



Uwe Rosenberger

Optimierte Prüfmethoden zur mechanischen Erprobung von Aufladeaggregaten



Audi-Dissertationsreihe, Band 127





Fakultät der Verkehrswissenschaften „Friedrich List“ der Technischen
Universität
Dresden

Dissertation

**Optimierte Prüfmethode zur mechanischen Erprobung von
Aufladeaggregaten**

zur Erlangung des akademischen Grades

Doktor-Ingenieur

(Dr.-Ing.)

vorgelegt von

Dipl.-Ing. Uwe Gil Rosenberger

aus

Leonberg

Baden-Württemberg

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Hans Zellbeck, Technische Universität Dresden

Prof. Dr.-Ing. Uwe Gampe, Technische Universität Dresden

Tag d. Verteidigung: 01. November 2017



Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

1. Aufl. - Göttingen: Cuvillier, 2018

Zugl.: (TU) Dresden, Univ., Diss., 2017

© CUVILLIER VERLAG, Göttingen 2018

Nonnenstieg 8, 37075 Göttingen

Telefon: 0551-54724-0

Telefax: 0551-54724-21

www.cuvillier.de

Alle Rechte vorbehalten. Ohne ausdrückliche Genehmigung des Verlages ist es nicht gestattet, das Buch oder Teile daraus auf fotomechanischem Weg (Fotokopie, Mikrokopie) zu vervielfältigen.

1. Auflage, 2018

Gedruckt auf umweltfreundlichem, säurefreiem Papier aus nachhaltiger Forstwirtschaft.

ISBN 978-3-7369-9738-7

eISBN 978-3-7369-8738-8



„Maschinen, Apparate, Fahrzeuge und Bauwerke versucht man ohne unnötigen Aufwand an Werkstoff und Arbeit grundsätzlich so zu bemessen, dass sie den zugemuteten, erwarteten oder möglichen Beanspruchungen auf die Dauer oder für eine vorgesehene Zeit widerstehen. Die Lösung dieser in der Praxis vielfältig abgewandelten Aufgabe gelingt umso sicherer, je klarer die Beanspruchungsverhältnisse erkundet sind, je genauer das Verhalten der Werkstoffe bei solchen Beanspruchungen bekannt ist, je zweckmäßiger die Beanspruchung und die im Werkstoff darstellbare Widerstandsfähigkeit an den entscheidenden Stellen aufeinander abgestimmt wurden und je besser diese Voraussetzungen im fertigen Gegenstand erfüllt sind.“

M. Pfender, 1956 [1]





Vorwort

Die Dissertation entstand während meiner Tätigkeit in der Ottomotoren-Vorentwicklung der Audi AG in Ingolstadt in Zusammenarbeit mit der Technischen Universität Dresden. Die wissenschaftliche Betreuung wurde von Herrn Prof. Dr.-Ing. Hans Zellbeck, Leiter des Lehrstuhls Verbrennungsmotoren der TU Dresden, übernommen. Ihm gilt mein großer Dank für die Übernahme des Hauptreferats, die wertvollen Ratschläge und wohlwollende Förderung.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Uwe Gampe, TU Dresden, danke ich für die Übernahme des Mitberichts. Herrn Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Fengler, TU Dresden, Herrn Prof. Dr.-Ing. Günther Prokop, TU Dresden, sowie Herrn Prof. Dr.-Ing. Bernhard Bäker, TU Dresden, danke ich für die Mitarbeit als Vorsitzender sowie Prüfer in der Promotionskommission.

Mein großer Dank gilt Herrn Dr.-Ing. Rainer Wurms, Audi AG, sowie Herrn Dipl.-Ing. Markus Sonner, Audi AG, die mir die Promotion in der Vorentwicklung Ottomotoren ermöglicht haben. Das große entgegengebrachte Vertrauen, die großzügige Förderung und Unterstützung bei der wissenschaftlichen Tätigkeit und Entstehung der Arbeit sowie die Bereitstellung der notwendigen Ressourcen haben wesentlich zum Gelingen der Arbeit beigetragen.

Bedanken möchte ich mich bei Hr. Dr.-Ing. Anton Stich sowie Hr. Dr.-Ing. Gregor Hullin, die durch ihre Expertise in der Werkstoffwissenschaft die Arbeit mit unterstützt haben. Besonderer Dank gilt auch den Kollegen Hr. Dr.-Ing. Peter Klumpp, Hr. Dipl.-Ing. Achim Lembach, Hr. Dr.-Ing. Malte Löprecht sowie Hr. Dipl.-Ing. Ekkehard Rieder für die Unterstützung in der Festigkeitsberechnung. Großer Dank gilt den Kollegen des Prüffeldes der Audi AG sowie der Motorentchnik Kolb in Gaimersheim für die Unterstützung bei der Durchführung der Motorenversuche. Darüber hinaus gilt mein großer Dank den Kollegen der Ottomotoren-Vorentwicklung, die mich während meiner Promotion unterstützt und motiviert haben.

Sehr herzlicher Dank gilt meinen Eltern Franz und Young-Ok Rosenberger, die mir die Basis meiner Ausbildung gelegt haben und mich in meinem Denken und Handeln immer bestärkt und unterstützt haben.

Der größte Dank gilt meiner Frau Beata sowie meinem Sohn Henry und meiner Tochter Tamara. Durch ihren Verzicht und ihre Opferbereitschaft, Unterstützung, Motivation und aufbauenden Worte ist die Entstehung der Arbeit überhaupt nur möglich geworden.

Ingolstadt, den 19. November 2017





Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Stand der Technik	4
2.1	Abgrenzung und Funktionsweise	4
2.2	Rückblick	5
2.3	Aufladung und Downsizing	7
2.4	Technologische Trends in der Mono-Aufladung	9
2.4.1	Erhöhte Abgastemperaturen	9
2.4.2	Erhöhte Umfangsgeschwindigkeiten	10
2.4.3	Titan-Aluminid	10
3	Die Zuverlässigkeit von Turboladern	12
3.1	Charakteristische Ausfallursachen	12
3.2	Zuverlässigkeit	13
3.3	Klassische Betriebsfestigkeit	16
3.4	Heutiges Vorgehen zur Sicherstellung der Zuverlässigkeit	18
3.4.1	Dynamischer Hochgeschwindigkeits Prüflauf (DHP ₃₁₉)	19
3.4.2	Stationärer Höchstgeschwindigkeits Prüflauf (SHP ₁₀₅)	20
3.4.3	Raster Prüflauf (RPL ₁₇₁)	21
3.4.4	Hochdynamischer Handlings Parcours (HHP ₃₁₉)	21
3.4.5	Thermo Schock Prüflauf (TSP ₈₆)	22
3.5	Ableitung des Handlungsbedarfs	23



4	Vorgehensweise zur Prüfzeitverkürzung	25
4.1	Prinzip der Prüfzeitverkürzung.....	25
4.1.1	Bestimmung des Zielprüflaufs.....	25
4.1.2	Übereilen und Überhöhen des Zielprüflaufs.....	27
4.1.3	Überhöhen mit Hilfe des Arrhenius-Ansatzes	29
4.2	Statistische Auswertung der Prüfläufe	30
4.2.1	Messtechnische Erfassung der bestehenden Prüfläufe	30
4.2.2	Lastkollektive und deren Auswertung.....	33
4.2.3	Bildung des Schädigungsparameters Omega.....	35
5	Die Prüfzeitverkürzung im Anwendungsfall	37
5.1	Thermische Ermüdung am Turbinengehäuse.....	38
5.1.1	Beanspruchungsverhalten	38
5.1.2	Turbinengehäusewerkstoff.....	39
5.1.3	Rechnerische Modellierung und Auswahl des Zielprüflaufs	41
5.1.4	Versuchszeitverkürzung durch Übereilen	49
5.1.5	Versuchszeitverkürzung durch Überhöhen	53
5.1.6	Validierung am Prüfstand	56
5.2	Kriechen am Inconel-Turbinenrad.....	67
5.2.1	Beanspruchungsverhalten	67
5.2.2	Turbinenradwerkstoff	70
5.2.3	Rechnerische Modellierung und Auswahl des Zielprüflaufs	71
5.2.4	Versuchszeitverkürzung durch Überhöhen	78
5.2.5	Validierung am Prüfstand	82
5.3	Kriechen am TiAl-Turbinenrad	87
5.3.1	Beanspruchungsverhalten	87
5.3.2	Turbinenradwerkstoff	87
5.3.3	Rechnerische Modellierung und Auswahl des Zielprüflaufs	89
5.3.4	Versuchszeitverkürzung durch Überhöhen	92
5.3.5	Validierung am Prüfstand	94



5.4	Oxydation am TiAl-Turbinenrad	99
5.4.1	Beanspruchungsverhalten.....	99
5.4.2	Turbinenradwerkstoff.....	101
5.4.3	Rechnerische Modellierung und Auswahl des Zielprüflaufs	102
5.4.4	Versuchszeitverkürzung durch Übereilen.....	106
5.4.5	Validierung am Prüfstand.....	109
6	Zusammenfassung	115
7	Anhang	119
7.1	Weitergehende Analysen zum Kriechverhalten von TiAl	119
7.2	Abbildungsverzeichnis	132
7.3	Formelverzeichnis	136
7.4	Formelzeichenverzeichnis	137
7.5	Abkürzungsverzeichnis	139
7.6	Literaturverzeichnis	142



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].

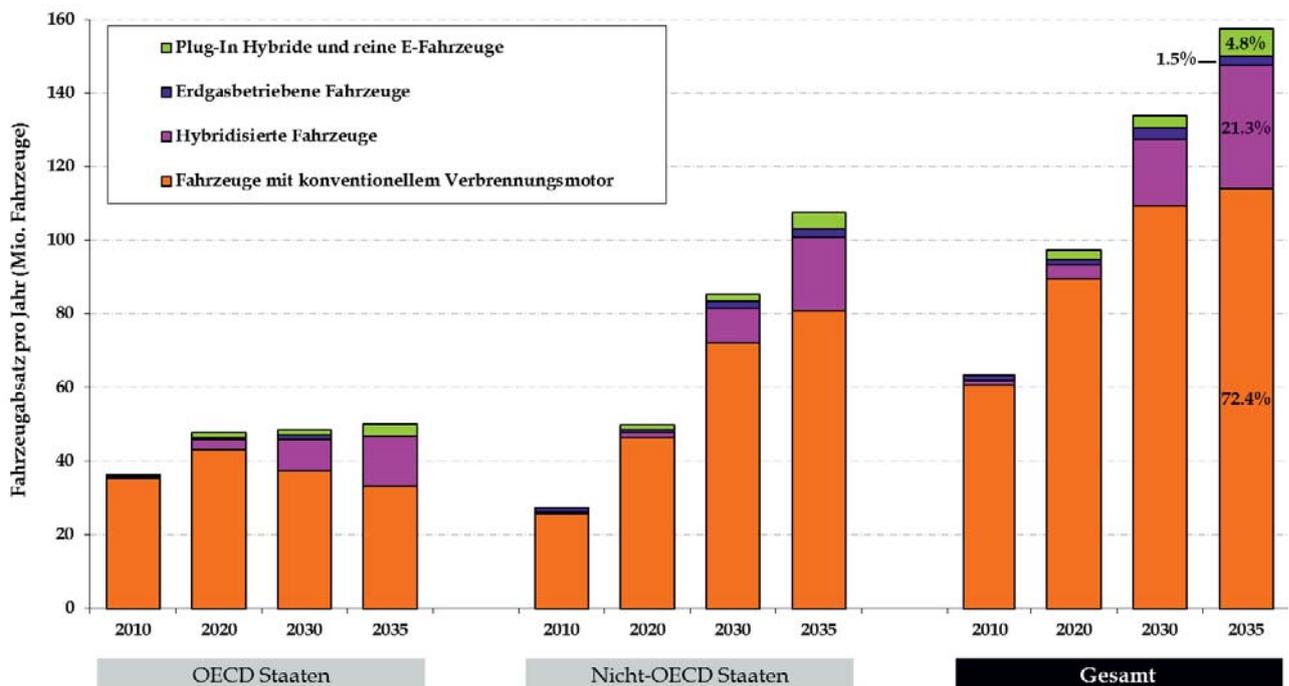


Abbildung 1-1: Globaler Absatz von PKW und leichten Nutzfahrzeugen nach Antriebsart [4]

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].

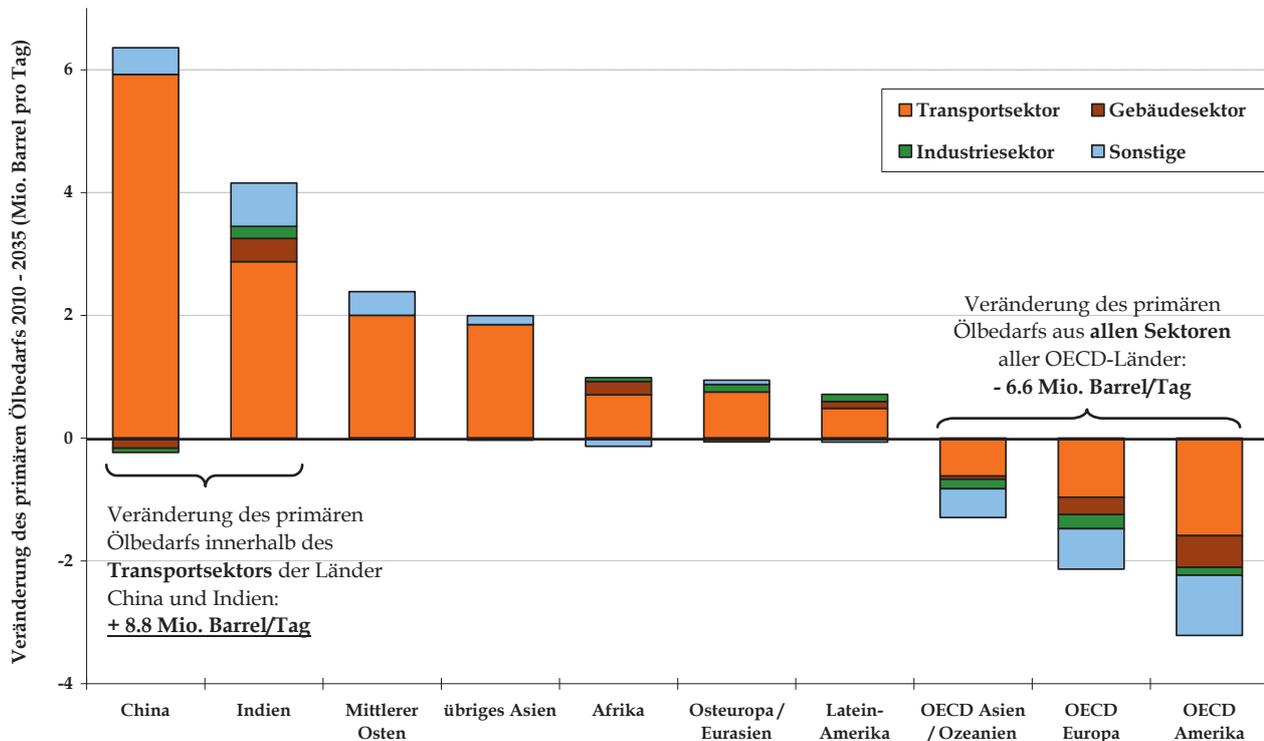


Abbildung 1-2: Veränderung des primären Ölbedarfs nach Sektoren u. Regionen 2010-2035 [4]

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 CO₂ 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 CO₂ 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 CO₂-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.

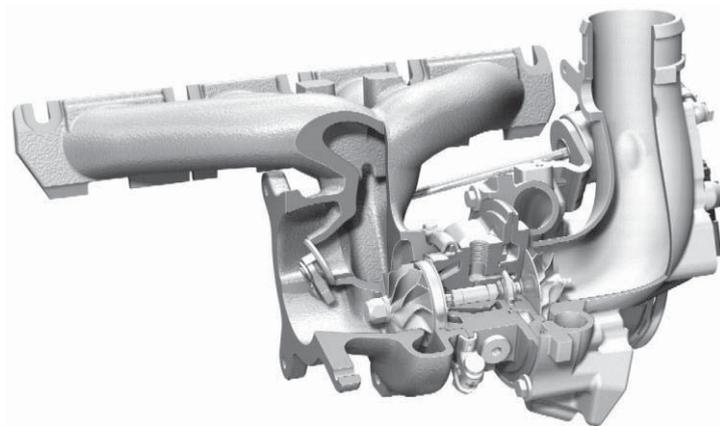


Abbildung 2-1: Abgasturbolader mit Integralkrümmung und Wastegate-Ladedruckregelung [18]