



Kompetenzen für Wasserstoffsicherheit

Erasmus+ KA202 - Strategische Partnerschaften für die
berufliche Aus- und Weiterbildung

Lerneinheit 7

Wasserstoffverbrennung

Inhalt

Block 1

1.1. Verbrennung.....	03
1.1.1. Arten der Verbrennung.....	03
1.1.2. FAQs zur Verbrennung.....	
.....	04
1.2. Die Verbrennung von Wasserstoff.....	
.....	05
1.3. Anwendungen der Wasserstoffverbrennung.....	
.....	06
1.3.1. Wasserstoffbasierte Verbrennungsmotoren.....	
.....	06
1.3.2. Eine Alternative zu Methan.....	06

Block 2

2.1. Entflammbarkeit von Wasserstoff.....	
.....	08
2.2. Die Wasserstoffflamme.....	09
2.3. Management der Wasserstoffverbrennung.....	
.....	10
2.3.1. Verhinderung der Verbrennung.....	
.....	10
2.3.2. Erkennung der Verbrennung.....	
.....	11
2.3.3. Unterdrückung der Verbrennung.....	
.....	12

Block 3

3.1. Wasserstoffverbrennungsmotoren.....	
.....	14
3.2. Wasserstoffheizkessel.....	16
3.2.1. Betrieb von Wasserstoffkesseln.....	17
Referenzen.....	19

----- BLOCK 1 -----

1.1. Verbrennung

Die Verbrennung ist ein exothermer chemischer Prozess, bei dem ein Stoff mit Sauerstoff reagiert und Wärme abgibt.

Der Ausgangsstoff wird als Brennstoff bezeichnet - er kann fest, flüssig oder gasförmig sein. Die Sauerstoffquelle wird als Oxidationsmittel bezeichnet - in der Regel handelt es sich um ein Gas (Luft). Die neuen chemischen Substanzen, die aus dem Brennstoff und dem Oxidationsmittel entstehen, werden als Abgase bezeichnet. Wenn Kohlenwasserstoffe als Brennstoff verwendet werden, ist Kohlendioxid ein übliches Abgas.

Die Aktivierungsenergie muss überwunden werden, um die Verbrennung in Gang zu setzen, aber die Wärme einer Flamme kann genug Energie liefern, um die Reaktion selbst zu erhalten.

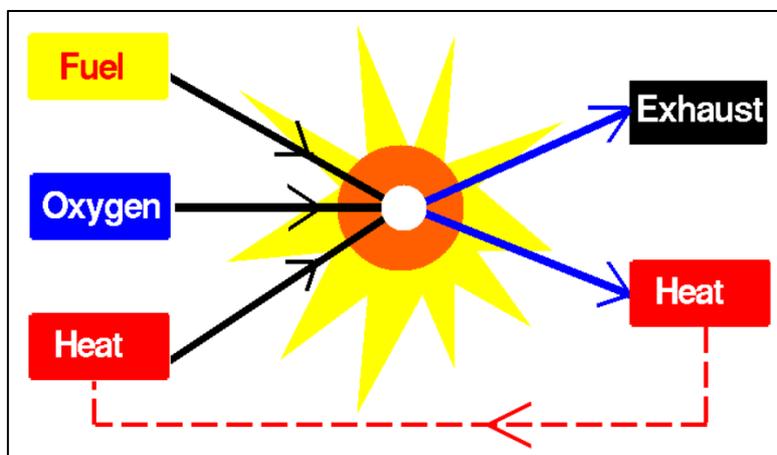


Abbildung 1. Grundschemata der Verbrennungselemente.

1.1.1. Arten der Verbrennung

Die Verbrennung kann in verschiedene Formen eingeteilt werden: Sie kann vollständig (bei unbegrenzter Sauerstoffzufuhr) oder unvollständig (bei begrenzter Zufuhr) sein. Tabelle 1 beschreibt die wichtigsten Unterschiede zwischen diesen beiden Formen.

Tabelle 1. Vollständige vs. unvollständige Verbrennung.

	COMPLETE	INKOMPLETT
Auch bekannt als	Saubere Verbrennung	Verschmutzte Verbrennung
Zustand	Unbegrenzte Versorgung mit Sauerstoff	Sauerstoff ist ein knappes Gut
Ergebnis	Kraftstoff wird vollständig verbrennen	Der Kraftstoff reagiert nicht vollständig
Nebenerzeugnisse	Wasser und CO ₂	CO und Ruß
Beispiel	Kerze	Brennendes Papier

Die Verbrennung kann ebenfalls in drei verschiedene Arten unterteilt werden:

- **Schnell:** Erzeugt eine große Menge an Wärme- und Lichtenergie, und zwar schnell. Eine Ofenflamme ist ein Beispiel für eine schnelle Verbrennung.
- **Spontan:** Benötigt keine externe Energie zum Starten - ein Stoff mit einer niedrigen Zündtemperatur erhitzt sich selbst und die Hitze kann nicht entweichen. Viele Stoffe und sogar Menschen können sich unter den richtigen Bedingungen spontan entzünden.
- **Explosiv:** Begleitet von einer plötzlichen Erzeugung von Wärme und Schall, die in extrem schnellem Tempo erfolgt. Feuerwerkskörper sind ein Beispiel für eine explosive Verbrennung.

Diskussion → Eine Diskussion in der Klasse wird empfohlen, um weitere Beispiele für die oben genannten Verbrennungsarten aufzuzeigen.

1.1.2. FAQs zur Verbrennung

Welches sind die Faktoren, die den Verbrennungsprozess unterstützen?

1. Ausreichende Versorgung mit Sauerstoff;

2. Ein Brennstoff, der bei der Verbrennung verbrennt;
3. Energie, die dazu beiträgt, dass der Kraftstoff den Zündpunkt erreicht.

Was ist die Entzündungstemperatur?

Er ist die Temperatur, bei der der Brennstoff zu brennen beginnt. Jeder Stoff hat einen anderen Entzündungspunkt.

Was sind brennbare Stoffe?

Es handelt sich um Stoffe mit sehr niedrigen Zündtemperaturen, die sorgfältig gelagert werden müssen.

1.2. Die Verbrennung von Wasserstoff

Bei der Verbrennung von Wasserstoff reagiert dieser mit Sauerstoff unter Freisetzung von Energie gemäß der Gleichung zu Wasser:



Diese Reaktion wird in der Raumfahrt häufig zum Antrieb von Raketentriebwerken verwendet, da Wasserstoff den höchsten spezifischen Impuls aller bekannten Treibstoffe liefert.

Bei der Verbrennung von Wasserstoff entstehen keine Kohlenstoffemissionen. Bei der Verbrennung an der Luft entstehen jedoch Stickoxide (**NOx**) aufgrund des in der Luft vorhandenen Stickstoffs.

NOx = the sum of NO and NO₂

Beachten Sie, dass dies nicht nur für die Verbrennung von Wasserstoff gilt, sondern auch für die Verbrennung fossiler Brennstoffe. NO₂ ist ein wichtiger Luftschadstoff und ein Vorläufer anderer bedenklicher Schadstoffe wie Feinstaub.

Eine Minimierung der NO_x-Emissionen von Wasserstoffmotoren und -kesseln ist durch die Steuerung bestimmter Verbrennungsbedingungen möglich, und auch eine Nachbehandlung und Beseitigung von NO_x ist möglich. Diese Strategien erhöhen jedoch ausnahmslos die Kosten und die Komplexität von Wasserstoffverbrennungssystemen.

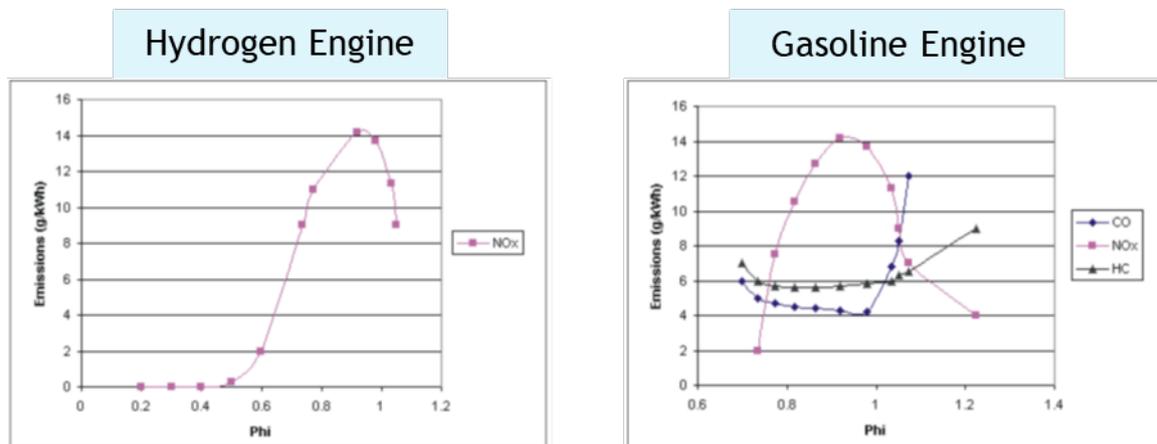


Abbildung 2. Vergleich der Emissionen eines Wasserstoffverbrennungsmotors mit denen eines herkömmlichen Benzinmotors.

[Quelle: https://www1.eere.energy.gov/hydrogenandfuelcells/tech_validation/pdfs/fcm03r0.pdf]

Die Verbrennung von Wasserstoff ist eine Möglichkeit, Energie aus Wasserstoff zu gewinnen. Dies unterscheidet sich jedoch von dem elektrochemischen Prozess, der in einer Brennstoffzelle abläuft, die ebenfalls Energie aus Wasserstoff erzeugt.

Diskussion → Eine Diskussion in der Klasse wird empfohlen, um die wichtigsten Unterschiede und Gemeinsamkeiten zwischen Brennstoffzellensystemen und Wasserstoffverbrennungssystemen herauszustellen.

1.3. Anwendungen der Wasserstoffverbrennung

Einige Beispiele für Anwendungen der Wasserstoffverbrennung, die im weiteren Verlauf des Kurses näher erläutert werden, sind:

1.3.2. Wasserstoffbasierte Verbrennungsmotoren

Sie funktionieren ganz ähnlich wie herkömmliche Ottomotoren, sind aber so modifiziert, dass sie Wasserstoff als Verbrennungstoff verwenden.

Empfohlene Lektüre → Wie Wasserstoffverbrennungsmotoren zur Emissionsfreiheit beitragen können.

<https://www.mckinsey.com/industries/automotive-and-assembly/our-insights/how-hydrogen-combustion-engines-can-contribute-to-zero-emissions>

1.3.3. Eine Alternative zu Methan

Wasserstoff kann verbrannt und für die gleichen Anwendungen wie fossiles Erdgas verwendet werden, z. B. zum Heizen von Industrieanlagen, zum Heizen und Kochen von Haushalten sowie zur Verbrennung in Gasturbinen.

Wasserstoff kann in vielen Arten von bestehenden Pipelines mit fossilem Erdgas gemischt werden, um es zu ergänzen oder letztendlich ganz zu ersetzen. Einige Projekte zur Einspeisung in das Erdgasnetz in der ganzen Welt umfassen:

- ✓ H21 Leeds City Gate (Vereinigtes Königreich), ein Plan für ein 100%iges Wasserstoffnetz für eine britische Stadt, der technisch machbar und wirtschaftlich tragfähig ist. Weitere Informationen unter <https://h21.green/projects/h21-leeds-city-gate/>
- ✓ HyDeploy (Vereinigtes Königreich), das weltweit erste Projekt zur Einspeisung von Wasserstoff ins Netz. Weitere Informationen unter <https://hydeploy.co.uk>
- ✓ Evolugen/Gazifère (Kanada), ein Projekt zur grünen Wasserstoffeinspritzung in Nordamerika. Weitere Informationen unter <https://evolugen.com/evolugen-and-gazifere-announce-one-of-canadas-largest-green-hydrogen-injection-projects-to-be-located-in-quebec/>

Empfohlene Lektüre → Zero Emission Hydrogen Turbine Center: Ein geschlossener Kreislauf für die Energiezukunft. <https://www.powerengineeringint.com/hydrogen/zero-emission-hydrogen-turbine-center-a-closed-loop-of-the-energy-future/>

KONTINUIERLICHE BEWERTUNG 1: QUIZ

----- Ende von Block 1 -----

----- BLOCK 2 -----

2.1. Entflammbarkeit von Wasserstoff

Entflammbarkeit ist die Leichtigkeit, mit der ein brennbarer Stoff entzündet werden kann. Wasserstoff hat einen sehr breiten Entflammbarkeitsbereich: zwischen 4 % und 74 % Konzentration in Luft und 4 % bis 94 % Konzentration in reinem Sauerstoff.

Das bedeutet, dass er entflammbar ist, wenn er auch nur in kleinen Mengen mit Luft gemischt wird, und dass es sehr wichtig ist, zu verhindern, dass sich Luft oder Sauerstoff in engen Räumen mit Wasserstoff vermischen. In Tabelle 2 und Abbildung 3 wird die Entflammbarkeit von Wasserstoff und anderen Brennstoffen verglichen.

Tabelle 2. Entflammbarkeitsbereiche von Wasserstoff und anderen Brennstoffen.

Kraftstoff	Entflammbarkeitsbereich in Luft (%)
Wasserstoff	4.0 - 74
Methan	5.3 - 15
Propan	2.2 - 9.6
Methanol	6.0 - 36
Benzin	1.0 - 7.6
Diesel	0.6 - 5.5

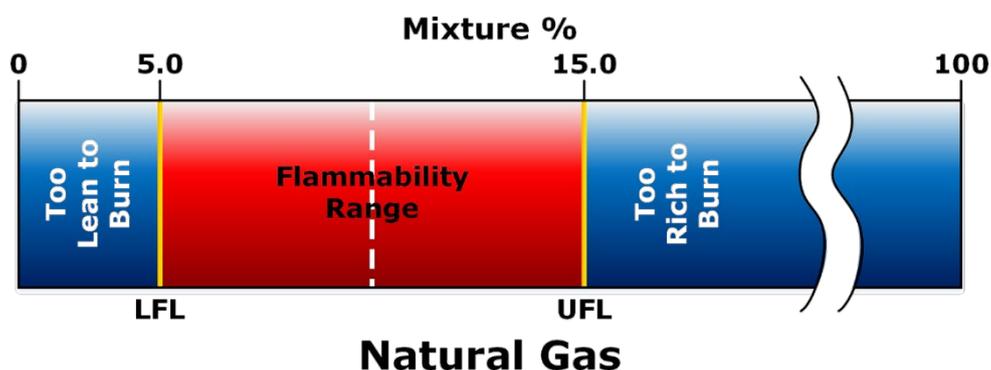


Abbildung 3. Der Entflammbarkeitsbereich von Erdgas (Methan), dargestellt zum Vergleich.

Die NFPA 704 ist das "Standardsystem zur Identifizierung der Gefahren von Materialien für den Katastrophenschutz". Wasserstoff hat nach NFPA 704 die höchste Einstufung von **4** auf der Entflammbarkeitsskala, jedoch die niedrigste Einstufung von **0** für die angeborene Gefahr der Reaktivität oder Toxizität.

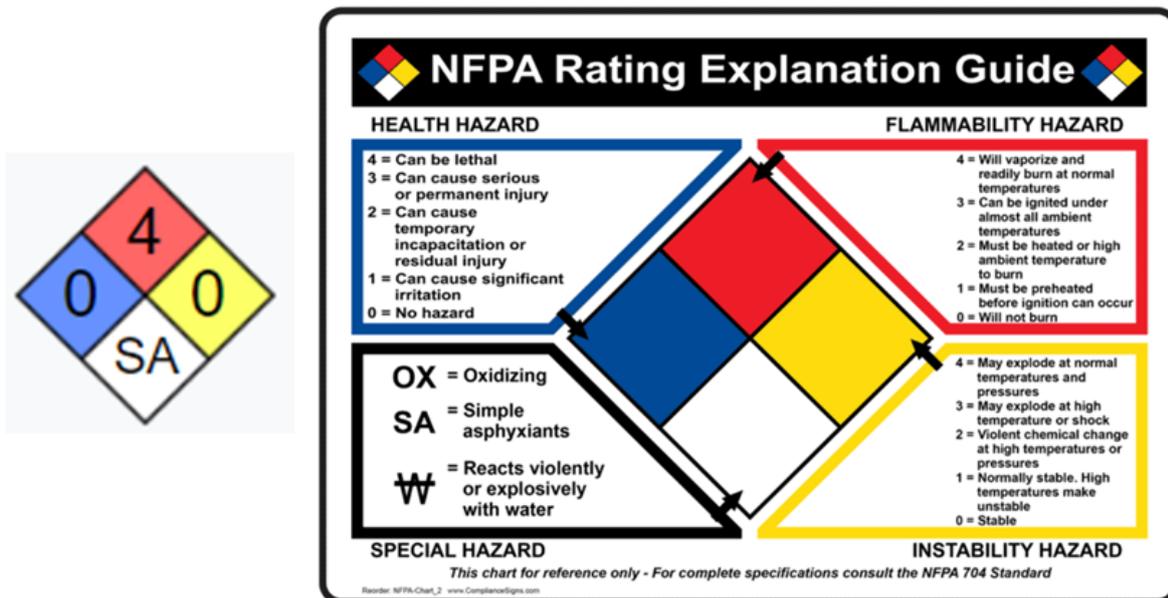


Abbildung 4. Feuerdiamant des Wasserstoffs (links) und detaillierte Erklärung eines Feuerdiamanten (rechts).
 [Quelle: <https://myusf.usfca.edu/environmental-health-safety/nfpa-hazard-diamond/>]

Gemäß Abbildung 4 bedeutet die Entflammbarkeit von Wasserstoff, dass er "bei normalem Atmosphärendruck und normaler Temperatur schnell oder vollständig verdampft oder leicht in der Luft dispergiert wird und leicht brennt". Die Einstufung als gesundheitsschädlich besagt, dass Wasserstoff "keine Gefahr für die Gesundheit darstellt und keine Vorsichtsmaßnahmen erforderlich sind", und die Einstufung der Instabilität/Reaktivität lautet "normalerweise stabil".

Ein besonderer Hinweis: Wasserstoff gilt als einfaches erstickendes Gas, das die normale Sauerstoffkonzentration in der Atemluft verringern/verdrängen kann. Dies ist eine Standardklassifizierung für viele Gase, und Wasserstoff ist in diesem Sinne nicht gefährlich, es sei denn, es handelt sich um erhöhte Konzentrationen.

2.2. Die Wasserstoffflamme

Wasserstoff brennt mit einer blassblauen Flamme, die bei Tageslicht fast unsichtbar ist, obwohl die Flamme gelb erscheinen kann, wenn es in der Luft Verunreinigungen wie Staub gibt. Eine reine Wasserstoffflamme erzeugt keinen Rauch, und die Flammentemperatur ist relativ hoch - Tabelle 3 vergleicht die Flammentemperatur von Wasserstoff mit anderen Brennstoffen.

Tabelle 3. Vergleich der Flammentemperaturen.

Kraftstoff	Flamme Temperatur in der Luft
Wasserstoff	2,045 °C
Methan	1,957 °C
Propan	1,980 °C
Kerze	1,000 °C

Wasserstoffflammen haben eine geringe Strahlungswärme, was bedeutet, dass Sie möglicherweise keine Wärme spüren, bis Sie sehr nahe an (oder in) der Flamme sind. Ein Video veranschaulicht die Eigenschaften einer Wasserstoffflamme besser, indem es eine Propanflamme als Vergleichsmittel verwendet.

Video → Wasserstoffsicherheit: Demonstration der Flammenausbreitung von Wasserstoff
<https://www.youtube.com/watch?v=r-8H5u4YzuY>

Laborexperiment → An dieser Stelle wird ein einfaches Laborexperiment empfohlen, damit sich die Lernenden eine Wasserstoffflamme vorstellen und sie mit der Flamme anderer gängiger Brennstoffe vergleichen können, wobei die relevanten Sicherheitsaspekte hervorgehoben werden.

2.3. Management der Wasserstoffverbrennung

Das Management und die Sicherheit der Wasserstoffverbrennung besteht aus drei Schlüsselbereichen: Verhinderung, Erkennung und Unterdrückung (unerwünschter/unkontrollierter) Verbrennung.

2.3.1. Verhinderung der Verbrennung

Da Wasserstoff einen sehr weiten Entflammbarkeitsbereich und eine niedrige Zündenergie aufweist, sollte man davon ausgehen, dass jede Freisetzung von Wasserstoff wahrscheinlich zu einem Brand führt.

Eine unerwünschte Verbrennung (Feuer) lässt sich am besten dadurch verhindern, dass man eines oder mehrere der drei Schlüsselemente Wärme, Brennstoff und Sauerstoff entfernt. Beim Umgang mit Wasserstoff ist es in der Regel am besten, die Wärme zu kontrollieren und vom Brennstoff fernzuhalten, um eine unerwünschte Verbrennung zu verhindern. Häufige Wärmequellen sind:

- **Anlagen und Ausrüstungen:** Ein geplantes Wartungsprogramm sollte dazu dienen, die Anlagen und Ausrüstungen sauber, gewartet und belüftet zu halten.
- **Heißarbeiten:** Arbeiten wie Schweißen und Löten müssen einem strengen Genehmigungssystem unterliegen, das Schutzkleidung, Funkenkontrolle und Routinekontrollen umfasst.
- **Elektrische Geräte:** Die Installation und Wartung von elektrischen Geräten und Armaturen sollte immer von qualifizierten Elektrofachkräften durchgeführt werden.
- **Rauchen:** Es müssen Nichtraucher Schilder aufgestellt und durchgesetzt werden.
- **Brandstiftung:** Auch die Möglichkeit vorsätzlich gelegter Brände sollte in die Risikobewertung einbezogen werden.

2.3.2. Erkennung der Verbrennung

Da Wasserstoff farb- und geruchlos ist, mit einer fast unsichtbaren Flamme brennt und relativ wenig Strahlungswärme abgibt, ist ein Wasserstoffbrand oft schwer zu erkennen.

Der Einsatz von Flammendetektoren (wie dem in Abbildung 5 gezeigten) und Wärmebildkameras ist der beste Weg, um festzustellen, ob Flammen vorhanden sind. Stehen diese Hilfsmittel nicht zur Verfügung, sollte man sich einem vermuteten Leck vorsichtig nähern und nach Wärmewellen suchen. Ein brennbarer Gegenstand wie ein Besen oder Staubpartikel kann ebenfalls vorsichtig in die vermutete Flamme gehalten werden, um deren Vorhandensein zu erkennen.



Abbildung 5. Der Honeywell FSL100 Flammenwächter.

[Quelle: <https://sps.honeywell.com/us/en/products/safety/gas-and-flame-detection/industrial-fixed/fsl100-flame-detectors>]

2.3.3. Unterdrückung der Verbrennung

Obwohl Wasserstoffbrände keinen Rauch erzeugen, kann bei der Verbrennung von brennbaren Materialien in der Nähe Rauch entstehen, dessen Einatmung bei einem Wasserstoffbrand eine Gefahr darstellen kann.

Wasserstoffbrände können durch Strahlungs- und/oder Konvektionswärme nahe gelegene Gegenstände entzünden. In der Regel wird ein Wasserstoffbrand erst gelöscht, wenn die Wasserstoffzufuhr unterbrochen oder erschöpft ist, und es besteht immer die Gefahr einer erneuten Entzündung und sogar einer Explosion.

Die beste Vorgehensweise bei einem Wasserstoffbrand besteht darin, ihn unter Kontrolle brennen zu lassen, bis die Zufuhr abgeschaltet wurde, da unverbrannter gasförmiger Wasserstoff zu einer Explosion führen kann. Zu den besten Praktiken gehören die folgenden Maßnahmen:

1. Aus sicherer Entfernung oder durch Fernsteuerung den Wasserstofffluss durch Schließen der Absperrung oder des Absperrventils unterbrechen;
2. Verwenden Sie Wassersprays, um eventuelle Sekundärbrände zu löschen und eine Ausbreitung des Feuers zu verhindern;
3. Versuchen Sie nicht, eine brennende Flasche zu bewegen;
4. Kohlendioxid kann bei einem Wasserstoffbrand eingesetzt werden, aber Trockenchemikalien funktionieren besser, da sie die Flammen besser sichtbar machen.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass Wasserstoff nicht mehr oder weniger gefährlich ist als andere brennbare Kraftstoffe, aber besondere Sicherheitsaspekte aufweist. Weitere Informationen finden Sie unter: <https://h2tools.org/bestpractices>.

“Hydrogen safety concerns are not cause for alarm; they simply are different than those we are accustomed to with gasoline or natural gas.”

–Air Products and Chemicals, Inc.

Diskussion → Es wird empfohlen, in der Klasse eine Diskussion über den Umgang mit der Wasserstoffverbrennung zu führen und dabei Besonderheiten und allgemeine Aspekte hervorzuheben sowie einen Vergleich mit dem eventuell vorhandenen Wissen der Lernenden über die Verbrennung anderer Brennstoffe anzustellen.

KONTINUIERLICHE BEWERTUNG 2: QUIZ

----- **Ende von Block 2** -----

----- BLOCK 3 -----

3.1. Wasserstoff-Verbrennungsmotoren

Wasserstoffverbrennungsmotoren (Hydrogen ICEs) sind nahezu identisch mit herkömmlichen Ottomotoren. In diesem Fall wird zur Schuberzeugung gasförmiger oder flüssiger Wasserstoff anstelle eines fossilen Brennstoffs verbrannt.



Abbildung 6. Ein Wasserstoff-Verbrennungsmotor.

[Quelle: https://www1.eere.energy.gov/hydrogenandfuelcells/tech_validation/pdfs/fcm03r0.pdf]

Im Allgemeinen sind Brennstoffzellen bei niedrigen Lasten am effizientesten, während Verbrennungsmotoren bei hohen Lasten am effizientesten sind, so dass beide Technologien für unterschiedliche Anwendungen erfolgreich sein können.

Wasserstoffverbrennungsmotoren haben den gleichen Vier-Takt-Verbrennungszyklus wie Benzinmotoren, bestehend aus Ansaugung, Verdichtung, Zündung und Auspuff, und erzeugen eine Drehbewegung. Dies ist in Abbildung 7 dargestellt.

1. **Ansaugung:** Luft und Kraftstoff werden gemischt und in den Zylinder gesaugt;
2. **Verdichtung:** Das Gemisch wird in der Kammer verdichtet;
3. **Zündung:** Das komprimierte Gemisch wird abgefeuert und gezündet, wodurch der Kolben wieder nach unten gedrückt wird;
4. **Auspuff:** Der Auspuff verlässt den Zylinder, und der Zyklus ist beendet.

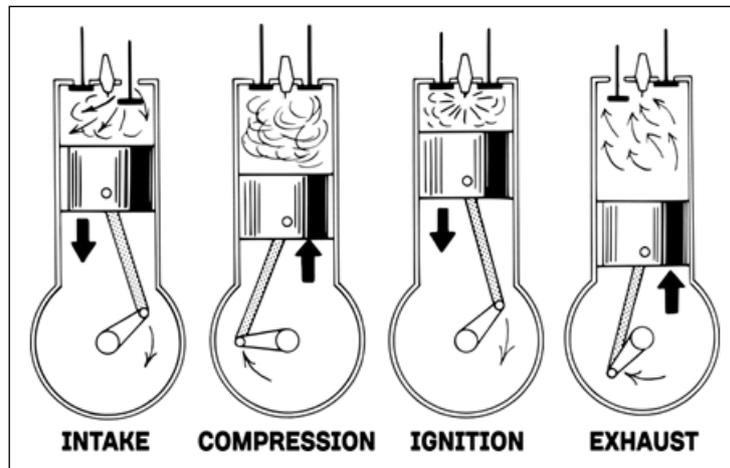


Abbildung 7. Der Standard-Viertakt-Verbrennungszyklus eines Motors.

Was die Verbrennungseigenschaften von Wasserstoff betrifft, so ist sein breites Spektrum an Entflammbarkeit ein Vorteil: Es bedeutet, dass Wasserstoffverbrennungsmotoren leicht zu starten sind, einen geringeren Kraftstoffverbrauch haben und eine vollständigere Verbrennung aufweisen. Außerdem ist die Zündenergie von Wasserstoff um eine Größenordnung geringer als die von Benzin, was zu mageren Gemischen und einer schnellen Zündung führt. Dies kann jedoch zu einer vorzeitigen Zündung führen, ein bekanntes Problem von Wasserstoff-ICE. Weitere Besonderheiten im Zusammenhang mit den Verbrennungseigenschaften von Wasserstoff sind:

- Die **Selbstentzündungstemperatur** von Wasserstoff ist relativ hoch und erfordert ein anderes Verdichtungsverhältnis;
- Die hohe **Flammgeschwindigkeit** von Wasserstoff bedeutet, dass sich Wasserstoffmotoren einem thermodynamisch idealen Zyklus annähern können;
- Die hohe **Diffusionsfähigkeit** von Wasserstoff (Fähigkeit, sich in der Luft zu verteilen) sorgt für ein gleichmäßigeres Gemisch, ist aber ein Nachteil, wenn ein Leck entsteht;
- Die **geringe Dichte** von Wasserstoff stellt eine Herausforderung für die Kraftstoffspeicherung und die geringere Energiedichte des Kraftstoff-Luft-Gemischs dar.

Auch die Sicherheitsaspekte von Fahrzeugen mit Wasserstoffverbrennungsmotor weisen einige Besonderheiten auf. So müssen beispielsweise geschlossene Räume (z. B. Garagen) und die Belüftung sowie das Aufprallverhalten beachtet werden.

Empfohlene Lektüre → Eine nützliche Veröffentlichung von H2 tools über Sicherheitsaspekte von wasserstoffbetriebenen Fahrzeugen mit Verbrennungsmotoren.
<https://h2tools.org/sites/default/files/2019-09/310002.pdf>

3.2. Wasserstoffkessel

Es wird erwartet, dass in naher Zukunft in Ländern wie dem Vereinigten Königreich und Irland Heizkessel, die zu 100 % mit Wasserstoff betrieben werden können, auf dem Markt erhältlich sein werden. Die meisten modernen Heizkessel - und andere Gasgeräte, die wir heute benutzen - können jedoch bereits mit einer Mischung von bis zu 20 % Wasserstoff betrieben werden. Zu den Unternehmen, die Gasgeräte herstellen und möglicherweise bald Wasserstoffsysteme anbieten, gehören Worcester (Teil der Bosch-Gruppe), Viessmann und Baxi.



Abbildung 8. Das Konzept eines 100%igen Wasserstoffkessels.

Eine der am häufigsten gestellten Fragen - und eine Quelle der Besorgnis - im Zusammenhang mit Wasserstoffheizkesseln sind ihre Kosten. Die Hersteller gehen jedoch davon aus, dass sie nicht mehr kosten werden als das Erdgasäquivalent: etwa zwischen 600 £ (700 €) für ein Budget-Modell und 2.000 £ (2.400 €) für ein Premium-Modell. Auch der Installationsprozess dürfte dem von Erdgaskesseln sehr ähnlich sein, und es werden ähnliche Kosten prognostiziert.

In vielen Ländern werden derzeit Projekte und Programme durchgeführt, die die Verwendung von Wasserstoff als Brennstoff für Haushalts- und Industriegeräte untersuchen. Im Rahmen des HyDeploy-Programms an der Universität Keele in England werden beispielsweise die Auswirkungen einer Mischung von Wasserstoff und Erdgas getestet. Im Rahmen des Projekts wurde zum ersten Mal Wasserstoff in einen Teil des britischen Erdgasnetzes eingespeist, und

für die nahe Zukunft sind größere Demonstrationen geplant. Weitere Informationen finden Sie unter www.hydeploy.co.uk.

In ähnlicher Weise testet auch das neue Innovationszentrum von Gas Networks Ireland (GNI) in Dublin verschiedene Mischungen von Wasserstoff und Methan (bis zu 10 % Wasserstoff) und ihre Anwendung in Geräten wie Heizkesseln, Öfen und Gaskaminen. Weitere Informationen finden Sie unter <https://www.gasnetworks.ie>.

3.2.1. Betrieb von Wasserstoffkesseln

Obwohl der Gesamtprozess eines Wasserstoffboilers derselbe ist wie bei einem herkömmlichen Boiler, sind einige Änderungen erforderlich. Eine schematische Darstellung der Hauptkomponenten ist in Abbildung 9 zu sehen.

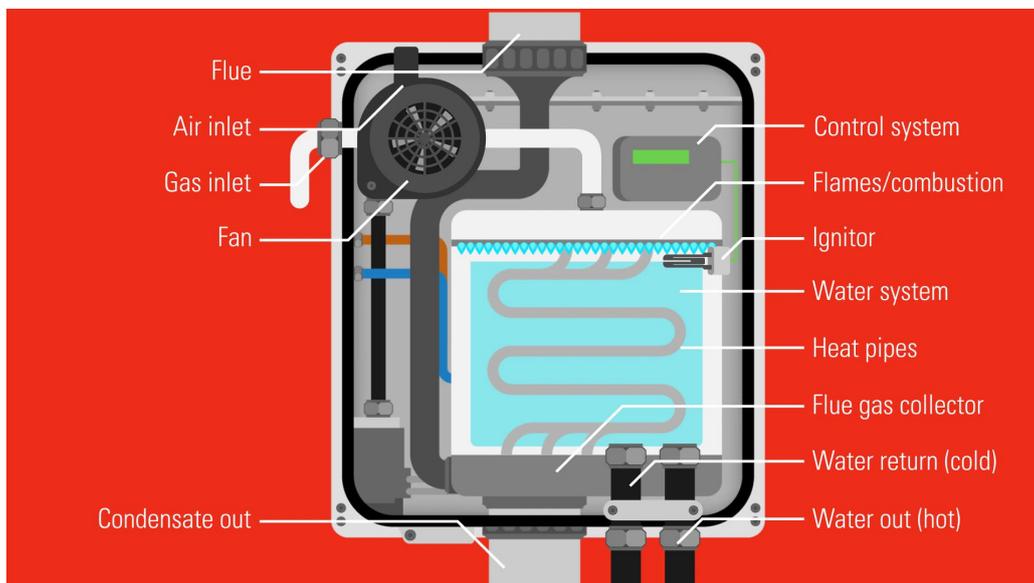


Abbildung 9. Hauptkomponenten eines Wasserstoffkessels.
[Quelle: <https://youtu.be/241Ltw7B8ZA>]

Der Betrieb eines Wasserstoffkessels umfasst vier Schritte:

1) Wasserstoff und Sauerstoff gelangen in den Kessel.

- ✓ Wasserstoff (aus der Hauptzufuhr) und Sauerstoff (aus der Luft) gelangen durch Einlässe mit Ventilen, die ihre Menge regeln.
- ✓ Die Gasmenge hat Einfluss auf die Größe der Flamme.

2) Die beiden Gase werden gemischt und verbrannt.

- ✓ Wasserstoff und Sauerstoff werden miteinander vermischt und in einem katalytischen Brenner verbrannt.
- ✓ Aufgrund der Entflammbarkeit von Wasserstoff müssen Brenner speziell konstruiert sein, um die Flammen zu begrenzen.
- ✓ Außerdem ist ein Flammendetektor erforderlich, da Wasserstoffflammen nahezu unsichtbar sind.

3) Das heiße Gemisch gelangt in den Wärmetauscher.

- ✓ Der Wärmetauscher besteht aus mehreren Rohren, durch die die heißen Gase geleitet werden und die von kaltem Wasser umgeben sind.
- ✓ Dieses Wasser wird nach der Erwärmung zu den Wasserhähnen und Heizungsanlagen geleitet.

4) Die Nebenprodukte verlassen das System.

- ✓ Das direkte Nebenprodukt der Wasserstoffverbrennung (Wasser) entweicht aus dem System.
- ✓ Die heißen Rauchgase (Wasserstoff und Sauerstoff) entweichen ebenfalls.
- ✓ Die geringe Menge an NO_x, die bei der Verbrennung entsteht, kann auch über den Schornstein aus dem System austreten.

Video → Wie ein Wasserstoffkessel funktioniert (von Viessmann).
<https://youtu.be/241Ltw7B8ZA>.

Diskussion → Es wird empfohlen, in der Klasse eine Diskussion über die zusätzlichen Komponenten eines Wasserstoffkessels und über allgemeine Sicherheitsüberlegungen zu führen.

KONTINUIERLICHE BEWERTUNG 2: HERSTELLUNG EINES DIAGRAMMS FÜR EINEN WASSERSTOFFKESSEL

----- Ende von Block 3 -----

Referenzen

Bewährte Praktiken - Wasserstoff-Werkzeuge. Verfügbar unter:
<https://h2tools.org/bestpractices>.

Verwendung von Wasserstoff in Verbrennungsmotoren. rep. Verfügbar unter:
https://www1.eere.energy.gov/hydrogenandfuelcells/tech_validation/pdfs/fcm03r0.pdf.

NFPA Hazard Diamond. Verfügbar unter: <https://myusf.usfca.edu/environmental-health-safety/nfpa-hazard-diamond>.

Viessmann. Verfügbar unter: <https://www.viessmann.co.uk>.

Auf Abbildungen und Tabellen wird gegebenenfalls in der Überschrift verwiesen.