



Centro d'iniziativa per i MOtori, VEicoli e Tecnologie

## Il ruolo dell'idrogeno nella transizione tecnologica ed ecologica dell'energia

7 luglio 2022

# L'impiego dell'Idrogeno nei Motori a Combustione Interna



UNIVERSITÀ  
DEGLI STUDI  
FIRENZE

**DIEF**  
DIPARTIMENTO  
DI INGEGNERIA  
INDUSTRIALE

**Giovanni Ferrara**

*Dipartimento di Ingegneria Industriale*

*Università degli Studi di Firenze*

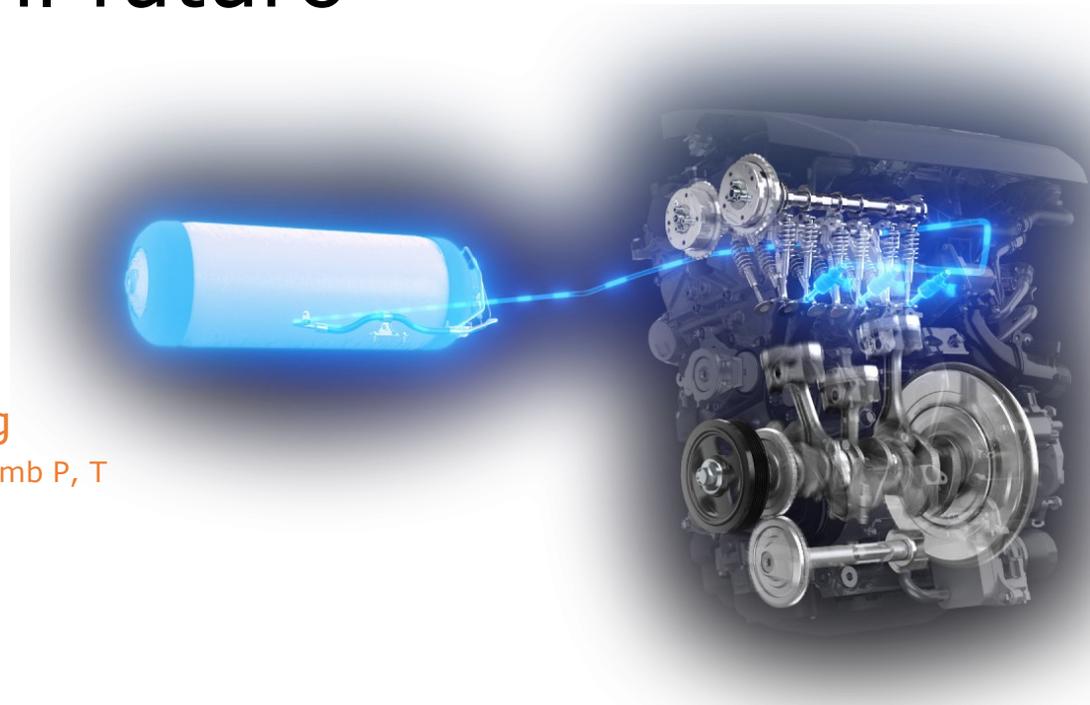
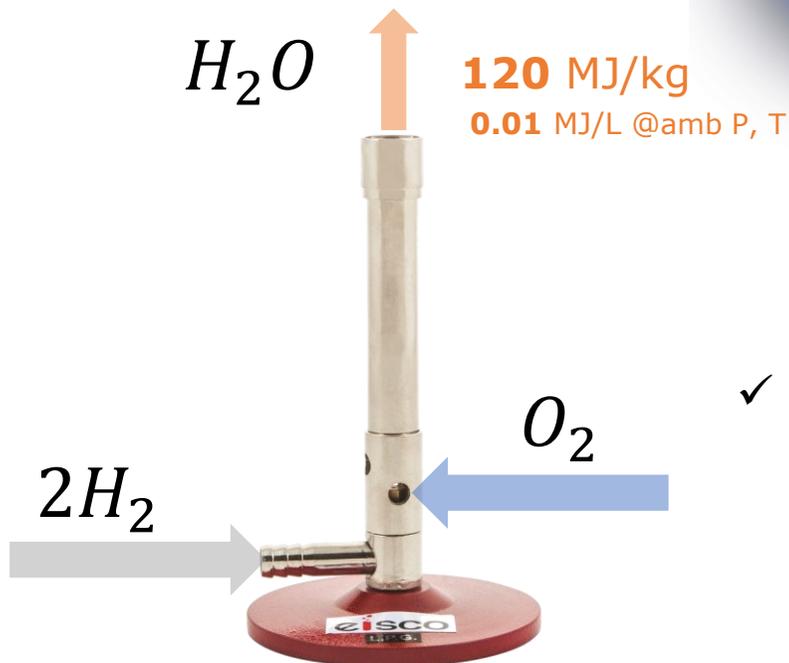
[giovanni.ferrara@unifi.it](mailto:giovanni.ferrara@unifi.it)

# 14 giugno 2022 – Comunità Europea

- Approvazione di un pacchetto di misure ambientali
  - Dal 2035 in poi stop alla vendita di auto che emettano CO2
- Le soluzioni tecnicamente compatibili appaiono essere
  - Propulsione elettrica
  - Propulsione ad idrogeno

# L'idrogeno come potenziale combustibile sostenibile per il futuro

- ✓ Combustibile **Carbon-free**
- ✓ **Alto potere calorifico** per unità di massa

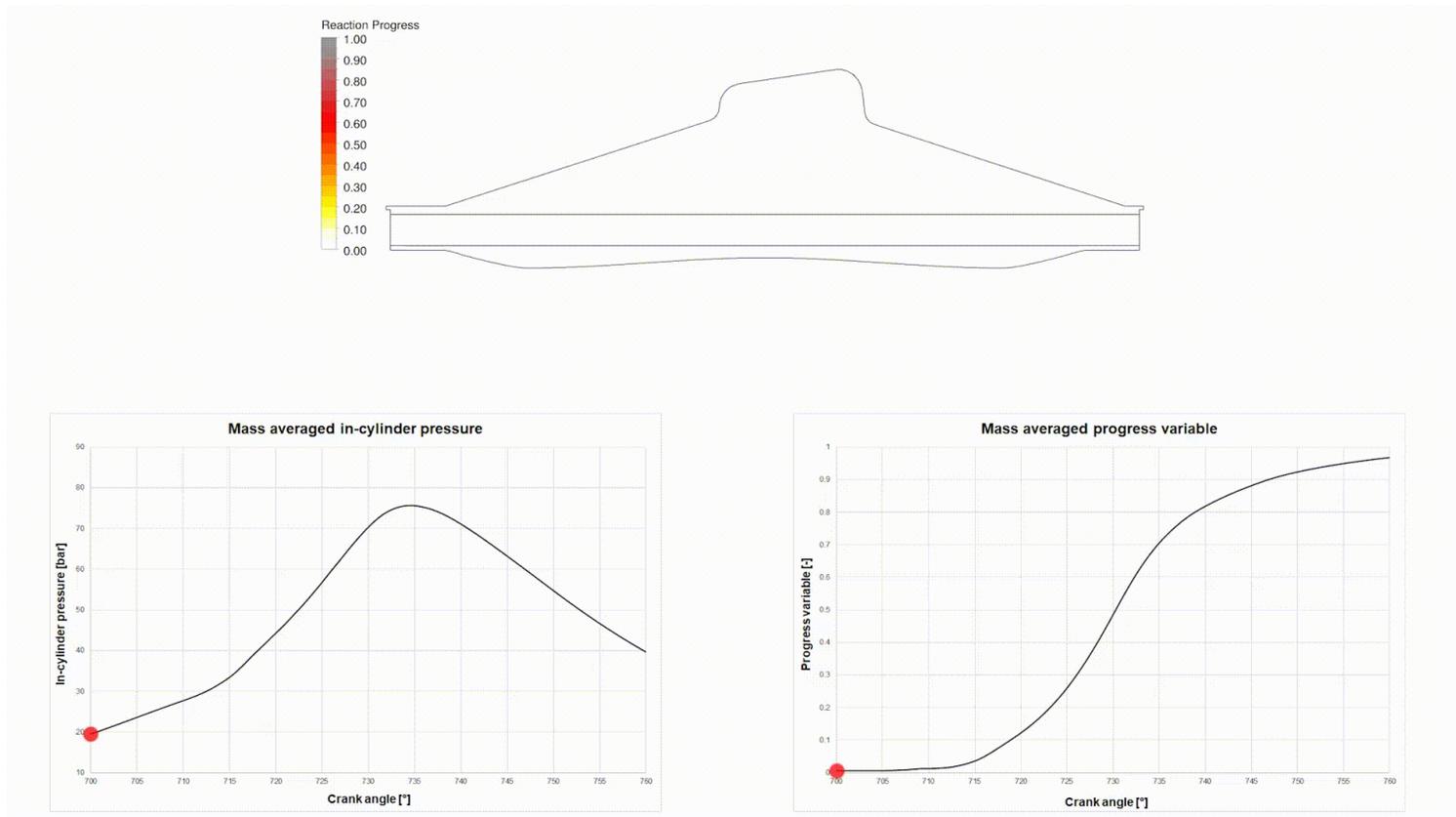


- ✓ Sfruttabile per **motori a combustione interna**

- L'alta diffusività garantisce ottimo mixing con aria
- L'ampio range di infiammabilità permette la combustione magra

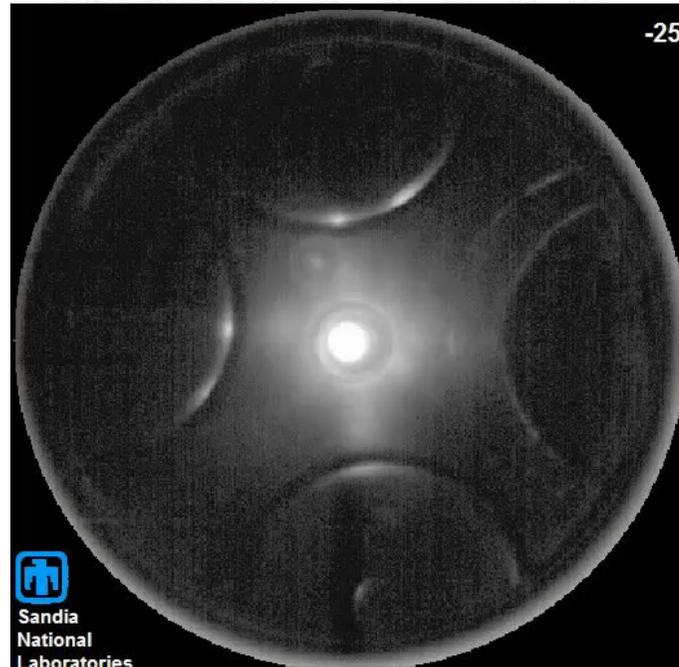
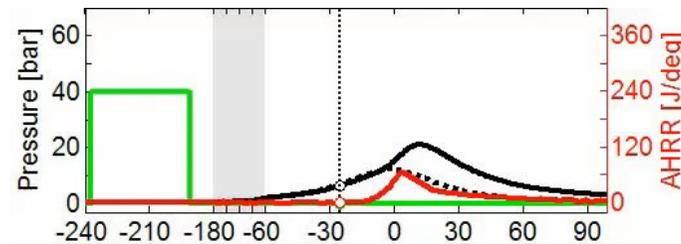
# Un passo indietro ...

- La combustione in un motore ad accensione comandata



# Un passo indietro ...

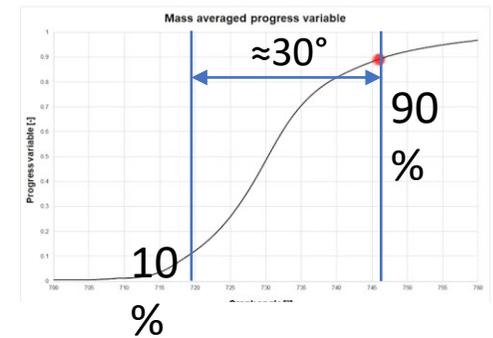
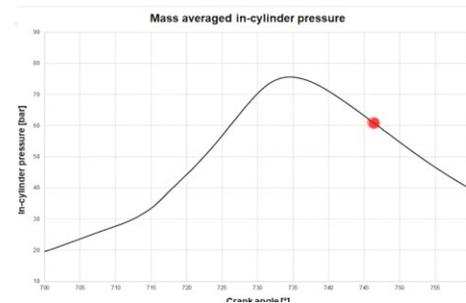
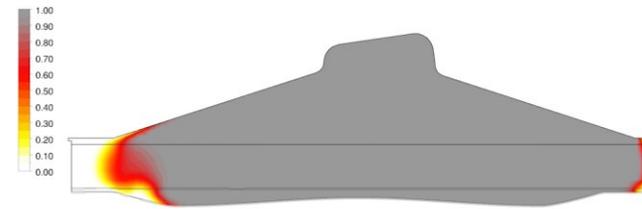
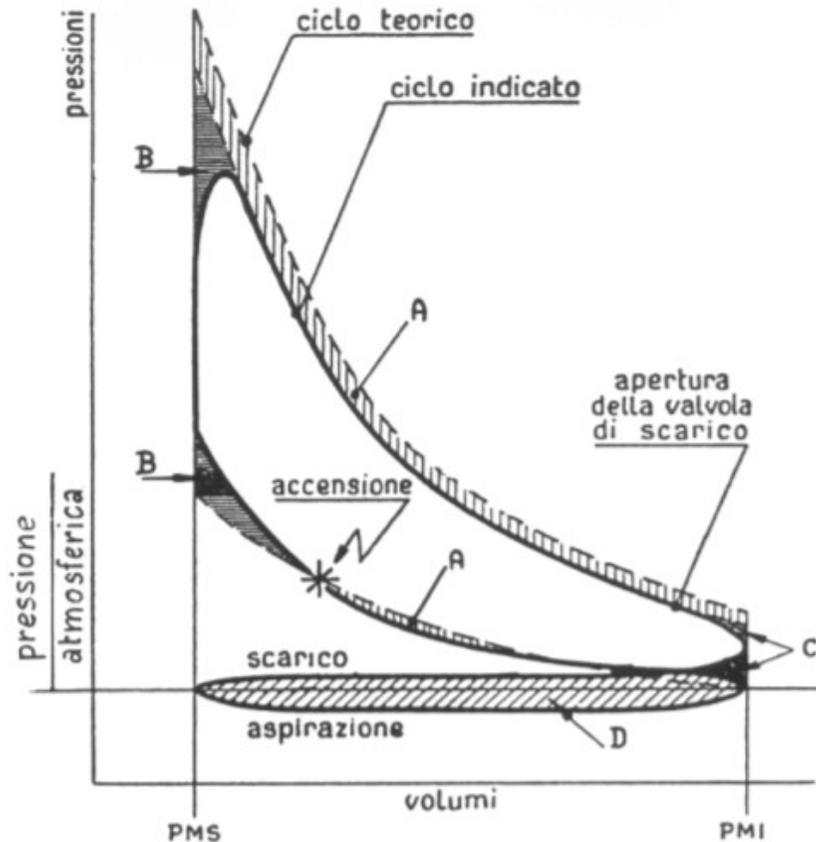
- La combustione in un motore ad accensione comandata



# I principali limiti dell'attuale tecnologia

- Processo di combustione
  - Scarsa rapidità del processo
    - Effetti sul rendimento

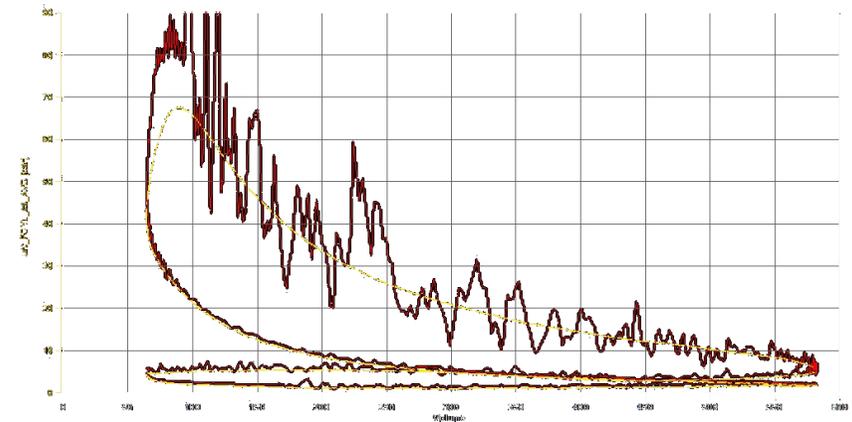
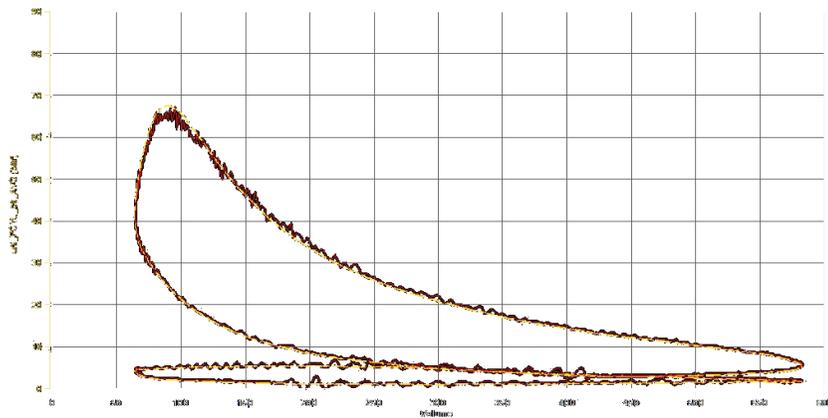
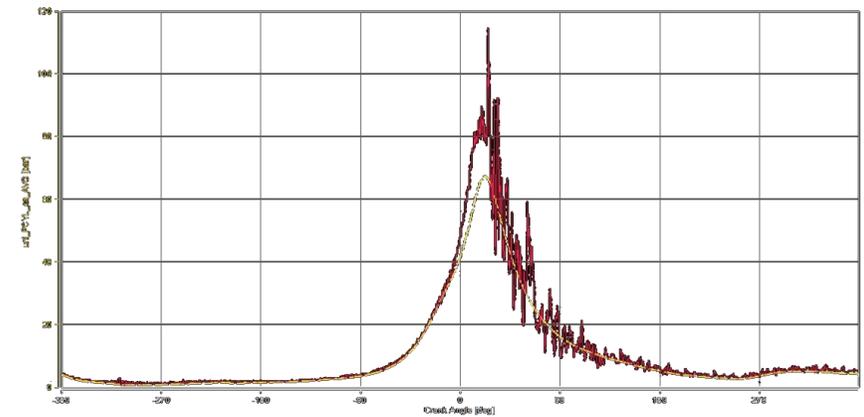
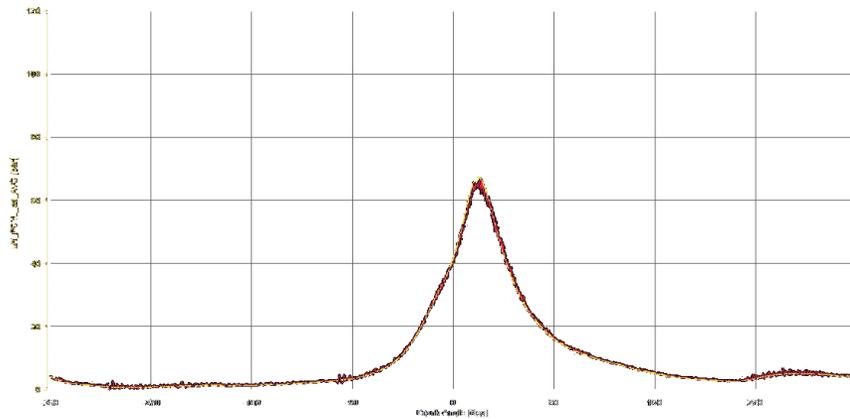
- Processo di combustione
  - Scarsa rapidità del processo
    - Effetti sul rendimento



# I principali limiti dell'attuale tecnologia

- Processo di combustione
  - Scarsa rapidità del processo
    - Effetti sul rendimento
    - Effetti sulla detonazione (dovuti anche al Numero di Ottano)

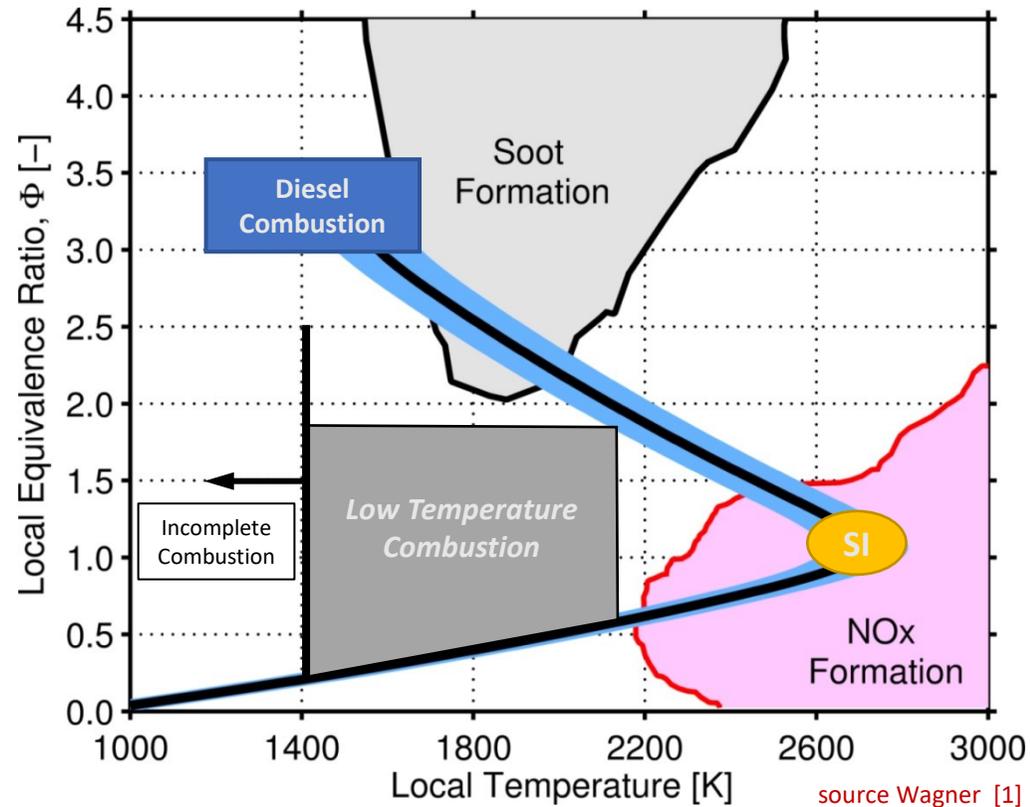
- Scarsa rapidità del processo
  - Effetti sulla detonazione



# I principali limiti dell'attuale tecnologia

- **Processo di combustione**
  - Scarsa rapidità del processo
    - Effetti sul rendimento
    - Effetti sulla detonazione (dovuti anche al Numero di Ottano)
- **Combustioni stechiometriche**
  - Alte temperature raggiunte => Produzione di NOx

- Combustioni stechiometriche
  - Alte temperature raggiunte => Produzione di NOx



# I principali limiti dell'attuale tecnologia

- **Processo di combustione**
  - Scarsa rapidità del processo
    - Effetti sul rendimento
    - Effetti sulla detonazione (dovuti anche al Numero di Ottano)
  - Combustioni stechiometriche
    - Alte temperature raggiunte => Produzione di NOx
- **Impiego di combustibili fossili**
  - La combustione di 1 litro di benzina => 2,3 kg CO<sub>2</sub>

- Impiego di combustibili fossili
  - La combustione di 1 litro di benzina => 2,3 kg CO<sub>2</sub>



**1 L  
benzina**



**2,3 kg  
CO<sub>2</sub>**



10 km

**10 km/l  
CO<sub>2</sub> 230 g/km**



20 km

**20 km/l  
CO<sub>2</sub> 115 g/km**

# I principali limiti dell'attuale tecnologia

- **Processo di combustione**
  - Scarsa rapidità del processo
    - Effetti sul rendimento
    - Effetti sulla detonazione (dovuti anche al Numero di Ottano)
  - Combustioni stechiometriche
    - Alte temperature raggiunte => Produzione di NOx
- **Impiego di combustibili fossili**
  - La combustione di 1 litro di benzina => 2,3 kg CO<sub>2</sub>
  - Combustioni parziali/incomplete => CO, HC

# Le caratteristiche dell'idrogeno ...

**Table 1.** Hydrogen properties compared with compressed natural gas (CNG), gasoline and diesel.

Property	Hydrogen	CNG	Gasoline	Diesel
Carbon content (mass%)	0	75 <sup>e</sup>	84	86
Lower heating value (MJ/kg)	119.7	45.8	44.8	42.5
Density <sup>a,b</sup> (kg/m <sup>3</sup> )	0.089	0.72	730–780	830
Volumetric energy content <sup>a,b</sup> (MJ/m <sup>3</sup> )	10.7	33.0	33 × 10 <sup>3</sup>	35 × 10 <sup>3</sup>
Molecular weight	2.016	16.043 <sup>e</sup>	~110	~170
Boiling point <sup>a</sup> (K)	20	111 <sup>e</sup>	298–488	453–633
Auto-ignition temperature (K)	858	813 <sup>e</sup>	~623	~523
Minimum ignition energy in air <sup>a,d</sup> (mJ)	0.02	0.29	0.24	0.24
Stoichiometric air/fuel mass ratio	34.5	17.2 <sup>e</sup>	14.7	14.5
Stoichiometric volume fraction in air (%)	29.53	9.48	~2 <sup>f</sup>	-
Quenching distance <sup>a,c,d</sup> (mm)	0.64	2.1 <sup>e</sup>	~2	-
Laminar flame speed in air <sup>a,c,d</sup> (m/s)	1.85	0.38	0.37–0.43	0.37–0.43 <sup>g</sup>
Diffusion coefficient in air <sup>a,b</sup> (m <sup>2</sup> /s)	8.5 × 10 <sup>-6</sup>	1.9 × 10 <sup>-6</sup>	-	-
Flammability limits in air (vol%)	4–76	5.3–15	1–7.6	0.6–5.5
Adiabatic flame temperature <sup>a,c,d</sup> (K)	2480	2214	2580	~2300

<sup>a</sup> at 1 bar, <sup>b</sup> at 273 K, <sup>c</sup> at 298 K, <sup>d</sup> at stoichiometry, <sup>e</sup> methane, <sup>f</sup> vapor and <sup>g</sup> n-heptane.

## ... Si traducono in



### Carbon free fuel

- Nessuna Carbon-based emission (CO-CO<sub>2</sub>-Soot)

### Alto coefficiente di diffusione

- Miglior capacità di miscelamento (rispetto a metano e, ancor più, benzina)

### Alta infiammabilità in aria 4-76%

- Possibilità di fare combustioni magre → alta efficienza



### Alta temperature adiabatica di fiamma

- ✓ Formazione di NO<sub>x</sub> (solo in parte superabile con combustioni magre)

### Bassa energia di accensione

- ✓ pre ignition (in fase di compressione) a causa di punti caldi o da residui di combustione

### Bassa quenching distance

- ✓ Alto gradiente di temperature in prossimità delle pareti
- ✓ Maggiori perdite termiche a parete

### Bassa quenching distance + alta velocità laminare di fiamma

- ✓ Rischio di backfiring nel condotto di aspirazione

### Infragilimento

- ✓ Rotture Meccaniche soprattutto in applicazioni HPDI

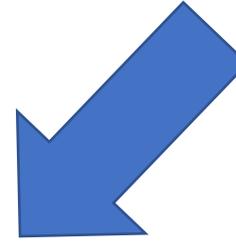
... e in



Potere calorifico inferiore 119.7 MJ/kg



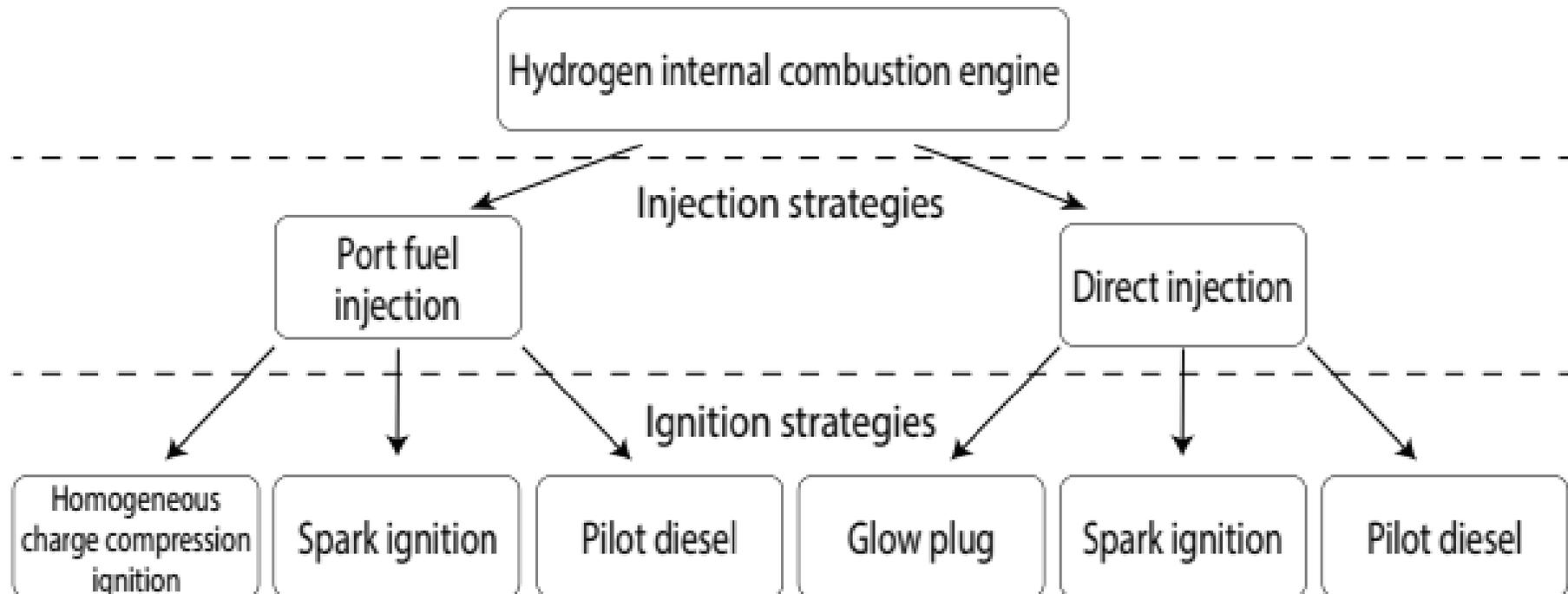
Densità 0.089kg/m<sup>3</sup> (1 bar, 273k)



Volumetric energy content 10.7 MJ/m<sup>3</sup> (1 bar, 273k)  
3 times less than CNG  
3 order less than gasoline / diesel



# Modalità di iniezione/combustione dell'H2



# DI – HCCI (Homogenous Charge Compression Ignition)

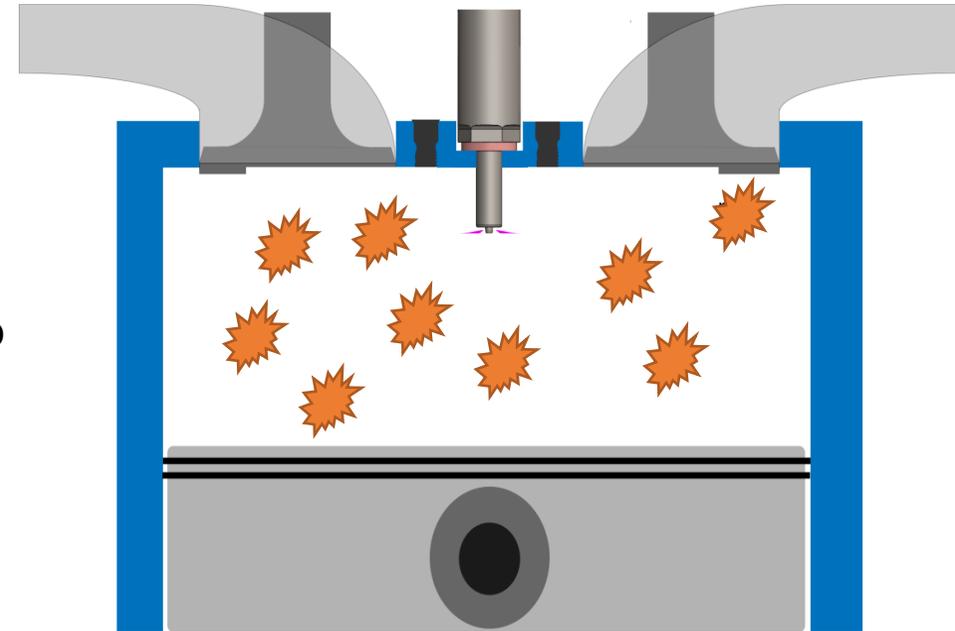
H<sub>2</sub> iniettato a valvole chiuse

- ✓ Compression stroke (ATTENTION to late inj → Homogeneity)
- ✓ Nessun problema di BackFire

Pressioni di iniezione > 100 bar

Efficienze comparabili con motori Diesel ad alto carico (circa 45%)

Consueti problemi di controllo per HCCI



# DI – Glow Plug & SI

## Accensione con candeletta

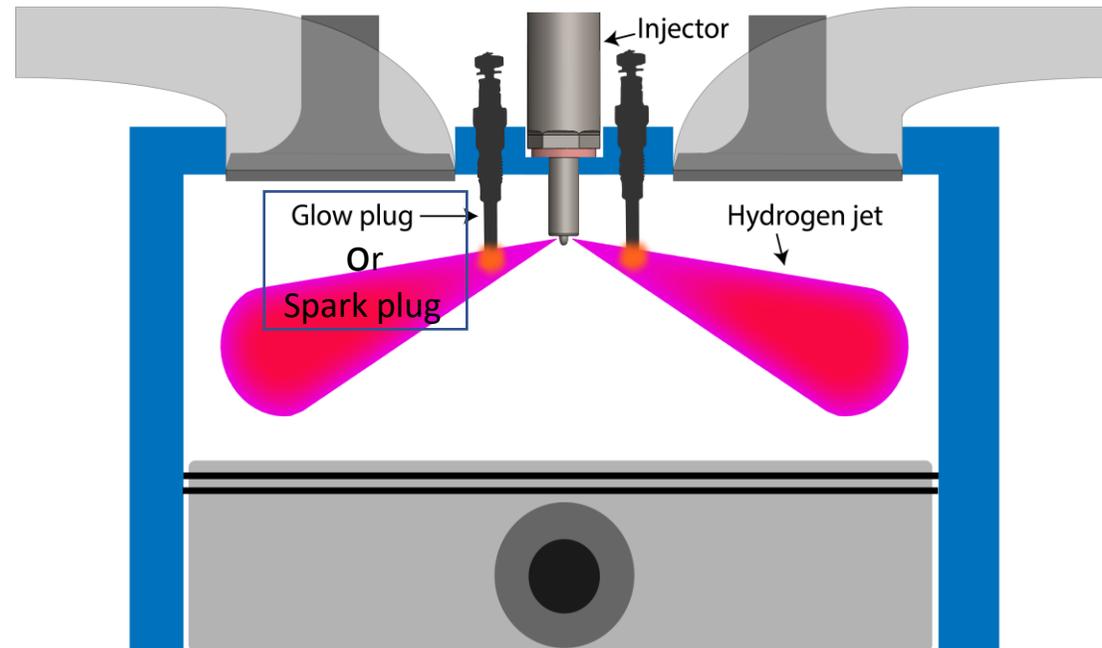
- ✓ Combustione stabile
- ✓ Problemi di durata delle candelette

## Accensione con candela

- ✓ Tecnologia consolidata

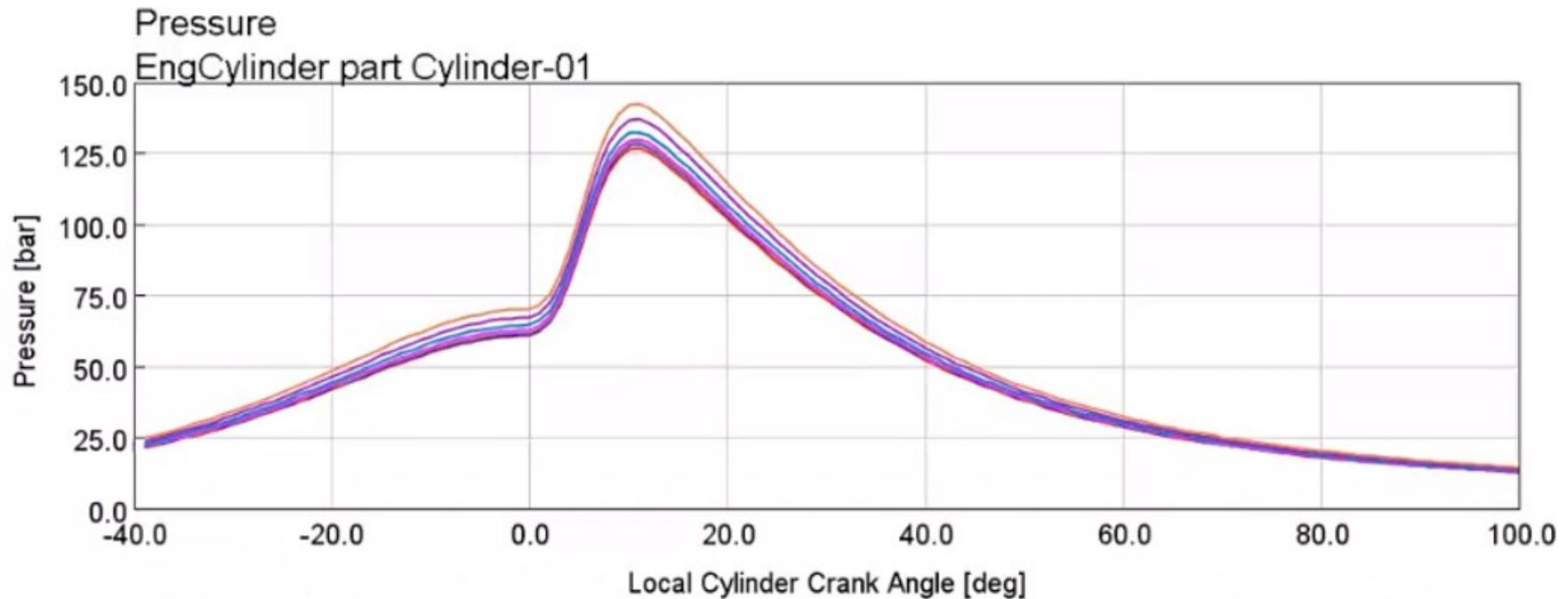
## Impiego di cariche stratificate

- ✓ Possibilità di contenere lo scambio termico
- ✓ Possibilità di gestire tempi di iniezione e di accensione per minimizzare gli Nox

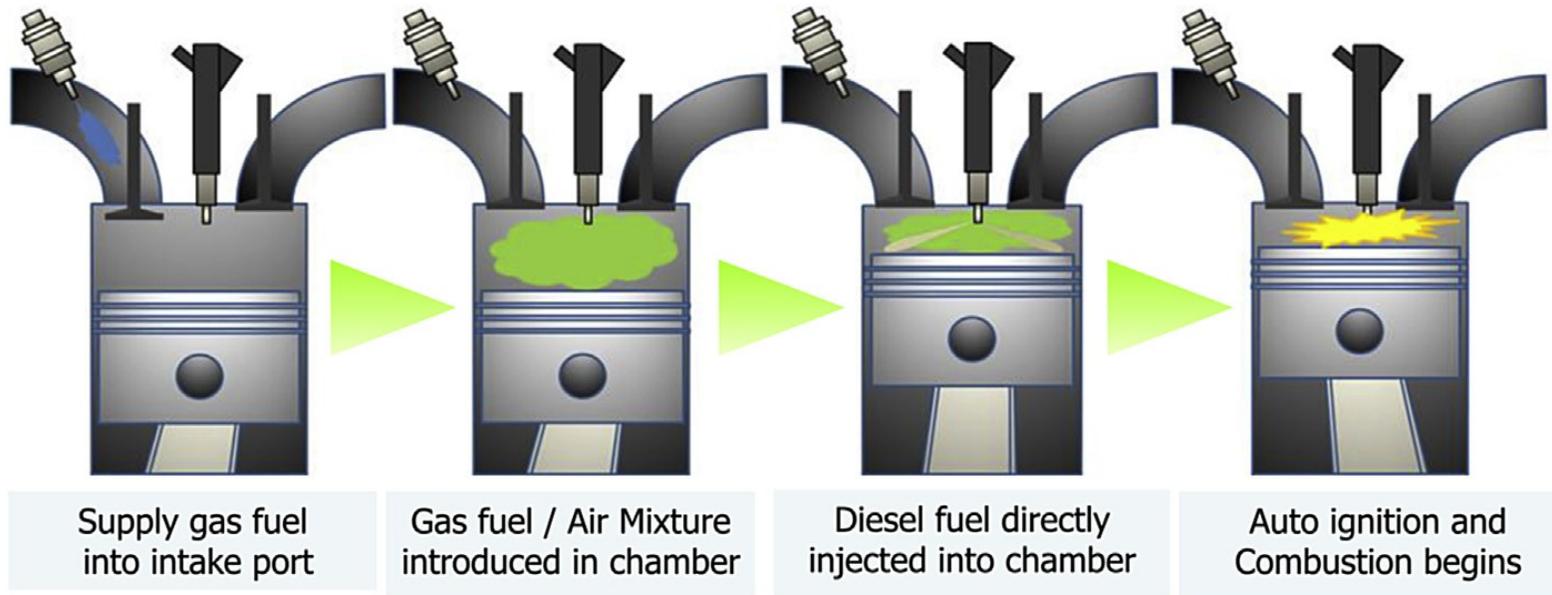


# Impiego di H2 puro

- H2-DI – Turbocharged engine
  - $\lambda=2$
  - 10-90 in circa 7°

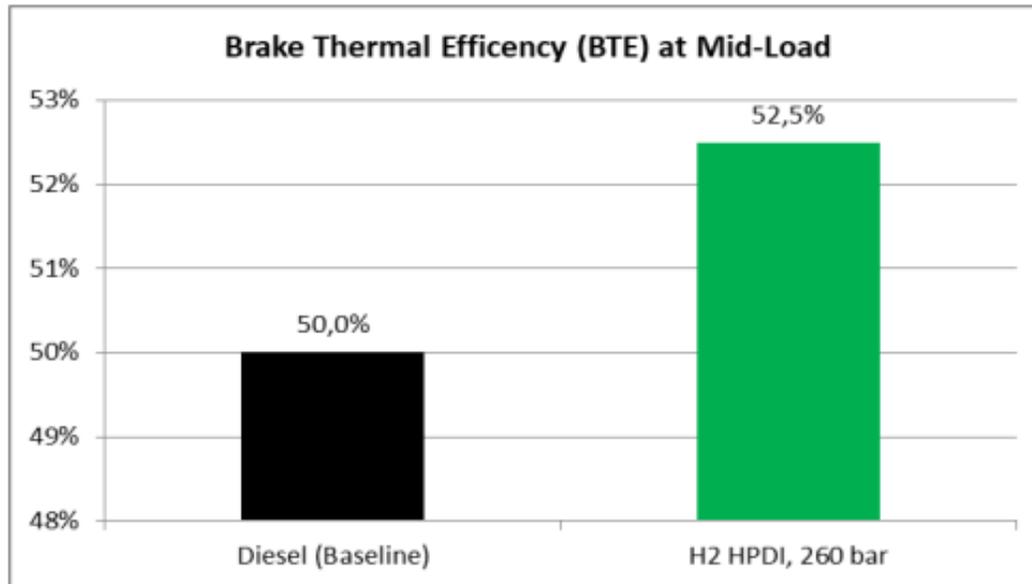


# Dual Fuel H2-Diesel

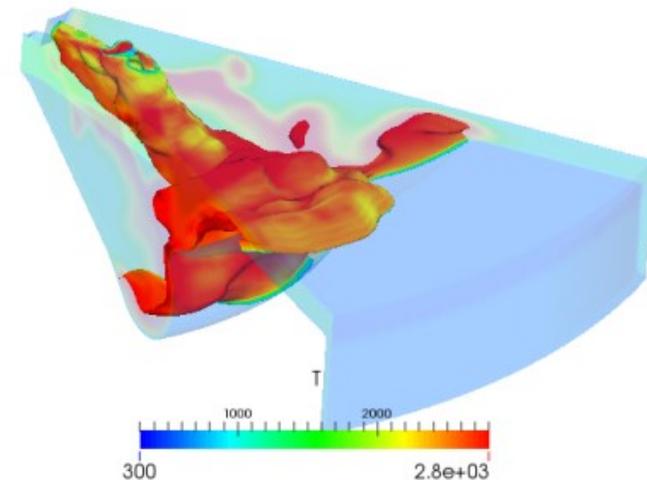


- Soluzione realistica per decarbonizzare gli attuali cogeneratori Diesel

# Dual Fuel H2-Diesel



H2 HPDI at Mid-Load Condition,  
Stoichiometric Surface of Fully Ignited  
H2 Jet at 8 Degrees after Top Dead Center

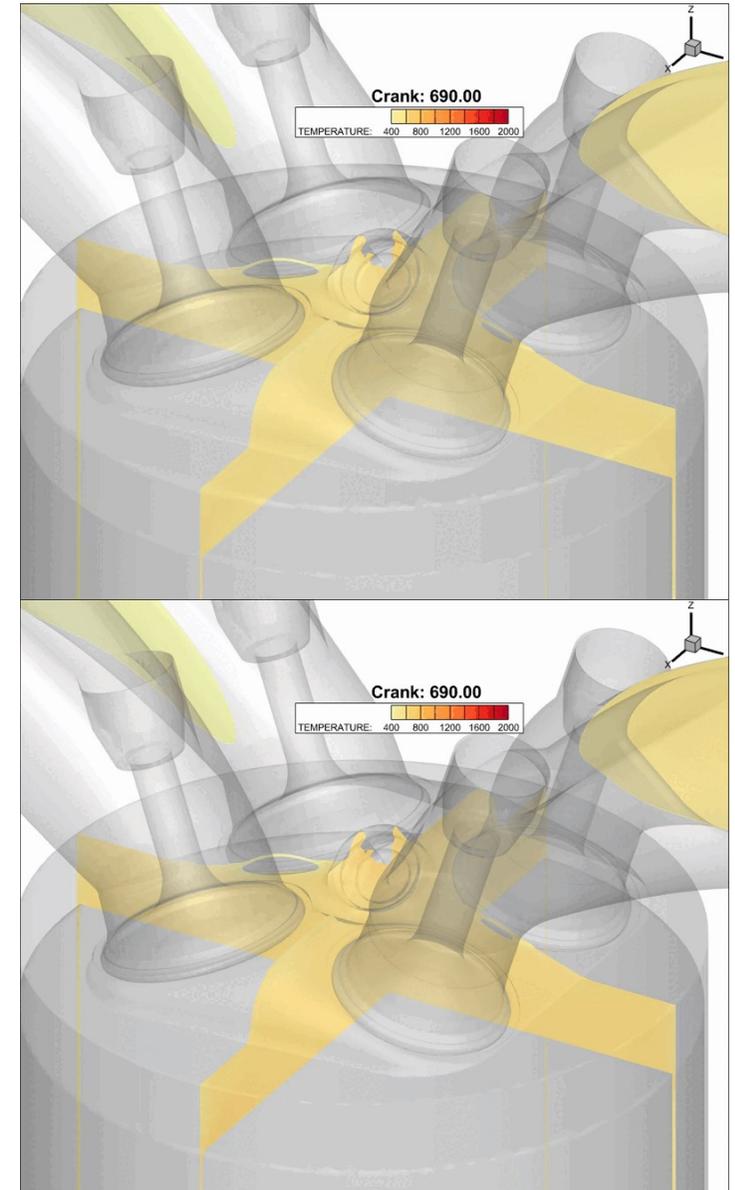
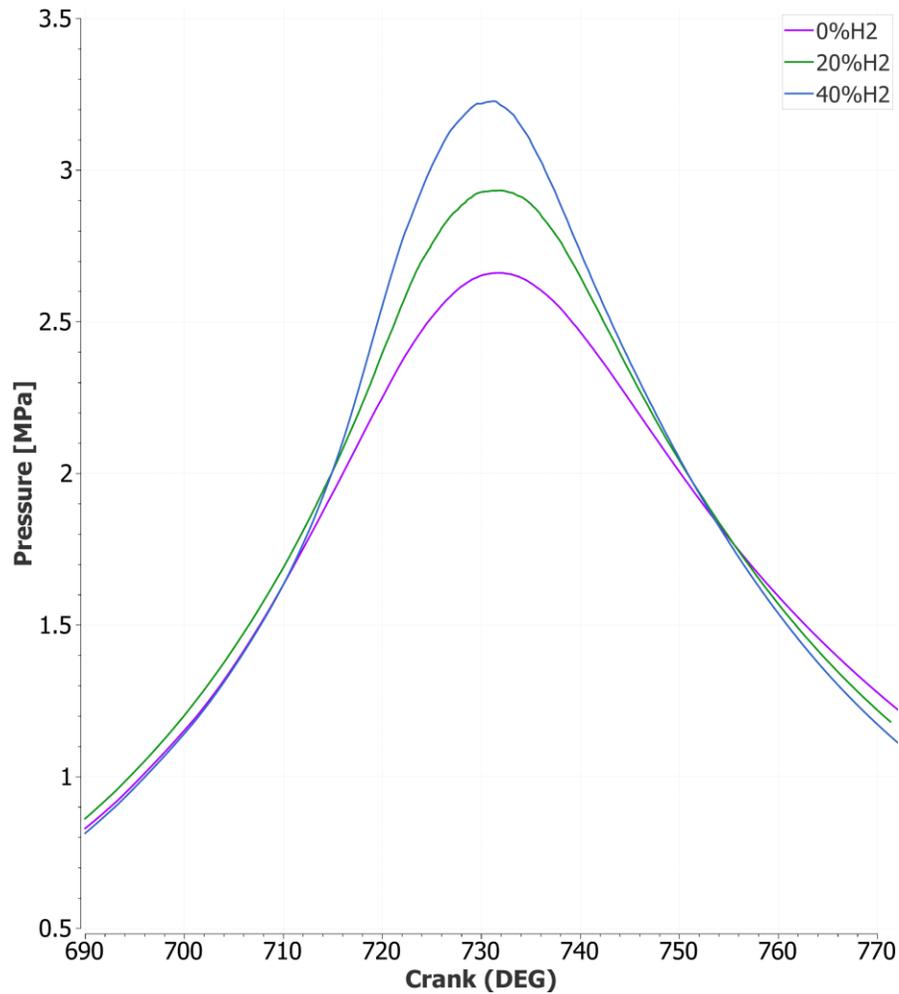


Crank Angle: 8 Degrees After Top Dead Center

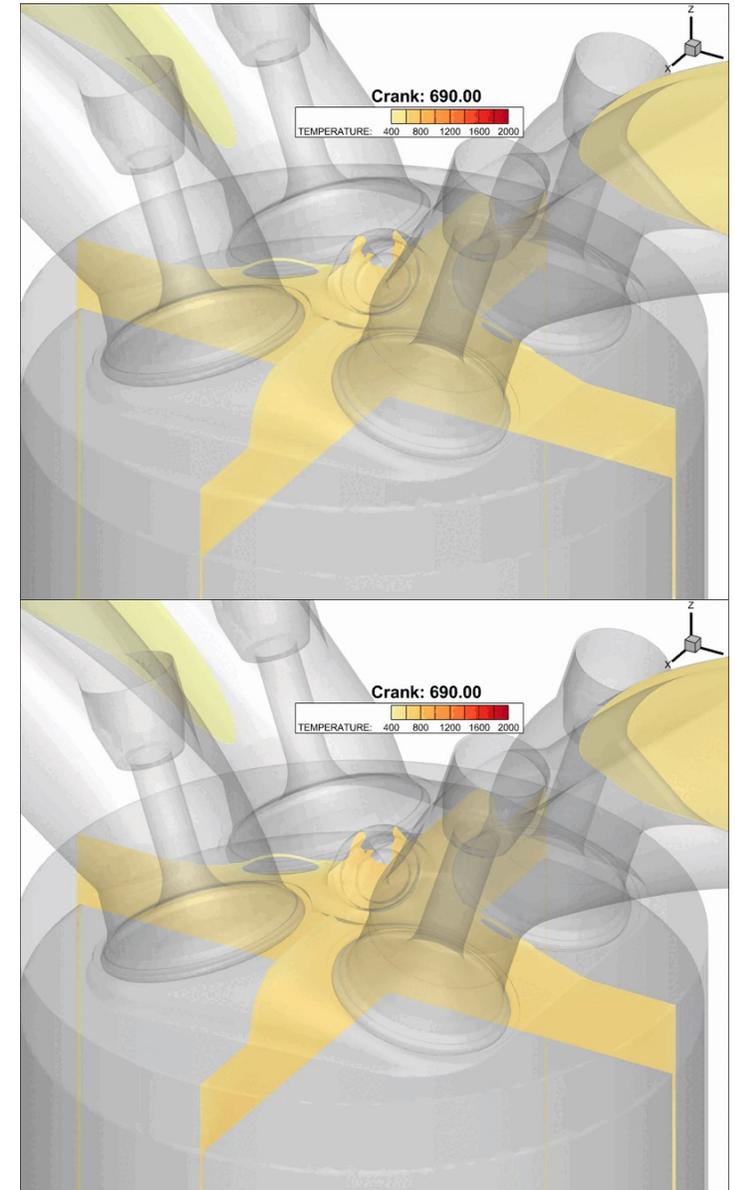
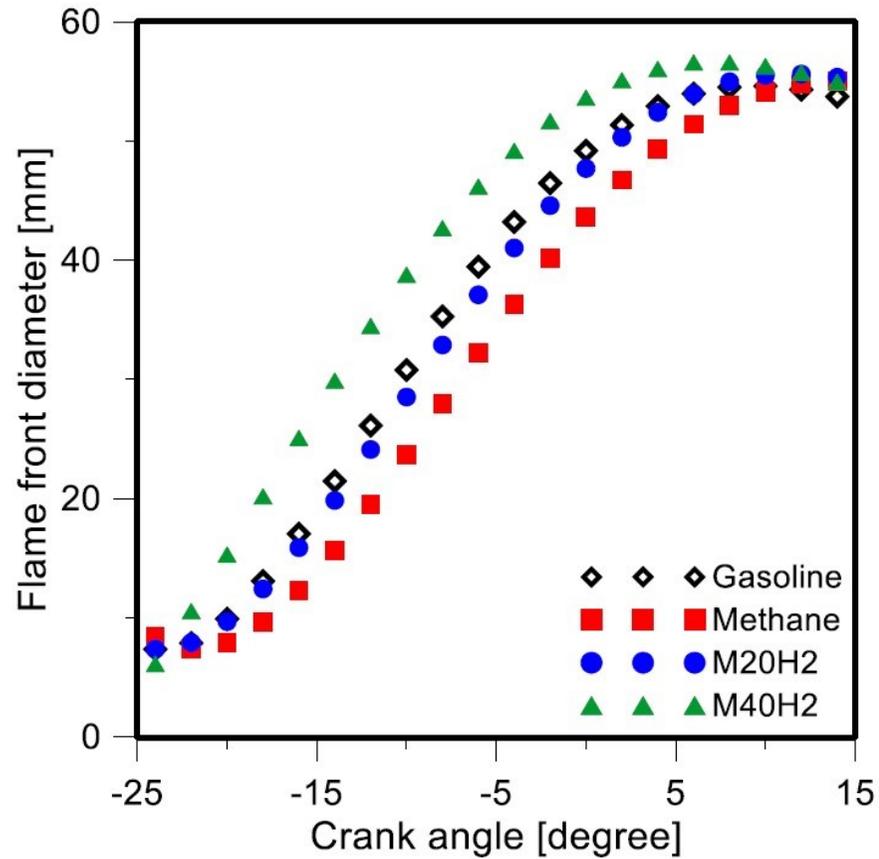
Figure.2 Brake Thermal Efficiency at mid-load condition.

- Soluzione Westport: iniezione coassiale di gasolio (pilot) e H2

# Miscela CH<sub>4</sub>-H<sub>2</sub> (PFI)



# Miscela CH<sub>4</sub>-H<sub>2</sub> (PFI)

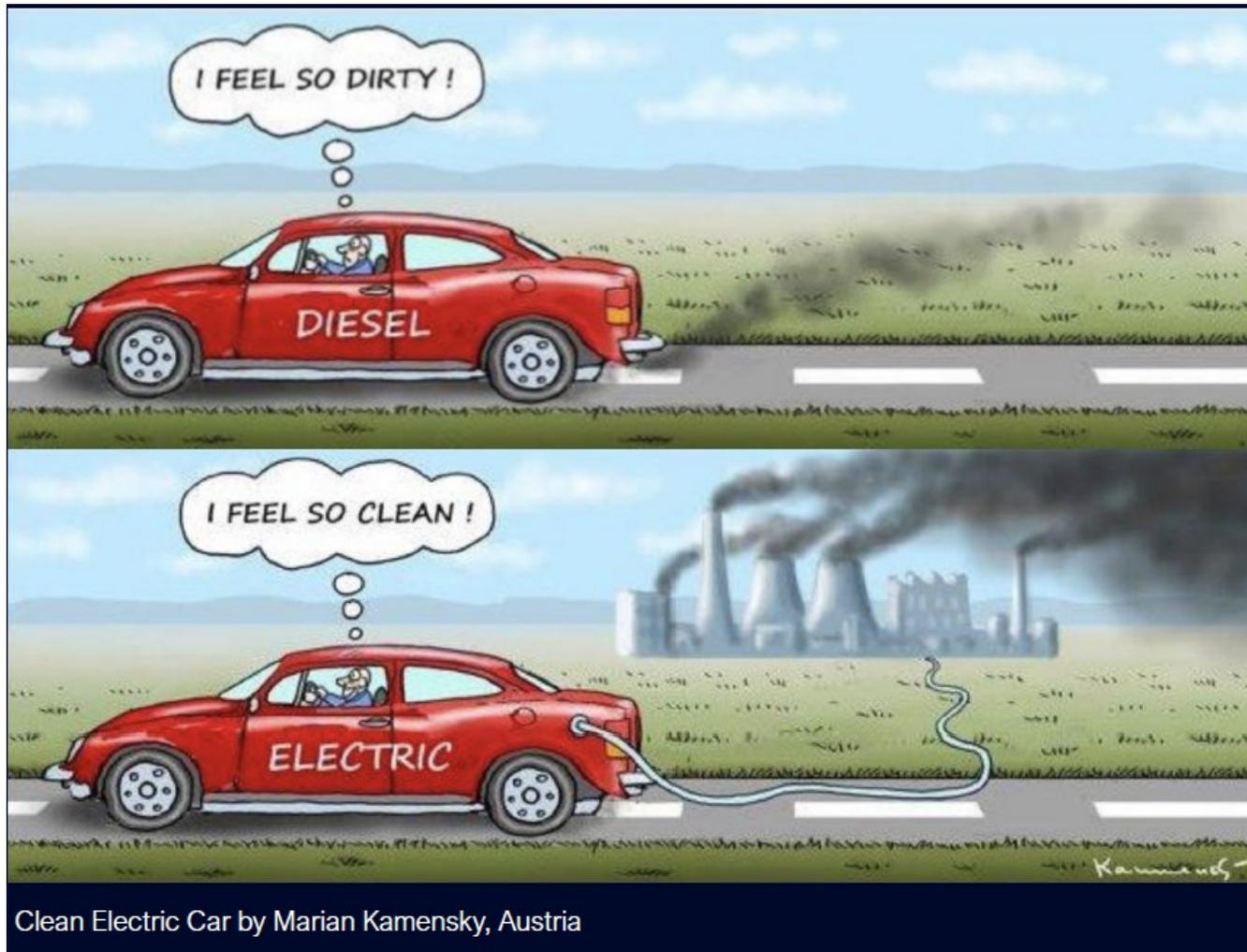


# Conclusioni

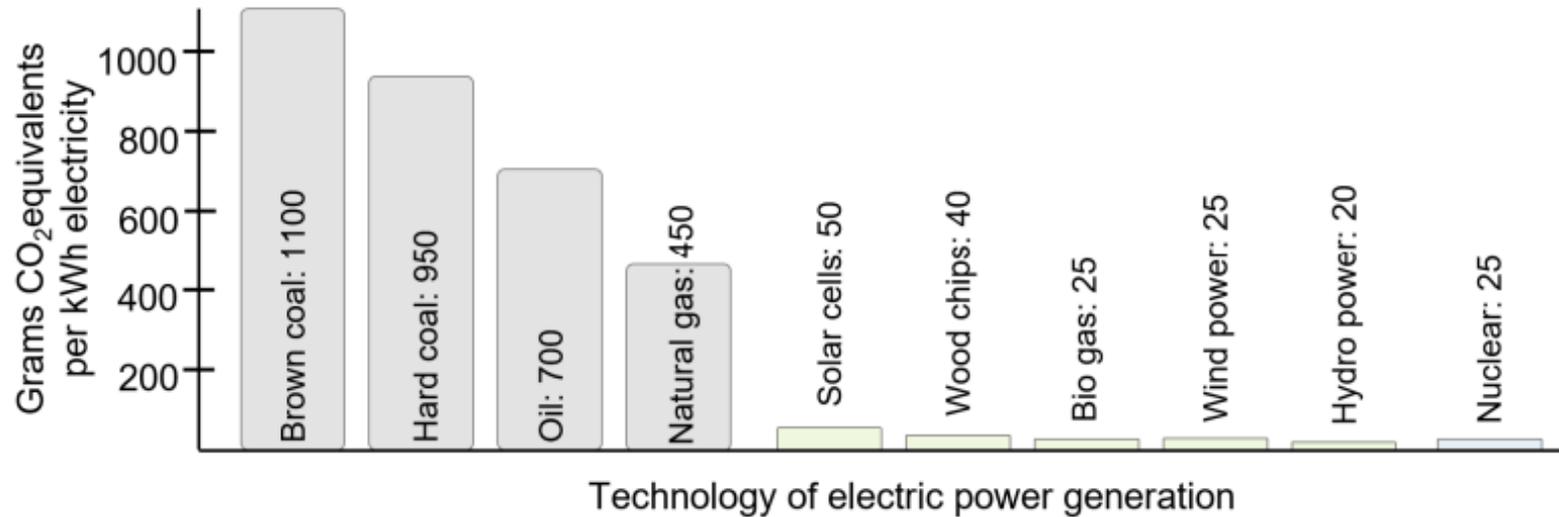
- **Potenzialità migliorative**
  - Possibile strada verso la decarbonizzazione
    - In dipendenza dalla produzione del vettore H<sub>2</sub>
  - Incremento di efficienza di conversione
    - Incremento della rapidità del processo di combustione
  - Limitazione delle emissioni inquinanti regolamentate
    - HC, CO, Soot
  - Possibili applicazioni «immediate»
    - Idrometano
- **Criticità**
  - Emissioni di NO<sub>x</sub>
    - margini possibili grazie all'impiego di miscele magre
    - Impiego di sistemi di post-trattamento tipo Diesel (SCR)
  - Stoccaggio
    - Particolarmente se impiegati sistemi a iniezione diretta (P>100 bar)
  - Pericolosità
    - Problemi di backfire in applicazioni PFI

# 14 giugno 2022 – Comunità Europea

- Approvazione di un pacchetto di misure ambientali
  - Dal 2035 in poi stop alla vendita di auto che emettano CO2
- Le soluzioni tecnicamente compatibili appaiono essere
  - Propulsione elettrica
  - Propulsione ad idrogeno



From Kelly Senecal (Converge) presentation (June 2022, SAE congress, PoliTo)



Mario Hirz, Thu Trang Nguyen 2022

“Life-Cycle CO<sub>2</sub>-Equivalent Emissions of Cars Driven by Conventional and Electric Propulsion Systems”

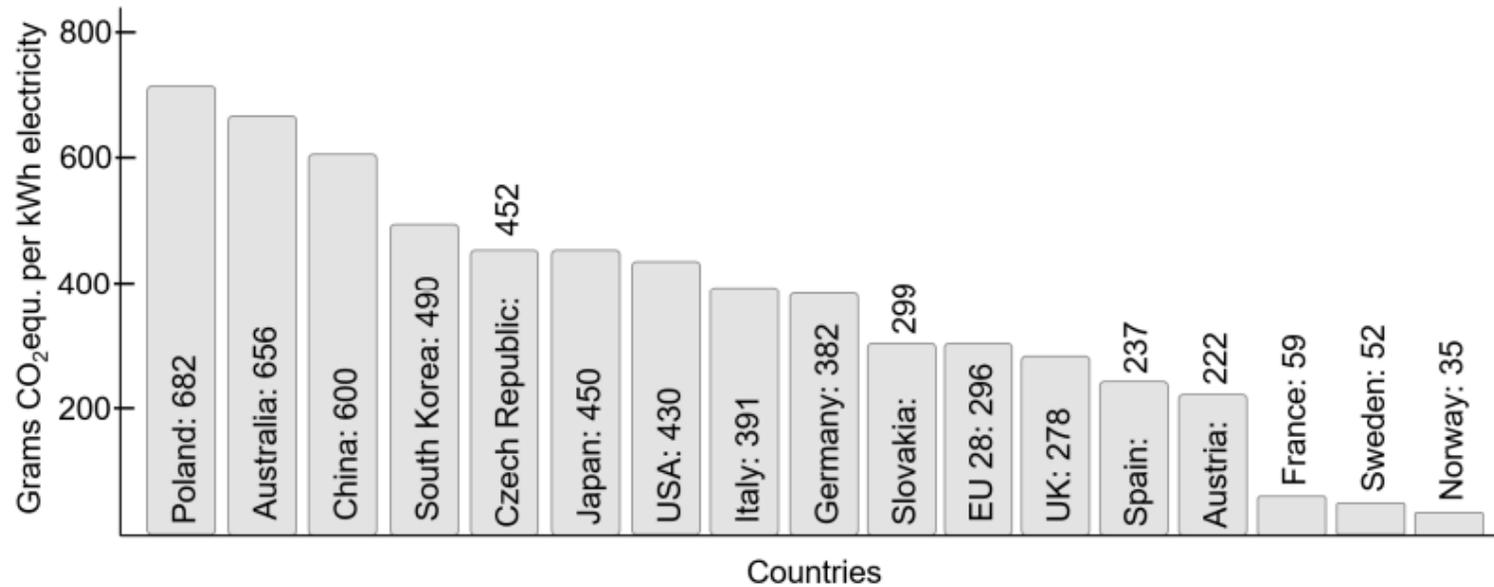
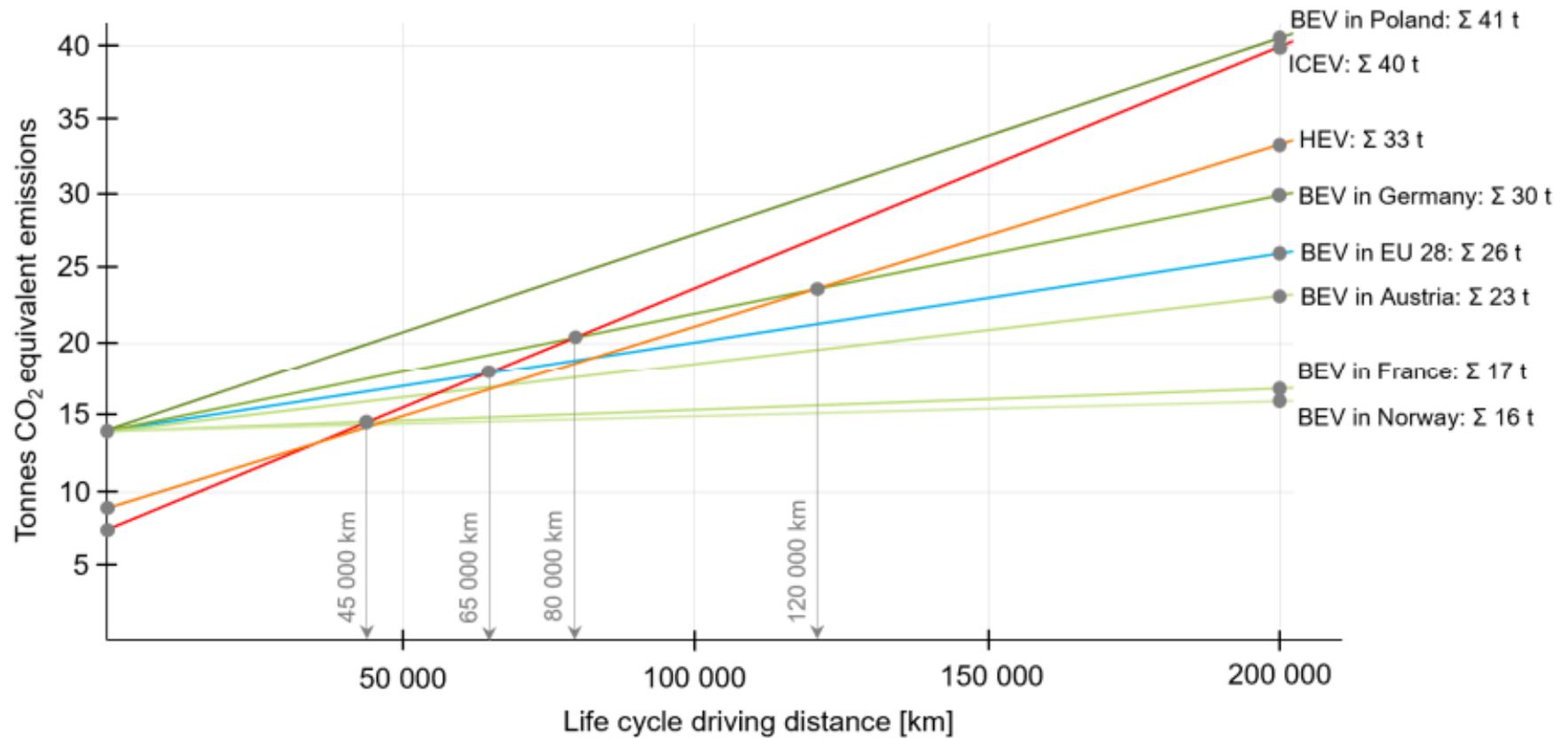


Figure 4. CO<sub>2</sub>-equivalent-emission intensity of electricity production in selected countries

Mario Hirz, Thu Trang Nguyen 2022

“Life-Cycle CO<sub>2</sub>-Equivalent Emissions of Cars Driven by Conventional and Electric Propulsion Systems”

# L'analisi LCA sensata ... ma non ancora «normata»



Mario Hirz, Thu Trang Nguyen 2022

“Life-Cycle CO<sub>2</sub>-Equivalent Emissions of Cars Driven by Conventional and Electric Propulsion Systems”

# La neutralità (questa sconosciuta)

- La legislazione e i regolamenti (ovvero la politica) dovrebbero seguire un approccio **tecnologicamente neutrale**
  - **Indicare gli obiettivi ...**
  - **... non le tecnologie per conseguirli**
- Analisi limitata al tank-to-wheel
- Il problema non è il motore ma il combustibile!
  - Bio-fuels
  - E-fuels
  - Hydrogen
  - Ammonia



Centro d'iniziativa per i MOtori, VEicoli e Tecnologie

## Il ruolo dell'idrogeno nella transizione tecnologica ed ecologica dell'energia

7 luglio 2022

# L'impiego dell'Idrogeno nei Motori a Combustione Interna



UNIVERSITÀ  
DEGLI STUDI  
FIRENZE

**DIEF**  
DIPARTIMENTO  
DI INGEGNERIA  
INDUSTRIALE

**Giovanni Ferrara**

*Dipartimento di Ingegneria Industriale  
Università degli Studi di Firenze*

[giovanni.ferrara@unifi.it](mailto:giovanni.ferrara@unifi.it)