Telefon: +41 58 585 77 77
Telefax: +41 58 585 51 44
www.abb.com/turbocharging
E-Mail: turbocharging@ch.abb.com