



Abgasrückführung am Ottomotor – Ein Baustein zur Verbrauchs- und Emissionsreduktion

Thorsten Reimers | 28.01.2020

UNSER **HERZ** SCHLÄGT FÜR IHREN ANTRIEB.

RHEINMETALL GROUP:



UMSATZ **6,148 MrdEUR**

OPERATIVES ERGEBNIS/EBIT **492 MioEUR** ↑ 8%

MITARBEITER **ca. 24.950**



UMSATZ **2,930 MrdEUR**

OPERATIVES ERGEBNIS/EBIT **262 MioEUR** ↑ 8,9%

MITARBEITER **ca. 12.855**



UMSATZ **3,221 MrdEUR**

OPERATIVES ERGEBNIS/EBIT **254 MioEUR** ↑ 7,9%

MITARBEITER **ca. 11.832**

RHEINMETALL AUTOMOTIVE:

Der Automobilzulieferer



KOLBENSCHMIDT

Lösungen für **nachhaltige Emissionsreduktion und reduzierten Kraftstoffverbrauch** durch **minimierte Reibung** und effizienten **Leichtbau**.



PIERBURG

Lösungen für **nachhaltige Emissionsreduktion und reduzierten Kraftstoffverbrauch** durch ganzheitliche **Abgasrückführungskonzepte**, die effiziente **Elektrifizierung** des Antriebsstrangs, E-Mobilität und intelligentes **Thermomanagement**.



MOTORSERVICE

Globales Ersatzteilgeschäft. Bedient den Großhandel des **freien Ersatzteilmarktes** sowie die gebundenen **Werkstätten** der Automobilhersteller.



UMSATZ NACH SEGMENTEN 2018

36%

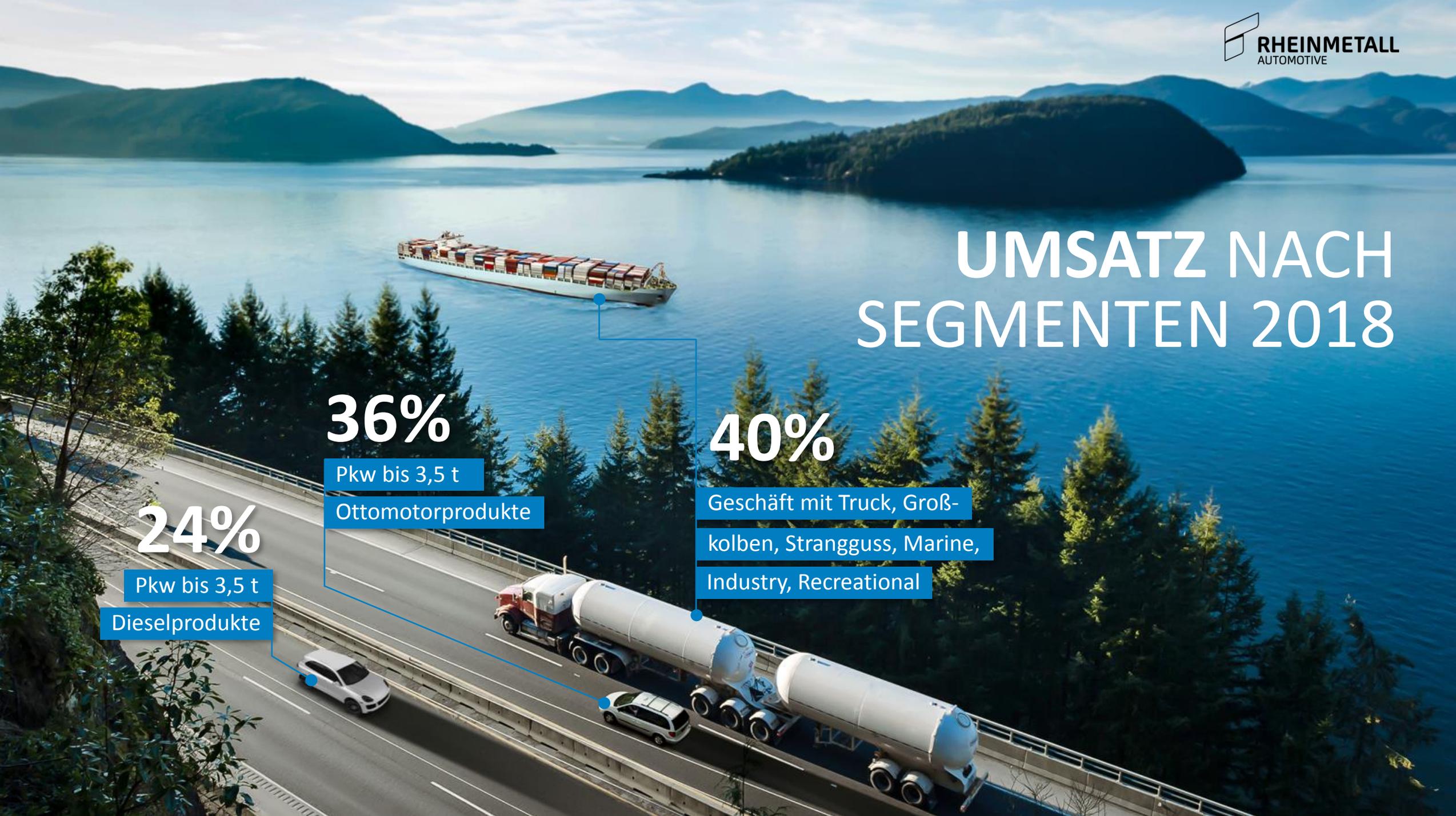
Pkw bis 3,5 t
Ottomotorprodukte

40%

Geschäft mit Truck, Groß-
kolben, Strangguss, Marine,
Industry, Recreational

24%

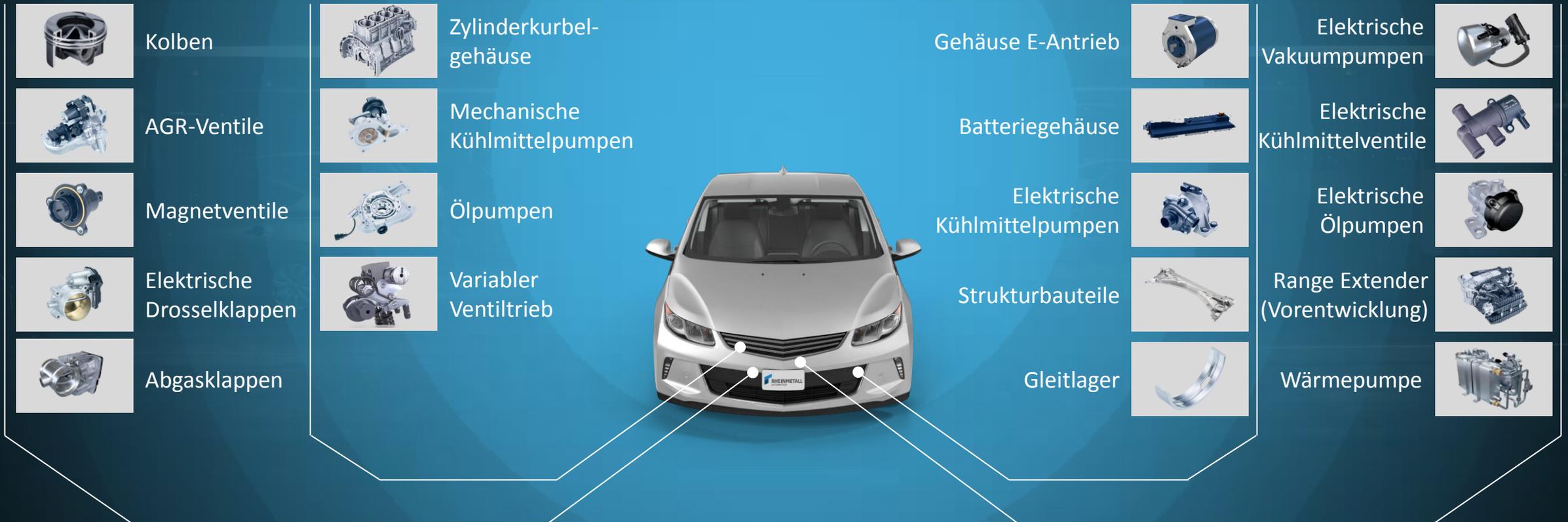
Pkw bis 3,5 t
Dieselprodukte



**Ausbau des Produktportfolios
für Verbrennungsmotoren ...**



**... durch Produkte für
Hybrid- und Elektrofahrzeuge**



Agenda

01 Was ist Abgasrückführung?

02 Wie wird Abgasrückführung am Verbrennungsmotor umgesetzt?

03 Wofür kann Abgasrückführung am Ottomotor eingesetzt werden?

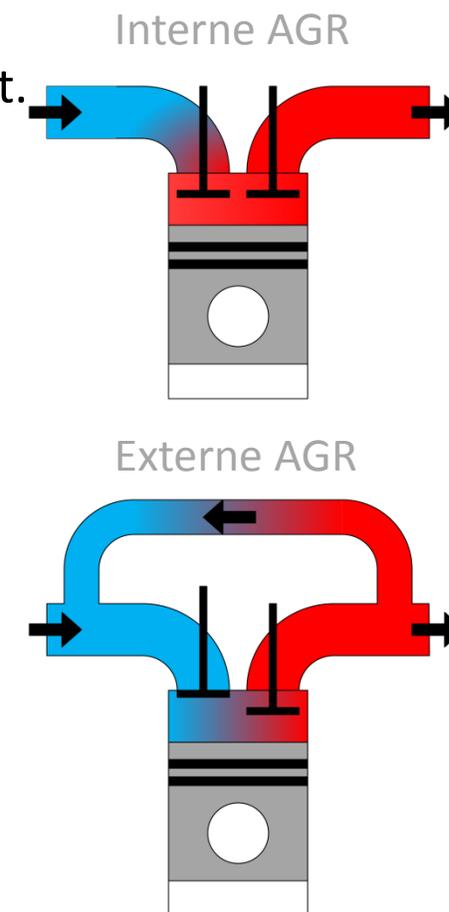
04 Welche Unterschiede ergeben sich aus den verschiedenen Systemen?

05 Zusammenfassung

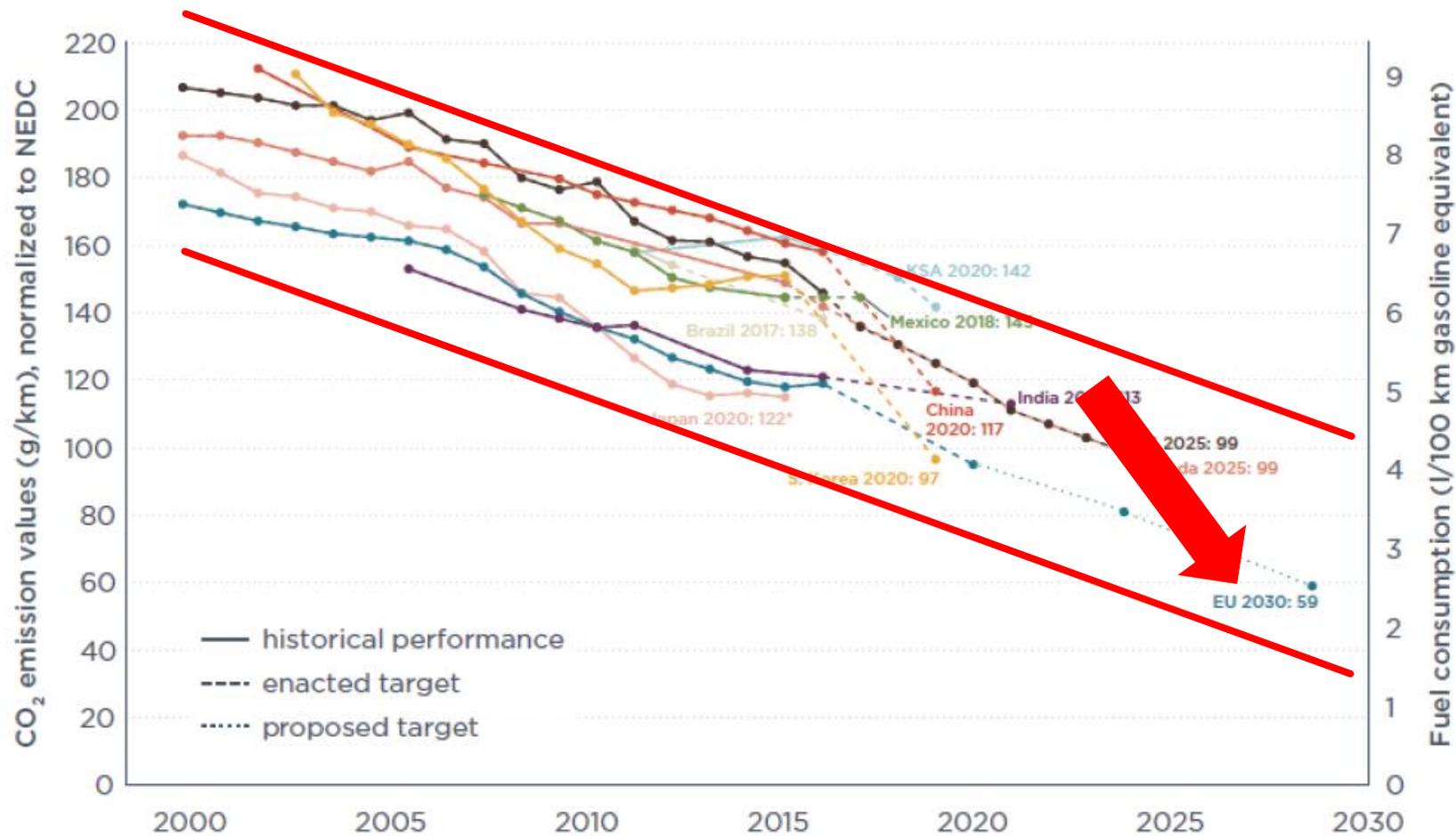
Was ist Abgasrückführung?

Abgasrückführung (AGR)

- bedeutet die Zufuhr von Abgas zum Frischgemisch bzw. zur angesaugten Frischluft.
- kann eingeteilt werden in
 - Interne Abgasrückführung
 - durch die Anpassung der Ventilsteuerzeiten von Ein- und Auslassventilen
 - hat mit Erscheinen von variablen Ventiltriebssystem die externe AGR am Ottomotor verdrängt.
 - Externe Abgasrückführung
 - mittels separatem Kanal von Abgas- zur Frischluftseite des Motors
 - stellt beim Dieselmotor den aktuellen Stand der Technik dar.
 - bietet die Möglichkeit zur Abgaskühlung.



Rahmenbedingungen für die Entwicklung von Ottomotoren – Verpflichtung, den CO₂-Ausstoß zu senken

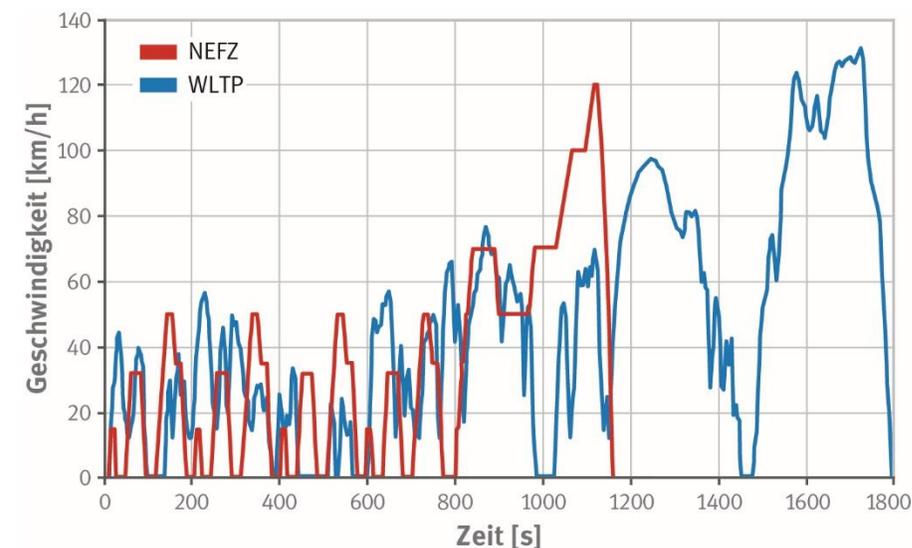


* Note that Japan has already met its 2020 statutory target as of 2013

Quelle: CO₂ Emission Standards For Passenger Cars and Light-Commercial Vehicles in the European Union
ICCT Policy Update, January 2019

Rahmenbedingungen für die Entwicklung von Ottomotoren – Verschärfung der Schadstoff-Emissionsgesetzgebung

- Schadstoffgrenzwerte (CO, HC und NO_x) für Ottomotoren seit EURO 5 konstant
- Einführung eines zusätzlichen Grenzwertes für Partikel (Anzahl/Masse)
- Aber:
 - Geänderter Testzyklus **NEFZ** → **WLTP**
 - Höhere Dynamik
 - Längere Zykluszeit
 - Größerer Temperaturbereich
 - ...
 - Messung unter realen Fahrbedingungen (**Real Driving Emissions**)
 - Schärfere Anforderungen hinsichtlich ISC (**In Service Conformity**)



Agenda

01 Was ist Abgasrückführung?

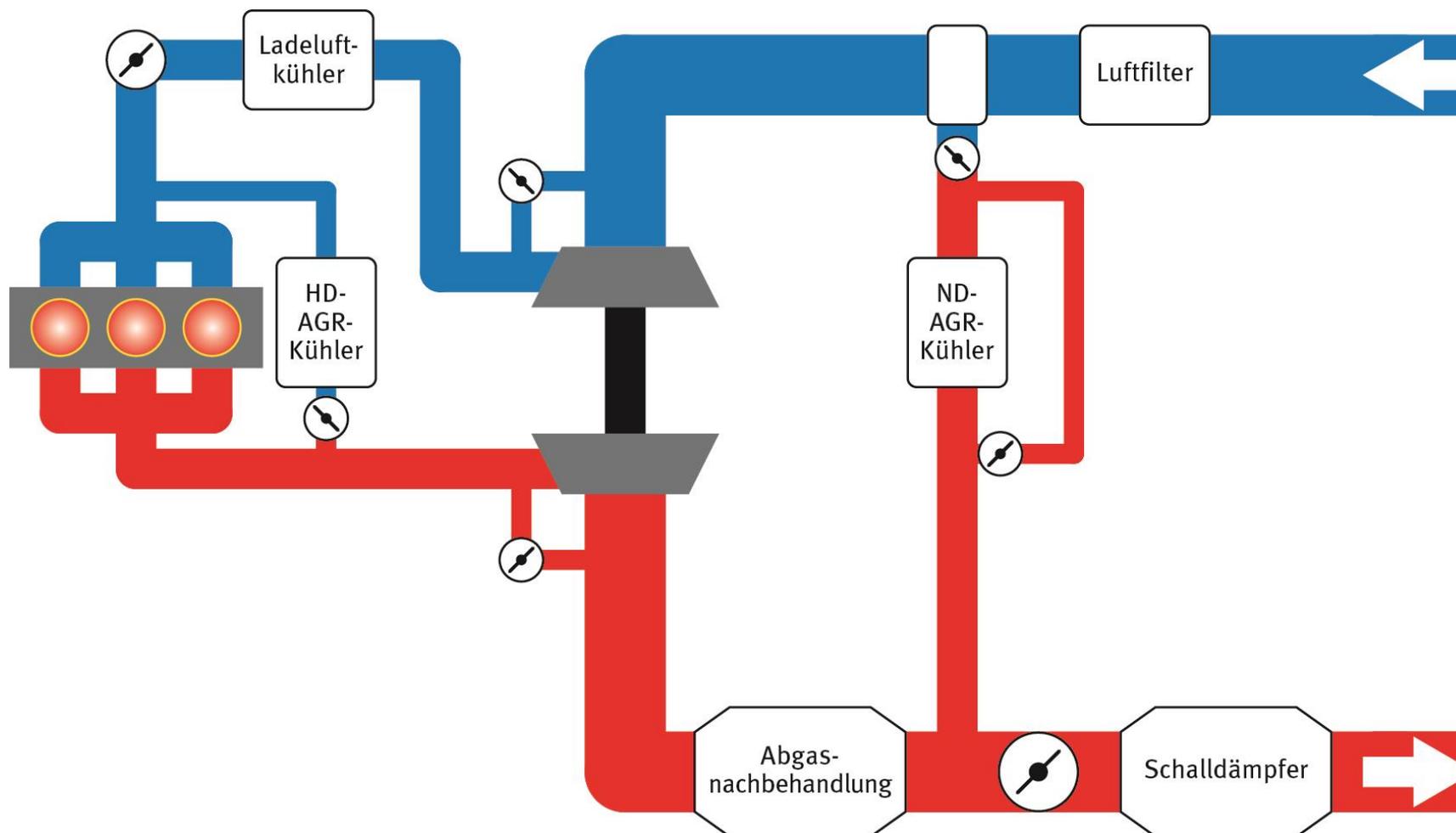
02 Wie wird Abgasrückführung am Verbrennungsmotor umgesetzt?

03 Wofür kann Abgasrückführung am Ottomotor eingesetzt werden?

04 Welche Unterschiede ergeben sich aus den verschiedenen Systemen?

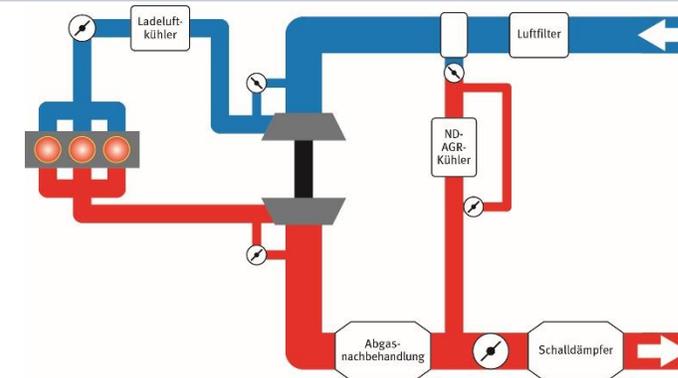
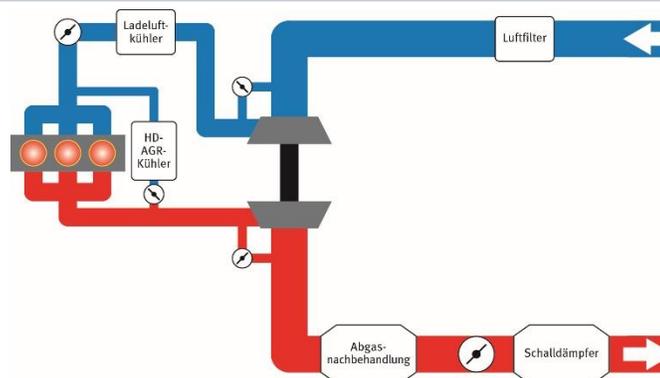
05 Zusammenfassung

Aufbau von Abgasrückführsystemen

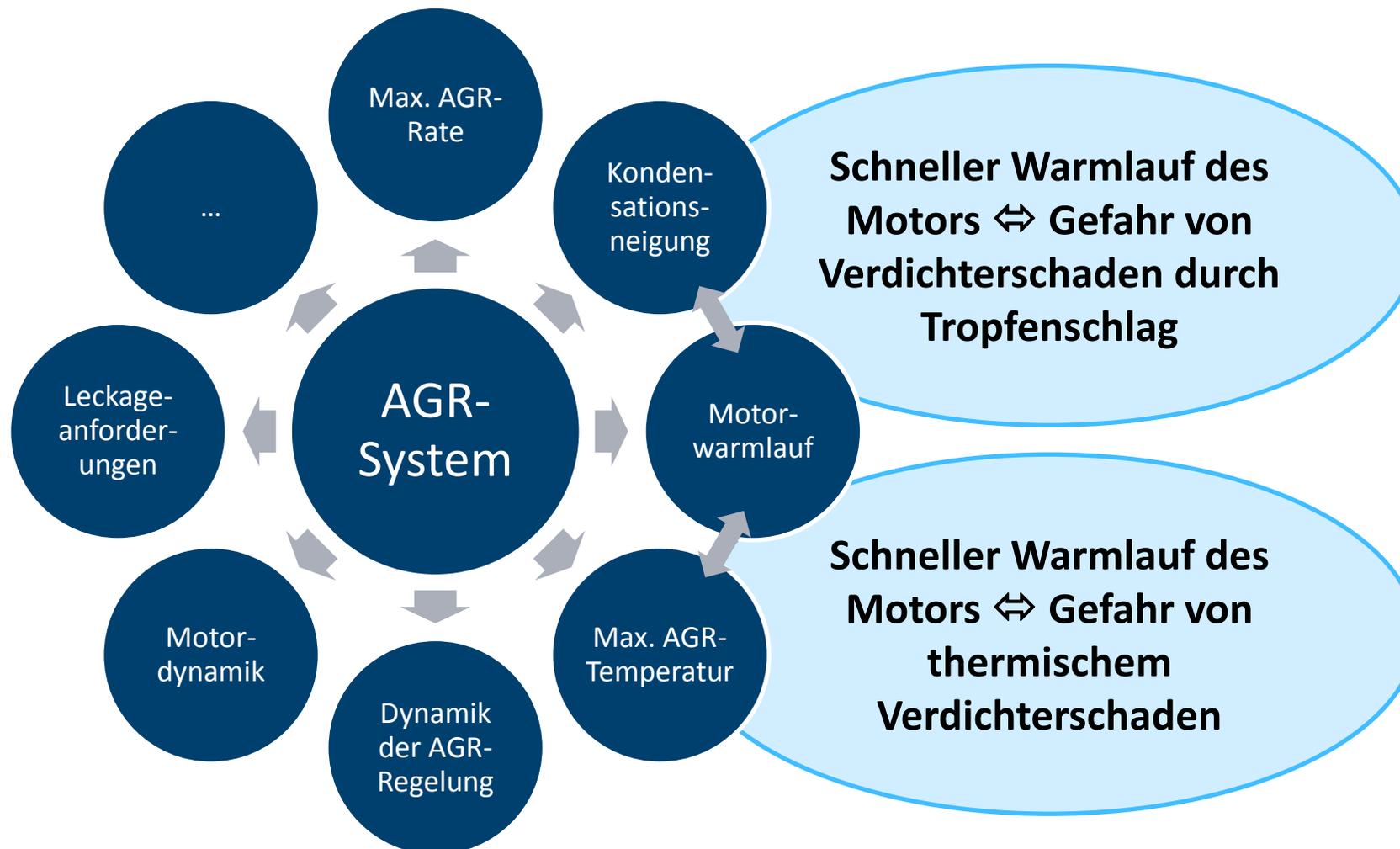


Randbedingungen für Komponenten von Hoch- und Niederdruck-AGR-Systemen

	Hochdruck-AGR	Niederdruck-AGR
Eintrittsdruck in AGR-Strecke	hoch (bis ca. 3,5 bar)	niedrig (bis ca. 1,3 bar)
Eintrittstemperatur in AGR-Strecke	sehr hoch (bis ca. 950°C)	hoch (bis ca. 800°C)
Druckdifferenz über AGR-Strecke	hoch (bis ca. 1,5 bar)	niedrig (bis ca. 0,3 bar)
Druckschwankungen (zyklisch)	groß	gering
Abgaszusammensetzung	Entnahme vor Abgasnachbehandlung	Ggf. Entnahme nach Abgasnachbehandlung



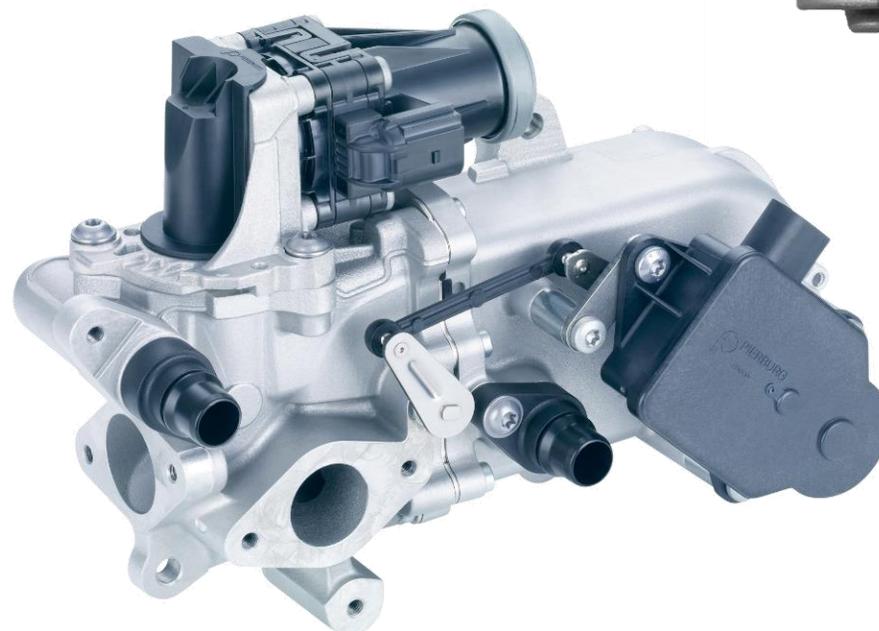
Welche Wechselwirkungen mit dem Motor müssen bei der Auslegung des AGR-Systems berücksichtigt werden?



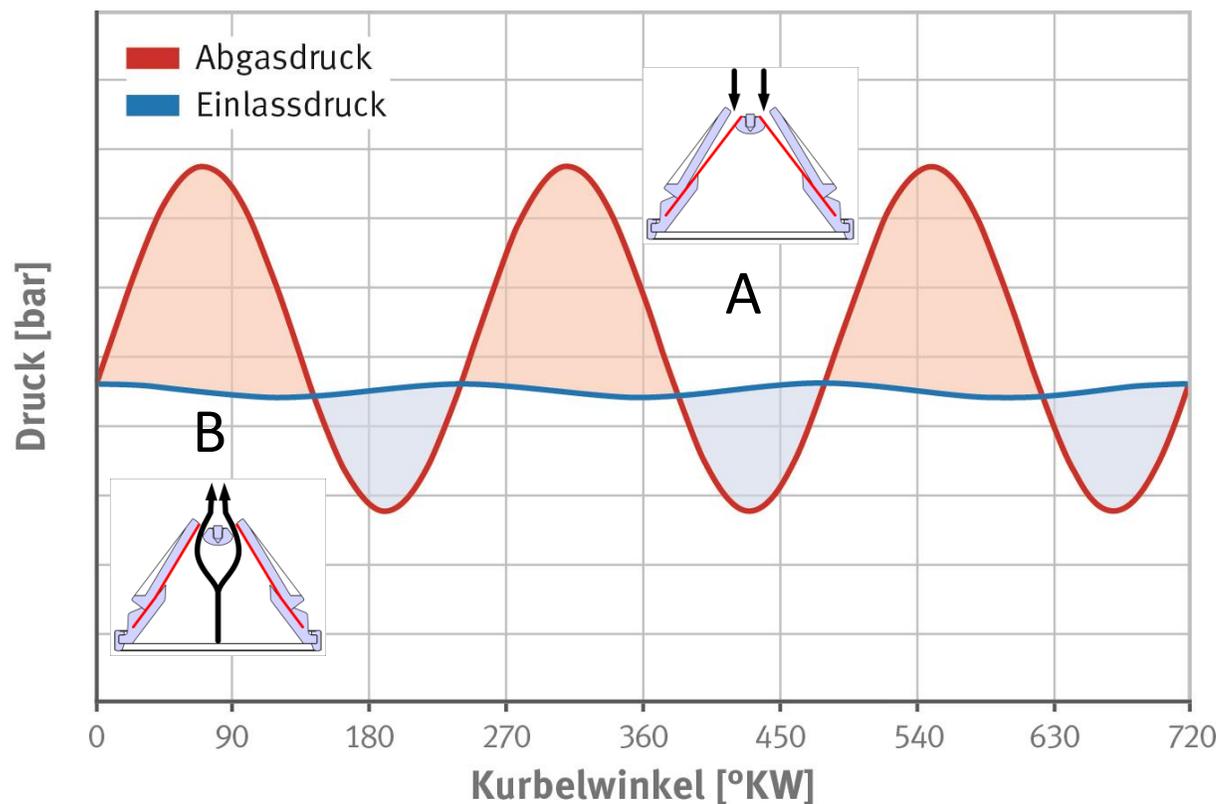
Komponenten von Niederdruck-AGR-Systemen



Komponenten von Hochdruck-AGR-Systemen



Einsatz von Rückschlagventilen (Reed-Valve) in der AGR-Strecke



Alternierende Druckdifferenzen zwischen Einlass- und Auslasskrümmer aufgrund der Ventilsteuerung führen zu pulsierenden Strömungsbedingungen.

Modus A:

- **Einlassdruck** > **Abgasdruck**
- Klappen sind geschlossen
- Rückströmen von AGR wird verhindert

Modus B:

- **Einlassdruck** < **Abgasdruck**
- Klappen öffnen aufgrund Druckunterschied selbsttätig
- AGR-Strömung ist möglich

Agenda

01 Was ist Abgasrückführung?

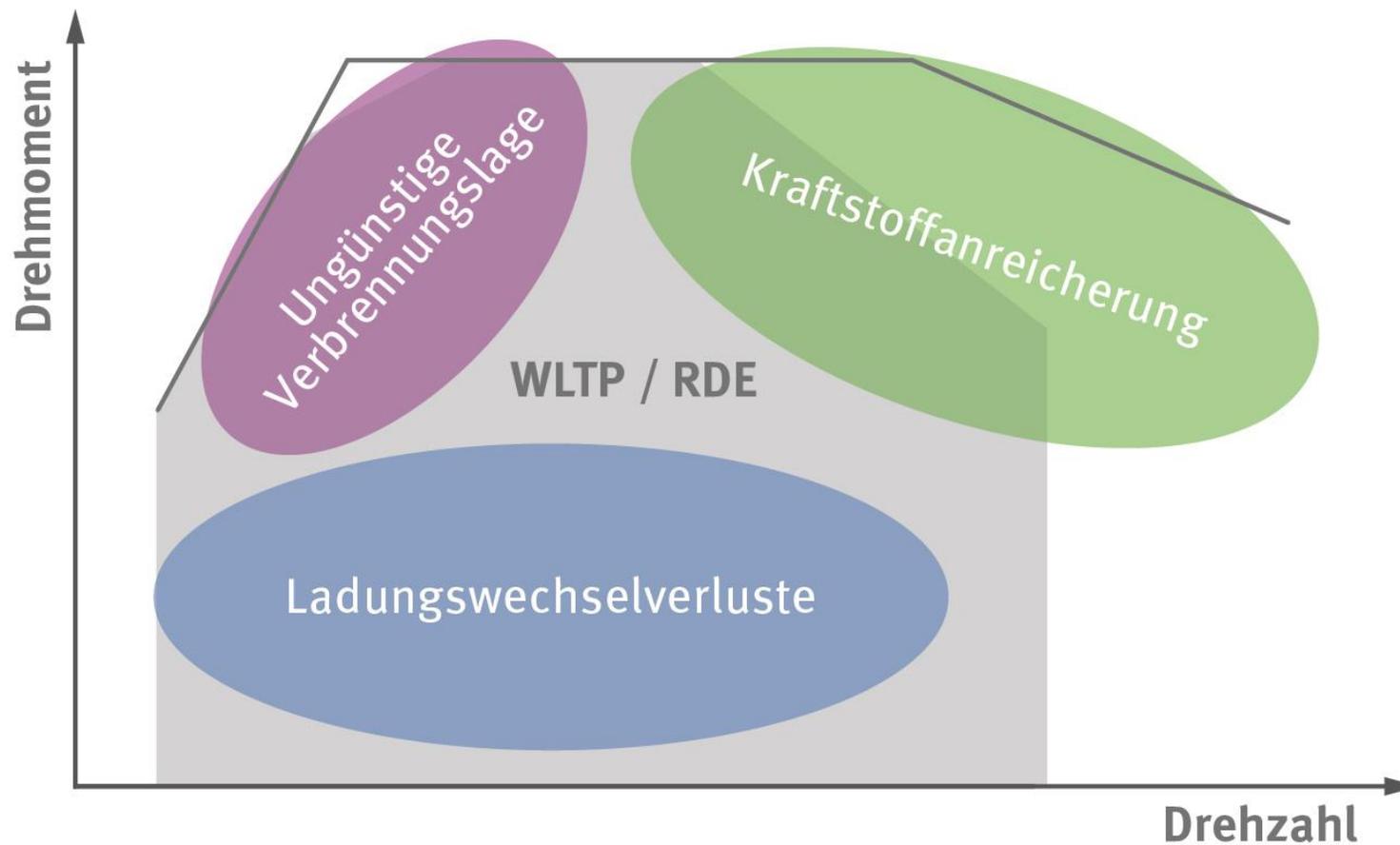
02 Wie wird Abgasrückführung am Verbrennungsmotor umgesetzt?

03 Wofür kann Abgasrückführung am Ottomotor eingesetzt werden?

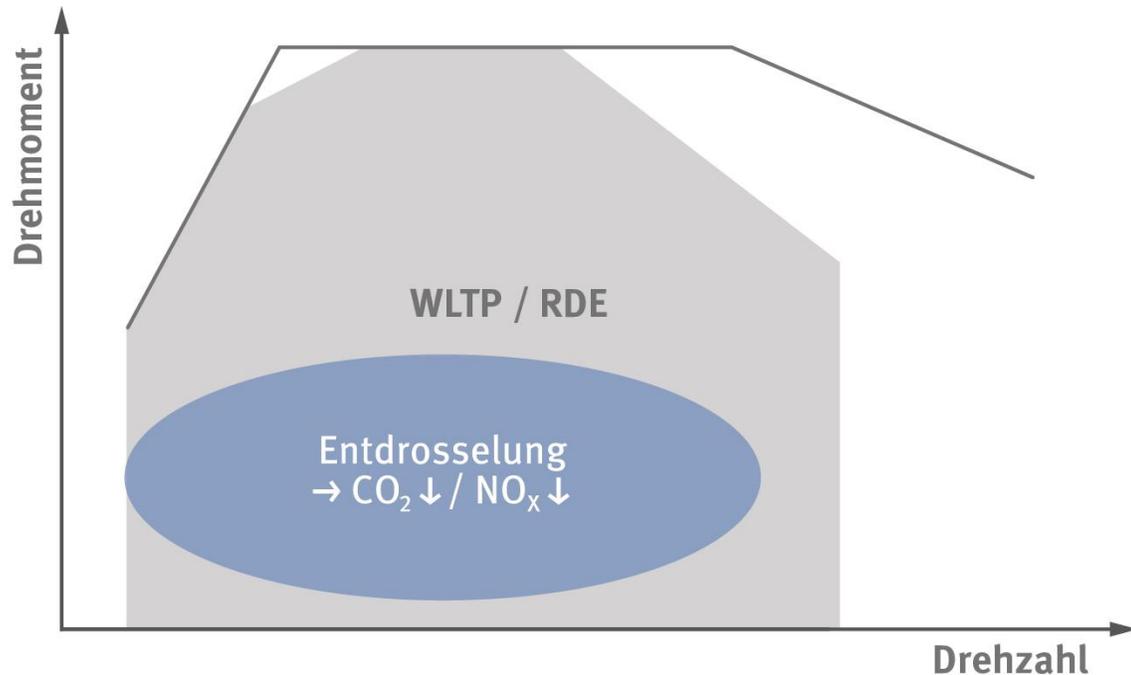
04 Welche Unterschiede ergeben sich aus den verschiedenen Systemen?

05 Zusammenfassung

Mögliche Ursachen eines reduzierten Motorwirkungsgrades



Reduktion der Ladungswechselerluste durch AGR



- **Niedrige Last → Ladungswechselerluste:**
 - Geringe eingespritzte Kraftstoffmenge bei niedriger Last
 - Quantitätsregelung des Ottomotors erfordert Reduktion der Luftmasse
 - Drosselung führt zu erhöhter Ladungswechselerarbeit und verschlechtertem Wirkungsgrad

Entdrosselung durch Abgasrückführung

Annahme: Konstanter Betriebspunkt

$$\rightarrow \dot{m}_{\text{Luft}} \sim a \sqrt{\rho \cdot \Delta p} = \text{konstant}$$

$$\rightarrow \dot{m}_{\text{Motor}} = \dot{m}_{\text{Luft}}$$

Mit AGR:

$$\dot{m}_{\text{Motor}} = \text{konstant}$$

Aber:

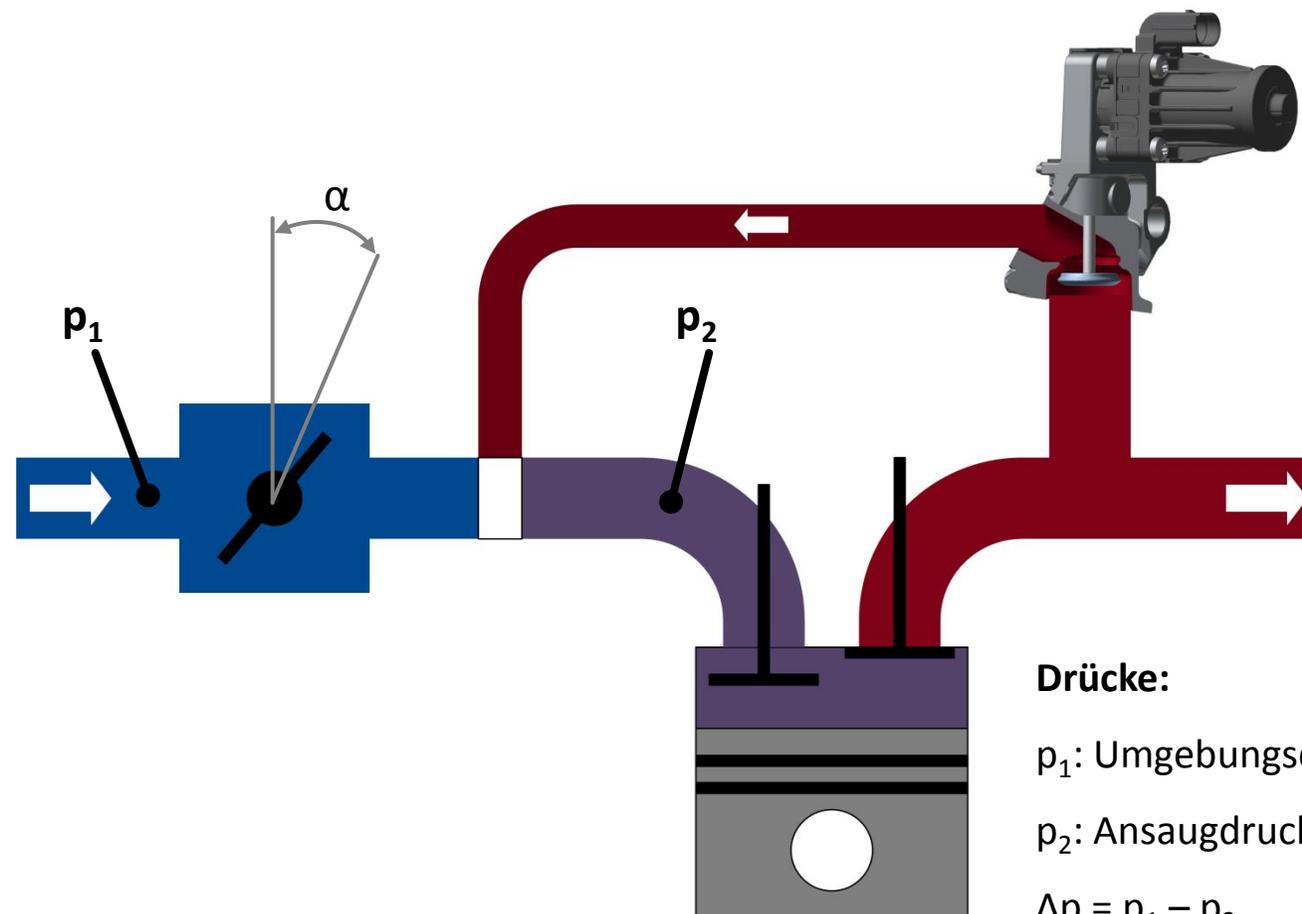
$$\dot{m}_{\text{Motor}} = \dot{m}_{\text{Luft}} + \dot{m}_{\text{AGR}}$$

$$\rightarrow \dot{m}_{\text{Luft}} \downarrow$$

Da $\dot{m}_{\text{Luft}} \stackrel{!}{=} \text{konstant} \rightarrow$ Öffnen der Drosselklappe

$$\rightarrow a \uparrow$$

$\rightarrow p_2 \uparrow \rightarrow \Delta p \downarrow \rightarrow$ Reduktion der Drosselverluste



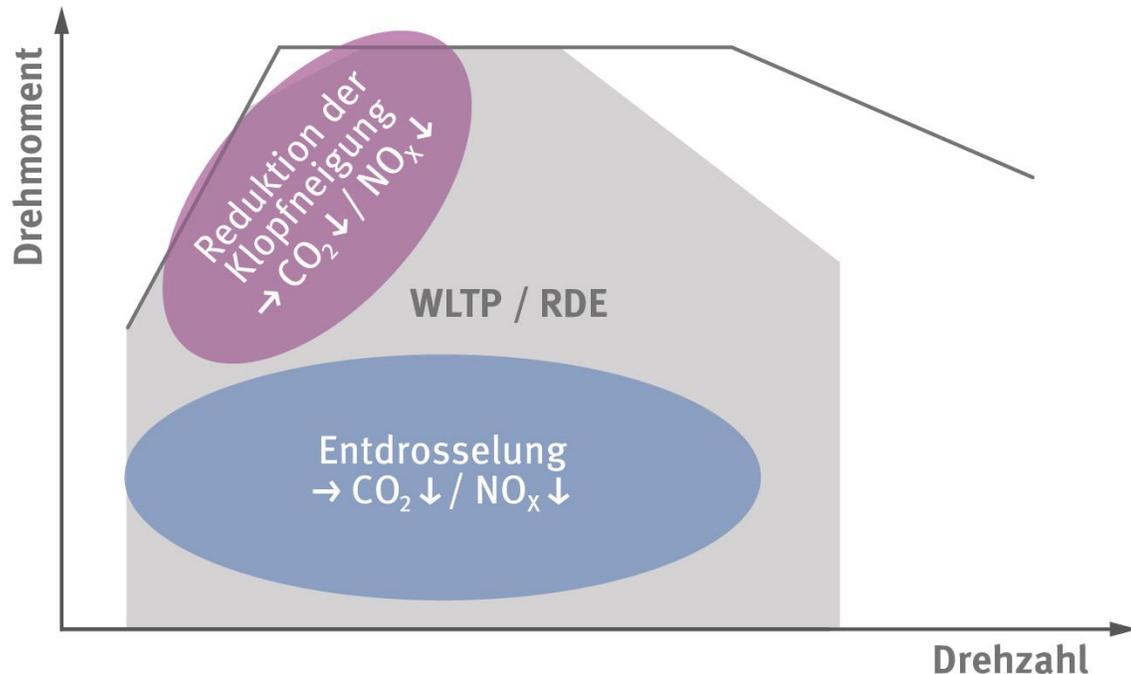
Drücke:

p_1 : Umgebungsdruck

p_2 : Ansaugdruck

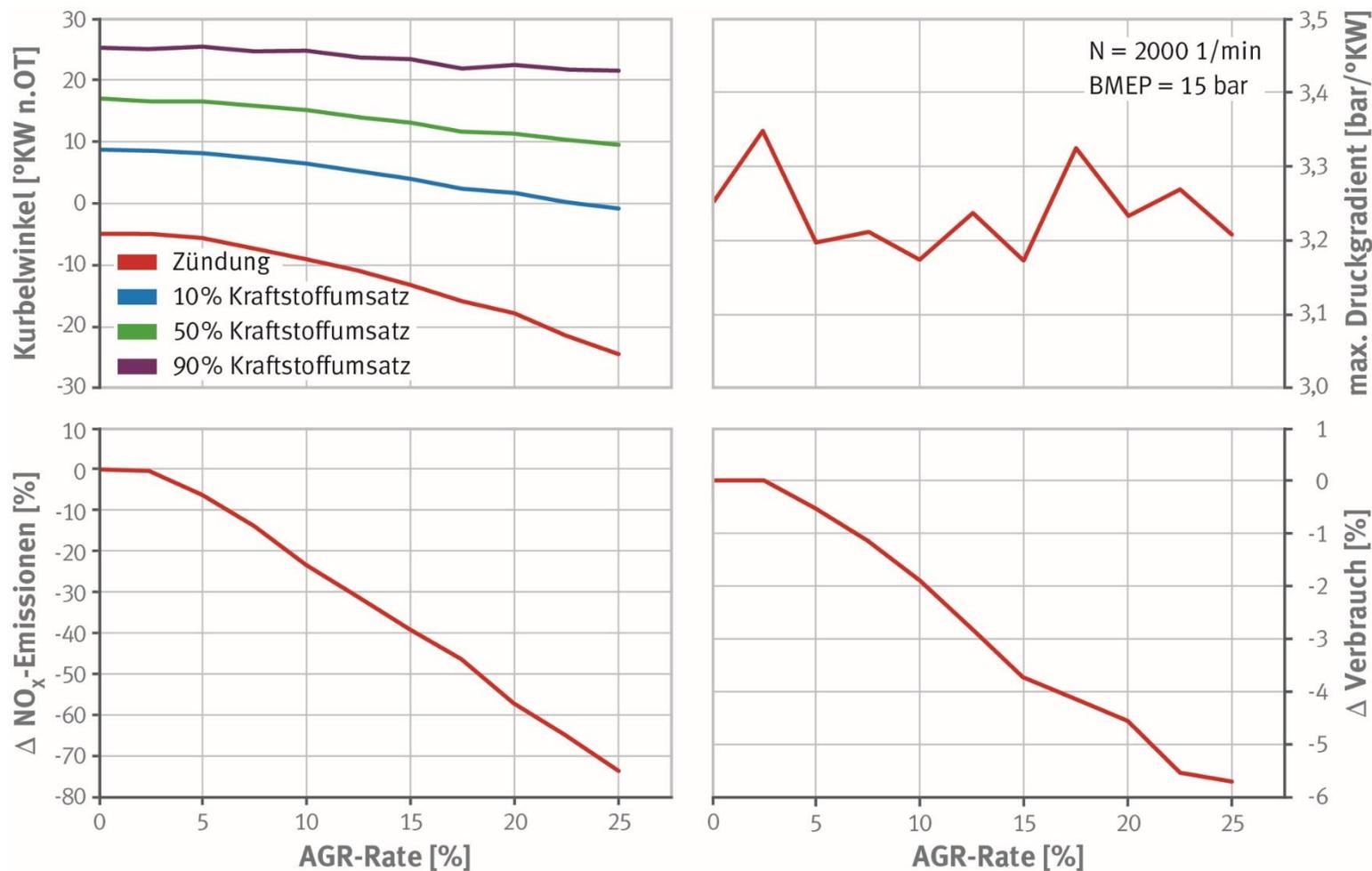
$$\Delta p = p_1 - p_2$$

Optimierung der Verbrennungsschwerpunktlage durch AGR

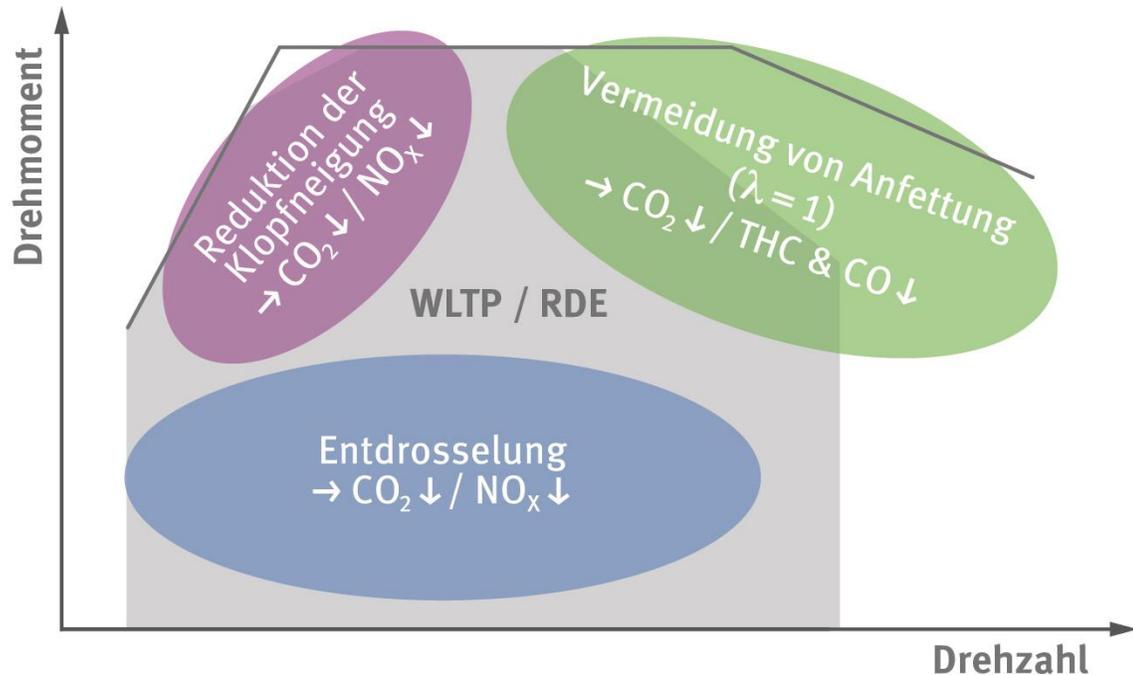


- **Niedrige Last → Ladungswechselerluste:**
- **Niedrige Drehzahl / Hohe Last → Ungünstige Verbrennungslage:**
 - Hohe Zylinderdrücke und Verbrennungstemperaturen bei gleichzeitig geringer Drehzahl begünstigen klopfende Verbrennung
 - Zur Sicherstellung kloppfreier Verbrennungsabläufe wird die Zündung in Richtung spät verstellt
 - Der daraus resultierende späte Verbrennungsschwerpunkt führt zu schlechten Wirkungsgraden

Reduktion der Klopfneigung durch AGR

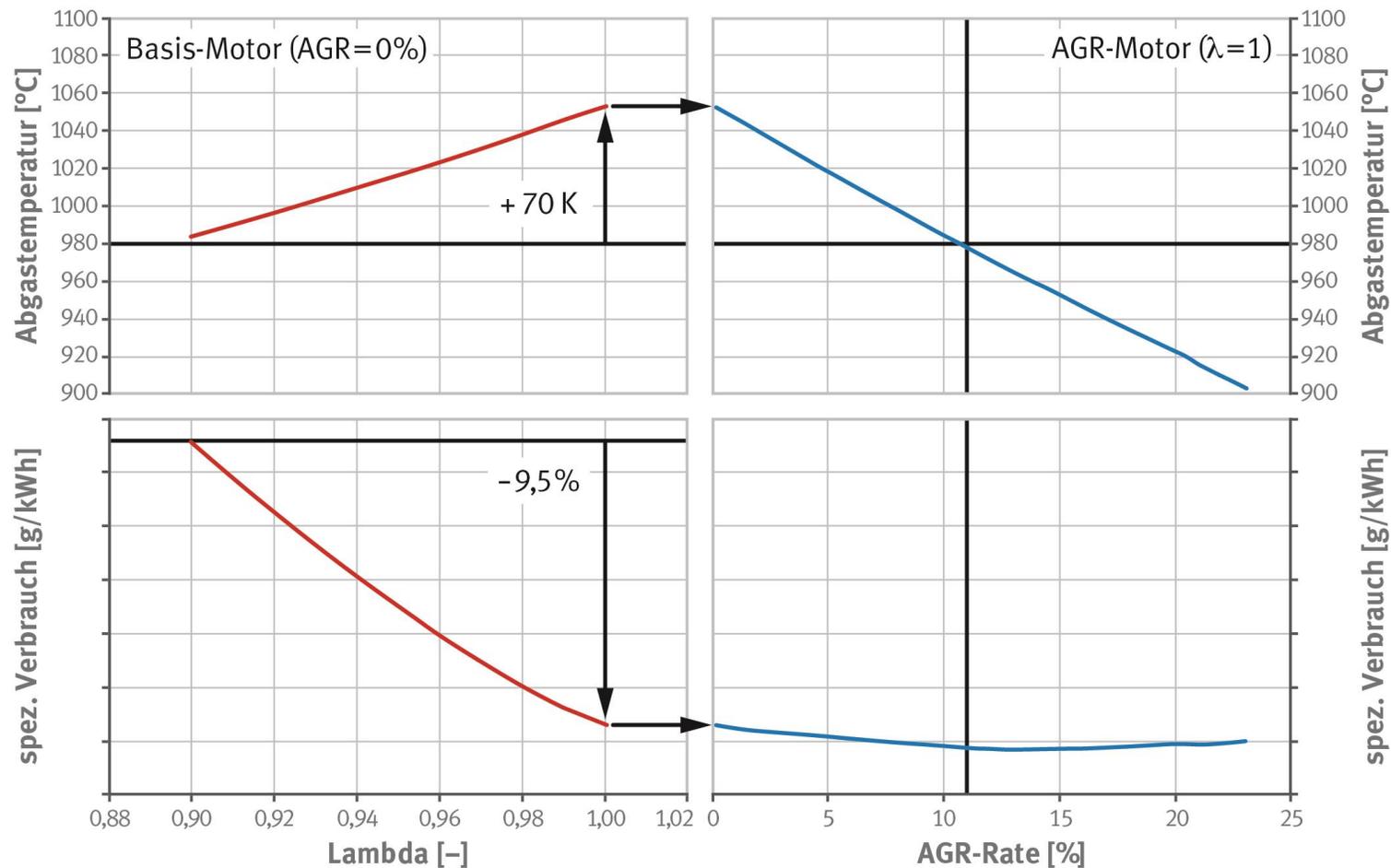


Vermeidung der Kraftstoffanreicherung durch AGR



- **Niedrige Last → Ladungswechselerluste:**
- **Niedrige Drehzahl / Hohe Last → Ungünstige Verbrennungslage:**
- **Hohe Drehzahl / Hohe Last → Kraftstoffanreicherung:**
 - Abgasführende Bauteile des Motors (Turbine, Katalysator) besitzen thermische Grenzen
 - Hohe Motorleistung führt zu sehr hohen Abgastemperaturen
 - Zusätzlicher Kraftstoff kühlt Abgas durch Verdampfung
 - Zusätzlicher Kraftstoff leistet keine mechanische Arbeit

Vermeidung der Kraftstoffanreicherung durch AGR



Agenda

01 Was ist Abgasrückführung?

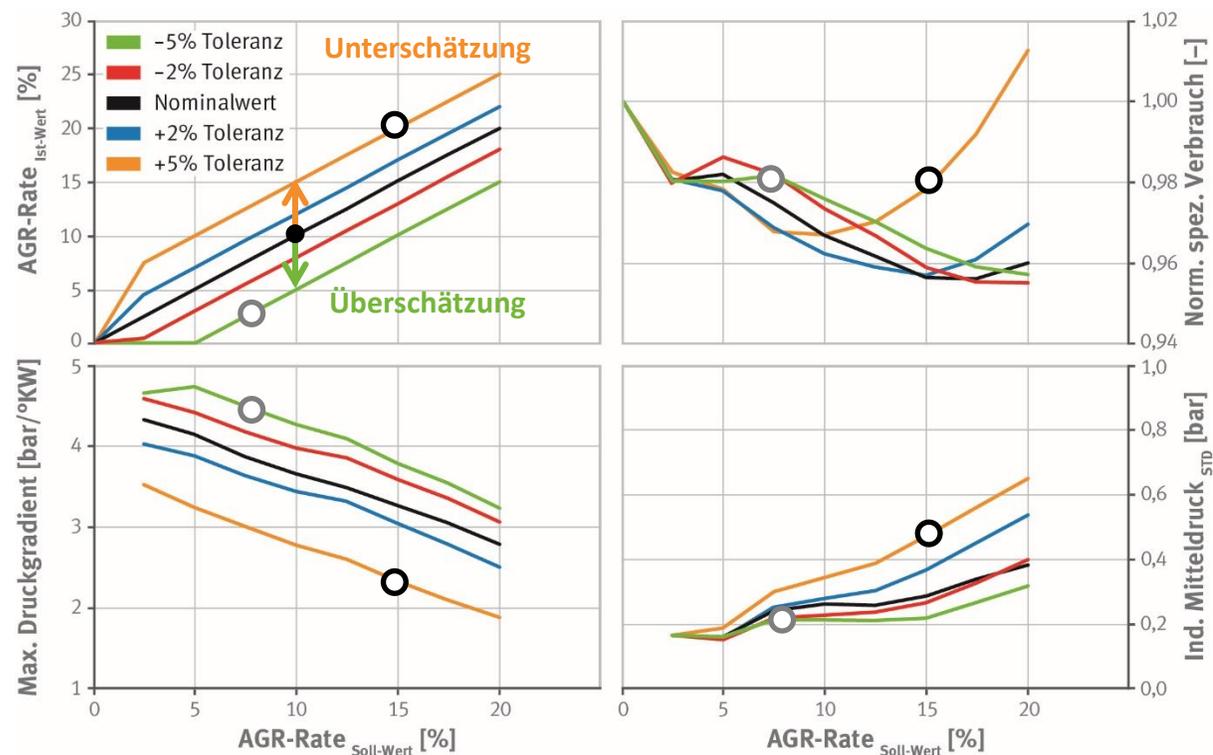
02 Wie wird Abgasrückführung am Verbrennungsmotor umgesetzt?

03 Wofür kann Abgasrückführung am Ottomotor eingesetzt werden?

04 Welche Unterschiede ergeben sich aus den verschiedenen Systemen?

05 Zusammenfassung

Bestimmung der AGR-Rate – AGR-Sensitivitätsanalyse im Betriebspunkt N = 2500 1/min; BMEP = 14 bar



- Verbrauchsverbesserung mit steigender AGR-Rate
- Relativ geringer Einfluss bei geringer Über- bzw. Unterschätzung der AGR-Rate
- Hohe Unterschätzung der AGR-Rate führt zu deutlicher Verbrauchsverschlechterung.
- Druckgradient/Verbrennungsgeräusch sinkt mit steigendem Restgasanteil.
 - Unterschätzung: Verbrennungsaussetzer
 - Überschätzung: Klopfen bis hin zum Motorschaden
- Verbrennungsstabilität sinkt mit steigender AGR-Rate.
- Unterschätzung hat höheren Einfluss als Überschätzung.

Bestimmung der AGR-Rate im Fahrzeug

Bestimmung mittels Gaspfadmodell

- Modellierung der AGR-Rate anhand des Schluckkennfeldes des Motors und der Nutzung von Sensormessdaten

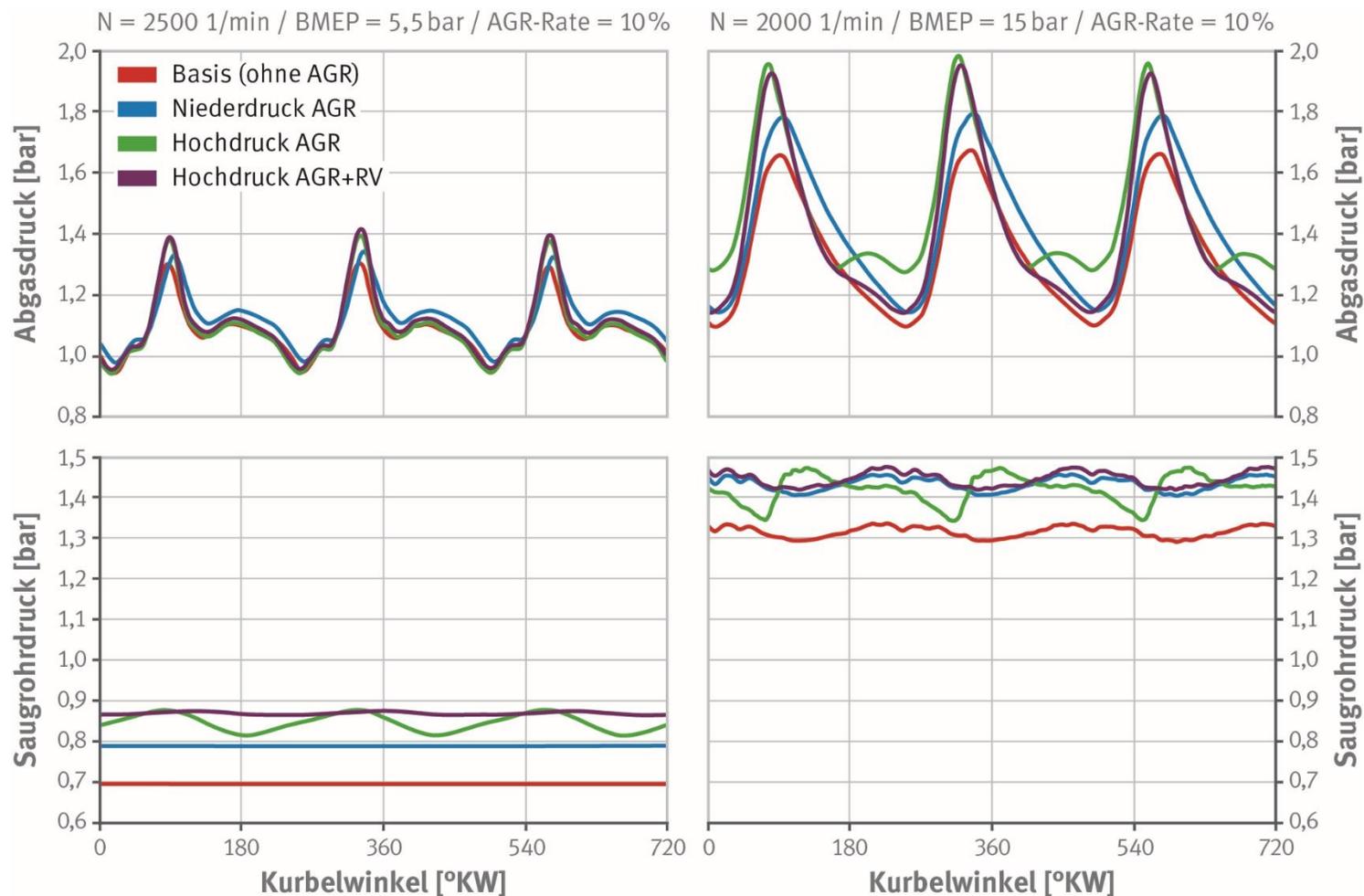
$$M_{AGR} = M_{Motor} - M_{Frischluft}$$

- $M_{motor} = f(N, p_{Saug}, T_{Saug}, \alpha_{Drossel}, \eta_{Motor}, EVÖ, AVS)$
- Genauigkeit = f(Sensorgüte)
- Niedrige Lastpunkte führen zu höherer Unsicherheit (Geringe Massenströme → unteres Ende des Messbereichs der Sensoren → geringere Genauigkeit)

Bestimmung mittels Sensormessung

- Messung des Sauerstoffanteils im Saugrohr (Messprinzip wie bei Lambda-Sonde)
- Beeinflussung der Sensorik durch Druck- und Massenstrompulsation

Druckschwankungen bei unterschiedlichen AGR-Systemen



Niederdruck-AGR:

- Kaum Beeinflussung der zyklischen Druckverläufe

Hochdruck-AGR:

- Geringe Druckschwankungen im Saugrohr bei niedriger Last
- Deutliche Veränderung der Druckverläufe bei hoher Last
 - Einfluss auf Turboladerbetrieb
 - AGR-Bestimmung sehr aufwendig

Hochdruck-AGR mit Reed-Valve:

- Druckschwankungen auf Niveau der Niederdruck-AGR

Einfluss der AGR auf die Motorperformance

Welche Parameter beeinflussen die Verbrennung?

- Zustand im Saugrohr
 - Druck
 - Temperatur
 - Gaszusammensetzung
- Steuerung der Verbrennung
 - Zündzeitpunkt
 - Ventilsteuerzeiten
 - ggf. Einspritzzeitpunkt
- Zustand im Abgasstrang
 - Druck

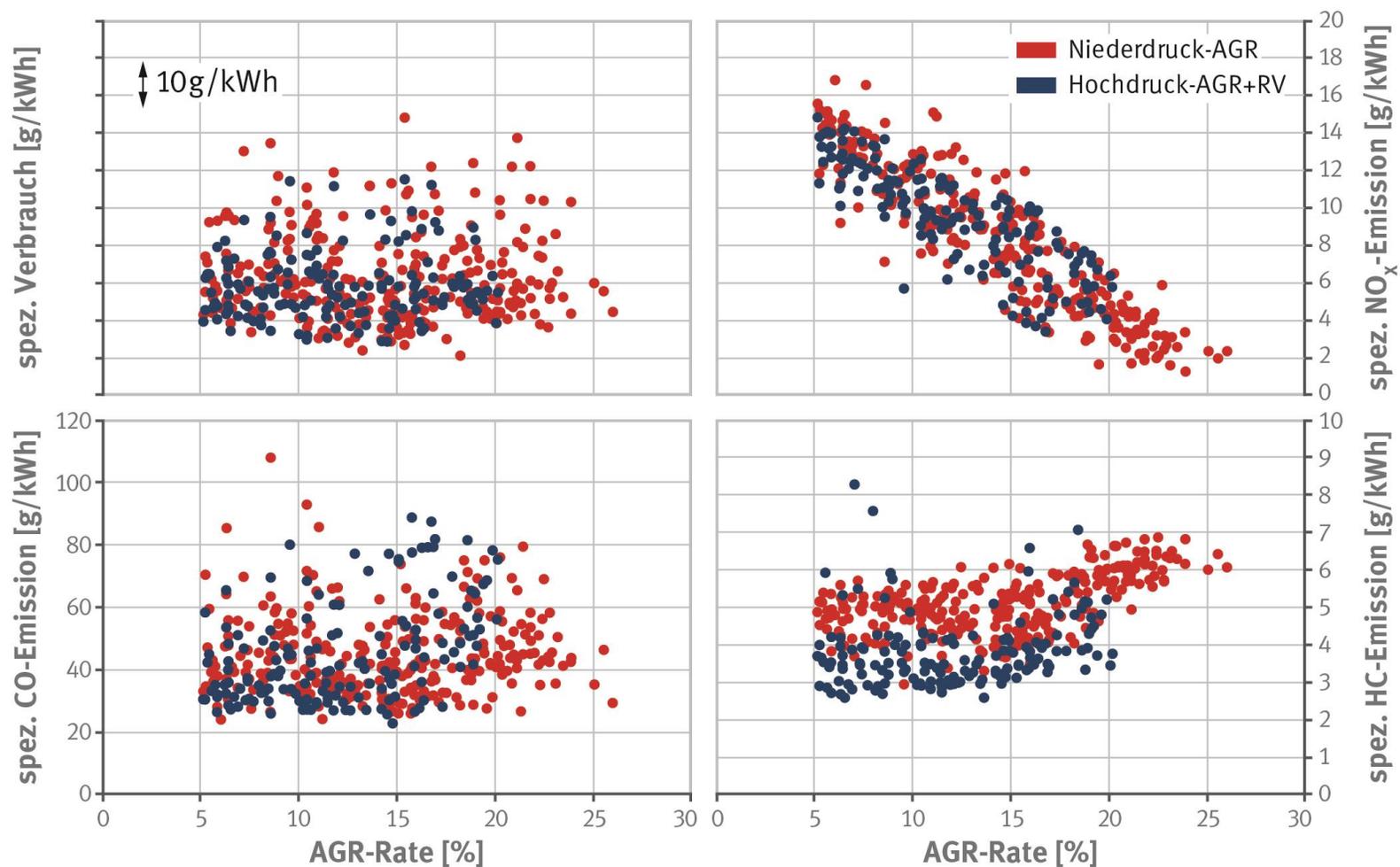
Methodik der Untersuchung

Design-of-Experiments-Ansatz mit ca. 500 Punkten und der Variation folgender Parameter:

- AGR-Rate
- Phasenlage von Ein- und Auslassnockenwelle
- Zündzeitpunkt
- Einspritzzeitpunkt
- Abgasdruck am Schalldämpfer

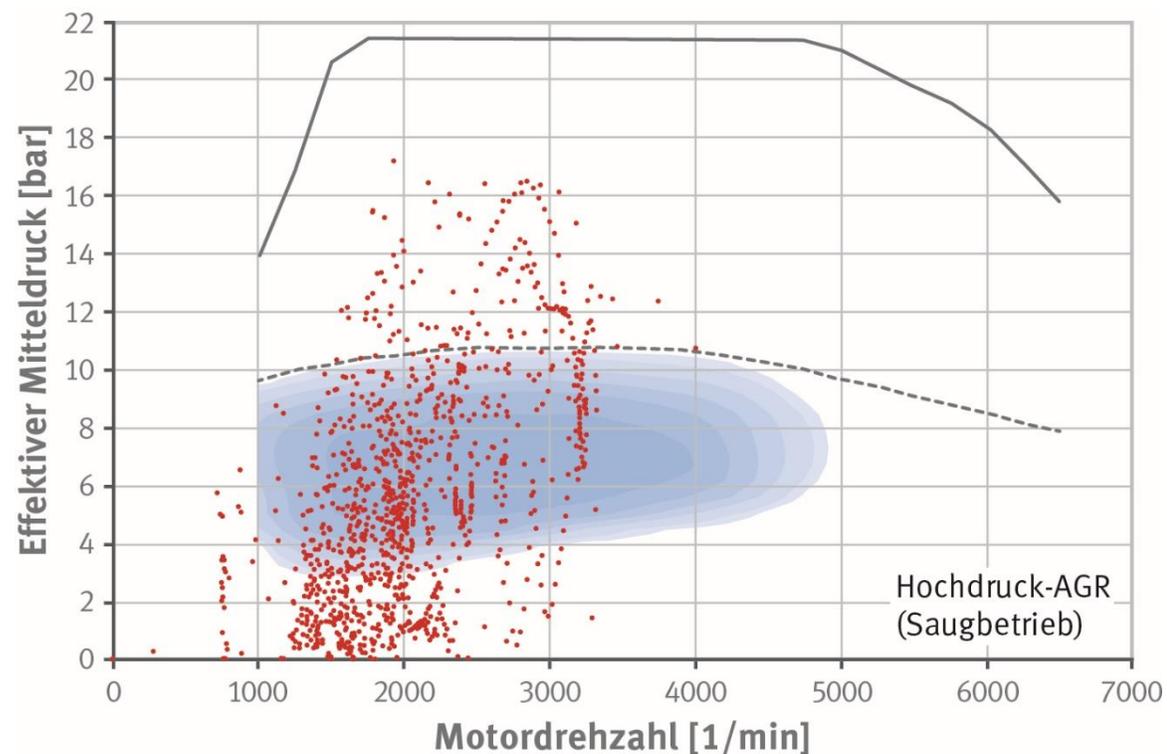
- Vergleich der AGR-Systeme anhand identischer Sollwertvorgabe

Einfluss von AGR auf Verbrauch und Schadstoffausstoß – Unterschiede zwischen AGR-Systemen (N = 2000 1/min; BMEP = 14 bar)



Emissionen und Verbrauch im WLTP-Fahrzyklus

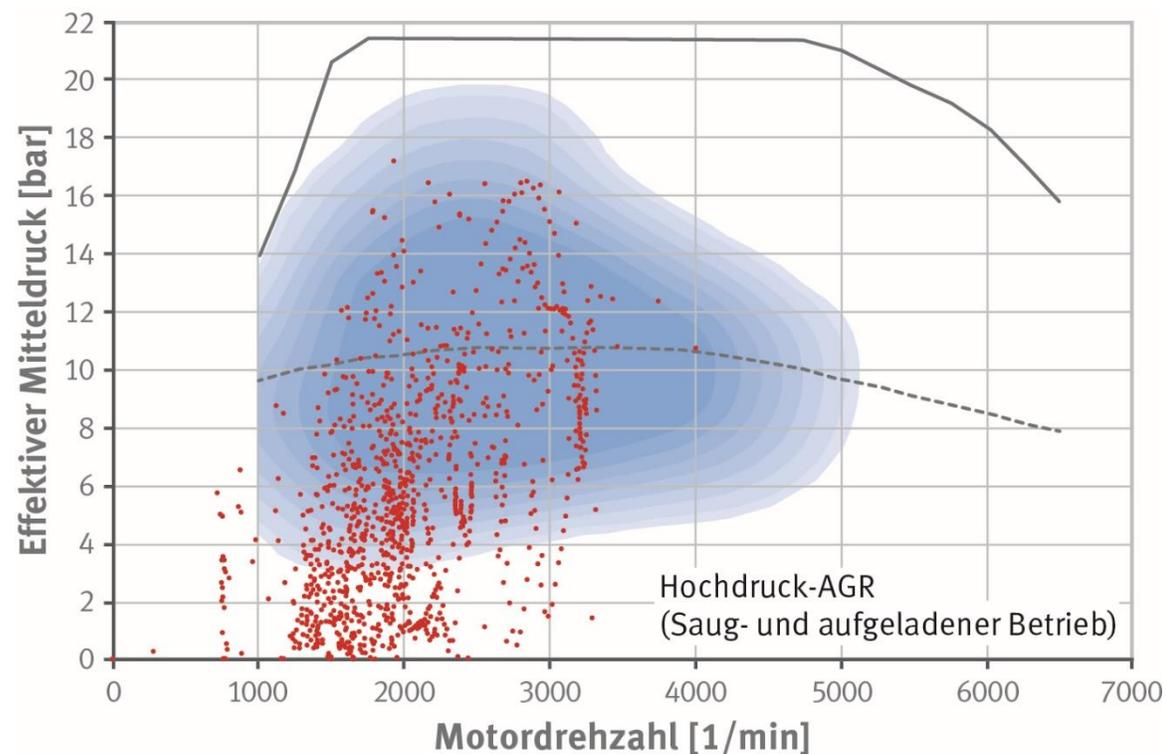
AGR-Kennfeld und Betriebspunkte im WLTP



AGR Layout	CO ₂ -Reduktion	NO _x -Reduktion (Rohabgas)
Hochdruck-AGR (Saugbetrieb)	-0.5%	-15%

Emissionen und Verbrauch im WLTP-Fahrzyklus

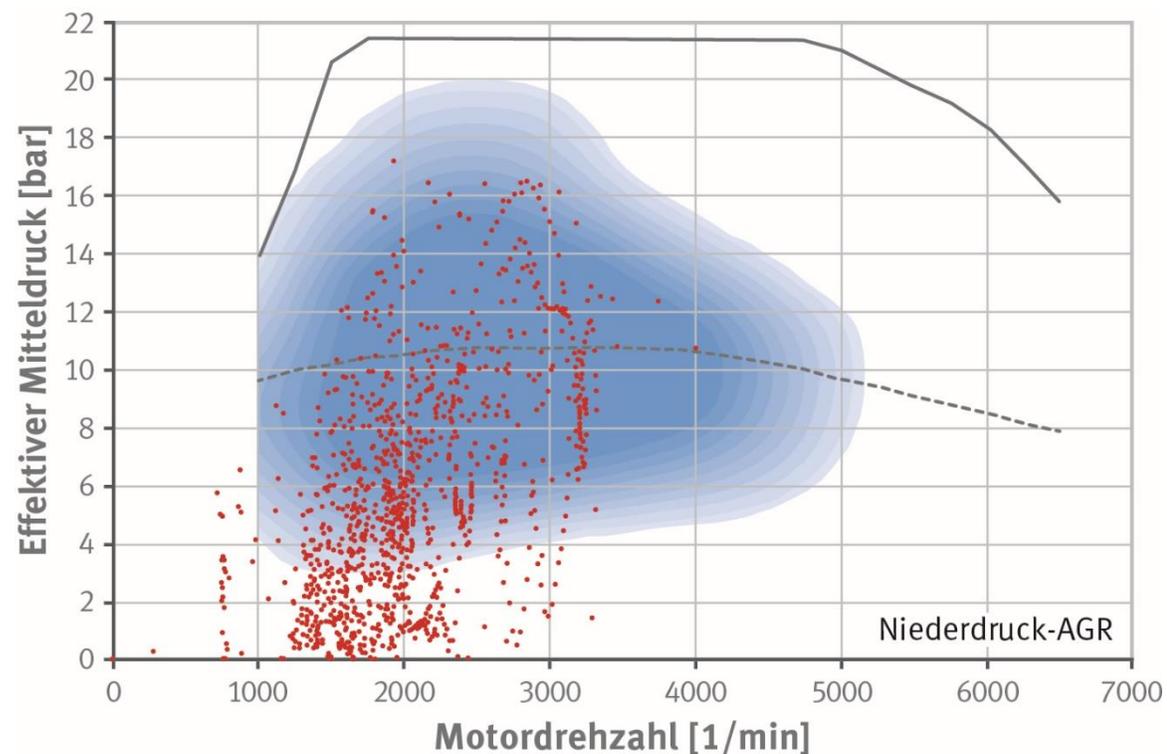
AGR-Kennfeld und Betriebspunkte im WLTP



AGR Layout	CO ₂ -Reduktion	NO _x -Reduktion (Rohabgas)
Hochdruck-AGR (Saugbetrieb)	-0.5%	-15%
Hochdruck-AGR (Saug- und aufgeladener Betrieb)	-2.5%	-40%

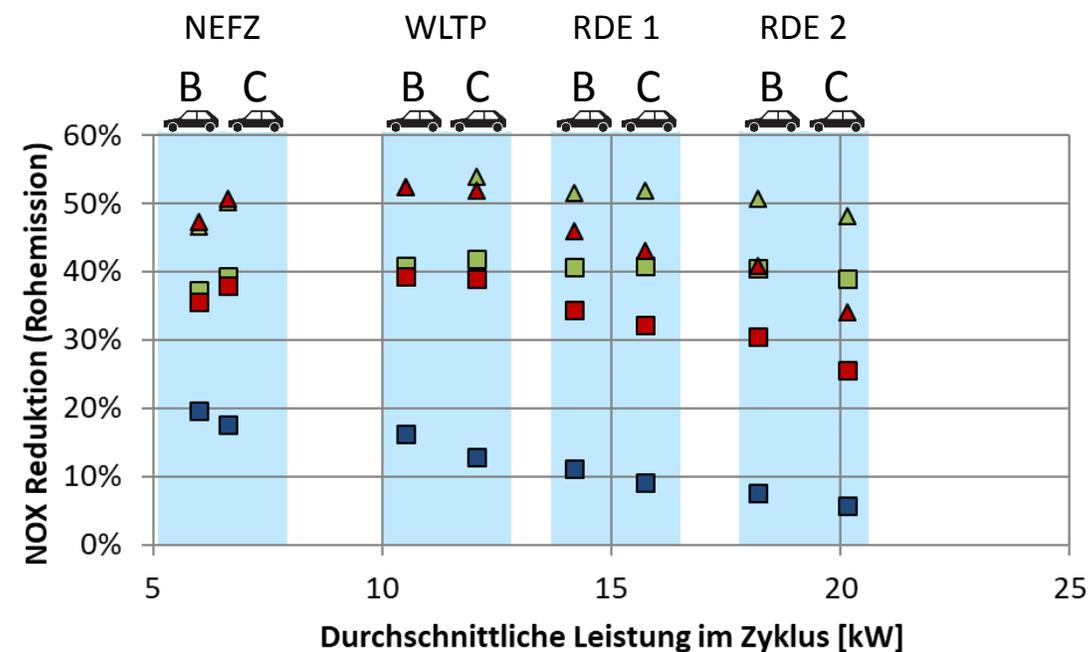
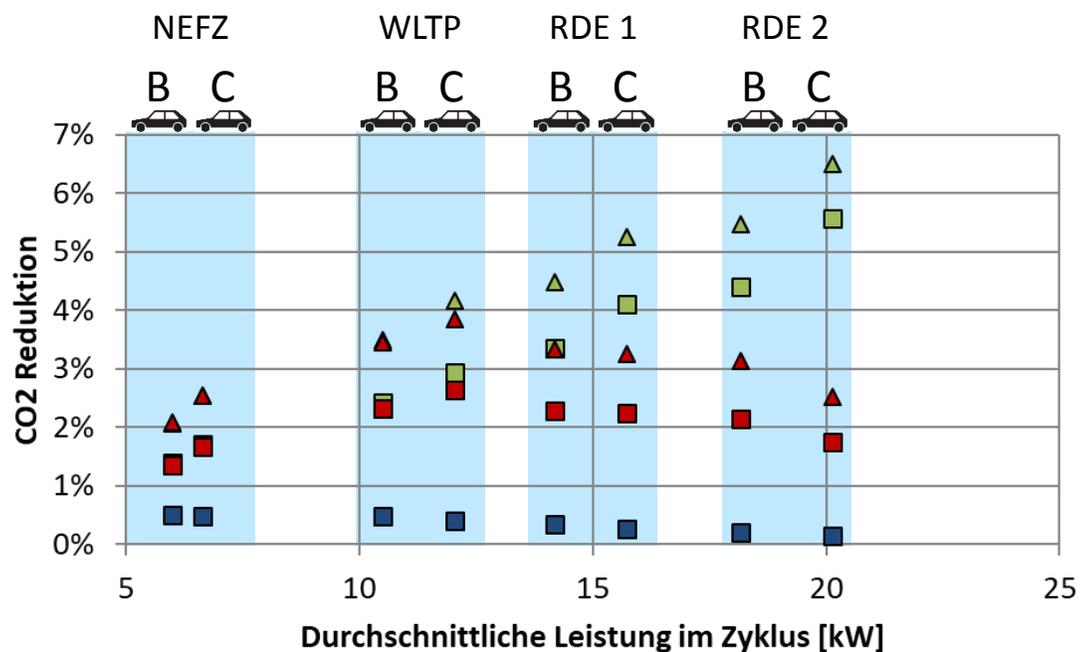
Emissionen und Verbrauch im WLTP-Fahrzyklus

AGR-Kennfeld und Betriebspunkte im WLTP



AGR Layout	CO ₂ -Reduktion	NO _x -Reduktion (Rohabgas)
Hochdruck-AGR (Saugbetrieb)	-0.5%	-15%
Hochdruck-AGR (Saug- und aufgeladener Betrieb)	-2.5%	-40%
Niederdruck-AGR	-3.5%	-50%

Einfluss des Fahrzyklus auf das Verbrauchs- und Emissions-Potential von AGR



Zyklussimulation basierend auf Daten aus stationären Bedingungen

Agenda

01 Was ist Abgasrückführung?

02 Wie wird Abgasrückführung am Verbrennungsmotor umgesetzt?

03 Wofür kann Abgasrückführung am Ottomotor eingesetzt werden?

04 Welche Unterschiede ergeben sich aus den verschiedenen Systemen?

05 Zusammenfassung

Zusammenfassung

- Abgasrückführung kann zur **Verbrauchsreduktion** genutzt werden durch
 - **Entdrosselung** im niedrigen Lastbereich
 - **Wirkungsgrad-optimalere Verbrennungsschwerpunktlage** im Low-End-Torque-Bereich
 - **Vermeidung von Kraftstoffanreicherung** bei Volllast
- Auch der **Schadstoff-Ausstoß** kann mittels Abgasrückführung **gesenkt** werden.
- Die **genaue Kenntnis der vorliegenden AGR-Rate ist essentiell**, um den maximalen Vorteil bei gleichzeitig sicherem Motorbetrieb erzielen zu können.
- Die Wahl des AGR-Systems führt zu **Wechselwirkungen mit dem Verbrennungsmotor**.
- Sowohl Hoch- als auch Niederdruck-AGR kann auch im Fahrzyklus Vorteile generieren, wobei Niederdruck-AGR aufgrund der höheren nutzbaren AGR-Rate das größere Potential zu haben scheint:
 - **Verbrauchsreduktion** im WLTP um **-3,5%**
 - **Reduktion der NO_x-Rohemission** im WLTP um **-50%**

Kontakt



Thorsten Reimers
Entwicklungsingenieur
Automotive Emission Systems [M-BEE1]

Pierburg GmbH
Alfred-Pierburg-Str. 1 · 41460 Neuss · Germany
Tel. +49 (0) 2131 520 2728
Thorsten.Reimers@de.rheinmetall.com



UNSER **HERZ** SCHLÄGT FÜR IHREN ANTRIEB.