



TECHNOLOGIE OCHRANY OVZDUŠÍ

Přednáška č. 11

- Přednášející: Ing. Marek Staf, Ph.D.

tel. 220 444 458; e-mail marek.staf@vscht.cz

budova A, ústav 216, č. dveří 162

Osnova přednášky



- Vznik a historie silničních vozidel
- Základní údaje o automobilové dopravě
- Princip funkce zážehového motoru
- Princip funkce vznětového motoru
- Automobilová paliva a jejich environmentální aspekty
- Přehled emisí z motorů s vnitřním spalováním
- Technologie BEV

Často používané zkratky



- ECU Engine Control Unit (řídící jednotka motoru)
- DPF Diesel Particulate Filter (filtr pevných částic)
- DPS Differential Position Sensor (snímač tlakové difference)
- SCR Selective Catalytic Reduction (selektivní katalytická redukce)
- EGR Exhaust Gas Recirculation (recirkulace výfukových plynů)
- VGT Variable Geometry Turbocharger (Turbodmychadlo s proměnnou geometrií)
- SI engine Spark-Ignition engine (Zážehový motor)
- CI engine Compression-Ignition engine (Vznětový motor)
- MEŘO Methyl ester řepkového oleje, nebo FAME z anglického Fatty acid methyl ester

Často používané zkratky



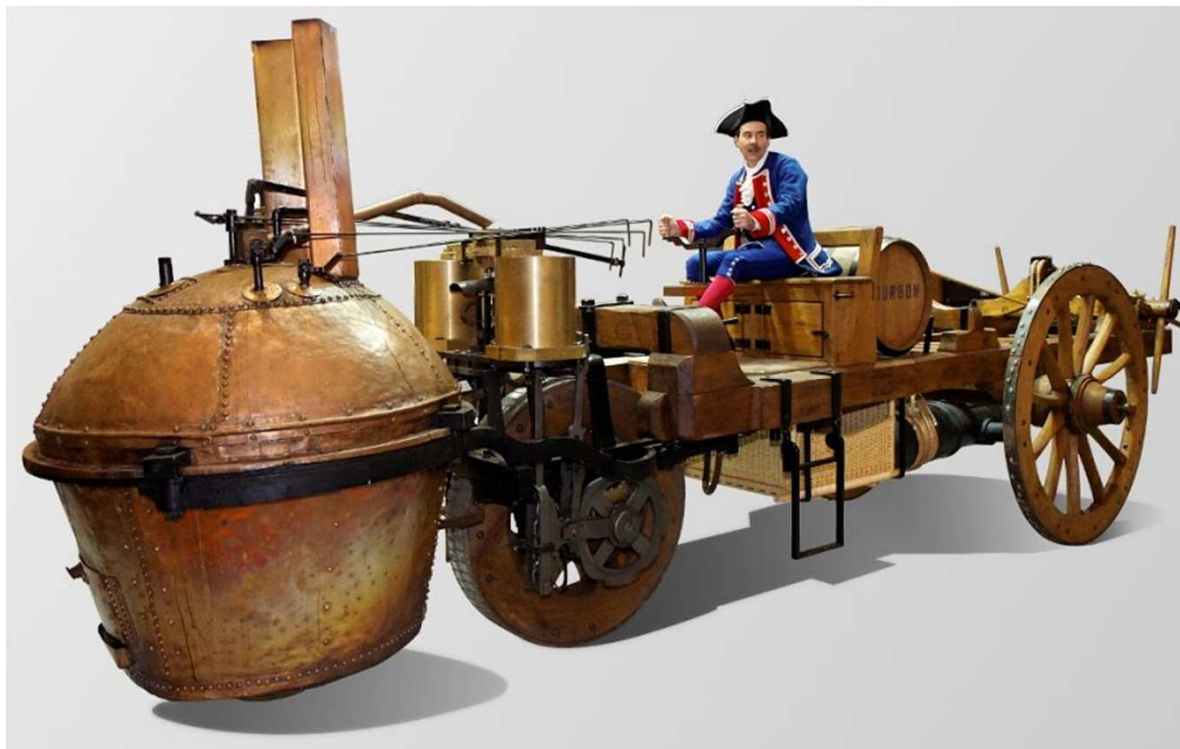
- FAME Fatty Acid Methyl Ester (synonymum MEŘO)
- AUS Aqueous Urea Solution (vodný roztok močoviny)
- DEF Diesel Exhaust Fluid (Aditivum pro SCR systémy v USA)

Počátky motorové silniční dopravy



- **Nicolas Joseph Cugnot: fardier à vapeur (1770)**

- Hmotnost 2,5 t, užitečné zatížení 4 t, max. rychlost 9 km.h⁻¹
- Pohon sytou párou, kotel nevybaven přehřívákem
- Tříkolové provedení vyhodnoceno armádou jako nestabilní

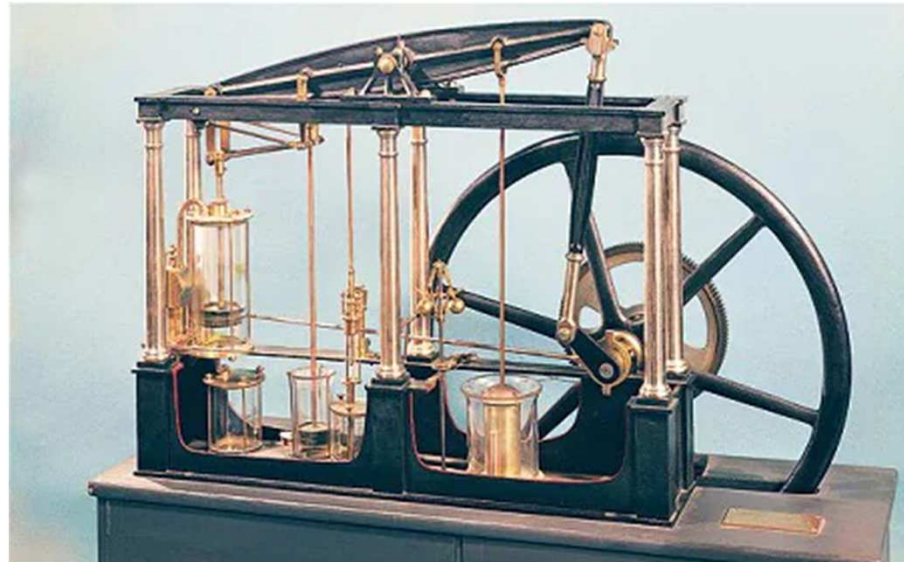
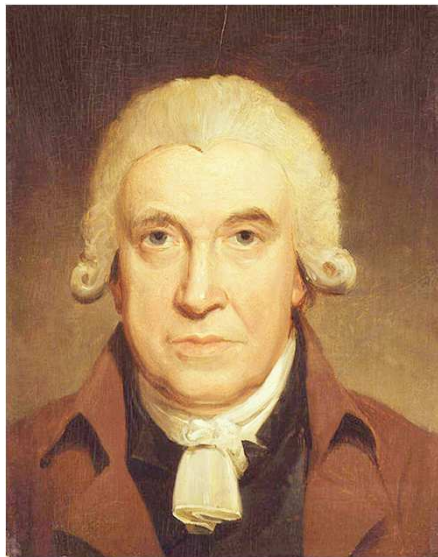


Zdroj foto: http://www.remarkablecars.com/wiki/index.php/1770_Cugnot_Fardier

Počátky motorové silniční dopravy



- **Následujících 100 let (1780 - 1880) velmi pomalý rozvoj**
 - V podstatě jen zdokonalování parního stroje
 - James Watt (1736 – 1819):
 - 1763 – zahájil vylepšování Newcomenova stroje
 - 1769 – patentoval oddělený kondenzátor (zvýšil účinnost)
 - do r. 1800 – vyrobeno jen cca 500 strojů (textilky, železárny, mlýny)
 - 1800 – expirace patentu ⇒ noví výrobci na trhu



Počátky motorové silniční dopravy



- **Následujících 100 let (1780 - 1880) velmi pomalý rozvoj**
 - Pozvolné zvyšování účinnosti z 5 na cca 12 %
 - Parní vozy drahé a nepraktické (plašení koní, nebezpečný provoz)
 - 1865 “Red flag act” 4 mph na venkově / 2 mph ve městě + pěší doprovod s červeným praporkem



Trevithick: “The puffing devil” (1801)



Baffrey: parní automobil (1886)

Počátky motorové silniční dopravy



- **Karl Benz: motorová tříkolka, říšský patent č. 37435a (1886)**
 - Motor upravený čtyřdobý Ottův (patent z r. 1877), výkon 0,66 kW při 400 rpm, obsah 954 cm³, reálná rychlost 11 km.h⁻¹, max. 16 km.h⁻¹



Nicolaus Otto



Karl Benz

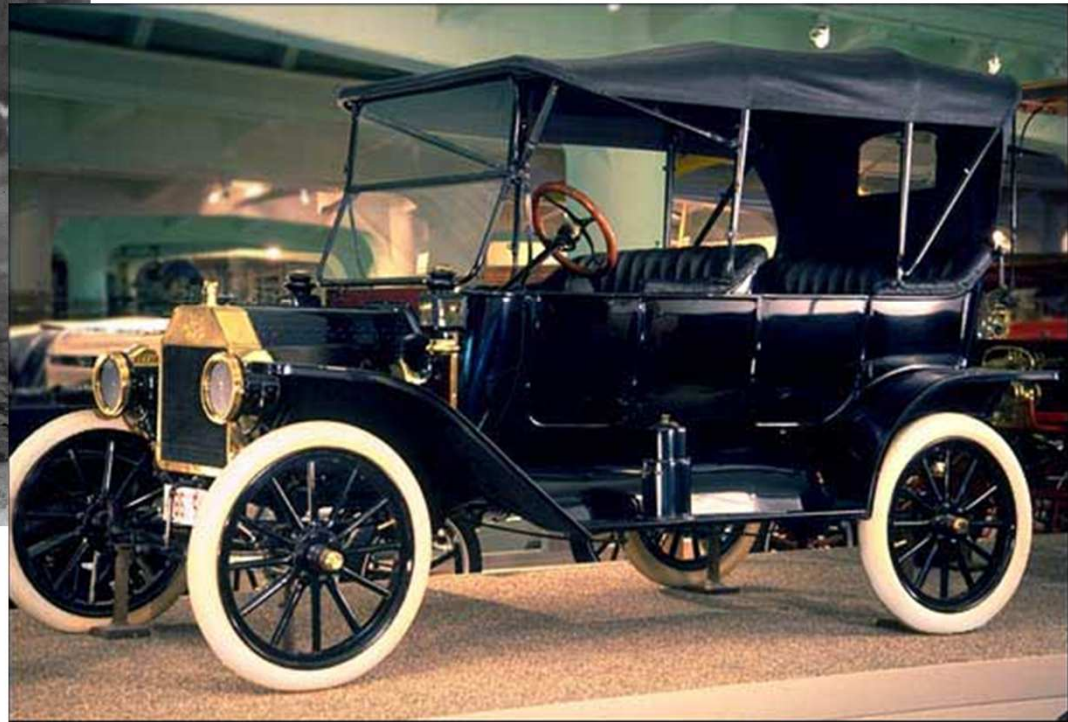


Zdroje foto: <http://veteran.auto.cz/clanek/321/benz-patent-motorwagen-1885-1886-automobilu-je-125-let>

Počátky motorové silniční dopravy



- **Průkopník světové motorizace – Henry Ford**
 - První sériový vůz modelu T: 27. 9. 1908 v Piquette Plant v Detroitu
 - od r. 1914 masová výroba až cca 300 000 vozů/rok



Zdroj foto: <https://g.cz/galerie/dedecek-automobil-slavi/?back=/budvar-fordt/&img=2>

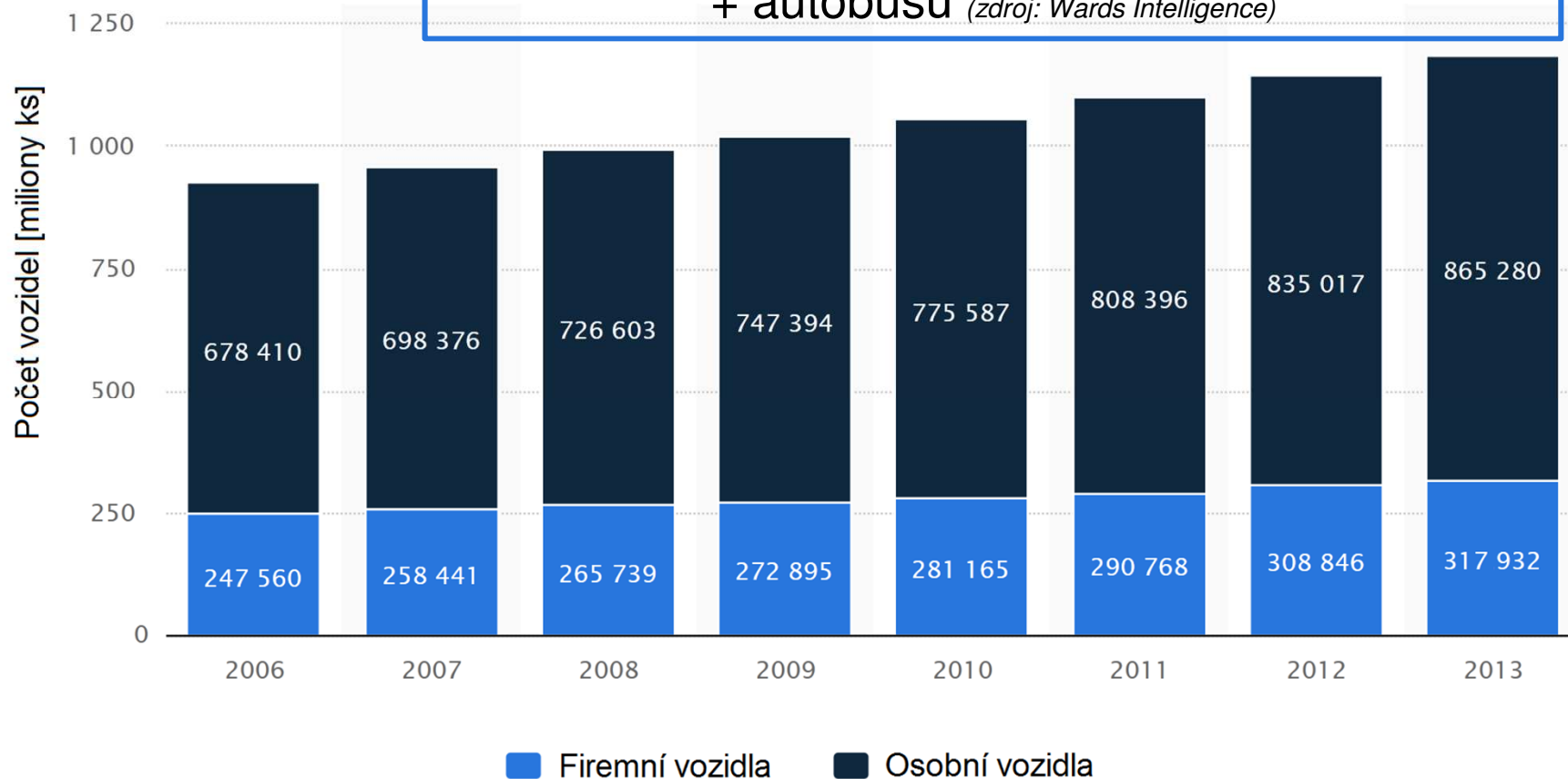
Údaje o pozemní dopravě



Počet registrovaných motorových vozidel ve světě

(Zdroj: www.statista.com)

Rok 2016: $1,32 \cdot 10^9$ osobních a nákladních vozidel
+ autobusů (zdroj: *Wards Intelligence*)



Aktuálně používané zdroje energie



■ Spalovací motory

– Zážehové

Benzin 95, 98 nebo 100 oktanů

Ethanol E85 s obsahem 70 – 85 % dle ročního období

Stlačený zemní plyn = Compressed Natural Gas (CNG)

Zkapalněný propan-butan = Liquefied Petroleum Gas (LPG)

v zimě 40 % butanu a v létě 60 % butanu

– Vznětové

Motorová nafta

Směsná motorová nafta SMN 30 s obsahem MEŘO 31 %

■ Hybridní pohon (spalovací motor + elektromotor)

– MHEV Mild Hybrid Electric Vehicle

– HEV „klasické“ Hybrid Electric Vehicle

– PHEV Plug-in Hybrid Electric Vehicle

■ Elektrický pohon (BEV – Battery Electric Vehicle nebo FCBEV – Fuel Cell Battery Electric Vehicle)

Obsah biosložky v palivu



■ Benzin

- Do roku 2023 povinnost výrobců PHM přidávat v ročním součtu min. 4,1 % ethanolu až do 5 % (tzv. benzin E5)
- 27. dubna 2022 novela Zákona o ochraně ovzduší 201/2012 Sb. mění §19 a uvedenou povinnost ruší
- ALE! definována povinnost snížit emise CO₂ o 6 % oproti r. 2010 ⇒ naopak zvýšení podílu ethanolu od r. 2024 na benzin E10

■ Motorová nafta

- Do roku 2023 povinnost výrobců PHM přidávat v ročním součtu min. 6,0 % MEŘO až do 7,0 % (tzv. nafta B7)
- od r. změna legislativy stejná viz výše

Rozdíly v hybridních pohonech



■ MHEV – Mild Hybrid Electric Vehicle

- hlavní pohonná jednotka = spalovací motor
- podpůrný systém sestává ze startér-generátoru s baterií
- startér-generátor nejčastěji připojen řemenicí (uložení energie z brždění motorem pro pozdější akceleraci)
- elektrický motor (cca 12 kW/ 45 V) není určen k pohonu vozu
- někdy elektrický motor pohání dmychadlo pomáhající turbu

■ HEV – „klasické“ Hybrid Electric Vehicle

- elektrická asistence při rozjezdu, zrychlení + krátká elektrická jízda
- neumožňuje externí nabíjení „ze zásuvky“
- varianty: rozjezd se spalovacím motorem (častěji), nebo elektricky

■ PHEV – Plug-in Hybrid Electric Vehicle

- dva plnohodnotné motory: elektrická jízda v řádu desítek km
- baterie nabíjena externě „ze zásuvky“ (bez dobití jen mrtvá zátěž)

Spal. motory klasické koncepce



■ Dvě hlavní konstrukce motorů s vnitřním spalováním

- Zážehové motory (spark-ignition engines, SI engines)
- Vznětové motory (compression-ignition engines, CI engines)

Rozdíl je ve způsobu zapálení vzducho-palivové směsi. ←

Princip zážehových motorů



Účinnost jen $\eta_{\text{Ottův cyklus}} = 25 - 38 \%$

- **Směs vzduchu a aerosolu paliva zapálena elektrickou jiskrou**
 - Nejstarší systém s karburátorem: aerosol tvořen průchodem vzduchu dýzou
 - Novější systém s nepřímým vstřikem paliva: benzin vstřikován mimo prostor válce do proudu vzduchu
 - Nejnovější systém s přímým vstřikem: benzin vstřikován do válce v počáteční fázi komprese
- **Poměr palivo/vzduch**
 - Staré karburátorové motory užívaly substechiometrický obsah vzduchu
 - Moderní pracují s koeficientem přebytku vzduchu $\lambda = 1 \pm 0,02$
- **Pracovní cyklus**
 - Většina automobilů užívá Ottův čtyřdobý cyklus
 - Historicky (před r. 1990) užíván i dvoudobý cyklus
 - Zejm. pro HEV výhodný Atkinsonův cyklus (účinnost \uparrow , výkon \downarrow)

Princip vznětových motorů



Účinnost jen $\eta_{\text{Diesel}} = 30 - 42 \%$

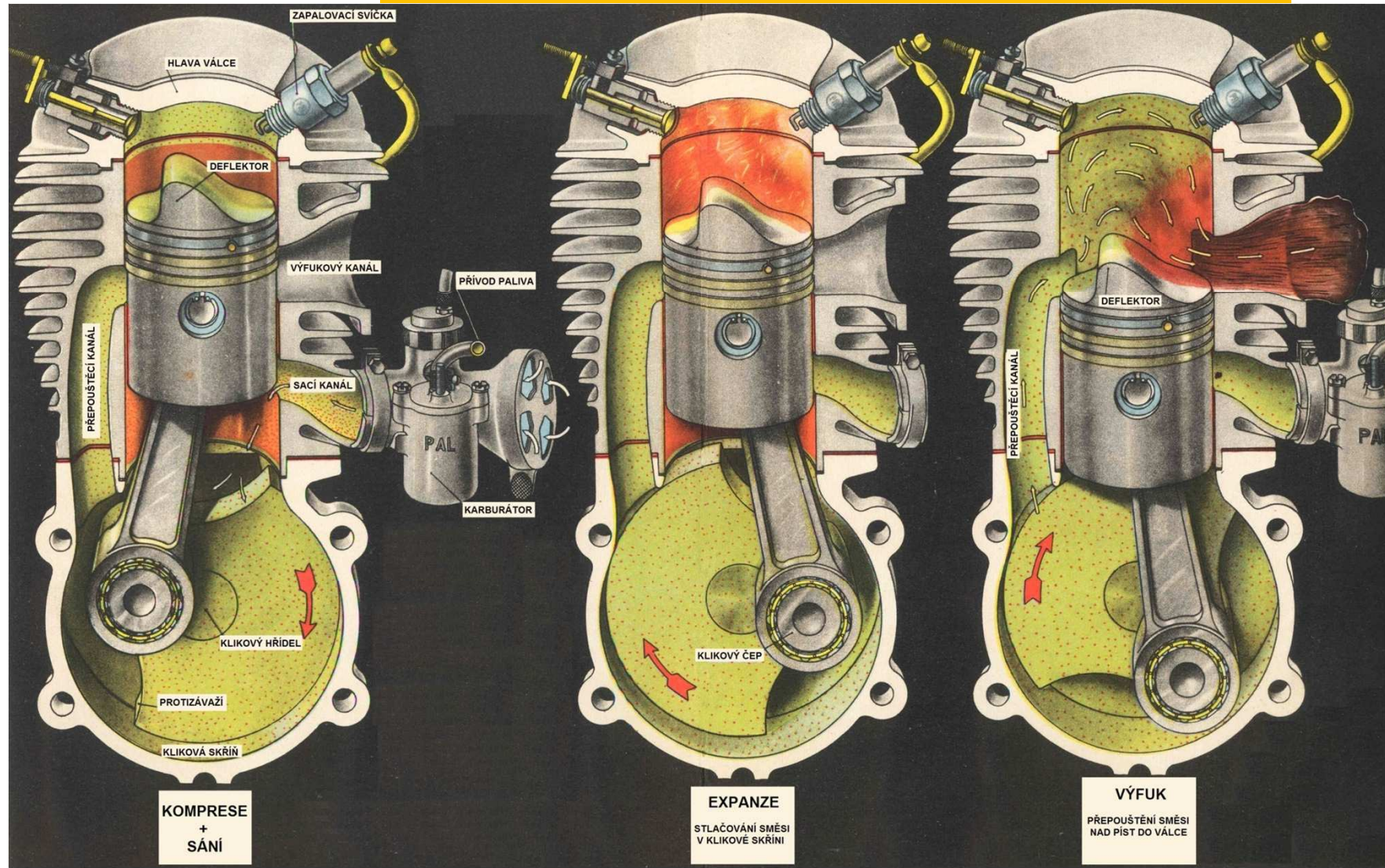
- V první fázi do válce přiveden pouze vzduch
- Po jeho adiabatické kompresi do válce nastříknuto palivo vysokotlakým čerpadlem a tryskou
 - Teplota stlačeného vzduchu 700 – 900 °C
 - Musí být nad mezí zápalnosti paliva (motorová nafta 320 – 380 °C)
- Koeficient přebytku vzduchu (vůči stechiometrii)
 - Atmosféricky plněné motory $\lambda = 1,3 - 1,4$ (nízký výkon)
 - Motory s turbodmychadlem $\lambda = 1,6 - 1,8$ (někdy až 2,0)
- Turbodmychadlo užívá zbytkový tlak spalin k tlakování spalovacího vzduchu.



Dvoudobý zážehový motor



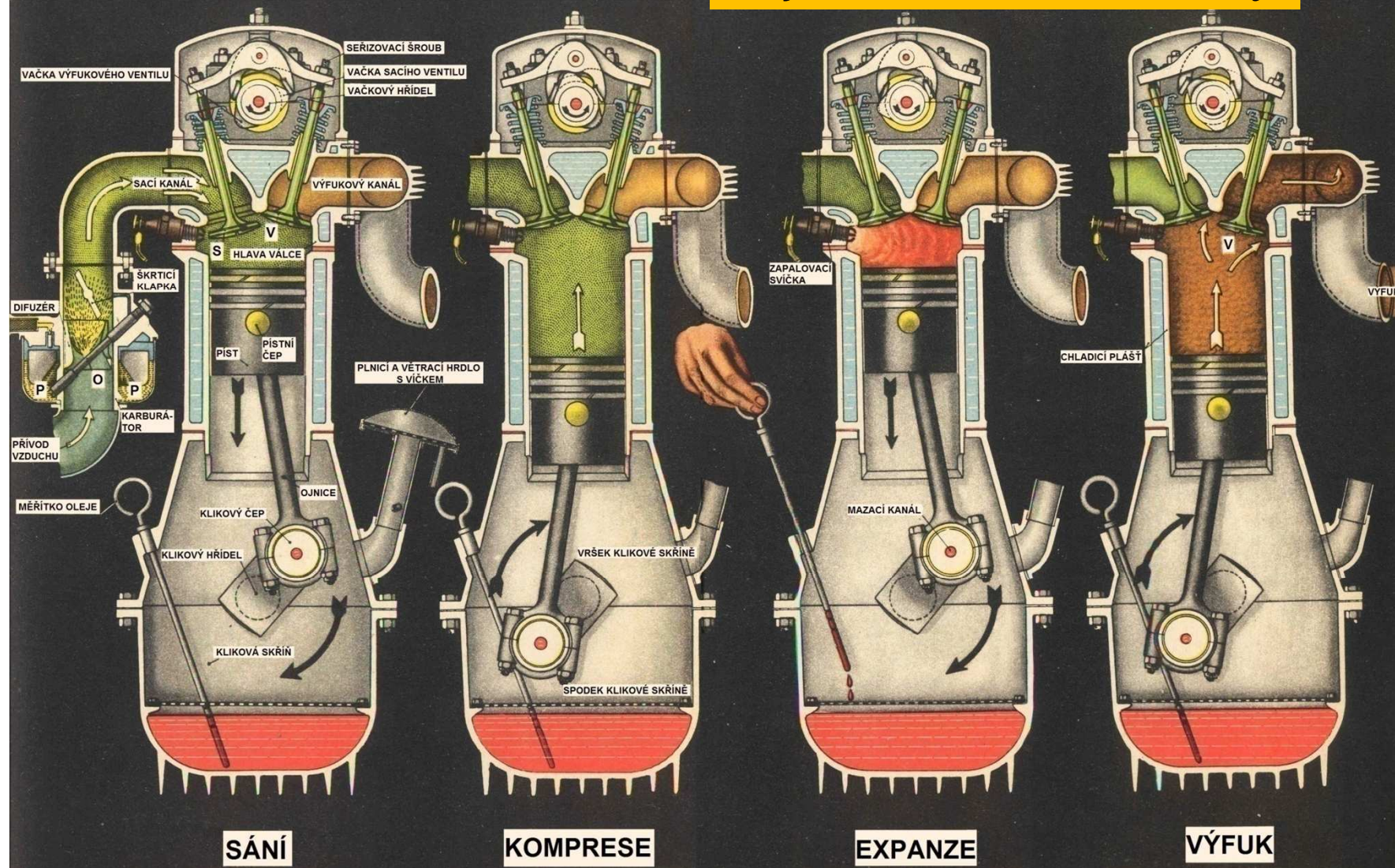
Některé motocykly a zahradní technika



Čtyřdobý zážehový motor



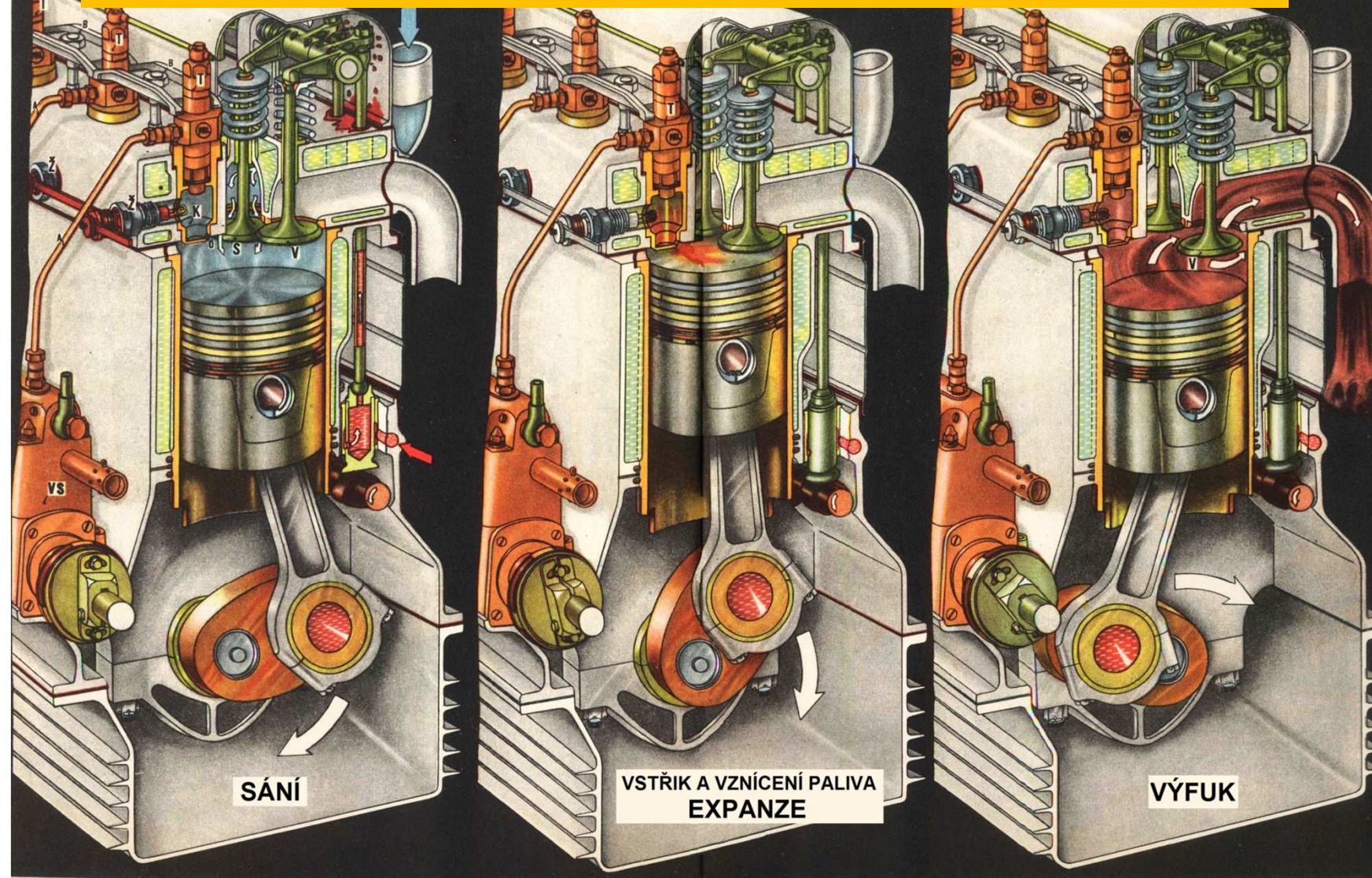
Zejm. osobní automobily



Čtyřdobý vznětový motor



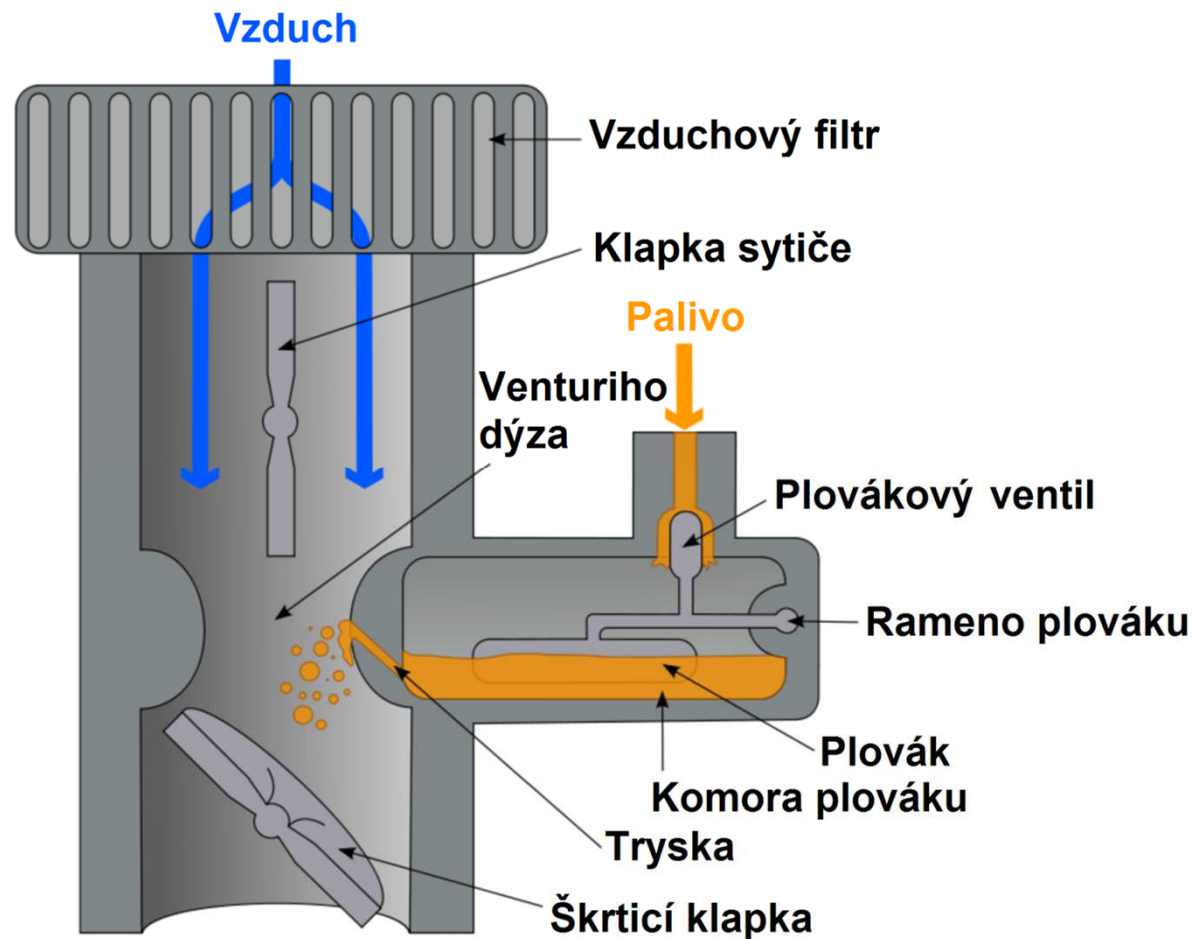
Osobní automobily, autobusy, nákladní automobily...



Konstrukce zážehových motorů



- **Karburátorový systém vzducho-palivové směsi** (Zdroj: K. Aainsqatsi)



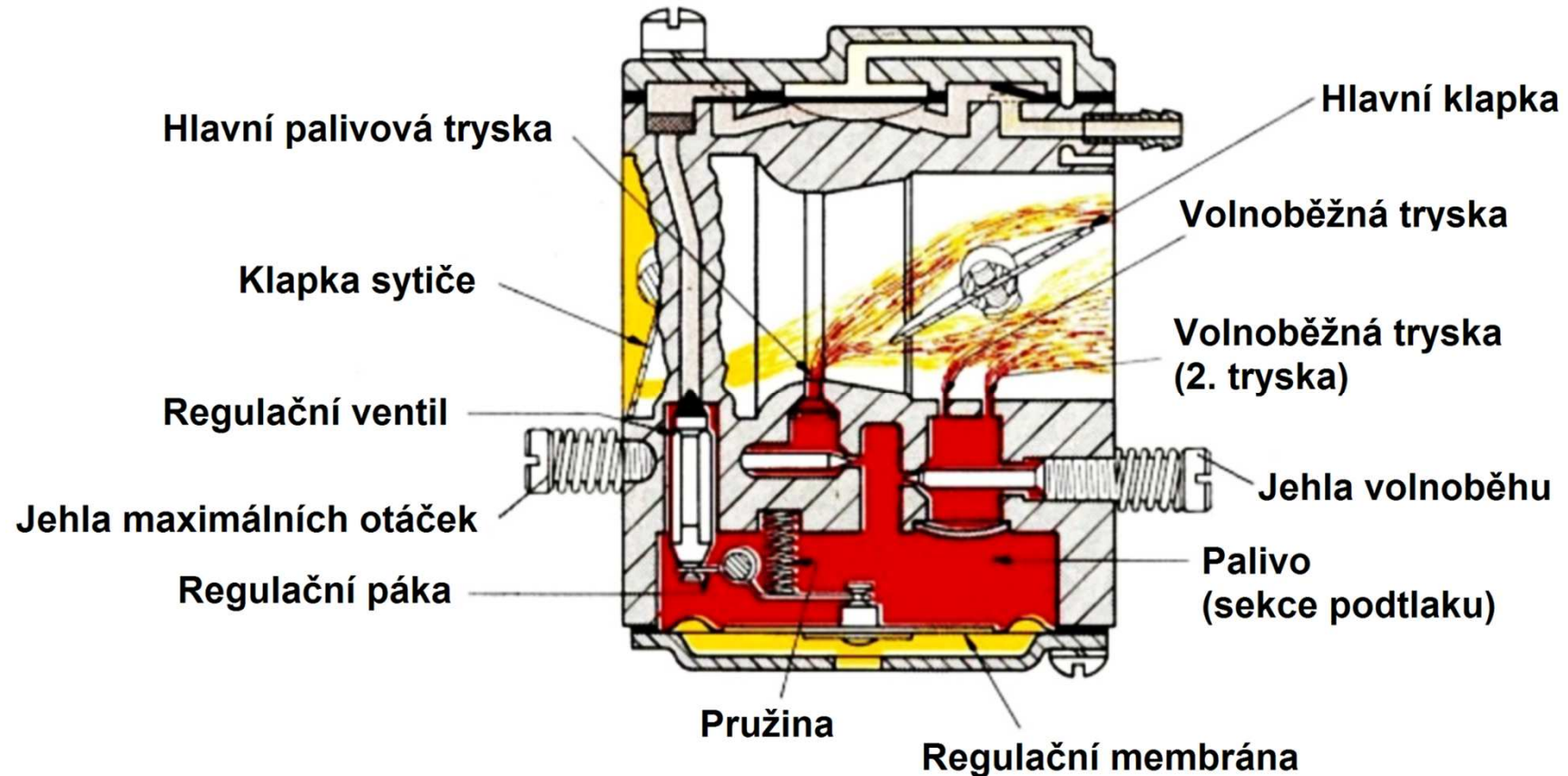
– Základní princip karburátoru

Konstrukce zážehových motorů



■ Karburátorový systém tvorby vzducho-palivové směsi

- Karburátor je starší systém přípravy směsi, bez lambda-regulace.

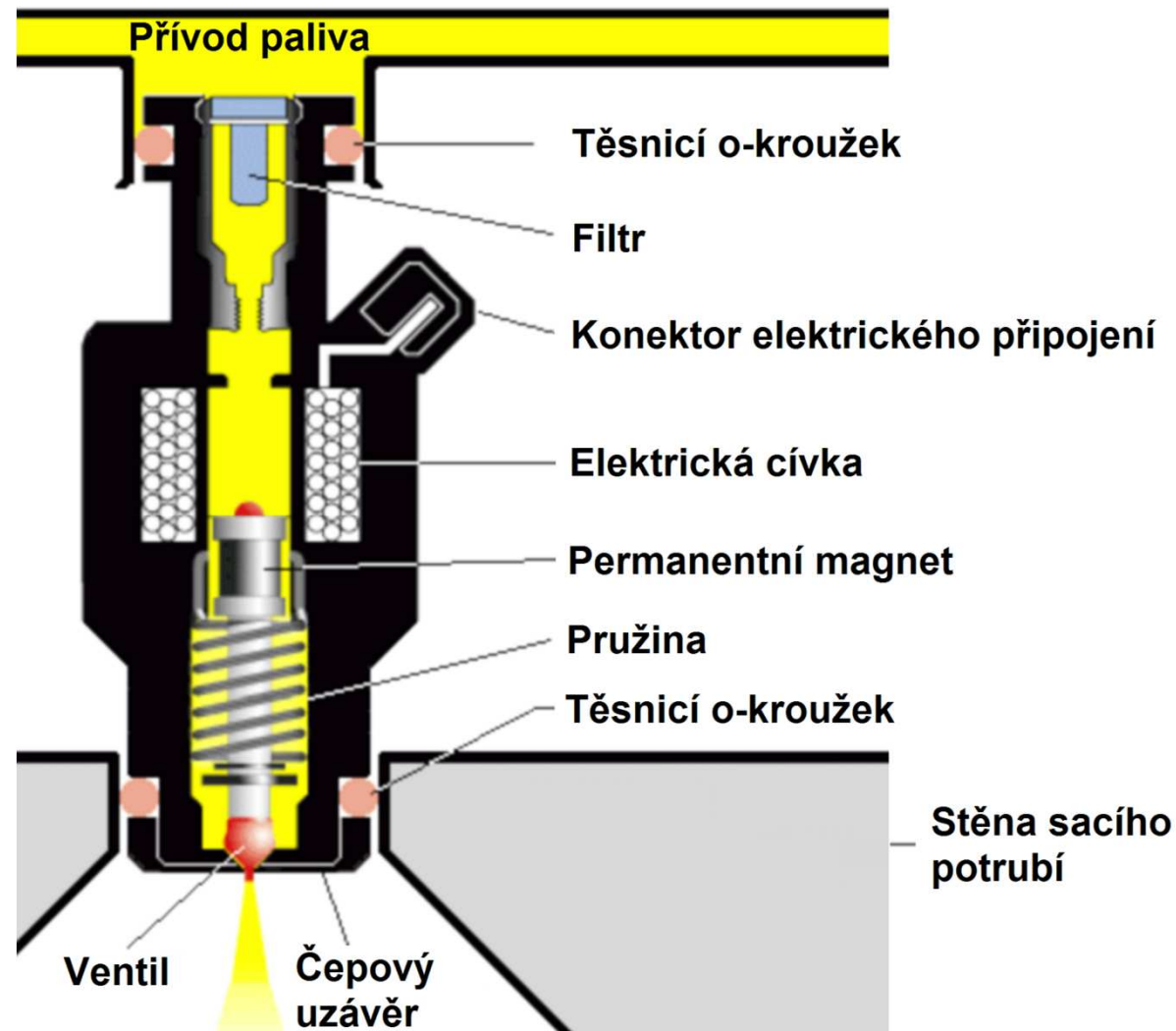


- Funkce karburátoru a sytiče (malý motocykl)

Konstrukce zážehových motorů



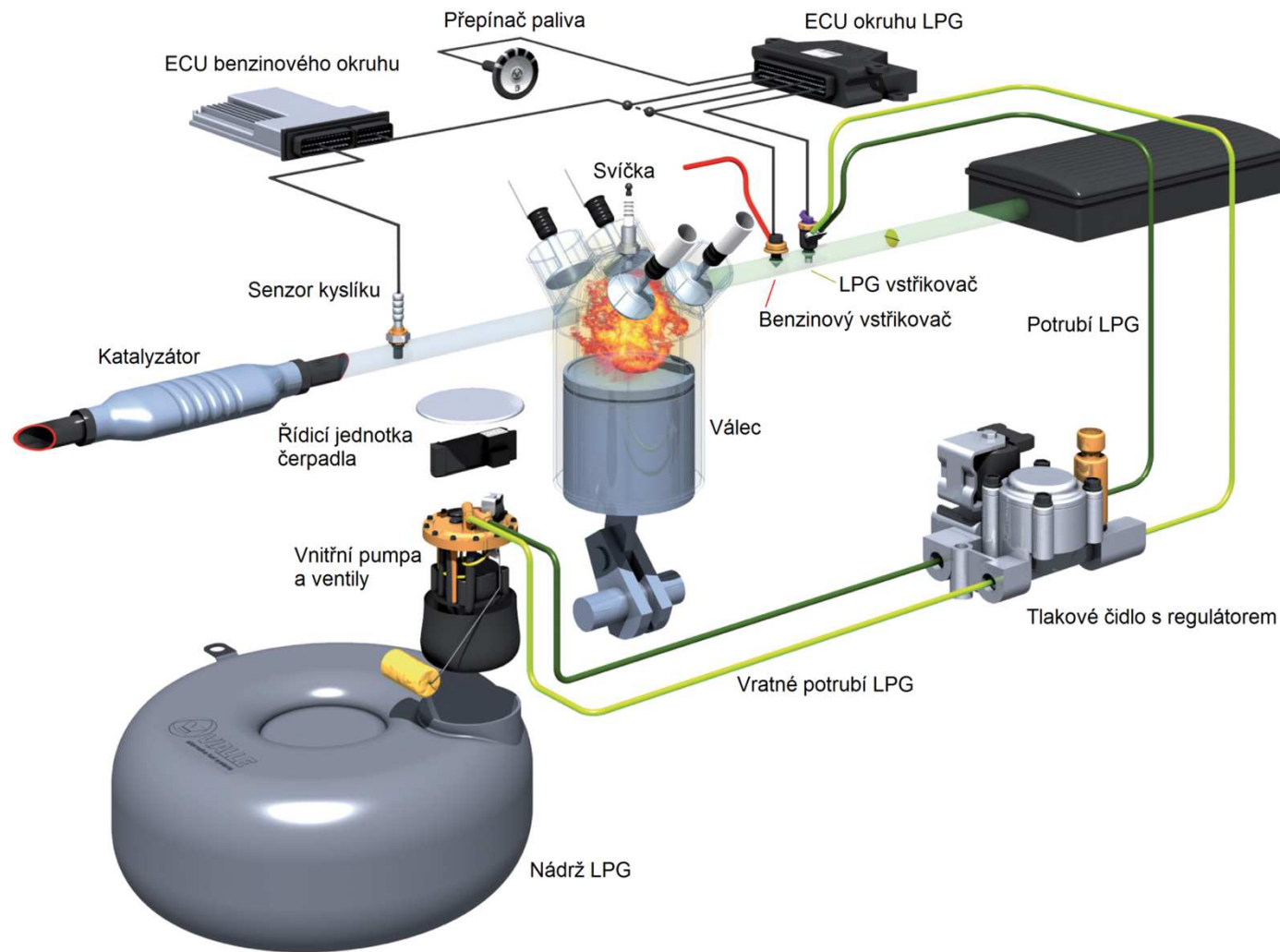
- **System vstřikování paliva (novější, umožňuje λ -regulaci)**



Konstrukce zážehových motorů



■ Příklad dvoupalivového motoru (benzín + LPG)



Konstrukce vznětových motorů



■ Typické provedení vstřiku paliva

– Aktuálně nejrozšířenější 2 alternativy:

Common rail princip společného vysokotlakého zásobníku pro všechny válce (tlak 180 – 250 MPa)

zamezuje kolísání tlaku při odběru palivy jednotlivými vstřikovači

tlak paliva nezávislý na otáčkách motoru a vstřikovaném objemu paliva

problém – nižší životnost injektorů ⇒ riziko podtékání a propálení válce.

Pumpe duse starší systém - každou jednotku ovládá pro každý válec vačkový hřídel

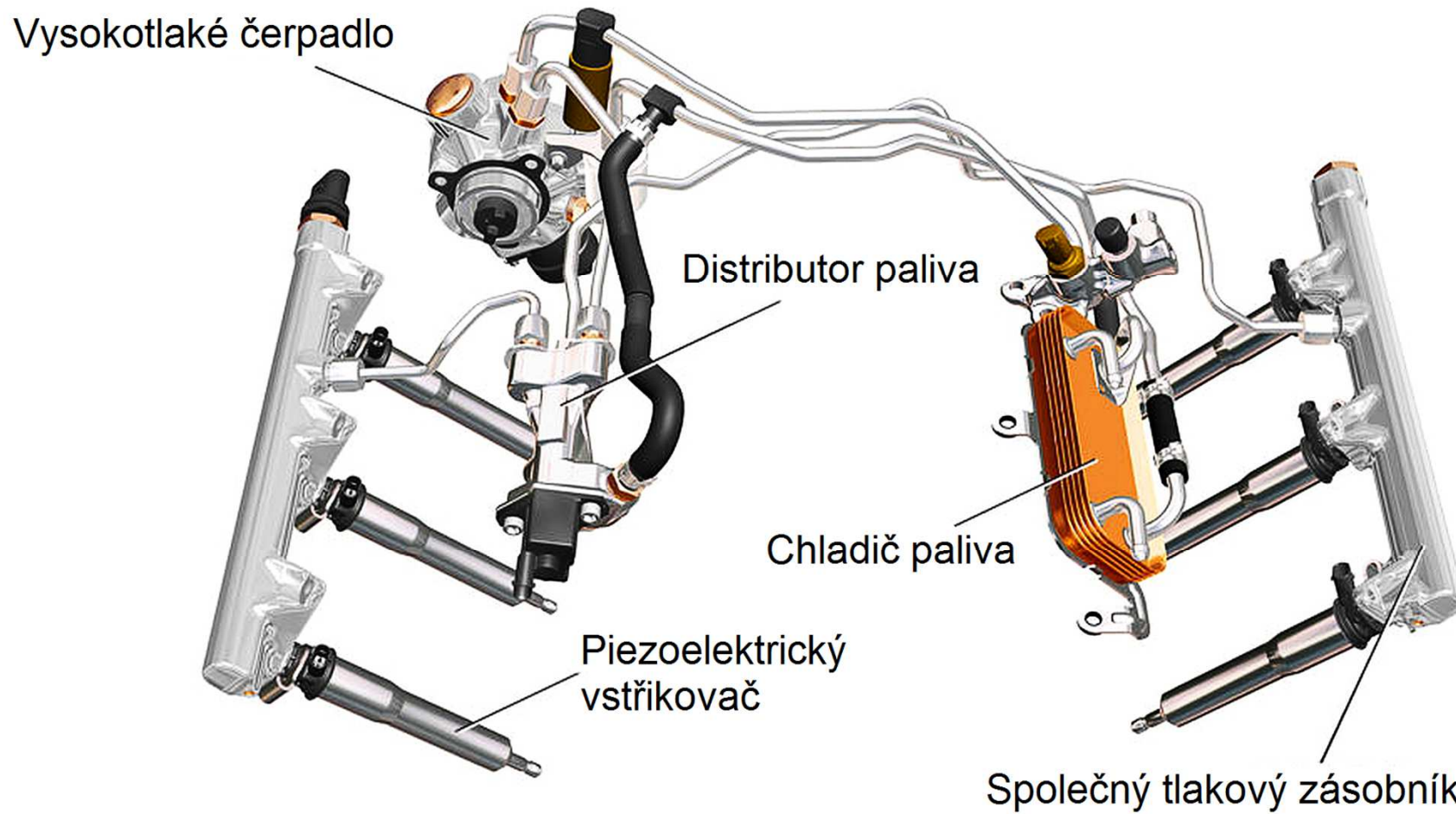
vstřikovací tryska a vstřikovací čerpadlo spojeny v jednom celku (tlak až 200 MPa)

chod motoru tvrdší a hlučnější

Konstrukce vznětových motorů



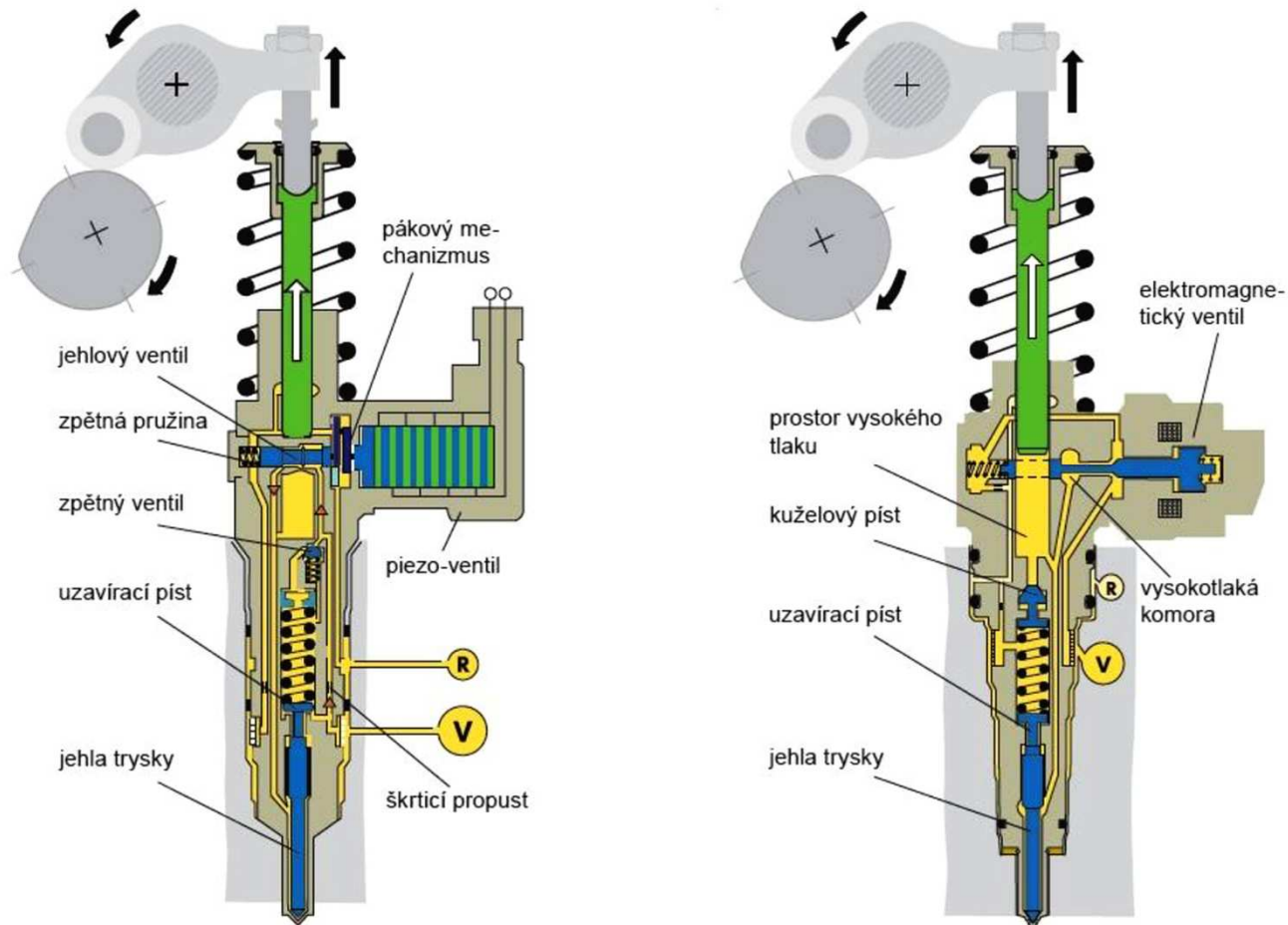
- **System vstřiku paliva common rail** *(Zdroj: autobild.cas.sk)*
 - System společného zásobníku – tlumení výkyvů tlaku při injektáži



Konstrukce vznětových motorů



■ Systém vstřiku paliva přes vačkový hřídel (Zdroj: autobild.cas.sk)



– Piezoelektrický a elektromagnetický systém vstřikovačů

Emisní limity motorových vozidel



- **Emisní úroveň – v EU tzv. EURO norma**
 - První norma o množství výfukových zplodin v Kalifornii v roce 1968;
 - V Evropě první emisní norma až v roce 1971 (EHK 15);
 - První EURO norma v roce 1992
 - Aktualizace EURO norem v intervalech cca 4 roky (postupné zpřísnování, EURO 5 v r. 2009, EURO 6 2014);
 - V technickém průkazu vozidla není uvedena explicitně EURO norma, ale uvádí se norma EHK (např. EHK 83.05 = EURO 3).

Emisní limity motorových vozidel



■ Emisní úroveň – tzv. EURO norma

– Emisní limity uváděny v gramech na ujetý (normalizovaný kilometr)

Rok/norma		CO (g/km)		NO _x (g/km)		HC + NO _x (g/km)		HC (g/km)	PČ (g/km)
1992	I	3,16	3,16	–	–	1,13	1,13	–	0,18
1996	II	2,20	1,00	–	–	0,50	0,70*	–	0,08**
2000	III	2,30	0,64	0,15	0,50	–	0,56	0,20	0,05
2005	IV	1,00	0,50	0,08	0,25	–	0,30	0,10	0,025
2009	V	1,00	0,50	0,06	0,18	–	0,23	0,10	0,005
2014	VI	1,00	0,50	0,06	0,08	–	0,17	0,10	0,005

BENZÍNOVÉ MOTORY, NAFTOVÉ MOTORY

* 0,90 pro motory s přímým vstřikováním paliva

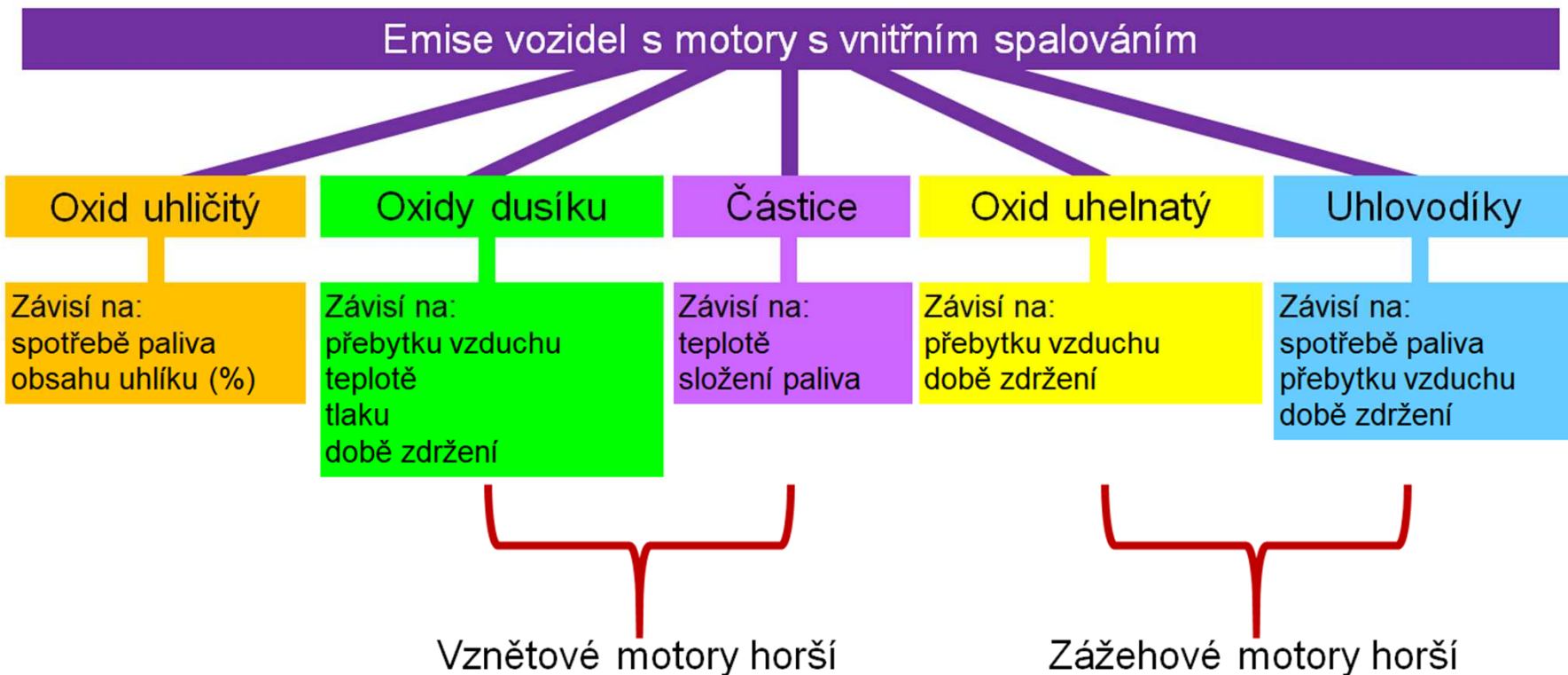
** 0,10 pro motory s přímým vstřikováním paliva

Emise spalovacích motorů



■ 5 různých skupin emisí

- CO₂ – nemůže být efektivně odlučován z výfukových plynů
- NO_x, prachové částice, CO, uhlovodíky – nasazovány účinné metody jejich odstraňování



CO₂ u většího zdvihového objemu



■ Příklad roční bilance provozu vozidla se zážehovým motorem s větším zdvihovým objemem

– Pozn. Zde uvažováno pouze dokonalé spalování;

Ujetá vzdálenost:	40 000 km
Palivo:	Benzin Natural 95
Průměrná spotřeba:	8,5 l/100 km
Hustota paliva:	0,75 kg.dm ⁻³
Roční spotřeba paliva:	2 550 kg

Jednotková bilance:

Vstup (vzduch + palivo)			Spaliny	
Spalovací vzduch				
N ₂	11,10 kg		N ₂	11,10 kg
O ₂	2,24 kg	+	CO ₂	3,10 kg
O ₂	1,16 kg		H ₂ O	1,30 kg
Zbytkové plyny	0,20 kg		Zbytkové plyny	0,20 kg
Celkem	14,70 kg	+	Celkem	15,70 kg
Benzin				
-	-			
C	0,86 kg	→		
H	0,14 kg			
-	-			
Celkem	1,00 kg	→		

Roční produkce spalin:	40 035 kg
Z toho CO ₂	7 905 kg

Emisní limity motorových vozidel



- **Emise oxidu uhličitého – nejsou předmětem měření v rámci STK**
 - U vyrobených automobilů se limity nevztahují na jednotlivé kusy, ale na průměr roční produkce výroby dané firmy
- **Reálné prům. emise CO₂ nových automobilů prodaných v EU**
 - 1995 186 g.km⁻¹
 - 2003 164 g.km⁻¹
 - 2017 118,6 g.km⁻¹
- **Zpřísnění po roce 2020 – s použitím pouze konvenčních motorů nesplnitelné**
 - Flotilový limit od ledna 2021: 95 g.km⁻¹
 - Odpovídající spotřeba PHM:

motorová nafta	3,54 l.100 km ⁻¹
benzin	4,06 l.100 km ⁻¹

Různé motory a emise



■ Porovnání emisí ze zážehových a vznětových motorů

– Rozdíly vycházejí z: různých paliv, teplotních a tlakových poměrů a koeficientu přebytku vzduchu.

– Zážehové motory:

Kompresní poměr 7 – 12 : 1

Kompresní tlak cca do 1,8 MPa

Spalovací tlak cca do 6,0 MPa

Spalovací teplota max. 2 000 °C

Problematické emise CO primárně až 12 % obj.

C_xH_y primárně 0,2 – 3 % obj.

NO_x primárně až 0,8 % obj.

– Pozn. Bez použití třícestného katalyzátoru je zážehový motor z pohledu uhlovodíků a CO emisně horší než vznětový.

Různé motory a emise



■ Porovnání emisí ze zážehových a vznětových motorů

– Rozdíly vycházejí z: různých paliv, teplotních a tlakových poměrů a koeficientu přebytku vzduchu.

– Vznětové motory:

Kompresní poměr 14 – 24 : 1

Kompresní tlak cca do 5,5 MPa

Spalovací tlak cca do 9,0 MPa

Spalovací teplota max. 2 000 °C

Problematické emise PM primárně až 1,1 g.m⁻³

NO_x primárně až 0,5 % obj.

– Pozn. u vysoce přeplňovaných vznětových motorů radikální zvýšení obsahu NO_x ve spalinách – bez SCR obtížně řešitelné.

– Při přepočtu zážehový/vznětový motor nutno zohlednit obsah O₂ ve spalinách (zážehový jen 0,3 – 0,8, vznětový 2 – 18 % obj.)

Snižování emisí z motorů



■ Obecný přehled metod

- Zdokonalování konstrukce motoru;
 - Zlepšení přípravy palivové směsi
 - Zlepšení zapalování (větší vzdál. elektrod \Rightarrow delší čas jiskry)
 - Recirkulace výfukových plynů
 - Snížení tolerancí ve spalovací části motoru
 - Přechod na chudé směsi
 - Lambda regulace spalování
 - Řízení pohybu směsi ve válci
 - Vypínání některých válců
 - Variabilní časování ventilů atd.
- Snížení již vzniklých emisí ve výfukových plynech;
 - Použití katalyzátorů
 - Použití filtrů

Snižování emisí z motorů



■ Vliv bohaté a chudé směsi

– Bohatá směs;

$$\lambda < 1$$

nedokonalé spalování

růst emisí C_xH_y a CO

nastavení obvyklé u starších motorů $\lambda = 0,88 - 1$

dolní hranice chodu $\lambda = \text{cca } 0,7$ (nepravicečný chod motoru až jeho zhasnutí z důvodu přesycení)

– Chudá směs;

$$\lambda > 1$$

u vznětových motorů vždy

nízké emise C_xH_y a CO

pro primární emise vhodné $\lambda = 1,01 - 1,15$ (horní hranice 1,3)

z hlediska funkce třicestného katalyzátoru nutná $\lambda = 1,0 \pm 0,02$

Emise ze zážehových motorů



■ Lambda regulace spalovacího procesu

- Na základě údaje o obsahu kyslíku ve spalinách ECU řídí poměr palivo/vzduch;
- Sonda je obvykle napěťová (signálem je elektrické napětí mezi elektrodami) nebo málo užívaná odporová (signálem je změna el. odporu).
- Napěťová sonda – generování U mezi elektrodami oddělenými keramikou na bázi ZrO_2 (referenční elektroda vystavena okolnímu vzduchu, měrná elektroda ve styku se spalinami;
Elektrody platinové
- Odporová sonda – změna elektrického odporu obvodu tvořeném Pt elektrodou a keramikou z TiO_2 ;

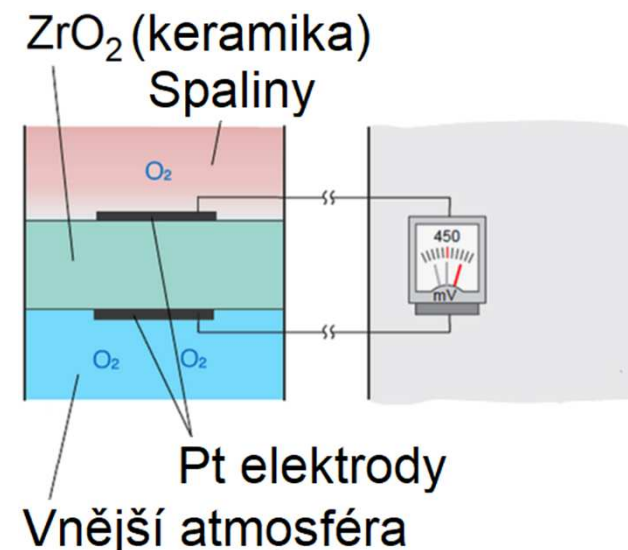
Lambda regulace zážehových m.



- **Sonda detekuje obsah kyslíku ve spalínách (350 °C do < 850 °C)**
 - Základem Nernstova buňka: keramická destička opatřená z obou stran elektrodami z platiny (spaliny || keramika || vnější vzduch)
 - Rozdílnou koncentrací kyslíku vzniká na elektrodách napětí
 - $\lambda < 1$ sonda generuje napětí 0,7 - 1,0 V (motor zkrátí t vstřiku)
 - $\lambda > 1$ sonda generuje napětí 0,1 - 0,2 V (motor prodlouží t vstřiku)
 - $\lambda = 1$ přesně stechiometrické spalování sonda generuje 0,45 V



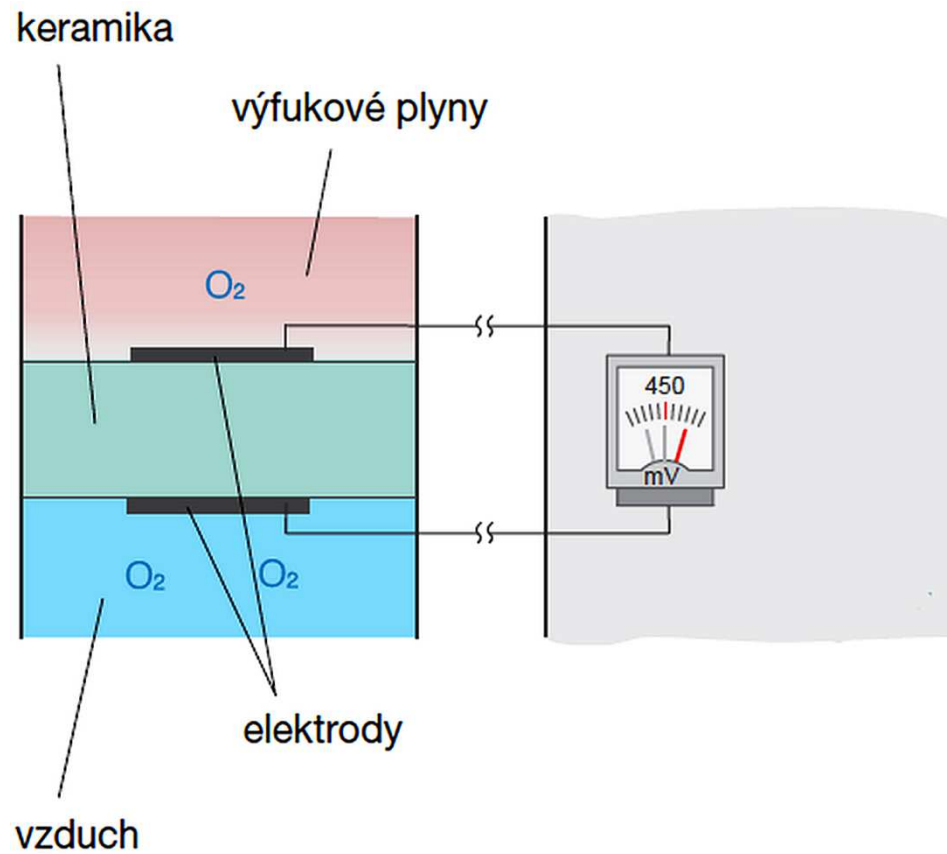
Elektrické
připojení + ohřev
na 350 °C



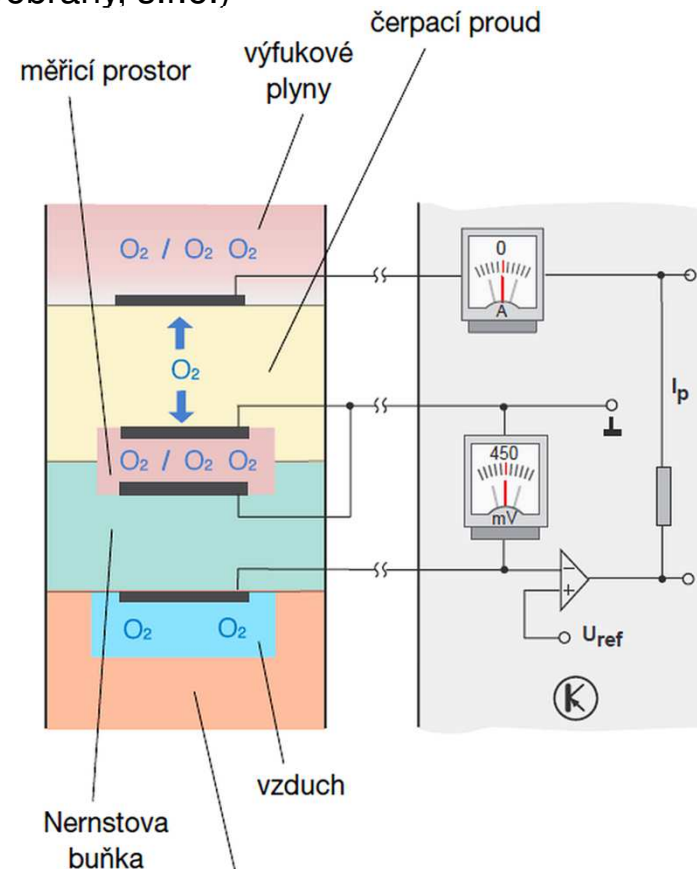
Emise ze zážehových motorů



■ Napět'ové lambda sondy (Zdroj: Subaru Dobřany, s.r.o.)



Dvoubodová sonda



Širokopásmová sonda

Emise ze zážehových motorů



- **Třícestné katalyzátory** (Zdroj: Johnson Matthey)
 - Společné odstraňování C_xH_y , CO a NO_x ;

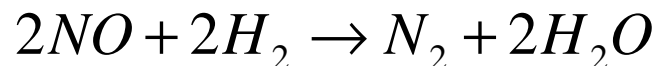
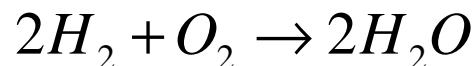
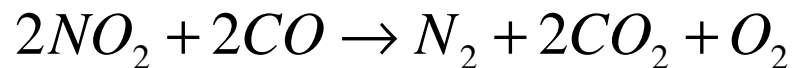
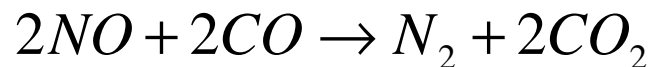
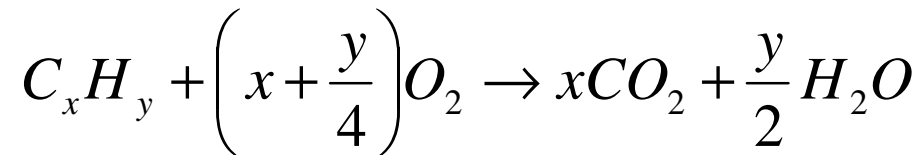
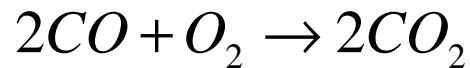


Emise ze zážehových motorů



■ Třícestné katalyzátory (Zdroj: Johnson Matthey)

- Reakční princip:
- Oxid uhelnatý a uhlovodíky jsou oxidovány, zatímco oxidy dusíku jsou redukovány.
- Kyslík pro oxidaci je odebírán z oxidů dusíku a nikoli ze vzduchu (protože $\lambda = 1 \pm 0,02$)



Emise ze zážehových motorů



■ Třícestné katalyzátory

- Konstrukce: Nosič s velkým povrchem + drahokovová aktivní složka nanesená na povrchu (Pt + Pd + Rh), vše v kovovém, vnitřně odpruženém pouzdře (pomocí žáruvzdorného pletiva);
- Nosič katalyzátoru: Sypké materiály (bulk material), téměř nepoužívány;
Keramické bloky (magnesium-aluminium-silikáty s povrchovou vrstvou Al_2O_3 a na ní s aktivní vrstvou) – nejrozšířenější;
Kovové bloky (s povrchovou vrstvou Al_2O_3 a na ní s aktivní vrstvou) – nákladné \Rightarrow málo používané;
- Provozní teplota: min. 300 °C, optimálně 400 – 800 °C, riziková 800 – 1 000 °C, destrukční > 1 000 °C (např. palivo v katalyzátoru \Rightarrow znehodnocení).

Emise ze vznětových motorů



- Komplikovanější řešení emisí – z důvodu $\lambda > 1$;
- Oproti zážehovým motorům nutno NO_x redukovat pomocí SCR a tuhé částice odlučovat filtrací v DPF filtru;
- Princip SCR (pro emisní limity Euro IV a vyšší): redukce nástríkem roztoku močoviny (tzv. AUS 32 = 32,5% močoviny, 67,5% vody) s bodem krystalizace -11 °C ;
- Roztok močoviny dodáván pod obchodním názvem AdBlue;
- Pro provoz za nízkých teplot nutná nádrž AdBlue s elektrickým ohřevem nebo vedením roztoku přes chladicí kapalinu motoru)
- V USA na trhu kompatibilní roztok s obchodním názvem DEF (Diesel Exhaust Fluid);
- AdBlue vstřikován před katalyzátor výfukových plynů (smísení se spaliny s následným rozkladem na $\text{NH}_3 + \text{CO}_2$).

Emise ze vznětových motorů

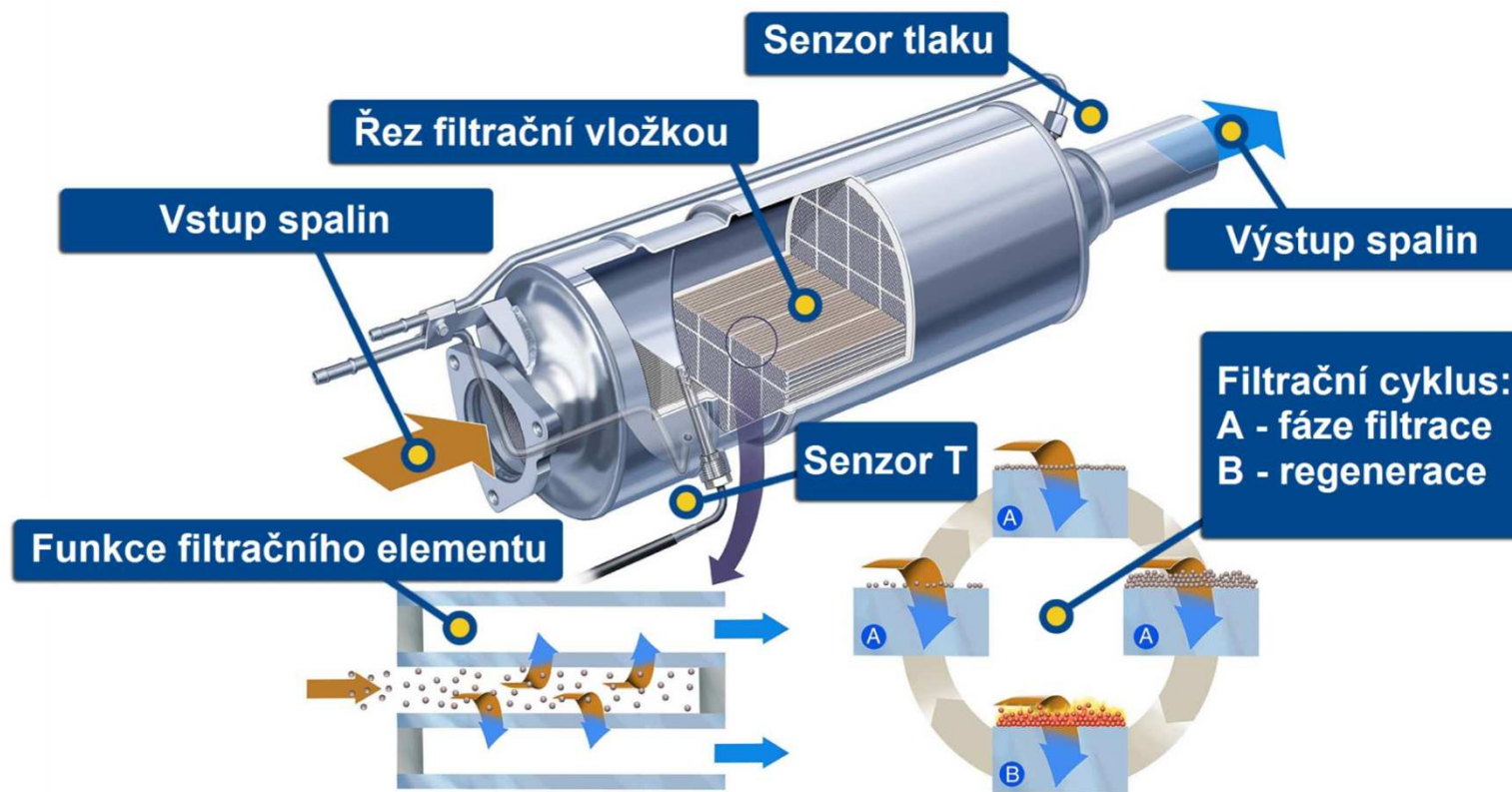


- Následná reakce NH_3 s NO_x stejným mechanismem, jako v případě průmyslové SCR, na H_2O a N_2 ;
- Provozní spotřeba AdBlue cca 3 – 7 % objemově vůči spotřebovanému palivu v závislosti na požadovaném emisním limitu;
- Provozní teplota SCR v rozsahu 200 – 450 °C;
- Teplota měřena čidly na vstupu, případně i na výstupu katalyzátoru
- AdBlue dávkováno až po dosažení provozní teploty, a velikost dávky řízena signálem senzoru NO_x před, za nebo na obou místech katalyzátoru
- Regulace nástřiku nutná z důvodu rizika překročení emisního limitu NO_x , vzniku páchnoucích sloučenin amoniaku nebo krystalizace nezreagované močoviny ve výfuku;
- Dávkování AdBlue řešeno různými způsoby, např. tlakovým vzduchem.

Emise ze vznětových motorů



- DPF filtr (automatická, tzv. aktivní, regenerace po ujetí 300 – 500 km);
 - Zahřátím sazí na cca 600°C dojde k jejich vyhoření a ke snížení Δp ;
 - Ohřev filtru vstříkem paliva do válců při otevřených ventilech výfuku;
 - Regenerace pouze při zahřátém motoru a rychlosti nad 55 – 60 km/h;
- (Zdroj: www.motoringassist.com)

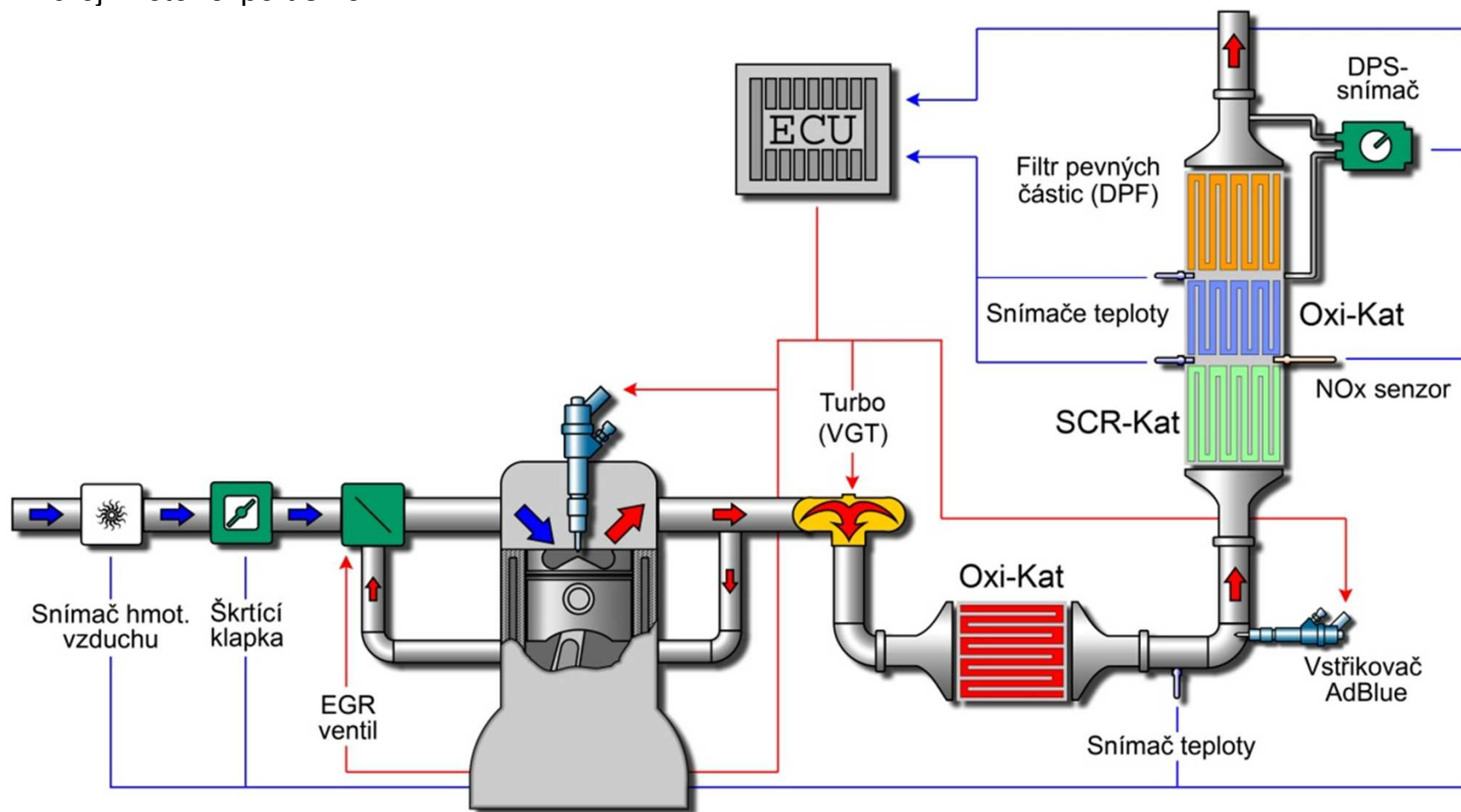


Vznětové motory



■ Selektivní katalytická redukce

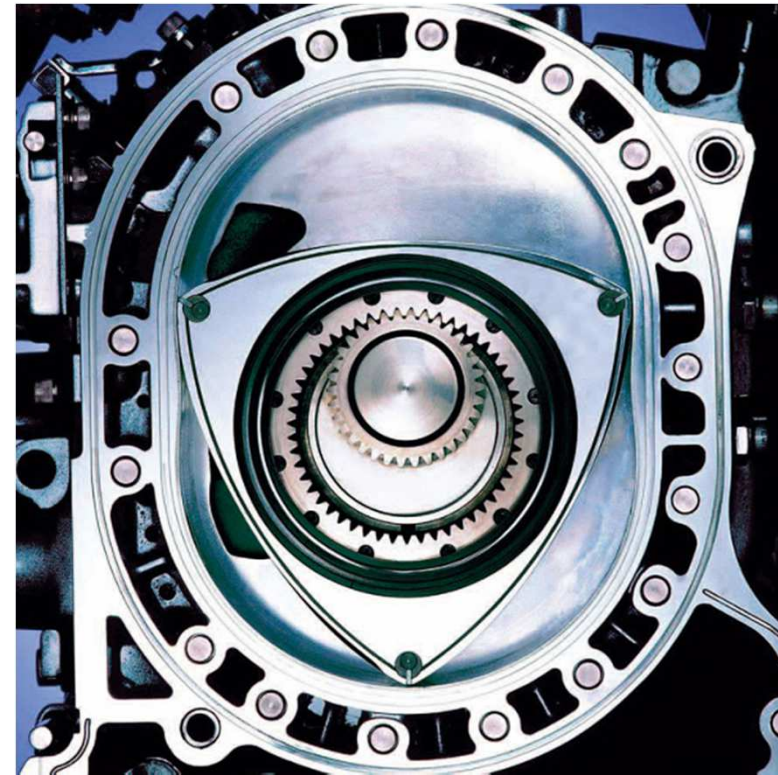
Zdroj: Motor expert s r.o.



Atypické konstrukce motoru



- Wankelův motor *(Zdroje: www.mattrittman.com, www.autoznalosti.cz)*
(patent Felixe Wankela)
 - Aktuální podoba odvozena od – KKM (Kreiskolbenmotor) z r. 1958.
 - Princip: stacionární blok a krouživý píst, rotující excentricky okolo hřídele (4-takt Ottova cyklu)
 - Výhody oproti pístovým:
 - kompaktní, lehčí
 - vyšší výkon a otáčky
(cca 9 000 RPM)
 - nižší NO_x
 - Nevýhody:
 - vysoká spotřeba oleje
 - opotřebení lamel
 - emise C_xH_y



Atypické konstrukce motoru



- Atkinsonův cyklus (Zdroj: Ladislav Čermák, auto.cz)
- Původní patent Jamese Atkinsona z r. 1882.
- Princip: Ottův cyklus = stejný objem při expanzi i kompresi \Rightarrow Atkinsonův cyklus = prodloužená dráha pístu oproti expanzi
- Dříve: mechanicky, nyní: sací ventil otevřený déle (na 20 – 30 % kompresního zdvihu)

- Výhody:

vyšší účinnost
(až cca 45 %)

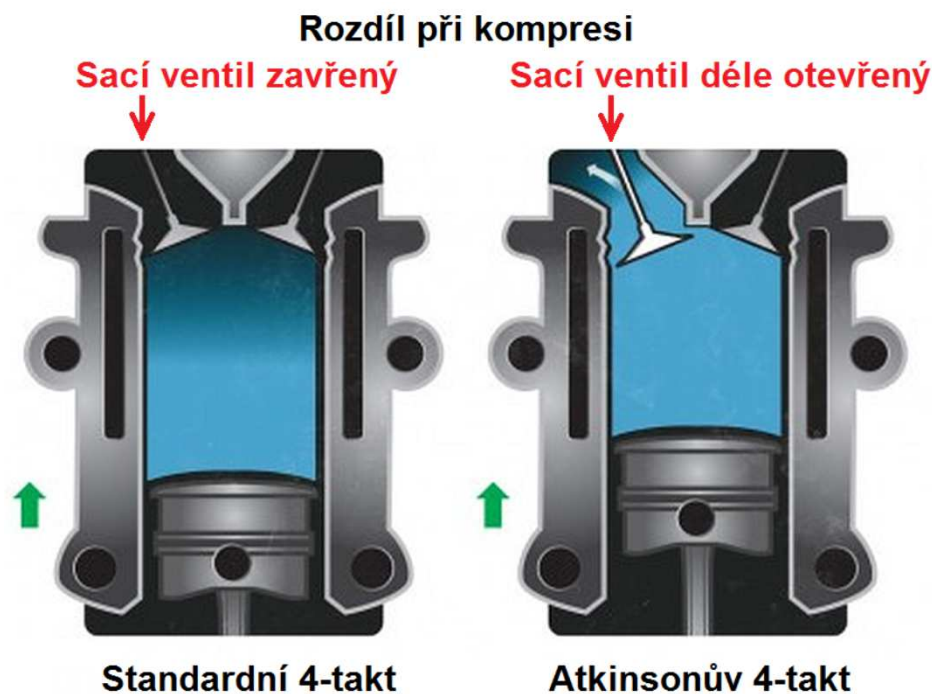
pozn.

$\eta_{\text{Ottův cyklus}} = 25 - 38 \%$

- Nevýhody:

nižší výkon

Užíváno zejm. u hybridů



Biosložka v palivech



- FAME, neboli MEŘO transesterifikací, ethanol kvašením + destilací
 - 82,3 milionu tun ekvivalentu ropy ročně.
 - výroba ethanolu: kukuřice, obilí, brambory, cukrová třtina a řepa
 - Výroba FAME: olej ze sóji, palmový olej, olej ze slunečnice, řepky
- Výroba potravin
 - světová populace 7,87 mld. (05/2021)
 - cca 815 mil. lidí trpí nedostatkem jídla (OSN, 2016)



Elektromobily – rychlé řešení?



- Aktuálně k dispozici dvě řešení
 - Systém s přímým pohonem kol (bez složité převodovky), často podvozek na rámu



- Obdoba klasického automobilu (samonosná karoserie, motor s automatickou převodovkou)

Lithium-iontové akumulátory



- Kovové lithium ${}^7_3\text{Li}$
 - Alkalický kov nízké hustoty a bodu tání pouze 180,54 °C.
 - Vysoce reaktivní prvek oxidující i na vzduchu. Bezpečně je přechováván v petroleji.
- Přírodní výskyt
 - Relativně vzácný prvek, obsažený v horninách zejm. na bázi aluminosilikátů, ale v rudách zpravidla méně než 5 % hm.



Lithiová ruda lepidolit



Kovové lithium



Žravý



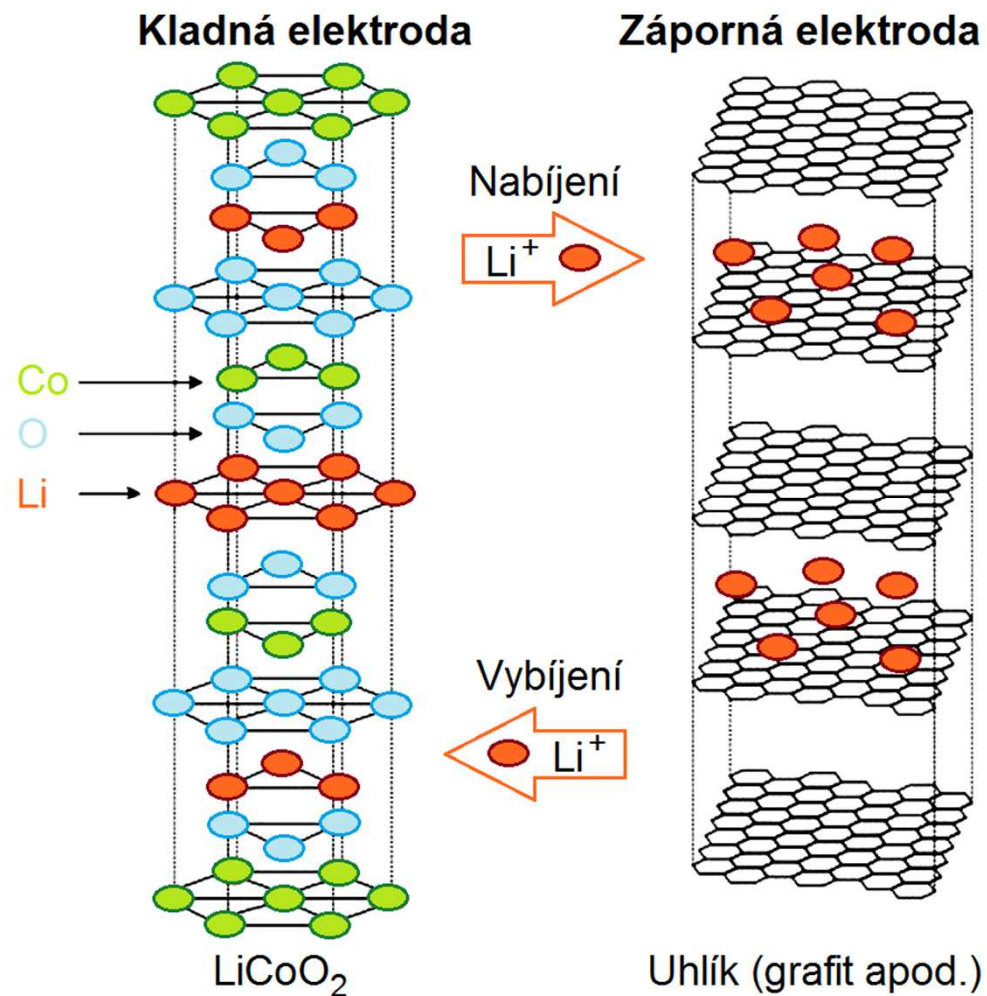
Vysoce hořlavý

Lithium-iontové akumulátory



■ Princip funkce

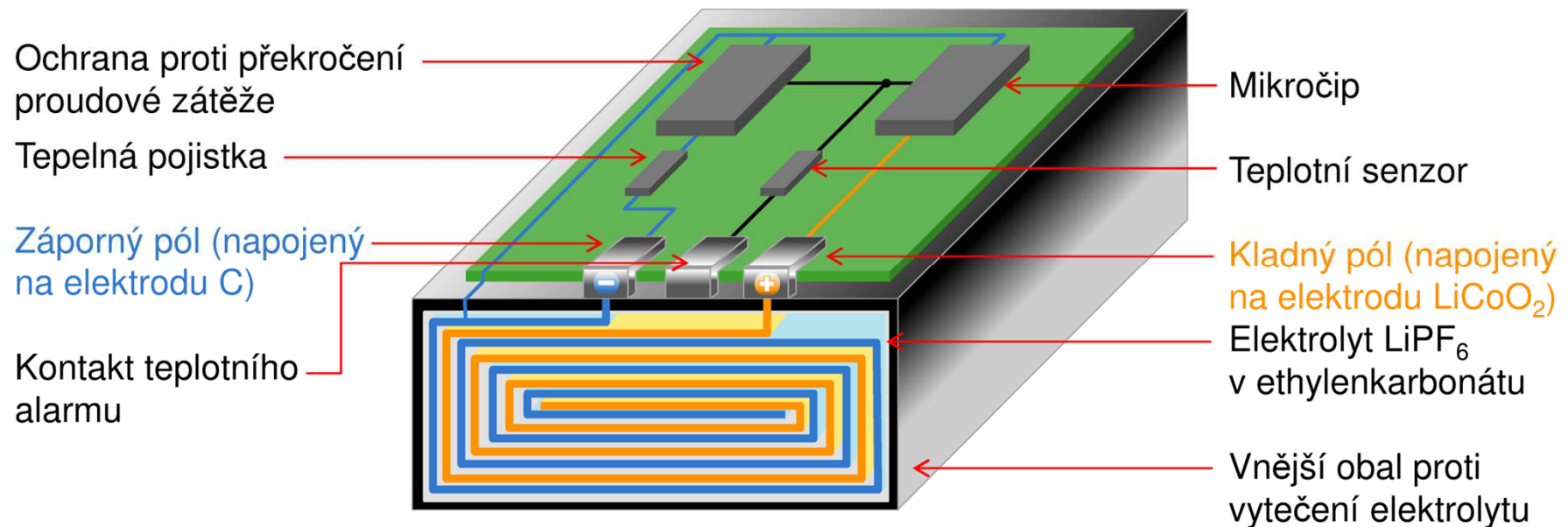
- Transport lithných iontů
- Katoda na bázi oxidů
 LiCoO_2 , $\text{Li}_x\text{Mn}_2\text{O}_4$, LiNiO_2 ,
 LiV_2O_5 aj.
- Anoda uhlíková
- Elektrolyt kapalný, gelový
nebo polymerní
- Nejrozšířenější kapalný
elektrolyt:
lithium-hexafluorofosfát
v rozpouštědlech
(ethylenkarbonát +
dimethylkarbonát atd.)



Lithium-iontové akumulátory



▪ Konstrukční řešení s kapalným elektrolytem



▪ Jmenovité napětí jednoho článku = 3,6 V

- Sériovým řazením dosahovány násobky: 7,2; 10,8; 14,4 V ...atd.
- Paralelním řazením pak zvyšována kapacita

Lithium-iontové akumulátory



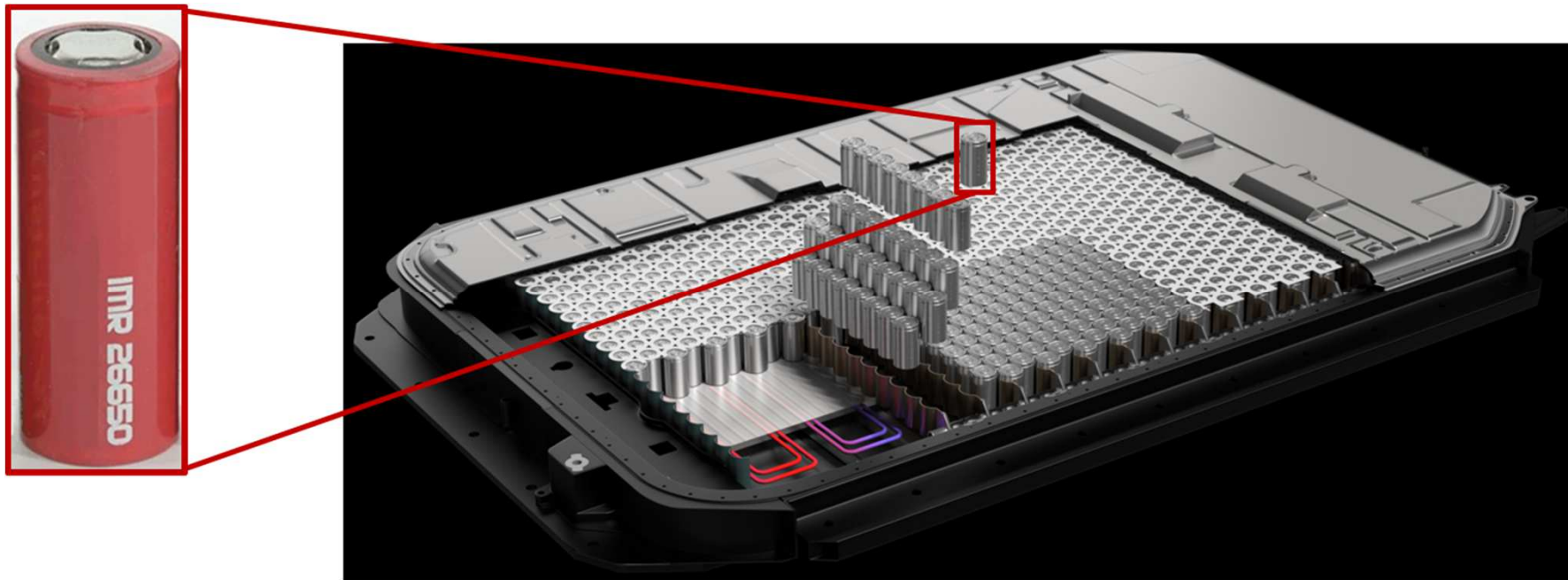
- Prvotní návrh – poč. 20. stol. Gilbert Newton Lewis
- První prakticky použitelná – 70. léta 20. stol. Li-TiS₂ Michael Stanley Wittingham
 - Neakceptovatelná cena sulfidu titaničitého
- Nižší cena LiC₆ Bellovy laboratoře AT&T
- První komerční – rok 1991, Sony, LiCoO₂
- Světově nejvyráběnější článek (situace 2021) – typ 18650, 18x65 mm
 - Např. modely Tesla S, Tesla X
 - Dále vyráběny např. typy 20700, 26650
 - různé elektrody dle užití (Li-NiCoAlO₂, Li₄Ti₅O₁₂ aj.)



Článek a battery pack



- Jednotlivé monočlánky se sdružují do battery packu (1 automobil vyžaduje řádově tisíce monočlánků)
 - jmenovité napětí článku = 3,6 V
 - kapacita se zvyšuje paralelním řazením, napětí sériovým řazením
 - battery pack dále obsahuje: ochranný box, vodní izolaci, nabíjecí/vybíjecí elektroniku a chladič systém



BEV: další výzkum a vývoj nutný



▪ Hlavní problémy vyžadující další vývoj

- 1 ▶ Nízká energetická hustota baterií
- 2 ▶ Hořlavost elektrolytu a anody Li-ion baterií
- 3 ▶ Degradace článku způsobující snižování kapacity (omezená životnost)
- 4 ▶ Závislost kapacity na teplotě
- 5 ▶ Pomalé nabíjení + nevyužitelných 100 % kapacity
- 6 ▶ Spotřeba ušlechtilých kovů (zejm. pro katody)
- 7 ▶ Nedostatek stabilních zdrojů energie z bezemisních zdrojů

Problém energetické hustoty



1

Energetická hustota $ED_V = ED_w \times \rho = \frac{E \times \rho}{m} \xrightarrow{\text{tedy}} [ED_V] = [W s m^{-3}]$

$$P = \frac{F \times d}{t} = \frac{E}{t} \xrightarrow{\text{tedy}} [J] = [W s]$$

- ▶ Energetická hustota = množství energie uložená v jednotkovém objemu nebo hmotnosti systému
- ▶ Jednotky:
 - 1 wattsekunda na metr krychlový $[Ws m^{-3}]$
 - 1 wattsekunda na kilogram $[Ws kg^{-1}]$

E energie [Joule], [J]

P výkon [Watt], [W]

F síla [Newton], [N]

d délka, dráha [metr], [m]

t čas [sekunda], [s]

ED_V objemová en. hustota [wattsekunda na m krychlový], $[Ws \cdot m^{-3}]$

ED_w hmotnostní energetická hustota [wattsekunda na kilogram], $[Ws \cdot kg^{-1}]$

ρ (materiálová) hustota [kilogram na metr krychlový], $[kg \cdot m^{-3}]$

m hmotnost [kilogram], [kg]

Problém energetické hustoty



1

Energetická hustota

- ▶ Paliva: energetická hustota dána spalným teplem, resp. výhřevností
- ▶ Baterie: energetická hustota dána množstvím náboje přeneseného mezi katodou a anodou

	Max. energetická hustota		Materiálová hustota	Max. účinnost motoru
	(Wh·kg ⁻¹)	(Wh·dm ⁻³)	(kg·dm ⁻³)	(%)
Nafta	11 836	9 942	0,84	42%
Benzin (95 okt.)	12 108	8 839	0,73	38%
Li-ion baterie	200	530	2,65	82%
LiFePO ₄ baterie	165	335	2,03	82%

Problém: Současná generace Li-ion baterií má velmi malou energetickou hustotu!

Teoretické maximum Li-ion článku je 1 700 Wh·kg⁻¹. není ale dosažitelné.

Problém energetické hustoty



1

Energetická hustota – porovnání motorů se započtením rozdílné účinnosti

- ▶ Mějme 4 automobily se stejným výkonem
- ▶ Vůz s dieslovým motorem má palivovou nádrž 50 litrů.
- ▶ Jaký je ekvivalent tohoto množství pro benzin a baterie (se započtením nízké účinnosti vozů na fosilní paliva) ?

	Objem paliva/bat.	Hmotnost paliva/bat.	Efektivně využitá energie	Celková energie paliva/bat.
	(dm ³)	(kg)	(kWh)	(kWh)
Nafta	50	42	209	497
Benzin (95 okt.)	62	45	stejná	550
Li-ion baterie	481	1 274	stejná	255
LiFePO ₄ baterie	761	1 545	stejná	255

Problém energetické hustoty



1 Energetická hustota – porovnání motorů se započtením rozdílné účinnosti

- ▶ Mějme vůz VW ID.5 s využitelnou kapacitou baterie 77,0 kWh (modelový rok 2023).
- ▶ Jakému množství fosilního paliva (včetně nízké účinnosti fosilních automobilů) tato kapacita odpovídá?

77,0 kWh uloženo v:

	Palivo/baterie	
	Objem (dm ³)	Hmotnost (kg)
Li-ion baterie	145	385
LiFePO ₄ baterie	230	467
Nafta	15	13
Benzin (95 okt.)	19	14



Problém hořlavosti Li-ion baterií



2 Ke vznícení Li-ion baterie může dojít:

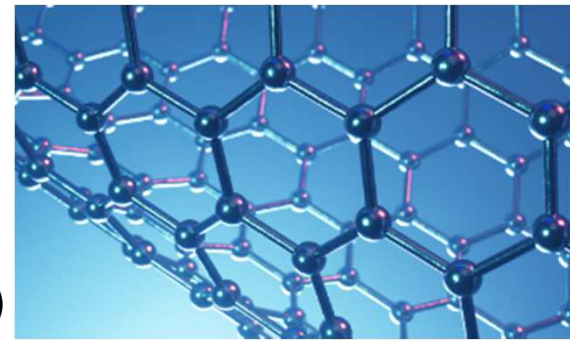
- z důvodu vnitřního zkratu (selhání separátoru)
- důsledkem srážky / nehody
- důsledkem přehřátí (selhání teplotního managementu, především při nabíjení)

■ Jediné účinné řešení:

- vývoj baterií bez hořlavých médií
- přetrvávající problém: bezpečné náhrady za kapalný organický elektrolyt mají horší přenos Li iontů \Rightarrow pomalejší nabíjení, nižší kapacita
- mnoho výzkumů, např.:

Solvent-Anchored non-Flammable Electrolyte
(SLAC/Stanford University)

Graphene-based lithium-ion batteries (Nanotech Energy)



.....atd.

Problém hořlavosti Li-ion baterií



2 Fáze destrukce baterie při přehřátí

- Exotermní rozklad mezifáze elektrolytu (SEI) 85 °C
- Tvorba sekundárního filmu a jeho následný rozklad 110 °C
- Vypařování elektrolytu 140 °C
- Tavení separátoru (mezi elektrodami a elektrolytem) 130-190 °C
- Následné zkratování obvodu a samovolné zahřátí
- Vznícení výparů z elektrolytu s O uvolněným z kladné elektrody ($\text{LiNi}_{0,8}\text{Co}_{0,15}\text{Al}_{0,05}\text{O}_2$) po odchodu Li 225 °C
- Vznícení grafitové elektrody 330 °C
- Tavení hliníkového kolektoru (pevného sběrače proudu) 660 °C
- Exploze



Problém degradace Li-ion baterií



- 3** Degradace článku vedoucí ke ztrátě kapacity nastává
- spontánně jako výsledek chemických procesů ve člancích
 - s rostoucím počtem nabíjecích/vybíjecích cyklů
 - životnost cca 2 000 cyklů u Li-ion a >2 000 cyklů u LiFePO₄
 - s četností užití maximálního nabíjecího výkonu („turbocharging“)
 - vystavováním baterie vysokým teplotám
 - dlouhodobým odstavením vozidla:
 - při jiném než 40 - 60% nabití
 - 100% nabití nebo vybití urychluje degradaci
 - Definitivní smrt článku nastane:
 - při hlubokém vybití pod 2,8 V
 - při přehřátí nad technický limit



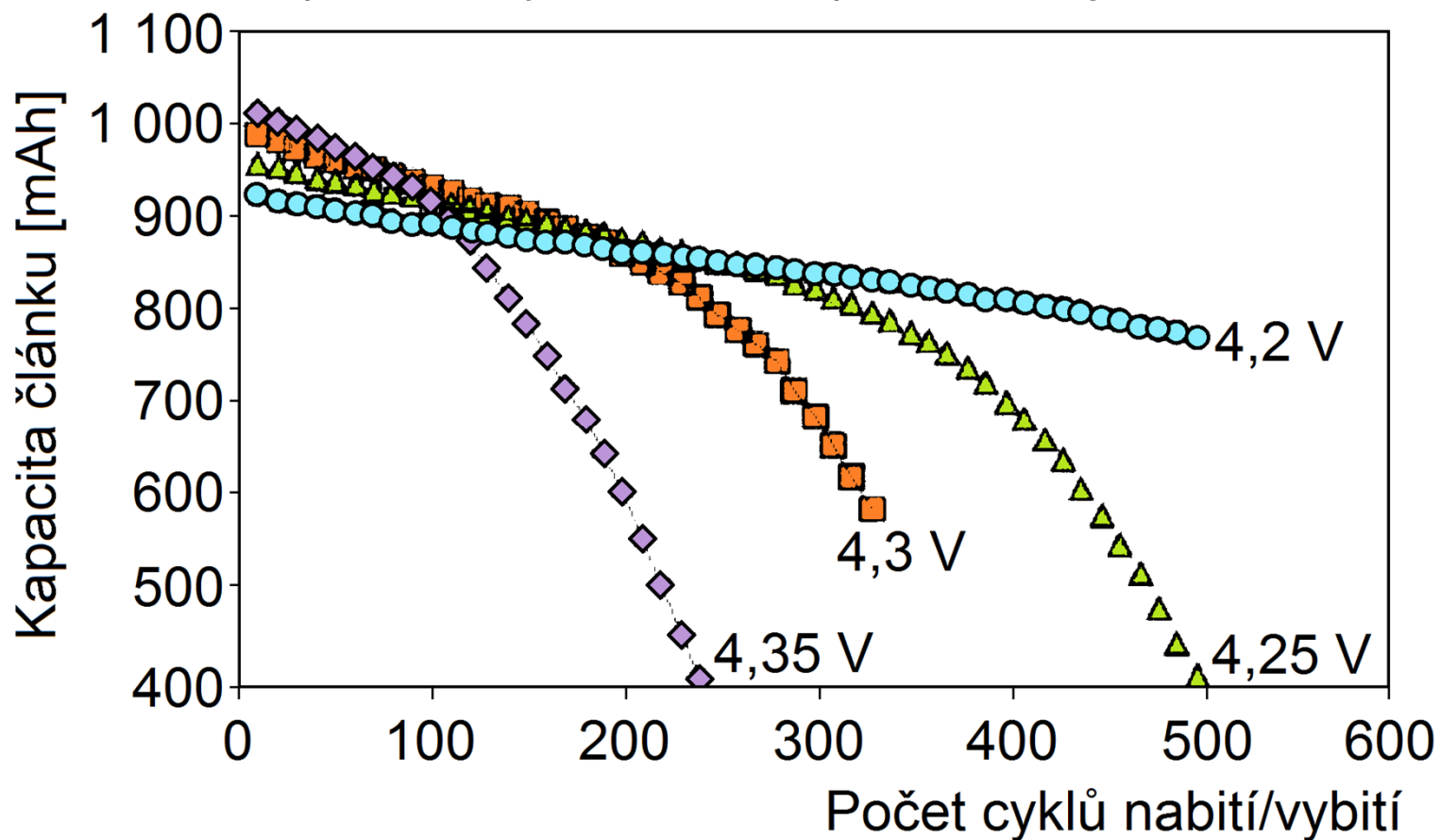
Problém degradace Li-ion baterií



3

- Problém nabíjení vyšším napětím mírné navýšení výchozí kapacity vykoupeno rychlým zlikvidováním akumulátoru

Pozn. nebezpečné nabíjení blokováno power managementem baterie

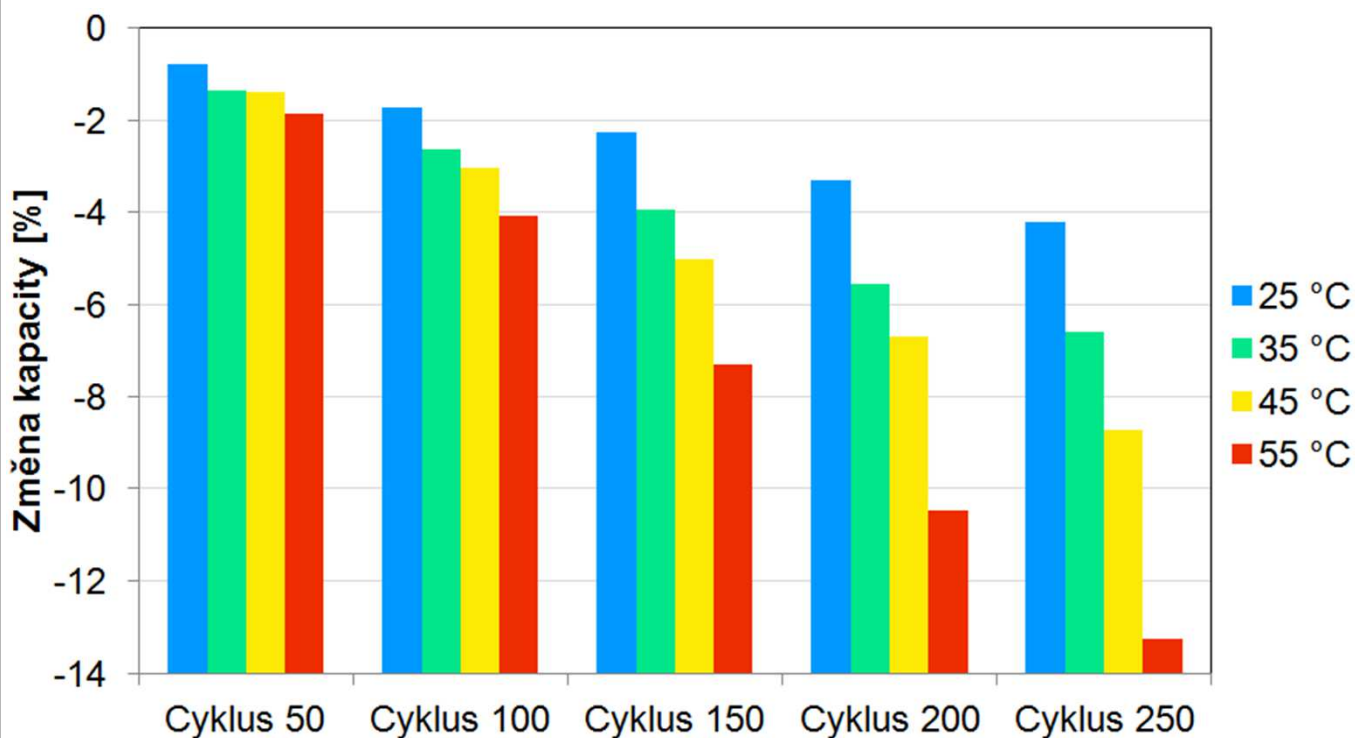


Problém kapacita vs. teplota



4

- Nízká teplota → snížení kapacity
 - Jestliže při $+27^{\circ}\text{C}$ je kapacita 100 %, při -18°C je pouze 50 %
- Vysoká teplota → snížení životnosti (trvalé snížení kapacity)



Problém pomalého nabíjení



5

- Pomalé nabíjení ve srovnání s tankováním kapalných paliv
 - Doba nabíjení závisí na: kapacitě, napětí a proudu.
 - Maximální proud je omezen materiálem a průřezem vodiče.
 - Standardní BEV užívají 400 V architekturu.
 - Premiové modely (Porsche Taycan) umožňují nabíjení 800 V.
 - Nabíjení probíhá stejnosměrným proudem (DC)
 - Pokud se připojí střídavý proud (AC) automatická aktivace usměrňovače (zpomalení nabíjení)
 - Nabíjecí proud pro DC a jednofázový AC

$$I[A] = \frac{P[W]}{U[V]}$$

- Nabíjecí proud pro 3-fázový AC
(kde P je výkon a Q je jalový výkon)

$$I = \frac{\sqrt{P^2 + Q^2}}{\sqrt{3} \times U}$$

Problém pomalého nabíjení



5

- Pomalé nabíjení ve srovnání s tankováním kapalných paliv
- Přehled nabíjecích systému v Evropě

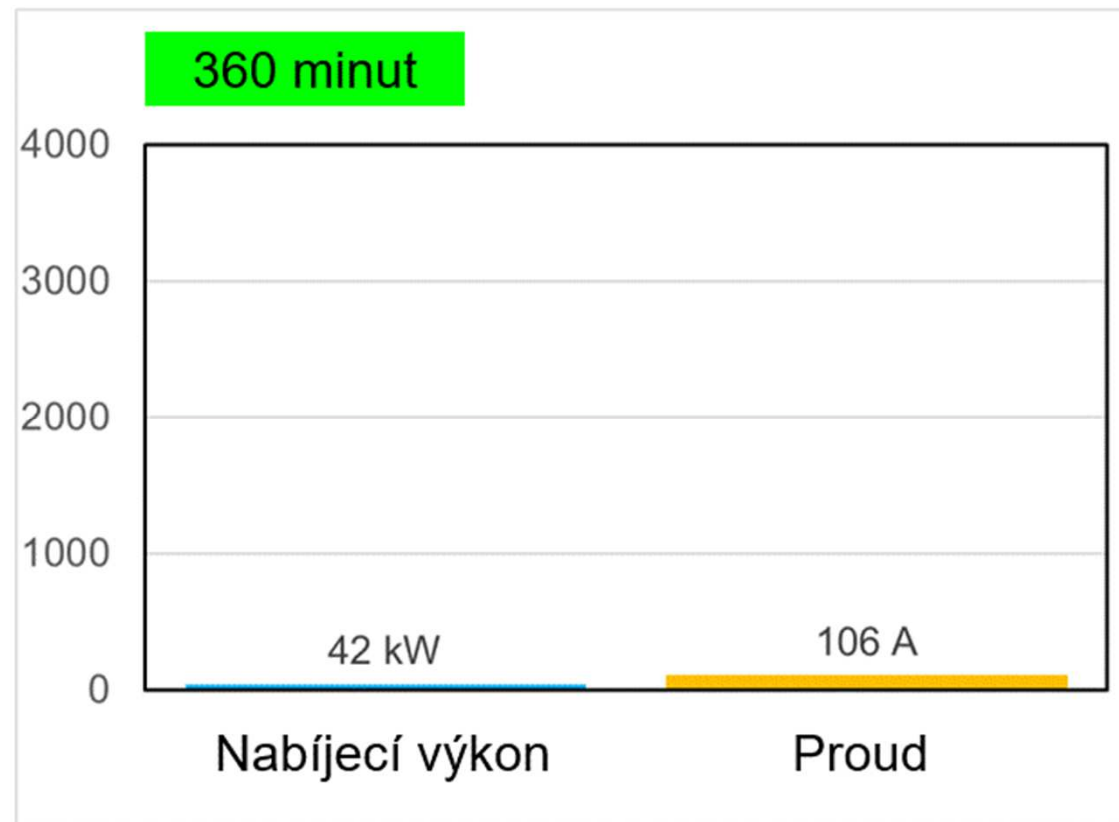
Typ nabíječky	AC			DC		
	Nabíjecí výkon	Napětí	Proud	Nabíjecí výkon	Napětí	Proud
Zásuvka (1-fáze)	2,3 kW	230 V	10 A	Neužívá se		
Zásuvka (1-fáze)	3,6 kW	230 V	16 A			
Wallbox (3-fáze)	7,2 kW	400 V	10 A			
Wallbox (3-fáze)	11,0 kW	400 V	16 A			
Wallbox (3-fáze)	22,0 kW	400 V	32 A			
Veřejná nabíječka	22,0 kW	400 V	32 A	22,0 kW	400 V	55 A
Veřejná nabíječka	43,0 kW	400 V	62 A	43,0 kW	400 V	108 A
Veřejná nabíječka	Neužívá se			50,0 kW	400 V	125 A
Veřejná nabíječka				120,0 kW	400 V	300 A
Veřejná nabíječka				150,0 kW	400 V	375 A
Veřejná nabíječka				350,0 kW	800 V	438 A

Problém pomalého nabíjení



5

- Příklad: dotankování 50 litrové nádrže trvá 10 min. včetně placení
 - Jak by se nabíjel BEV při dosažení stejného času?
 - Podmínky: DC nabíječka / 400 V architektura automobilu

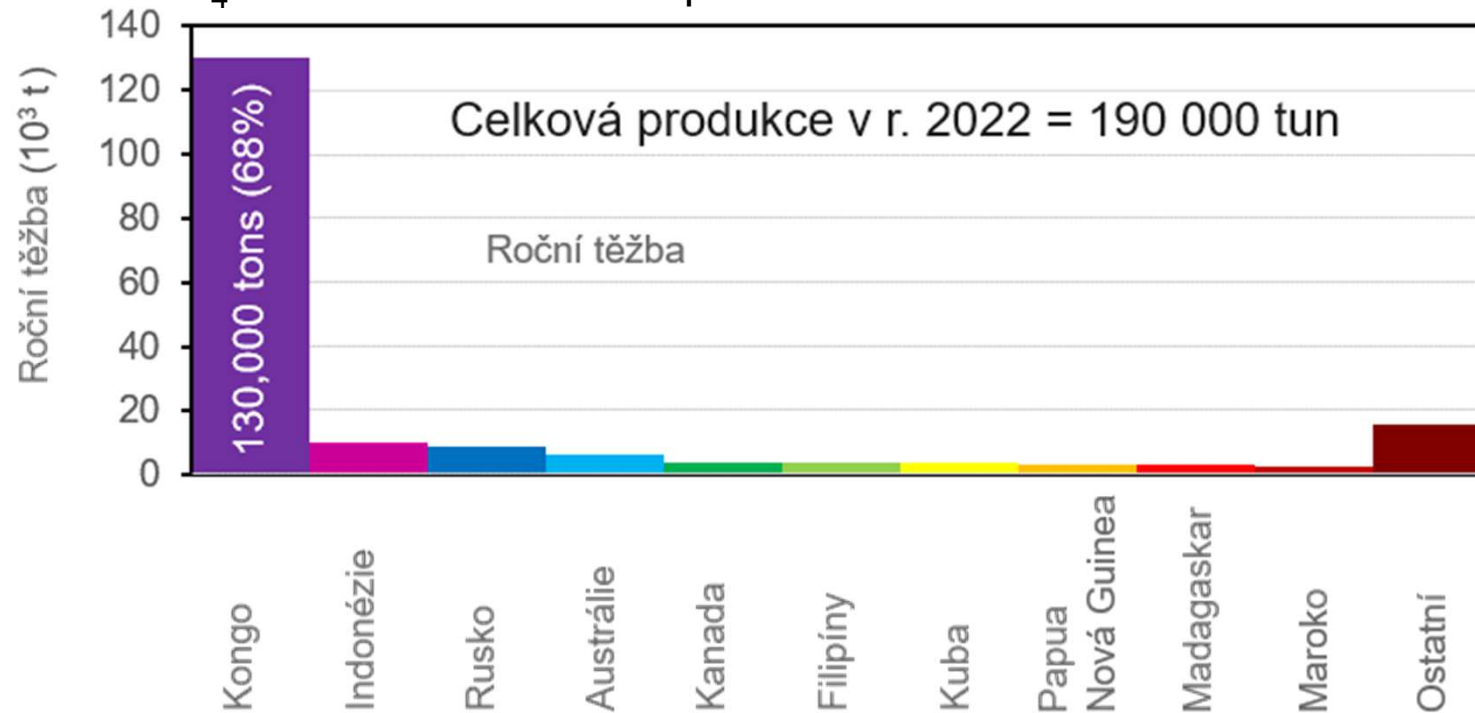


Problém ušlechtilých kovů (Co aj.)



6

- Kromě Li jsou třeba další kovy, jako např.: Ni, Co, Ti, V nebo Mn
- Metalurgie kobaltu: tlakové kyselé loužení \Rightarrow ohrožující ŽP
 1. Kobaltová ruda loužena směsí minerálních kyselin při 4,5 MPa a 255°C
 2. Kovy sráženy z roztoku pomocí H_2S
 3. Sulfidy převedeny na sírany pomocí O_2 za zvýšeného tlaku
 4. $CoSO_4$ oddělen z roztoku kapalinovou extrakcí



Problém ušlechtilých kovů (Co aj.)



6

- Demokratická republika Kongo: cca 2/3 těžitelných zásob Co
- Těžitelné zásoby v Kongu: cca 3,4 mil. t Co
- Způsob těžby: zejména manuální

Mutanda Mine



Údaje Unicef 2021: světový podíl
dětské práce 160 mil. dětí

Problém stabilní energetiky



7

- Stabilní a zároveň environmentálně příznivé zdroje = další problémy
 - Solární a větrná energie: proměnlivá produkce
 - Spalovací procesy: pre-, post- a oxy-combustion záchyt CO₂ nezbytný
 - Jaderná energie: nezbytné vyřešit nakládání s vyhořelým palivem
 - trvalé ukládání
 - recyklace
 - uzavřený palivový cyklus
 - Nezbytný vývoj a výstavba zařízení na ukládání energie:
 - bateriová
 - gravitační
 - přečerpávací vodní
 - chemické ukládání

Reference



1. http://www.remarkablecars.com/wiki/index.php/1770_Cugnot_Fardier
2. <https://www.elektrina.cz/james-watt-parni-stroj>
3. <https://www.telegraph.co.uk/news/science/8367976/James-Watt-Britains-head-of-steam.html>
4. <https://www.facebook.com/MarkDaleArtist/posts/puffing-devil-1801-my-latest-watercolour-illustration-celebrates-the-remarkable-/1288004354922961/>
5. <https://www.flickr.com/photos/theadventurouseye/29309904104>
6. <http://veteran.auto.cz/clanek/321/benz-patent-motorwagen-1885-1886-automobilu-je-125-let>
7. <https://www.i60.cz/clanek/detail/4726/henry-ford-delnik-ktery-vyrabi-auta-musi-mit-penize-aby-si-ho-mohl-koupit?lang=2>
8. <https://www.statista.com/statistics/281134/number-of-vehicles-in-use-worldwide/>
9. <http://www.fae.es>
10. www.motoringassist.com

Reference



11. http://d2ojs0xoob7fg0.cloudfront.net/evtv-word-press/wp-content/uploads/2014/07/Tesla_Motors_Model_S_base.jpg
12. https://auto.idnes.cz/foto.aspx?r=auto_testy&c=A130506_143517_auto_testy_fdv&foto=FDV4b12ef__DLS8134.jpg
13. www.sberatelmineralu.cz, Theodore W. Gray
14. <http://oze.tzb-info.cz/akumulace-elektriny/13612-lithiove-akumulatory>
15. <https://www.emobility-engineering.com/cell-to-pack-batteries/>
16. <https://podbabaoperak.cz/vuz/volkswagen-id-5/>
17. Bandhauer T., M., Garimella S., Fuller T., F. A Critical Review of Thermal Issues in Lithium-Ion Batteries. J. Electrochem. Soc. 2011, 158 (3), R1-R25.
18. Leng F., Tan C., M., Pecht M. Effect of Temperature on the Aging rate of Li Ion Battery Operating above Room Temperature. Scientific Reports 2015, 5.
19. <https://investingnews.com/where-is-cobalt-mined/#toggle-gdpr>
20. <https://oenergetice.cz/akumulace-energie/stane-se-honba-za-kobaltem-baterie-zlatou-horeckou-21-stoleti>