

Die Wasserstoff-Nutzung in Motoren und die Perspektive für die KWK

Prof. Dr.-Ing. Jochen Arthkamp
Energieanlagentechnik und Fluidenergiemaschinen

Technische Hochschule Georg Agricola zu Bochum



- **Warum Wasserstoff?**
- **Status Quo**
- **Neue Möglichkeiten für Verbrennungsmotoren**
- **Physik und Anwendung**
- **Verfügbare Techniken**
- **Abschlussbemerkung**

Regenerative Energien erfordern Langzeit-Speicher großer Leistungen
(Tag/Nacht, Sommer/Winter)

- Pumpspeicherkraftwerke ausgereizt
- Akkumulatoren nicht ausreichend verfügbar
- Chemische Speicher geeignet
 - Power to Gas: H₂, CH₄

Aus Langzeit-Speichern muss wieder elektrische Energie erzeugt werden.

Bei der Erzeugung elektrischer Energie fällt Abwärme an.

Die Abwärme sollte genutzt werden
= KWK



Stromerzeugung aus H₂ und CH₄ (Gas to Power): Status Quo

- Gas- und Dampfturbinen-Kraftwerk
 - große Leistungen
 - Fernwärmenetze oder Dampfnetze erforderlich

- Brennstoffzelle
 - kleine und mittlere Leistungen
 - Entwicklungspotenzial
 - Kosten
 - Langlebigkeit

- Verbrennungsmotore mit Generator
 - kleine und mittlere Leistungen
 - Entwicklungspotenzial
 - Wirkungsgrad

Stromerzeugung aus H₂ und CH₄ (Gas to Power): Wirkungsgrade



- Gas- und Dampfturbinen-Kraftwerk

- η elektrisch: 60 %
- η Wärmenutzung 30 %
- η gesamt 90 %



- Brennstoffzelle

- η elektrisch: 60 %
- η Wärmenutzung 30 %
- η gesamt 90 %



- Verbrennungsmotor mit Generator

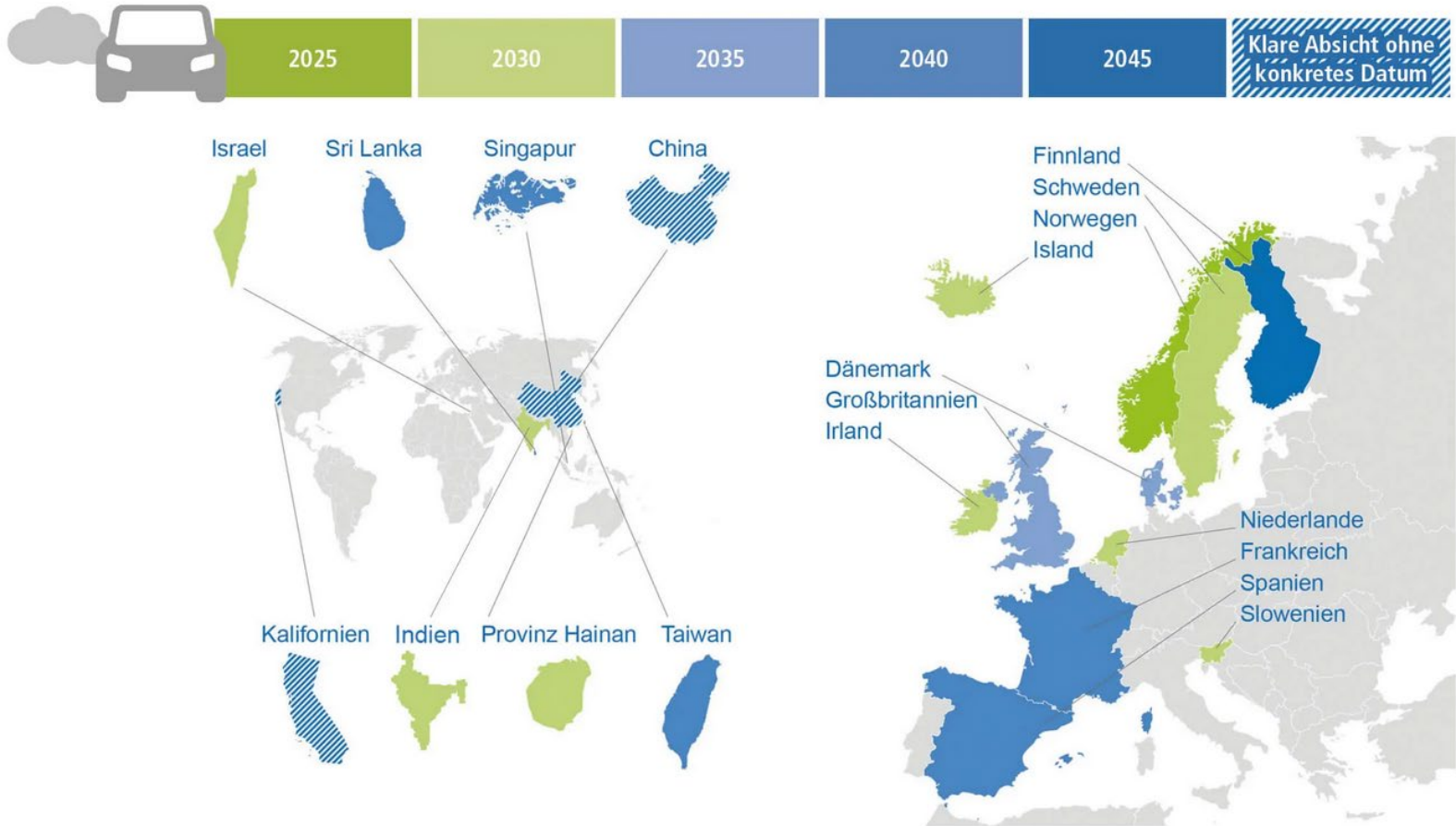
- η elektrisch: 40 %
- η Wärmenutzung 50 %
- η gesamt 90 %



Politik und Verbrennungsmotor

DAS ENDE DES VERBRENNUNGSMOTORS

Zu wann Staaten weltweit das Auslaufen von Benzin- und Diesel-Pkw angekündigt haben

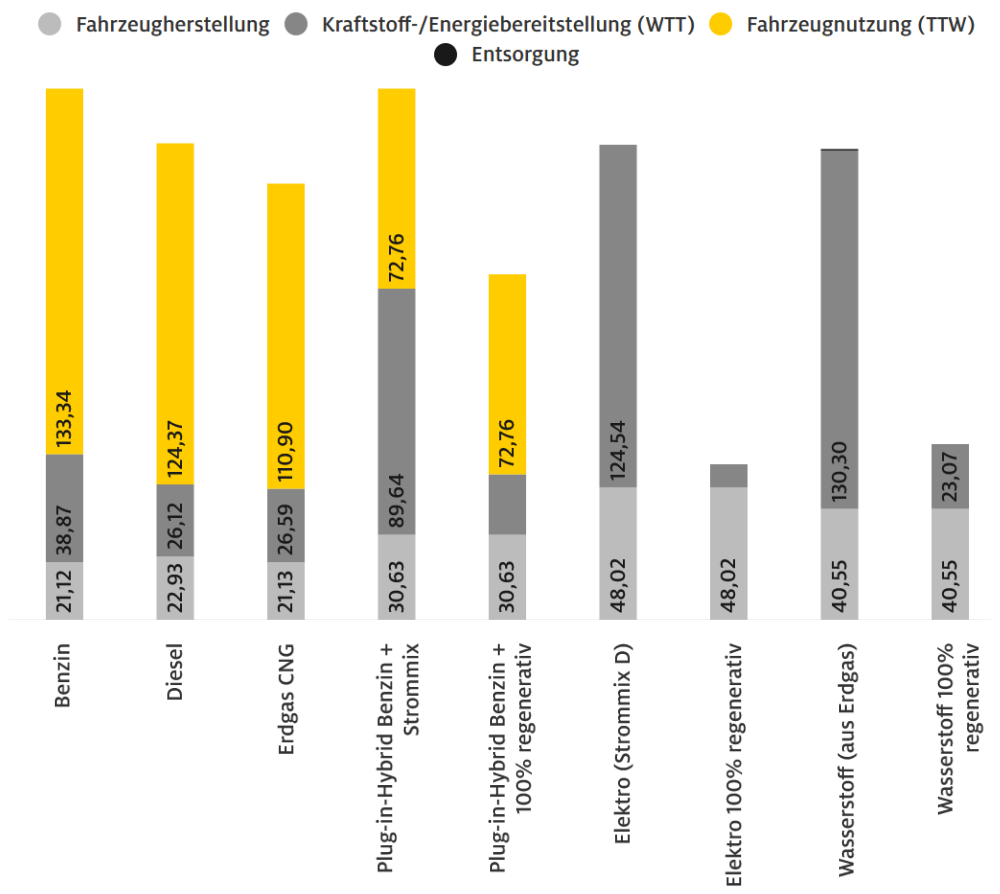


Quelle: Oeko-Institut e.V.: Das Ende des Verbrennungsmotors, 2020.

Abb.: ACE, Öko-Institut, 2020

ADAC und Verbrennungsmotor

CO₂-Emissionen in g/km



Quelle: Joanneum Research, Graz/ADAC e.V.

© ADACe.V. 10.2019

Abb.: ADAC, Oktober 2019

Es folgt: Physik und Verbrennungsmotor

- Wasserstoff als Treibstoff
 - schnellere Verbrennung
 - regenerativ
 - vorhandene Gas-Infrastruktur weiter nutzbar
 - schnell nachtankbar
- Keramische Werkstoffe/Materialien
 - höhere Temperaturen
 - weniger Reibung
 - weniger Druckverluste: höhere Drücke
- Additive Fertigung „3 D-Druck“
 - kleinere schwingende Massen
- Turbolader

Wirkungsgrade von Verbrennungsmotoren

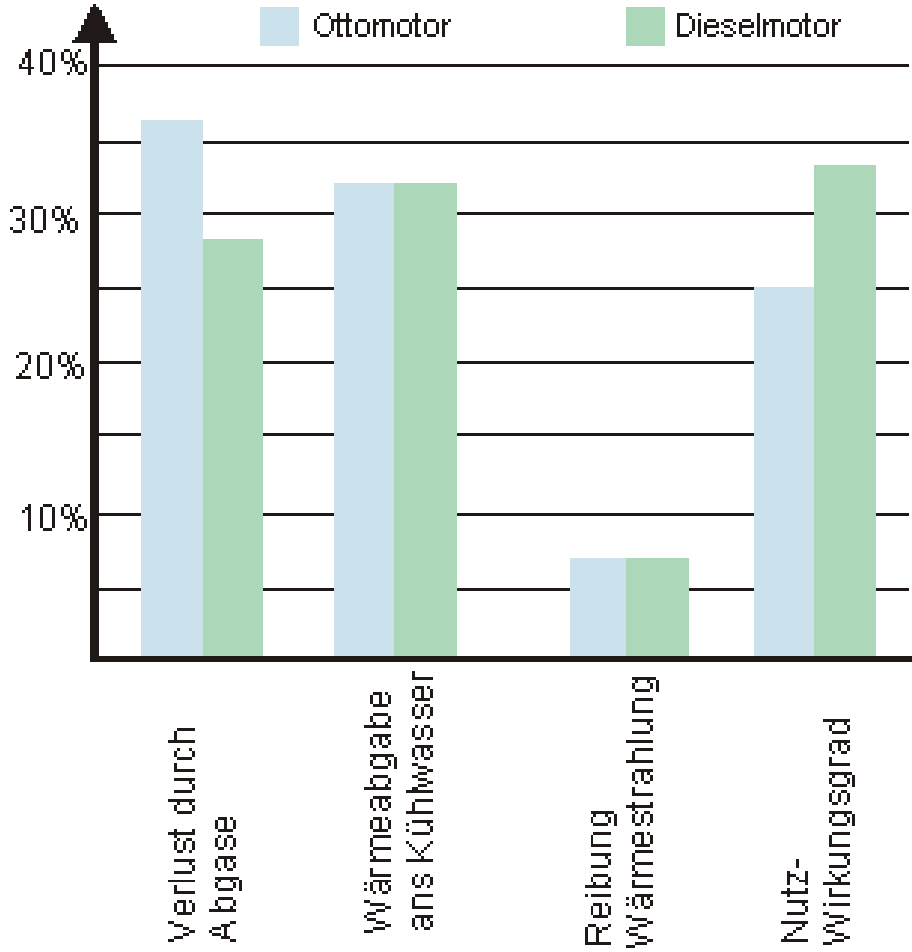
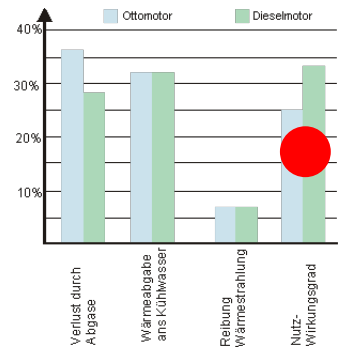


Abb.: Joachim Herz-Stiftung „LeifiPhysik“



Wirkungsgradsteigerung durch höhere Drücke

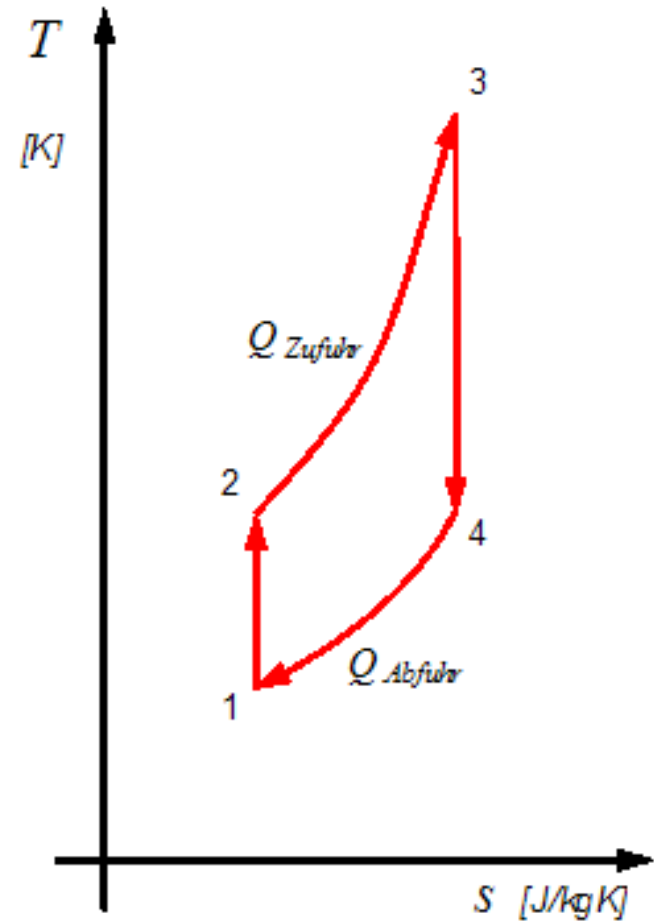
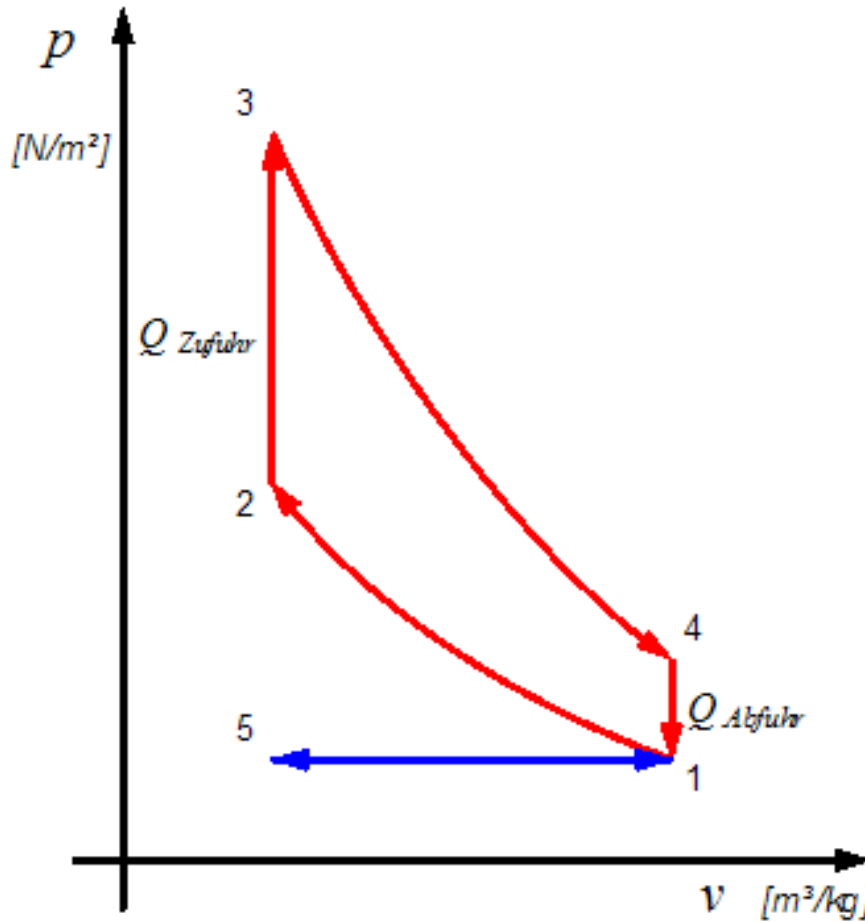


Abb.: energie.ch

Verdichtungsdruck und Wirkungsgrad

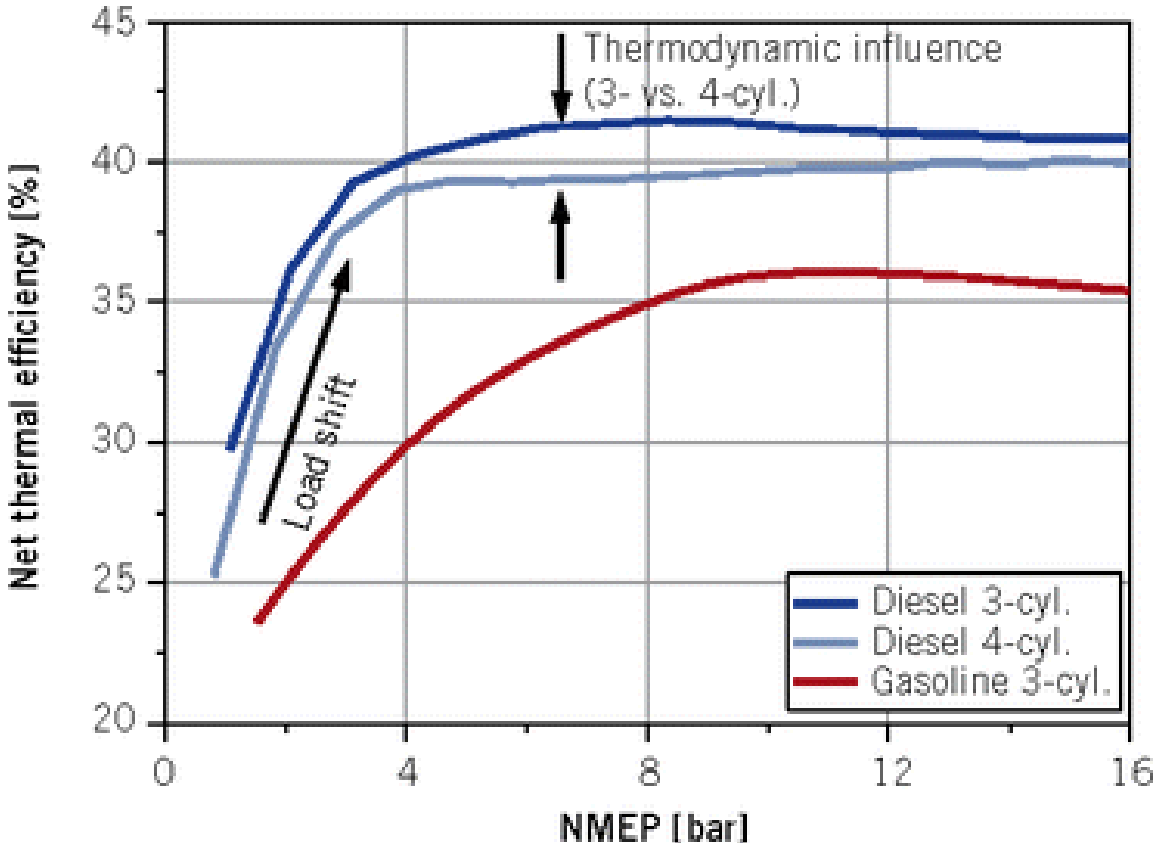


Abb.: Springer-Verlag
 Mauch, A.; Tophoven, J.; Trzebiatowski, T.; Ratz, T.: Potential and Limits of Downsizing a Diesel Engine

Wirkungsgradsteigerung durch höhere Kompression

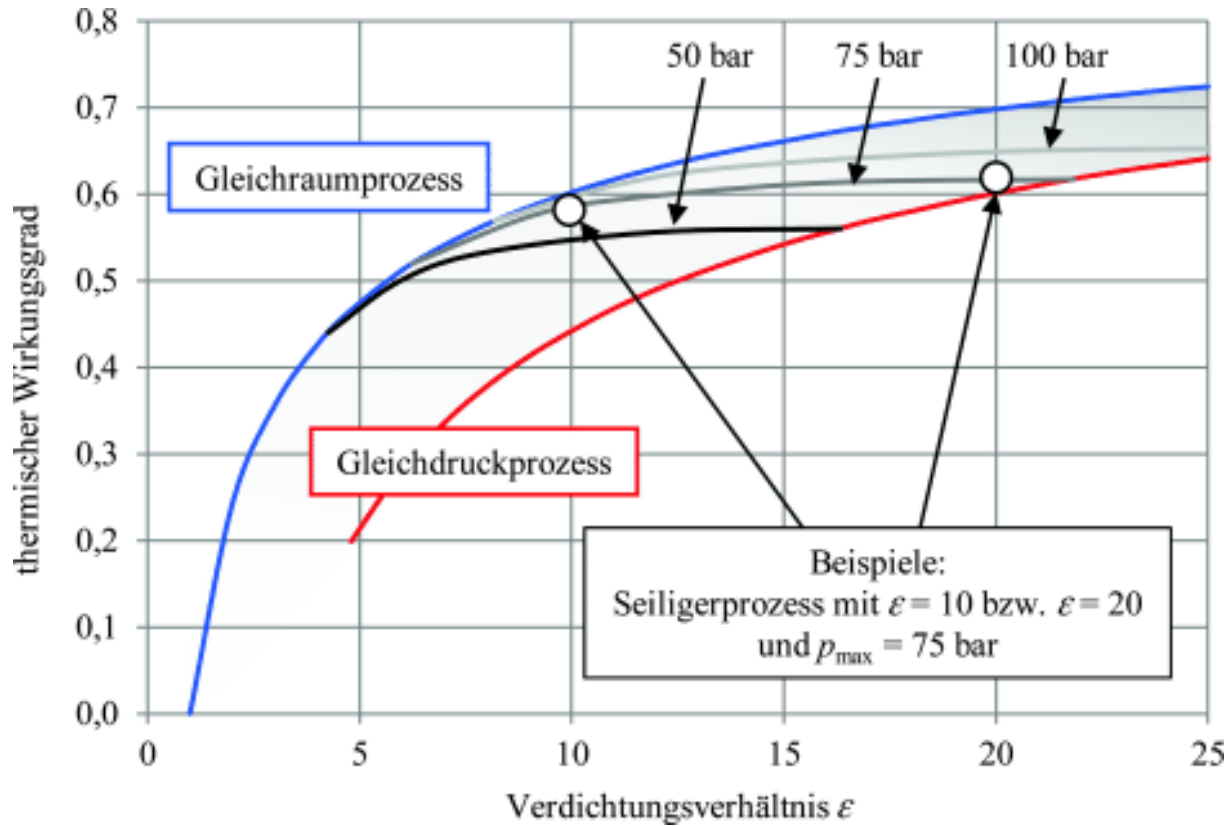
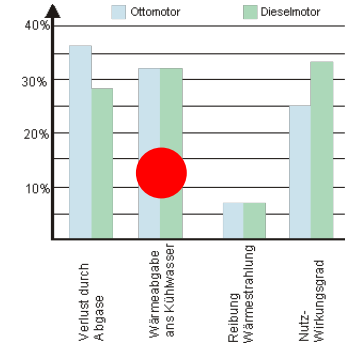


Abb.: Springer-Verlag



Wirkungsgradsteigerung durch höhere Temperaturen

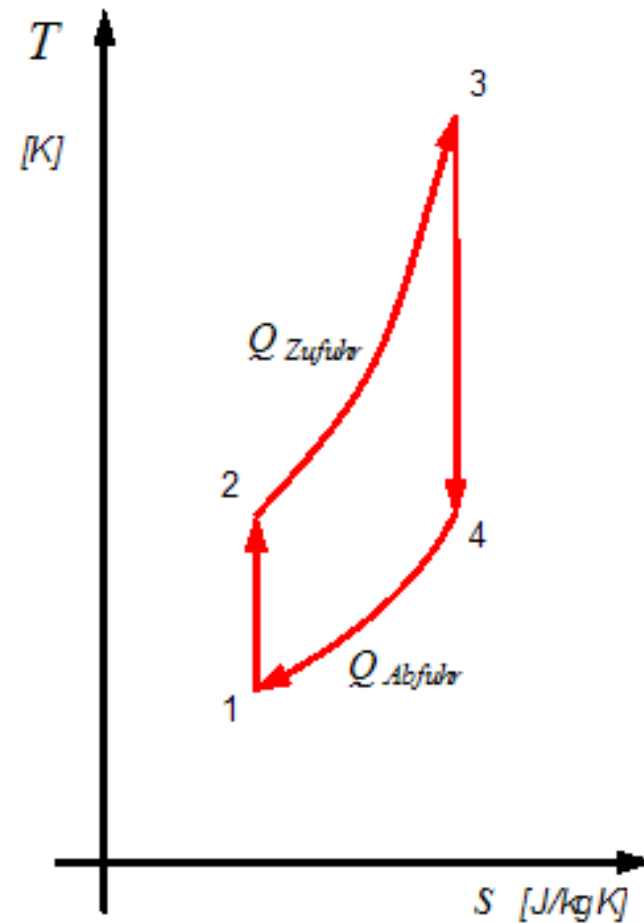
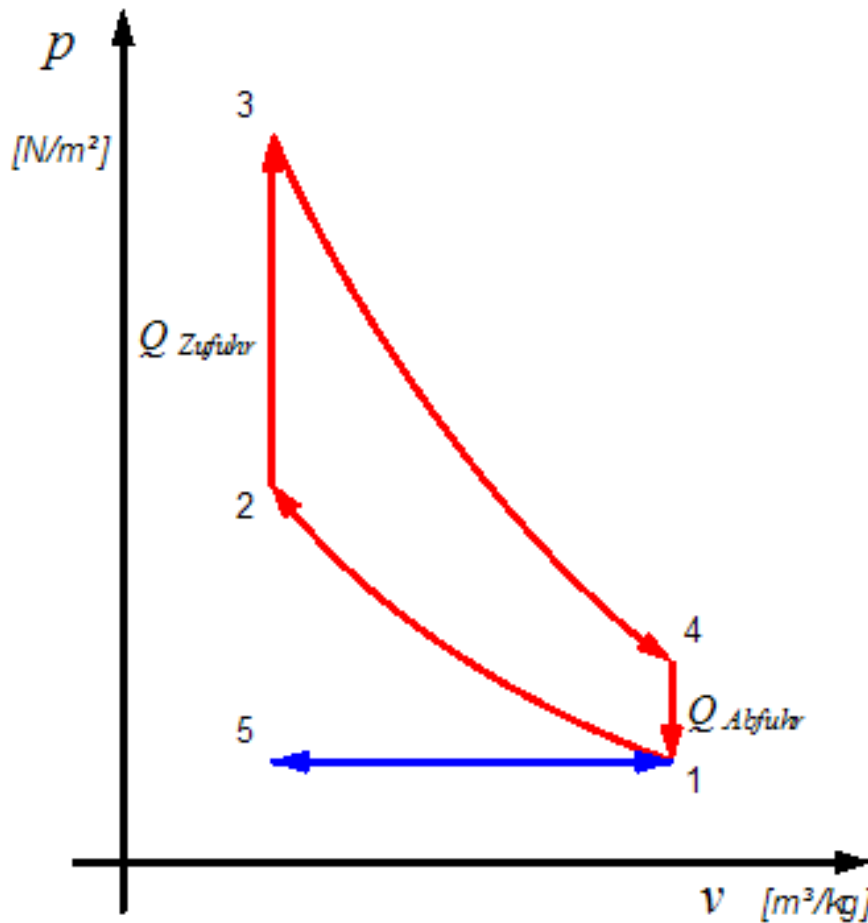


Abb.: energie.ch

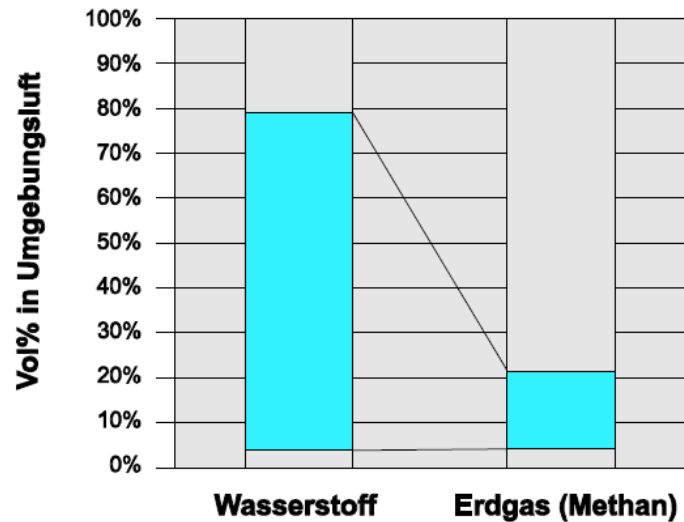
Keramiken erlauben höhere Temperaturen...

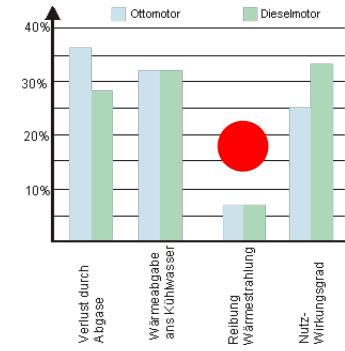


Abb.: mentech-one

...Wasserstoff auch!

	Wasserstoff H ₂	Methan CH ₄
Dichte in kg/m ³	0,08988	0,7175
Zündtemperatur in Luft in °C	585	540
Max. Flammgeschw. in cm/s	346	43
Zündbereich in Luft Vol.-%	4 - 73	5 - 14
Flammentemp. in Luft in °C	2130 °C	1970 °C





Reibungsbeiwerte

Gleitreibungszahlen μ_G (Richtwerte)					
Materialpaarung		trocken	wenig fettig	geschmiert	mit Wasser
Bronze auf	Bronze	0,20		0,06	
	Grauguss	0,21	0,08		
	Stahl	0,18	0,16	0,07	
Grauguss auf	Bronze	0,20	0,15	0,08	
	Eiche	0,49	0,19		0,22
	Grauguss	0,28	0,15	0,08	0,31
Eiche auf Eiche		0,34		0,1	0,25
Lederriemen auf	Eiche	0,27			0,29
	Grauguss	0,56	0,27	0,12	0,36
Messing auf Eiche		0,60		0,44	0,24
Stahl auf	Bronze	0,18	0,16	0,07	
	Eiche	0,5		0,08	0,26
	Eis	0,014			
	Grauguss	0,18		0,01	
	Stahl	0,12		0,01	
	Messing	0,2			
	Weißmetall	0,2	0,1	0,04	
blockiertes Autorad auf Pflaster		0,5			0,2

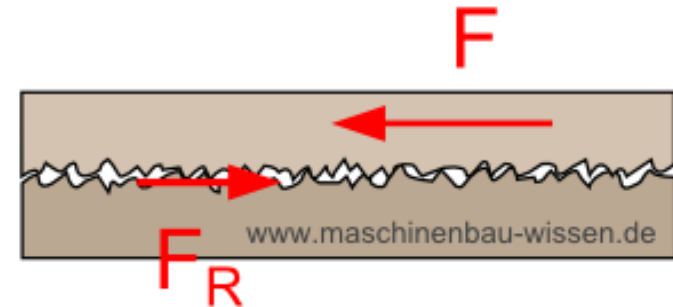


Abb.: maschinenbau-wissen.de

Reduzierung der Reibung durch keramische Werkstoffe

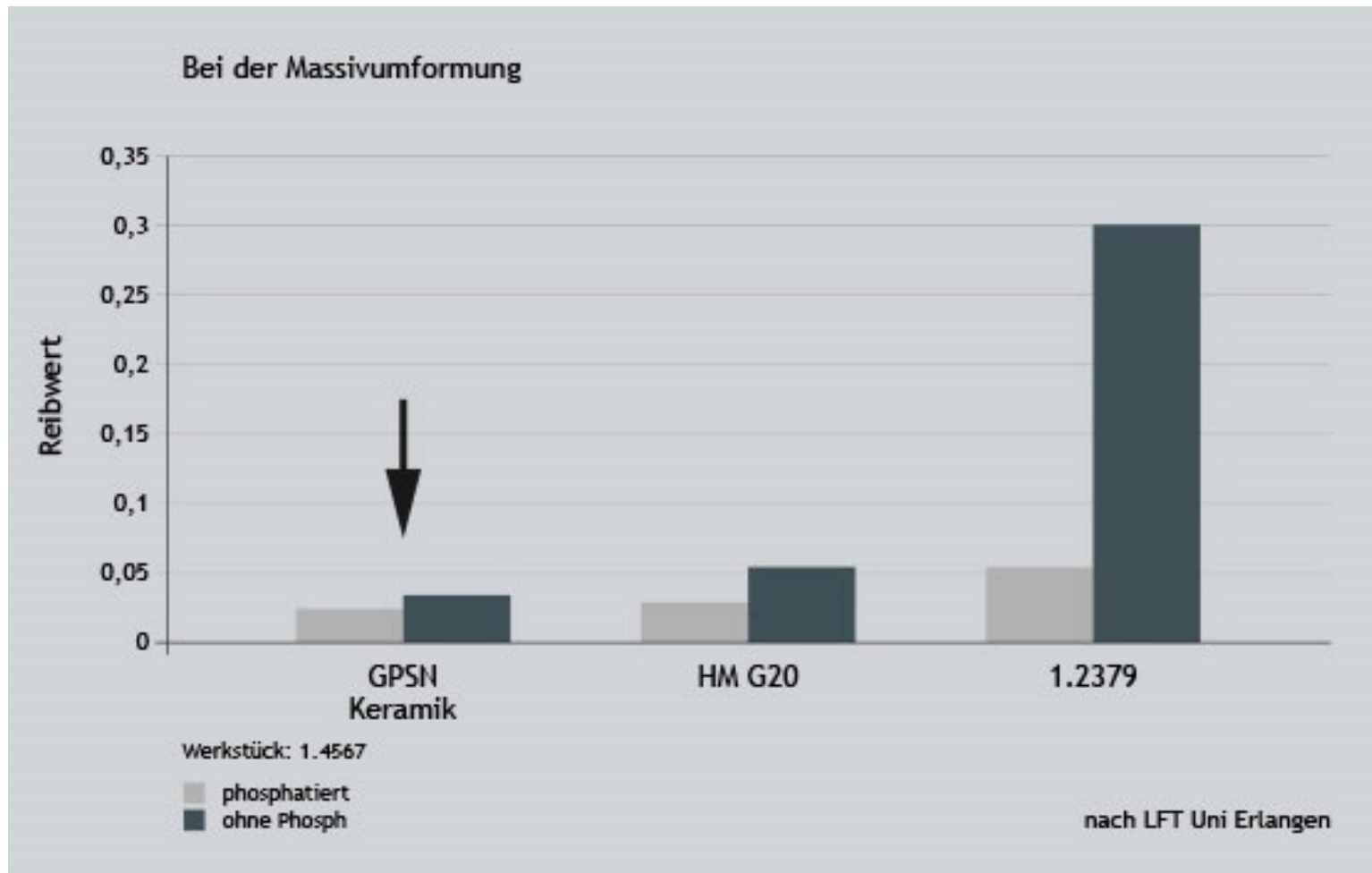
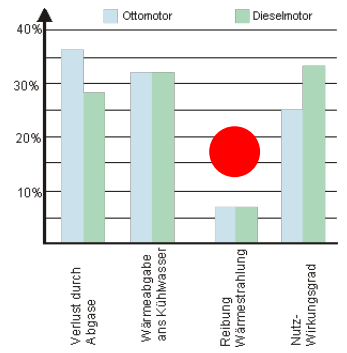


Abb.: Bea Tec

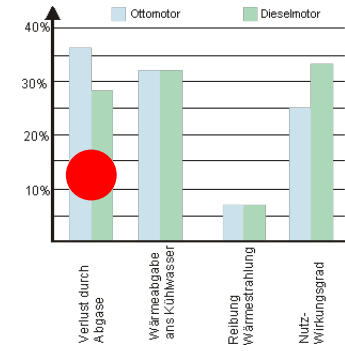
Schwingende Massen reduzieren



Kolben aus additiver Fertigung (3 D-Druck) reduzieren Gewicht und schwingende Massen



Abb.: Auto, Motor und Sport, Porsche



Turbolader nutzt Abgas-Energie

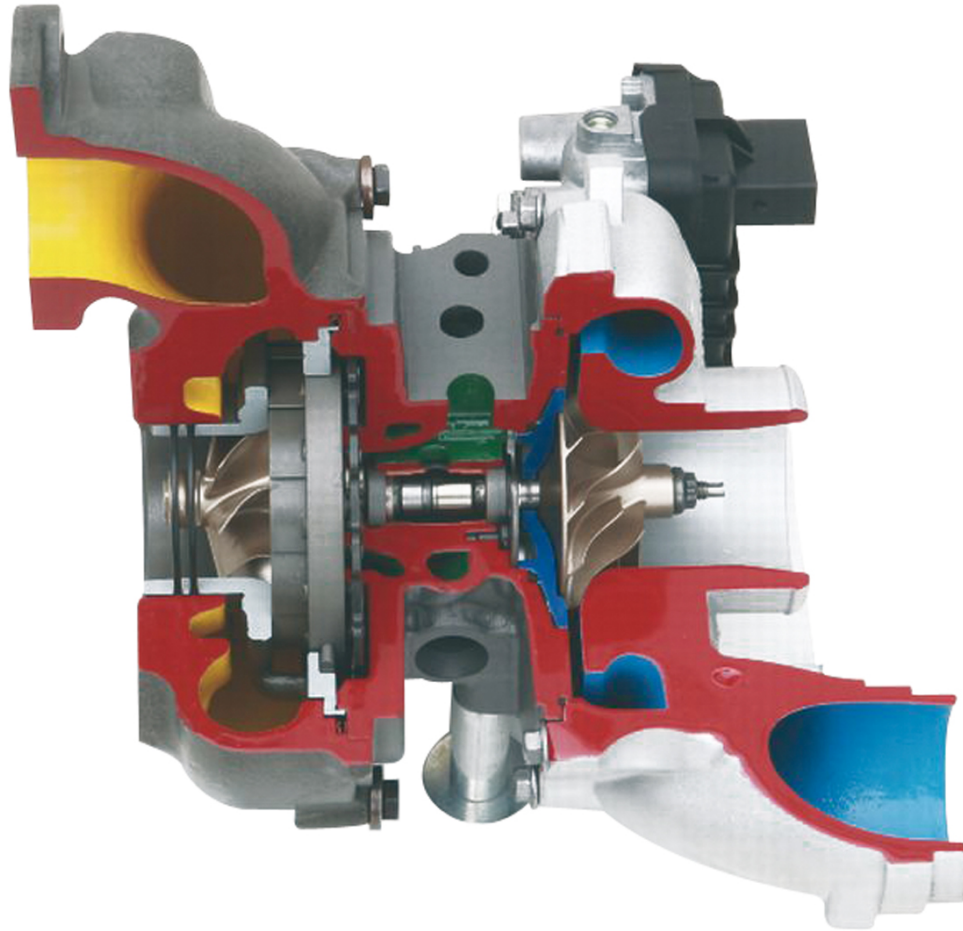
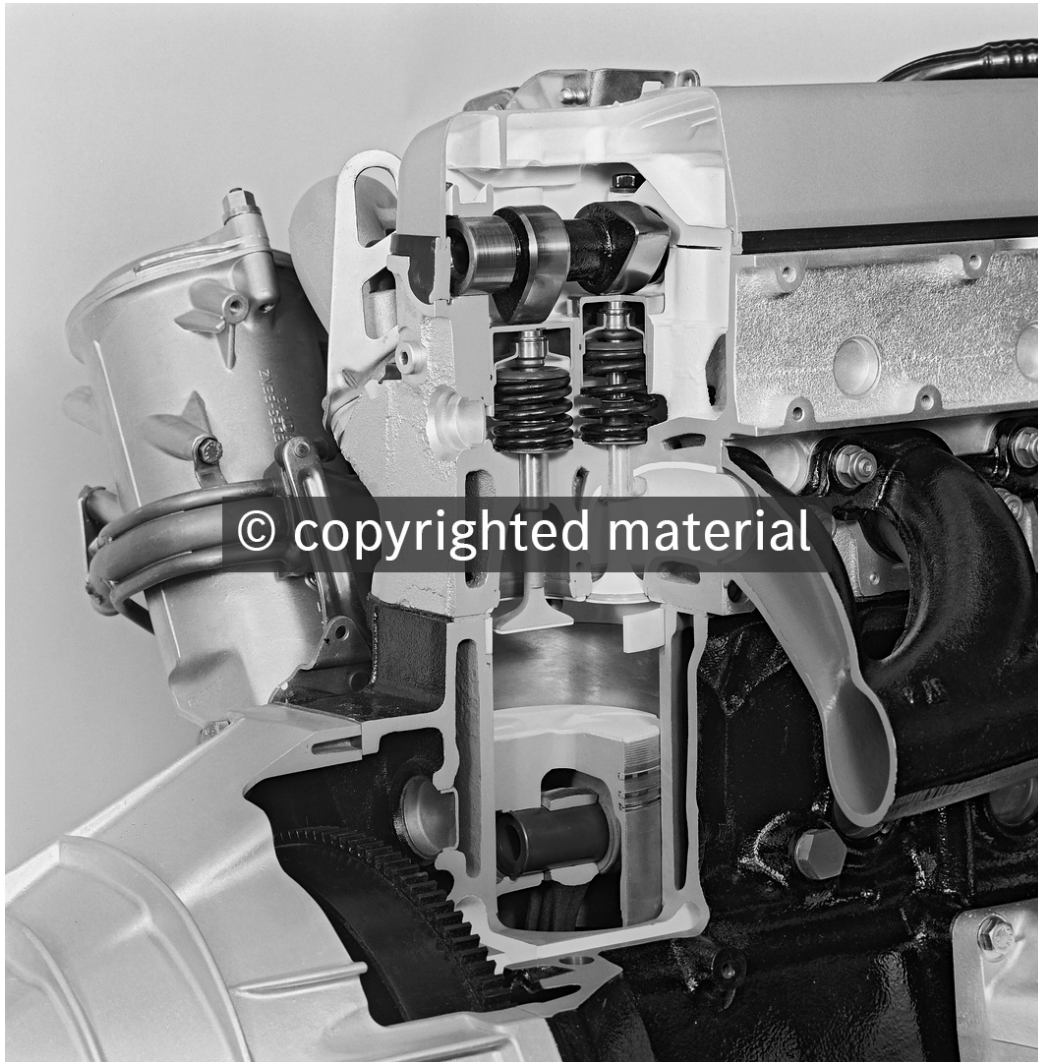


Abb.: Christiani

- Was gibt es heute?



Diesel-Keramikmotor OM 601:
2-Liter-Forschungsmotor mit
Keramikteilen:

- Kolbenboden
- Zylinderkopf
- Einlassventil
- Auslassventil
- Ventildederteller
- Auskleidung des Auslasskanals
(Portliner)
- Zylinder-Teilbüchse
- Vorkammer
- Kolbenbolzen

Abb.: Mercedes Benz

BMW 750 hL (Baureihe E38)



Abb.: BMW

H₂-Verbrennungsmotor im Pkw (BMW)



Abgasemissionen des Wasserstoffautos im Vergleich zum Benzinmotor

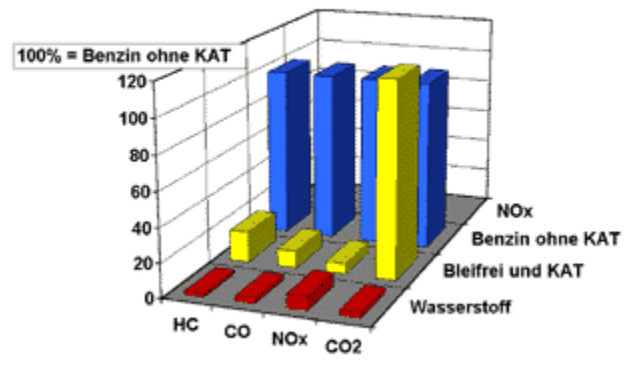
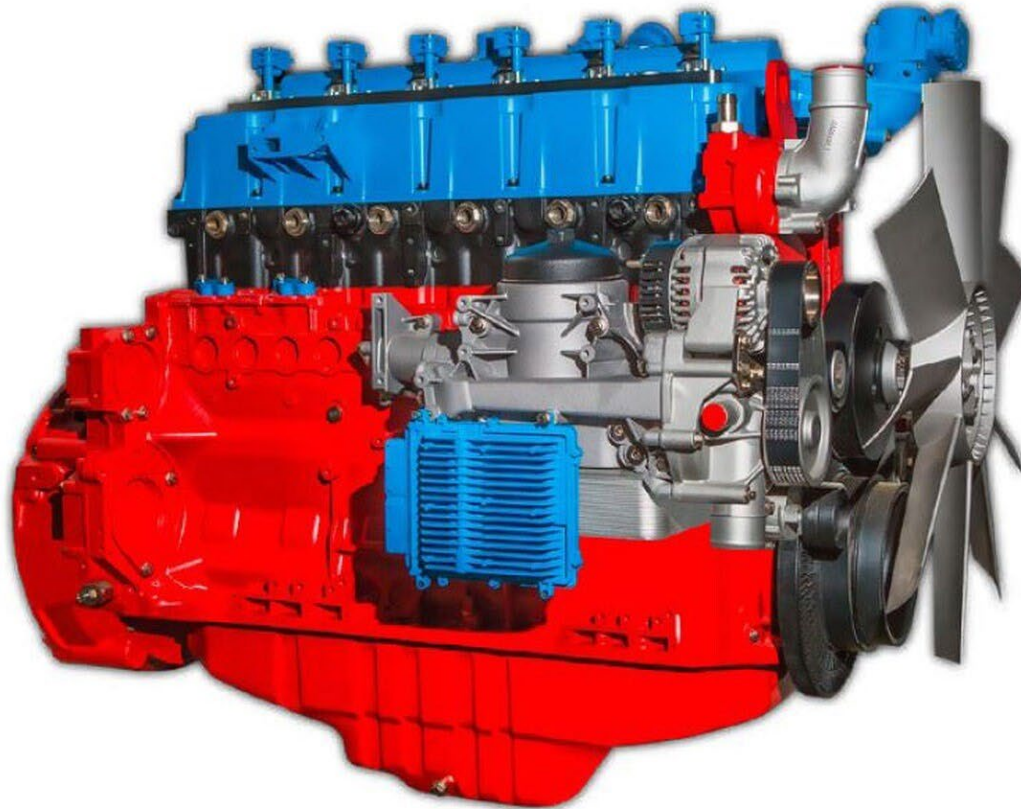


Abb.: BMW, T. Seilnacht

Wasserstoff-Verbrennungsmotor für Nutzfahrzeuge und BHKW



Basis:
Dieselmotor

Angepasst:
Brennstoffeindüsung
Flammensicherung
Fremdzündung
Turbolader
Abgasrückführung

Abb.: KEYOU/Deutz

Wasserstoff-Verbrennungsmotor

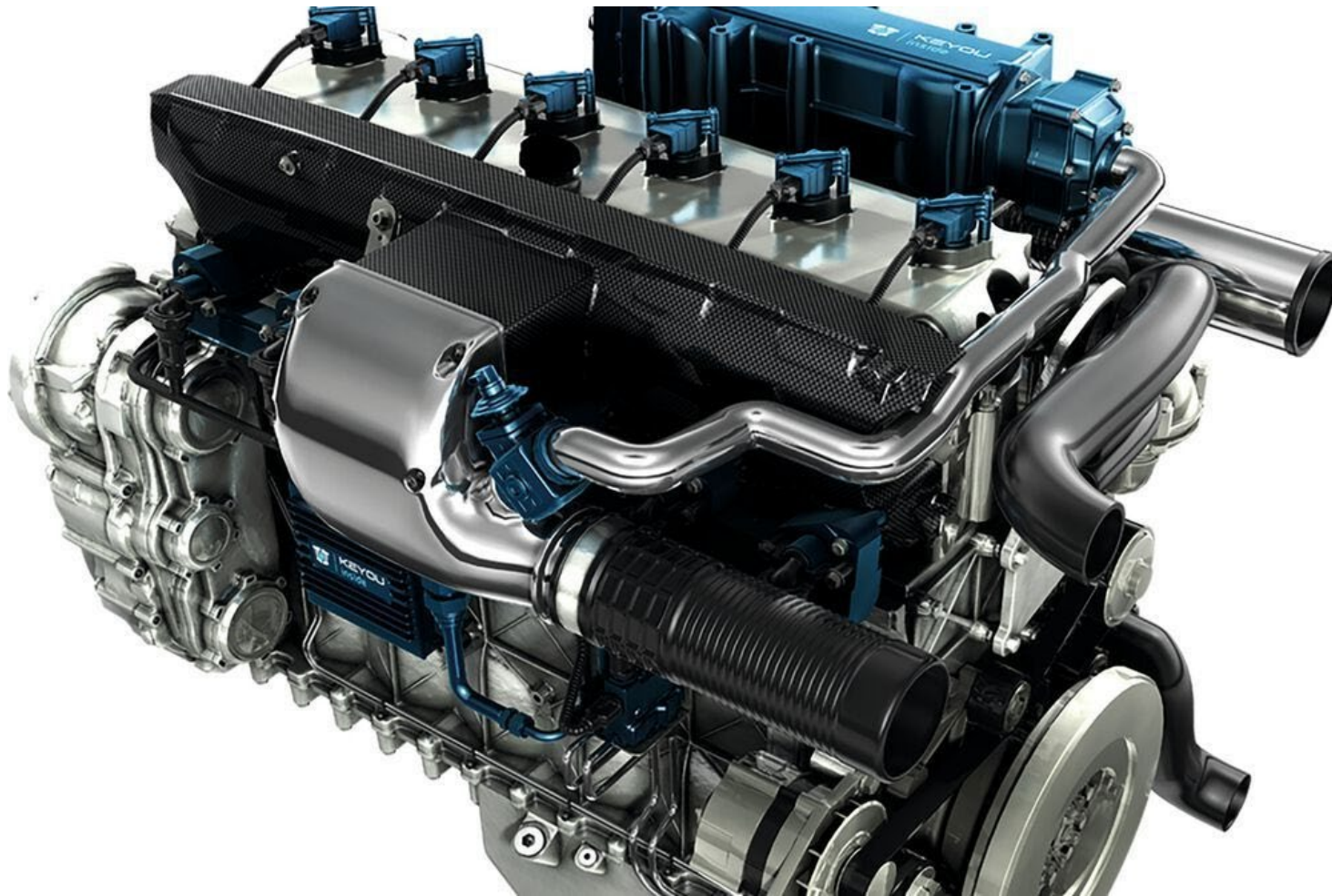


Abb.: KEYOU, München

Keyou-H₂-Motor auf Basis Deutz-Diesel-Motor



Abb.: transport-online.de, 2021

Wasserstoff-Verbrennungsmotor

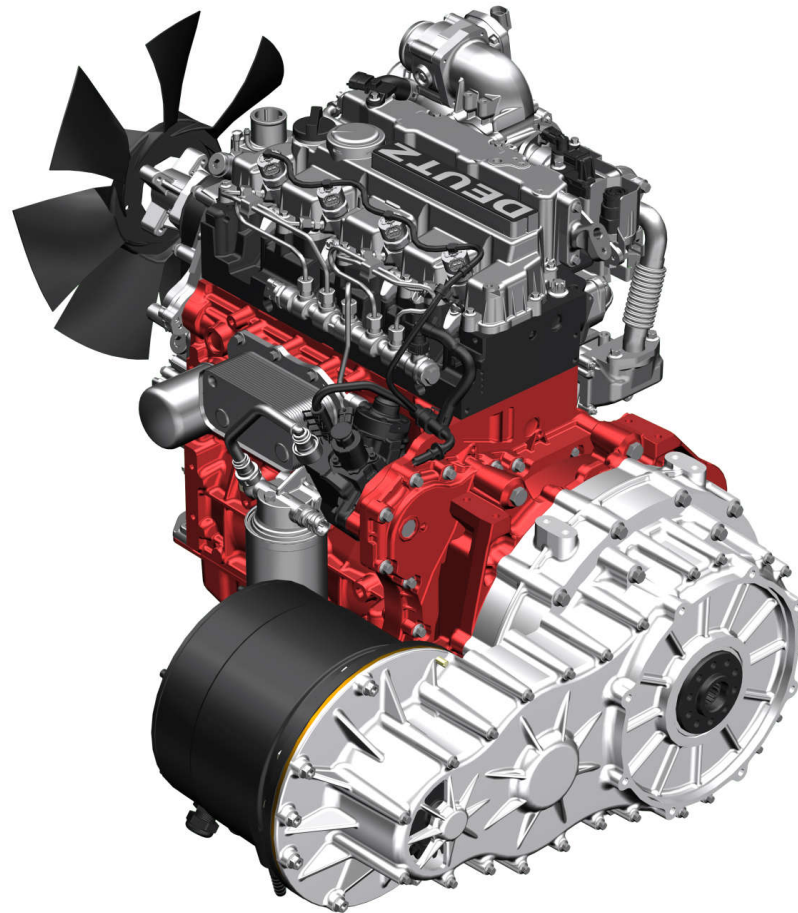
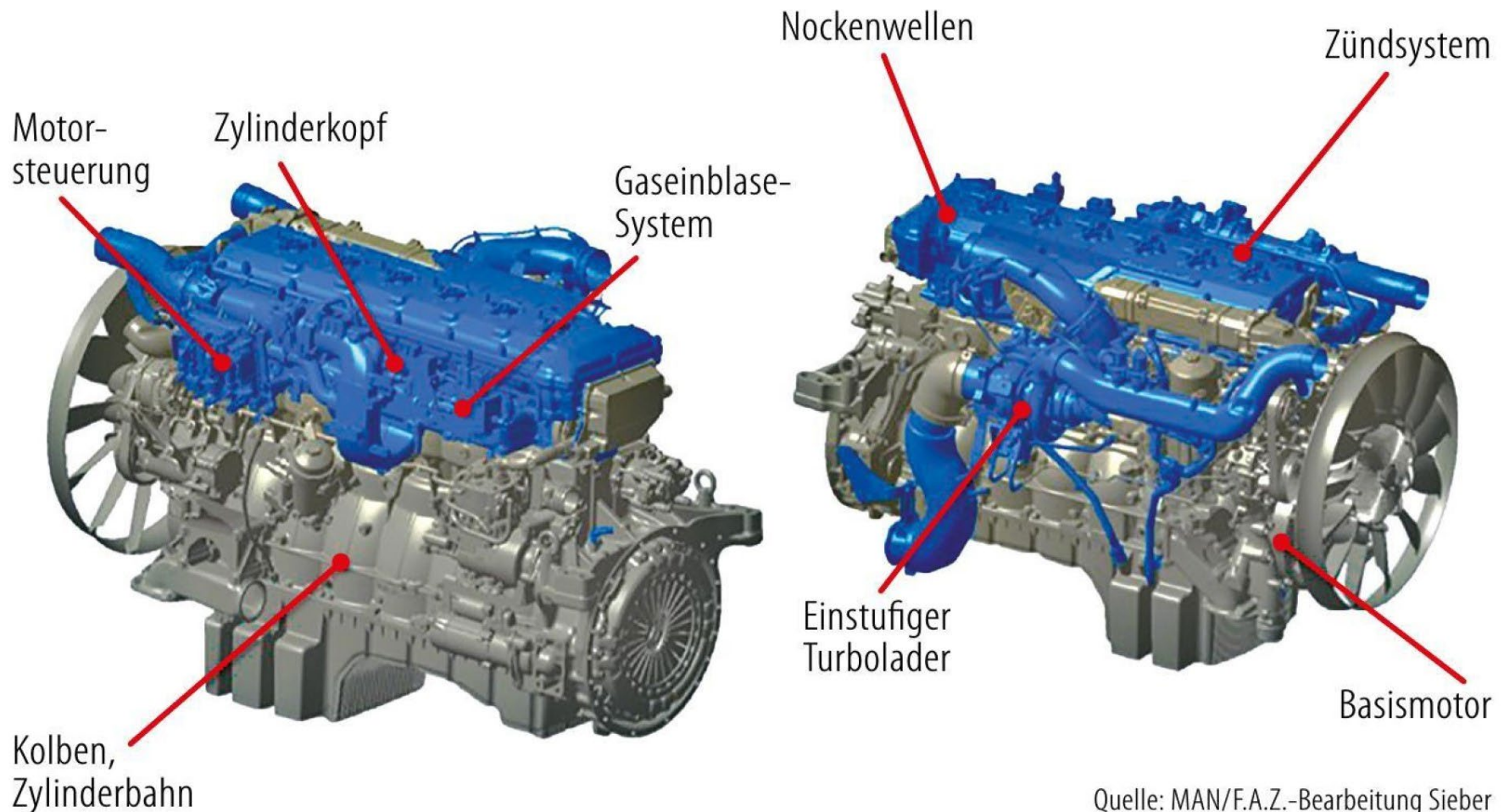


Abb.: Deutz

MAN-Wasserstoffmotor



Quelle: MAN/F.A.Z.-Bearbeitung Sieber

Einsatzgebiete moderner Wasserstoff-Motoren

- BHKW
- Gasmotorwärmepumpe
- Lokomotiven/Triebwagen
- Baumaschinen
- LKW, Busse
- PKW

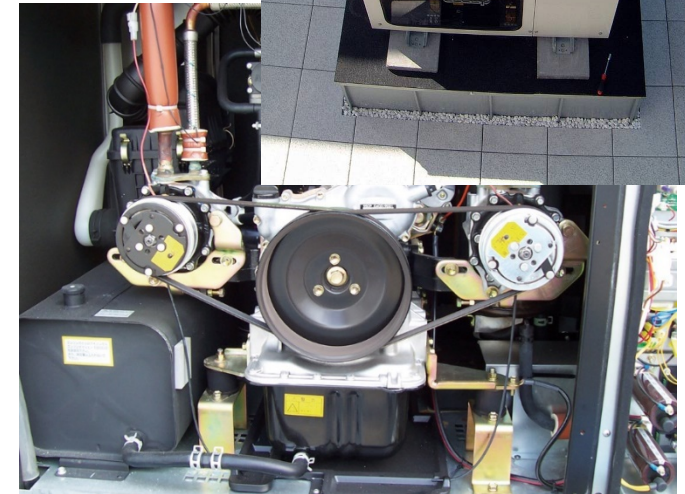
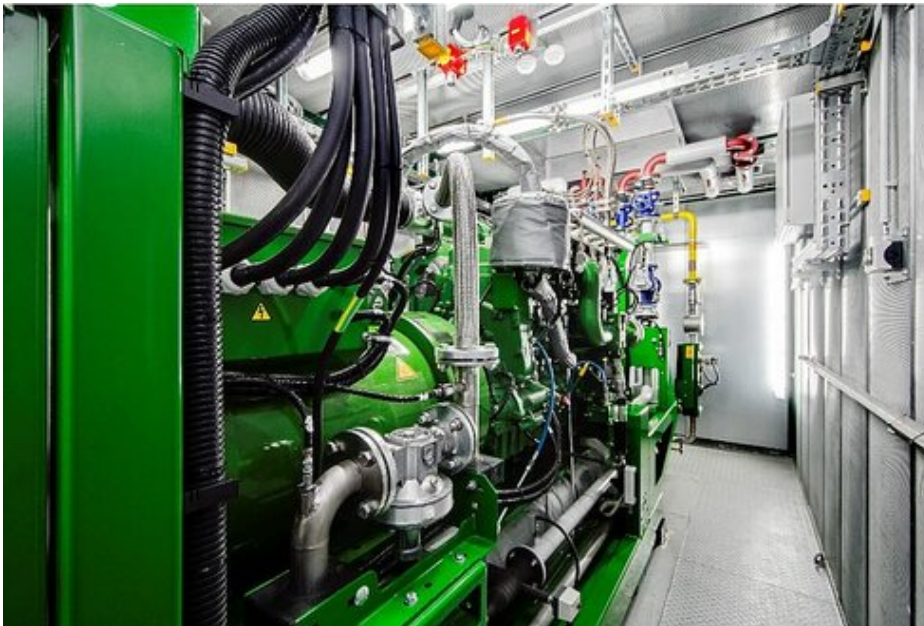


Abb.: 2G, Aisin

- Hohe Verdichtung der Luft (Basis Dieselmotor)
- Direkteinspritzung
- Fremdzündung durch Zündkerze
- Wasserstoff-Verbrennung
- Hohe Temperaturen
- Abgas-Turbolader (ggf. mehrstufig mit Ladeluftkühlung)
- Kleine schwingende Massen
- Keramische Werkstoffe:
 - hohe Temperaturen
 - geringe Reibung
 - weniger Schmieröl und dessen Abbrand
 - hohe Festigkeit: kleinere schwingende Massen

- Verbrennungsmotoren haben ein weiteres hohes Entwicklungspotenzial und können mit GuD und Brennstoffzellen gleich ziehen.
- Verbrennungsmotoren lohnen besonders in der KWK.
- Verbrennungsmotoren sind flexibel beim Übergang von klassischen auf neue Brennstoffe einsetzbar.
- Technik-Neutralität und Wettbewerb der Techniken führen zum technischen und wirtschaftlichen Optimum.



Über Ihren Glauben entscheiden Sie selbst:
Politik oder Physik.

Prof. Dr.-Ing. Jochen Arthkamp
jochen.arthkamp@thga.de

