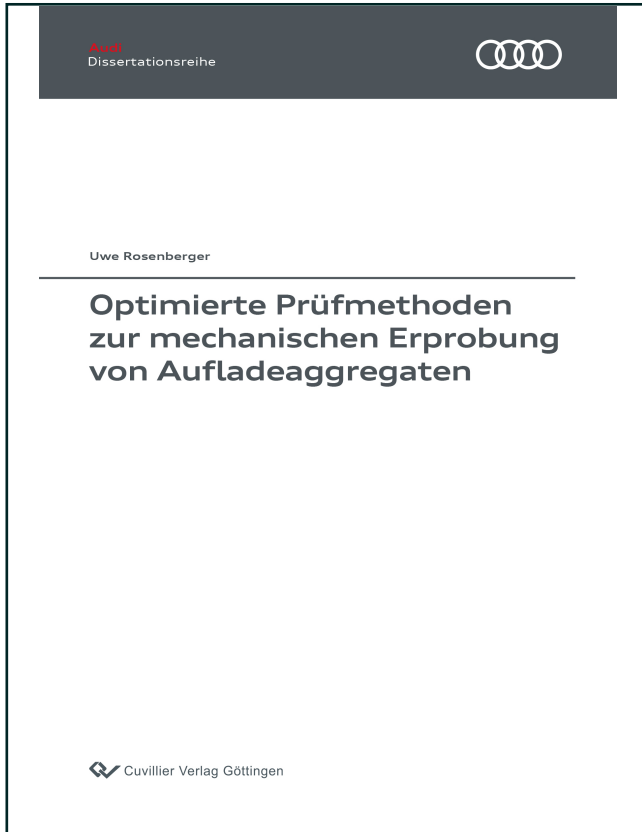




Uwe Rosenberger (Autor)  
**Optimierte Prüfmethoden zur mechanischen  
Erprobung von Aufladeaggregaten**



<https://cuvillier.de/de/shop/publications/7746>

Copyright:  
Cuvillier Verlag, Inhaberin Annette Jentsch-Cuvillier, Nonnenstieg 8, 37075 Göttingen,  
Germany  
Telefon: +49 (0)551 54724-0, E-Mail: [info@cuvillier.de](mailto:info@cuvillier.de), Website: <https://cuvillier.de>

# 1 Einleitung

Mobilität ist eine grundlegende und zwingend notwendige Eigenschaft eines jeden modernen Wirtschaftssystems und spielt im Sozial- und Arbeitsleben der Menschen eine wichtige Rolle. Durch sie können Personen und Güter räumliche Distanzen überwinden, um diverse marktwirtschaftliche oder soziale Bedürfnisse nach einer Ortsveränderung zu befriedigen. Mobilität stellt somit ein Grundbedürfnis dar.

Zur Herstellung von Mobilität spielt der straßengebundene Transport mit 87% Anteil (im Vgl. zu weiteren Transportarten wie bspw. Bahn-, Schiff- und Flugverkehr) sowohl für den Personen- wie auch für den Güterverkehr (82% Anteil) die ausschlaggebende Rolle [2][3]. Abbildung 1-1 zeigt dabei zwei wesentliche Aspekte: Nach Schätzungen der Internationalen Energie Agentur wird sich der Jahresabsatz von Personenkraftwagen und leichten Nutzfahrzeugen bis ins Jahr 2035 auf nahezu 160Mio. Fahrzeuge verdoppeln, vornehmlich getrieben durch den Zuwachs außerhalb der klassischen Industriestaaten (Nicht-OECD). Zum Zweiten wird der Verbrennungsmotor auch in der Zukunft als alleiniger Antrieb (72.4%) oder im hybridisierten Verbund (21.3%) die wichtigste Antriebsart bleiben [4].

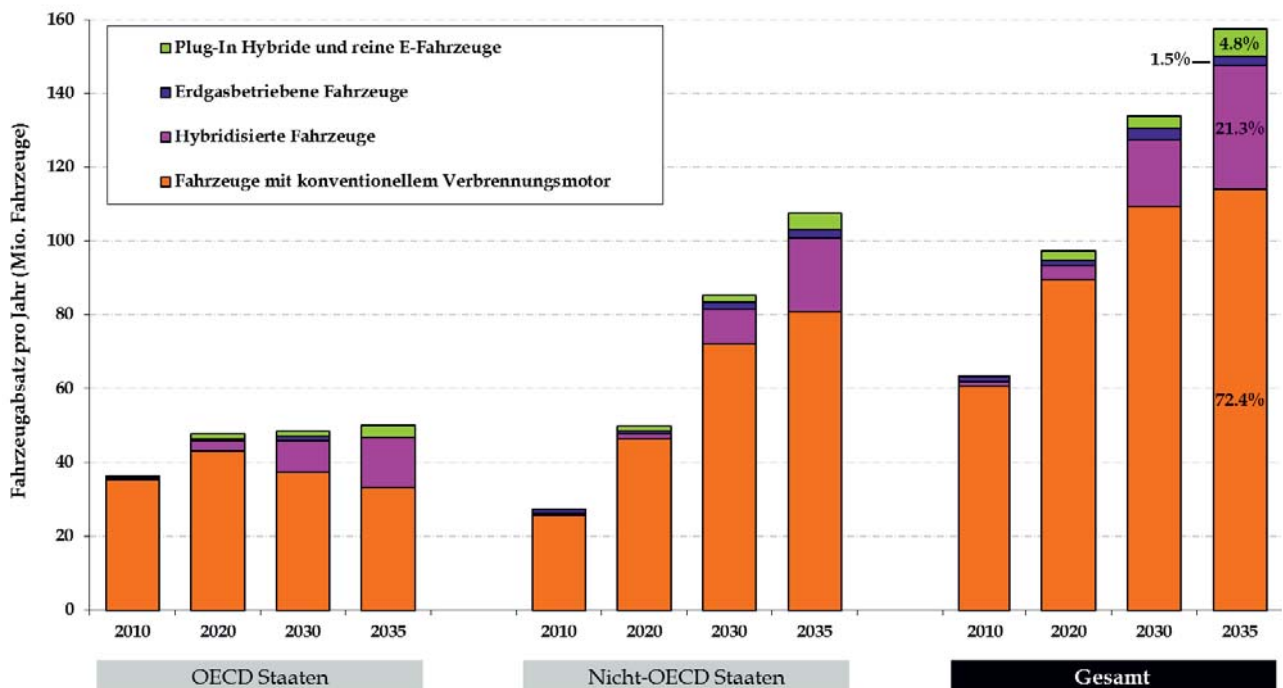


Abbildung 1-1: Globaler Absatz von PKW und leichten Nutzfahrzeugen nach Antriebsart [4]

Abbildung 1-2 zeigt die aus dem steigenden Mobilitätsangebot hervorgehenden Konsequenzen in der energetischen Betrachtung. Der Zuwachs des globalen Mineralölverbrauchs wird maßgeblich durch den zunehmenden Energiebedarf im Transportsektor bestimmt. Alleine der Anstieg des Ölverbrauchs im Transportsektor der Länder China und Indien überkompensiert den gesamten sinkenden Ölbedarf in allen Sektoren der klassischen Industriestaaten (OECD-Staaten) [4].

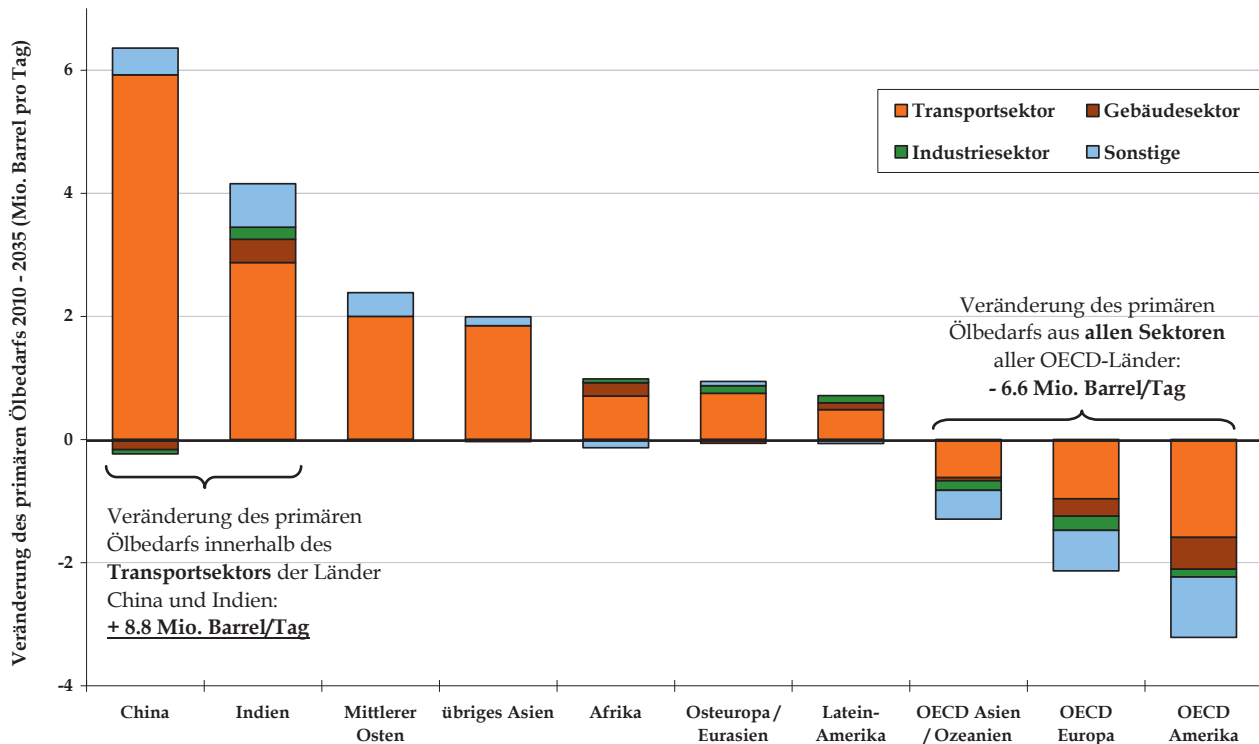


Abbildung 1-2: Veränderung des primären Ölbedarfs nach Sektoren u. Regionen 2010-2035 [4]

Zunehmende Explorationskosten, politische Einflüsse und ungewisse Marktdynamiken besitzen dabei eine erhebliche Einwirkung auf die Energiekosten für den Verbraucher. Somit ist ungewiss, in welchem Maße der Energieträger Mineralöl längerfristig kostengünstig zur Verfügung stehen wird. Darüber hinaus ist unumstritten, dass sich der globale Ausstoß von treibhausaktivem CO<sub>2</sub> negativ auf das Klimageschehen auswirkt und zu einer globalen Erderwärmung je nach zugrunde gelegtem Berechnungsszenario um bis zu 6°C am Ende dieses Jahrhunderts führen könnte [5][6].

Die Gesetzgeber reagieren auf allen wichtigen Märkten auf das dargestellte Szenario und beeinflussen die Entwicklung der Antriebstechnologie von Kraftfahrzeugen durch steuerliche Maßnahmen. So darf bspw. in der Europäischen Union die Fahrzeugflotte eines Automobilherstellers ab 2020 lediglich 95 g/km CO<sub>2</sub> pro Fahrzeug ausstoßen, was bei Nichteinhaltung zu hohen Strafzahlungen führt [7][8][9]. Daher sieht sich die Automobilindustrie weiter in der Pflicht, drastische Verbrauchsreduzierungen umzusetzen.

Zur Realisierung dieser Verbrauchspotentiale dient in der Ottomotorenentwicklung insbesondere die Downsizing-Strategie. Durch die Absenkung des Hubvolumens bei gleicher Leistung ergeben



sich eine Mitteldrucksteigerung und damit eine Lastpunktverschiebung des Motors in Bereiche besseren spezifischen Verbrauchs. Schlüsseltechnologie beim Downsizing ist die Turboaufladung. Nachdem sie sich bei Dieselantrieben flächendeckend etabliert hat, beobachtet man bei Ottomotoren einen rapiden Anstieg der Aufladequote mit weiterhin steigender Tendenz [10][11][12][13][14][15].

Insbesondere Audi hat das Potenzial der Aufladung beim Ottomotor früh erkannt und liegt in der Aufladequote von Ottomotoren weit überdurchschnittlich. Der erste direkteinspritzende, turboaufgeladene Ottomotor (TFSI) für den weltweiten Einsatz wurde 2004 von Audi vorgestellt und setzt heute seinen Siegeszug entschieden fort. Seither werden bei Audi alle R4- und R5-Ottomotoren überwiegend mit TFSI-Technologie ausgestattet und tragen durch die konsequente Fortführung der Downsizing- und Downspeedingstrategie auch zukünftig zu signifikanten CO<sub>2</sub>-Einsparungen bei.

Eine Verbrauchsreduzierung bei gleichzeitigem Ausbau souveräner Fahrleistungen stellt die Aufladetechnologie weiter in den Fokus. Um diese Vereinbarkeit auch in Zukunft darstellen zu können, wird die technologische Komplexität der Aufladesysteme zunehmen. Neben immer kürzeren Entwicklungszeiten und einer zunehmenden Derivatisierung sieht sich die Entwicklung mit steigenden Aufladegraden und den damit verbundenen, wachsenden Belastungen an den ohnehin hochbeanspruchten Aufladeaggregaten konfrontiert.

Um weiterhin eine hohe Kundenzufriedenheit im Sinne der Produktqualität und Langlebigkeit von TFSI-Motoren darzustellen, muss die Entwicklung der Systemzuverlässigkeit während des gesamten Produktentstehungsprozesses mit hoher Priorität verfolgt werden. Dabei gilt der Grundsatz, dass sich der entsprechende Kostenaufwand überproportional verringert, je früher Zuverlässigkeitsanalysen im Produktlebenszyklus angewandt werden.

Mit Hilfe der in dieser Arbeit zu entwickelnden Methodik soll die Möglichkeit zur Schaffung von Kurzprüfläufen beleuchtet werden. Insbesondere in der frühen Vorentwicklungsphase, die maßgeblich funktionsorientiert arbeitet und nur begrenzte Ressourcen besitzt, sollen diese Kurzprüfläufe zur Anwendung kommen. Dadurch sollen frühzeitig mechanische Schwachstellen neuer Konzepte offengelegt werden, um bei der Entwicklung neuer Technologien schon in einer Vorentwicklungsphase belastbare Aussagen über das Festigkeitsverhalten und die Zuverlässigkeit zu gewinnen.

## 2 Stand der Technik

### 2.1 Abgrenzung und Funktionsweise

Unter Aufladung versteht man nach DIN 6262 das Vorverdichten der gesamten oder eines Teils einer Ladung, so dass mit der spezifischen Nutzarbeit Drehmoment und Leistung zunehmen. Neben den verdichterlosen Aufladeverfahren wie bspw. Resonanz- und Druckwellenaufladung wird zwischen mechanisch und strömungsenergetisch angetriebenen Verdichtern unterschieden, wie sie zumeist in Form der Turboaufladung realisiert werden [16].

Der Turbolader besteht aus zwei Strömungsmaschinen, einer Abgasturbine und einem Verdichter, welche auf einer gemeinsamen Welle angeordnet sind. Die im Abgas enthaltene Enthalpie wird in der Turbine in mechanische Energie zum Antrieb des Verdichters umgewandelt, um so den Ladedruck zu erhöhen. Energetisch ist der ATL nur durch den Abgas- und Frischluftmassenstrom mit dem Verbrennungsmotor gekoppelt [16][17]. Abbildung 2-1 [18] zeigt einen Standard-ATL mit einflutiger Turbinenschnecke und Wastegate-Ladedruckregelung, die wahlweise wie in der Abbildung über eine membrangesteuerte Druckdose wird oder über einen elektrischen Aktuator angesteuert werden kann. Diese Art der Ladedruckregelung stellt bei Ottomotoren die am weitesten verbreitete Technik dar. Die Turboaufladung besitzt den Vorteil, einen Teil der im Abgas enthaltene Enthalpie zu nutzen und im Gegensatz zu Kompressoren, die direkt von der Kurbelwelle Nutzarbeit beziehen, keine mechanische Leistung abzufordern [19]. Darüber hinaus bietet sie Vorteile im Package, bei den Kosten und im akustischen Verhalten, so dass sie das am meisten eingesetzte Aufladeverfahren darstellt. Die technische Herausforderung bei der Turboaufladung ist neben der thermodynamischen Auslegung die Betriebssicherheit unter den hohen Belastungen, die auch in der Geschichte der Aufladung immer eine entscheidende Rolle spielte.

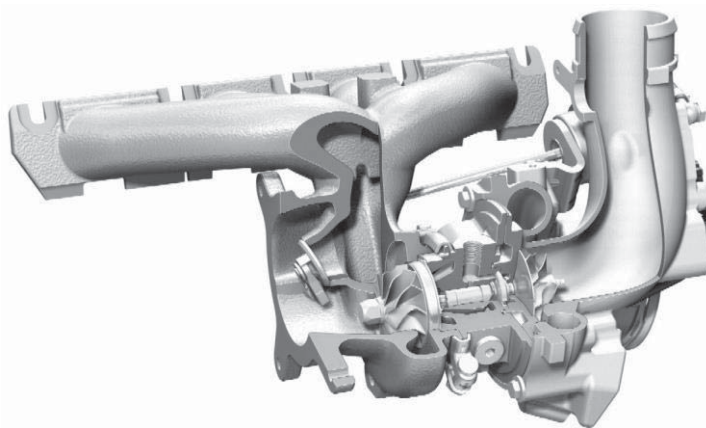


Abbildung 2-1: Abgasturbolader mit Integralkrümmung und Wastegate-Ladedruckregelung [18]

## 2.2 Rückblick

Rund 30 Jahre nach der Entwicklung des atmosphärischen Gasmotors durch Nikolaus A. Otto erkennt der Schweizer Alfred J. Büchi den wirkungsgradsteigernden Nutzen der Turboaufladung und meldet 1905 beim Kaiserlichen Patentamt in Berlin sein Patent über „einen Kompressor (Turbinkompressor), einen Kolbenmotor und einer dahintergeschalteten Turbine“ an. In den darauffolgenden Jahren entsteht eine Vielzahl an turboaufgeladenen Stationärmotoren und Großdieselmotoren für die Schifffahrt [20][21][22][23][24].

Auch in der Luftfahrt ergibt sich schnell ein Bedarf an aufgeladenen Motoren. Aufgrund der abnehmenden Luftdichte in zunehmender Höhe verlieren Saugmotoren spürbar an Leistung. Zuerst half man sich mit überhoch verdichteten Motoren, bevor überwiegend die mechanische Aufladung bis Ende der 1930er-Jahre bei Flugmotoren zur Anwendung kam, da sich die Turboaufladung bis dato aufgrund ihrer mangelnden Betriebsfestigkeit nicht durchsetzen konnte. Erst gegen Ende des Zweiten Weltkrieges setzt sich die Turboaufladung aus dem Zwang, effizientere Motoren zu bauen, langsam in der Flugmotorentechnik durch.

Nach Ende des Zweiten Weltkrieges gewinnt die zivile Luftfahrt an Bedeutung, für deren Flugdienste hauptsächlich Kolbenmotoren eingesetzt wurden. Einer der letzten Flugkolbenmotoren wurde von Curtiss-Wright hergestellt und besaß einen durch mechanische Radialverdichter aufgeladenen Doppelsternmotor mit 2x9 Zylindern, die zuletzt als Turbo-Compound-Triebwerke ausgeführt wurden (Abbildung 2-2). Die Leistung der direkteinspritzenden R-3350 Duplex Cyclone betrug bei 55 Litern Hubraum ca. 2.800 kW. Es dauerte Jahre, bis die Störanfälligkeit des Motors reduziert werden konnte und dem Flugzeug letztlich den Spitznamen „Beste Dreimotorige der Welt“ einbrachte. Das Triebwerk kam vor allem in der Lockheed Super Constellation zum Einsatz und begründete mit der Entwicklung von leistungsfähigeren Strahltriebwerken das Ende der Kolbenmotorenära in der Luftfahrt [25][26][27][28][29].

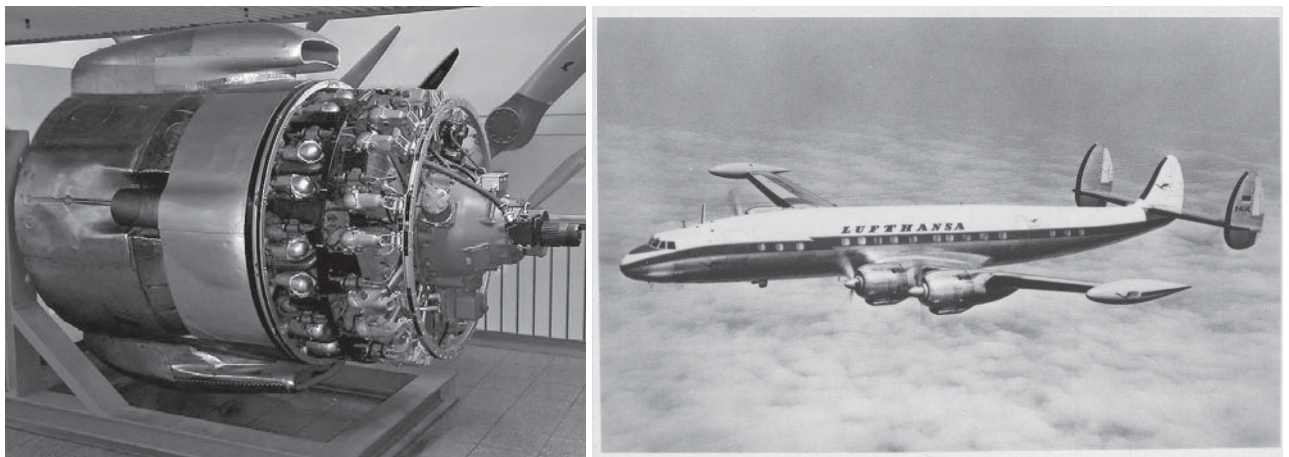


Abbildung 2-2: Curtiss-Wright Duplex Cyclone; Lockheed Super Constellation [28][29]



Während sich die Aufladetechnik im Rennsport durch das hohe Potential zur Leistungssteigerung schon vor dem Zweiten Weltkrieg etablierte, war sie in der Fahrzeugindustrie lange Zeit den Nutzfahrzeug-Dieselmotoren vorbehalten. Erst 1961 findet die Turboaufladung den Weg in serienmäßige Personenwagen. General Motors stellte mit dem Oldsmobile F-85 Jetfire (Abbildung 2-3) ein Fahrzeug vor, welches vor allem den aus Europa in den amerikanischen Markt drängenden, kleineren Fahrzeugen Einhalt gebieten sollte. Der F-85 besaß mit 3.5 Litern Hubraum für amerikanische Verhältnisse einen unzeitgemäß kleinen Leichtmetall-V8-Motor, der erstmalig von einem Turbolader unterstützt wurde. Der Turbolader fand sich im V des Achtzylinders wieder und wurde vom Abgas der rechten Zylinderbank beaufschlagt. Die Turbine besaß einen relativ kleinen Durchmesser für spontanes Ansprechverhalten und erstmalig einen Turbinenbypass, das Wastegate, um in Betriebspunkten hoher Abgasströme ein Stopfen der Turbine zu vermeiden. Da die Ingenieure eine für Turbomotoren ungewöhnlich hohe Verdichtung von 10.25 beibehielten, wurde zur Erhöhung der Klopffestigkeit ein Zusatztank im Motorraum installiert, der bei Hochlastanforderung das „Turbo-Rocket-Fluid“, ein Wasser-Methylalkohol-Gemisch, zur Gemischaufbereitung in den Vergaser einspritzte um so das Ansauggemisch zu kühlen. Anfangs feierte die Presse den Oldsmobile F-85. Das Fachblatt „Car & Driver“ schrieb: "the latest Oldsmobile offers sports-car performance in a deluxe compact car" [...] "the power gain in mid-range torque characteristics is its most striking advance" [30].

Neben den einhergehenden Zusatzpflichten des Kunden (Nachfüllen des Zusatztanks, Nachlaufenlassen des Motors) konnte sich die Turboaufladung trotz der guten Fahreigenschaften aufgrund der mangelnden Betriebsfestigkeit des Turbomotors nicht durchsetzen und wurde von General Motors bereits 1964 wieder aus dem Programm genommen. 1965 bot General Motors den Kunden des Jetfires den kostenlosen Tausch des Turbo-Rocket-Motors gegen einen großvolumigen konventionellen V8-Saugmotor an. So blieben der Oldsmobile F-85 Jetfire und der zeitgleich erschienene Chevrolet Corvair Monza für Jahre Vorreiter in der Turbotechnologie [31][32].

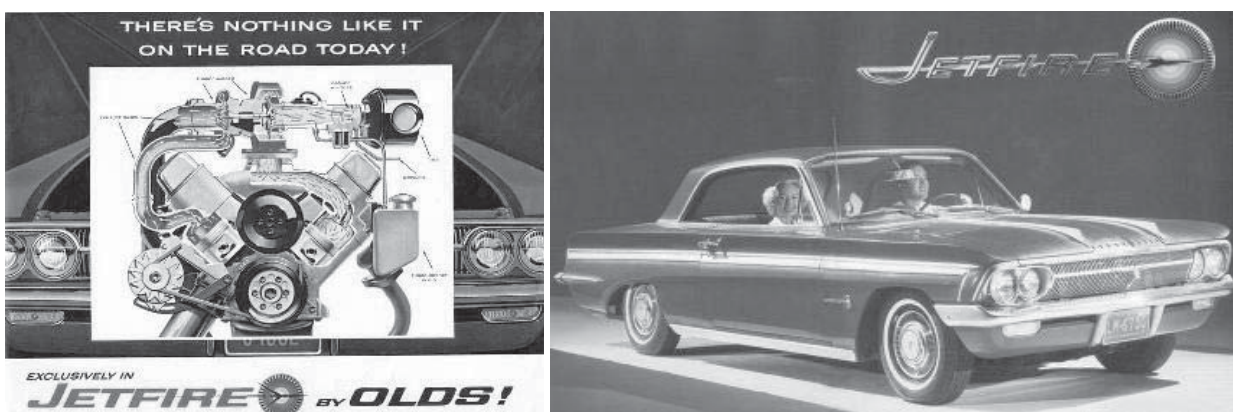


Abbildung 2-3: GM-Werbung aus dem Jahr 1963 für den Oldsmobile Jetfire [32]

Erst acht Jahre später präsentiert BMW den 2002 turbo, 1975 Porsche den 911turbo und 1978 Daimler-Benz den ersten PKW-Turbodiesel. 1979 erschien im Audi 200 5T ein Fünfzylinder-Turbomotor, der die Grundlage für eine weitreichende Palette von aufgeladenen R5-Motoren bildete und schließlich im Audi quattro Sport S1 mit über 440kW/600PS aus 2.1 Liter Hubraum einen Meilenstein im Rennsport setzte. Trotz dieser Erfolge war die Entwicklung der Turboaufladung aufgrund mangelnder Beherrschbarkeit der hohen Belastungen von teilweise kostenintensiven Rückschlägen begleitet und unterstreicht die Wichtigkeit einer betriebssicheren und zuverlässigen Auslegung der Aufladeaggregate.

### 2.3 Aufladung und Downsizing

Heute ist die Turboaufladung bei Dieselmotoren zum Standard geworden und die erwähnte Wirkungsgradsteigerung durch Downsizing mit Hilfe der Turboaufladung tritt bei Ottomotoren in den Vordergrund. Durch die Verwendung eines Aufladeaggregats kann der Grundmotor verkleinert werden, um bei gleicher Leistung Betriebspunktverlagerungen in Kennfeldbereiche zu ermöglichen, die bei höheren Mitteldrücken einen niedrigeren spezifischen Verbrauch aufweisen und somit den Gesamtverbrauch minimieren. Wird gleichzeitig eine längere Getriebeübersetzung im Fahrzeug realisiert, können durch die abgesenkte Motordrehzahl und der weiteren Verlagerung der Motorbetriebspunkte in Bereiche höherer Mitteldruckniveaus (Downspeeding) zusätzliche Verbrauchspotentiale ausgeschöpft werden [33][34][35].



Modell	A4 (B6) 2.4	A4 (B8) 1.8 TFSI
		
Modelljahr	2003	2012
Motor	2.4L V6 30V	1.8L R4 16V TFSI
Leistung bei	125kW bei 6000 1/min	125kW bei 3800 - 6200 1/min
Drehmoment bei	230Nm bei 3200 1/min	320Nm bei 1400 - 3700 1/min
Beschleunigung 0-100	8.8s	8.1s
Vmax	226km/h	230km/h
Emissionsklasse	EU 4	EU 5
Verbrauch	9.5 L/100km ROZ 98	5.7 L/100km ROZ 95
CO2-Emission	228 g/km	134 g/km

Abbildung 2-4: Vergleich A4 Lim. 2.4 V6 (MJ 2003) und A4 Lim. 1.8 TFSI (MJ 2012) [36][ 37]





Ein Beispiel der Anwendung dieses verbrauchsoptimierten Konzeptes ist der aktuelle A4 (B8-Baureihe) mit 1.8L-TFSI-Aggregat. Durch die Umsetzung fahrzeugseitiger Maßnahmen wurde mit Hilfe des früh anliegenden, hohen Drehmoments und einer angepassten Getriebeübersetzung ein Zulassungs-Verbrauch von 5.7 L/100km, entsprechend 134 g/km CO<sub>2</sub>, realisiert. Abbildung 2-4 zeigt einen Vergleich zwischen der aktuellen B8-Baureihe und einem gleichwertigen Modell von 2003 (B6-Baureihe), bei dem trotz verbesserter Fahrleistungen die Umsetzung der Verbrauchspotentiale durch Downsizing und -speeding deutlich erkennbar sind [36][37].

Durch die Verwendung der Abgasturboaufladung entstehen konzeptbedingte Nachteile im Betriebsverhalten des Motors. Dies sind das Instationärverhalten und die sich daraus ergebende dynamische Fahrbarkeit sowie die Anpassung der Aufladung an die ottomotorischen Prozessparameter und Rahmenbedingungen, die meist nur suboptimal und kompromissbehaftet umgesetzt werden können. In der Praxis äußert sich dieses Phänomen durch einen verzögerten Momentenaufbau, wenn ein Fahrer durch die Stellung des Gaspedals einen Momentenwunsch absetzt und augenblicklichen Vortrieb erwartet. Die Herausforderung bei aufgeladenen Motoren liegt daher im schnellen Ladedruckaufbau ohne das weitläufig bekannte „Turboloch“. Insbesondere bei Downsizing-Aggregaten kann dieses Phänomen aufgrund der hohen abzudeckenden Massenstromspektren und hohen Aufladegrade besonders zu Tage treten.

Darüber hinaus können die bei einem Downsizing-Motor umgesetzten technischen Schritte aufgrund des ottomotorischen Brennverfahrens in bestimmten Betriebsbereichen zu Nachteilen führen, besonders im Vollastbetrieb. Dort führen Maßnahmen zur Kühlung des Abgases sowie ungünstige Zündwinkel- und Verbrennungsschwerpunktslagen zur Vermeidung von klopfender Verbrennung zu einer Verschlechterung des Wirkungsgrades und können den Kraftstoffverbrauch in diesen Betriebspunkten im Vergleich zu leistungsgleichen, hubraumstärkeren Saugmotoren überproportional steigen lassen. Den Aufladeaggregaten kommt hier neben einer optimalen thermodynamischen Auslegung auch die Ausreizung der mechanischen Grenzen im Hinblick auf höchstmögliche Abgastemperaturen und Laderdrehzahlen eine wichtige Rolle zu.

Mit einem konventionellen Standardturbolader sind die Eigenschaften hohes Low-End-Torque, saugmotor-ähnliches Ansprechverhalten, minimaler Verbrauch und maximale Leistungsausbeute nur begrenzt parallel realisierbar und stellen immer eine Kompromisslösung dar.

Zur Auflösung dieses Kompromisses existieren in der Aufladetechnik verschiedene Konzepte wie bspw. die Verwendung einer variablen Turbinengeometrie oder eines mehrfach aufgeladenen Systems. Darüber hinaus kann der Standard-Mono-ATL durch Ausreizen der Materialeigenschaften und durch Einsatz höherwertigerer Werkstoffe aufqualifiziert werden. Diese Möglichkeiten werden im Folgenden auszugsweise mit ihren Besonderheiten in Bezug auf die mechanische Betriebsfestigkeit vorgestellt.

## 2.4 Technologische Trends in der Mono-Aufladung

### 2.4.1 Erhöhte Abgastemperaturen

Die Abgastemperaturen heute üblicher Otto-Brennverfahren erreichen bis zum Turbineneintritt Werte bis 1050°C. Da die Turbine temperaturbegrenzt ist, muss durch innermotorische Maßnahmen oder Abgaskühlung eine Absenkung erwirkt werden, die wirkungsgradungünstige Betriebspunkte mit erhöhtem Vollastverbrauch bedeuten. Ein Meilenstein stellt dabei die aktuelle Generation der Audi TFSI-Motoren dar, die einen in den Zylinderkopf integrierten, gekühlten Abgaskrümmer besitzen und genau diese nachteiligen Betriebspunkte umgehen.

Kostengünstige Eisengusswerkstoffe lassen standardmäßig Abgastemperaturen von 950°C zu, deren Überschreitung sehr schnell zu thermomechanischen Überbeanspruchungen führt. Um auch weiterhin, bei weiter steigenden Aufladeraten, an der Vollast einen wirkungsgradoptimalen Betrieb des Motors durch Anhebung der zulässigen Abgastemperatur zu ermöglichen, müssen hochtemperaturbeständigere Werkstoffe an Turbinengehäuse und -rad eingesetzt werden. Dabei entstehen durch den vermehrten Einsatz von hochwertigeren Legierungen und deren aufwendige Verarbeitung erhebliche Zusatzkosten. Für die jeweilige Qualitätsstufe der eingesetzten Werkstoffe ist es daher Auslegungsziel, ein Maximum an Temperaturbelastung zu ermöglichen.

Abbildung 2-5 zeigt den Krümmer des Versuchsträgers bei verschiedenen Abgastemperaturen. Die hohen Temperaturen, die bis in den Bereich von Warmschmiedetemperatur reichen, unterstreichen die Herausforderung, den Abgasturbolader betriebssicher auszulegen.

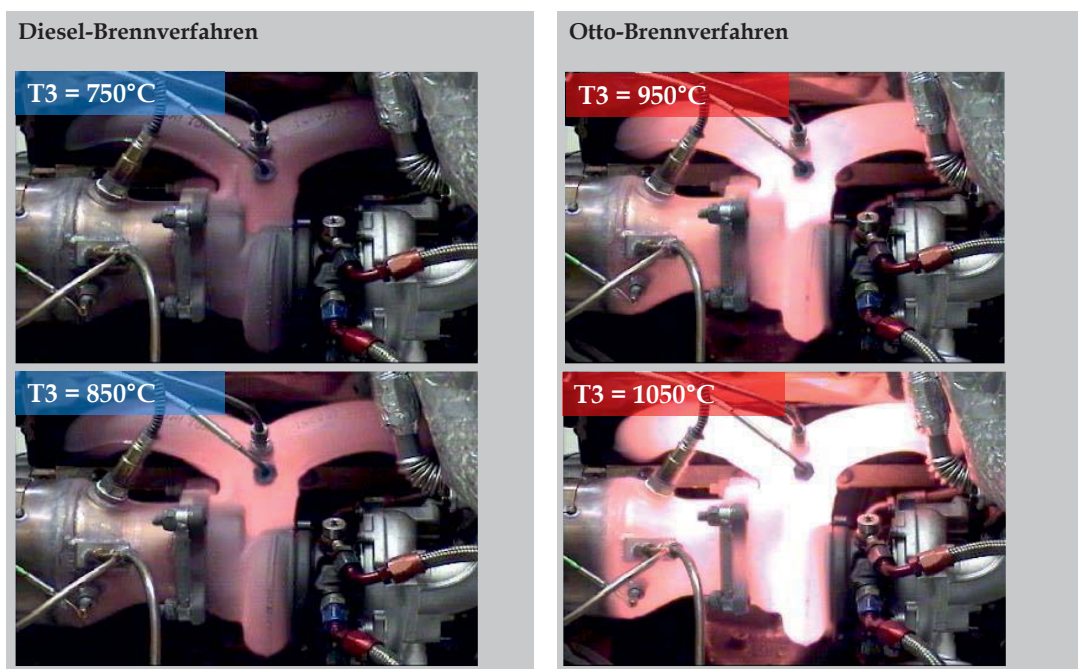


Abbildung 2-5: Betrieb eines Abgasturboladers bei verschiedenen Abgastemperaturen



### 2.4.2 Erhöhte Umfangsgeschwindigkeiten

Eine Anhebung der maximal zulässigen Umfangsgeschwindigkeiten kann bei entsprechender Auslegung der Turbinen- und Verdichterräder dazu genutzt werden, den maximalen Durchsatz des Turboladers zu erhöhen. Dies hat zur Folge, dass die Räder in ihrem Durchmesser nicht größer werden und somit auch das Massenträgheitsmoment nicht steigt. Faktisch kann so eine Leistungssteigerung bei gleichem Ansprechverhalten erzielt werden. Mit Hilfe leistungsfähiger Festigkeitsberechnungen und unter Einsatz hochfester Werkstoffe können an den äußeren Enden der Verdichterräder heute Spitzengeschwindigkeiten von bis zu 600m/s erreicht werden.

Aus mechanischer Sicht führen die hohen Umfangsgeschwindigkeiten zu hohen Belastungen an den Rädern und der Wellenlagerung, zumal Betriebspunkte mit Höchstdrehzahlen immer bei maximalen Druckverhältnissen, Durchsätzen und hohen Temperaturen einher gehen. Somit muss neben einer stabilen Lagerung des Läufers auch sichergestellt sein, dass die Räder robust gegen die ständigen Aufheiz- und Abkühlvorgänge im Turbolader ausgelegt sind sowie eine Überschreitung der Zeitdehngrenze durch Kriechbeanspruchung vermieden wird, da das Rad nach einer gewissen Laufzeit sonst an seinem Gehäuse anstreift und zum Ausfall des ATLS führt.

### 2.4.3 Titan-Aluminid

Während des transienten Ladedruckaufbaus muss neben der Verdichtungsarbeit zeitgleich Energie zur Beschleunigung des Läufers aufgewendet werden, die neben der zu erreichenden Winkelgeschwindigkeit ( $\omega$ ) maßgeblich vom Massenträgheitsmoment ( $J$ ) gemäß Formel 2-1 abhängt. Das Massenträgheitsmoment eines (starren) Körpers hängt vom senkrechten Abstand zur Rotationsachse  $r_i$  sowie von der Masse  $m_i$  des zu beschleunigenden Masseteilchens ab. Durch eine Verringerung der Dichte kann folgerichtig das Massenträgheitsmoment linear beeinflusst werden.

$$E_{rot} = \frac{1}{2} J \omega^2 \quad J = \sum_i^N m_i r_i^2$$

*Formel 2-1: Berechnung des Massenträgheitsmomentes*

Während die Läuferwelle aufgrund des kleinen Radius kaum Einfluss auf das Trägheitsmoment hat, besitzen Dichteverringerungen am Turbinenrad eine große Hebelwirkung. Sie bestehen meist aus Nickelbasislegierungen, die je nach Zusammensetzung für Einsatztemperaturen bis 1050°C geeignet sind. Ihre Dichten variieren zwischen 7,9 g/cm<sup>3</sup> und 8,6 g/cm<sup>3</sup> [40][41].

In den 80er Jahren wurden vollkeramische Turbinenräder aus Siliziumnitriden und -carbiden untersucht, um das Trägheitsmoments abzusenken und höhere Abgastemperaturen zuzulassen. Die aufwendige Produktion und die nachteiligen Eigenschaften von Keramiken wie hohe Sprödigkeit, geringe Bruchdehnung, schlechte Thermowechselbeständigkeit und das hohe Berst-