

*Tenzij anders vermeld, is er sprake van standaardomstandigheden:  
T = 298 K en p = p<sub>0</sub>.*

## Waterstofauto's die methaanzuur tanken

---

Omdat de opslag van waterstof een probleem is, wordt onderzoek gedaan naar manieren om waterstof om te zetten tot stoffen met een hogere dichtheid. Een voorbeeld van zo'n stof is methaanzuur (HCOOH).

Methaanzuur wordt momenteel industrieel bereid in drie stappen:

- 1 Waterstof reageert met koolstofdioxide tot methanol en water.
- 2 Methanol reageert met koolstofmono-oxide tot methylmethanoaat.
- 3 Methylmethanoaat reageert met water tot methaanzuur en methanol.

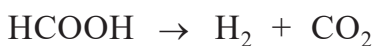
3p 1 Geef de reactievergelijking van stap 3 in structuurformules.

In totaal komt het proces neer op de omzetting van waterstof met CO<sub>2</sub> en CO tot methaanzuur en methanol. Methaanzuur en methanol ontstaan hierbij in de molverhouding 1 : 1.

4p 2 Voer de volgende opdrachten uit:

- Geef de totaalvergelijking van het hele proces.
- Bereken de atomeconomie van deze productie van methaanzuur.

Als het technisch mogelijk is om methaanzuur in een auto om te zetten tot waterstof en koolstofdioxide, kan de auto de vrijgekomen waterstof gebruiken als brandstof. De omzetting van methaanzuur tot waterstof in een auto is hieronder weergegeven.



Een Hyundai-waterstofauto kan 594 km rijden op 5,64 kg waterstof. De dichtheid van methaanzuur is 1,22 kg L<sup>-1</sup>.

4p 3 Bereken het volume in L methaanzuur dat minstens nodig is om 5,64 kg waterstof te kunnen produceren. Geef de uitkomst in het juiste aantal significante cijfers.

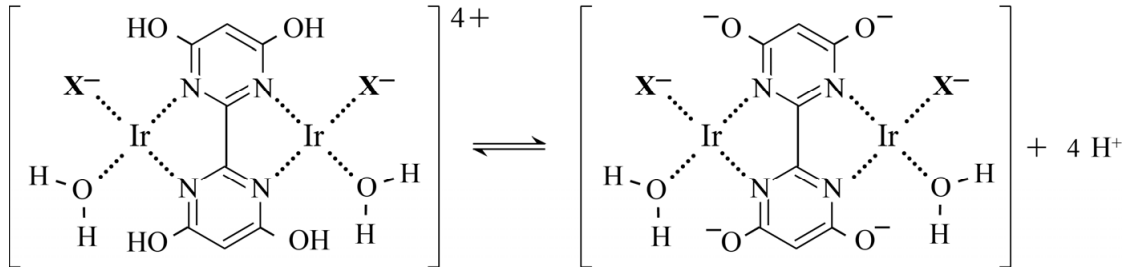
Twee onderzoeksgroepen hebben een katalysator ontwikkeld die de directe omzetting van H<sub>2</sub> en CO<sub>2</sub> tot methaanzuur katalyseert. Omdat deze omzetting in basisch milieu optreedt, wordt er geen methaanzuur gevormd, maar onder andere het zuurrest-ion van methaanzuur.

2p 4 Geef de reactievergelijking van deze omzetting.

Afhankelijk van de pH komen in oplossingen van de gebruikte katalysator voornamelijk deeltjes  $[H_4kat]^{4+}$  of deeltjes  $[kat]^0$  voor.

In de figuur is het evenwicht tussen deze deeltjes weergegeven met structuurformules.

**figuur**



In elk katalysatordeeltje zijn twee iridium-ionen door elektrostatische interacties gebonden aan enkele omringende deeltjes. Deze interacties zijn in de figuur weergegeven met stippellijnen. In de figuur zijn alle formele ladingen aangegeven, behalve de lading van de iridium-ionen. Alle iridium-ionen in de figuur hebben dezelfde lading.

2p **5** Leg uit welke lading een iridium-ion in de figuur heeft.

Op de uitwerkbijlage is een Lewisstructuur van het deeltje  $X^-$  weergegeven. Een andere grensstructuur is onvolledig weergegeven.

2p **6** Maak op de uitwerkbijlage de rechter grensstructuur van het deeltje  $X^-$  compleet.

- Geef de formele lading(en) aan.
- De C-atomen in deze grensstructuur moeten voldoen aan de oktetregel.

De gebruikte katalysator is ook werkzaam bij de omzetting van methaanzuur tot  $H_2$  en  $CO_2$  in een auto. Deze omzetting treedt alleen op bij lage pH.

2p **7** Leg uit welk van beide katalysatordeeltjes uit de figuur overwegend aanwezig is bij lage pH.