

Elektrolyse van water

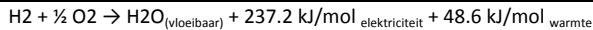


Alle energie komt uit elektriciteit bij wind, zon en powerdampen om waterstof te maken;- in de industrie kan de warmtetoevoer met stoom worden uitgevoerd.

1 MJ = 1/3,6 kWh. Voor de productie is dus minimaal nodig $(237,2 + 48,6)/3,6 = 79,4$ kWh voor 1 mol Waterstof. 1 mol waterstof weegt 2,0158 g bij 1 bar en 25°C

Het theoretisch minimum voor productie van waterstof is dus 39,4 kWh/kg. Dit noemen we ook de bovenste verbrandingswaarde. In de processen waar meer verbruikt wordt levert dat restwarmte.

Brandstofcel reactie



Bij de reactie in een brandstofcel komt maximaal 237,2 kJ/ mol vrij voor de stroomproductie. Per kg H2 is dat 33,3 kWh. Dit noemen we de onderwaarde

Hiervan moet elektriciteit worden gemaakt en dat gaat met een rendement van maximaal 83%.

Uit brandstofcellen halen we momenteel in de industrie 50 - 60% van de onderwaarde.

Kengetallen elektrolyse	Best practice industrie 2020		Mogelijke Industriële ontwikkeling		Opmerking
Onderste verbrandingswaarde (120 MJ/ kg) => kWh/kg	33,3	33,3	33,3	33,3	
Bovenste verbrandingswaarde (141,80 MJ/ kg) => kWh/kg	39,4	39,4	39,4	39,4	
Alles betrokken op 1 KW elektrisch vermogen van de electrolyzer					
Kosten electrolyzer	€ 1.800	€ 1.800	€ 900	€ 900	
Levensduur	15	15	15	15	
Kosten stacks per 7,5 jaar (jaren tellen zwaarder dan draaiuren)	€ 500	€ 500	€ 250	€ 250	
Kosten compressor met capaciteit kg waterstof/uur	€ 29.000	€ 29.000	€ 10.000	€ 10.000	
Kosten opslag 200 bar per kg	€ 200	€ 200	€ 100	€ 100	Bij massaproductie
Kosten opslag 350 bar per kg	€ 400	€ 400	€ 200	€ 200	Bij massaproductie transport
Kosten opslag 750 bar per kg	€ 1.000	€ 1.000	€ 500	€ 500	Bij massaproductie transport
Kosten fuel cell	€ 100	€ 100	€ 50	€ 50	Bij massaproductie
Stacks fuel cell elke 7,5 jaar (jaren tellen zwaarder dan draaiuren)	€ 40	€ 40	€ 35	€ 35	Bij massaproductie
Rente per jaar	4,50%	4,50%	4,50%	4,50%	Met staatssteun mogelijk naar 2%
Capex/ jaar electrolyzer	€ 167,60	€ 167,60	€ 83,80	€ 83,80	
Capex/ jaar stacks electrolyzer	€ 80,02	€ 80,02	€ 40,01	€ 40,01	
	€ 247,63	€ 247,63	€ 123,81	€ 123,81	
Rendement elektrolyse kWh/kg	58	58	50	50	Proces haalbaar geacht praktijk minimum = 44 kWh/kg
Rendement fuel-cell op onderwaarde	60%	60%	70%	70%	Proces thermodynamisch maximum = 83% (Gibbs)
Energiegebruik opslag 200 bar, kWh/kg	2,8	2,8	2,8	2,8	
Energiegebruik opslag 350 bar, kWh/kg	3,2	3,2	3,2	3,2	Onder druk brengen van waterstof prof. Sofolkis et al
Energiegebruik opslag 750 bar, kWh/kg	4,7	4,7	4,7	4,7	
Draaiuren	8000	2000	8000	2000	Vollast versus deellast
Productie per uur kg H2	0,017	0,017	0,020	0,020	
Productie per jaar kg H2	137,9	34,5	160,0	40,0	
Kosten productie €/kg h2	€ 1,80	€ 7,18	€ 0,77	€ 3,10	
Kosten compressie capaciteit/uur	500	500	200	200	
Capex compressie	€ 46,56	€ 46,56	€ 18,62	€ 18,62	
Kosten compressie €/kg	€ 0,34	€ 1,35	€ 0,12	€ 0,47	
Kosten opslag 200 bar					
Cyclus laden/ontladen (bepaalt hoeveelheid opslag) in dagen	14	14	7	7	Just in time cycli massagebruik verlaagt opslag capaciteit
Investering in opslag vereist voor nominale productie Capex opslag	€ 1.058	€ 1.058	€ 307	€ 307	Opslag is geen draaiuur variabele
Kosten opslag €/kg	€ 98,52	€ 98,52	€ 28,57	€ 28,57	
	€ 0,71	€ 2,86	€ 0,18	€ 0,71	
Energie kosten stroominput €/kWh	€ 0,04	€ 0,04	€ 0,04	€ 0,04	Dit wordt een politieke prijs
Energie kosten H2 productie €/kg	€ 2,32	€ 2,32	€ 2,00	€ 2,00	
Energie kostenkosten H2 opslag €/kg	€ 0,11	€ 0,11	€ 0,11	€ 0,11	
Energie kosten H2 productie op 200 bar	€ 2,43	€ 2,43	€ 2,11	€ 2,11	
Productie demiwater €/kg	€ 0,10	€ 0,10	€ 0,10	€ 0,10	
Capex elektrolyse + vervanging stacks	€ 1,80	€ 7,18	€ 0,77	€ 3,10	
Capex compressie en opslag	€ 1,05	€ 4,21	€ 0,29	€ 1,18	
Totale kosten H2 productie per kg	€ 5,38	€ 13,92	€ 3,28	€ 6,49	

Energie inhoud waterstof voor verwarmen kWh/kg	39,4	39,4	39,4	39,4	
Kosten € /kWh (excl. belastingen en netwerkkosten)	€ 0,14	€ 0,35	€ 0,08	€ 0,16	Belasting en btw nog toevoegen
Aardgas energie inhoud voor verwarmen (kWh/m3)	9,75	9,75	9,75	9,75	
Kosten aardgas voor consument per m3	€ 0,60	€ 0,60	€ 0,60	€ 0,60	
Kosten € /kWh verwarmen (inclusief belastingen en netwerkkosten)	€ 0,062	€ 0,062	€ 0,062	€ 0,062	
Factor prijsverhoging voor thermische energie	222%	574%	135%	268%	excl. Infra en CV aanpassingen
Waterstof invoeden in het net door er stroom van te maken met Fuel cells					
Per kg waterstof is bruikbaar kWh/kg onderwaarde	33,3	33,3	33,3	33,3	
Daar halen we elektriciteit uit kWh/kg	20,0	20,0	23,3	23,3	
Kosten per kWh elektriciteit (excl. belastingen en netwerkkosten)	€ 0,27	€ 0,70	€ 0,14	€ 0,28	APX prijspeil 2020: 4 - 6 cent/kWh
Gebruik waterstof voor transport personenvervoer compressie naar 750 bar					
Meer investering opslag voor nominale productie 750 bar	€ 4.232	€ 4.232	€ 1.227	€ 1.227	opslag is geen draaiuur variabele
Meerkosten jaarkosten opslag 750 bar	€ 394	€ 394	€ 114	€ 114	
Extra kosten opslagsysteem €/kg	€ 2,86	€ 11,43	€ 0,71	€ 2,86	
Extra energie kosten compressie van 200 - 750 bar kWh/kg	1,9	1,9	1,9	1,9	Excl. kosten koeling tankstations en excl. transport
Extra kosten opslag en compressie van 200 naar 750 bar €/kWh	€ 0,09	€ 0,35	€ 0,02	€ 0,09	
Kosten €/ kWh op 200 bar	€ 0,27	€ 0,70	€ 0,14	€ 0,28	
Finale kosten per kWh beschikbaar vooraandrijving	€ 0,36	€ 1,04	€ 0,16	€ 0,37	Excl. accijnzen en btw
Rendement accu/ aandrijving	90%	90%	90%	90%	
TTW € per kWh (excl. accijnzen en BTW)	€ 0,40	€ 1,16	€ 0,18	€ 0,41	
Kosten benzine (€/ltr)					
Kosten benzine (€/ltr)	€ 1,50	€ 1,50	€ 1,50	€ 1,50	Accijnzen gaan stijgen
Energie-inhoud (kWh/ltr)	9,1	9,1	9,1	9,1	
Kosten per kWh	€ 0,16	€ 0,16	€ 0,16	€ 0,16	
Rendement	25%	25%	25%	25%	
TTW € per kWh (incl. accijnzen en BTW)	€ 0,66	€ 0,66	€ 0,66	€ 0,66	
Kosten diesel (€/ltr)					
Kosten diesel (€/ltr)	€ 1,20	€ 1,20	€ 1,20	€ 1,20	Accijnzen gaan stijgen
Energie-inhoud (kWh/ltr)	10	10	10	10	
Kosten per kWh	€ 0,12	€ 0,12	€ 0,12	€ 0,12	
Rendement	30%	30%	30%	30%	
TTW € per kWh (incl. accijnzen en BTW)	€ 0,40	€ 0,40	€ 0,40	€ 0,40	

Notitie opslag

Opslag volume vereist: jaarproductie in kilo's gedeeld door de cycli per jaar.
Bij het verminderen van het aantal draaiuren verandert de opslag behoefte niet.
omdat de productie per uur tijdens de draaiuren wel nominaal blijft.

Notitie arbeid

Niet begroot zijn de manuren en gereedschapskosten voor onderhoud & inspectie van de installaties

Notitie Stroomprijzen

Exploitanten van windparken verkopen stroom op de beurs.
Er is geen reden waarom ze onder die prijs stroom afstaan voor waterstofproductie
Daarom moeten we uitgaan van de marktprijs